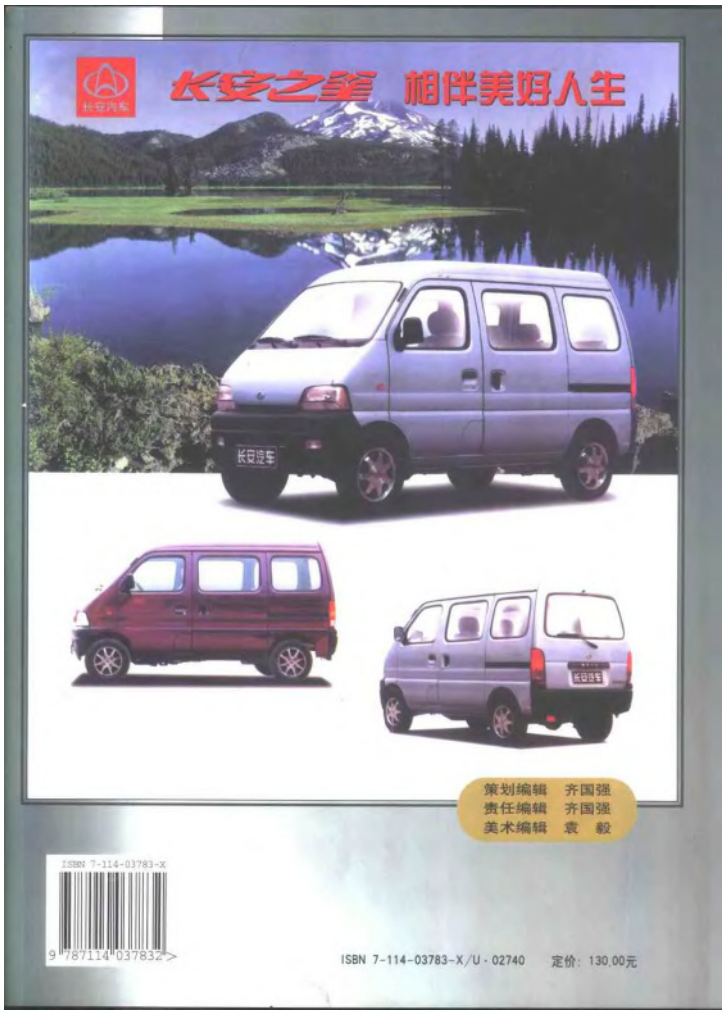


汽车论坛 http://www.qclt.com



策划编辑 齐国强
责任编辑 齐国强
美术编辑 袁 毅

ISBN 7-114-03783-x
9 787114 037832 >

ISBN 7-114-03783-X/U·02740 定价：130.00元

汽车论坛 http://www.qclt.com

QICHE GONGCHENG SHOUCE

汽车工程手册

制造篇

《汽车工程手册》编辑委员会

人民交通出版社

汽车论坛 http://www.qclt.com

内 容 提 要

本书是由汽车界上千名技术专家、教授花费多年精力编写的我国汽车行业第一部工具书。本套书共分五册——基础篇、设计篇、试验篇、制造篇、摩托车篇。

本册为制造篇，共分七章，分别是材料、加工技术、零部件加工、汽车装配、生产管理系统、质量管理和可靠性。

图书在版编目(CIP)数据

汽车工程手册.制造篇/《汽车工程手册》编辑委员会.
北京:人民交通出版社，2001.5
ISBN 7-114-03783-X

Ⅰ.汽… Ⅱ.汽… Ⅲ.①汽车工程－技术手册
②汽车制造－技术手册 Ⅳ.U46-62

中国版本图书馆CIP数据核字（2001）第029186号

汽车工程手册
制造篇

《汽车工程手册》编辑委员会
版式设计:刘晓方 责任校对:张 莹 责任印制:张 凯
人民交通出版社出版发行
（100013 北京和平里东街10号）
各地新华书店经销
深圳当纳利旭日印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:57 字数:1930千

2001年5月 第1版
2001年5月 第1版 第1次印刷
印数:0001—5000册 定价:130.00元

ISBN 7-114-03783-X
U·02740

汽车论坛 http://www.qclt.com

序　言

由汽车界上千名技术专家、教授花费四年多的精力编写的我国汽车行业第一部工程技术工具书——《汽车工程手册》终于在世纪之交问世了，这是我国汽车工业发展中的一项重大技术基础建设。

我国汽车工业从无到有、从小到大历经四十余年，产量已居世界第九位，但在产品技术开发水平方面还处于落后状态。面对国际化市场的严峻挑战，唯一的出路只能是加强开发能力建设，提高工程技术人员的创新能力。一部先进、实用、系统、科学，既总结我们自己的经验，结合我国实际，又广泛吸收国外先进技术并具前瞻性的技术工具书，对于提高我国汽车行业技术水平具有格外重要的意义。

希望这部手册不仅能为工程技术人员、高等院校师生所欢迎，也能对汽车界的经营、管理人员有所帮助，使读者系统地了解当前汽车工业国内外技术水平和发展方向。

这部手册的编著和出版既反映了汽车行业的期盼，又凝聚了主编单位、参编单位以及全行业的心血。这部近1000万字巨著的高质量顺利完成也显示了我国汽车行业的技术力量与协同能力。在此我谨代表编审委员会和国家机械工业局向参加编审工作的全体工作人员致以衷心的问候，并向支持本手册编著出版工作的各个单位致以诚挚的感谢。

作为中国汽车行业第一部工程手册，在编写过程中由于多方面原因，不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。希望这部手册今后还能不断地修订完善，作为全行业的一项重要的基础性工作持续下去。

2000年3月

汽车论坛　http://www.qclt.com

《汽车工程手册》编审委员会

主任委员：张小虞

委　　员：（按姓氏笔划为序）

叶　平　田　炜　朱正林　安庆衡　吕振华

任晓常　孙　敏　吴　云　陈　林　陈永强

陈铁群　何世斌　张兴业　张应吉　宋廷光

李家本　赵　航　徐仁根　徐兴尧　郭孔辉

《汽车工程手册》编辑委员会

主任委员：冯　超

副主任委员：邬惠乐

委　　员：余志生　康展权　顾柏良　姚贵升　李德宽

《汽车工程手册》编辑办公室

主　　任：高和生

委　　员：武兆迁　高　瑛

汽车论坛　http://www.qclt.com

《汽车工程手册》主要编写单位

企　　业： 中国第一汽车集团公司
东风汽车公司
上海汽车工业(集团)总公司
跃进汽车集团公司
中国汽车工业总公司
天津汽车工业(集团)有限公司

高等院校： 清华大学
原吉林工业大学
原武汉汽车工业大学
同济大学
江苏理工大学
原西安公路交通大学

研究院所： 中国汽车技术研究中心
长春汽车研究所
东风汽车工程研究院
重庆汽车研究所
南京汽车研究所
上海汽车技术中心
天津摩托车技术中心
重型汽车集团公司技术中心
长沙汽车电器研究所
长春汽车材料研究所
机械部第九设计研究院
机械部汽车规划设计(天津)研究院

汽车论坛　http://www.qclt.com

《汽车工程手册》编辑说明

编著出版一部中国自己的汽车工程手册的酝酿工作由来已久。1995年6月，机械部汽车司以机汽科[1995]093号文指示立项编辑出版中国汽车工程手册，将其列为“九五”汽车行业重点课题。在批文中提出：“手册的编辑出版是我国汽车行业的一项十分重要的基础性工作，对贯彻汽车工业产业政策，促进我国汽车工业的自主开发，提高行业整体技术水平具有重要意义。”

1995年7月召开了有21个汽车行业主要企事业单位和高校代表参加的汽车工程手册筹备工作会议，与会代表一致表示积极支持“手册”的编辑出版工作。人民交通出版社参与了筹备工作并承担出版任务。

经过近一年时间的筹备，1996年8月在北戴河召开了“汽车工程手册第一次编撰工作会议”。会上讨论通过了包括“汽车工程手册编写方针、要求和措施”、“汽车工程手册编写大纲及控制字数”、“汽车工程手册组织机构”、“汽车工程手册主要编写单位”等文件，确定了“手册”的主要结构、各篇的设置和主要内容、控制字数，特别是确定了各篇的主编、副主编；明确提出了“手册”的目标是为形成自主开发能力和加速科技进步服务。

由于组织和经费等原因，在1997年到1998年初的一年多时间内，“手册”的编写工作受到了较大的影响。1998年6月在北京召开了有国家机械局领导参加的“汽车工程手册第二次编撰工作会议”。会议再次强调：“编辑出版一套技术新、内容实用、使用方便的汽车工程手册是全行业的一件大事，具有十分重要的意义”；要求抓紧编辑出版工作，一定要在“九五”期间，即本世纪末与读者见面。这次会议成了一次再动员会，大大推进了“手册”编撰工作的进展。又经过了约两年的努力，于2000年上半年完成了全部稿件的初稿工作。

为了达到上述目标，我们用以下四个方面来概括对“手册”内容的要求，即：先进；实用；系统；科学。

先进：要能反映、体现当代汽车技术发展的现状，反映先进实用的技术发展趋势，要有高、新的技术含量。

实用：要能有助于形成自主开发能力，有助于提高技术创新能力，有助于提高行业的整体技术水平。总之，是要立足于对中国汽车工业有用、好用，适用。

系统：这是一部大型工具书，要全面系统地包含汽车技术的主要方面，五册书之间要有合理的联系，使读者通过这部手册能掌握全面情况。

科学：在内容上和形式上都要体现科学的编著。要有手册的特点，内容简洁，便于使用。所引用的资料数据尽量可靠、权威。

汽车工程手册分为基础篇、设计篇、试验篇、制造篇(含材料)和摩托车篇共五册。在编撰工作中贯彻了以下方针：

(1)依靠行业力量，集体编写：

这是“手册”编撰中的主要原则。在组织编写队伍时，强调了产、学、研各个领域专家相结合。特别注意请长期处在第一线，有丰富实践经验的专家参加编写。集体编写的重要意义还

汽车论坛 http://www.qclt.com

在于“手册”的著作权为行业所有，这样也就可能依靠全行业的力量继续修订、更新。参加本“手册”五篇编著审校工作的专家总共近1000人。

(2)实行各篇主编负责制。“手册”编撰工作的组织结构为：

编审委员会→编辑委员会→各篇编委会→各章负责人→参加编写的专家

各篇编委会由主编、主审和数名副主编组成。主编即为编委会主任，负责该篇的质量和进度，包括决定该篇具体结构和各章的编写人选，对稿件的完成情况和质量负责。为明确文责，采用在各章、节、段后将主要编著人员署名的方式。参编单位则统一列于手册各篇前页。

编写中对各篇之间的相关章节进行了必要的协调，同时注意了保持各篇的相对独立性和系统性。

(3)增加行业专家审稿程序：

除了正常的校、审、定稿程序外，为确保质量，在每篇稿件完成一审校样后，由编审委员会主持，组织行业中未参加“手册”编著工作的该领域专家审稿，并召开审稿会，对稿件的先进性、实用性、系统性和科学性提出评价和修改意见，各篇编委会据此再对稿件进行必要的修改完善。

在整个编写过程中，我们一直探索的几个问题是：如何结合我国的实际情况，做好先进性与实用性的结合；如何编出“手册”应有的特点；如何既能保证统一的要求又要允许不可避免的作者风格的差异；以及如何在时间、条件的限制下处理好“从无到有”与“精益求精”的关系。

“手册”的编著和出版是我国汽车界全行业共同努力的结果。几年来，从酝酿筹备、编著校审直到付印出版都是在行业各单位的关心和支持下才得以完成。作为行业“九五”重点课题，这项工作自始至终是在机械部汽车司(现为国家机械局)的直接领导和支持下进行的。许多大企业以广告费的方式给予了至关重要的经济支持。特别是担任主编、副主编和参加编审工作的上千名专家教授，其中许多人已经退休，为本书做了大量艰辛的努力，使得这部“手册”终于如期呈现在中国汽车界读者的面前。这一切都是因为大家有一个共同的愿望，就是为振兴中国汽车工业做一点切实的贡献。

国外同类手册已有几十年的历史，并经过多年不断地更新、完善。而我们刚刚迈出第一步，这部汽车工程手册显然在一定程度上也反映了当前我国汽车工业和作者们的综合水平，加上在时间和条件方面所受的限制，肯定有许多不足之处，殷切期望读者批评指正。汽车技术的进展日新月异，我们期待汽车行业能将这部手册的更新、修订工作继续下去，使它更好地为21世纪中国汽车工业的大发展服务。

冯 超

2000年7月

汽车论坛 http://www.qclt.com

《汽车工程手册·制造篇》编委会

主　编：姚贵升

主　审：韩云岭

副主编：敖炳秋　刘炎生　朱伟成　陈毅夫　薛永纯　林　锋

《汽车工程手册·制造篇》评审专家

支德瑜　李龙天　顾永生　张禾丰　康来明

《汽车工程手册·制造篇》
编 写 人 员 名 单

（按姓氏笔划为序）

丁　卫　丁　圆　于俊旭　于洪涛　马汝成　马鸣图　马香生　尹　平
卞　岩　王春祥　王野青　王志超　王介康　王定国　王树春　王　枫
王诗恩　王　珏　王建兴　王延正　王志煌　王　平　王恩荣　方伟荣
毛志强　冯云翔　冯　超　卢　岚　田　东　叶连祥　叶钜舜　安宝祥
刘士功　刘英海　刘靖平　刘　勇　刘国山　刘玉堂　刘炎生　刘运长
刘纪伦　刘云旭　江　梅　庄永明　阮曼仙　孙智义　仲继明　朱强劲
朱伟成　权仁泽　向兴球　陈毅夫　陈湘一　陈勉已　陈丽萍　陈延祥
陈　熙　陈志鑫　陈贤章　陈慈平　陈美美　李凤国　李树生　李玉峰
李树廷　李尹熙　李绍忠　李成国　张元纯　张锦国　张连玉　张英才
张　东　张　俊　吴　涛　吴琦瑾　吴旭初　吴立岚　吴　可　许嘉平
宋建兴　余月初　邹孝元　邬美华　汪恩荣　汪兆华　杜　华　沈文君

汽车论坛　http://www.qclt.com

沈励　林社允　林锋　林刚　周文亮　周志宏　周建忠　周恒悦
周翊　周喜生　杨春杰　杨文杰　杨念萱　杨毅　杨光大　杨乔治
杨金　宝剑虹　金培　金海东　金晓春　范国辉　季强　郑士荣
俞恒平　姜盖汕　姜文龙　胡金芳　胡家农　赵松淮　赵嘉鼎　赵永彬
赵启华　赵锡华　施麟范　南阳　姚贵升　姚培亨　姚逸邦　陶齐松
顾闻　顾明峰　候永茂　敖柄秋　袁序弟　袁伟　康来明　倪铭诚
倪锋　徐孝德　徐宝庆　徐纲　徐国昌　徐景雍　高春明　奚传森
韩云岭　韩建国　翁松伟　钱宏远　龚根龙　章雄生　黄荫新　黄国强
黄鸿生　黄江玲　谢干和　谢琳　谢玉山　彭元亨　彭峰　董佩杰
董长征　黄雁鸣　董亚平　童筱琴　靳晓哲　程志明　傅鹏九　蒋镜昱
蒋嘉明　蒋涛　解威　缪幼熙　蔡培明　蔡若帆　蔡军　樊启晟
樊惠卿　谭善锟　薛永纯　薛亚萍　魏晓川

汽车论坛　http://www.qclt.com

《汽车工程手册·制造篇》
编写说明

我国汽车工业的发展已经有将近半个世纪的历史，年产量已经达到180万辆左右，居世界第9位，但是还没有一本根据我国汽车工业情况由国人编写、国内出版发行的汽车工程手册，实属憾事。因此组织国内专家编写一本"汽车工程手册"很有必要。

为了编辑出版《汽车工程手册》，原机械工业部汽车司于1996年8月在北戴河召开了"手册"第一次编撰会议，成立了"手册"编辑委员会，确定了"手册"共分基础篇、设计篇、试验篇、制造篇和摩托车篇等五篇。并落实了各篇的主编、副主编、主审单位及人选。

1998年11月在上海召开了"制造篇"编写讨论会，讨论了编写原则；要突出实用性、指导性和先进性的内容特征，进一步落实了编写单位和进度要求。

1999年5月在天津召开了"制造篇"的审稿会，会上审查了已经编写完的稿件，提出了修改意见，讨论了尚未编写部分（如零部件）的编写原则和要求并进一步明确了编写进度。

1999年12月在北京召开了"制造篇"的专家审定会，到会的12位专家对稿件进行了审定，肯定了该书编入了我国多年积累的经验，内容结合实际，有很强的实用性；书中还介绍了国外当前各类制造技术的发展趋势，对行业的技术人员有一定的指导性；将我国自行开发的研究成果和引进轿车的生产技术消化吸收的成果写入书中，使书的内容具有先进性，认为该书的出版，对我国汽车生产和零部件生产有参考价值。

制造篇共分四大部分，即材料（主要由中国第一汽车集团公司与东风汽车公司编写）、生产制造工艺（主要由中国第一汽集团公司与东风汽车公司、上海汽车工业（集团）总公司汽编写）、重要零部件的生产技术（主要由上海汽车工业（集团）总公司编写）和生产技术及质量管理（主要由中国第一汽车集团公司与中国汽车技术研究中心编写）。每部分的特点如下：

1. 材料部分介绍了钢铁、有色金属、非金属材料、涂料和粘结剂的特点、选用原则、国内外用料情况，并列出了常用各类材料的性能数据，对技术人员选用材料很有参考价值。

2. 制造技术部分介绍了汽车生产的主要工艺（如铸造、机械加工、冲压、焊接……等十余种工艺）的特点，选用的设备和工艺装备，质量控制与检测情况，着重介绍了国内大型汽车厂所用的工艺、先进的生产线和典型的车间平面布置。书中还有选择地介绍了一些从国外引进的先进技术和在国内的消化吸收及推广情况。

书中所写的关于切削加工、冲压和铸造等加工工艺内容，均属国外最近的先进技术，使手册包含了非常先进的生产工艺水平，对新企业的建设和老企业的技术改造将有很大的实用价值。

3. 汽车零部件制造部分叙述了汽车主要零部件如发动机中缸体、曲轴、连杆等零件，传动装置的离合器、变速器和等速万向节等零件，转向机构零件、悬架机构的减振器、弹簧等零件，制造系统的零件，车轮与轮胎，车身部分的车身本体、内外饰件以及汽车附件的空调和仪表及其它部件共40多种零部件的制造技术，反映了我国近10多年来引进技术和合资生产轿车零部件的生产方法、质量控制和工装设备情况。其中发动机零部件（如曲轴的车拉加工、连

汽车论坛 http://www.qclt.com

杆的涨断工艺和凸轮轴的高速点磨铣削等工艺)的生产技术反映了当代最新的水平。撰写的内容结合我国轿车工业的特点,体现了我国消化吸收引进技术的成果,书的内容既使读者了解到轿车零部件制造技术的发展趋势,又可对我国企业的技术创新起到参考借鉴。

4. 管理方面包括生产管理、质量管理和可靠性。这部分涉及管理科学的三个章节,对多年以来汽车企业生产管理方式的几次变革以及目前我国普遍采用的生产管理方式作了简述,并较为系统地介绍了起源于日本和美国并为世界主要汽车制造企业广泛采用的现代管理方式、ISO9000族标准质量管理思想以及可靠性管理工程等。理论部分准确、精炼,并用大量篇幅介绍了当代汽车生产管理的方式、手段、工具和数据等,对当前我国汽车企业加强科学管理、提高产品可靠性和劳动生产率、降低生产成本、增强产品竞争能力都有参考价值并有较强的实用性。

由于编写人员众多,制造篇由50多个单位共约200位专家参加编写,各人的写法不同,全书的写作风格难于一致;再加上部分内容涉及专有技术,不便于公开发表;而且编写进度紧和作者水平所限,有错误和不当之处,敬请读者原谅并请提出宝贵意见。

姚贵升

1999年11月

汽车论坛 http://www.qclt.com

跃进汽车集团公司



NJ2045越野车



优尼柯 NJ6400GHA 高顶旅行客车

汽车论坛 http://www.qclt.com

目 录

1 材 料

1.1 钢材 …… 1
1.1.1 钢板 …… 1
1.1.2 钢管 …… 33
1.1.3 汽车用结构钢 …… 39
1.1.4 特殊用途钢 …… 78
1.1.5 粉末冶金用粉 …… 108
1.2 铸铁 …… 116
1.2.1 灰铸铁 …… 116
1.2.2 球墨铸铁 …… 125
1.2.3 蠕墨铸铁 …… 143
1.2.4 可锻铸铁 …… 149
1.2.5 特种铸铁 …… 155
1.2.6 铸钢 …… 183
1.3 有色金属材料 …… 184
1.3.1 铝合金 …… 184
1.3.2 铜合金 …… 202
1.3.3 锌合金 …… 212
1.3.4 镁合金 …… 212
1.3.5 轴承合金 …… 216
1.4 非金属材料 …… 225
1.4.1 橡胶 …… 225
1.4.2 塑料 …… 237
1.4.3 涂料 …… 265
1.4.4 纤维 …… 271
1.4.5 粘结密封材料 …… 274
参考文献 …… 283

2 加工技术

2.1 铸造 …… 287
2.1.1 概述 …… 287
2.1.2 铸造工艺及设备 …… 287
2.1.3 铸造模具（模样、芯盒）的设计与制造 …… 305
2.1.4 铸件热处理 …… 305
2.1.5 铸件品质（质量） …… 307
2.1.6 计算机在铸造生产中的应用 …… 310
2.1.7 先进制造技术在铸造上的应用 …… 311
2.2 锻造 …… 312
2.2.1 概述 …… 312

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.2.2 锻造加工工序及相应设备 …… 314
2.2.3 冷锻 …… 319
2.2.4 温锻 …… 322
2.2.5 特殊锻造 …… 323
2.2.6 锻模 …… 328
2.2.7 锻件的精度及质量 …… 334
2.2.8 锻造新技术 …… 336
2.2.9 各锻造工序的关键设备应用一览表 …… 337
2.3 粉末冶金 …… 339
2.3.1 概述 …… 339
2.3.2 粉末冶金汽车零件制造 …… 340
2.3.3 烧结材料及其标准 …… 353
2.3.4 新粉末冶金工艺、技术和材料 …… 357
2.4 热处理 …… 363
2.4.1 概述 …… 363
2.4.2 锻坯热处理 …… 363
2.4.3 传动件热处理 …… 370
2.4.4 汽车零件的感应热处理 …… 378
2.4.5 汽车紧固件热处理 …… 384
2.5 加工部分 …… 391
2.5.1 机械加工基础 …… 391
2.5.2 机械加工方法与设备 …… 400
2.6 冲压 …… 423
2.6.1 冲压工艺 …… 423
2.6.2 冲压模具 …… 429
2.6.3 冲压材料 …… 436
2.6.4 冲压设备 …… 440
2.6.5 冲压车间的平面布置 …… 450
2.7 塑料成形 …… 452
2.7.1 概述 …… 452
2.7.2 加工方法 …… 454
2.7.3 模具制造 …… 462
2.7.4 二次加工 …… 463
2.7.5 塑料零部件精度和质量保证 …… 465
2.8 陶瓷 …… 465
2.8.1 概述 …… 465
2.8.2 主要陶瓷的种类和性质 …… 465
2.8.3 陶瓷制备工艺 …… 467
2.9 电镀 …… 469
2.9.1 概述 …… 469
2.9.2 电镀设备与工艺 …… 469
2.10 涂装 …… 478
2.10.1 概述 …… 478
2.10.2 涂装前的车身 …… 478

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.10.3 前处理 …… 479
2.10.4 电泳（底漆） …… 482
2.10.5 密封及车底防护 …… 487
2.10.6 中涂 …… 489
2.10.7 面漆 …… 493
2.10.8 修补 …… 495
2.10.9 涂蜡 …… 496
2.10.10 涂装节能、环保新技术 …… 497
2.10.11 涂装技术的发展趋势 …… 501
2.11 焊接 …… 502
2.11.1 概述 …… 502
2.11.2 焊接工艺及设备 …… 502
2.11.3 焊接质量检验 …… 526
2.12 联接 …… 528
2.12.1 联接的分类 …… 528
2.12.2 螺纹联接 …… 528
2.12.3 过盈联接 …… 531
2.12.4 粘接 …… 536
2.12.5 压接工艺——一种新的联接技术 …… 537
2.13 其他加工 …… 539
2.13.1 喷丸处理 …… 539
2.13.2 热喷涂 …… 544
2.14 无损检测 …… 549
2.14.1 概述 …… 549
2.14.2 无损探伤 …… 549
2.14.3 材质检测 …… 554
2.14.4 无损检测方法的比较 …… 555
2.15 快速成形 …… 555
参考文献 …… 556

3 零部件加工

3.1 发动机 …… 558
3.1.1 气缸体、气缸盖 …… 558
3.1.2 活塞 …… 564
3.1.3 连杆 …… 567
3.1.4 曲轴 …… 570
3.1.5 轴承 …… 572
3.1.6 凸轮轴 …… 577
3.1.7 气门 …… 580
3.1.8 燃料供应装置 …… 584
3.1.9 进气歧管、排气歧管 …… 590
3.1.10 触媒转换器 …… 591
3.1.11 增压器 …… 616
3.1.12 蓄电池 …… 618

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.1.13 火花塞 …… 620
3.1.14 散热器 …… 623
3.1.15 发动机装配 …… 632
3.2 动力传动装置 …… 634
3.2.1 离合器 …… 634
3.2.2 手动机械变速器 …… 638
3.2.3 自动变速器装配 …… 641
3.2.4 传动轴 …… 642
3.2.5 等速万向节 …… 644
3.2.6 减速装置 …… 647
3.2.7 液力变矩器 …… 648
3.3 转向机构 …… 653
3.3.1 转向盘 …… 653
3.3.2 转向柱 …… 654
3.3.3 转向器 …… 657
3.4 悬架 …… 660
3.4.1 悬架螺旋弹簧 …… 660
3.4.2 减振器 …… 663
3.4.3 球铰链接头总成 …… 668
3.4.4 下摇臂 …… 668
3.5 制动 …… 670
3.5.1 制动钳 …… 670
3.5.2 制动防抱死装置（ABS） …… 671
3.5.3 制动摩擦片 …… 673
3.5.4 制动主缸、真空助力器 …… 675
3.6 车轮、轮胎 …… 678
3.6.1 车轮 …… 678
3.6.2 轮胎制造 …… 685
3.6.3 车轮装配 …… 688
3.6.4 维修站的轮胎装配 …… 690
3.7 车身 …… 691
3.7.1 副车架 …… 691
3.7.2 车身本体 …… 692
3.7.3 车身外部饰件 …… 703
3.7.4 车身内饰 …… 705
3.8 附件 …… 717
3.8.1 汽车空调系 …… 717
3.8.2 仪表 …… 721
3.8.3 电子门锁 …… 726
3.9 电子设备 …… 729
3.9.1 集成电路 …… 729
3.9.2 安装 …… 731
3.9.3 检查 …… 733
参考文献 …… 733

汽车论坛 http://www.qclt.com

4 汽车装配

4.1 概述 …… 736
4.1.1 汽车装配概念及其特点 …… 736
4.1.2 装配的种类 …… 736
4.1.3 装配生产组织形式 …… 736
4.1.4 汽车装配技术的最新发展 …… 738
4.2 整车装配工艺与设备 …… 740
4.2.1 轿车 …… 740
4.2.2 载货汽车 …… 750
4.2.3 客车 …… 753
参考文献 …… 757

5 生产管理系统

5.1 概述 …… 758
5.1.1 汽车工业生产管理的变迁 …… 758
5.1.2 生产管理的组织机构 …… 758
5.2 生产过程的组织 …… 759
5.2.1 概述 …… 759
5.2.2 生产类型 …… 760
5.2.3 生产过程的空间组织 …… 761
5.2.4 生产过程的时间组织 …… 762
5.2.5 流水生产组织 …… 763
5.3 生产计划与控制 …… 765
5.3.1 生产计划 …… 765
5.3.2 生产作业控制 …… 768
5.3.3 期量标准 …… 769
5.4 准时化生产方式 …… 773
5.4.1 准时化生产方式概述 …… 773
5.4.2 看板管理 …… 774
5.4.3 “一个流”生产 …… 777
5.4.4 多品种混合流水生产 …… 779
5.4.5 物流合理化 …… 782
5.5 现场管理 …… 785
5.5.1 现场管理体制 …… 785
5.5.2 “5S”——生产和办公区的清洁工作 …… 786
5.5.3 定置管理 …… 787
5.5.4 目视管理 …… 788
5.5.5 设备故障管理 …… 788
5.5.6 工具集配管理 …… 790
5.6 制造资源计划 MRPⅡ …… 791
5.6.1 MRPⅡ的概念 …… 791
5.6.2 MRPⅡ的基本数据 …… 791
5.6.3 MRPⅡ的功能 …… 792

汽车论坛 http://www.qclt.com

5.7 生产自动系统 …… 798
5.7.1 可编程序控制器（PLC） …… 798
5.7.2 数控设备 …… 801
5.7.3 工业机器人 …… 802
5.7.4 自动化立体仓库 …… 805
5.7.5 柔性制造系统（FMS） …… 806
5.7.6 网络系统 …… 809
5.7.7 计算机集成制造系统（CIMS） …… 812
参考文献 …… 814

6 质量管理

6.1 质量管理概论 …… 815
6.1.1 质量的定义 …… 815
6.1.2 质量的特性 …… 815
6.1.3 质量管理 …… 816
6.1.4 质量保证 …… 819
6.1.5 质量体系 …… 819
6.1.6 汽车工业质量保证体系标准 …… 820
6.2 产品形成各阶段的质量管理 …… 821
6.2.1 策划 …… 822
6.2.2 设计 …… 824
6.2.3 生产工艺的策划和开发 …… 827
6.2.4 采购 …… 833
6.2.5 生产现场 …… 837
6.2.6 质量检验 …… 840
6.2.7 服务 …… 844
6.3 当代质量管理活动 …… 847
6.3.1 基准确定 …… 847
6.3.2 质量功能展开 …… 850
6.3.3 潜在的失效模式及后果分析（FMEA） …… 853
6.3.4 价值流图析技术 …… 856
6.3.5 持续改进 …… 857
6.3.6 质量成本 …… 858
参考文献 …… 861

7 可靠性

7.1 可靠性概述 …… 863
7.1.1 可靠性的概念 …… 863
7.1.2 可靠性管理与质量保证 …… 864
7.2 基本可靠性工程方法 …… 864
7.2.1 可靠性的度量 …… 864
7.2.2 系统可靠性的分配与预测 …… 871
7.3 可靠性管理及方法在产品寿命周期各阶段的应用 …… 876
7.3.1 策划阶段——制定可靠性战略、目标与实施计划 …… 876

汽车论坛 http://www.qclt.com

1 材 料

1.1 钢 材

目前，世界各国汽车工业的发展都向着减轻自重、节约能耗、降低排污和驾驶安全的方向发展。为了减重节能，各汽车制造厂家都扩大了铝、镁轻金属和塑料的应用，使这些材料在汽车用材中的比例逐年增加。尽管如此，钢铁材料仍是汽车工业用材的主体，它们的用量仍占汽车用材的70%左右。

为了与其它材料竞争，钢材在生产工艺和材料性能方面也不断改进。例如，在结构钢方面通过炉外精炼、真空处理、成分微调和连续浇铸等先进冶金技术生产出纯度高、性能稳定的钢材，不仅大大地降低了零件的重量，节约了钢材的消耗，还延长了零件的使用寿命；在热轧钢板方面，生产出各种类型的低合金高强度钢板，通过硫化物形态的控制改善了钢板的横向冷弯性能，它们广泛地用于车架和车轮的制造，提高了汽车的承载能力；在冷轧钢板方面，由于生产出超低碳、超深冲的无间隙原子钢板（IF钢板），有烘烤硬化性能的BH钢板，含磷高强度深冲钢板，防腐能力强的镀层钢板以及采用激光拼焊冲压毛坯等先进工艺，不仅满足了复杂车身零件的需要，并延长了车身的使用年限；近来，又开发出中间夹有树脂夹层的减振、减重的复合钢板，满足了汽车降低噪声和减轻重量的需要；还开发了镀铝钢板和不锈钢板用于消声器的制造，满足延长消声器寿命和减少排污的需要。

1.1.1 钢板

1.1.1.1 生产工艺

汽车用热轧钢板、冷轧钢板、表面处理钢板等，主要采用转炉冶炼、连续热轧和冷轧、罩式炉退火或连续式炉退火、冷轧平整以及表面镀层等生产工艺。当然较老式的还有用平炉冶炼、往复轧机生产工艺。主要生产工艺流程如图1-1-1所示。

1）炼钢工艺

计算机全程控制冶炼过程的顶—底复合吹炼的转炉，炉外精炼有RH真空脱气、KIP脱硫、CAS钢水合金微调、KST合金微调等，保证了严格的钢水成分范围，极大限度地降低了钢中S、P、N等有害元素，并可使碳降到极低限度（C小于50ppm），使钢水纯净。

连铸为立弯式连铸机，可生产厚度为250mm、宽度为900～1 900mm的连铸坯。连铸生产中采用回转台钢包吹氩，结晶器液位控制、二冷段气水冷却、电磁搅拌、压缩铸造等。便于钢水中夹杂物上浮，进一步保证连铸坯的纯净钢质和坯内部组织等轴晶化，减少中心偏析和疏松，还可防止连铸坯表面裂纹的产生。同时，连铸机还具有全线的计算机控制及计算机质量判断手段，保证了热轧钢板和冷轧钢板能得到优质的板坯原料。

2）热轧工艺

板坯经加热炉加热到1 200～1 250℃，经由四机架带立辊的粗轧机，并加强立辊及宽度的自动控制（AWC）；七架四辊式精轧机，呈四分之三的连轧布置。精轧采用了CVC技术及液压厚度自动控制（AGC）；并配以弯辊装置，保证了带钢的尺寸精度。整个轧线有完善的除鳞设备，高压水除鳞装置，可全面清除热轧带钢表面氧化铁皮。采用完善的四级计算机控制：MS（管理机）→FLS（生产控制机）→PCC（过程机）→BA（基础自动化）。还可通过先进的数学模型，严格控制终轧温度、卷取温度，从而保证了热轧钢板的力学性能。

汽车论坛 http://www.qclt.com

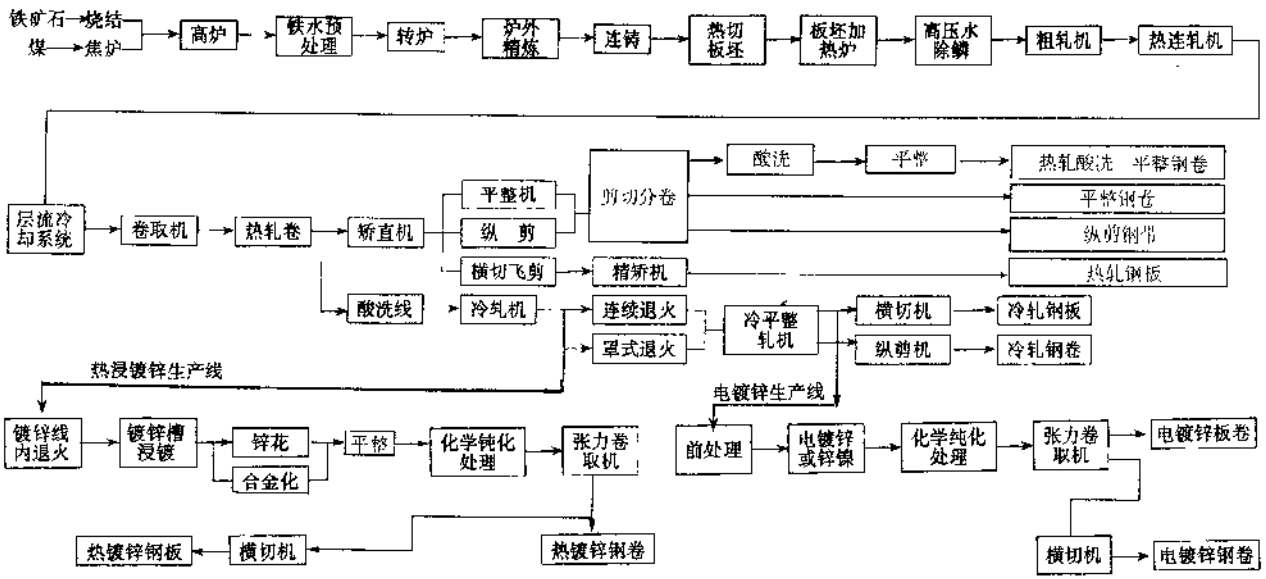


图 1-1-1 钢板生产工艺流程图

注：(1) 铁矿石＋石灰石烧结成自溶性烧结团铁矿，以减小在高炉内直接加入石灰石使高炉温度下降。

(2) 罩式退火可采用紧卷退火或松卷退火，并在退火前采用电解净化处理。

(3) 前处理包含脱脂和酸洗。

汽车论坛 http://www.qclt.com

板坯多采用热送，以减少热耗。加热到1 200℃以上的板坯，经七架连续轧机轧制成1.5～25mm的热轧钢卷。小于2.0mm的热轧钢板，其宽度应为900～1 000mm。低合金高强度热轧钢板，厚度为2.0～14.0mm。往复轧制生产的热轧钢板，厚度应为6.0～18.0mm。

对于1/2连轧机（也称半连轧机）生产的热轧钢板，轧制后钢板厚度一般为2.0～12.5mm，宽度在1 500mm以下，还可在钢板进入1/2连轧板以前，将经过粗轧的板卷重新卷取，即卷头变成卷尾，然后进入保温箱，可使板卷温度均匀和改善钢板的组织，改善热轧钢板的力学性能。

3）冷轧工艺

热轧板卷经盐酸浅槽酸洗，可有效地清除表面氧化铁皮，然后由五机架全连续冷轧机，轧制成厚度为0.30～3.50mm的冷轧板卷。生产过程采用计算机控制，并有厚度自动控制AGC系统，以确保轧后的厚度精度。还装有板型检测调节装置和CVC轧辊凸度连续可变的调节技术，保证钢板的平直。冷轧板卷的退火可用罩式炉退火，也可用CAPL连续退火机组退火。罩式退火采用计算机控制，可按不同钢种和堆垛方式分别采用不同的退火曲线。一般认为，采用缓慢升温或双台阶退火制（在550℃保温），使钢中的AlN充分析出。CAPL机组可一次完成脱脂、再结晶和平整工艺，由于退火温度高，可使冷轧板（卷）获得良好的力学性能。也可以利用退火后的快速冷却生产强度大于440MPa的冷轧高强度钢板。退火后的冷轧板卷，经脱脂、酸洗预处理，浸在电镀液中进行电镀，然后进行磷化、钝化、涂油及耐指纹处理，可生产电镀锌钢板。未退火的冷轧板卷经由热浸镀锌生产线，在生产线退火炉内退火，浸入熔化的锌槽中进行热镀锌，经表面锌花调整、表面光轧制平整，进行各项化学处理，可生产热镀锌钢板。热浸热镀锌后再加热，使其形成质量均匀的中间铁—锌合金层，即合金化处理，可生产合金化热镀锌钢板。

单机架生产的冷轧钢板，由于厚度和板形控制较差，冷轧压下率较低，不宜生产汽车用特别是轿车用冷轧钢板。

4）冷平整工艺

冷轧钢板的表面结构，往往用粗糙度来衡量。表面粗糙度是指冷轧钢板表面均匀地分布不同深度的微细小坑，用平均粗糙度 Ra 来度量。当钢板表面粗糙度 $Ra<0.4\mu m$ 时，称光面钢板。$Ra>0.4\mu m$ 时，称粗糙表面钢板（俗称麻面钢板或无光泽钢板）。粗糙度的产生是退火冷轧钢板，经过平整工艺时，事先将平整辊经喷沙处理、激光毛化处理或电火花处理，经冷轧平整压下量约0.8%～1.5%后，冷轧钢板呈现出小坑，即表面粗糙度。钢板表面具有一定的粗糙度，可储存润滑油和收集磨粒，有利于冲压成形；对油漆具有较强的附着力，可提高油漆质量，但粗糙度过大，成形时摩擦阻力增加，不利于冲压成形，甚至恶化油漆表面质量。所以，对于汽车外表面件，钢板表面粗糙度 Ra 值应为0.7～1.3μm；对于内部件，粗糙度 Ra 值可控制在0.8～1.8μm范围内。

1.1.1.2 热轧钢板（卷）

热轧钢板（卷）既可直接应用，又是进一步加工成冷轧钢板（卷）和表面处理钢板（卷）的原材料。热轧钢板卷可纵剪成带卷，既可直接应用，又是进一步加工成冷轧钢带卷和焊管的原材料。

1）优质碳素结构钢板

在GB3275中列入了“汽车制造用优质碳素结构钢热轧钢板和钢带”标准，厚度为2.0～14.0mm，适用于制造汽车冷冲压零件及冷弯零件。钢板和钢带的尺寸应符合GB709的规定。其化学成分见表1-1-1，力学性能见表1-1-2。

表1-1-1 优质碳素钢化学成分（%）

钢号	C	Si	Mn	P	S	Al
08F	0.05～0.11	≤0.03	0.25～0.50	≤0.035	≤0.035	–
10F	0.07～0.14	≤0.07	0.25～0.50	≤0.035	≤0.035	–
15F	0.12～0.19	≤0.07	0.25～0.50	≤0.035	≤0.035	–

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	C	Si	Mn	P	S	Al
08Al	0.05～0.12	≤0.03	0.25～0.65	≤0.035	≤0.035	0.02～0.07
15Al	0.12～0.19	≤0.06	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	0.02～0.07
08	0.05～0.12	0.17～0.37	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	–
10	0.07～0.14	0.17～0.37	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	–
15	0.12～0.19	0.17～0.37	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	–
20	0.17～0.24	0.17～0.37	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	–
25	0.22～0.30	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.035	≤0.035	–
30	0.27～0.35	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.035	≤0.035	–
35	0.32～0.40	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.035	≤0.035	–
40	0.37～0.45	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.035	≤0.035	–
45	0.42～0.50	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.035	≤0.035	
50	0.47～0.55	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.035	≤0.035	–

表 1-1-2 优质碳素钢力学性能、工艺性能和显微组织

钢号	试验项目						
	1	2	3	4	5	6	7
	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	HB	冷弯 180°	晶粒度	游离渗碳体	带状组织
08F	275～370	≥30	≤100	$d=0$	6～11 级	0～3 级	–
08、10F、10	275～410	≥27	≤108	$d=0$	6～11 级	0～3 级	–
08Al	315～440	≥27	≤117	$d=0$	6～11 级	0～3 级	–
15F、15	315～440	≥26	≤117	$d=0$	6～11 级	–	1～3 级
15Al、20	345～490	≥24	≤127	$d=a$	6～11 级	–	1～3 级
25	390～540	≥23	≤138	$d=a$	6～11 级	–	–
30	440～590	≥21	≤150	$d=2a$	6～11 级	–	–
35	490～635	≥18	≤161	$d=2a$	6～11 级	–	–
40	510～655	≥17	≤167	$d=2a$	6～11 级	–	–
45	540～685	≥15	≤174	–	6～11 级	–	–
50	540～735	≥13	≤184	–	6～11 级	–	–

由于优质碳素结构热轧钢板主要是碳强化，因此在提高强度的同时伸长率下降明显，汽车上用量越来越少。近期开发了热轧深冲薄钢板，钢板的化学成分采用超低碳（C≤0.010%），并用钛微合金化，用控轧和控冷技术，可获得低屈服强度和高伸长率。2.0mm 和 2.5mm 的热轧钢板的实际性能：σ_s = 156～185MPa；σ_b = 309～338MPa；$\delta_{L0=80}$为 37.5%～43.7%；$d=0$ 完好。可代替相应厚度的冷轧板生产汽车零件支架、加强板和深冲壳类件等。还开发具有低的强度、高的伸长率、低的冷脆转变温度和时效值的热轧拉延钢板，其性能为：σ_s≤215MPa；σ_b≤350MPa；$\delta_{L0=50}$≥45%；冷脆转变温度≤－70℃；时效指数 AI≤30MPa。同时还开发了具有良好冷成形性能、优良表面质量和尺寸精度高的热轧酸洗钢板，其实物性能：σ_s = 230～275MPa；σ_b = 330～370MPa；$\delta_{L0=80}$为 35%～41%；宽冷弯 $d=0$ 完好。开发的汽车用热轧钢板的性能见表 1 1-3。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-3 热轧钢板的性能

项目名称	钢号	σ_s (MPa)	σ_t (MPa)	δ (%) $L_0=80mm$	δ (%) $L_0=50mm$	其它	冷弯 180° $B=35mm$	厚度 (mm)	备注
热轧深冲	RSC	≤215	≤275~350	≥36	–	$r\geq1.3$	$d=0$	1.5~3.0	–
热轧拉延	WLY	≤215	≤350	–	≥45		$d=0$	2.0~3.0	–
汽车结构件用钢板	QJ320	215~285	320~390	≥32		–	$d=0$	2.0~3.0	酸洗平整
	QJ370	≥245	≥370	≥28		–	$d=a$	2.0~3.0	酸洗平整
	QJ420	≥350	≥420	≥24		–	$d=a$ $B=25mm$	2.0~3.0	酸洗平整

宝钢将引进的德国钢号 StW22、StW23、StW24 和日本钢号 SPHC、SPHD、SPHE，对化学成分进行调整和其它部分修改后，形成宝钢企业标准 Q/BQB302—94 的“热连轧低碳钢板和钢带”，其化学成分和力学性能见表 1-1-4、表 1-1-5 和表 1-1-6。

表 1-1-4 钢的化学成分（%）

钢号	厚度（mm）	脱氧方式	C	Si	Mn	P	S	Alt
StW22			≤0.10		≤0.60	≤0.035		≥0.010
StW23	1.5~8.0	铝镇静	≤0.10	≤0.05	≤0.50	≤0.035	≤0.035	≥0.020
StW24			≤0.08		≤0.50	≤0.030		≥0.020
SPHC	1.5~14.0		≤0.15	≤0.05	≤0.60	≤0.035		≥0.010
SPHD	1.5~14.0	铝镇静	≤0.10	≤0.07	≤0.50	≤0.035	≤0.035	≥0.020
SPHE	1.5~6.0		≤0.10	≤0.07	≤0.50	≤0.030		≥0.020

表 1-1-5 钢板的力学性能和工艺性能

钢 号	抗拉强度 (MPa)	δ (%) 厚度<3mm $L_0=80mm$, $b_0=20mm$	δ (%) 厚度≥3mm $L_0=5.65\sqrt{F_0}$	弯曲 180°, $B>20mm$ ≤2mm	弯曲 180°, $B>20mm$ >2mm
StW22	≤440	≥25	≥29		–
StW23	≤420	≥27	≥31	$d=0$	$d=a$
StW24	≤410	≥30	≥34	$d=0$	$d=a$

表 1-1-6 钢板的力学性能和工艺性能

钢 号	σ_b (MPa)	下列厚度的伸长率（%） <1.6	1.6~<2.0	2.0~<2.5	2.5~<3.2	3.2~<4.0	≥4.0	弯曲 180°, $B>20mm$ <3.2	≥3.2
SPHC	≥270	≥27	≥29	≥29	≥29	≥31	≥31	$d=0$	$d=a$
SPHD	≥270	≥30	≥32	≥33	≥35	≥37	≥39	$d=0$	$d=a$
SPHE	≥270	≥31	≥33	≥35	≥37	≥39	≥41	$d=0$	$d=a$

注：拉伸试样为 $L_0=50mm$，$b_0=25mm$。

2）碳素结构热轧钢板

碳素结构热轧钢板是由 70 年代的普通碳素结构热轧钢板转化来的，在钢号、技术要求和内容形式均有变化。具体变化如表 1-1-7。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-7 碳素和普通碳素结构热轧钢板对照表

碳素结构热轧钢板			普通碳素结构热轧钢板	
Q195		化学成分和力学性能均保证	A1 B1	保证力学性能（σ_b，δ 和冷弯），不保化学成分。 保化学成分，但不保力学性能。
Q215	A级	保化学成分和力学性能	A2	保力学性能
	B级	保化学成分和力学性能并做常温冲击试验，V型	B2 C2	保化学成分 化学成分和力学性能均保证
Q235	A级	保成分和性能	A3	保性能和常温冲击试验 U 型
	B级	保成分和性能，并做冲击试验 V 型	B3 C3	保化学成分 保成分和性能，常温或 -20℃ 冲击试验，U 型
	C级	保成分性能，冲击，作重要焊接结构用		
	D级	同上		
Q255	A级	保成分和性能	A4 B4	保性能 保化学成分
	B级	保成分、性能、常温冲击、U 型	C4	保成分、性能、冲击试验、U 型
Q275	-	保成分和性能	A5	B5 和 C5 分别保性、成分和成分性能

碳素结构热轧钢板的化学成分和力学性能分别见表 1-1-8 和表 1-1-9。

表 1-1-8 钢的化学成分（%）

钢号	等级	C	Mn	Si	P	S
Q195	-	0.06～0.12	0.25～0.50	≤0.30	≤0.045	≤0.050
Q215	A级	0.09～0.15	0.25～0.55	≤0.30	≤0.045	≤0.050
	B级					≤0.045
Q235	A级	0.14～0.22	0.30～0.65	≤0.30	≤0.045	≤0.050
	B级	0.12～0.20	0.30～0.70			≤0.045
	C级	≤0.18	0.35～0.80		≤0.040	≤0.040
	D级	≤0.18			≤0.035	≤0.035
Q255	A级	0.18～0.28	0.40～0.70	≤0.30	≤0.045	≤0.050
	B级					≤0.045
Q275	-	0.28～0.38	0.50～0.80	≤0.35	≤0.045	≤0.050

表 1-1-9 钢板的力学性能和工艺性能

钢号	等级	σ_s（MPa）		σ_b（MPa）	δ_5（%）		α_k，V型（纵向）冲击功		弯曲 180° $B=2a$	
		≤16mm	>16～40 mm		≤16mm	>16～40 mm	(℃)	(J)	方向	$B=2a$
Q195	-	≥195	≥185	315～390	≥33	≥32	-		横	$d=0.5a$
									纵	$d=0$
Q215	A级	≥215	≥205	335～410	≥31	≥30	-	-	横	$d=a$
	B级						20	≥27	纵	$d=0.5a$
Q235	A级	≥235	≥225	375～460	≥26	≥25	-	-	横	$d=1.5a$
	B级						20	≥27		
	C级						0		纵	$d=a$
	D级						-20			
Q255	A级	≥255	≥245	410～510	≥24	≥23	-	-		$d=2a$
	B级						20	≥27		
Q275	-	≥275	265	490～610	≥20	≥19	-	-		$d=3a$

宝钢非等效采用 JIS G3101 中的 SS330～SS540 和 DIN17100 中的 St37-2～St52-3，形成了宝钢标准 Q/BQB303—99 中的部分钢号，主要用于建筑、桥梁、船舶、车辆等一般结构件用钢板，其化学成分和力学性能见表 1-1-10、表 1-1-11 和表 1-1-12。

表 1-1-10 钢 的 化 学 成 分

钢号	厚度（mm）	C	Si	Mn	P	S	其 它
SS330	≤12.7	≤0.15	≤0.30	≤0.95	≤0.035	≤0.035	Alt≥0.01
SS400	≤16.0	≤0.21	≤0.30	≤1.30			
SS490	1.6～12.5	≤0.22	≤0.25	≤1.40			
SS540	2.3～6.0	≤0.30	≤0.25	≤1.60			可添加其它元素
St37－2	4.0～16.0	≤0.17	≤0.12	≤1.25	≤0.035	≤0.035	Alt≥0.010
	>16～25.0	≤0.20		≤1.30			
St37－3	≤25.0	≤0.17		≤1.25			Alt≥0.020
St44－2	≤18.0	≤0.21		≤0.95			Alt≥0.010
St50－2	≤10.0	≤0.30	≤0.35	≤1.60			－
St52－3	≤25.0	≤0.22	≤0.55				Alt≥0.020

表 1-1-11 钢板的力学性能和工艺性能

钢 号	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ（%） $L_0=50$mm, $b_0=25$mm, ≤5mm	δ（%） $L_0=200$mm, $b_0=40$mm, >5mm	弯曲 180° $B\geq 35$mm
SS330	≥205	330～430	≥26	≥21	$d=a$
SS400	≥245	400～510	≥21	≥17	$d=3a$
SS490	≥285	490～610	≥19	≥15	$d=4a$
SS500	≥400	≥540	≥16	≥13	$d=4a$

表 1-1-12 钢板的力学性能和工艺性能

钢 号	σ_s (MPa) ≤16mm	σ_s (MPa) >16mm	σ_b (MPa) <3mm	σ_b (MPa) ≥3mm	δ（%） $L_0=80$mm 1.5～<2	2～<2.5	2.5～<3	$L_0=5.65\sqrt{F_0}$ ≥3	弯曲 180° $B>20$mm <3mm	≥3mm
St37－2	≥235	≥225	360～510	340～470	≥17	≥18	≥19	≥24	$d=1.5a$	$d=2a$
St37－3									$d=a$	$d=1.5a$
St44－2	≥275	≥265	430～580	410～540	≥14	≥15	≥16	≥20	$d=2.5a$	$d=3a$
St50－2	≥295	－	490～660	470～610	≥12	≥13	≥14	≥18	－	－
St52－3	≥355	≥345	510～680	490～630	≥14	≥15	≥16	≥20	$d=2.5a$	$d=3a$

由于钢中的磷和硫含量与优质碳素结构热轧钢板相同，而且用降低钢中的碳含量，增加钢中锰含量、甚至用其它元素来强化，无疑在提高强度时，伸长率下降较少（与优碳钢比较），因此，可用来代替优碳钢板甚至部分低合金热轧钢板生产汽车制动盘、托架结构件、保险杠和车箱纵梁、横梁以及部分车架横梁等。

3）低合金高强度热轧钢板

热轧高强度钢板在载货汽车上的用量很大，约占载货汽车用热轧钢板总用量的 70%。主要用于汽车车架的纵梁和横梁，车箱的纵梁和横梁以及制动盘等受力结构件和安全件。这些件采用的强度级别主要有两种，其抗拉强度分别为 390MPa 和 510MPa。目前已形成我国汽车用热轧高强度钢板系列。如锰钢或锰—稀土钢系列，硅—钒、锰—钒钢系列，含钛钢系列和含铌钢系列，这对提高汽车的整车性能、节约材料，降低能耗和适应我国汽车严重超载、道路差和驾驶员素质参差不齐等因素，无疑已起到重要的作用。

汽车论坛 http://www.qclt.com

热轧高强度钢板的强化机理有固溶强化、析出强化、组织强化、部分再结晶强化和相变诱导塑性强化（仅为研究所热处理型相变诱导塑性钢板的数据）。可以看出，抗拉强度在650MPa以下时，用固溶强化或析出强化钢板可以得到满足；若要求抗拉强度大于550MPa，而零件形状复杂要求好的塑性，可用热轧双相钢板制造；具有高强度和高塑性兼有的相变诱导塑性钢板有可能成为今后汽车用热轧钢板的最佳选择。

部分热轧钢板的抗拉强度与伸长率的生产统计数据关系如图1-1-2、图1-1-3所示。

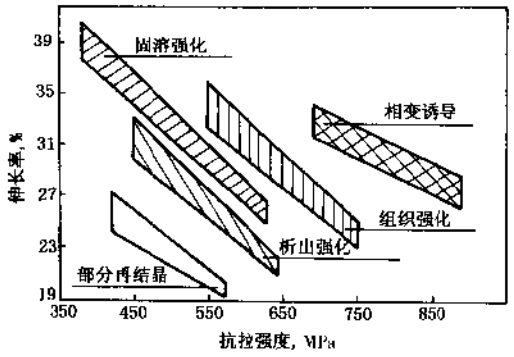


图1-1-2 热轧钢板强度—塑性平衡

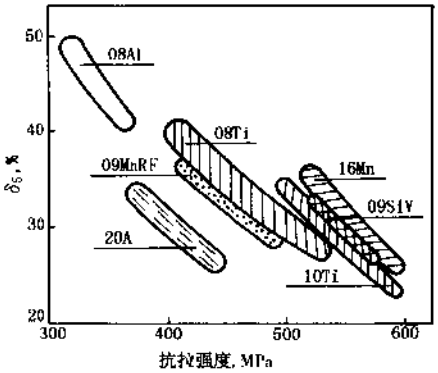


图1-1-3 实际热轧钢板强度—塑性平衡

（1）锰钢或锰—稀土处理钢板

大家知道，16Mn钢中的MnS夹杂物，在高温或轧制温度下具有好的塑性，轧制时沿轧向伸长，形成细长条MnS夹杂物。钢板冲压成形时，这种夹杂物与金属界面分离而形成显微孔洞，随着钢板继续变形，这些显微孔洞扩大和连结，形成大的孔洞，最终成为零件冲压开裂的起始点。当钢中加入稀土后，具有明显的脱硫效果，一般为30%～50%；稀土又可改变MnS夹杂物的形态、大小和分布，使MnS型夹杂改变成RE_2S_3型夹杂。如果要将钢中细长条MnS夹杂全部消失，变成RE_2S_3型夹杂，所需要的稀土（RE）量为：

$$RE\% = \frac{141.2}{32} \times \frac{2}{3} \times S\% = 2.942 \times S\%$$

式中：141.2为稀土元素的综合原子量；32为硫的原子量；2/3为RE_2S_3型夹杂分配比。

因此，只有当钢中的RE/S≈3时，细长条MnS夹杂被RE_2S_3型所代替，形成圆球状、点状或不规则状的稀土硫化物，大大削弱了硫化物的有害作用；显著提高各种温度下钢板的横向冲击韧性、断面收缩率和冷弯性能；大幅度提高钢板的横向塑性和实际冲压成形性能，如60年代，用16Mn和16MnRE热轧钢板生产汽车纵梁，在抗拉强度相同的情况下，16Mn钢板的冲压开裂率高达89%；而16MnRE钢板的冲压开裂率仅为2%～6%，效果十分明显。

（2）热轧含钛钢板系列

热轧含钛钢板在汽车上的用量很大，以CA1092载货汽车为例，每车用量约350kg，曾是我国汽车用热轧高强度钢板的主要钢种。目前由于含铌高强度热轧钢板用量的增加，使含钛钢板在汽车上的用量在减少。尽管如此，由于含钛钢板强度高，车架横梁用4～5mm钢板制造，大幅度降低了汽车自重，同时，汽车车架的使用寿命成倍提高，见图1-1-4。其它仍有相当数量的钛钢在应用。

钢中加入钛，提高了钢板的强度，强化能力与钢中的氮和硫含量有关。因为钛首先与氮结合，形成TiN，再与硫或硫碳结合，形成TiS或$Ti4C_2S_2$，然后与碳结合形成TiC。钛又能够改变钢中硫化物夹杂的形态和分布，生产实际结果表明，当钢中的Ti/S比值≥6时，钢中细长条MnS夹杂明显减少甚至消失，被棒状、点状和不规则状的TiS和$Ti_4C_2S_2$型夹杂所代替，钢板的横向塑性明显提高，冷弯性能和实冲性能显著改善。热轧含钛钢板的冲击韧性很高，U型缺口的冲击值可高达200～300J/cm^2。缺口静弯曲试验结果亦表明，热轧含钛钢板的塑性功比同强度级别的锰钢高一倍，撕裂功约高二倍，说明含钛钢板具有良

汽车论坛 http://www.qclt.com

好的塑性和缓慢的裂纹扩展速度，从而提高了钢板的实际成形性能。

由于钛对热轧后冷却速度很敏感，控制不当或卷取时板卷头部冷却快等因素，导致热轧含钛钢板的头、中、尾部的强度波动大，形成强度呈盆形曲线分布；强度波动大又会造成弯曲件和槽形冲压件的回弹增大，降低了零件的装配质量，甚至因装配铆钉受剪切而过早断裂，影响使用寿命。

(3) 热轧含铌钢板系

在微含量时，铌的强化能力大于钛，为节约合金元素，降低钢的生产成本，目前大量应用热轧含铌钢板生产汽车车架和其它冲压件。当钢中硫含量较低时，含铌钢具有较好的经济性。因为钛优先与氮化合形成 TiN，并与硫形成钛硫化合物 ($Ti_4(S,C)_2$)，增加了钛在钢中的含量。要获得同级强度的钢板，铌量仅为钛量的 1/3 左右。但钢中硫含量较高时，由于钛能够改变钢中硫化物夹杂的形态，从而改善钢板的横向塑性，而铌钢没有这种特性。

钢中加入微量的铌，可引起钢组织的变化，如晶粒细化和在基体中析出弥散分布的碳氮化合物 (Nb(C,N))，在热轧过程中，由于铌强烈阻碍再结晶，获得十分细小的奥氏体晶粒，经轧后快冷，发生奥氏体—铁素体的转变，同时进行再结晶和开始析出极细的碳氮化铌，得到了细晶粒的热轧含铌钢板。由于轧后的快速冷却和因卷取造成的延迟冷却，使还处于固溶状态的铌以极细小的形式在铁素体中析出，形成强烈的析出硬化强化。铌含量通过晶粒细化或析出硬化强化得到屈服强度的增加，可用下式表示：

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

式中：σ_s——屈服强度，MPa；

σ_c——阻碍自由位错运动的晶格抗力，MPa；

K——常数；

d——铁素体晶粒平均直径，mm。

钢中铌含量对屈服强度的增加如图 1-1-5 所示。可以看出，当 Nb≤0.04%时，屈服强度的增加主要依

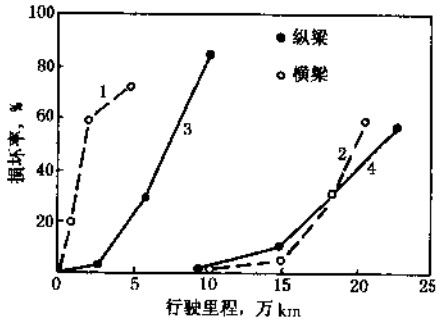


图 1-1-4 不同钢种零件行驶里程的损坏率
1-08Al 钢板；2-08Ti 钢板；3-退火 30Ti 钢板；4-16Mn 钢板

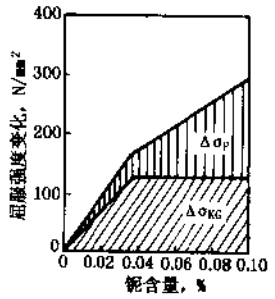


图 1-1-5 晶粒细化和析出硬化引起屈服强度的变化
$\Delta\sigma_{KG}$-晶粒细化使 σ_s 增加量；$\Delta\sigma_p$-析出硬化使 σ_s 增加量

赖于细晶强化 ($\Delta\sigma_{KG}$)，只有当 Nb 含量接近 0.10%时，才有可能使析出硬化强化接近细粒强化。

卷取温度对钢中的固溶铌含量有决定性的影响，当卷取温度降低时，钢中固溶铌量增加。固溶铌量的增加，意味着钢板屈服强度的提高，因此，为充分发挥铌元素的潜力，轧后快速冷却和低温卷取是重要的。

另外，铌钢的强化形式对脆性转变温度有影响，如图 1-1-6 所示。有人认为，晶粒尺寸对转变温度的影响为每降低晶粒尺寸 $mm^{-1/2}$，转变温度下降为 −12.5℃ (−12.5℃/$mm^{-1/2}$)，而 σ_s 应力每增加 10MPa 时，转变温度上升为 3.8℃。为评价材料的脆性倾向，可用脆化因子 K 来表示：

$$K = \frac{\Delta T_u}{\Delta \sigma_s} \quad (℃/MPa)$$

式中：ΔT_u——脆性转变温度变化量，℃；

汽车论坛 http://www.qclt.com

$\Delta\sigma_s$——屈服强度变化量，MPa。

K 值愈低，对钢的抗脆断性的影响愈大。当 K 为负值时，意味着屈服强度和脆性转变温度同时得到改善。铌钢在屈服强度约 500MPa 时的最佳脆性转变温度可达 -80℃（V 型—横向试样），这种脆性转变温度是低的。细小晶粒尺寸和固定钢中的氮，可保证铌钢具有高的抗脆断性能。

（4）热轧硅—钒钢板

钒为我国丰富资源之一，为发挥这一资源优势，开发了 09SiV 热轧钢板。钢板经两架轧机往复轧制，生产汽车车架用热轧钢板。钢中加入钒，可生产中等程度的沉淀强化和相对较弱的晶粒细化，并与其含量成正比，如图 1-1-7 所示。钢中的氮，形成 VN，提高了沉淀强化的效果。在正火温度下，钒具有相对较大的溶解度，因此，正火的钒钢板，也可以达到相当的沉淀强化效果。钒在 α-铁中的扩散速度较大，尽管生成碳氮化钒的过饱和度较小，但碳氮化钒（V（C.N））的生成仍较快。

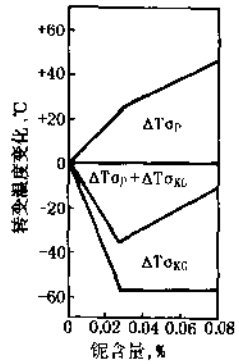


图 1-1-6 晶粒细化、析出硬化和转变温度变化的关系

$\Delta T_{\sigma KG}$-晶粒细化对转变温度的变化量；

$\Delta T_{\sigma P}$-析出硬化对转变温度的变化量

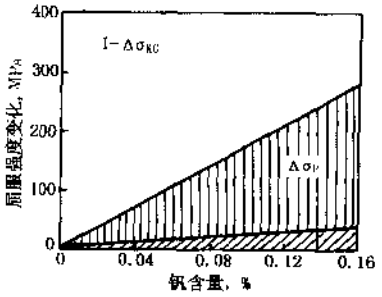


图 1-1-7 晶粒细化和沉淀强化对屈服强度的影响

$\Delta\sigma_{KG}$-晶粒细化使 σ_s 增加量；

$\Delta\sigma_P$-析出硬化使 σ_s 增加量

钒钢中的硅含量约 0.5%时，脆性转变温度达到最低值，再增加硅含量，转变温度上升。晶粒细化不仅使屈服强度提高，而且也改善了抗脆断性能；相反，沉淀强度可提高屈服强度，但也促使脆性转变温度的提高。铁素体晶格中沉淀粒子或“原子气团”对位错运动的阻碍作用愈强，钢就越容易发生脆断，因此，细小的弥散相对脆性转变温度有不利的影响。有的研究认为，当钢中加入 0.1%的钒时，虽然可获得 130MPa 的屈服强度的增量，但又相应伴有 13J/cm² 的韧性下降和约 +15℃的脆性转变温度的升高。热轧的 09SiV 钢板，虽具有较好的成形性能、纵横向性能差别较小和屈服强化不高等优点，但钒含量（V：0.04%～0.10%）和较高的硅含量（Si：0.70%～1.0%）对脆性转变温度的影响应引起关注。

09SiV 热轧钢板的低温性能如图 1-1-8 和图 1-1-9 所示。

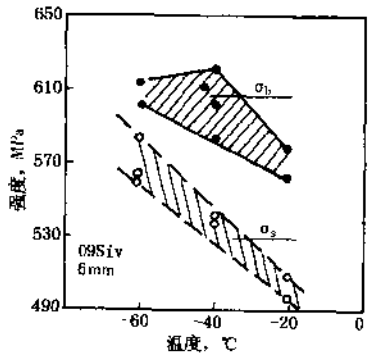


图 1-1-8 低温强度性能

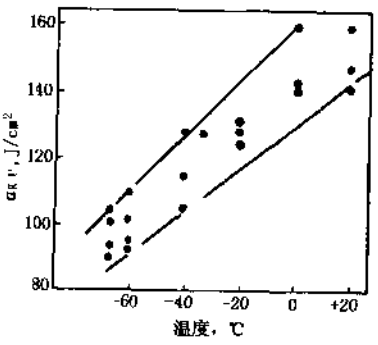


图 1-1-9 低温冲击韧性

图 1-1-8、图 1-1-9 给出，随着温度的降低，屈服强度和抗拉强度提高，冲击韧性下降。

主要热轧高强度钢板的成分和性能见表 1-1-13。

表 1-1-13 热轧高强度钢板的成分和性能

钢 号	化学成分（%）								σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	横向 180°弯曲 $B=35mm$
	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti				
09MnREL	≤0.12	0.20～0.60	0.70～1.00	≤0.035	≤0.035				≥245	375～470	≥32	$d=0.5a$
16MnREL	0.12～0.20	0.20～0.60	1.20～1.60	≤0.035	≤0.035				≥355	510～610	≥24	$d=a$
16MnL	0.12～0.20	0.20～0.60	1.20～1.60	≤0.035	≤0.035				≥355	510～610	≥24	$d=a$
09SiVL	0.08～0.15	0.70～1.00	0.45～0.75	≤0.035	≤0.035		0.04～0.10		≥355	510～610	≥24	$d=a$
06TiL	≤0.08	≤0.20	0.20～0.50	≤0.035	≤0.035			0.07～0.20	≥245	375～480	≥26	$d=0$
08TiL	≤0.12	0.10～0.40	0.30～0.60	≤0.035	≤0.035			0.07～0.20	≥295	390～510	≥24	$d=0.5a$
10TiL	≤0.14	0.10～0.30	0.50～0.90	≤0.035	≤0.035			0.07～0.20	≥355	510～630	≥22	$d=0.5a$
T52L	0.05～0.12	≤0.20	0.45～0.80	≤0.030	≤0.030			0.07～0.14	≥335	510～630	≥24	$d=0$
T52	≤0.12	≤0.20	≤0.80	≤0.035	≤0.035			≤0.14	≥355	510～630	≥24	$d=0.5a$
T42	≤0.12	≤0.20	≤0.80	≤0.035	≤0.035			≤0.14	≥295	410～530	≥26	$d=0.5a$
B420L	≤0.12	≤0.50	≤1.20	≤0.030	≤0.025	≤0.04			≥305	420～540	≥25	$d=0.5a$
B510L	≤0.16	≤0.50	≤1.60	≤0.030	≤0.025	≤0.06			≥355	510～610	≥24	$d=0.5a$
WL510	≤0.14	≤0.50	≤1.50	≤0.030	≤0.025	≤0.05			≥355	510～610	≥24	$d=a$
QStE 340TM	≤0.12	≤0.50	≤1.30	≤0.030	≤0.025	≤0.09		≤0.22	≥340	420～540	≥25	$d=0.5a$
QStE 380TM	≤0.12	≤0.50	≤1.40	≤0.030	≤0.025	≤0.09		≤0.22	≥380	450～590	≥23	$d=0.5a$
QStE 420TM	≤0.12	≤0.50	≤1.50	≤0.030	≤0.025	≤0.09		≤0.22	≥420	480～620	≥21	$d=0.5a$
QStE 460TM	≤0.12	≤0.50	≤1.60	≤0.030	≤0.025	≤0.09		≤0.22	≥460	520～670	≥19	$d=a$
QStE 500TM	≤0.12	≤0.50	≤1.70	≤0.030	≤0.025	≤0.09		≤0.22	≥500	550～700	≥17	$d=a$

注：09MnREL 和 16MnREL 钢中 RE 加入量 0.02%～0.20%。

4）滚型车轮用热轧钢板

无内胎的滚型车轮具有精度高、重量轻、良好的动平衡性、高的疲劳寿命以及可靠的安全性等优点，在汽车上得到了广泛的应用。目前，全部轿车、轻型客车、小吨位轻型车车轮都采用滚压成形工艺。近来，为改善中吨位载货车的整车性能，也开始采用先进的滚压成形工艺生产车轮。

汽车论坛 http://www.qclt.com

车轮轮辐采用拉延和反拉延生产工艺，制造出形状复杂和疲劳寿命要求高的轮辐；采用旋压工艺，制造形状复杂、重量轻和壁厚均匀的轮辋；闪光对焊和焊接装配中的高焊接质量，这都需要钢板的优异性能的配合。特别是车轮的疲劳寿命，它取决于车轮的结构设计、制造工艺和材料，在结构和工艺一定的条件下，材料就成为影响车轮疲劳寿命的重要因素。

车轮承受汽车的重力、行驶中的侧向力和滚动阻力等，这些力构成作用于车轮上的交变循环应力。其特征为恒应力幅下的弯曲疲劳应力，最终导致车轮疲劳破坏。室内评价车轮疲劳寿命的试验方法有两种：一种是轴向弯曲交变循环负荷，它是将车轮固定，通过与车轮配合的中心轴对车轮施加一个离心力矩，然后轴高速旋转，记录疲劳断裂时的循环周次，称轴向疲劳试验；另一种是通过车轮在左右倾斜状态下的长距离行走，来评价行驶时出现侧向力引起的疲劳破坏，称径向疲劳试验。汽车对车轮的轴向疲劳寿命有明确的性能指标，如奥迪轿车为 60 万次，桑塔纳为 40 万次等。对径向疲劳寿命则没有明确要求。因此，对轴向疲劳寿命作较为深入的探讨。

轴向疲劳试验疲劳裂纹的萌生、扩展至断裂过程，都发生在轮辐上，所以，轮辐钢板的多项指标都影响轴向疲劳寿命，尤以钢板的抗拉强度、厚度和表面质量的影响最为显著。

(1) 钢板抗拉强度对疲劳寿命的影响

众所周知，高周波循环时，钢板的疲劳极限随抗拉强度增加而提高，但并不呈线性关系。钢板弯曲疲劳试验的疲劳极限（σ_{-1}）≈（0.4～0.5）σ_b，轮辐用热轧钢板的测试结果为 σ_{-1}≈（0.433～0.451）σ_b。钢板的抗拉强度对车轮件疲劳寿命的影响曲线如图 1-1-10 所示。可以看出，车轮的台架疲劳寿命随着钢板强度的增加而提高，这种用提高钢板强度来提高车轮的疲劳寿命，是靠增加钢板的疲劳抗力来实现的。奥迪轿车车轮的疲劳寿命要求 60 万次，轮辐用钢板的抗拉强度在 400MPa 以上为宜；而桑塔纳轿车的疲劳寿命为 40 万次，轮辐用钢板的抗拉强度以大于 380MPa 较为合适。

(2) 钢板厚度对疲劳寿命的影响

钢板厚度对疲劳寿命的影响曲线如图 1-1-11 所示。钢板厚度的小量变化，明显影响车轮的疲劳寿命。

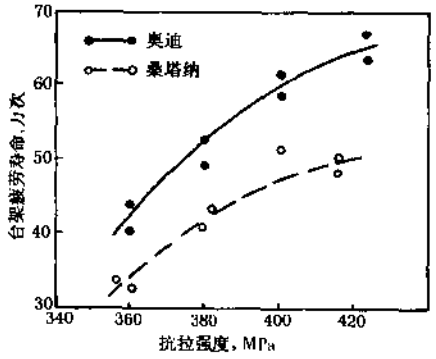


图 1-1-10 强度对疲劳寿命的影响

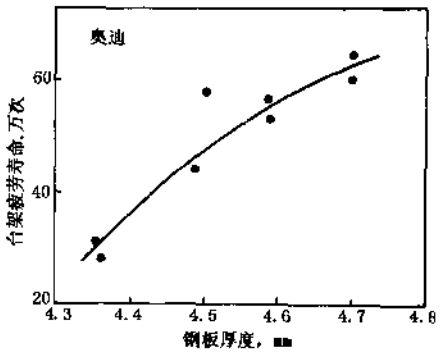


图 1-1-11 厚度对疲劳寿命的影响

因此，对轿车滚型车轮用热轧钢板，其厚度公差带最好为 ±0.10mm 或 $^{+0.20}_{0.00}$mm。

(3) 钢板表面质量对疲劳寿命的影响

车轮的弯曲疲劳最大拉应力位于表面，因此，钢板表面质量严重影响车轮的疲劳寿命。钢板表面存在缺陷，实际上起着缺口作用，特别是缺陷处于拉应力部位时，缺口作用越明显。用同批次钢板生产奥迪轿车车轮时，用 2 200N·m 载荷做强化疲劳试验（正常载荷为 1 800N·m），无明显缺陷钢板生产的车轮，平均疲劳寿命为 18.95 万次；有划痕缺陷钢板生产的车轮，平均疲劳寿命只有 12.03 万次，仅为表面无缺陷车轮的 63.5%，因划痕引起疲劳寿命下降达 36.5%。一般表面质量好的钢板与表面质量不太好（一般）的钢板，疲劳寿命相差 10%～30%，有的更甚。因此，车轮用热轧钢板，哪怕是微小的表面缺陷，都将成为车轮疲劳损坏的起始点。对滚型车轮用钢板，其表面缺陷应予以特别关注。

汽车论坛 http://www.qclt.com

滚型车轮用钢的化学成分和力学性能如表 1-1-14 和表 1-1-15 所示。

表 1-1-14 车轮用钢的化学成分（%）

钢 号	技 术 条 件	C	Si	Mn	P	S	Alt	Ti	Nb
B320LW	BZJ412—99	≤0.12	≤0.05	≤0.60～1.00	≤0.030	≤0.025	≥0.020	—	—
B330CL	Q/BQB310—99	≤0.10	≤0.05	≤0.50	≤0.030	≤0.035	≥0.020	—	—
B380CL	Q/BQB310—99	≤0.12	≤0.05	≤0.60～1.20	≤0.030	≤0.025	≥0.020	—	—
RCL330	协议	≤0.10	≤0.10	≤0.50	≤0.030	≤0.010	≥0.015	—	—
RCL370	协议	≤0.10	≤0.10	≤1.00	≤0.030	≤0.010	≥0.015	—	—
LQ370	鞍汽协 94—2	≤0.08	≤0.15	≤0.40～0.80	≤0.035	≤0.020	0.01～0.06	≤0.020	—
LQ410	鞍汽协 94—7	≤0.10	0.17～0.37	0.40～0.70	≤0.035	≤0.025	—	0.005～0.025	0.005～0.025

注：钢号 B320LW 为车轮轮辋用冷轧钢板，厚度为 2.0～3.0mm，其余钢号均为热轧钢板。

表 1-1-15 钢板的力学性能

钢 号	技 术 条 件	成品厚度 (mm)	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	弯曲 180°，横向 $B=35$mm
B320LW	BZJ412－99	2.0～3.0	≥210	320～410	≥28*	$d=0$
B330CL	Q/BQB310—99	2.5	≥225	330～430	≥33	$d=0.5a$
B380CL	Q/BQB310—99	2.7～5.5	≥260	380～480	≥32	$d=0.5a$
		5.5～10.0	≥235		≥28	$d=a$
		10.0～14.0	≥220		≥25	$d=a$
RCL330	协议	2.5～4.0	≤310	330～430	≥28	$d=0.5a$
RCL370	协议	3.0～6.0	≤275	370～470	≥30	$d=0.5a$
LQ370	鞍汽协 94—2	3.0～5.0	≥260	370～470	≥30	$d=0.5a$
LQ410	鞍汽协 95—7	≤7.0	≥315	410～520	≥26	$d=0.5a$

注：* 拉伸试样的标距 $L_0=80$mm。

5）热轧双相钢板

钢从奥氏体淬火得到马氏体，使其强化，称相变强化或组织强化，这时在软的铁素体基上弥散着一些坚硬的岛状或纤维状的变态相，而形成的复合组织钢称双相钢。

在强度相同时，双相钢具有低的屈服点和低屈强比，高伸长率和加工硬化高以及抗疲劳性能好等特点，受到材料工作者的重视。热轧双相钢多用硅、锰强化。硅是强化铁素体元素，它可以改变碳的分布，加剧碳在奥氏体中的偏聚，进一步净化铁素体，改善了双相钢板的延展性；同时硅提高了 A_3 线的斜率，从而使临界区热处理的温度范围加宽，保证了双相钢性能的一致性和重现性。锰提高了双相钢的淬透性，并具有稳定奥氏体的作用。

在较低的冷却速度条件下，部分奥氏体在冷却时首先转变成铁素体，碳向残余奥氏体中富集，提高了奥氏体的淬透性，在较低温度下转变成马氏体。在淬火状态下，几乎全部原始奥氏体都转变成马氏体，钢中的马氏体量与在两相区的奥氏体相当。所以，冷却速度对控制马氏体量是非常重要的。

我国双相钢是从 70 年代末开始研制，80 年代进行大生产试验，已形成了 Si-Mn 系、Si-Mn-Cr 系和 Si-Mn-Mo 系，其中热轧双相钢板的抗拉强度有 540MPa、590MPa 和 640MPa 三种强度级别，其实际化学成

汽车论坛 http://www.qclt.com

分和力学性能见表 1-1-16。

表 1-1-16 热轧双相钢板的实际成分和性能

钢号	化学成分（%）								σ_S (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	横向弯曲 180° $B=35mm$	a_k U型 (J/cm^2)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	T					
Rs55	0.06～0.065	0.93～0.97	1.06～1.18	0.011～0.014	0.011～0.016	0.80～0.88	—	0.014～0.020	380～465	540～670	25～36	$d=a$	—
Rx60	0.07～0.09	0.84～1.05	1.12～1.41	0.008～0.020	0.004～0.007	0.64～0.97	—	—	369～474	577～662	28～40	$d=0.5a$	200～219
Rx65	0.10～0.11	0.99～1.19	1.09～1.19	0.012～0.020	0.009～0.011	0.43～0.50	0.35～0.44	—	433～491	641～710	24～28	$d=a$	167～201

80 年代初期，曾用热处理得到了 09MnMo 热轧双相钢的组织和性能。钢的化学成分为 0.11%C、0.26%Si、1.2%Mn 和 0.12%Mo，热轧成 3.0～3.5mm 的热轧钢板。在双相区进行热处理，加热温度 780～820℃保温 5min，出炉后采用吹雾冷却，钢板的力学性能为：$\sigma_{0.2}=291\sim313MPa$、$\sigma_b=539\sim568MPa$、$\delta_5=30\%\sim35\%$，无屈服点延伸、冷弯 $d=0$ 合格（$B=35mm$），钢中马氏体量约为 15%。试生产汽车零件“刹车室”、“后桥外壳盖”等件，成形性良好。同时将 09MnMo 热轧双相钢板经 5% 变形后，其屈服强度提高 176.4MPa，而 08Al 钢板只提高 58.8MPa，双相钢板屈服强度的增加是 08Al 钢板的三倍。说明双相钢的高应变硬化能力，这对零件的成形性和使用性有利。

6）相变诱导塑性（TRIP）热轧钢板

当双相钢的抗拉强度大于 800MPa 时，马氏体量在 30% 以上，钢板的成形性能已很差。为此，发展了一种相变诱导塑性钢板，它在高强度时，仍保持良好的塑性。

众所周知，马氏体相变要在 Ms 点以下才能发生。但在应力作用下，在 Ms 点以上某一温度范围内（Ms～Md 间）仍可发生马氏体相变，这种现象称为应变诱发马氏体相变，钢呈现较高的塑性，称相变诱导塑性（Transformation Induced plasticity）。60 年代，美国 V.F.Zackay 教授利用这种效应研制出高强度、高塑性钢。以后许多学者对 TRIP 钢进行了研究，但均以高铬、高镍的奥氏体不锈钢为研究对象，热处理工艺相当复杂，成本极高，没有工业实用前景。近几年，利用 TRIP 效应，试制含有残留奥氏体的冷、热轧钢板，其强度与成形性能的良好匹配，显示出其广泛的应用前景。但仍处于研制阶段。

热控制型 TRIP 钢板的轧制工艺如图 1-1-12 所示。TRIP 钢板轧制工艺参数确定的原则是控制铁素体、贝氏体和残留奥氏体的相对量，以得到强度与塑性的良好配合。终轧温度在 Ar_3 以上有一最佳温度范围。温度太高或太低，残留奥氏体数量都减少。轧制压下量愈大，残留奥氏体也愈多。从终轧温度（T_1）到卷取温度（T_2）之间的冷却速度（CR），既要保证有一定数量的铁素体，又不发生珠光体转变。T_2 在下贝氏体转变温度时，钢的强度较高，塑性好。90 年代，金属研究所曾用 0.15%C-1.2%Si-2.0%Mn 钢，板坯加热 1200℃×1h，经六道次轧制，将 30mm 厚的板坯轧成 2.3mm，终轧温度为 800℃，卷取温度分别为 350℃ 和 400℃，冷却速度分别为 30℃/s 和

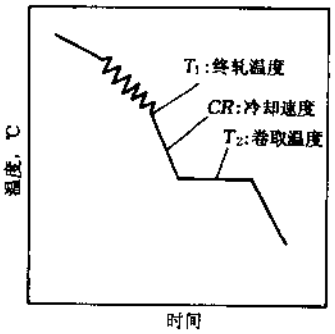


图 1-1-12 TRIP 钢热控制工艺示意图

60℃/s，获得抗拉强度为770～830MPa和伸长率为30%～25%的TRIP热轧钢板。

1.1.1.3 冷轧钢板

冷轧钢板有冷轧铝镇静钢板、超深冲IF冷轧钢板的一般强度级别的冷轧钢板，也有高强度冷轧钢板，如含磷冷轧钢板、烘烤硬化冷轧钢板、冷轧双相钢板和高强度IF冷轧钢板。用户可根据零件的变形大小、受力情况和形状的复杂程度来选择钢板的品种、规格和冲压级别。

1）冷轧铝镇静钢板

冷轧铝镇静钢板具有一般强度和好的塑性，根据冲压级别可分为最复杂拉延（ZF）、很复杂拉延（HF）、复杂拉延（F）、最深拉延（Z）、深拉延（S）和普通拉延六级。由于钢中加入铝，固定了钢中的氮，钢板经冲压成形后，零件表面不产生滑移线，称非时效钢。是目前汽车上用量最大的冷轧钢板。主要用于车身驾驶室、车头和车尾（行李箱）等冲压件。它的化学成分和力学性能见表1-1-17、表1-1-18。

滑移线是指冷轧钢板在未变形前，钢板表面光洁平整，当钢板冲压变形时，在零件表面出现凹凸不平的溢流条纹；或者在做拉伸试验时，当应力接近屈服点，在拉伸试样表面呈现横着拉伸方向或与拉伸方向成45°～60°角度的条纹。这种溢流条纹称滑移线。拉伸变形继续进行，拉伸负荷却保持不变或略有下降。这时负荷—变形曲线出现明显的屈服伸长，也称屈服平台。平台的长短，反映冷轧钢板成形后零件表面滑移线的严重程度。滑移线高度可用下式计算：

$$\Delta f = \frac{t_0}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{e+1}}-1\right)$$

式中：Δf——滑移线高度，mm；

t_0——钢板厚度，mm；

e——屈服伸长，%。

表1-1-17 冷轧铝镇静钢板的成分和性能

钢号	冲压级别	厚度(mm)	化学成分（%）						σ_s(MPa)	σ_b(MPa)	δ_{10}(%)
			C	Si	Mn	P	S	Alt			
08Al	ZF	全部	≤0.08	痕迹	≤0.40	≤0.020	≤0.030	0.02～0.07	≤195	255～325	≥44
	HF								≤205	255～335	≥42
	F	>1.2							≤215	255～345	≥39
		1.2							≤215	255～345	≥42
		<1.2							≤235	255～345	≥42
	Z		0.05～0.12	≤0.030	0.25～0.65	≤0.035	≤0.035	0.015～0.065		275～390	≥32
	S								—	275～410	≥30
	P								—	275～410	≥28
St12	—	0.35～3.50	≤0.10	—	≤0.50	≤0.035	≤0.035	—	≤280	270～410	≥28
St13			≤0.08	—	≤0.45	≤0.030	≤0.035	—	≤240	270～370	≥34
St14			≤0.08	—	≤0.40	≤0.020	≤0.030	≥0.025	≤210	270～350	≥38
St15			≤0.06	≤0.030	≤0.35	≤0.020	≤0.025	0.025～0.07	≤195	250～330	≥40

注：1）St12～St15的拉伸试样为$b_0=20$mm、$L_0=80$mm。

2）钢号St13、St14和St15的钢板（带），在供货6个月内不产生滑移线；钢号St12（FC）在供货10周内不产生滑移线。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-18 冷轧钢板的顶压值（杯突深度，mm）

厚度 (mm)	08Al钢板的拉延级别						St12	St13	St14			St15
	ZF	HF	F	Z	S	P			F	HF	ZF	
0.5	9.5	9.3	9.1	9.0	8.4	8.0	8.8	9.5	9.6	9.7	9.8	
0.6	9.8	9.6	9.4	9.4	8.9	8.5	9.0	9.8	9.8	9.9	10.0	
0.7	10.3	10.1	9.9	9.7	9.2	8.9	9.2	10.0	10.1	10.2	10.3	
0.8	10.6	10.5	10.3	10.0	9.5	9.3	9.4	10.2	10.3	10.5	10.6	
0.9	10.8	10.7	10.5	10.3	9.9	9.6	9.6	10.3	10.5	10.7	10.8	
1.0	11.2	10.8	10.7	10.5	10.1	9.9	9.8	10.5	10.7	10.8	11.2	
1.1	11.3	11.0	10.9	10.8	10.4	10.2	9.9	10.7	10.9	11.0	11.3	
1.2	11.5	11.2	11.1	11.0	10.6	10.4	10.1	10.8	11.1	11.2	11.5	
1.3	11.7	11.3	11.3	11.2	10.8	10.6	10.2	11.0	11.2	11.3	11.7	
1.4	11.8	11.4	11.4	11.3	11.0	10.8	10.4	11.1	11.4	11.4	11.8	
1.5	12.0	11.6	11.5	11.5	11.2	11.0	10.5	11.2	11.5	11.6	12.0	
1.6	-	11.8	11.7	11.6	11.4	11.2	10.6	11.3	11.6	11.8	-	
1.7	-	12.0	11.9	11.8	11.6	11.4	10.7	11.5	11.7	12.0	-	
1.8	-	12.1	12.0	11.9	11.7	11.5	10.8	11.6	11.8	12.1	-	
1.9	-	12.2	12.1	12.0	11.8	11.7	11.0	11.7	11.9	12.2	-	
2.0	-	12.3	12.2	12.1	11.9	11.8	11.1	11.8	12.1	12.3	-	

冷轧退火钢板具有最佳的塑性，但拉伸时出现屈服伸长。退火钢板经0.8%～2.0%的冷轧平整后，屈服伸长得到消除。

滑移线的存在，严重影响零件的表面质量和外观，对于汽车的外表面件，不允许有滑移线；对于密封件，则影响密封质量。同时，滑移线的严重程度与零件变形量的大小有关。生产实践表明，当零件的变形量<1.5%或者>10%时，冷轧钢板虽有屈服伸长，也不容易产生滑移线。只有变形量在1.5%～10%特别是在2%～8%时，零件表面则呈现严重的滑移线。

为防止滑移线的产生，汽车用冷轧钢板，宜采用非时效钢，即在钢中添加一定的铝、钒、钛或硼，以固定钢中的氮。已产生滑移线的冷轧钢板，可用多辊平整机平整来消除。

另外，冷轧钢板表面还有一种“脆裂线”和“折摺线”，人们往往把它们视为滑移线，故称伪滑移线。当冷轧钢板受弯曲应力产生一组与材料轧向垂直的等距条线，称“脆裂线”；当紧卷退火造成粘结，开卷时已粘结的钢板经撕开并平整，形成与轧向垂直的条纹，称“折摺线”。其特点垂直于轧向，冷轧钢板在未成形前，可明显观察到等距条纹，所以是表面缺陷，而不是滑移线。

2）超深冲IF冷轧钢板

在碳≤80ppm的超低碳钢中，加入足够量的强碳、氮化合物形成元素钛、铌，或钛与铌，使钢中的碳、氮原子完全被固定成碳氮化合物（Ti（C,N））、Nb（C,N）），钢中无间隙原子存在，这种钢称“无间隙原子钢”（Interstitial Free Steel）。

汽车论坛 http://www.qclt.com

目前，随着冶金工业的技术进步，如真空脱气炼钢技术和连续退火技术在钢铁生产中的应用，超低碳IF冷轧钢板已大量应用于汽车生产，并形成IF镀锌钢板、IF高强度钢板，IF高强度烘烤硬化钢板，IF镀铝钢板和IF不锈钢板等系列品种。90年代、IF钢的年产量已逾3 000万·t，已成为汽车用冷轧钢板的一种主要钢种。

在IF钢中，根据添加的微合金元素不同，可将IF钢分为Ti-IF钢、Nb-IF钢和（Ti+Nb）-IF钢三类。工业生产超低碳钢（C：10～50ppm），若不经过Ti或Nb微合金化处理，其{111}退火织构不强，r值不高。因为微合金化处理是为了消除固溶体中的间隙原子（C.N），得到纯净的铁素体基体。钢中加入钛和铌的量，要使钢中的碳、氮原子被完全固定，使纯净的铁素体中无间隙原子存在，这是IF钢的冶金学基础。所以，IF冷轧钢板具有以下特点：

①钢中的杂质元素含量低，钢质纯净，使IF冷轧钢板具有高的塑性。而高塑性是各类冲压成形件的塑性变形的重要指标。

②低的屈服强度和低屈强比的IF冷轧钢板，在冲压成形时，具有低的起始形变抗力和大的塑性功。钢板的起始形变抗力低，意味着钢板易于变形，而大的塑性功，说明钢板的塑性储量大。

③高的伸长率是钢板塑性良好的具体反映，对于单拉成形件，伸长率更为重要，

④高塑性应变比r值和高应变硬化指数n值，使钢板具有很优异的成形性能，而高r值和n值，要求钢板具有强的{111}织构和纯洁而较为粗大的铁素体晶粒（5～6级）。

⑤IF冷轧钢板，由于钢中碳、氮被完全固定，已显示钢板无时效性，即使退火钢板的冷平整为0.5%时，时效指数AI≈0。

塑性应变比r值的物理意义，就是描述薄板抵抗变薄的能力。当垂直于薄板的强度（厚向强度）＞薄板表面的平均强度，$\bar{r}>1$，说明薄板具有高的抗变薄能力；当薄板的厚向强度和面向强度相等时，$r=1$，说明薄板为各向同性，即厚向变形等于平面变形。

应变硬化指数n值，它描述了材料的应变硬化率，可由下式来定义：

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^{n}$$

式中：σ、ε——真应力和真应变；

K——为强度系数。

具有高n值的薄板，在冲压过程中，零件变形大的部位优先硬化，变形量减弱，而变形小的部位的薄板，因硬化小而继续变形，并促使其金属向变形大的部位流动，使整个零件变形均匀化，延缓了局部缩颈的出现，从而提高了钢板的深冲性能。

钢中存在过剩相，降低了n值，而n值又与晶粒大小有关，可用W·B摩立逊的关系式来解释：

$$n = \frac{5}{10 + d^{-1/2}}$$

式中：d——为晶粒度平均直径，mm。

对于低碳钢，n值与钢板的σ_s/σ_b有关，并可用$\sigma_s/\sigma_b=\left(\frac{C}{n}\right)^{n}$来计算$n$值。式中$\sigma_s/\sigma_b$为屈强比，$C$为常数，对低碳钢，$C=0.02$。

IF钢中的超低碳含量（C：10～50ppm），是用RH真空脱气处理得到的。但在连铸过程中和合金化时，钢水要增碳，因此，采用无碳耐火材料，低碳合金元素、多炉IF钢连浇以减少与其它钢种的交接坯，将增碳控制在10ppm以内。因为碳含量的增加，不仅降低钢板的r值和n值，而且增加了钢板的屈服强度，降低其伸长率，都对钢板的深冲性能造成很不利的影响。同时，钢中元素总量将降低钢板的平面应变，将IF钢中的元素总量控制在0.2%以内也很有必要。

IF冷轧钢板的深冲性能，主要取决于强的{111}织构，纯净铁素体的晶粒尺寸和无时效性。这均与钢的化学成分、轧制工艺有关。钢板r值随钢中Ti/（C+N）的比值增加而提高，增加钢中钛含量，比值升高，但钢中钛的碳、氮化合物增加，既不利于r值，也不利于n值。因此，要想提高Ti/（C+N）的比值，最佳方案是降低钢中的碳和氮的含量，使Ti/（C+N）＞10，可获得高r值。轧制工艺对r值的影

汽车论坛 http://www.qclt.com

响主要是冷轧压下率和退火温度，因为高的冷轧压下率，有利于{111}织构的发展，对于IF钢，当冷轧压下率>75%时，45°方向的r值急剧上升到大于0°方向（轧向）的r值，而平均$\bar{r}$值是加权平均值，即$\bar{r}=(r_{90°}+r_{0°}+2r_{45°})/4$，因此，45°方向的$r$值增加，意味着$\bar{r}$值的急剧增加。晶粒尺寸对$r$值的影响，是由于$r$值与晶粒度之间存在一种直线关系，可用方程式表达：$\bar{r}=\bar{r}_0-KN$。

式中：$\bar{r}_0$——对于同成分和同轧制工艺的钢板为常数；

K——本身就是一种常数；

N——晶粒度号数。

因此，$\bar{r}$值的大小取决于晶粒度号数，号数越大，$\bar{r}$值越高。r值随晶粒长大而提高，是因为再结晶的{111}晶粒吞并其它取向的再结晶晶粒。

超深冲IF冷轧钢板的标准为宝钢企业标准，标准号为BZJ408-99。其化学成分和力学性能见表1-1-19和表1-1-20。

3）含磷高强度冷轧钢板

表1-1-19 IF钢的化学成分

钢号	来源	C	Si	Mn	P	S	Alt	N	Ti	Nb
St16	BZJ408-99	≤0.008	≤0.03	≤0.30	≤0.020	≤0.015	≤0.07	≤0.0041	注1	注2
St16	检验统计 注3	0.001~0.004 0.00283	0.01~0.02 0.0133	0.13~0.15 0.14	0.009~0.013 0.011	0.006~0.008 0.00767	0.027~0.037 0.031	0.001~0.003 0.00167	0.047~0.070 0.0608	—

注①Ti=（4C+3.43N+1.5S）·（1~4）

注②Nb=（0.01~0.3）Ti

注③检验统计数据，分子为范围值，分母为平均值。

表1-1-20 IF钢板的力学性能

钢号	来源	σ_s（MPa）	σ_b（MPa）	δ（%）$L_0=80$mm	r值	$\bar{n}$值	σ_s/σ_b
St16	BZJ408-99	≤190	260~330	≥41	≥1.8	≥0.22	-
St16	检验统计	131~190 146.18	285~310 294.77	42~49 45.55	1.80~2.60 2.1177	0.22~0.25 0.2405	0.46~0.61 0.496

注：检验统计数据，分子为范围值，分母为平均值。

用高强度冷轧钢板制造汽车车身及其它冲压件，是汽车轻量化和节约油耗的需要。含磷冷轧钢板主要用来生产轿车外板、车门、顶盖和行李箱盖外板以及其它冲压件，也可用于载货车驾驶室和车箱等冲压件。80年代，我国正处于开发研究汽车用含磷冷轧钢板阶段，进入90年代，逐步形成含磷高强度钢板系列。如鞍钢生产的06AlP、08AlP和10AlP系；宝钢生产的BP340和BP400系；武钢生产的WP340、WP370和WP390系。已在中型载货车和轻型载货车上得到了不同程度的应用。如CA1092载货车的用量约占冷轧钢板用量10%。

含磷高强度冷轧钢板具有许多优点，因而受汽车工业界的广泛关注。

①当磷原子进入铁原子晶格内，与铁原子置换形成固溶体。由于磷和铁原子的半径不同，在磷原子周围产生弹性变形而使钢强化。磷的强化能力很强，低碳钢中每增加0.01%的磷，屈服强度提高4.1~5.5MPa；每增加0.1%的锰（10倍磷含量），屈服强度提高4.1MPa；每增加0.1%硅，屈服强度提高4.9~8.0MPa。不难看出，要获得与含磷钢强度相当的冷轧钢板，必须添加大量的锰或者硅，既降低了钢板的塑性，又会增加钢的生产成本。

②含磷冷轧钢板具有较高的强度，比08Al冷轧钢板的强度约高15%~25%。

③含磷冷轧钢板呈现出良好的强度和塑性平衡。通常随着钢板强度的增加，伸长率和 n 值下降，但含磷冷轧钢板随着强度的增加，伸长率和 n 值下降具微。以抗拉强度 340MPa 的含磷冷轧钢板为例，当平均的屈服强度为 235MPa、抗拉强度与 390MPa 时，其平均伸长率仍达 40%，n 值保持在 0.22 的较高水平。

④含磷冷轧钢板具有较高的塑性应变比 r 值，其数值与 08Al（ZF－F 级）或 St14 冷轧钢板相当，约为 1.4～1.8（平均 $\bar{r}$ 值）。一般情况下，含磷冷轧钢板的高 r 值，主要是钢中 AlN 的贡献，其退火织构为 {111}〈110〉；当冷轧压下率大于 70%，其退火织构以 {111}〈112〉为最强，钢板 45°方向的 r 值得到提高，从而显示出含磷冷轧钢板的高 $\bar{r}$ 值。

⑤含磷冷轧钢板具有好的点焊性能，可与 08Al 冷轧钢板媲美。汽车车身的装配均由点焊组装而成，要求薄板在短时间内获得全部饱满并以拉长破坏方式为特征的点焊熔核，这就要求薄板具有好的点焊性能。

⑥含磷冷轧钢板的耐腐蚀性能明显优于 08Al 冷轧钢板。按暂行盐雾试验标准测得的腐蚀试验结果，含磷冷轧钢板的抗腐蚀率比 08Al 冷轧钢板的提高 20%。这是由于盐雾试验后，钢板表面生成疏松的棕色外锈层，并形成黑色致密的内锈层，其内锈层含磷冷轧钢板比 08Al 钢板更致密。X-射线衍射分析表明，棕色外锈层为 $r-Fe_2O_3 \cdot H_2O$，黑色内锈层主要为尖晶石型的 Fe_3O_4，形成一层氧化铁的致密保护膜。钢中的磷有助于形成这种保护膜，从而提高了钢板的耐腐蚀性能。

⑦含磷冷轧钢板还具有一定的烘烤硬化性能，这是 08Al 冷轧钢板不具有的。因此，磷是烘烤硬化钢板常用元素。钢中随着磷含量的增加，烘烤硬化值（BH 值）提高，是由于磷具有加速碳原子扩散速度的作用。一般含磷铝镇静冷轧钢板有 10～17MPa 的 BH 值，而 08Al 冷轧钢板的 BH 值几乎为零。

⑧磷是深冲高强度冷轧钢板和超深冲高强度冷轧钢板的主要添加元素，见表 1-1-21。

表 1-1-21 含磷高强度冷轧钢板品种

冲压级别	冷轧钢板品种	强度级别（MPa）
深冲级	加磷铝镇静冷轧钢板	340～440
	加磷铝镇静烘烤硬化冷轧钢板	340
超深冲级	加磷超低碳高强度 IF 冷轧钢板	340
	加磷超低碳烘烤硬化冷轧钢板	340
	加磷热镀锌超低碳 IF 冷轧钢板	

另外，磷对冷轧钢板性能也有不利影响：

①磷在钢中容易偏析，其偏析大于硫和碳等元素。由于磷加入钢中，扩大液相线与固相线间的距离，从液态至固态需要通过较宽的温度区域，使含磷浓度较高的钢液充填在先已凝固的枝晶夹缝中而形成磷的偏析。如钢板采用连铸生产，可减少磷对钢的偏析作用。

②磷有较明显的冷脆倾向。钢中的碳含量越高，磷引起的冷脆性越大。在低磷软钢中，当磷含量从 0.017%增至 0.103%，脆性转变温度上升；磷含量再增至 0.122%和 0.228%，不仅脆性转变温度上升，冲击韧性也显著下降。因此，含磷冷轧钢板的磷含量应＜0.12%，最好＜0.10%，同时还应降低钢中的碳含量。

③由于磷的偏析作用，含磷冷轧钢板的力学性能较分散；受强度的制约，成形性能有一定的局限性；回弹和侧壁扭曲均比低碳软钢板要大。影响含磷冷轧钢板的弹性回复的主要因素是屈服强度，同时屈服强度还决定起皱的弹塑性性质。对于高屈服强度的高强度钢板，失稳为弹性；对于低屈服强度的冷轧钢板，失稳为塑性。随着屈服强度增加，回弹加大，侧壁扭曲增加，而且零件的起皱高度也在增加。

含磷冷轧钢板的化学成分和力学性能见表 1-1-22。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-22 化学成分和力学性能

钢号	化学成分（%）						σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_{10} (%)	$\bar{r}$ 值	$\bar{n}$ 值	弯曲 180° $B=35$mm
	C	Si	Mn	P	S	Alt						
06AlP	≤0.06	≤0.04	≤0.35	0.05～0.08	≤0.020	0.02～0.07	≥215	340～420	≥35	≥1.4	≥0.19	d=0
08AlP	≤0.08	≤0.06	≤0.70	0.06～0.12	≤0.025	0.02～0.07	≥250	380～470	≥32	≥1.2	≥0.17	d=0
10AlP	≤0.14	0.20～0.40	≤1.00	≤0.14	≤0.025	0.02～0.07	≥290	440～560	≥24	–		d=a
BP340	≤0.07	≤0.05	≤0.40	0.05～0.10	≤0.025	0.02～0.08	≥190	≥340	≥30	–	–	d=0
BP400	≤0.09	≤0.05	≤0.40	0.05～0.10	≤0.025	0.02～0.06	≥230	≥400	≥30	–	–	d=0
WP340	≤0.08	≤0.05	≤0.50	≤0.10	≤0.03	≤0.08	≥175	340～410	≥30	≥1.4	≥0.19	d=0
WP370	≤0.08	≤0.05	≤0.50	≤0.12	≤0.03	≤0.08	≥205	370～440	≥28	≥1.2	≥0.19	d=0
WP390	≤0.08	≤0.05	≤0.50	≤0.12	≤0.03	≤0.08	≥235	390～460	≥31	≥1.2	≥0.17	d=0

注：①表中的 $\bar{r}$ 和 $\bar{n}$ 值不作交货条件。

②BP340 和 BP400 冷轧钢板的拉伸试样为：$L_0=80$mm。

③钢板测试杯突深度，但不作保证值。

含磷冷轧钢板的实际化学成分和力学性能见表 1-1-23。

表 1-1-23 实际化学成分和力学性能

钢号	化学成分（%）						σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_{10} (%)	$\bar{r}$ 值	$\bar{n}$ 值
	C	Si	Mn	P	S	Alt					
06AlP	0.03～0.06	0.018～0.042	0.26～0.33	0.059～0.08	0.016～0.028	0.015～0.079	220～300 255.7	360～420 392.8	37.5～42.5 40.4	1.39～1.75 1.49	0.20～0.242 0.223
08AlP	0.04～0.08	0.01～0.04	0.32～0.43	0.07～0.89	0.012～0.020	0.02～0.08	250～320 284.1	380～440 403.69	32～39 34.87	1.15～1.40 1.27	0.185～0.25 0.2103
10AlP	0.08～0.11	0.01～0.04	0.62～0.80	0.087～0.107	0.014～0.022	0.028～0.06	320～365 345.38	440～510 485.71	26～36 31.15	–	–
BP340	0.042～0.06	0.028～0.033	0.23～0.32	0.065～0.085	0.006～0.009	0.042～0.058	238～265 247.42	377～393 384.67	36.5～41 39.01	1.47～1.736 1.5777	0.2023～0.22 0.2115
BP400	0.04～0.06	0.032～0.034	0.25～0.28	0.065～0.077	0.010～0.011	0.049～0.068	317～331.5 323.17	420～427 423.67	36.5～37 36.83	1.19～1.41 1.266	0.18～0.22 0.1916
WP340	0.04～0.07	0.01～0.03	0.20～0.30	0.055～0.068	0.002～0.024	0.02～0.07	228.5～293 252.83	340.5～400 366.63	35～46 38.63	1.663～1.82 1.7573	0.199～0.216 0.2097
WP370	0.05～0.066	0.014～0.02	0.25～0.32	0.073～0.093	0.004～0.024	0.04～0.063	25～361 258.5	363～425 385.75	35～43 39.09	1.42～1.64 1.5067	0.20～0.22 0.2167
WP390	0.03～0.06	0.01～0.03	0.27～0.38	0.081～0.090	0.009～0.031	0.02～0.07	265～328 288.32	366.5～439 384.45	30～42 34.73	1.486～1.64 1.588	0.205～0.208 0.2067

注：力学性能指标分子为波动范围，分母为平均值。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-24 含磷冷轧钢板的硬化性能

钢号	σ_s（MPa）	σ_b（MPa）	δ_{10}（%）	WH+BH(MPa)	WH(MPa)	BH(MPa)
06AlP	255	393	40	68	53	17
08AlP	285	405	35.5	63	52	11
BP340	238.5	370	39.0	65	50	15
BP400	279	421	34.5	59	46	13
08Al	180	310	42.0	64	61	3

注：WH——加工硬化值；BH——烘烤硬化值。

4）烘烤硬化冷轧钢板

汽车在行驶中，车身外部件经常受沙石的碰击，因而产生凹坑。一般认为，凹坑深度取决于薄板的厚度和屈服强度，它是（厚度）$^m\times\sigma_s$ 的函数，式中 m 数值约为 2。增加钢板厚度，会增加车重和油耗，而提高屈服强度，又使钢板深冲性能恶化，因此烘烤硬化钢板应运而生。这就要求薄板在冲压成形前具有较低的屈服强度，经冲压成形或预拉伸变形后，并经烤漆温度时效处理，薄板的屈服强度可以得到一定程度的提高，这种薄板称烘烤硬化钢板，简称 BH 钢板。

将拉伸试样经 2% 预变形后，加热至 170℃ 并保温 20min，然后重新加载至屈服点，加热前后屈服强度的增量为烘烤硬化值，简称 BH 值。

铝镇静烘烤硬化钢板的碳含量与罩式退火温度的简要关系如图 1-1-13 所示。一般铝镇静钢板的碳含量约 0.05% 左右，在临界温度下用罩式退火，如 C 区所示。均热时，碳在铁素体内溶解大于 100ppm，在缓慢冷却中析出渗碳体。提高退火温度到 B 区（A_1 以上），渗碳体在晶界上少量析出。当钢中碳含量降到小于 0.02%，如 A 区，均热时不存在渗碳体。并且对退火温度的敏感性减弱，对 BH 值的有效固溶碳约为 8～15ppm。碳含量高对 BH 冷轧钢板有不利影响。磷在铁素体中的分布是不均匀的，均热时易在晶界上偏聚，增加磷含量，可以抑制碳的析出，增加了 BH 值。硅抑制碳的扩散速度，延缓碳在过饱和固溶体中析出，增加了 BH 值。锰增加碳在饱和固溶体中析出，降低了 BH 值。

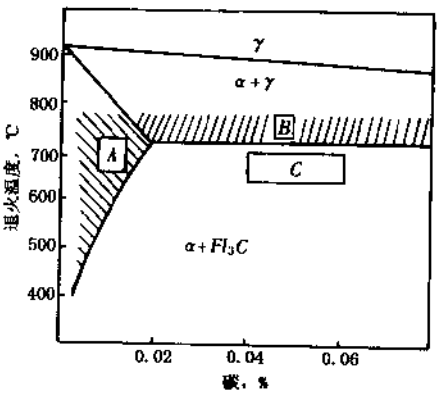


图 1-1-13 碳与退火温度的关系

对于烘烤硬化冷轧钢板的 BH 值，主要决定钢中的固溶碳量，当固溶碳量为 10ppm 时，BH 值在 40MPa 以上；固溶碳为 30ppm，BH 达到最大值（约 100MPa）。再增加固溶碳，BH 值几乎不增加，因此，烘烤硬化钢板的有效固溶碳量应为 8～15ppm。

温度对 BH 值的影响比较大，当烘烤温度低于 230℃ 时，BH 值随温度升高而增加；当温度在 230～280℃，BH 值为最大值，再升高温度，BH 值下降；到 350℃ 时，BH 值降到最小值。

随着钢板 BH 值的增加，时效性增大。可用时效指数（AI）来评价钢板的时效倾向。所谓时效指数是拉伸试样在预拉伸 7.5% 的屈服应力与随后 100℃ 加热 30min 后的屈服应力的差值称时效指数，用 AI 表示。如冷轧钢板的 AI＜30MPa 时，钢板可在 3 个月内不产生时效。时效指数和烘烤硬化性均为不同的时效处理，因此，随 BH 值增加，AI 数值也增加，它们之间有好的对应关系。具有相同 BH 值的冷轧钢板，似乎罩式退火的 AI 值要小于连续退火的 AI 值，可能是连续退火的冷却速度快，固溶碳增加或者固溶碳易于在位错处聚集的缘故。有人认为，烘烤硬化钢板要想获得高 BH 值，如 60MPa 的 BH 值，而其屈服伸长又控制在 0.2% 左右，必须加大退火冷轧钢板的冷轧平整量，其数值应大于 1.6%。

抗凹陷性是烘烤硬化钢板的重要特性，目前尚无统一的试验方法，只能用比较的办法，来衡量某一种钢板比另一种钢板具有好的抗凹陷性。08Al 冷轧钢板和 BH 冷轧钢板，加工成圆片，然后成形成带法兰盘平底的圆锥体，锥体高视平底部位约 2% 变形终止，因此，锥体高相同，平底变形也相同。将圆锥体中的

汽车论坛 http://www.qclt.com

1/2 经高温时效处理（170℃×20min），在相同负载下用钢球压一小坑、用千分表测量小坑深度。结果如表 1-1-25 所示。

表 1-1-25 BH 冷轧钢板的抗凹陷性能

钢 号	厚度（mm）	加载负荷 P（N）	烘烤前凹坑深度（mm）	烘烤后凹坑深度（mm）	备 注
08Al	0.9	600	~0.45	~0.45	无变化
BH340	0.9	600	~0.30	~0.15	提高一倍
BH340	1.2	1000	~0.25	~0.225	提高 10%

表 1-1-25 给出，同厚度的 BH 钢板和 08Al 钢板，烘烤后的抗凹陷性提高了一倍。

烘烤硬化冷轧钢板的实际成分和性能见表 1-1-26。

表 1-1-26 实际成分和性能

钢 号	化学成分（%）						σ_s（MPa）	σ_b（MPa）	δ_{10}（%）	$\bar{r}$ 值	$\bar{n}$ 值	BH 值（MPa）
	C	Si	Mn	P	S	Alt						
A220BH	0.04~0.08	0.037	0.22~0.28	0.048~0.065	0.012~0.013	0.029~0.035	210~250 220	370~380 373.5	37~40 38	1.285 1.285	0.2375 0.2375	31.05
WBH	0.038~0.05	0.01~0.02	0.23~0.27	0.064~0.074	0.013~0.019	0.020~0.041	200~260 238.57	360~390 381.23	40~44 40.68	1.613	0.2289	39.47
BH340	0.02~0.026	0.02~0.022	0.15~0.23	0.097~0.103	0.007~0.009	0.031~0.041	200~270 221.1	340~390 362.62	35~44 40.3	1.6366	0.2386	39.45
BH340*	0.01~0.03	0.01~0.02	0.16~0.23	0.062~0.097	0.006~0.012	0.041~0.050	210~260 231.5	360~400 380.3	35~40 38.7	1.5842	0.2297	53.74

注：*连续退火

5）冷轧双相钢板

当冷轧钢板加热到 Ac1～Ac3 温度范围后，经空冷或急冷，得到铁素体＋弥散马氏体；加热在 Ac1～Ac3 之间，从生成的奥氏体中得到马氏体，此时，冷却速度是决定因素。如果冷却速度小，要提高奥氏体的势能，必须增加钢中 Mn、Si、Cr 等元素的含量。研究结果表明，冷却速度与奥氏体势能（可用锰当量 Mneq 表示）有如下关系。logCR（冷却速度）＝1.11 Mneq＋2.75，其中 Mneq = Mn + 3.28Mo + 1.29Cr + 0.46Cu + 0.37Ni + 0.07Si。Mneq 当量越大，在奥氏体中 C、N 等元素的浓度越大，使 CCT 曲线长时间向右侧移动，在缓慢冷却时也能形成马氏体。影响最大的元素有 Mo、Cr 和 Mn。当钢中元素含量固定，可以大约估计临界冷却速度，或者确定临界冷却速度，来推算钢中添加合金元素含量或种类。尽管如此，当冷速度为 10～100℃/s，双相钢仍有约 5% 的残留奥氏体。

冷轧双相钢板，采用连续退火或罩式退火，但必须具有高的退火温度、较大的冷却速度和窄的退火温度及冷却速度控制范围。

冷轧双相钢板具有连续屈服、屈强比低和加工硬化高以及高强度和高塑性兼备的特点，适用于零件形状较复杂且要求强度高的冲压件。

双相钢的强度取决于马氏体存在的体积比率，马氏体的体积比率对冷轧双相钢板的拉伸性能的影响示于图 1-1-14。可以看出，抗拉强度随马氏体体积比率的增加而提高。但屈强比在比率约 15% 时出现一个最低值，增大或减小其比率，钢的屈强比均增加。

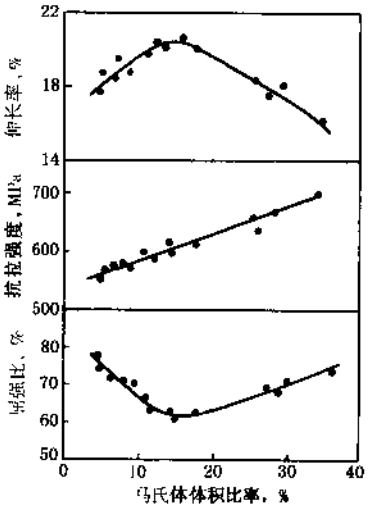


图 1-1-14 马氏体比率对拉伸性能的影响

双相钢的抗拉强度可用 $\sigma_b=\sigma_M\cdot V_M+\sigma_F\cdot(1-V_M)$。式中 σ_b 为双相钢的抗拉强度，σ_M 和 σ_F 分别为马氏体和铁素体的强度，V_M 为马氏体的体积百分数。

由于双相钢的强度取决于钢中马氏体存在的比率，为获得强度和塑性良好的平衡，马氏体的比率应为10%～20%，最佳值为15%。

同时冷轧双相钢板还具有好的烘烤硬化性能，其烘烤硬化BH值可达40～60MPa。冷轧双相钢板主要用于轿车车门加强板、后货箱盖板、保险杠和车轮等件。我国研制冷轧双相钢的实际成分和性能见表1-1-27。

表1-1-27 冷轧双相钢板的实际成分和性能

钢号	化学成分（%）						σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	σ_s/σ_b	$\bar{r}$ 值	$\bar{n}$ 值
	C	Si	Mn	P	S	Al						
SX540	0.12	0.94	2.09	0.017	0.006	0.03	405	560	28.10	0.71	1.04	0.201

6）超低碳高强度冷轧钢板

在超低碳钢（C≤0.005%、N≤0.004%）中加入适量的钛或铌，使钢中C、N原子被固定成碳氮化合物（Ti（C.N）、Nb（C.N））来保证钢板的深冲性能；添加相应量的磷实现置换固溶强化，以提高钢板的强度，这种钢称超低碳高强度冷轧钢板。它将IF钢的超深冲性与固溶强化机制相结合，实现深冲性与高强度的合理匹配，对于汽车上一些形状复杂且强度要求较高的难冲件更为合适。展望未来，它在汽车上的应用范围将愈来愈广，已成为汽车冲压用钢——超低碳系列产品之一。

80年代初，新型“IF钢”的问世，标志着新一代汽车冲压钢板的诞生，也为超低碳高强度钢板的研制奠定了基础。

超低碳钢中固定C、N原子的处理方式有三种，即Ti处理、Nb处理或（Ti+Nb）复合处理。超低碳高强度冷轧钢板表现为强烈发展的{111}退火织构；一定量的磷原子置换固溶，使其提高强度的同时具有IF钢的深冲性；粗大的铁素体晶粒和较纯净的铁素体基体，从而构成了超低碳高强度钢板独特的冶金学特点。Nb的加入量应按下式考虑：Nb=（0.7～1.2）·93/12·C wt%。

式中93和12分别为铌和碳的原子量。如果再加入Ti，其Ti量应为Ti=48/32·S+48/14·N wt%。

式中48、32和14分别为钛、硫和氮的原子量。磷的加入量可根据钢板的强度而定，一般为0.05～0.12%，磷含量过低强化效果差，磷含量过高磷的不利因素加强，钢板的深冲性受损害。其它元素含量应控制在很低的水平，以保证钢质纯净。

冶炼工艺应保证钢质纯净，浇铸工艺应保证纯净化的钢质不受污染，如增碳，当然，增碳是必然的，但应控制在5ppm以内；热轧工艺的选择应有利于碳氮化物（Ti（C.N）、Nb（C.N））的析出、聚集和粗化；冷轧工艺应采用大于75%的冷轧压下率和高温退火（连续退火温度＞830℃），保证一定的冷轧平整量，以满足消除屈服平台和具有一定板形和表面形貌的要求。

超低碳高强度冷轧钢板的实际成分如表1-1-28所示。

表1-1-28 超低碳高强度冷轧钢板实际成分

钢号	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ti	Nb
BIF340	0.004	0.01	0.33～0.36	0.042～0.044	0.005～0.008	0.032	0.002	<0.02	0.027～0.031

超低碳高强度冷轧钢板的实际性能如表1-1-29所示。

表1-1-29 实际性能（薄板公称厚度为0.9mm）

钢号	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ（%） $L_0=80$mm	$\bar{r}$ 值	$\bar{n}$ 值	CCV值 (mm)	锥杯比 η	扩孔率 λ（%）
BIF340	192～200 194.9	350～375 366.2	36.53～40 38.57	2.064～2.1582 2.0927	0.25～0.2663 0.2579	36.55～37.1 36.768	0.272～0.277 0.2738	125.7

注：分子为波动范围，分母为平均值。

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.1.1.4 表面处理钢板

目前，各国都在为延长汽车使用寿命而制订防腐目标。一般保证轿车车身的外观锈蚀为 1.5～5 年，孔腐蚀为 5～10 年。

提高汽车车身的防腐蚀能力，最有效的办法是使用表面处理钢板，如镀锌钢板。锌是一种两性金属，易受酸或强碱的浸蚀，锌在中性或弱碱性介质中，表面形成氧化锌、氢氧化锌和碳酸锌，阻碍了锌继续腐蚀，因此，镀锌钢板在轿车车身上得到了广泛的应用。目前我国轿车用镀锌钢板的情况见表 1-1-30。

表 1-1-30 几种车型用钢板情况

车型 / 品种	富康		切诺基		奥迪	
	每车用量（kg）	（%）	每车用量（kg）	（%）	每车用量（kg）	（%）
1. 冷轧钢板	138.1	19.86	175.6	24.87	145.8729	19.08
2. 热轧钢板	29.0	4.17	23.09	3.27	85.9676	11.25
3. 电镀锌钢板	125.6	18.06	103.03	14.59	202.3858	26.48
4. 热镀锌钢板	392.6	56.47	404.36	57.27	326.8688	42.76
5. 镀铝钢板	10	1.44	—	—	3.3343	0.43
共 计	695.3	100	706.08	100	764.4292	100

富康轿车用单面热镀锌钢板每车为 319.2kg，占钢板总量的 45.9%；而切诺基越野车用高强度热镀锌钢板每车为 130.16kg，占钢板总量的 18.43%，这是它们用镀锌钢板的显著特点。

1）电镀锌钢板

电镀锌钢板主要用于轿车车身外部件，要求钢板具有好的耐腐蚀性能、成形性能和涂漆性能。一般认为，随着镀锌钢板的锌层附着量的增加，耐腐蚀性能提高，但成形性和焊接性要降低。它们之间的关系如图 1-1-15 所示。

图 1-1-15 示出了它们之间的定性或者半定量的对应关系。可以看出，随着锌层附着量的增加，耐蚀

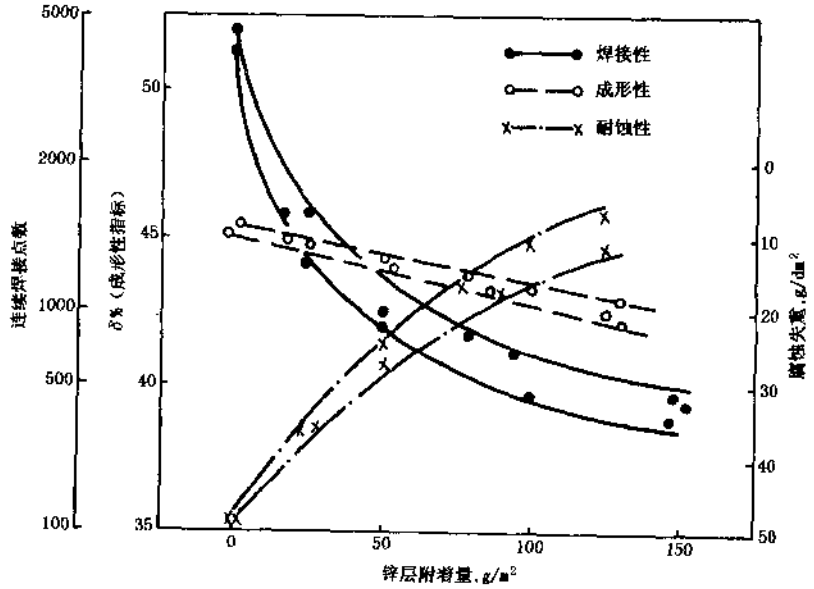


图 1-1-15 锌层附着量与耐蚀性、焊接性和成形性的关系

性能明显增加，焊接性能显著降低，而反映钢板成形性的指标延伸率则略有下降。

目前我国生产的电镀锌钢板标准按宝钢 Q/BQB430—99 标准生产。其化学成分、力学性能、工艺性能和其它性能见表 1-1-31～表 1-1-36。

表 1-1-31 电镀锌钢板的化学成分

用途	钢号	原板钢号	脱氧方式	化学成分（%）							
				C	Ni	Mn	P	S	Ti	Nb	Al
一般用	SECC	SPCC	铝镇静	≤0.12	≤0.05	≤0.05	≤0.035	≤0.035	—	—	—
冲压用	SECD	SPCD	铝镇镇	≤0.10	≤0.03	≤0.45	≤0.030	≤0.035	—	—	—
深冲用	SECE	SPCE	铝镇静	≤0.08	≤0.03	≤0.40	≤0.025	≤0.030	—	—	—
超深冲用	SECIF	BIF	铝镇静	≤0.008	≤0.03	≤0.03	≤0.020	≤0.015	≤0.008	≤0.005	≤0.008

注：①SECC、SECD 和 SECE 为引进的钢号，但成分已作了调整。

②SECIF 为宝钢新开发的 IF 电镀锌钢板。

表 1-1-32 电镀锌钢板的力学性能

钢号	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ（%） $L_0=50$mm	下列厚度的伸长率 δ（%）（$b_0=25$mm，$L_0=50$mm）						$\bar{r}$ 值	n 值
				≤0.40	0.4～<0.6	0.6～<1.0	1.0～<1.6	1.6～<2.5	≥2.5		
SECC	—	≥270	—	≥32	≥34	≥36	≥37	≥38	≥39	—	—
SECD	—	≥270	—	≥34	≥36	≥38	≥39	≥40	≥41	—	—
SECE	—	≥270	—	≥36	≥38	≥40	≥41	≥42	≥43	—	—
SECIF	≥180	260～330	≥41	—	—	—	—	—	—	1.8	≥0.22

注：对平整的 SPCE（SECE）钢板和钢带，在供货 6 个月内不应产生滑移线。

表 1-1-33 电镀锌钢板的杯突值

钢号 / 厚度（mm）	SECC	SECD	SECE		
			F	HF	ZF
0.4	7.2	7.6	8.0	—	—
0.5	8.0	8.4	9.1	9.3	9.5
0.6	8.5	8.9	9.4	9.6	9.8
0.7	8.9	9.2	9.9	10.1	10.3
0.8	9.3	9.5	10.3	10.5	10.6
0.9	9.6	9.9	10.5	10.7	10.8
1.0	9.8	10.1	10.7	10.8	11.2
1.2	10.1	10.6	11.1	11.2	11.5
1.4	10.4	11.0	11.4	11.4	11.8
1.6	10.6	11.3	11.7	11.8	—

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-34 电镀锌钢板的锌层附着量

标准镀锌量（单面）（g/m²）	镀层厚度（单面）（μm）	最小锌层量（单面）（g/m²）	
		等厚镀锌量	差厚镀锌量
10	1.4	8.5	8
20	2.8	17	16
30	4.2	25.5	24
40	5.6	34	32
50	7.0	42.5	40
60	8.4	51.0	48
70	9.8	59.5	56
80	11.2	68	64

表 1-1-35 钢板和钢带的表面处理

表面处理种类	代号	作用
铬酸系处理	C	主要是为了减少产品在运输和储存期间产生白锈
涂油	O	主要为了减少产品产生白锈
磷酸系处理	P	主要是为钢板进一步涂漆作表面处理，也可减少产品产生白锈
铬酸系处理+涂油	S	为进一步减少产品产生白锈
不处理	M	极易产生白锈，供方对此不作保证

对镀锌层应进行弯曲试验。弯曲 180°，试样宽度 $b_0=75\sim125$mm，$d=0$ 时不得发生锌层脱落。

表 1-1-36 IF 电镀锌钢板的实际性能

钢号	厚度（mm）	σ_s（MPa）	σ_b（MPa）	δ（%）$l_0=80$mm	$\bar{r}$ 值	$\bar{n}$ 值
SECIF	0.8	142～170 150.46	286～305 296.96	40～48 44.32	2.0～2.23 2.1656	0.22～0.2575 0.2314

注：分子为波动范围，分母为平均值

目前，由于汽车用表面处理钢板的综合性能（成形性、耐蚀性、焊接性和涂漆性）要求越来越高，数量在迅速增加，各主要汽车生产国的钢厂对电镀锌钢板生产线建设加快，见表 1-1-37。

表 1-1-37 80 年代西欧国家新建的主要电镀锌生产线

国家	投产日期	最大速度（m/min）	最大宽度（mm）	最大厚度（mm）	产品品种
奥地利	1985 年	90	1600	1.5	ZE.ZNE
法国	1983 年	180	1830	2.0	ZE.ZNE
德国	1985 年	90	1570	1.8	ZNE.TE
	1986 年	180	1950	1.6	ZE
	1987 年	80	1600	3.0	ZE
	1987 年	180	1850	2.0	ZE
	1987 年	180	1900	2.5	ZE
意大利	1986 年	60	1400	1.6	ZE.MZ
	1987 年	70	1600	1.5	ZE.MZ
	1988 年	80	1800	2.0	ZE.
卢森堡	1983 年	90	1500	3.0	ZE
英国	1986 年	70	1700	2.0	ZE

注：ZE——电镀锌，ZNE——锌-镍合金，TE——锌-铁合金，MZ——多层电镀锌。

汽车论坛 http://www.qclt.com

1982～1988年，日本新日铁、川崎、NKK、住友、神户和日新六大钢铁企业新建10条电镀锌生产线，月生产能力达22.95万·t，可生产电镀锌、合金电镀锌和有机涂层电镀锌钢板。

电镀锌钢板的成形性能和焊接性能良好，但因镀锌层较薄、耐蚀性能较差。为此，开发了锌铁、锌镍、锌—铝等合金镀层钢板及在合金镀层上再电镀一层富铁层的电镀锌钢板，可防止锌—铁合金层在正离子沉积电镀过程中，当钢板表面性能不均匀时，会产生弧坑形缺陷。但由于纯铁层不易溶于磷酸，难于获得细小的磷酸盐的成核作用。如在纯铁层中加入锌或磷，可改善磷酸盐处理性能，使其达到与冷轧钢板性能相当的水平。

锌—镍合金镀锌钢板应用广泛，因为Zn-Ni合金的镀层中的镍含量在10%～16%时，镀层具有γ单相层，镀层中不会形成微原电池，且腐蚀产物主要是$Zn(OH)_2$，这种化合物的导电性差，抑制了镀层表面的氧化还原反应，从而表现出优异的耐腐蚀性，有效地防止了孔腐蚀和锌层剥落。

目前，国外双层铁—磷/锌—铁和双层铁—磷/锌—镍电镀锌钢板已经用于汽车的外板件。同时真空蒸气镀锌钢板已经问世，这将对汽车用电镀锌钢板的质量是一个极大的推动。

2）热镀锌钢板

热镀锌钢板主要用于汽车的内部件，但富康轿车大量用单面热镀锌钢板生产内部件和外部件。热镀锌钢板在解决成形性和焊接性后，代替电镀锌钢板生产汽车外部件，这是一种发展趋势。80年代，欧共体国家新建10条热镀锌生产线；80年代和90年代初，日本新建年生产能力为24～48万·t的生产线15条，累计年产量近500万·t；90年代，美国新建6条生产线，年产量达200万·t，显示出热镀锌钢板的良好发展前景。

目前我国生产的热镀锌钢板，其化学成分、工艺性能和其它性能见表1-1-38～表1-1-42。

表1-1-38 热镀锌钢板的化学成分

钢号	符号	化学成分（%）						
		C	Si	Mn	P	S	Ti	Nb
St01Z	—	≤0.12	—	≤0.50	≤0.035	≤0.035	—	—
St02Z	PT							
St03Z	JY							
St04Z	SC							
St05Z	CS							
St06Z	—	≤0.008	≤0.03	≤0.30	≤0.020	≤0.015	≤0.08	≤0.05
St07Z	—	≤0.008	≤0.03	≤0.30	≤0.020	≤0.015	≤0.08	≤0.05
StE250-2Z	JG	≤0.16	—	≤0.60	≤0.035	≤0.035	—	—
StE280-2Z	JG	≤0.20	—	≤0.80	≤0.035	≤0.035	—	—

表1-1-39 热镀锌钢板的力学性能和工艺性能

钢号	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ (%) (L_0=80mm)	锌层代号	锌层弯曲 180° b_0=50～100 (mm)	用途
St01Z	—	—	—	001～350	$d=a$	适用于制造形状简单的产品，如波纹板，钢盖板等
				450～600	$d=2a$	
St02Z	—	270～500	—	001～350	$d=0$	适用于制造厚度≤1.5mm的机械咬合产品及厚度≤0.9mm的翻卷咬合产品和普通形状产品

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ (%) ($L_0=80mm$)	锌层代号	锌层弯曲 180° $b_0=50\sim100$ (mm)	用途
St03Z	—	270～420	≥24	001～275	$d=0$	适用于拉延、冲压成形产品及厚度＞0.9mm的翻卷咬合产品
St04Z	—	270～380	≥30	001～275	$d=0$	适用于要求高变形性能的深拉延产品及制造较厚的形状复杂的产品
St05Z	—	270～380	≥30	001～275	$d=0$	适用于要求高变形性能的深拉延产品及制造较厚的形状复杂的产品
St06Z	≤200	270～350	≥40	001～275	$d=0$	适用于深拉延和超深拉延产品及制造较厚的形状很复杂的产品
St07Z	≤180	270～350	≥43	001～270	$d=0$	适用于超深接延及制造较厚的形状最复杂的产品
STE 250～2Z	≥250	330～470	≥19	001～450	$d=a$	适用于使用钢板和钢带供货状态下力学和工艺性能的结构件产品
				600	$d=2a$	
STE280～2Z	≥280	370～510	≥18	001～600	$d=2a$	

表 1-1-40 热镀锌钢板的杯突值

厚度 (mm)	下列钢号的杯突值 (mm)		厚度 (mm)	下列钢号的杯突值 (mm)	
	St03Z	St04Z、St05Z		St03Z	St04Z、St05Z
0.5	7.4	8.2	1.3	9.6	10.2
0.6	7.8	8.5	1.4	9.7	10.3
0.7	8.1	8.9	1.5	9.9	10.5
0.8	8.4	9.1	1.6	10.0	10.6
0.9	8.7	9.3	1.7	10.2	10.8
1.0	9.0	9.6	1.8	10.3	10.8
1.1	9.2	9.8	1.9	10.4	11.0
1.2	9.4	10.0	2.0	10.5	11.1

表 1-1-41 钢板的锌层重量

代号	类别	三点试验平均值（双面）(g/m^2)	单点试验平均值（双面）(g/m^2)	表面结构	表面处理
001	001g/m²	—	—	①正常锌花	①铬酸钝化
100	100g/m²	100	85	②小锌花	②涂油
180	180g/m²	180	150	③光整锌花	③铬酸钝化＋涂油
275	275g/m²	275	235		
350	350g/m²	350	300		
450	450g/m²	450	385		
600	600g/m²	600	510		

汽车论坛 http://www.qclt.com

新开发的 IF 热镀锌钢板的实际性能如表 1-1-42 所示。

表 1-1-42 IF 热 镀 锌 钢 板

钢 号	厚度 (mm)	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ (%) $L_0=80$mm	$\bar{r}$ 值	$\bar{n}$ 值
IF 热镀锌板	0.7~1.6	151~230 187.97	275~320 296.84	39~50 44.00	1.43~2.69 1.8285	0.19~0.24 0.2122

注：分子为波动范围，分母为平均值。

现代热镀锌钢板生产的工艺及技术进展主要围绕着以下几方面：

①由于现代汽车工业对热镀锌钢板的深冲性要求越来越高，增加了超深冲 IF 热镀锌钢板，以满足零件形状复杂和工艺合并的要求。

②表面结构。可分为正常锌花、小锌花和光整锌花三种，它对冲压、涂漆等后道工序有重要影响，应从热镀锌生产线对表面结构的影响考虑工艺和设备。如用喷锌粉法增加锌花的结晶核，生产小锌花热镀锌钢板；用无铅锌液生产镀层表面均匀和无锌花热镀锌钢板；用氮气气刀吹刮，使锌层均匀并生产单面热镀锌钢板。

③镀锌特性。深冲和超深冲级热镀锌钢板，要求镀锌层能随基板的变形而变形，就必须从工艺参数来考虑镀层对钢基的附着力。通常用退火前的电解脱脂，以增强锌层与钢基的附着力；钢板进入锌锅的温度和锌锅温度，使其对力学性能的损失为最小值；锌液中铝含量的精确控制，以提高热镀锌钢板的抗粉化能力。

④计算机在控制过程中的应用，操作自动化，新型监测设备的发展等，保证了热镀锌钢板的优异性能。还可通过镀锌线上锌锅的替换，生产出两种或三种不同的镀层产品，如纯镀锌、合金镀锌等。

⑤用调整带钢两面不同的吹气气刀的压力，可生产差厚热镀锌钢板；用剥离法，保护膜法和真空蒸气镀法，可生产单面热镀锌钢板。

⑥钢板经连续镀锌线热镀锌后立即进入锌锅上方的合金化退火炉中进行合金化退火，可得到含铁量为 10% 的铁—锌合金层，这种钢板称合金化热镀锌钢板。

⑦Galvalume 合金镀层钢板（55%Al，1.66%Si，其余为 Zn），兼有镀锌和镀铝的性能，裸露耐蚀性能特别好，既耐大气腐蚀，又具有抗高温氧化性，可在 300℃ 下长期使用，其耐腐蚀性能比一般热镀锌钢板高 4～6 倍，因而获得迅猛的发展。

⑧Galfarn 合金镀层钢板（5%Al，0.03%～0.1%RE，其分为 Zn）不仅具有优异的耐腐蚀性（比一般高 2～3 倍），而且还具有良好的成形性能和涂漆性能，适合用于深冲和超深冲级的热镀锌钢板。

3）镀铝钢板

镀铝钢板具有良好的抗高温氧化性和耐腐蚀性能，主要用于汽车排气系统的排气管和消声器。随着汽车工业的发展，镀铝钢板的要求量在急剧增加，目前，世界热镀铝钢板的生产能力已在 300 万·t 以上，其中 70% 用来生产汽车排气管和消声器等零件。

镀铝钢板约在 550℃ 时长期使用，由于镀铝钢板表面生成稳定的氧化物，镀铝层不直接与大气接触，因此，表面仍保持原有的光泽。在更高温度下，由于铁—铝相互扩散形成合金层，表面呈深灰色。镀铝钢板在加热过程中，铁—铝合金层逐渐扩大，表面形成高温氧化层，可以抑制镀铝钢板氧化。在 500～600℃，镀铝钢板的耐热性能可与 18-8 不锈钢板媲美，比冷轧钢板优秀 20 倍以上。同时镀铝钢板还具有良好的热反射性能，在 500℃ 时，其热反射率约为镀锌钢板的 5 倍。在弱酸介质中，耐蚀性能远高于镀锌钢板；但在弱碱性介质中，其耐蚀性不如镀锌钢板。

镀铝钢板的镀铝层较软，面导电性又较强，焊接散热性优于冷轧钢板，焊接电流小。但铝容易粘附在焊头上，使焊接打点性明显下降。一般镀铝层量为 40g/m^2 的焊接打点次数约 900 次，当镀铝层量提高到 80g/m^2 时的焊接打点次数降到 500 次，明显呈现出镀铝量对焊接性能的不利影响。

为提高热镀铝钢板镀层的附着性和耐热性，在铝液中加入 1%～10% 的硅，生产铝—硅合金镀层钢

汽车论坛 http://www.qclt.com

板；为提高热镀铅钢板的高温抗氧化性能，可用超低碳 IF 冷轧钢板作基板，生产耐高温氧化性镀铅钢板，其抗高温氧化性接近低碳不锈钢板；在铅液中加入一定量的镍和铬，生产出铅—镍—铬合金镀层板，具有更好的耐热性和耐腐蚀性能；同时，在底层涂环氧树脂，表层涂聚乙烯，可生产高耐热涂漆钢板和基板加铬的高耐腐蚀镀层钢板，以提高对排出废气凝聚水的耐蚀性。

4）镀铅钢板

汽车油箱一般用镀铅、镀铅—锡合金、镀锌钢板和塑料等材料制造，在我国，汽车油箱多用热浸镀铅钢板生产。油箱用镀铅钢板的力学性能和工艺性能如表 1-1-43 和表 1-1-44 所示。

表 1-1-43 力 学 性 能

钢 号	拉延级别	厚度 (mm)	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_{10} (%)	弯曲 180°（横向）
08AlA	J	0.5～2.0	≤225	275～375	≥39	$d=0$
08Al	Z	0.5～2.0	—	275～390	≥32	$d=0$
	S	0.5～2.0	—	275～410	≥30	$d=0$
	P	0.5～2.0	—	275～410	≥28	$d=0$

表 1-1-44 钢 板 的 杯 突 值

拉延级别 / 厚度(mm)	拉延级别				拉延级别 / 厚度 (mm)	拉延级别			
	J	Z	S	P		J	Z	S	P
0.5	9.2	9.0	8.4	8.0	1.3	11.4	11.2	10.8	10.6
0.6	9.6	9.4	8.9	8.5	1.4	11.5	11.3	11.0	10.8
0.7	9.9	9.7	9.2	8.9	1.5	11.7	11.5	11.2	11.0
0.8	10.2	10.0	9.5	9.3	1.6	11.8	11.6	11.4	11.2
0.9	10.5	10.3	9.9	9.6	1.7	12.0	11.8	11.6	11.4
1.0	10.7	10.5	10.1	9.9	1.8	12.1	11.9	11.7	11.5
1.1	11.0	10.8	10.4	10.2	1.9	12.2	12.0	11.8	11.7
1.2	11.2	11.0	10.6	10.4	2.0	12.3	12.1	11.9	11.8

东风汽车公司已大量采用专门标准的镀锌钢板制作汽油箱。

1.1.1.5 树脂复合钢板

1）减振钢板

由两块钢板中间夹一层树脂阻尼材料复合可制成树脂复合钢板，其树脂层厚为 0.05mm 左右。它继承了钢板强度高塑性好和树脂阻尼性好的双重特性，由于树脂具有好的粘弹特性，它能吸收机械振动能使之转变成热能并释放出去，达到减少振动降低噪声的效果。

树脂材料在 -40℃ 到 80℃ 时，其阻尼性能有明显的变化，随着温度升高，损耗因子增加，在某一温度下达到最大值，然后随温度升高而减小。树脂材料的阻尼性达到最大值的某一温度称玻璃化温度。不同树脂具有不同的玻璃化温度，因此，可根据不同使用温度来选择树脂。一般分常温和高温减振钢板，它们又有热可塑性型和热硬化型之分。一般讲，当使用温度（包含油漆烘烤温度）较高时，宜用热硬化型，否则用热可塑性型减振钢板。

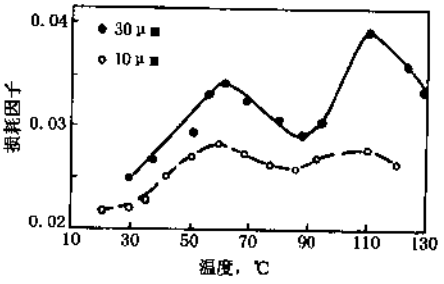


图 1-1-16 不同厚度树脂的损耗因子随温度变化曲线

在不同温度下，随着树脂厚度的增加，减振效果增加。见图 1-1-16。可以看出，两条曲线有相同的玻璃化温度，说

明树脂层厚度对玻璃化温度没有影响或影响甚微。随着树脂厚度的增加，减振效果越好，特别是在峰值处更为明显。但是，随着树脂厚度的增加，减振钢板的成形性能有下降的趋势。减振钢板的回弹比冷轧钢板大，其数值随着粘接强度的增加而减小。减振钢板的点焊性能不如冷轧钢板，为改善其点焊性能，可在树脂中加入导电粒子，如镍粉，但增加了成本；也可以采用在两钢板点焊时加一个回路，但降低生产率；还可用不通电流的冲压凸焊等。尽管如此，只要选择合适的焊接规范，减振钢板是可焊的。

我国对减振钢板进行了较多的室内性能试验与研究工作，特别是粘接强度方面取得了很好的进展。同时在点焊、起皱和回弹以及成形性诸方面都有不同程度的研究。目前，国内已形成年产 2 万 t 的减振钢板生产线，即将用于汽车油底壳等件的生产。

2）减重钢板

减重钢板亦称轻质钢板，它是由薄钢板（冷轧板、表面处理板）把塑料夹在中间，在不损失材料刚性的同时减轻重量。一般中间塑料层的厚度约等于两层表皮钢板的厚度，这样可减轻重量约 50%。一辆汽车从制造到报废，材料生产能耗占 10%；车体制造能耗占 5%；而行驶能耗占 85%。因此，减重不仅意味着材料的节约，更意味着能耗的节约。

目前汽车减重，采用高强度钢板是重要措施之一，但厚度减薄，会使刚性下降。采用轻质钢板，在厚度不变或变化很小的情况下，可大幅度降低重量。但塑料与钢板，因其变形速率的不一致性，特别是表皮钢板较薄，承受拉延时的能力以及钢板与塑料之间的粘接强度，均对轻质钢板的成形性产生影响，而点焊性能也因塑料层较厚而恶化，目前尚处在研究与试验阶段。我国也准备在这个领域开展研究工作，因为轻质钢板大幅度减轻重量对汽车生产是很有吸引力的。

1.1.1.6 不锈钢板

汽车用不锈钢板，主要有消声器外壳层用的耐热不锈钢板和装饰用的耐腐不锈钢板。不锈钢板有奥氏体型、铁素体型、奥氏体—铁素体型、马氏体型和沉淀硬化型。一般不锈钢的铬含量不低于 11%，如 1Cr12 的铬含量为 11.5%～13.0%，这是铁素体型不锈钢的最低铬含量。随着钢中铬含量的增加，耐腐蚀性提高，但铁素体型不锈钢板的加工性、焊接性不如奥氏体型不锈钢板（奥氏体型钢中含有 Cr，Ni 甚至 Mo），对于排气系统中与发动机接触的支管装置和转换器，由于工作温度高达 800℃左右，宜选用低碳奥氏体不锈钢板；至于工作温度较低的尾管和靠近尾管的消声器以及前管、中间管，可部分用不锈钢板和镀铝钢板，以降低汽车成本。主要不锈钢板的化学成分和力学性能见表 1-1-45～表 1-1-49。

表 1-1-45 主要奥氏体型钢的化学成分

类型	钢号	化学成分（%）							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	其它
奥氏体型	1Cr17Ni8	0.03～0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	16.0～18.0	7.0～9.0	—
	1Cr18Ni9	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0～19.0	8.0～10.0	—
	0Cr18Ni9	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0～19.0	8.0～11.0	—
	00Cr19Ni10	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	18.0～20.0	8.0～12.0	—
	0Cr19Ni9N	≤0.08	≤1.00	≤2.50	≤0.035	≤0.030	18.0～20.0	7.5～10.5	N：0.10～0.25
	0Cr19Ni10NbN	≤0.08	≤1.00	≤2.50	≤0.035	≤0.030	18.0～20.0	7.5～10.5	N：0.15～0.30 Nb≤0.15
	00Cr18Ni10N	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0～19.0	8.5～11.5	N：0.12～0.22
	0Cr18Ni12Mo2Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	16.0～19.0	11.0～14.0	Mo：1.8～2.5 Ti：5×C%～0.70

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

类型	钢号	化学成分（%）							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	其它
奥氏体铁素体型	00Cr18Ni5Mo3Si2	≤0.03	1.30~2.00	1.00~2.00	≤0.030	≤0.030	18.0~19.5	4.5~5.5	Mo：2.5~3.0 N≤0.10
	1Cr18Ni11Si4AlTi	0.10~0.18	3.4~4.0	≤0.80	≤0.035	≤0.030	17.5~19.5	10.0~12.0	Ti：0.40~0.70 Al：0.10~0.30
	1Gr21Ni5Ti	0.09~0.14	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	20.0~22.0	4.8~5.8	Ti:5(C%-0.02)~0.80
	0Cr26Ni5Mo2	≤0.08	≤1.00	≤1.50	≤0.035	≤0.030	23.0~28.0	3.0~6.0	Mo：1.0~3.0
铁素体型	0Cr13Al	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.5~14.5	—	Al：0.10~0.30
	00Cr12	≤0.030	≤1.00	≤0.01	≤0.035	≤0.030	11.0~13.5	—	—
	1Cr15	≤0.12	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	14.0~16.0	—	—
	00Cr17Mo	≤0.025	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	16.0~19.0	—	Mo：0.75~1.25 N≤0.025
	00Cr30Mo2	≤0.010	≤0.40	≤0.40	≤0.030	≤0.020	28.5~32.0	—	Mo：1.5~2.5 N≤0.015
马氏体型	1Cr12	≤0.15	≤0.15	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.5~13.0	—	Ni≤0.60
	2Cr13	0.16~0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	12.0~14.0	—	Ni≤0.60
	3Cr13	0.26~0.35	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	12.0~14.0	—	Ni≤0.60
	4Cr13	0.36~0.45	≤0.08	≤0.08	≤0.035	≤0.030	12.0~14.0	—	Ni≤0.60
	7Cr17	0.60~0.75	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	16.0~18.0	—	Mo≤0.75
	1Cr17Ni2	0.11~0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	16.0~18.0	1.50~2.50	—

表 1-1-46 经固溶处理的奥氏体型钢的力学性能

钢号	拉伸试验			硬度试验		
	$\sigma_{0.2}$（MPa）	σ_b（MPa）	δ_5（%）	HB	HRB	HV
1Cr17Ni8	≥205	≥570	≥45	≤187	≤90	≤200
1Cr18Ni9	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
0Cr18Ni9	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200
00Cr19Ni10	≥177	≥480	≥40	≤180	≤90	≤200
0Cr19Ni9N	≥275	≥550	≥35	≤217	≤95	≤220
0Cr19Ni10NbN	≥345	≥685	≥35	≤250	≤100	≤260
00Cr18Ni10N	≥245	≥550	≥40	≤217	≤95	≤220
0Cr18Ni12Mo2Ti	≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-47 经固溶处理的奥氏体—铁素体型钢的力学性能

钢 号	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	HB	HRC	HV
00Cr18Ni5Mo3Si2	≥390	≥590	≥20	—	≤30	≤300
1Cr18Ni11Si4AlTi	—	≥715	≥30	—	—	—
1Cr21Ni5Ti	—	≥635	≥20	—	—	—
0Cr26Ni5Mo2	≥390	≥590	≥18	≤277	≤29	≤292

表 1-1-48 经退火处理的铁素体型钢的力学性能

钢 号	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	HB	HRC	HV	弯曲 180° d——弯心直径 a——钢板厚度
0Cr13Al	≥175	≥410	≥20	≤183	≤88	≤220	$a<8$mm $d=a$ $a\geq8$mm $d=2a$
00Cr12	≥190	≥365	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
1Cr15	≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	≤200	$d=2a$
00Cr17Mo	≥245	≥410	≥20	≤217	≤96	≤230	$d=2a$
00Cr30Mo2	≥295	≥450	≥22	≤209	≤95	≤220	$d=2a$

表 1-1-49 经退火处理的马氏体型钢的力学性能

钢 号	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	HB	HRC	HV	弯曲 180° d——弯心直径 a——钢板厚度
1Cr12	≥205	≥440	≥20	≤200	≤93	≤210	$d=a$
2Cr13	≥225	≥520	≥18	≤223	≤97	≤234	$d=2a$
3Cr13	≥225	≥540	≥18	≤235	≤99	≤247	—
4Cr13	≥225	≥590	≥15	—	—	—	—
7Cr17	≥245	≥590	≥15	≤255	HRC≤25	≤269	—
1Cr17Ni2	—	≥1080	≥10	—	—	—	—

不锈钢板的全面情况可查阅 GB3280 标准及有关资料。（撰稿人：谭善锟）

1.1.2 钢管

汽车用钢管数量不多，以五吨载货汽车为例，每车耗用无缝钢管约 52kg，电焊钢管约 28kg，双层卷焊钢管约 6kg，共消耗钢管约 86kg，占钢材消耗总量的 2.54%。

1.1.2.1 生产工艺

无缝钢管、电焊钢管和双层卷焊钢管的生产工艺不同，分别简介如下：

无缝钢管由连铸方坯或由钢锭经初轧机轧成的方坯经无缝钢管轧机轧制而成，其生产工艺流程如图1-1-17。

电焊钢管（薄壁、直缝）用冷轧钢带经成形、焊接、去除焊渣、冷却、整径切断等工序制成，其生产工艺的示意图如图 1-1-18 所示。

汽车论坛 http://www.qclt.com

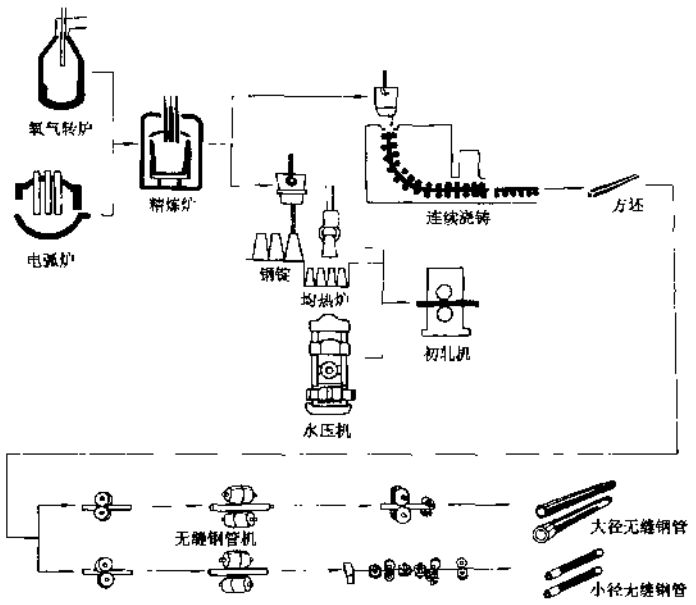


图 1-1-17 无缝钢管的生产流程示意图

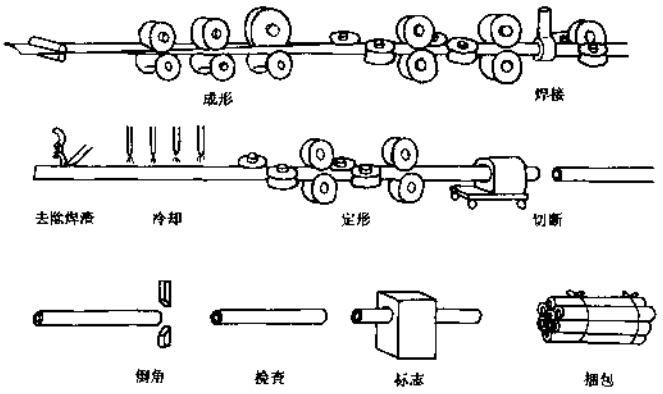


图 1-1-18 直缝电焊钢管生产工艺示意图

双层卷焊钢管是用镀铜的低碳冷轧钢带经过管成形后，在还原性气氛中加热，使铜熔化作为钎焊材料进行焊接而成。这种管是双壁的，单带型和双带型焊管均为 360°焊接结构，见图 1-1-19。

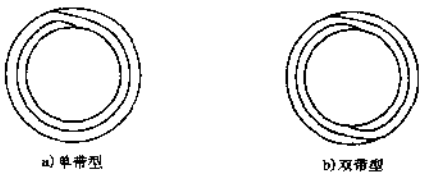


图 1-1-19 双层卷焊管的焊接结构

1.1.2.2 无缝钢管的应用情况及性能数据

无缝钢管分为热轧（挤压、扩）和冷拔（轧）两种，热轧钢管的尺寸较大，可以生产最大外径为 630mm、最大壁厚为 75mm 的钢管，但钢管的精度较差；冷拔管的尺寸较小，可以生产最小外径为 6mm、最小壁厚为 0.25mm 的钢管，而且尺寸精度较高。用户可以根据需要的尺寸（外径、壁厚）和要求的精度选用钢管，按“GB8162—87 结构用无缝钢管”标准供货。用这类钢管制造的典型零件如转向拉杆和各种套管。

汽车上用无缝钢管制造的重要零件是半轴套管，对于半轴套管，国家冶金行业有专用标准（YB/T5036—1966 汽车半轴套管用无缝钢管），标准中规定的钢管尺寸及其允许偏差列于表 1-1-50。

钢管用 45，45Mn2、40MnB、40Cr 和 20CrNi3A 牌号的钢制造，根据用户要求，经供需双方协商，可以生产其他牌号的钢管。钢管的化学成分应符合 GB699 和 GB3077 的规定。钢管交货等的力学性能应符合表 1-1-51 的规定。

表 1-1-50 汽车半轴套管用无缝钢管及尺寸允许偏差（YB/T5035—1996）（mm）

钢管尺寸		按外径和壁厚供应的钢管的尺寸允许偏差	按外径、内径和壁厚供应的钢管的尺寸允许偏差	外径 77mm、内径为 57mm、壁厚为 10mm 的钢管的尺寸允许偏差
外径	壁厚			
76	7	外径（D） $\pm1\%$ 壁厚 $S\leqslant7$mm $^{+15\%}_{-9\%}$ 7mm$<S\leqslant$15mm $^{+12.5\%}_{-10\%}$ $S>15$ $^{+12.5\%}_{-7.5\%}$	外径（D） $\pm1.0\%$ 内径（d） $\pm1.75\%$ 壁厚差（ΔS）$\leqslant$15%公称壁厚	外径 $^{+1.0\text{mm}}_{-0.3\text{mm}}$ 内径 $^{+1.5\text{mm}}_{-0.5\text{mm}}$ 壁厚差（ΔS）$\leqslant$15%公称壁厚
77	10			
80	11.5			
83	11			
89	16			
92	12			
95	12			
95	13			
96	12			
96	15			
102	13.5			
108	15			
114	16			
114	20			
114	26			
114	28.5			
121	20.5			

注：钢管的弯曲度：壁厚 $S\leqslant15$mm，1.5mm/m；壁厚 $S>15$mm，3.0mm/m。

表 1-1-51 钢管交货状态的力学性能

序 号	钢 号	力学性能			
		σ_b（MPa）	σ_s（MPa）	δ_5（%）	布氏硬度 HB
1	45	≥590	≥335	≥14	—
2	45Mn2	—	—	—	217～269
3	40MnB	—	—	—	217～269
4	40Cr	—	—	—	217～269
5	20CrNi3A	—	—	—	217～269

注：对于 20CrNi3A 制造的钢管，表列硬度值供参考。

1.1.2.3 电焊钢管的应用情况和性能数据

汽车用的电焊钢管外径较小，一般在 100mm 以下，壁厚较薄，一般在 2.5mm 以下，用于制造消声器进气管和尾管等零件。

钢管用钢的牌号和力学性能列于表 1-1-52。它们的化学成分应符合有关标准的规定。

钢管除了进行强度性能试验外，对于外径不大于 219.1mm 的钢管应承受外径压缩 1/3 的压扁试验，外径小于 50mm 的钢管可用弯曲试验代替压扁试验，冷弯试验时不带填充物，弯曲半径等于钢管公称外径的 6 倍，弯曲角度为 90°，焊缝位于弯曲方向的侧面。此外，根据用户要求，还可以进行扩口试验和液压

汽车论坛 http://www.qclt.com

试验。

表 1-1-52 电焊钢管的力学性能

牌号	软状态钢管（R）		低硬状态钢管（DY）	
	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)
	不小于			
08F、08、10F、10	315	22	375	13
15F、15	355	20	400	11
20	390	19	400	9
Q195	315	22	335	14
Q215 A·B	335	22	355	13
Q235－A·B	375	20	390	9

汽车上用电焊钢管制造的重要零件是传动轴管，因此对传动轴管有专用的国家标准，即“GB9947—88 传动轴用电焊钢管”。

传动轴管按下列规定分为三类：

Ⅰ类：用热轧带钢焊接制造，多为壁厚较大的钢管；

Ⅱ类：用冷轧带钢焊接制造，多为壁厚较薄的钢管。

Ⅲ类：用冷、热带钢焊拔结合的方法制造，这类钢管精度较高。

制造传动轴管的钢的牌号、化学成分和力学性能列于表 1-1-53。

表 1-1-53 传动轴管用钢的牌号、化学成分和力学性能

类别	牌号	化学成分（%）									力学性能			适用范围
		C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Ni	Cu	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	
Ⅰ	08Z	0.05～0.12	≤0.37	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	≤0.14	≤0.10	≤0.25	≤0.25	440～570	≥295	≥15	轻型车
											≥490	≥350	≥15	—
Ⅱ	15TiZ	0.12～0.19	0.30～0.60	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	0.12～0.22	≤0.25	≤0.25	≤0.25	≥450	≥350	≥10	—
	20Z	0.17～0.24	0.17～0.37	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	—	≤0.25	≤0.25	≤0.25	≥440	≥295	≥10	—
	25Z	0.20～0.27	0.17～0.37	0.40～0.70	≤0.035	≤0.035	—	≤0.25	≤0.25	≤0.25	≥440	≥315	≥10	—
Ⅲ	20Z	0.17～0.24	0.17～0.37	0.35～0.65	≤0.035	≤0.035	—	≤0.25	≤0.25	≤0.25	460～590	≥350	≥10	—

除了力学性能测定外，钢管应进行水压试验，试验压力为 11.8MPa，稳压时间应不少于 5s，不得出现漏水及渗漏现象。经用户同意，可以用涡流探伤代替水压试验。钢管还应进行压扁试验，试验时将外径压缩 1/3，压扁后，试样上不得出现裂缝、裂口或焊缝开裂。钢管还要进行扩口试验，顶心锥度为 60°，Ⅰ类钢管外径扩大值为 10%，Ⅱ、Ⅲ类钢管外径扩大值为 8%，扩口试样不得出现裂缝、裂口或焊缝开裂。

钢管的外径、内径、壁厚及其公差列于表 1-1-54。

钢管的内毛刺高度及椭圆度的规定列于表 1-1-55。

传动轴管由于零件的长度较长，为了减少材料损失，在钢管定货时还有倍尺要求，一般在定货合同中注明。如解放牌 5t 载货汽车的传动轴管定货时要求 1 562mm 倍尺，为便于储运，总长度要小于或等于 5 倍大，为留切口，总长度另加 30～50mm。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-54 汽车传动轴管用电焊钢管的内径、外径、壁厚及其公差(mm)

外径	内径			壁厚				
	尺寸	允许偏差	类别	尺寸	允许偏差	类别	尺寸	允许偏差
50	45	±0.12		2.5				
63.5	60.3	±0.14		1.6				
63.5	58.5	±0.14		2.5	+0.20 −0.10			
68.9	64.3	±0.20		2.3				
76	71	±0.20		2.5				
89	84	±0.25		2.5				
89	81	±0.25	I	4.0	+0.25 0.15	II III	1.6~3.6	±0.12
89	79	±0.30		5.0	±0.25			
100	92	±0.30		4.0	+0.25 −0.15			
100	88	±0.35		6.0	±0.25			

表 1-1-55 汽车传动轴管用电焊钢的内毛刺高度及椭圆度规定 (mm)

类别	外径	内毛刺高度（不小于）		椭圆度（不大于）	备注
		刀刮	碾压		
I、II	≤63.5	+0.15 −0.05	+0.20 0	0.30	
	>63.5~100	+0.20 0.05	+0.25 0	0.40	
III	50~100	−0.18 0		0.28	

1.1.2.4 双层卷焊管的应用情况及性能数据

双层卷焊钢管用于汽车、冷冻设备、电热电器工业中制造制动管、燃料管、润滑油管、加热或冷却器等。

双层卷焊钢管已制定国家标准“GB1125B—89 双层卷焊钢管”。但是由于在汽车上用于制造制动管，涉及到汽车的行驶安全，所以对双层卷焊钢管有更加严格的技术要求，因此一汽与钢管的生产厂家签定了“汽车用双层卷焊钢管技术条件”（以下简称一汽技术条件）、生产厂家按此条件生产供货，现将国家标准和一汽技术条件中的主要内容简介如下。

钢管用的低碳钢带的牌号为 08、08F 和 08AL。其化学成分应符合有关标准规定。钢管的纵向力学性能应符合表 1-1-56 的规定。

表 1-1-56 钢管的力学性能

牌号	力学性能					
	GB11258—89			一汽技术条件		
	σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ_5 (%)	σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	$\delta_{(L_0=40mm)}$ (%)
08、08F、08AL	≥290	≥180	14~40	≥280	≥180	≥25

汽车论坛 http://www.qclt.com

除了进行力学性能测定外，钢管还要进行工艺性能试验，试验方法和性能要求分述如下：

①压扁试验：试验方法列于表 1-1-57。

表 1-1-57 压扁试验方法

GB11258—89	一汽技术条件
进行压扁试验时，压板间距离（H）：$4S$（S为公称壁厚），试验后外边缘不得有裂缝、裂口或焊缝开裂	从钢管上取不小于 65mm 的试样，用两个平板将其压扁，直到内壁相接触； 然后有把压扁的试样绕直径等于钢管外径三倍的靠模一次弯曲成 90°后一次拔直； 试样的焊缝应与作用力方向呈 45°角，试样应能通过这些试验而无破口或裂纹

②扩口试验，试验方法列于表 1-1-58。

表 1-1-58 扩口试验方法

GB11258—89	一汽技术条件
进行扩口试验时，试样长度为 50～100mm，顶心锥度为 6°，扩口率为 20%，试验后无裂缝，裂口或焊缝开裂	从选好的管端切下约 100mm 长的试样，然后将试样在 90°的锥形芯棒上扩径，直到端部外径扩大 20%为止，在实验时，必须使管和圆锥体保持同心。试验后，试样经检验无破口或裂纹

③水压试验：水压试验方法 GB11258—89 与一汽技术条件相同。试验压力 p（MPa）按下列公式计算：

$$p=\frac{2\sigma S}{D}$$

式中：σ——允许应力，为 110MPa；

S——钢管公称壁厚，mm；

D——钢管公称外径，mm。

钢管应经受 5s 的液体压力检验而无破裂和渗漏现象。

④弯曲试验：试验方法列于表 1-1-59。

表 1-1-59 弯曲试验方法

GB11258—89	一汽技术条件
对于外径小于或等于 8mm 的钢管，其弯芯直径为外径的 3 倍，外径大于 8mm 的，其弯芯直径为外径的 6 倍。弯曲角度为 180°，焊缝应位于弯曲方向的外侧，试验后钢管应无皱折、开裂或其它裂缝	从选用的每根管端切下一适当长度的样品，将其沿圆筒形模具上弯曲 360°，焊缝与弯曲面呈 90°。检验中管内不许有填充物。模具直径如下： 管径小于或等于 8mm，模具直径 3 倍于管径； 管径大于 8mm，模具直径 6 倍于管径； 试样通过检验应无弯折、破口或裂纹

为了提高抗腐蚀性能，汽车上应用的双层卷焊钢管外表面应进行热浸镀铝锡处理，镀层中含锡量至少含 12%的锡，且密度至少为 18g/m^2。

国家标准 GB11258—89 中列出的双层卷焊钢管的尺寸及其公差列于表 1-1-60，一汽技术条件中的双层卷焊钢管尺寸公差列于表 1-1-61。

近来用异形钢管，如矩形钢管代替木材制造车箱的高栏板，特别是代替圆管作篷杆构件，可大大提高刚度。矩形钢管又是制造无大梁公共汽车底部承载骨架的材料。用钢管的液压成形工艺制造一些结构件以减轻汽车自重都是发展新方向。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-60 国家标准 GB11258—89 中列出的双层卷钢管尺寸及其公差

外 径 (mm)	外径允许偏差 (mm)		壁 厚 (mm)	壁厚允许偏差 (mm)	
	普 通 级	较 高 级		普 通 级	较 高 级
3.17	+0.07	±0.05	0.50	±0.10	±0.08
4.76	±0.10	±0.08			
5.00					
6.00			0.70	±0.12	±0.08
6.35					
8.00					
10.00	±0.12	±0.10	1.0	±0.13	±0.09
12.00					

表 1-1-61 一汽技术条件中列出的双层卷焊钢管的尺寸及其公差

外 径 (mm)	外径公差 (mm)	壁 厚 (mm)	壁厚公差 (mm)	长 度		公度公差 (mm)
4.75	+0.5 −0.8	0.71	+0.5 −0.8	定尺（具体尺寸在合同中注明）	2.01~4m 范围内	±3
(5.00)						
(6.00)						
6.35						
8.00					4.01~10m 范围内	±6
(10.00)						
12.00						

德国、法国和俄罗斯普遍采用小径精密电焊钢管制造汽车制动管，该管与双层卷焊管功能相同，但成本较低，我国亦在试制中。（撰稿人：姚贵升）

1.1.3 汽车用结构钢

汽车生产中结构钢用量虽然比钢板用量少，但是它们都用于制造汽车上的重要零件，如发动机中的曲轴、连杆；传动器的齿轮和转向系统的转向臂、转向节等，这些零件的质量直接影响汽车的可靠性和汽车的寿命，因此对制造这些零件用的结构钢的性能提出了很高的要求。

在选用结构钢时对其性能有两方面的要求：

1）满足使用性能和设计要求的力学性能

汽车零件的设计，主要根据零件使用性能的要求，在设计时通过计算、测试、台架试验甚至行车试验确定零件所要求的各种力学性能指标，并根据这些指标来选用合适的材料。

绝大多数汽车零件在其服役过程中都不允许发生塑性变形，因此钢材的屈服强度作为选材和设计的基本依据；塑性指标在某种程度上被认为是安全的保证，可以通过零件局部的少许塑性变形来消除应力集中引起的应力峰，从而避免零件的突然失效；冲击韧度试验可以用来控制冶炼和热加工的质量，同时冲击韧度也可以防止零件在有尖锐缺口、高速载荷和低温下的突然断裂，确保零件的使用安全；钢材的疲劳强度是防止零件在低于屈服强度的交变应力作用下发生的突然疲劳断裂……。零件的受力情况不同，工作环境不同，选用钢材时所侧重的性能指标也有所不同。

2）满足各种加工工艺要求的工艺性能

钢材的工艺性能决定汽车零件加工的难易程度和生产成本。当前，汽车的生产向着大批量、高度自动化流水生产方式发展，更要求钢材有良好的工艺性能满足这种生产方式的要求。

考虑钢材的工艺性能时要结合零件的生产工艺来考虑，如锻造、切削加工和热处理的发动机和底盘零

汽车论坛 http://www.qclt.com

件，要考虑钢材的锻造、可切削加工性能和热处理性能；对于车身的钢板冲压零件，要考虑钢板的冲压性能等等。

在满足使用性能和设计要求的力学性能与满足加工工艺要求的工艺性能的基础上，力求选用价格便宜的钢材以降低成本，增强产品在市场上的竞争能力。

1.1.3.1 钢材的生产工艺

结构钢可以用氧气转炉或电弧炉冶炼，氧气转炉冶炼时原料主要为高炉铁水，而电弧炉冶炼时原料主要为废钢，在中国，用电弧炉冶炼的结构钢数量较多，优质结构钢多经过炉外精炼和真空除气处理，通过这些处理微调钢材的化学成分，确保钢材的化学成分和淬透性能符合用户要求并保证性能稳定；通过这些处理降低钢中气体特别是氧的含量，降低钢中夹杂物，提高钢的纯净度。

冶炼完毕后，钢水可以通过模铸铸成钢锭，通过初轧机轧成钢坯，也可以通过连续浇铸直接铸成方坯。模铸是将钢水注入钢锭模中，凝固脱模后成为钢锭。一般非合金钢锭脱模后即可热送初轧车间；有些合金钢锭还须经缓冷或退火处理，并经表面清理修磨后，再送初轧车间。连铸是钢水从钢包经过中间包注入连铸机的水冷结晶器，从结晶器的另一端连续拉出铸坯，连铸是钢铁工业发展的先进技术，世界范围内的连铸比例逐年提高，日本和韩国在80年初的连铸比例已超过95%，我国于1997年达到80%。和传统的模铸相比，连铸的优点是：简化生产工序，缩短生产周期，提高生产效率，提高金属收得率，可直接热送和直接轧制，降低能耗、铸坯质量好，内部组织均匀，性能稳定。

连铸方坯和初轧坯经过开坯机轧成小方坯，再经条钢轧机轧成圆钢或方钢，或经线材轧机轧成盘条，经检查包装后发往用户。

结构钢棒材和线材的生产流程示意图如图1-1-20所示。

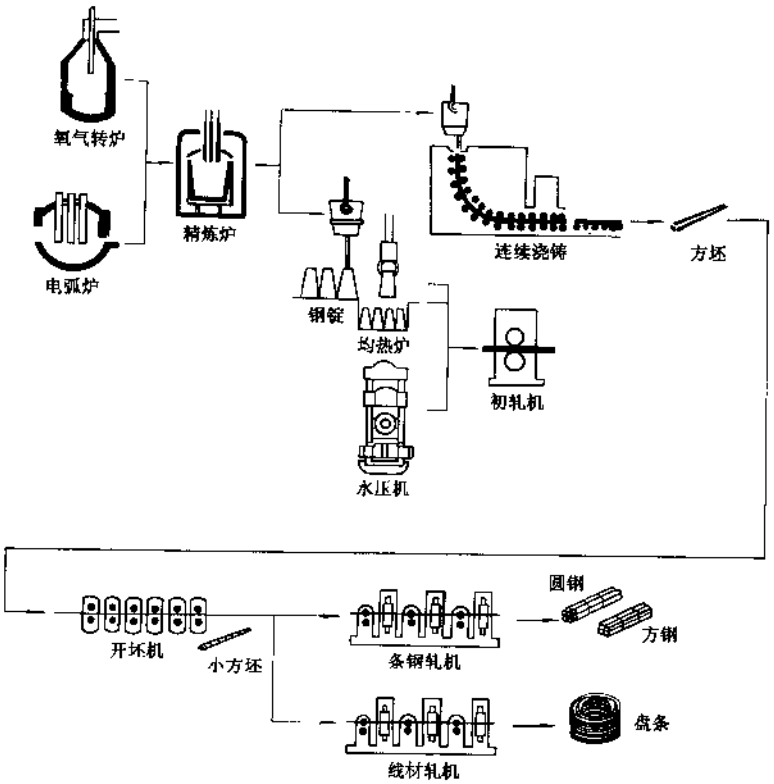


图1-1-20 结构钢棒材（圆钢、方钢）和线材生产流程示意图

汽车的发展趋势是重量轻、动力性好，安全可靠，排污少、这就对汽车的设计、制造工艺和应用的材料包括钢材提出了更高的要求，而汽车的生产方式又向大批量高度自动化流水生产方式发展，只有批量大才能降低生产成本，只有自动化流水生产才能保证产品质量和提高生产效率，这种生产方式对钢材也提出了越来越高的要求，归纳起来对汽车用结构钢包括渗碳钢、强韧钢、弹簧钢等有如下共同的技术要求。

1）钢的纯净度不断提高

钢中存在的杂质及有害元素如磷、硫、氮、氢和氧不但降低钢材的力学性能从而影响汽车零件的使用寿命，而且形成有害的夹杂物还会恶化钢材的工艺性能，如大块的Al_2O_3会恶化可切削加工性能，长条状的MnS夹杂物恶化钢板的冲压性能。

近年来，由于钢的冶炼技术的发展特别是钢包内二次冶金技术（包中进行合金化、喷粉改善夹杂物形态，真空除气等等）的发展，可以使各种有害元素的总和降至100ppm以下。图1-1-21中示出历年来钢中有害元素降低的情况。

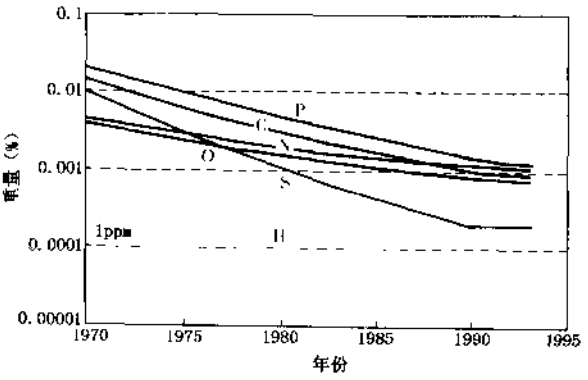


图1-1-21 历年来钢中有害元素的降低情况

2）钢材的性能波动范围窄

在大量流水高度自动化的汽车生产中，要求钢材的性能尽可能一致，波动范围小，这不仅是生产工艺的要求，也是产品质量的要求。

在高度自动化的机床上加工，要求毛坯的硬度和金相组织尽量一致，而且夹杂物的形态得到控制，使之有利于切削加工。因为在这种加工机床上，刀具和切削规范基本上是固定的，不能随时调整，否则就会降低生产效率，只有使毛坯去适应加工条件，而不能改变加工条件去适应毛坯的变化。

齿轮渗碳（或碳氮共渗）热处理后，基本上不再加工，这样就要求热处理变形小而且规律固定，要做到这一点，钢材的淬透性能范围要窄而且要符合零件的要求，否则无法使齿轮热处理后的变形达到工艺规定的要求，装配后影响齿轮箱的噪声。

近年来，钢厂都采用合金元素的计算系统，利用该系统可以使合金元素的加入达到预期的淬透性能和力学性能的目标值，碳的控制可以达到0.005%，Mn、Si和Cr为0.01%。

3）钢的夹杂物形态得到控制

钢中夹杂物的种类、性质和形态对其力学性能和工艺性能都有很大影响。从力学性能方面考虑，夹杂物数量越少，形状越趋于圆形，对力学性能的影响越小；从切削加工性能方面考虑，硬度高的夹杂物磨损刀具，不利于切削加工，通过改性处理后成椭圆形的硫化物在切削加工时起润滑作用，减少刀具的磨损，对切削加工有利。

近年来，制钢工艺中加钙处理得到了很大的发展，在引入喷粉技术并且工业化之后，钙处理得到了突破，最近又引入喂丝技术更推进了钙处理钢的发展。

加钙处理钢的可切削加工性能可得到很大的改善，这是由于磨损刀具的硬的氧化物转变成较软的铝酸钙并被软的硫化物所包围，这些夹杂物的磨损作用小，而且在中、高速切削时在刀具表面形成保护膜，防止了刀具的坑状磨损延长了刀具寿命。

4）钢材的表面质量良好

近年来，钢材锻造时的加热已经由电炉、煤气炉加热改为感应加热、经电炉或煤气炉加热时，钢材表面的细小缺陷，如浅的裂纹和发纹可以通过氧化皮而加以去除，改为感应加热后基本上不形成氧化皮，所以细小的缺陷也会在锻件毛坯表面有所反应。国内少数采用先进技术的锻造生产线使用国内生产的钢材时，都采用剥皮钢材，不仅钢材的价格高、消耗大，而且国内的生产量有限，数量上远远满足不了要求，

汽车论坛 http://www.qclt.com

因此必须在钢材的轧制过程中加强表面清理和表面检查，而且希望在钢材表面有缺陷的部位自动标记，只有这样，生产出来的钢材才能满足大量流水生产的高度自动锻造生产线的要求。

5）钢材的尺寸公差要求严

精密锻造生产的锻件没有飞边，下料的毛坯全部锻成锻件，下料的重量就是锻件的重量，而且下料的长度是自动控制的，这样，钢材的尺寸公差就是影响下料重量的主要因素了，因此精密锻造用的热轧钢材的尺寸公差远远高于目前的国家标准。同样，对钢材的椭圆度也要求很严。由于采用感应加热，钢材在一个很长的感应圈内通过，所以对钢材的弯曲度也要求较严，钢材的弯曲度大则无法在很长的感应圈内通过。一汽集团公司从瑞士哈德宝公司（Hatebur）引进一条齿轮毛坯精锻机，为一汽大众公司提供捷达轿车的齿轮毛坯，设备已经调试完毕，对钢材尺寸公差初步提出的要求如下：

ø35～ø49mm：	±0.35mm
ø50～ø75mm：	±0.50mm
＞75mm：	按 GB702
弯曲度：	≤2.5mm/m

1.1.3.2 表面硬化钢

有些机器零件表面要求有较高的硬度以提高其耐磨性，而心部又要求有足够的韧性以承受冲击载荷，而整个零件由于承受交变载荷又要求有较高的疲劳强度，这类零件就要求用表面硬化钢制造。

取得表面坚硬而心部柔韧的性能，在热处理工艺和钢材选用上有三种选择：

①通过低碳钢渗碳或碳氮共渗改变零件表层的化学成分，提高表层的碳含量或碳氮含量，淬火后表面形成硬度高的高碳马氏体而心部为韧性好而硬度低的低碳马氏体，而且在表层形成残余压应力可以提高零件的疲劳性能。承受接触应力和弯曲应力较大的零件，如各类载货汽车的传动齿轮多采用这种工艺。

②中碳钢采用高频（或中频）感应加热使表层淬硬得到马氏体组织，而心部未被加热仍保持原来的珠光体—铁素体或索氏体组织。这样也会使表面硬度高而耐磨，心部硬度低而柔韧，满足零件的使用要求，同时处理后表层也会形成残余压应力，提高疲劳性能。采用这种热处理的零件的形状必须比较简单，否则难以得到需要的沿零件轮廓均匀分布的硬化层。

③中碳氮化钢或中碳钢经过调质处理或正火处理得到零件需要的心部性能后，再加热到 550℃左右进行氮化处理使零件表面硬度提高从而获得很好的耐磨性能和疲劳性能，这种处理由于加热温度低，所以变形很小，适用于机床主轴、丝杆、镗杆等尺寸精确的零件。

最近发展的激光表面热处理等新工艺也逐渐被采用。但是在汽车工业中应用最多的还是渗碳、氮碳共渗和感应加热表面淬火工艺。

各种工艺适用的钢种不同，选择时考虑的因素也有所不同。

1）渗碳钢

（1）渗碳钢的特点

渗碳钢通常为含碳量 0.17%～0.24%的低碳钢，强度要求不高、尺寸较小的零件选用碳钢；强度要求高、尺寸较大的零件选用合金钢，零件断面尺寸越大，为了保证零件的心部硬度，选用的合金钢合金元素的含量越高。

在合金钢中常加入的合金元素有锰、铬、镍、钼、硼、钒和钛等，其中锰、铬、镍、铝和硼的相同的作用是增加钢的淬透性，以保证零件渗碳淬火后表面和心部得到马氏体组织，从而有良好的综合力学性能。但是各元素还有其特殊作用，如铬和钼等形成碳化物元素将促使而层含碳量增加，渗碳时容易在渗碳层组织中形成大量碳化物，使渗碳层性能恶化。钢中含镍时，渗碳后各种力学性能优越，但工艺性能差，锻造毛坯要经过复杂的热处理后才能切削加工，渗碳后不能直接淬火，要经过二次加热淬火，工艺复杂，而且价格贵，只有载荷很大的零件才选用含镍的钢材。微量的硼可以显著地增加钢材的淬透性能，但是含碳量增加时，它增加淬透性能的作用减弱，而且热处理后变形大、采用渗碳硼钢时，要注意这些特点。在渗碳钢中加入钒、钛、铌和锆等形成稳定的碳化物的合金元素，在渗碳高温加热时可以防止奥氏体晶粒长

汽车论坛 http://www.qclt.com

大，渗碳后可以直接淬火、淬火后得到细微马氏体组织，有良好的力学性能。

碳氮共渗采用的钢种与渗碳钢相似，但碳氮共渗的渗层较浅，零件的心部硬度也略高，采用的钢材的含碳量也稍高。

(2) 选用渗碳钢时考虑的因素

汽车上渗碳钢应用最多的是制造传动齿轮，因此，我们以齿轮为例说明选用渗碳钢时考虑的因素。

a. 工艺性能

齿轮的生产过程大致如下：热轧钢材经锻造成形，锻造可以是平锻、模锻或精锻，为了提高生产效率，减少切削加工量并提高材料利用率，大量流水生产的轿车齿轮毛坯多采用精锻，精锻使用的钢材尺寸精度高，表面质量好。锻件毛坯要经正火处理或利用锻造余热进行等温退火处理，锻坯处理的目的是得到适宜的硬度和组织以利于切削加工，近年来，轿车齿轮毛坯多利用锻造余热进行等温退火处理；一方面可以减少能源的消耗，同时处理后可以得到的比较粗大的珠光体和铁素体组织，并且硬度也比较均匀一致，对切削加工十分有利。切削加工后的齿轮要进行渗碳或碳氮共渗热处理，现在多采用贯通式连续渗碳（碳、氮共渗）炉处理，渗碳后降温直接淬火，这种处理工艺对钢材也提出了要求，钢材在渗碳的高温（如930℃）长时间加热（如8h）后奥氏体晶粒不能长大，否则将恶化渗碳热处理后零件的力学性能，因此钢材必须是本质细晶粒钢。

b. 淬透性能

淬透性能影响着齿轮渗碳淬火后的心部硬度从而影响整个齿轮的性能，所以在零件的技术条件中都规定了齿轮的心部硬度数值，如中型载货汽车后桥齿轮规定的轮齿心部硬度值为33～48HRC，当淬火条件固定时，轮齿的心部硬度决定于钢材的淬透性能。图1-1-22示出钢的淬透性能对齿轮轮齿心部硬度和疲劳寿命的影响。

钢材的淬透性能对齿轮渗碳淬火后的变形也有很大影响。图1-1-23示出钢材淬透性能对热处理后齿轮内孔收缩的影响，钢材淬透性能提高，内孔收缩量增加，钢种不同，变化情况也不同。淬透性能相同时，20Mn2TiB钢的内孔收缩量比20CrMnTi钢的大。如果齿轮的内孔是圆的，内孔收缩量大，可以通过加大磨量将内孔磨到规定尺寸，不影响装配；如果内孔是花键孔，通过磨削加工也不能使内孔达到规定的尺寸而使齿轮无法装配在花键轴上而使齿轮报废。

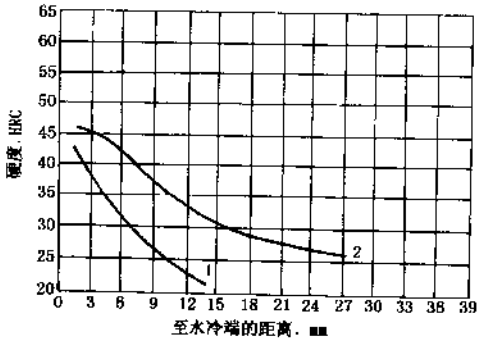


图1-1-22 淬透性能对轮齿的心部硬度及疲劳寿命的影响

1-心部硬度28HRC，弯曲疲劳寿命 1.8×10^4 次；

2-心部硬度40HRC，弯曲疲劳寿命 36×10^4 次

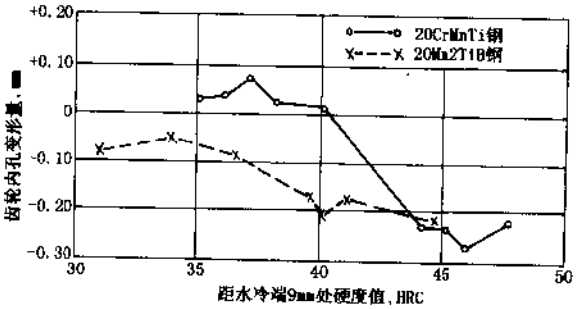


图1-1-23 钢材淬透性能对齿轮内孔变形量的影响

基于钢材淬透性能对齿轮热处理后的性能和变形都有显著的影响，我国于1985年颁布了保证淬透性能的合金结构钢技术条件（GB5216—85），用户可以按此条件定货。

轿车齿轮工作时对噪声有严格的要求，因此对齿轮的精度要求更高，变形要求更小，这样就对钢材的淬透性能提出了更高的要求，如德国大众汽车公司对制造奥迪、捷达和桑塔纳轿车齿轮的铬—锰钢的淬透

汽车论坛 http://www.qclt.com

性能要求为距端末 10mm 处的硬度范围为 7～8HRC，而且同一批料要控制在 4HRC 以内。

(3) 渗碳钢的力学性能

渗碳零件的使用情况和使用寿命受渗碳钢力学性能的影响。而未渗碳时测得的力学性能只是渗碳零件心部的性能，渗碳后的力学性能是渗碳层与心部的综合力学性能，它受很多因素的影响，如心部的力学性能、渗碳层深及金相组织、钢材的化学成分、残余内应力的分布等。

通常用弯曲样品测定渗碳钢的静强度，样品的心部硬度提高、渗碳样品的弯曲强度也提高，而心部硬度又受钢材的淬透性能和含碳量的影响，因此选用渗碳钢时，其淬透性能和含碳量是主要因素。

渗碳钢的冲击韧性用没有缺口的样品测定，当样品尺寸较小、渗碳层较深时，冲击试验时是脆性破坏，冲击功只决定于渗碳层的性能；当样品尺寸增大或渗碳层较薄时，冲击试验时是韧性破坏，冲击功只决定于心部的性能。

渗碳钢的疲劳性能是很重要的性能，因为主要渗碳零件齿轮是在交变载荷下工作的，齿轮轮齿承受交变弯曲应力，经常是在齿根部位由于弯曲疲劳而损坏；而齿轮轮齿的接触面工作时承受交变的接触压力，由于接触疲劳而损坏。

心部硬度和渗碳层深对渗碳钢弯曲疲劳性能的影响有着互相矛盾的二方面因素，一方面心部硬度和渗碳层深度增加可以提高渗碳的疲劳性能，但是它们增加又会降低表层残余压应力的数值，对疲劳性能又有不利的影响。因此，对于弯曲疲劳强度来讲，心部硬度和渗碳层深都有一个最佳值。

渗碳零件齿轮工作时，表面承受的应力最大而且疲劳性能对表面情况最敏感，所以渗碳层的金相组织对疲劳性能有更大的影响。在渗碳层金相组织中除马氏体外，还会出现由于内氧化而形成的氧化物、分布形态不同的碳化物和残余奥氏体，它们都对疲劳性能有影响。

在渗碳层表层形成的氧化物大都存在于晶粒间界，有时成断续网状分布，由于某些合金元素如 Si、Mn 和 Cr 形成氧化物会使氧化物附近的合金元素贫化而使淬透性能降低，在氧化物周围常有非马氏体组织出现，降低了最表层的硬度并改变了残余内应力的分布情况，因而降低疲劳性能。

渗碳层组织中的碳化物当呈粗大网状分布时对疲劳性能有不利的影响，当呈细小颗粒状均匀分布时对接触疲劳性能有有利的影响。

渗碳层组织中的残余奥氏体的数量很多时会降低弯曲疲劳强度但却能改善其接触疲劳性能。通过冰冷处理可以使残余奥氏体数量转变成马氏体，但是这种转变导致了显微裂纹的形成，它增加了疲劳裂纹的形成和扩展，因而降低疲劳性能。

钢材的化学成分对渗碳钢的疲劳性能有很大影响，随着钢中含镍量的增加，渗碳钢的多次冲击抗力和弯曲疲劳性能都提高。但是含镍的渗碳钢工艺性能很差，切削加工困难，渗碳后要二次加热淬火，除非受载荷很大的零件才选用含镍的钢材。

近年来，由于钢材冶炼技术的提高，可以生产含氧量降低和非金属夹杂物少的纯净度高的钢材，由于夹杂物数量减少可以提高渗碳钢的疲劳强度，我们用炉外精炼的含氧量低的钢材进行齿轮的疲劳试验结果表明：齿轮的弯曲疲劳寿命和接触疲劳寿命均提高一倍以上。

通过喷丸强化和滚压强化可以在渗碳零件表层形成更加有利的残余内应力，因而可以进一步提高零件的疲劳性能。某厂生产的中型载货汽车的后桥主动螺旋齿轮曾经发生过早期疲劳损坏情况，通过采用大圆弧滚刀加工，增大齿根圆角，降低应力集中，并采用强化喷丸后，疲劳寿命显著提高，解决了早期疲劳损坏问题。

(4) 主要国家应用的渗碳钢性能数据

a. 中国渗碳钢的性能数据

在中国优质碳素钢（GB699—88）和合金结构钢（GB3077—88）中所列的低碳钢都可以作为渗碳钢使用。表 1-1-62 列出其化学成分，为了满足汽车大量流水生产的要求，保证齿轮渗碳淬火后的变形和性能要求，我国于 1985 年发布了保证淬透性结构钢技术条件（GB5216—85），这个标准中共列入 15 个钢号，其中可作为渗碳用的低碳钢有 10 个钢号，国内主要汽车厂都采用这个标准中所列的钢号。其化学成分和淬透性能分别列于表 1-1-63 和表 1-1-64。

表 1-1-62 主要渗碳钢的化学成分

钢号	化学成分的质量分数（%）						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	其 它
15	0.12～0.19	0.17～0.37	0.35～0.65				
20	0.17～0.24	0.17～0.37	0.35～0.65				
20Mn2	0.17～0.24	0.17～0.37	1.40～1.80				
20MnV	0.17～0.24	0.17～0.37	1.30～1.60				V：0.07～0.12
20Mn2B	0.17～0.24	0.17～0.37	1.50～1.80				B：0.0005～0.0035
20MnMoB	0.16～0.22	0.17～0.37	0.90～1.20			0.20～0.30	B：0.0005～0.0035
15MnVB	0.12～0.18	0.17～0.37	1.20～1.60				B：0.0005～0.0035 V：0.07～0.12
20MnVB	0.17～0.23	0.17～0.37	1.20～1.60				B：0.0005～0.0035 V：0.07～0.12
20MnTiB	0.17～0.24	0.17～0.37	1.30～1.60				B：0.0005～0.0035 Ti：0.04～0.10
25MnTiBRE	0.22～0.28	0.20～0.45	1.30～1.60				B：0.0005～0.0035 Ti：0.04～0.10 RE 加入量 0.05
20SiMnVB	0.17～0.24	0.50～0.80	1.30～1.60				B：0.0005～0.0035 V：0.07～0.12
15Cr	0.12～0.18	0.17～0.37	0.40～0.70	0.70～1.00			
20Cr	0.18～0.24	0.17～0.37	0.50～0.80	0.70～1.00			
20CrMo	0.17～0.24	0.17～0.37	0.40～0.70	0.80～1.10		0.15～0.25	
20CrV	0.17～0.23	0.17～0.37	0.50～0.80	0.80～1.10			V：0.10～0.20
15CrMn	0.12～0.18	0.17～0.37	1.10～1.40	0.40～0.70			
20CrMn	0.17～0.23	0.17～0.37	0.90～1.20	0.90～1.20			
20CrMnMo	0.17～0.23	0.17～0.37	0.90～1.20	1.10～1.40		0.20～0.30	
20CrMnTi	0.17～0.23	0.17～0.37	0.80～1.10	1.00～1.30			Ti：0.04～0.10
30CrMnTi	0.24～0.32	0.17～0.37	0.80～1.10	1.00～1.30			Ti：0.04～0.10
20CrNi	0.17～0.23	0.17～0.37	0.40～0.70	0.45～0.75	1.00～1.40		
12CrNi2	0.10～0.17	0.17～0.37	0.30～0.60	0.60～0.90	1.50～1.90		
12CrNi3	0.10～0.17	0.17～0.37	0.30～0.60	0.60～0.90	2.75～3.15		
20CrNi3	0.17～0.24	0.17～0.37	0.30～0.60	0.60～0.90	2.75～3.15		
12Cr2Ni4	0.10～0.16	0.17～0.37	0.30～0.60	1.25～1.65	3.25～3.65		
20CrNiMo	0.17～0.23	0.17～0.37	0.60～0.95	0.40～0.70	0.35～0.75	0.20～0.30	
20Cr2Ni4	0.17～0.23	0.17～0.37	0.30～0.60	1.25～1.65	3.25～3.65		
18Cr2Ni4W	0.13～0.19	0.17～0.37	0.30～0.60	1.35～1.65	4.00～4.50		W：0.80～1.20
25Cr2Ni4W	0.21～0.28	0.17～0.37	0.30～0.60	1.35～1.65	4.00～4.50		W：0.80～1.20

根据零件的断面尺寸及受力状态，可以选用不同级别的渗碳钢，断面尺寸大的零件，为了保证心部的硬度（强度）要选用淬透性能较高的钢材，渗碳钢的选用情况举例如表 1-1-65 所示。

我国从 1985 年发布了保证淬透性能结构钢技术条件后，对提高和稳定汽车齿轮的质量起了一定的作用，但是不管齿轮模数大小均采用一个淬透性能 J_9 为 30～42HRC 的钢号 20CrMnTiH 显然是不合理的，变速器齿轮渗碳淬火后轮齿的心部硬度可能为上限，而齿套花键的心部硬度可能超过上限，而后桥齿轮齿的心部硬度可能处于下限，都不是齿轮性能的最佳值。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-63 钢的化学成分

序号	牌号	化学成分（%）								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	Ti	V
1	20CrH	0.17～0.23	0.17～0.37	0.50～0.85	0.70～1.00					
2	20MnMoBH	0.16～0.22	0.17～0.37	0.90～1.25			0.20～0.30	0.0005～0.0035		
3	20MnVBH	0.17～0.23	0.17～0.37	1.05～1.45				0.0005～0.0035		0.07～0.12
4	22MnVBH	0.19～0.25	0.17～0.37	1.25～1.65				0.0005～0.0035		0.07～0.12
5	20MnTiBH	0.17～0.23	0.17～0.37	1.20～1.55				0.0005～0.0035	0.04～0.10	
6	20CrMnMoH	0.17～0.23	0.17～0.37	0.85～1.20	1.05～1.40		0.20～0.30			
7	20CrMnTiH	0.17～0.23	0.17～0.37	0.80～1.15	1.00～1.35				0.04～0.10	
8	20CrNi3H	0.17～0.23	0.17～0.37	0.30～0.65	0.60～0.95	2.70～3.25				
9	12Cr2Ni4H	0.10～0.17	0.17～0.37	0.30～0.65	1.20～1.75	3.20～3.75				
10	20CrNiMoH	0.17～0.23	0.17～0.37	0.60～0.90	0.35～0.65	0.35～0.75	0.15～0.25			

表 1-1-64 渗碳钢的淬透性能数据

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度 HRC												
		1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	12	15	18	21	24	27	30
20CrH	最大	48	47	42	37	33	30	26	24	22	21	20		
	最小	41	37	30	25	22								
20MnMoBH	最大	48	48	48	47	46	45	40	35	32	30	28	27	27
	最小	41	41	40	39	37	34	27	22					
20MnVBH	最大	48	48	47	46	45	44	41	38	35	33	31	29	28
	最小	40	40	39	37	35	32	26	23	21				
22MnVBH	最大	50	50	50	50	49	48	46	43	40	38	36	34	33
	最小	42	42	42	41	40	38	33	27	24	22	20		
20MnTiBH	最大	48	48	48	47	46	44	41	37	33	30	27	25	24
	最小	40	40	39	37	35	32	25						
20CrMnMoH	最大	50	50	50	50	49	48	46	43	41	40	39	38	38
	最小	42	42	41	40	39	37	34	31	29	28	27	26	26
20CrMnTiH	最大	48	48	47	46	44	42	38	35	33	32	31	30	29
	最小	40	39	37	35	32	30	26	22	20				
20CrNi3H	最大	49	49	48	47	46	45	42	39	37	35	34	33	32
	最小	41	40	39	38	36	34	31	28	26	24	23	22	21
12Cr2Ni4H	最大	44	44	44	44	44	43	43	42	41	40	39	39	38
	最小	37	37	37	36	36	35	33	31	30	29	28	27	26
20CrNiMoH	最大	48	47	45	42	39	35	31	28	26	25	24	23	23
	最小	41	37	31	27	24	22							

汽车论坛 http://www.qclt.com

渗碳钢选用时主要根据零件的尺寸和受力情况，零件尺寸较小受力较低时，选用淬透性能较低的钢材，反之，则选用淬透性能较高的钢材，举例列于表 1-1-65。

表 1-1-65 渗 碳 钢 的 选 用

钢 号	淬透性指标	主 要 性 能 特 点	用 途 举 例	可以互相代用的钢号
20	J_9：80～95HBR	淬透性能低，正火、退火后硬度低、切削性能不良	用于制造尺寸小，负荷低的零件，如轴套、链条的滚子、小轴及不重要的小齿轮	15，Q235
20Cr	J_9：18～30HRC	渗碳时有晶粒长大倾向，需二次淬火以提高心部韧性	用于制造断面在 30mm 以下负荷不大的零件，如机床及小汽车的齿轮、活塞销等零件	15Cr、20Mn2
18CrMnTi	J_9：30～42HRC	正火后切削性能良好，渗碳后面层含碳量适中，过渡层均匀，晶粒不易长大，渗碳后可降温直接淬火	广泛应用于制造汽车、拖拉机齿轮	20MnTiB，20MnVB、20CrMo
12Cr2Ni4	J_9：35～43HRC	高强度、高韧性和良好的淬透性，但工艺性能差，正火后要高温回火，才能切削加工。渗碳后不能采用直接淬火，因为渗碳层中残余奥氏体多、必须二次淬火	用于断面较大、载荷较高而又需要良好韧性和缺口敏感性低的重要零件，如重型载货车及坦克的齿轮	

近些年来，由于钢材冶炼技术的改进以及钢材市场情况的变化，已经有条件把渗碳齿轮钢的淬透性能带缩窄，通过汽车厂与钢厂协商，一汽和东风汽车公司与有关钢厂签定了缩窄淬透性能技术条件，并按此条件供货。一汽与东风汽车公司与钢厂签定的技术协议主要要求列于表 1-1-66 和表 1-1-67。

表 1-1-66 一汽所用铬锰钛钢的淬透性能要求

钢 号	淬透性能组别	J_{9mm} HRC	J_{15mm} HRC	用 途
20CrMnTiH	I	30～36	≤35	5t 载货汽车变速器齿轮
	II	36～42	≤35	5t 载货汽车后桥齿轮
16CrMnTiH		27～37		5t 载货汽车变速器固定齿座

表 1-1-67 东风汽车公司用渗碳钢的淬透性能要求

钢 种	钢 号	J_{9mm} HRC	J_{15mm} HRC	用 途
Cr-Mn-Ti	20CrMnTiH (1)	30～37	≤35	变速器齿轮
	20CrMnTiH (2)	35～42	≤35	
	20CrMnTiH (3)	32～39	≤35	变速器齿轮
Mn-V-B	20MnVBH (1)	32～40	≤38	后桥行星齿轮
	20MnVBH (2)	37～44	≤38	后桥主动锥齿轮
	20MnVBH (3)	34～43	≤38	后桥从动锥齿轮

b. 德国渗碳钢的性能数据与应用情况

德国 1986 年颁布的渗碳钢标准（DIN17210）中列了 19 个钢号。其中一部分钢号规定有两种含硫量，一种含硫量为小于 0.035%；另一种含硫量为 0.020%～0.035%，这种钢的钢号后边加一个 "S" 字。

汽车论坛 http://www.qclt.com

在定货时，可以要求钢材的淬透性能在给定的范围内，也可以要求缩窄淬透性能的钢材，其淬透性能只有正常淬透性能带的2/3宽，如果要求的淬透性能带位于正常带下部2/3，则在钢号末尾用HL表示，位于上部的2/3，则用HH表示。它们的化学成分与标准的H钢相同，但是在生产时要缩小化学成分范围。

DIN17210标准中列出的化学成分与淬透性能数据见表1-1-68和表1-1-69。

表1-1-68 德国渗碳钢的化学成分

钢号	化学成分（%）							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
C10	0.07～0.13	≤0.40	0.30～0.60	≤0.045	≤0.045	-	-	-
CK10	0.07～0.13	≤0.40	0.30～0.60	≤0.035	≤0.035	-	-	-
C15	0.12～0.18	≤0.40	0.30～0.60	≤0.045	≤0.045	-	-	-
CK15	0.12～0.18	≤0.40	0.30～0.60	≤0.035	≤0.035	-	-	-
Cm15	0.12～0.18	≤0.40	0.30～0.60	≤0.035	0.020～0.035	-	-	-
17Cr3	0.14～0.20	≤0.40	0.40～0.70	≤0.035	≤0.035	0.60～0.90	-	-
20Cr4	0.17～0.23	≤0.40	0.60～0.90	≤0.035	≤0.035	0.90～1.20	-	-
20CrS4	0.17～0.23	≤0.40	0.60～0.90	0.035	0.020～0.035	0.90～1.20	-	-
16MnCr5	0.14～0.19	≤0.40	1.00～1.30	≤0.035	≤0.035	0.80～1.00	-	-
16MnCrS5	0.14～0.19	≤0.40	1.00～1.30	≤0.035	0.020～0.035	0.80～1.10	-	-
20MnCr5	0.17～0.22	≤0.40	1.10～1.40	≤0.035	≤0.035	1.10～1.30	-	-
20MnCrS5	0.17～0.22	≤0.40	1.10～1.40	≤0.035	0.020～0.035	1.10～1.30	-	-
20MoCr4	0.17～0.22	≤0.40	0.70～1.00	≤0.035	≤0.035	0.30～0.60	0.40～0.50	-
20MoCrS4	0.17～0.22	≤0.40	0.70～1.00	≤0.035	0.020～0.035	0.30～0.60	0.40～0.50	-
22CrMoS35	0.19～0.24	≤0.40	0.70～1.00	≤0.035	0.020～0.035	0.30～0.60	0.40～0.50	-
21NiCrMo2	0.17～0.23	≤0.40	0.65～0.95	≤0.035	≤0.035	0.40～0.70	0.15～0.25	0.40～0.70
21NiCrMoS2	0.17～0.23	≤0.40	0.65～0.95	≤0.035	0.020～0.035	0.40～0.70	0.15～0.25	0.40～0.70
15CrNi6	0.14～0.19	≤0.40	0.40～0.60	≤0.035	≤0.035	1.40～1.70		1.40～1.70
17CrNiMo6	0.15～0.20	≤0.40	0.40～0.60	≤0.035	≤0.035	1.50～1.80	0.25～0.35	1.40～1.70

表1-1-69 德国渗碳钢的淬透性能

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度（HRC）												
		1.5	3.0	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
17Cr3HH	最大	45	44	38	26	21								
	最小	37	32	23										
17Cr3HL	最大	41	38	31										
	最小	34	25											
24Cr4	最大	49	48	46	43	40	37	35	33	28	25	22		
	最小	41	39	30	25	22								
16MnCr5HH	最大	47	46	44	41	37	35	34	33	31	30	29	28	27
	最小	41	38	35	31	28	26	24.5	23.5	22	20.5			

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度（HRC）												
		1.5	3.0	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
16MnCr5HL	最大	44	42	40	37	33	30.5	29	28	26	25	24	23	22
	最小	39	35	31	28	24	22	20						
20MnCr5HH	最大	49	49	48	46	44	42	41	40	37	35	34	33	31
	最小	43.5	42	40	37	35	33	31	30	27	25.5	24.5	23.5	22
20MnCr5HL	最大	46.4	46	44	41.5	39	37.5	36	35	32	30	29	28	26
	最小	41	39	36	33	31	29	27	25	23	21			
20MoCr4HH	最大	49	47	44	41	38	35	33	31	28	26	25	24	24
	最小	42.5	40	35.5	31	29	26	24	22					
20MoCr4HL	最大	46	43	40	36	33	31	29	27	24	22	20		
	最小	41	37	31	27	24	22							
22CrMoS35HH	最大	50	49	48	47	45	43	41	40	37	35	34	33	32
	最小	44.5	43.5	41	37.5	35	33	31	29.5	27.5	26	25	24	23
22CrMoS35HL	最大	47.5	46	44	42	40	38	36	34.5	32	30.5	29	28.5	27.5
	最小	42	41	37	33	31	28	26	25	23	22	21	20	
21NiCrMo2HH	最大	49	48	46	43	39	35	33	31	28	27	26	25	24
	最小	43	41	35	30	27	24.5	23						
21NiCrMo2HL	最大	46	45	42.5	38	33.5	30	28	26	23	22	21		
	最小	41	37	32	25	22	20							
15CrNi6HH	最大	47	47	46	45	43	42	41	39	37	35	34	34	33
	最小	41.5	41	39.5	38	36	34	32	31	28	26.5	25	24.5	24
15CrNi6HH1	最大	44.5	44	43	41.5	39.5	37.5	36	35	32.5	31	29.5	29	28.5
	最小	39	38	36	35	32	30	28	26	24	22	21	20	20
17CrNiMo6HH	最大	48	48	48	48	47	47	46	46	44	43	42	41	41
	最小	43	42.5	42	41.5	40.5	39.5	39	38	36	34.5	33.5	33	33
17CrNiMoHL	最大	45.5	45.5	45	45	44	43	42.5	42	40	39	38	37	37
	最小	40	40	39	38	37	36	35	34	32	31	30	29	29

我国从德国大众公司引进的桑塔纳、奥迪和捷达轿车所用的渗碳齿轮钢并不完全采用 DIN17210 标准中所列的钢号和技术要求，而是制定了大众公司的内部标准，钢厂按此标准供货。

汽车论坛 http://www.qclt.com

大众公司规定的齿轮用钢的牌号和主要技术要求列于表 1-1-70。

表 1-1-70 大众公司齿轮用钢牌号

大众公司牌号	化学成分（%）							夹杂物 K_4 值	淬透性值 J_{10}	钢号
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al			
TL-VW4220	0.17～0.22	≤0.12	1.10～1.50	≤0.035	0.020～0.035	1.00～1.30	0.020～0.055		33～39	20MnCr5
TL-VW4221	0.14～0.19	≤0.12	1.00～1.40	≤0.035	0.020～0.035	0.80～1.20	0.020～0.055	φ50mm K_4≤30	29～35	16MnCr5
TL-VW4124	0.20～0.25	≤0.12	0.60～0.80	≤0.035	0.020～0.035	0.80～1.20	0.020～0.055	φ51～φ130 K_4≤40	22～28	23Cr4
TL-VW4125	0.23～0.28	≤0.12	0.60～0.80	≤0.035	0.20～0.035	0.80～1.20	0.020～0.055		24～31	25Cr4
TL-VW4129	0.25～0.30	≤0.12	0.60～0.80	≤0.035	0.20～0.035	0.80～1.20	0.020～0.055		28～35	28Cr4

从表 1-1-70 的数据中看出：

① 大众公司的牌号 TL-VW4124（23Cr4）、4125（25Cr4）和 4129（28Cr4）在 DIN17210 标准中没有。

② 大众公司标准中规定钢中含 Si 量为≤0.12 比 DIN 标准中规定的≤0.40%低很多，这样可以降低渗碳时内氧化的趋势，减少形成影响渗碳层质量的氧化物。

③ 为了防止渗碳时晶粒长大，大众公司标准中规定了钢中含铝量。

④ 大众公司标准中规定的淬透性能范围比 DIN 标准中规定的窄，大众公司规定的距冷却端 10mm 处的硬度范围为 7HRC，而 DIN 标准中规定的即使是缩小的 HH 钢和 HL 钢也有 10HRC。

⑤大众公司标准中规定的钢的纯净度（d≤φ50mm，K_4≤30）也比 DIN 标准中规定的（35＜d≤70mm，K_4≤35）严格。

c. 美国渗碳钢的性能数据和应用情况

美国材料试验学会（ASTM）1990 年公布的满足淬透性能需要的钢材标准（ASTMA904—90）中共列出碳钢（包括含锰量稍高的）钢号共 11 个，合金钢钢号共 75 个。这些钢号中含碳量低的可作为渗碳钢应用的有 29 个。

近年来，汽车生产希望零件热处理后力学性能均匀一致，波动范围小，而且要求热处理的变形小，因此要求钢材淬透性能波动范围小，同时由于钢材冶炼技术的改进，可以生产出淬透性能带缩窄的钢材。

美国材料试验学会（ASTM）1992 年发布了缩窄淬透性能带的钢材标准（A914/A914M—92），将这种钢材在牌号加 RH（Restricted Hardenability）两个字母。RH 钢在距冷却端较近处，硬度范围不超过 5HRC，在淬透曲线转折部分，其淬透性硬度波动范围不超过标准 H 钢的硬度范围的 65%。RH 钢多为经常应用的钢号。

保证淬透性能的 H 钢和缩窄淬透性能带的 RH 钢的化学成分和淬透性能分别列于表 1-1-71 和表 1-1-72。

表 1-1-71 美国广泛应用的 H 钢和 RH 钢的化学成分

钢号	化学成分（%）					
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
15B21H	0.17～0.24	0.70～1.20	0.15～0.35			
15B21RH	0.17～0.22	0.80～1.10	0.15～0.35			
3310RH	0.08～0.13	0.40～0.60	0.15～0.35	3.25～3.75	1.40～1.75	
4027H	0.24～0.30	0.60～1.00	0.15～0.35			0.20～0.30
4027RH	0.25～0.30	0.70～0.90	0.15～0.35			0.20～0.30
4118H	0.17～0.23	0.60～1.00	0.15～0.35		0.30～0.70	0.08～0.15

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢 号	化学成分（%）					
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
4118RH	0.18~0.23	0.70~0.90	0.15~0.35		0.40~0.60	0.08~0.15
4120RH	0.18~0.23	0.90~1.20	0.15~0.35		0.40~0.60	0.13~0.20
4320H	0.17~0.23	0.40~0.70	0.15~0.35	1.55~2.00	0.35~0.65	0.20~0.30
4320RH	0.17~0.22	0.45~0.65	0.15~0.35	1.65~2.00	0.40~0.60	0.20~0.30
4620H	0.17~0.23	0.35~0.75	0.15~0.35	1.55~2.00		0.20~0.30
4620RH	0.17~0.22	0.45~0.65	0.15~0.35	1.65~2.00		0.20~0.30
4820H	0.17~0.23	0.40~0.80	0.15~0.35	3.20~3.80		0.20~0.30
4820RH	0.18~0.23	0.50~0.70	0.15~0.35	3.25~3.75		0.20~0.30
8620H	0.17~0.23	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25
8620RH	0.18~0.23	0.70~0.90	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25
8622H	0.19~0.25	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25
8622RH	0.20~0.25	0.70~0.90	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25
8720H	0.17~0.23	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.20~0.30
8720RH	0.18~0.23	0.70~0.90	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.20~0.30
8822H	0.19~0.25	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.30~0.40
8822RH	0.20~0.25	0.75~1.00	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.30~0.40
9310H	0.07~0.13	0.40~0.70	0.15~0.35	2.95~3.55	1.00~1.45	0.08~0.15
9310RH	0.08~0.13	0.45~0.65	0.15~0.35	3.00~3.50	1.00~1.40	0.08~0.15

表 1-1-72 美国广泛应用的 H 钢和 RH 钢的淬透性能

钢 号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度 RHC																
		1.6	3.2	4.8	6.4	8.0	9.6	11.2	12.8	14.4	16	19.2	22.4	25.6	28.8	32	35.2	38.4
13B21RH	最大	47	46	44	42	37	30	24	22	20								
	最小	42	41	39	33	24	20											
3310RH	最大	42	42	42	41	41	41	40	40	39	39	39	38	37	36	36	35	35
	最小	37	37	37	36	36	35	34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	27
4027H	最大	52	50	48	40	34	30	28	26	25	25	23	22	21	21	20		
	最小	45	40	31	25	22	20	—										
4027RH	最大	51	48	43	37	32	28	26	24	23	22	21	20					
	最小	46	42	34	28	24	22	20										
4118H	最大	48	48	41	35	31	28	27	25	24	23	21	20					
	最小	41	35	27	23	20												
4118RH	最大	47	44	38	33	29	27	25	24	23	22	20						
	最小	42	38	30	25	22	20											

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度 RHC																
		1.6	3.2	4.8	6.4	8.0	9.6	11.2	12.8	14.4	16	19.2	22.4	25.6	28.8	32	35.2	38.4
4120RH	最大	47	45	41	38	34	31	29	28	26	25	23	22	21	20			
	最小	42	39	35	30	26	24	22	21	20								
4320H	最大	48	47	45	43	41	38	35	34	33	31	29	27	26	25	25	24	24
	最小	41	38	35	32	29	27	25	23	22	21	20						
4320RH	最大	47	46	44	41	39	36	34	32	31	29	26	24	23	22	22	21	21
	最小	42	40	37	34	31	29	27	25	24	23	21						
4620H	最大	48	45	42	39	34	31	29	27	26	25	23	22	21	21	20		
	最小	41	35	27	24	21												
4620RH	最大	47	44	40	37	32	29	27	25	24	23	21						
	最小	42	37	30	27	24	21	20										
4820H	最大	48	48	47	46	45	43	42	40	39	37	35	33	31	29	28	28	27
	最小	41	40	39	38	34	31	29	27	26	25	23	22	21	20	20		
4820RH	最大	47	47	46	45	43	41	40	38	36	35	33	31	29	28	27	26	25
	最小	42	42	41	40	36	33	32	30	28	27	25	24	23	22	22	21	20
8620H	最大	48	47	44	41	37	34	32	30	29	28	26	25	24	23	23	23	23
	最小	41	37	32	27	23	21											
8620RH	最大	47	45	41	38	34	31	29	28	26	25	23	22	21	20			
	最小	42	39	35	30	26	24	22	21	20								
8622H	最大	50	49	47	44	40	37	34	32	31	30	28	26	25	25	24	24	24
	最小	43	39	34	30	26	24	22	20									
8622RH	最大	49	47	45	41	38	35	32	30	29	28	26	24	23	23	22	22	22
	最小	44	41	37	32	29	27	24	22	21	20							
8720H	最大	48	47	45	42	38	35	33	31	30	29	27	26	25	24	24	23	23
	最小	41	38	35	30	26	24	22	21	20								
8720RH	最大	47	45	43	40	36	33	31	29	28	27	25	24	23	23	22	22	21
	最小	42	39	37	32	28	26	24	23	22	21							
8822H	最大	50	49	48	46	43	40	37	35	34	33	31	30	29	29	28	27	27
	最小	43	42	39	33	29	27	25	24	24	23	22	22	21	20			
8822RH	最大	49	48	47	43	40	37	35	33	32	31	30	28	27	27	26	26	26
	最小	44	43	40	35	31	29	27	26	25	25	23	23	22	21	20		
9310H	最大	43	43	43	42	42	42	42	41	40	40	38	36	35	35	35	34	34
	最小	36	35	35	34	32	31	30	29	28	27	26	26	26	26	25	25	25
9310RH	最大	42	42	42	41	41	40	40	39	38	37	36	34	33	33	32	32	32
	最小	37	36	36	35	34	33	32	31	30	29	28	28	27	27	26	26	26

汽车论坛 http://www.qclt.com

在美国标准中列的钢号很多，这给用户提供了广泛选择的机会，但是给钢厂的生产也许会带来一些不便。

对于断面尺寸较小的变速器齿轮选用 4027、4118、1524 等含合金元素较少的钢材，而对于断面较大的齿轮选用 4620、4820、4320 等含合金元素较多的钢材。

d. 日本渗碳钢的性能数据及应用情况

在日本 JISG4052（1979）标准中列出的低碳合金钢均可作为渗碳钢应用，列出的钢号不多，只有 Mn 钢、Cr-Mn 钢、Cr Mo 钢、Ni-Cr 钢和 Ni-Cr-Mo 钢共 12 个钢号，其化学成分和淬透性能数据列于表 1-1-73 和表 1-1-74。

表 1-1-73 日本保证淬透性能的渗碳钢化学成分

钢号	化学成分（%）							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SMn420H	0.16～0.23	0.15～0.35	1.15～1.55	≤0.030	≤0.030			
SMnC420H	0.16～0.23	0.15～0.35	1.15～1.55	≤0.030	≤0.030		0.35～0.70	
SCr415H	0.12～0.18	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030		0.85～1.25	
SCr420H	0.17～0.23	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030		0.85～1.25	
SCM415H	0.12～0.18	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030		0.85～1.25	0.15～0.35
SCM418H	0.15～0.21	0.15～0.25	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030		0.85～1.25	0.15～0.35
SCM420H	0.17～0.23	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030		0.85～1.25	0.15～0.35
SCM822H	0.19～0.25	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030		0.85～1.25	0.35～0.45
SNC415H	0.11～0.18	0.15～0.35	0.30～0.70	≤0.030	≤0.030	1.95～2.50	0.20～0.55	
SNC815H	0.11～0.18	0.15～0.35	0.30～0.70	≤0.030	≤0.030	2.95～3.50	0.65～1.05	
SNCM220H	0.17～0.23	0.15～0.35	0.60～0.95	≤0.030	≤0.030	0.35～0.75	0.35～0.65	0.15～0.30
SNCM420H	0.17～0.23	0.15～0.35	0.40～0.70	≤0.030	≤0.030	1.55～2.00	0.35～0.65	0.15～0.30

在 JIS 标准中所列的各种钢号的淬透性能曲线带均较宽，不太适合大量流水高度自动化的汽车生产，但是汽车厂向钢厂定货时可以采用淬透性能带宽度为 JIS 标准中规定的三分之二的宽度的淬透性能带供货。

表 1-1-74 日本渗碳钢的淬透性能

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度 HRC														
		1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
SMn420H	最大	48	46	42	36	30	27	25	24	21						
	最小	40	36	21												
SMnC420H	最大	48	48	45	41	37	33	31	29	26	24	23				
	最小	40	39	33	27	23	20									
SCr415H	最大	46	45	41	35	31	28	27	26	23	20					
	最小	39	34	26	21											
SCr420H	最大	48	48	46	40	36	34	32	31	29	27	26	24	23	23	22
	最小	40	37	32	28	25	22	21								

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度 HRC														
		最小	40	37	32	28	25	22	21							
SCM415H	最大	46	45	42	38	34	31	29	28	26	25	24	24	23	23	22
	最小	39	36	29	24	21	20									
SCM418H	最大	47	47	45	41	38	35	33	32	30	28	27	27	26	26	25
	最小	39	37	31	27	24	22	21	20							
SCM420H	最大	48	48	47	44	42	39	37	35	33	31	30	30	29	29	28
	最小	40	39	35	31	28	25	24	23	20	20					
SCM822H	最大	50	50	50	49	48	46	43	41	39	38	37	36	36	36	36
	最小	43	42	41	39	36	32	29	27	24	24	23	22	22	21	21
SNC415H	最大	45	44	39	35	31	28	26	24	21						
	最小	37	32	24												
SNC815H	最大	46	46	46	46	45	44	43	41	38	35	34	34	33	33	32
	最小	38	37	36	34	31	29	27	26	24	22	22	22	21	21	21
SNCM220H	最大	48	47	44	40	35	32	30	29	26	24	23	23	23	22	22
	最小	41	37	30	25	22	20									
SNC420H	最大	48	47	46	42	39	36	34	32	29	26	25	24	24	24	24
	最小	41	38	34	30	27	25	23	22							

虽然在 JIS 标准中列出了 12 种渗碳钢，但是根据资料的介绍和我们分析日本产的汽车齿轮的结果来看，轿车、轻型和中型载货汽车的变速器齿轮多采用 Cr 钢（SCr415H 和 SCr420H）和 Cr-Mo 钢（SCM415 和 SCM420）制造，而后桥齿轮多采用 Cr-Mo 钢（SCM420 和 SCM822）制造。

2）渗氮钢（氮化钢）

渗氮钢多为含碳量偏低的中碳钢。调质处理后加工成零件，在 500～580℃之间加热进行渗氮处理（其温度低于调质处理的回火温度）后不再进行任何加工，经渗氮处理后，可以得到非常高的表面硬度，因而耐磨性能优越，咬死和擦伤的倾向小；有一定的耐热性，在低于渗氮温度下加热时可以保持高的硬度，改善抗腐蚀性能；由于表层形成残余压应力，可以提高零件的疲劳性能，改善对缺口的敏感性。

传统的渗氮钢是含铝、铬和钼的合金钢，渗氮钢要得到满意的渗氮层，钢中要含 1%左右的铝。不含铝时，形成的渗氮层脆，很容易剥落。渗氮钢中铝的作用在于形成非常稳定的氮化铝，在真空中加热到 1 100℃时它仍不分解，而其它元素形成的氮化物在真空中加热到 600℃就开始分解。钢中加铬增加渗氮层的韧性，提高渗氮层的硬度，增加渗氮层的深度，铬还增加钢的淬透性能，改善零件的心部性能。钢中加钼可以进一步改善渗氮层的韧度，同时也增加钢的淬透性能，改善心部性能并消除回火脆性。

国内外应用的渗氮钢成分列于表 1-1-75。

表 1-1-75 几个国家应用的氮化钢的化学成分

国家	标准号	钢号	化学成分									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ni	V
中国	GB 3077—88	38CrMoAl	0.35～0.42	0.20～0.45	0.30～0.60	≤0.035	≤0.035	1.35～1.65	0.15～0.25	0.70～1.10	—	—

续上表

国家	标准号	钢 号	化学成分									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ni	V
德国	DIN17211	31CrMo12	0.28～0.35	≤0.40	0.40～0.70	≤0.025	≤0.030	2.80～3.30	0.30～0.50	—	≤0.30	—
		31CrMoV9	0.26～0.34	≤0.40	0.40～0.70	≤0.025	≤0.030	2.30～2.70	0.15～0.25	—	—	0.10～0.20
		15CrMoV59	0.13～0.18	≤0.40	0.80～1.10	≤0.025	≤0.030	1.20～1.50	0.80～1.10	—	—	0.20～0.30
		34CrAlMo5	0.30～0.37	≤0.40	0.50～0.80	≤0.025	≤0.030	1.00～1.30	0.15～0.25	0.80～1.20	—	—
		34CrAlNi7	0.30～0.37	≤0.40	0.40～0.70	≤0.025	≤0.030	1.50～1.80	0.15～0.25	0.80～1.20	0.85～1.15	—
美国		125（M）	0.20～0.30	0.20～0.40	0.40～0.70			0.90～1.40	0.15～0.25	0.85～1.20	—	—
		135（G）	0.30～0.40	0.20～0.40	0.40～0.70			0.90～1.40	0.15～0.25	0.85～1.20	—	—
		135（飞机）	0.38～0.45	0.20～0.40	0.40～0.70			1.40～1.80	0.30～0.45	0.85～1.20	—	—
日本	J1SG4202（1979）	SACM645	0.40～0.50	0.15～0.50	≤0.60	≤0.30	≤0.030	1.30～1.70	0.15～0.30	0.70～1.20	—	—

渗氮钢制造的零件要得到需要的渗氮层要在渗氮温度加热几十小时才能实现，生产效率低，能耗大，只有变形要求非常严格或渗碳不能满足使用要求的零件才采用渗氮处理。

3）感应加热淬火用钢

感应加热表面淬火与调质处理和渗碳处理相比有下列优点：

①表面淬硬而心部仍保持有较高的塑性和韧性，零件不容易发生脆性破坏；

②表面局部加热，零件的淬火变形小、节能；

③加热速度快，生产率高，可以完全消除零件表面的氧化与脱碳；

④在零件表面层形成残余压应力，提高了零件的疲劳强度；

⑤感应加热淬火设备可以安置在机械加工的流水线上，减少了零件的往返运输，还便于组织生产。

由于感应加热表面淬火有上述优点，所以不仅原来要求耐磨的渗碳零件用感应加热表面淬火代替了，而且要求疲劳性能的调质零件（如半轴、转向节）最近也被它代替了。

感应淬火用钢一般为中碳碳素钢（如45钢）和中碳合金钢（如40Cr、40MnB）。钢中含碳量是影响感应加热表面淬火后性能的最主要因素。提高含碳量可以增加零件的表面硬度与耐磨性，但却增加了淬硬层的脆性、降低心部的韧性并增加淬火裂纹倾向。有时为了保证零件的淬火质量采用含碳量范围缩窄的精选钢，如汽车发动机凸轮轴选用含碳量为0.44%～0.49%的45钢。

当零件的心部的力学性能要求较高时，感应加热淬火前，零件要进行调质处理。感应加热淬火时，为使奥氏体均匀化，常采用较高的加热温度，为避免奥氏体晶粒长大，淬火后形成粗大马氏体恶化力学性能，感应淬火用钢为本质细晶粒钢。

圆柱形的轴、销类零件选用冷拉钢制造。如原材料的脱碳层过深超过磨削余量，淬火后磨削加工不能

汽车论坛 http://www.qclt.com

把脱碳层全部磨掉，表面硬度将达不到要求。因此用于制造感应淬火轴类零件的冷拉钢要控制其脱碳层。

我国、日本等国没有专门用于感应淬火用钢的标准，只在有关标准中选用中碳钢就可以了，有时提出精选含碳量的补充技术要求。德国有专门的火焰淬火和感应淬火用钢标准（DIN17212—1972），在该标准中列入碳钢牌号4个，合金钢牌号5个共9个钢号。

1.1.3.3 强韧钢

调质钢、非调质钢和低碳马氏体钢制成的零件经过适当的热处理都具有良好的强韧性。制造的典型零件如汽车的转向节、前梁、连杆和半轴等。传统的钢种为调质钢，零件淬火后再高温回火，组织为索氏体；近年来，为了节能，开发并生产应用了非调质钢，即在含锰较高的钢中加入微量钒，锻造（轧制）后控制冷却速度，不经过调质处理也可以得到需要的强韧性；将低碳钢或低碳合金钢淬火后低温回火处理，得到低碳马氏体组织，也具有良好的强韧性，因其含碳量低，便于冷塑性成形，适合于制作冷锻成形的高强度螺栓。

1）调质钢

大多数调质钢的含碳量在0.30%～0.60%范围内，在标准中所列的中碳钢都可以作为调质钢使用。

调质钢零件的典型生产工艺流程如下：

热轧钢材→锻造（平锻、模锻或精锻）→ 调质处理（241～285HB）→切削加工→质量检查→装配

热轧钢材→锻造（平锻、模锻或精锻）→ 正火处理（207～241HB）→切削加工→调质处理（341～415HB）→校直→装配

（1）选用调质钢时考虑的因素

在选用调质钢时既要考虑其工艺性能，也要考虑其力学性能。

a. 工艺性能

调质钢制造汽车零件时要经过锻造、切削加工和调质热处理，要结合制造工艺来考虑其工艺性能。

钢材的化学成分对锻造性能影响不大，但钢材表面质量对锻造却有很大影响，用于锻造的钢材必须经过表面清理，将表面缺陷清除，这种钢材在标准中称“热加工用钢”，而不经锻造直接切削加工的钢材称“切削加工用钢”，机械制造厂根据自己的加工工艺选用“热加工用钢”或“切削加工用钢”。

切削加工是零件制造中所占费用最高的加工工序，钢材的可切削加工性能对切削加工时的刀具耐用度、零件表面的粗糙度和动能消耗都有影响，因此在大量流水生产的汽车厂在采用一种新钢材代替原来应用的钢材时，必须通过生产试验来检验新钢材的可切削加工性能。

调质零件须经淬火和高温回火的调质处理，淬火时要控制淬火变形和防止产生淬火裂纹，钢材含碳量和合金元素含量越高淬透性能越好时，淬火时越容易产生淬火裂纹，这时宜采用油淬，以防止产生淬火裂纹。通过调整回火温度可以得到需要的硬度，回火时要注意防止回火脆性。

b. 零件的尺寸与钢材的淬透性能

零件淬火得到全部马氏体再回火得到索氏体组织有最好的综合力学性能。但是如果零件尺寸增大，淬火后得不到全部马氏体而有部分铁素体或珠光体组织时，钢材的综合力学性能将会恶化，屈强比和冲击值将降低。表1-1-76示出断面尺寸对45Mn2钢力学性能的影响。

表1-1-76 不同断面的45Mn2钢的力学性能

热处理	直径（mm）	σ_b（MPa）	σ_s（MPa）	$\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$	δ_5（%）	Ψ（%）	a_K（J/cm²）	HB
850℃加热淬油 575℃回火水冷	12.5	1069	981	0.92	16.5	55.0	87.3	293
	25	952	785	0.83	17.5	54.5	102	277
	50	863	574	0.67	20.5	56.5	83.4	241
	100	839	559	0.67	20.0	56.0	58.9	229

但是，尺寸增大时，如选用合金元素含量较高淬透性能较好的钢材，淬火后金相组织中非马氏体组织会减少，综合力学性能也会明显的改善，表 1-1-77 示出尺寸相同但淬透性能不同的钢材调质后的力学性能。

表 1-1-77 淬透性能不同的钢径相同的调质处理后的力学性能

直径及热处理	钢 号	淬透性 J_9（HRC）	σ_0（MPa）	σ_s（MPa）	$\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$	δ_5（%）	ψ（%）	a_K（J/cm²）	HB
φ50mm 850℃加热淬油 575℃回火	45Mn2	47	862	573	0.67	20.5	56.5	83.3	241
	35CrMo	52	960	774	0.81	17.5	54.0	100.0	304
	40CrNiMo	58	1009	892	0.88	17.5	60.0	137	309

上述数据充分说明零件尺寸和钢材的淬透性能对调质状态的力学性能的显著影响，所以选用钢材时要结合零件的尺寸选用淬透性能合适的钢材。

c. 淬透性能的测定方法与表示方法

测定结构钢淬透性能最普遍的方法是末端淬火法（GB225—63）。用淬透性能曲线（也称末端淬火曲线）表示钢材的淬透性能，或用 J 值表示，如 J_9 = 30～45HRC，即距冷却端 9mm 处的硬度值为 30～45HRC。

因为末端淬火试样淬火时的冷却条件是严格控制的，所以距端末不同距离处的冷却速度的数值是一定的，靠近水冷却端的冷却速度最大，距冷却端越远，冷却速度越小，整个试样上冷却速度的变化范围约为 2～230℃/s。这大致相当于直径 100mm 以下各种尺寸的圆柱淬水、淬油或其他冷却介质时，在不同部位的冷却速度变化范围，因此可以在一个末端淬火试样上，得到圆棒在不同冷却条件下，距末端不同距离、不同部位和冷却速度的关系，见图 1-1-24，如直径为 50mm 的圆棒淬水时，它表面和心部的冷却速度分别为 272℃/s 和 18℃/s，这分别相当于距端末 1.5mm 和 12.5mm 处的冷却速度。

d. 机器零件淬透深度的确定：

任何一种零件整个断面都完全淬透再高温回火，可以得到最好的综合力学性能，但是这意味着要使用含合金元素较多，淬透性能较好而且价格较贵的合金钢。事实上不是所有零件都要求完全淬透，因此必须根据零件的受力情况进行具体分析来确定其淬透深度。

第一种情况是整个断面承受均匀拉伸应力或压缩应力的零件（如螺栓），要求整个断面完全淬透，几乎为全部马氏体组织。一般的讲，硬度在 500HB 以下，抗拉强度和硬度几乎成直线关系，整个断面完全淬透时，其屈服强度和硬度也成直线关系。但是淬火时如果没有完全淬透（心部出现非马氏体组织），虽然可以用降低回火温度得到需要的硬度，但是屈服强度将降低，这样就降低了零件的质量，如气缸盖螺栓在装配时将达不到规定的扭矩而发生塑性变形，使螺栓拉长。因此，制造整个断面承受均匀分布应力的零件，钢材的淬透性能应保证零件断面完全淬透。

第二种情况是承受弯曲和扭转应力的零件，如汽车的转向节（弯曲应力）和半轴（扭转应力）。承受弯曲和扭转载荷时，零件的表面应力最

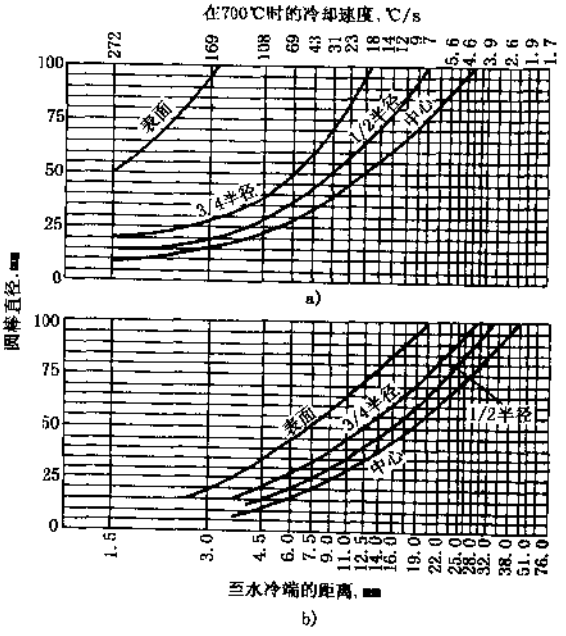


图 1-1-24 不同直径的圆棒淬火后，从表面至中心各点与末端淬火试棒距试样末端各距离的关系曲线

a）棒材淬入缓动的水中；b）棒材淬入缓动的油中

汽车论坛 http://www.qclt.com

大，自表面向里应力逐渐递减，至心部趋于零。这类零件不需要很深的淬透层，一般距表面1/4半径处淬火时能得到80%马氏体已足够。

淬硬深度适当时，淬火后零件表层还会产生残余压应力，从而抵消一部分由于弯曲或扭转载荷在表层形成的拉应力，提高了零件的疲劳性能。

第三种情况是热处理要求耐磨的零件。中碳钢热处理后表面硬度越高，耐磨性能越好。对于这类零件选择钢材时，要注意钢的含碳量及其淬透性，保证零件淬火后能够获得规定的表面硬度和足够的淬硬深度。

(2) 调质钢的力学性能

各种零件的工作条件和载荷情况不同，对钢材的力学性能的要求也不同。

有些零件工作时要求有足够的刚度以抵抗承载时产生的弹性变形，而零件的刚度与材料的弹性模量E、零件的截面积和零件的形状有关，材料的弹性模量E与金属的原子结构和晶体类型有关，铁合金(钢)的原子结构与晶体类型是一定的，所以热处理和合金化对钢的弹性模量E的影响均不大，要提高零件的刚度不能指望通过热处理或采用合金钢来解决，只能通过加大零件的截面尺寸或改变零件形状来解决。

有些零件承受静载荷，不允许产生超过允许限度的永久变形，这时就要求零件淬火时完全淬透，因为当抗拉强度(硬度)相同时，完全淬透有较高的屈服强度。

材料的疲劳强度、多次冲击抗力、磨损抗力是决定零件使用寿命的重要指标。承受交变载荷的零件经常是疲劳损坏的，材料的疲劳性能决定着这些零件的寿命。钢材的化学成分、金相组织、零件的尺寸及形状(它决定零件的应力集中情况)以及残余内应力的分布对疲劳性能都有影响，特别是零件表面情况的影响更为显著，疲劳损坏源于拉应力，因此采用表面强化方法在零件表层形成有利的残余压应力可以有效地降低拉应力峰值，从而提高零件的疲劳性能。承受小能量多次冲击的零件，要求采用较低的回火温度(强度指标较高而塑性指标较低)，可以得到较高的多冲抗力。构成摩擦副的零件，磨损抗力是决定其寿命的主要因素，零件的表面情况、润滑情况、硬度、表面金相组织以及互相摩擦的零件的性能差别等，都影响磨损性能。

a. 合金元素对力学性能的影响

淬透性能相同的钢调质到相同硬度时，抗拉强度基本相同，硬度与抗拉强度大致成直线关系，见图1-1-25。

各种成分的合金钢调质到不同硬度时，屈强比和抗拉强度的关系见图1-1-26。硬度为400HB(抗拉强度约为1 400MPa)时，屈强比值最高，约为0.9，淬火状态的组织对屈强比有很大影响，图中左边的虚线表示淬火时未完全得到马氏体，右边的虚线表示得到完全马氏体组织。

调整钢中合金元素的种类及其含量，可以得到淬透性能相同的钢，通过适当的调质处理可以得到相同的抗拉强度和屈服强度。因此，在选择合金元素时应优先选择增加淬透性能作用显著而价格较低的元素，如硼、锰、铬等。但是合金元素不同的钢要调质得到相同的硬度所采用的回火温度各不相同，即各种钢的抗回火性能不同。

淬透性能相同的钢调质到相同的硬度时，虽然抗拉强度和屈服强度基本相同，但是脆性破坏倾向却有很大差别，低温冲击试验结果见图1-1-27。

成分不同的钢调质后硬度与疲劳极限的关系见图1-1-28。硬度在35HRC以下时疲劳极限与硬度成直线关系，疲劳极限的波动范围为130MPa。硬度超过35HRC时，疲劳极限的波动范围较宽，如硬度为55HRC时，疲劳极限的波动范围达380MPa。

b. 调质零件硬度的确定

零件的淬透情况相同时，调质后的硬度即可反映零件的屈服强度与抗拉强度，因此零件的图纸和技术条件一般只规定硬度数值。只有很重要的零件才规定其他力学性能指标。

调质零件硬度的确定，必须考虑制造工艺的要求和使用时的载荷条件。从制造工艺考虑，希望零件在毛坯状态调质，而后进行切削加工装配。这样零件热处理时产生的变形和脱碳在以后的切削加工中加以消

汽车论坛 http://www.qclt.com

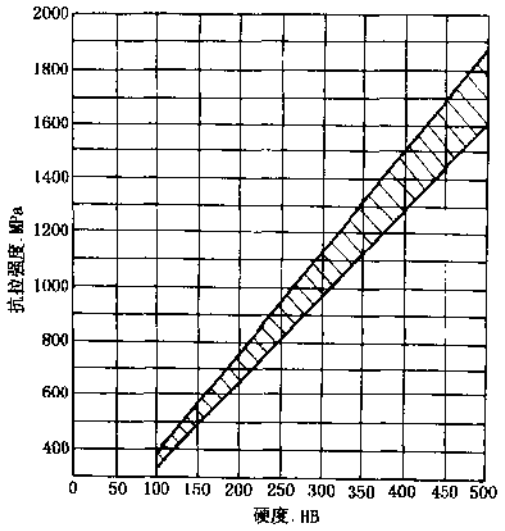


图 1-1-25 硬度与抗拉强度的关系

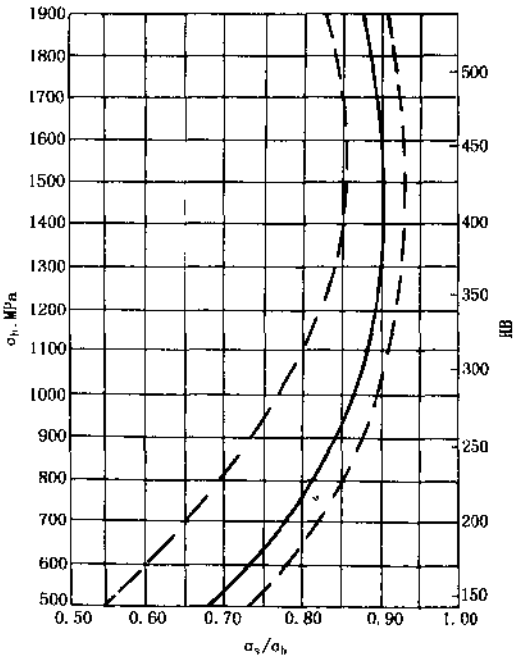


图 1-1-26 屈强比与抗拉强度的关系

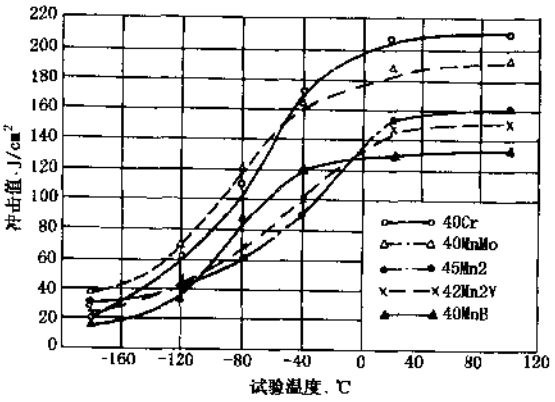


图 1-1-27 五种钢的低温冲击韧性

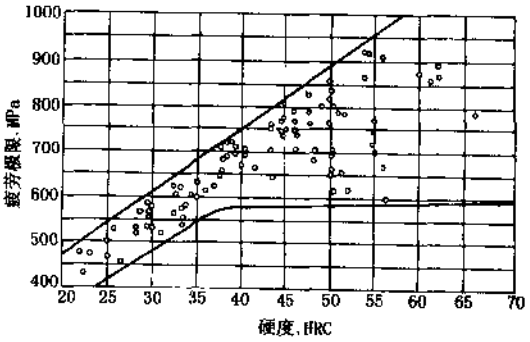


图 1-1-28 硬度与疲劳极限的关系

除。但是采用这种制造程序的零件，其硬度不能过高，一般不超过 300HB，个别的不超过 350HB，否则切削加工困难。要求硬度更高的零件（如有些汽车半轴要求硬度为 341～415HB），只能先切削加工，然后再进行调质处理，这时零件加热时应防止脱碳，淬火时应防止变形，有时热处理后要增加校直工序。小批量或单件生产的零件，切削加工所允许的硬度可以适当提高。

确定调质零件硬度时还必须考虑到生产的特点，小批量单件生产的产品，不同零件可以选定不同的硬度，大批量流水生产的工厂希望大部分零件的硬度范围一致或固定在几个硬度范围之内，以便于组织热处理的生产。

从零件使用角度考虑，确定调质零件的硬度时要注意到零件的工作条件和零件的形状。一般的讲，硬度提高，光滑样品的疲劳强度提高，但是对应力集中的敏感性增加，因此，当零件上有起应力集中作用的

汽车论坛 http://www.qclt.com

缺口（花键、槽或断面变化大）时，为使应力分布均匀，减少应力集中现象，较低的硬度反而可以获得较高的疲劳性能。

(3) 主要国家应用的调质钢性能数据

a. 中国的调质钢性能数据

在中国“GB699—88 优质碳素结构钢技术条件”和 GB3077—88 合金结构钢技术条件”中所列的中碳钢都可以作调质钢使用。它们的化学成分列于表 1-1-78。

但是要保证生产稳定和产品质量，大量流水生产的汽车厂都选用保证淬透性能的调质钢，在国家标准 GB5216—85 中只列出 5 种保证淬透性能的中碳钢作为调质钢使用，它们的淬透性能数据列于表 1-1-79。

可以根据零件的断面尺寸和要求的屈服强度选用不同的钢号，零件的断面尺寸越大和要求的屈服强度越高，选用钢材的含合金元素也越多，即淬透性能越高的钢材。图 1-1-29 示出零件断面尺寸，要求的屈服强度和选用钢材的情况。

表 1-1-78 中国常用调质钢的化学成分

钢号	化学成分 (%)								
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	B	其它
35	0.32~0.40	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25				
40	0.37~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25				
45	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	≤0.25				
35Mn	0.32~0.40	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25	≤0.25				
40Mn	0.37~0.45	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25	≤0.25				
45Mn	0.42~0.50	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25	≤0.25				
35Mn2	0.32~0.39	0.17~0.37	1.40~1.80	≤0.30	≤0.30				
40Mn2	0.37~0.44	0.17~0.37	1.40~1.80	≤0.30	≤0.30				
45Mn2	0.42~0.49	0.17~0.37	1.40~1.80	≤0.30	≤0.30				
50Mn2	0.47~0.55	0.17~0.37	1.40~1.80	≤0.30	≤0.30				
35SiMn	0.32~0.40	1.10~1.40	1.10~1.40	≤0.30	≤0.30				
42SiMn	0.39~0.45	1.10~1.40	1.10~1.40	≤0.30	≤0.30				
30Mn2MoW	0.27~0.34	0.17~0.37	1.70~2.00	≤0.30	≤0.30	0.40~0.50			W: 0.60~1.00
37SiMn2MoV	0.33~0.39	0.60~0.90	1.60~1.90	≤0.30	≤0.30	0.40~0.50	0.05~0.12		
40B	0.37~0.44	0.17~0.37	0.60~0.90	≤0.30	≤0.30			0.0005~0.0035	
45B	0.42~0.49	0.17~0.37	0.60~0.90	≤0.30	≤0.30			0.0005~0.0035	
50B	0.47~0.55	0.17~0.37	0.60~0.90	≤0.30	≤0.30			0.0005~0.0035	
40MnB	0.37~0.44	0.17~0.37	1.10~1.40	≤0.30	≤0.30			0.0005~0.0035	
45MnB	0.42~0.49	0.17~0.37	1.10~1.40	≤0.30	≤0.30			0.0005~0.0035	
40MnVB	0.37~0.44	0.17~0.37	1.10~1.40	≤0.30	≤0.30		0.05~0.10	0.0005~0.0035	
35Cr	0.32~0.39	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.30	0.80~1.10				
40Cr	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.30	0.80~1.20				
45Cr	0.42~0.49	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.30	0.80~1.10				
50Cr	0.47~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.30	0.80~1.10				

续上表

钢 号	化学成分（%）								
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	B	其它
35CrMo	0.32～0.40	0.17～0.37	0.40～0.70	≤0.30	0.80～1.00	0.15～0.25			
42CrMo	0.38～0.45	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.30	0.90～1.20	0.15～0.25			
38CrSi	0.35～0.43	1.0～1.30	0.30～0.60	≤0.30	1.30～1.60				
40CrV	0.37～0.44	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.30	0.80～1.10		0.10～0.20		
50CrVA	0.47～0.54	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.30	0.80～1.10		0.10～0.20		
40CrMn	0.37～0.45	0.17～0.37	0.90～1.20	≤0.30	0.90～1.20				
30CrMnSi	0.27～0.34	0.90～1.20	0.80～1.10	≤0.30	0.80～1.10				
30CrMnSiA	0.28～0.34	0.90～1.20	0.80～1.10	≤0.30	0.80～1.10				
35CrMnSiA	0.32～0.39	1.10～1.40	0.80～1.10	≤0.30	1.10～1.40				
40CrMnMo	0.37～0.45	0.17～0.37	0.90～1.20	≤0.30	0.90～1.20	0.20～0.30			
40CrNi	0.37～0.44	0.17～0.37	0.50～0.80	1.00～1.40	0.45～0.75				
45CrNi	0.42～0.49	0.17～0.37	0.50～0.80	1.00～1.40	0.45～0.75				
50CrNi	0.47～0.54	0.17～0.37	0.50～0.80	1.00～1.40	0.45～0.75				
37CrNi3	0.37～0.41	0.17～0.37	0.30～0.60	3.00～3.50	1.20～1.60				
40CrNiMoA	0.37～0.44	0.17～0.37	0.50～0.80	1.25～1.65	0.60～0.90	0.15～0.25			
45NiCrMoVA	0.42～0.49	0.17～0.37	0.50～0.80	1.30～1.80	0.80～1.10	0.20～0.30	0.10～0.20		

注：优质钢：P≤0.035、S≤0.035、Cu≤0.30；高级优质钢（A）：P≤0.025、S≤0.025、Cu≤0.25；35、40、45钢：Cu≤0.25。

表 1-1-79 中国保证淬透性能调质钢（H钢）的淬透性能

钢 号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度值 HRC												
		1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	12	15	18	21	24	27	30
45H	最大	61	60	55	40	35	33	31	29	28	27	26	25	24
	最小	54	37	28	26	24	23	21						
40CrH	最大	59	59	58	57	56	54	48	43	41	39	38	37	37
	最小	51	51	50	48	46	42	34	30	27	26	25	24	23
45CrH	最大	62	62	61	60	58	56	50	45	42	41	40	39	38
	最小	54	54	53	51	48	44	35	31	29	28	27	26	25
40MnBH	最大	60	60	59	58	57	55	51	45	50	36	34	32	31
	最小	51	50	49	48	46	43	27	23	21	20			
45MnBH	最大	63	63	62	61	60	58	53	47	42	39	37	35	34
	最小	54	53	52	51	49	46	30	26	24	23	22	22	21

b. 德国的调质钢性能数据

德国1991年颁布的调质钢标准中（DIN10083）列出24个钢号，其中碳素钢9个钢号，合金钢15个钢号。其中一部分钢号规定有两种含硫量，一种含硫量小于0.035%；另一种为0.020%～0.035%，这种钢的钢号后加一个“S”字。

汽车论坛 http://www.qclt.com

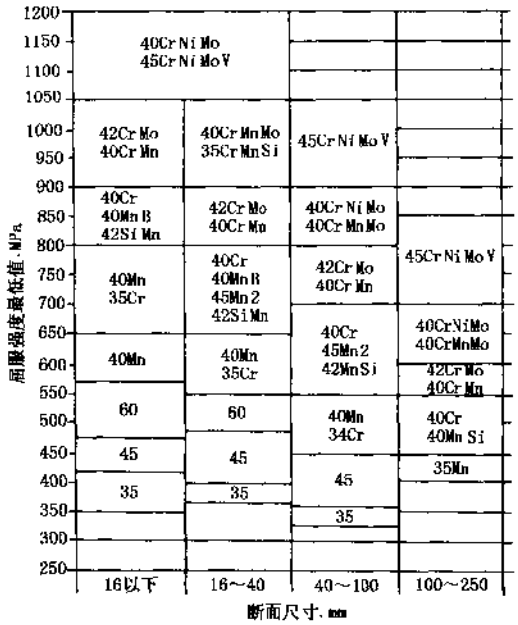


图 1 1-29 零件的断面尺寸、要求的屈服强度及选用的钢材

在定货时，对于合金调质钢可以要求钢材的淬透性能在给定的范围内，也可以要求缩窄淬透性能的钢材，其淬透性能只有正常淬透性能带的 2/3 宽，淬透性能带位于正常带的下部 2/3，则在钢号末尾用 HL 表示；位于上部 2/3，则用 HH 表示，它们的化学成分与标准的 H 钢相同，但在生产时要缩小化学成分范围。

DIN10083 中列出的化学成分与淬透性能数据见表 1-1-80、表 1-1-81 和表 1-1-82。

表 1-1-80 德国调质钢的化学成分

钢号	化学成分 (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
2C22	0.17~0.24	≤0.40	0.40~0.70	≤0.035	≤0.035	≤0.040	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C22					0.020~0.040					
2C25	0.22~0.29	≤0.40	0.40~0.70	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C25					0.020~0.040					
2C30	0.27~0.34	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C30					0.020~0.040					
2C35	0.32~0.39	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C35					0.020~0.040					
2C40	0.37~0.44	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C40					0.020~0.040					

续上表

钢 号	化学成分（%）									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cr+Mn+Ni
2C45	0.42~0.50	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C45					0.020~0.040					
2C50	0.47~0.55	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C50					0.020~0.040					
2C55	0.52~0.60	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C55					0.020~0.040					
2C60	0.57~0.65	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
3C60					0.020~0.040					
28Mn6	0.25~0.32	≤0.40	1.30~1.65	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.10	≤0.40	—	≤0.63
38Cr2	0.35~0.42	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	0.40~0.60	—	—	—	—
38CrS2					0.020~0.040					
46Cr2	0.42~0.50	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	0.40~0.60	—	—	—	—
46CrS2					0.020~0.040					
34Cr4	0.30~0.37	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	—	—	—	—
34CrS4					0.020~0.040					
37Cr4	0.34~0.41	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	—	—	—	—
37CrS4					0.020~0.040					
41Cr4	0.38~0.45	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	—	—	—	—
41CrS4					0.020~0.040					
25CrMo4	0.22~0.29	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	0.15~0.30	—	—	—
25CrMoS4					0.020~0.040					
34CrMo4	0.30~0.37	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	0.15~0.30	—	—	—
34CrMoS4					0.020~0.040					
42CrMo4	0.38~0.45	≤0.40	0.60~0.90	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	0.15~0.30	—	—	—
42CrMoS4					0.020~0.040					
50CrMo4	0.46~0.54	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	0.15~0.30	—	—	—
36CrNiMo4	0.32~0.40	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	0.90~1.20	0.15~0.30	0.90~1.20	—	—
34CrNiMo6	0.30~0.38	≤0.40	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	1.30~1.70	0.15~0.30	1.30~1.70	—	—
30CrNiMo8	0.26~0.34	≤0.40	0.30~0.60	≤0.035	≤0.035	1.80~2.20	0.30~0.50	1.80~2.20	—	—
36CrNiMo16	0.32~0.39	≤0.40	0.30~0.60	≤0.030	≤0.025	1.60~2.00	0.25~0.45	3.60~4.10		
51CrV4	0.47~0.55	≤0.40	0.70~1.10	≤0.030	≤0.035	0.90~1.20	—	—	0.10~0.25	—

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-81 德国碳素调质钢的淬透性能

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度值 HRC															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25	30
2C35H	最大	58	57	55	53	49	41	34	31	28	27	26	25	24	23	20	
3C35H	最小	48	40	33	24	22	20										
2C40H	最大	60	60	59	57	53	47	39	34	31	30	29	28	27	26	25	24
3C40H	最小	51	46	35	27	25	24	23	22	21	20						
2C45H	最大	62	61	61	60	57	51	44	37	34	33	32	31	30	29	28	27
3C45H	最小	55	51	37	30	28	27	26	25	24	23	22	21	20			
2C50H	最大	63	62	61	60	58	55	50	43	36	35	34	33	32	31	29	28
3C50H	最小	56	53	44	34	31	30	30	29	28	27	26	25	24	23	20	—
2C55H	最大	65	64	63	62	60	57	52	45	37	36	35	34	33	32	30	29
3C55H	最小	58	55	47	37	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	22	20
2C60H	最大	67	66	65	63	62	59	54	47	39	37	36	35	34	33	31	30
3C60H	最小	60	57	50	39	35	33	32	31	30	29	28	27	26	25	23	21

表 1-1-82 德国合金调质钢的淬透性能

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度值 HRC															
		1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50	
28Mn6HH	最大	54	53	51	48	44	41	38	35	31	29	27	26	25	25	24	
	最小	48	46	42	34	30	27	24	21	—	—	—	-	—	—	—	
28Mn6HL	最大	51	49	46	41	35	32	29	26	22	20	—	—	—	—	—	
	最小	45	42	37	27	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
38Cr2HH	最大	59	57	54	49	43	39	37	35	32	30	27	25	24	23	22	
38CrS2HH	最小	54	50	43	36	31	28	26	24	21	—	—	—	—	—	—	
38Cr2HL	最大	56	53	48	42	37	33	31	29	26	24	21	—	—	—	—	
38CrS2HL	最小	51	46	37	29	25	22	20	—	—	—	—	—	—	—	—	
46Cr2HH	最大	63	61	59	57	53	47	42	39	36	33	32	31	30	29	29	
46CrS2HH	最小	57	53	46	40	36	32	29	28	25	22	21	20	—	—	—	
46Cr2HL	最大	60	57	53	49	45	40	36	33	31	28	27	26	25	24	24	
46CrS2HL	最小	54	49	40	32	28	25	23	22	20	—	—	—	—	—	—	
34Cr4HH	最大	57	57	56	54	52	49	46	44	39	37	35	34	33	32	31	
34CrS4HH	最小	52	51	49	45	41	38	35	33	28	26	25	24	23	22	21	
34Cr4HL	最大	54	54	52	50	46	43	40	38	34	32	30	29	28	27	26	
34CrS4HL	最小	49	48	45	41	35	32	29	27	23	21	20	—	—	—	—	
37Cr4HH	最大	59	59	58	57	55	52	50	48	42	39	37	36	35	34	33	
37CrS4HH	最小	54	53	51	48	44	41	39	37	31	29	27	25	24	23	22	
37Cr4HL	最大	56	56	55	53	50	47	44	42	37	34	32	31	30	29	28	
37CrS4HL	最小	51	50	48	44	39	36	33	31	26	24	22	20	—	—	—	
41Cr4HH	最大	61	61	60	59	58	56	54	52	46	42	40	38	37	36	35	
41CrS4HH	最小	56	55	53	51	47	43	41	39	35	31	29	27	26	25	24	

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度值 HRC														
		1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
41Cr4HL	最大	58	58	57	55	52	50	47	45	40	37	34	32	31	30	29
41CrS4HL	最小	53	52	50	47	41	37	34	32	29	26	23	21	—	—	—
25CrMo4HH	最大	52	52	51	50	48	46	43	41	37	35	33	32	31	31	31
25CrMoS4HH	最小	47	46	44	41	39	37	34	32	28	26	24	23	22	22	22
25CrMo4HL	最大	49	49	47	46	43	41	38	36	32	30	29	28	27	27	27
25CrMoS4HL	最小	44	43	40	37	34	32	29	27	23	21	20	—	—	—	—
34CrMo4HH	最大	57	57	57	56	55	54	53	52	48	45	43	41	40	40	39
34CrMoS4HH	最小	52	52	51	49	46	44	42	40	36	34	32	31	30	29	29
34CrMo4HL	最大	54	54	54	52	51	49	47	46	42	39	38	36	35	35	34
34CrMoS4HL	最小	49	49	48	45	42	39	36	34	30	28	27	26	25	24	24
42CrMo4HH	最大	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47	46	45
42CrMoS4HH	最小	56	56	55	54	52	48	46	44	41	39	38	36	36	35	34
42CrMo4HL	最大	58	58	58	57	56	54	53	51	49	46	44	42	41	40	40
42CrMoS4HL	最小	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30	29	29
50CrMo4HH	最大	65	65	64	64	63	63	63	62	61	60	58	57	55	54	54
	最小	60	60	59	58	57	56	55	53	50	47	45	44	43	42	42
50CrMo4HL	最大	63	63	62	61	60	60	59	57	56	54	52	51	49	48	48
	最小	58	58	57	55	54	53	51	48	45	41	39	38	37	36	36
36CrNiMo4HH	最大	59	59	58	58	57	57	57	56	55	54	53	52	51	50	49
	最小	54	53	52	52	51	50	50	49	47	45	44	43	41	39	38
36CrNiMo4HL	最大	56	56	55	55	54	54	53	52	51	50	48	47	46	45	44
	最小	51	50	49	49	48	47	46	45	43	41	39	38	36	34	33
34CrNiMo6HH	最大	58	58	58	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
	最小	53	53	53	53	52	51	51	51	51	50	50	50	50	49	48
34CrNiMo6HL	最大	55	55	55	55	54	54	54	54	54	54	54	54	53	53	53
	最小	50	50	50	50	49	48	48	48	48	47	47	47	46	45	44
30CrNiMo8HH	最大	56	56	56	56	55	55	55	55	54	54	54	54	54	54	54
	最小	51	51	51	51	50	50	50	49	49	48	48	47	47	47	47
30CrNiMo8HL	最大	53	53	53	53	52	52	52	52	52	51	51	51	51	50	50
	最小	48	48	48	48	47	47	47	46	46	45	45	44	44	43	43
36CrNiMo16HH	最大	57	56	56	56	56	56	56	55	55	55	55	55	55	55	55
	最小	52	51	51	51	51	51	51	50	50	50	50	50	50	50	50
36CrNiMo16HL	最大	55	54	53	53	53	53	53	52	52	52	52	52	52	52	52
	最小	50	49	48	48	48	48	48	47	47	47	47	47	47	47	47
51CrV4HH	最大	65	65	64	64	63	63	63	62	62	62	61	60	60	59	58
	最小	60	59	59	58	56	56	54	53	50	48	45	43	43	42	41
51CrV4HL	最大	62	62	61	61	60	59	59	57	56	55	53	52	51	50	49
	最小	57	56	56	55	53	52	50	48	44	41	37	35	34	33	32

汽车论坛 http://www.qclt.com

c. 美国的调质钢性能数据

美国材料试验学会（ASTM）1990年公布的满足淬透性能的钢材标准A304—90中有56个中碳钢可作为调质钢应用，其中碳钢6个，合金钢50个。美国ASTM 1992年发布的缩窄淬透性能带的钢材标准（A914/A914M—92）中缩窄淬透性能（RH钢）的中碳钢有9个钢号。我们把RH钢和部分广泛应用的中碳钢的化学成分及淬透性能分别列于表1-1-83和表1-1-84，供参考。

表1-1-83 美国广泛应用的H钢和RH钢的化学成分

钢号	化学成分（%）							
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	B	其它
1541H	0.35~0.45	1.25~1.75	0.15~0.30					
15B41H	0.35~0.45	1.25~1.75	0.15~0.30				≥0.0005	
1340H	0.37~0.44	1.45~2.05	0.15~0.35					
4042H	0.39~0.46	0.60~1.00	0.15~0.35			0.20~0.30		
4130H	0.27~0.33	0.30~0.70	0.15~0.35		0.75~1.20	0.15~0.25		
4130RH	0.28~0.33	0.40~0.60	0.15~0.35		0.80~1.10	0.15~0.25		
4140H	0.37~0.44	0.65~1.10	0.15~0.35		0.75~1.20	0.15~0.25		
4140RH	0.38~0.43	0.75~1.00	0.15~0.35		0.80~1.10	0.15~0.25		
4145H	0.42~0.49	0.65~1.10	0.15~0.35		0.75~1.20	0.15~0.25		
4145RH	0.43~0.48	0.75~1.00	0.15~0.35		0.80~1.10	0.15~0.25		
4161H	0.55~0.65	0.65~1.10	0.15~0.35		0.65~0.95	0.25~0.35		
4161RH	0.56~0.64	0.75~1.00	0.15~0.35		0.70~0.90	0.25~0.35		
4340H	0.37~0.44	0.55~0.90	0.15~0.35	1.55~2.00	0.65~0.95	0.20~0.30		
50B40H	0.37~0.44	0.65~1.10	0.15~0.35		0.30~0.70		≥0.0005	
50B40RH	0.38~0.43	0.75~1.00	0.15~0.35		0.40~0.60		≥0.0005	
5130H	0.27~0.33	0.60~1.10	0.15~0.35		0.75~1.20			
5130RH	0.28~0.33	0.70~0.90	0.15~0.35		0.80~1.10			
5140H	0.37~0.44	0.60~1.00	0.15~0.35		0.60~1.00			
5140RH	0.38~0.43	0.70~0.90	0.15~0.35		0.70~0.90			
5160H	0.55~0.65	0.65~1.10	0.15~0.35		0.60~1.00			
5160RH	0.56~0.64	0.75~1.00	0.15~0.35		0.70~0.90			
6150H	0.47~0.54	0.60~1.00	0.15~0.35		0.75~1.20			V: ≥0.15
81B45H	0.42~0.49	0.70~1.05	0.15~0.35	0.15~0.45	0.30~0.60	0.08~0.15	≥0.0005	
8640H	0.37~0.44	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25		
9260H	0.55~0.65	0.65~1.10	1.70~2.20					

表 1-1-84 美国广泛应用的 H 钢和 RH 钢的淬透性能

钢号	淬透性带总范围	离开淬火端下列距离处(mm)的硬度值 HRC																
		1.6	3.2	4.8	6.4	8.0	9.6	11.2	12.8	14.4	16	19.2	22.4	25.6	28.8	32	35.2	38.4
1340H	最大	60	60	59	58	57	56	55	54	52	51	48	44	41	39	38	37	36
	最小	53	52	51	49	46	40	35	33	31	29	27	25	24	23	23	22	22
4042H	最大	62	60	58	55	50	45	39	38	34	33	31	30	29	28	28	28	27
	最小	55	52	48	40	33	29	27	26	25	24	23	23	22	22	21	20	20
4130H	最大	56	55	53	51	49	47	44	42	40	38	35	34	33	32	32	32	31
	最小	49	48	42	38	34	31	29	27	26	26	25	24	23	22	21	20	
4130RH	最大	55	54	52	49	46	44	41	39	37	35	32	31	31	30	30	30	29
	最小	50	48	44	40	36	34	32	30	28	27	26	25	25	24	23	23	22
4140H	最大	60	60	60	59	59	58	58	57	57	56	55	54	53	52	51	49	48
	最小	53	53	52	51	51	50	48	47	44	42	39	37	35	34	33	33	32
4140RH	最大	59	59	59	59	58	57	56	55	54	53	52	50	49	48	47	46	45
	最小	54	54	54	53	52	51	50	49	48	46	43	41	39	38	37	37	36
4145H	最大	63	63	62	62	62	61	61	61	60	60	59	59	58	57	57	56	55
	最小	56	55	55	54	53	53	52	52	51	50	48	45	42	40	38	37	36
4145RH	最大	62	62	61	61	60	60	59	59	58	58	57	56	55	54	53	52	51
	最小	57	57	56	56	55	55	54	53	52	52	50	48	46	44	43	42	40
4161H	最大	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	64	64	64	64	63	63	63
	最小	60	60	60	60	60	60	60	60	59	59	59	58	56	55	53	50	48
4161RH	最大	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	64	64	63	62	62	61	60
	最小	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	59	59	57	56	54	53	51
4340H	最大	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	59	58	58	58	57	57	57
	最小	53	53	53	53	53	53	53	52	52	52	51	49	48	47	46	45	44
50B40H	最大	60	60	60	59	58	58	57	57	56	55	51	47	41	38	36	35	34
	最小	53	53	52	51	50	48	44	39	34	31	28	26	25	23	21		
50B40RH	最大	59	59	58	58	57	56	55	54	52	50	47	44	38	36	34	33	32
	最小	54	54	53	53	52	50	47	43	38	35	32	30	28	26	24	23	22
5130H	最大	56	55	53	51	49	47	45	42	40	38	36	34	33	32	31	30	29
	最小	49	46	42	39	35	32	30	28	26	25	22	20					
5130RH	最大	55	53	51	49	46	44	42	39	37	35	33	31	29	28	27	26	25
	最小	50	47	44	41	37	35	33	31	29	27	25	23	21	20			
5140H	最大	60	59	58	57	56	54	52	50	48	46	43	40	38	37	26	35	34
	最小	53	52	50	48	43	38	35	33	31	30	28	27	25	24	23	21	20
5140RH	最大	59	58	57	55	53	51	48	46	44	43	40	37	35	34	33	32	31
	最小	54	53	51	49	45	41	38	36	34	33	31	29	27	26	25	34	23

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离处（mm）的硬度值 HRC																
		1.6	3.2	4.8	6.4	8.0	9.6	11.2	12.8	14.4	16	19.2	22.4	25.6	28.8	32	35.2	38.4
5160H	最大	65	65	65	65	65	64	64	63	62	61	59	58	52	48	47	46	45
	最小	60	60	60	59	58	56	52	47	42	39	36	35	34	33	32	31	30
5160RH	最大	65	65	65	65	64	63	62	60	58	56	53	50	47	44	43	42	41
	最小	60	60	60	59	58	57	54	50	45	42	39	37	36	35	34	33	32
6150H	最大	65	65	64	64	63	63	62	61	61	60	58	55	52	50	48	47	46
	最小	59	58	57	56	55	53	50	47	43	41	38	36	35	34	32	31	30
81B45H	最大	63	63	63	63	63	63	62	62	61	60	59	57	56	55	53	52	50
	最小	56	56	56	56	55	54	53	51	48	44	39	37	35	34	32	31	30
8640H	最大	60	60	60	59	59	58	57	55	54	52	49	45	42	41	39	28	38
	最小	53	53	52	51	49	46	42	39	36	34	31	29	28	26	26	25	25
9260H	最大	65	65	65	64	63	62	60	58	55	52	47	43	40	38	37	36	36
	最小	60	60	57	53	46	41	38	36	36	35	34	33	32	31	31	30	30
1541H	最大	60	59	57	55	52	48	44	39	35	33	32	31	30	30	29	28	26
	最小	53	50	44	38	32	27	25	23	23	22	21	20					
15B41H	最大	60	59	59	58	58	57	57	56	55	55	53	51	49	46	42	39	36
	最小	53	52	52	51	51	50	49	48	44	37	28	25	24	23	22	21	21

d. 日本调质钢的性能数据

在日本 JISG4052（1979）标准中列出的中碳钢均可作为调质钢应用。其化学成分和淬透性能分别列于表 1-1-85 和表 1-1-86。

表 1-1-85 日本保证淬透性能的调质钢化学成分

钢号	化学成分（%）							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SMn433H	0.29～0.36	0.15～0.35	1.15～1.55	≤0.030	≤0.030	—	—	—
SMn438H	0.34～0.41	0.15～0.35	1.30～1.70	≤0.030	≤0.030	—	—	—
SMn443H	0.39～0.46	0.15～0.35	1.30～1.70	≤0.030	≤0.030	—	—	—
SMnC443H	0.39～0.46	0.15～0.35	1.30～1.70	≤0.030	≤0.030	—	0.35～0.70	—
SCr430H	0.27～0.34	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030	—	0.85～1.25	
SCr435H	0.32～0.39	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030	—	0.85～1.25	—
SCr440H	0.37～0.44	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030	—	0.85～1.25	—
SCM435H	0.32～0.39	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030	—	0.85～1.25	0.15～0.35
SCM440H	0.37～0.44	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030	—	0.85～1.25	0.15～0.35
SCM445H	0.42～0.49	0.15～0.35	0.55～0.90	≤0.030	≤0.030		0.85～1.25	0.15～0.35
SNC631H	0.26～0.35	0.15～0.35	0.30～0.70	≤0.030	≤0.030	2.45～3.00	0.55～1.05	

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-86 日本调质钢的淬透性能

钢号	淬透性带范围	离开淬火端下列距离（mm）处的硬度值 HRC														
		1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
SMn433H	最大	57	56	53	49	42	36	33	30	27	25	24	23	22	21	21
	最小	50	46	34	26	23	20									
SMn438H	最大	59	59	57	54	51	46	41	39	35	33	31	30	29	28	27
	最小	52	49	43	34	28	24	22	21							
SMn443H	最大	62	61	60	59	57	54	50	45	37	34	32	31	30	29	28
	最小	55	53	49	39	33	29	27	26	23	22	20				
SMnC443H	最大	62	62	61	60	59	58	56	55	50	46	42	41	40	39	38
	最小	55	54	53	51	48	44	39	35	29	26	25	24	23	22	21
SCr430H	最大	56	55	53	51	48	45	42	39	35	33	31	30	28	26	25
	最小	49	46	42	37	33	30	28	26	21						
SCr435H	最大	58	57	56	55	53	51	47	44	39	37	35	34	33	32	31
	最小	51	49	46	42	37	32	29	27	23	21					
SCr440H	最大	60	60	59	58	57	55	54	52	46	41	39	37	37	36	35
	最小	53	52	50	48	45	41	37	34	29	26	24	22			
SCM435H	最大	58	58	57	56	55	54	53	51	48	45	43	41	39	38	37
	最小	51	50	49	47	45	42	39	37	32	30	28	27	27	26	26
SCM440H	最大	60	60	60	59	58	58	57	56	55	53	51	49	47	46	44
	最小	53	53	52	51	50	48	46	43	38	35	33	33	32	31	30
SCM445H	最大	63	63	62	62	61	61	61	60	59	58	57	56	55	55	54
	最小	56	55	55	54	53	52	52	51	47	43	39	37	35	35	34
SNC631H	最大	57	57	56	56	55	55	55	54	53	51	49	47	45	44	43
	最小	49	48	47	46	45	43	41	39	35	31	29	28	27	26	26

2）非调质钢

（1）非调质钢的特点

非调质钢是在含锰较高的中碳钢中加入微量合金元素（V、Ti、Nb 和 N 等），通过控制轧制（锻制）、控温冷却，在铁素体和珠光体中弥散析出碳（氮）化合物为强化相，使之在轧制（锻制）后不经调质处理，即可获得调质处理后的力学性能的钢种。

与传统的调质工艺相比，采用非调质钢不仅省略了调质处理的淬火、回火工序，节约了能源消耗，降低了生产成本，而且还消除了淬火时的变形、开裂以及为解决变形而增加的校直工序。

但是，使用非调质钢，零件的热加工条件要相对稳定。加热温度、终轧（锻）温度和轧（锻）后的冷却速度都要加以控制，因为这些参数都影响零件的力学性能。

非调质钢按使用加工方法不同分为两类，一类是用户只进行切削加工而不再经过锻造等热加工，这类钢是钢厂通过控制轧制得到需要的力学性能，在钢厂出厂时要保证力学性能；另一类是用户还要进行锻造等热加工，其力学性能是用户通过控制热加工工艺来得到的，这类钢在钢厂出厂时要保证化学成分。

根据零件所要求的性能不同，对钢材成分要进行一些调整，如零件局部要进行感应加热淬火时，钢材的含碳量要高一些以保证淬火后的硬度；零件的韧性要求较高时，钢的含碳量要低一些；零件要求有良好的可切削加工性能时，要适当地提高钢中含硫量。

（2）非调质钢的力学性能

含钒非调质钢材的化学成分、锻造条件、零件的尺寸和形状都会通过影响钒的碳氮化物的固溶与析出、晶粒度和显微组织等因素来影响零件的强度、韧性和塑性等力学性能指标。这种关系示于图 1-1-30。

化学成分中对强度影响最大的是碳和钒，含碳量增加，珠光体数量增加，强度增加；含钒量增加，钒

汽车论坛 http://www.qclt.com

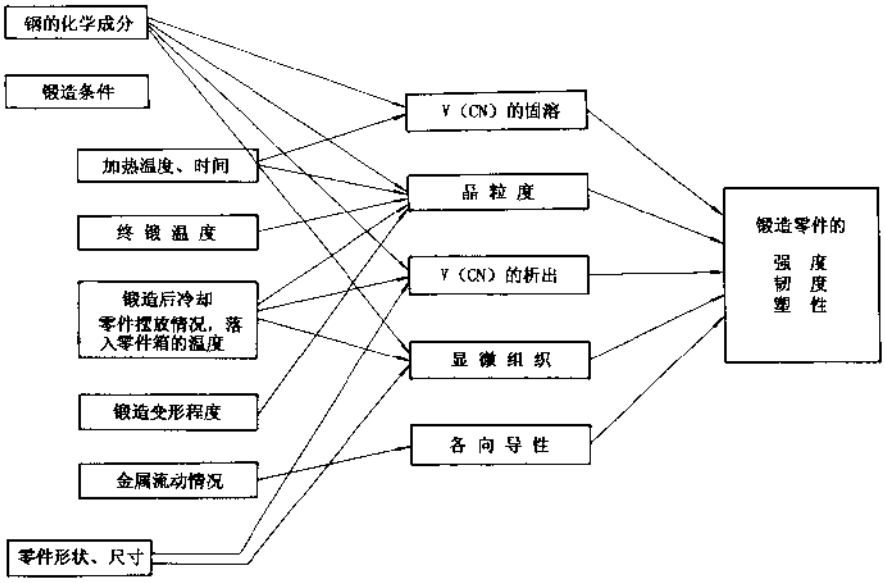


图 1-1-30 化学成分、锻造条件、零件形状对零件力学性能的影响

的化合物析出量增加，析出硬化作用加强，因而强度也增加。加热温度升高，由于固溶于奥氏体中钒量增加，析出相增加，析出强化作用大而使强度也增加；加热温度升高，奥氏体晶粒粗化，转变为珠光体数量增加而使强度增加。

非调质钢的主要缺点是比中碳钢经调质处理后的韧性差，这一缺点在一定程度上妨碍了它的推广应用。近年来很多研究工作都是设法改善其冲击韧性。

含碳量和含钒量增加都会提高钢材的硬度，因而引起冲击韧度的降低。细化奥氏体晶粒可以改善非调质钢的冲击韧性，降低锻造加热和终锻温度可以细化奥氏体晶粒，但是由于增加变形阻力和加速模具的磨损，实际上难以实现。钢中加钛可以形成稳定的 TiN，防止奥氏体晶粒长大，改善非调质钢的冲击性能。提高钢中含硫量，形成的 MnS 颗粒，可以成为铁素体析出的附加核心，细化铁素体和珠光体组织而有效地改善钢材的冲击性能。

（3）我国应用非调质钢的实例

解放牌中型载货汽车的发动机连杆原用 55 钢采用锻造余热淬火，然后经 670℃ 高温回火，处理后的硬度值为 229～269HB（下限可到 217HB）。现改用非调质钢 35MnVS，使用情况满意。35MnVS 钢供应技术条件列于表 1-1-87。35MnVS 钢下料后采用中频感应加热，加热温度为 1 150～1240℃，用 3 150t 锻压机锻压成形，终锻温度为 1 150～1 100℃，终锻后零件单件摆放，经过 8m 长的输送带空气冷却。锻成的连杆经喷丸处理，测定了 35MnVS 钢锻造后空冷的连杆硬度和 55 钢调质后的硬度，35MnVS 钢的连杆硬度变化范围为 220～283HB，平均值为 245HB；55 钢的硬度范围为 210～270HB，平均值为 242HB，都基本上符合要求。用 35MnVS 和 55 钢的连杆进行整体拉伸试验，并从连杆上取样加工成 4mm×15mm×120mm 和 5mm×10mm×55mm 的拉伸试样与冲击试样进行样品的性能试验，结果见表 1-1-88。

表 1-1-87 35MnVS 钢技术条件

钢号	化学成分的质量的分数（%）						力学性能				
	C	Mn	Si	P	S	V	σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ (%)	ψ (%)	a_K (J/cm²)
35MnVS	0.33～0.40	1.00～1.40	0.30～0.60	≤0.035	0.035～0.075	0.06～0.12	720～920	≥440	≥15	≥35	≥39

表 1-1-88 35MnVS 与 55 钢连杆的力学性能

钢 号	整体连杆拉伸断裂时拉力（kN）	力学性能				
		样品号	σ_b（MPa）	δ（%）	ψ（%）	a_K（J/cm²）
35MnVS	213～275 平均值 248	1	816	14	57.0	119
		2	944	15	56.0	114
		3	994	16	58.0	
		平均值	918	15	57.0	116.5
55 钢	216～243 平均值 232	1	771	19.5	46	92
		2	840	19.0	43.5	92
		平均值	806	19.0	45	92

（4）国内外非调质钢的牌号与性能

由于非调质钢开发和生产的较晚，很多国家尚未形成标准，只有各个厂家自己的牌号，这里介绍收集到的有关标准。

a. 中国的非调质结构钢：在（GB/T15712—1995 非调质机械结构钢）标准中共列入 9 个牌号，其化学成分、力学性能分别列于表 1-1-89 和表 1-1-90，东风汽车公司采用非调质钢情况，见表 1-1-91。

表 1-1-89 钢的化学成分

序号	牌 号	化学成分（%）						
		C	Si	Mn	S	P	V	其它
1	YF35V	0.32～0.39	0.20～0.40	0.60～1.00	0.035～0.075	≤0.035	0.06～0.13	
2	YF40V	0.37～0.44	0.20～0.40	0.60～1.00	0.035～0.075	≤0.035	0.06～0.13	
3	YF45V	0.42～0.49	0.20～0.40	0.60～1.00	0.035～0.075	≤0.035	0.06～0.13	
4	YF35MnV	0.32～0.39	0.30～0.60	1.00～1.50	0.035～0.075	≤0.035	0.06～0.13	
5	YF40MnV	0.37～0.44	0.30～0.60	1.00～1.50	0.035～0.075	≤0.035	0.06～0.13	
6	YF45MnV	0.42～0.49	0.30～0.60	1.00～1.50	0.035～0.075	≤0.035	0.06～0.13	
7	F45V	0.42～0.49	0.20～0.40	0.6～1.0	≤0.035	≤0.035	0.06～0.13	
8	F35MnVN	0.32～0.39	0.20～0.40	1.00～1.50	≤0.035	≤0.035	0.06～0.13	N≥0.0090
9	F40MnV	0.37～0.44	0.20～0.40	1.00～1.50	≤0.035	≤0.035	0.06～0.13	

注：①YF 表示易切削非调质钢；F 表示热锻用非调质钢。

②钢中允许含有不大于 0.30% 铬、镍、铜，热压力加工用钢允许含有不大于 0.20% 铜。

表 1-1-90 钢材的力学性能

序号	牌 号	力学性能						硬度 HB 不大于
		钢材尺寸（mm）	σ_b（MPa）	σ_s（MPa）	δ_5（%）	ψ（%）	A_K（J）	
			不小于					
1	YF35V	直径或边长不大于 40	590	390	18	40	47	229
2	YF40V		640	420	16	35	37	255
3	YF45V		685	440	15	30	35	247
4	YF35MnV		735	460	17	35	37	257
5	YF40MnV		785	490	15	33	32	275
6	YF45MnV		835	510	13	28	28	275
7	YF35MnV	直径或边长大于 40 但不大于 60	710	440	15	33	35	257
8	YF40MnV		760	470	13	30	28	265
9	YF45MnV		810	490	12	28	25	275
10	F45V*	直径或边长不大于 80	685	440	15	40	32	257
11	F35MnVN*		785	490	15	40	39	269
12	F40MnV*		785	490	15	40	36	275

注：* 取 ϕ25mm 试样毛坯，经 850±20℃，保温 30min，正火处理后的力学性能

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-91 东风汽车公司系列非调质钢零件应用概况

序号	零件名称	生产用钢及规格	钢材供应厂家	主要化学成分（%）	首次装车时间与数量	累计装车数量	累计用量（t）
1	EQ1090E 汽车前轴	12Mn2VB 方 85	攀枝花钢铁公司， 唐山贝钢总厂	C：0.10～0.15 Mn：2.25～2.55 V：0.06～0.12	1982 年装车 3 辆 1986 年装车 2 100 辆	9 300 辆使用正常	725
2	EQ1092 汽车前轴	12Mn2VB 方 90	攀枝花钢铁公司， 唐山贝钢总厂	C：0.10～0.15 Mn：2.25～2.55 V：0.06～0.12	1996 年装车 2 000 辆		170
3	EQ1061T 汽车前轴	12Mn2VB 方 80	攀枝花钢铁公司， 唐山贝钢总厂	C：0.10～0.15 Mn：2.25～2.55 V：0.06～0.12	1998 年装车 5 000 辆	11 924 辆	830
4	EQ6100 发动机连杆	35MnV 方 50	大冶钢厂，大连钢厂， 重庆特殊钢厂	C：0.32～0.37 Mn：1.20～1.50 V：0.07～0.12	1985 年装车 34 辆	48 万辆	12 000
5	康明斯 6BT 发动机连杆*	40MnVG* 方 55	大冶钢厂、抚顺钢厂， 兴澄钢厂	C：0.36～0.42 Mn：1.30～1.60 V：0.07～0.12	1997 年装车 100 辆	9 500 辆	330
6	EQ6102D 发动机连杆	40MnV 方 55	大冶钢厂、抚顺钢厂， 兴澄钢厂	C：0.36～0.42 Mn：1.30～1.60 V：0.07～0.12	1999 年装车 600 辆		20
7	EQ1090 汽车半轴	40MnVD ϕ50	大冶钢厂，大连钢厂	C：0.36～0.42 Mn：0.90～1.25 V：0.07～0.12	1987 年装车 280 辆	3 400 辆	130
8	花键轴——传动轴	40MnVZ ϕ50	大冶钢厂，大连钢厂， 兴澄钢厂	C：0.36～0.42 Mn：1.10～1.40 V：0.07～0.12	1988 年装车 3 辆 1990 年装车 430 辆	60 000 辆	300
9	康明斯 6BT 发动机曲轴	48MnV 方 125	抚顺钢厂，大冶钢厂	C：0.45～0.51 Mn：0.90～1.20 V：0.05～0.10	1994 年装车 280 辆	90 000 辆	9 000
10	转向轴万向节叉	35MnV ϕ42	大冶钢厂、大连钢厂	C：0.32～0.37 Mn：1.20～1.50 V：0.07～0.12	1997 年装车 6 000 辆	13 000 辆	30
11	横拉杆左右接头	35MnV ϕ52	大冶钢厂、大连钢厂	C：0.32～0.37 Mn：1.20～1.50 V：0.07～0.12	1994 年装车 2 500 辆	7 500 辆	40

注：* 40MnV 因为零件要求不同，所以适当调整含锰量，分别为 40MnVG（高）、40MnVZ（中）和 40MnVD 低

汽车论坛 http://www.qclt.com

b. 非调质钢的国际标准，1992 年对非调质钢的国际标准提案通过，编号为 ISO11692。

按使用的加工方法，ISO11692 将非调质钢分为热锻用坯料与棒材和直接切削用棒材二类，各纳入 5 个牌号，热锻用只保证化学成分（表 1-1-92），不保证力学性能，对直接切削用钢只保证力学性能（表 1-1-93）。化学成分在热锻用钢的化学成分基础上对硫含量作适当的调整。

表 1-1-92 ISO 标准提案热锻用坯料与棒材的化成学分（冶炼分析值）

序号	牌 号	化 学 成 分 （%）					
		C	Si	Mn	P	S	V
1	19MnVS6	0.15～0.22	≤0.8	1.20～1.60	≤0.035	0.020～0.060	0.08～0.20
2	30MnVS6	0.26～0.33	≤0.8	1.20～1.60	≤0.035	0.020～0.060	0.08～0.20
3	38MnVS6	0.34～0.41	≤0.8	1.20～1.60	≤0.035	0.020～0.060	0.08～0.20
4	46MnVS6	0.42～0.49	≤0.8	1.20～1.60	≤0.035	0.020～0.060	0.08～0.20
5	46MnVS3	0.42～0.49	≤0.8	0.60～1.00	≤0.035	0.020～0.060	0.08～0.20

表 1-1-93 标准提案切削用钢棒的种类与力学性能

序 号	牌 号	力 学 性 能			
		屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)
1	19MnVS6TP	≥390	600～750	≥16	≥32
2	30MnVS6TP	≥450	700～850	≥14	≥30
3	38MnVS6TP	≥520	800～950	≥12	≥25
4	46MnVS6TP	≥580	900～1050	≥10	≥20
5	46MnVS3TP	≥450	700～850	≥14	≥30

c. 美国的非调质钢：美国 1994 年公布了轧制状态应用和轧后再经锻造的非调质钢标准（ASTMA920/A920M—93）和（ASTMA921/A921M—93）。

标准中提供了钢材的化学成分（表 1-1-94）。加入的微合金元素的量（表 1-1-95）和力学性能（表 1-1-96）。

表 1-1-94 美国的微合金非调质钢成分

牌 号	化 学 成 分 （%）					
	C	Si	Mn	P	S	V
10V40	0.37～0.44	0.15～0.35	0.6～0.9	≤0.040	≤0.05	0.02～0.20
10V45	0.43～0.50	0.15～0.35	0.6～0.9	≤0.040	≤0.05	0.02～0.20
11V37	0.32～0.39	0.15～0.35	1.3～1.65	≤0.040	0.08～0.13	0.02～0.20
11C41	0.37～0.45	0.15～0.35	1.35～1.65	≤0.040	0.08～0.13	0.02～0.20
15V24	0.19～0.25	0.15～0.35	1.35～1.65	≤0.040	≤0.05	0.02～0.20
15V41	0.36～0.44	0.15～0.35	1.35～1.65	≤0.040	≤0.05	0.02～0.20

表 1-1-95 加入的微合金元素

加 入 元 素	成 分 范 围 （%）	
	炉前分析	成品分析
V	0.02～0.20	0.01～0.21
Nb	0.005～0.07	0.004～0.08
Mo	0.01～0.30	≤0.31

汽车论坛 http://www.qclt.com

轧制状态应用的非调质钢按化学成分和力学性能供应，而轧后再经锻造的非调质钢只按化学成分供应。

表 1-1-96 美国的微合金非调质钢力学性能

强度等级	力学性能						备注
	σ_s		σ_b		δ（%）		
	KSi	(MPa)	KSi	(MPa)	标距 8in (200mm)	标距 2in (50mm)	
60	≥60	≥415	≥75	≥515	≥16	≥18	
80	≥80	≥550	≥95	≥655	≥13	≥15	
100	≥100	≥690	≥125	≥860	≥8	≥10	
120	≥120	≥825	≥150	≥1030	≥6	≥8	

表 1-1-94 列出的是基础的化学成分，根据钢材供、需双方协议可以单独或复合加入 V、Nb 或 Mo，为了细化晶粒也可以加入 Ti，这些元素的范围由双方商定。

除了 V、Nb 和 Ti 之外，还可以补充加入氮元素，当加入氮时，V 与 N 的比值至少为 4:1，而且氮的含量不能超过 0.03%。

3）低碳马氏体钢

（1）低碳马氏体钢的特点

低碳或低碳合金钢淬火后得到低碳马氏体组织，低碳马氏体固溶的过饱和碳含量较低，其晶格扭曲较中碳马氏体小，而且马氏体开始转变和转变终了的温度都较高，淬火时产生的马氏体在随后的冷却过程中会发生自行回火，因此低碳马氏体的力学性能不像中碳马氏体那样硬而脆，在具有高强度的同时兼有良好的塑性及韧性，和中碳钢淬火后高温回火得到的综合力学性能相近，其力学性能变化范围如下：

抗拉强度 (σ_b) 1 150～1 500MPa

屈服点 (σ_s) 950～1 250MPa

伸长率 (δ) ≥10%

断面收缩率 (ψ) ≥40%

冲击韧度 (α_k) ≥60J/cm^2

因此，对于要求强韧性能的零件，根据其载荷特征，加工特点和生产条件，可以选用调质钢、非调质钢或低碳马氏体钢来制造。这里还要指出，低碳马氏体钢在淬火前由于其含碳量低，硬度低而塑性好，很适合于冷镦或冷挤压成形。

（2）低碳马氏体钢的力学性能

对低碳马氏体钢的拉伸性能，脆性破坏倾向，缺口敏感性、疲劳性能和延迟断裂性能进行了测定并与 40Cr 钢调质后的性能进行了对比，结果如下。

①拉伸性能：20Cr 钢淬火后不同温度回火与 40Cr 钢淬火后不同温度回火的力学性能对比数据列于表 1-1-97。可以看出，当热处理到相同硬度时，20Cr 钢与 40Cr 钢的强度性能指标几乎相同而 20Cr 钢的塑性指标与韧性指标还优于 40Cr 钢。

表 1-1-97 20Cr 钢淬火后不同温度回火与调质钢性能对比数据

钢号	热处理工艺	力学性能					
		σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	a_k (J/cm²)	HB
20Cr	正火	570	350	30.8	74	–	–
	880℃加热淬 NaOH 水溶液	1 580	1 145	8.4	28	69	441
	100℃回火	1 570	1 175	8.8	32	65	433
	200℃回火	1 490	1 245	8.4	36	71	425
	300℃回火	1 375	1 245	8.2	45	57	397
	400℃回火	1 215	1 130	10.0	53	101	360
	500℃回火	985	960	14.7	63	186	302
	600℃回火	815	755	19.1	73	243	241
40Cr	850℃加热淬油 500℃回火	1 220	1 120	13.0	54.0	77	341
	575℃回火	995	920	16.5	57.5	117	302
	650℃回火	895	780	19.5	63.5	147	255

②脆性破坏倾向：低碳马氏体钢与中碳钢调质态相比，其脆性破坏倾向小。图 1-1-31 示出 15MnVB 钢淬水与淬油后 200℃回火与 40Cr 钢淬火后 600℃回火的低温冲击试验结果，由图可见，15MnVB 钢淬火后低温回火的冲击值在 +20～−60℃温度范围内都比 40Cr 钢调质的高，因此，在低温条件下工作要求强度高韧性好的机件采用低碳马氏体钢是适合的。

③缺口敏感性：用低碳马氏体钢制造螺栓时，螺栓的螺纹相当于缺口，装配时难免倾斜。经对 40Cr 钢（调质处理到硬度为 30HRC、35HRC、36～40HRC 三组样品）与 15MnVB 钢（淬火后 200℃回火硬度 36～40HRC 和 42HRC 两组样品）开 60℃的缺口试样，进行不同斜度的拉伸试验（图 1-1-32），结果表明：40Cr 钢硬度为 36～40HRC 时，缺口试样的抗拉强度仍高于光滑的，但在倾斜 8°拉伸时其抗拉强度低于光滑试样的，因此用 40Cr 钢制造有缺口的零件时，硬度不宜太高。15MnVB 钢热处理得到低碳马氏体组织，当硬度为 36～40HRC 和 42HRC 时，即使缺口试样倾斜 8°进行拉伸试验时，其强度均大于光滑试样的强度，说明低碳马氏体在强度高时，其缺口敏感性比 40Cr 钢低。

④疲劳性能：对 20Cr 钢和 40Cr 钢进行疲劳性能对比试验，结果列于表 1-1-98。低碳马氏体钢的疲劳抗力明显地优于中碳合金调质钢，不仅光滑样品的疲劳极限高，而且它的缺口敏感度小。

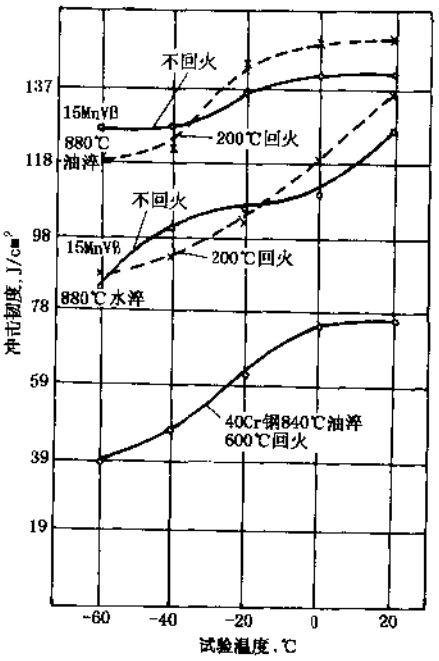


图 1-1-31 15MnVB 钢与 40Cr 钢的低温冲击曲线

表 1-1-98 低碳马氏体钢与中碳调质钢疲劳缺口敏感度的比较

钢号	热处理	硬度 HRC	强度及疲劳强度 (MPa)			$K_f=\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1n}}$	$q=\frac{K_f-1}{K_t-1}$
			σ_b	光滑 σ_{-1}	缺口 σ_{-1n}		
20Cr	880℃淬含 10% NaOH 水溶液，200℃回火	45	1490	565	455	1.24	0.33
40Cr	840℃淬油、600℃回火	30	960	486	333	1.46	0.64

⑤延迟断裂：延迟断裂是指机械零件或金属试样在一定的环境中（介质、温度…）。在静拉伸应力的作用下，经过一段时间后而发生的脆性断裂现象。钢的强度越高，对延迟断裂越敏感，一般认为钢的抗拉

汽车论坛 http://www.qclt.com

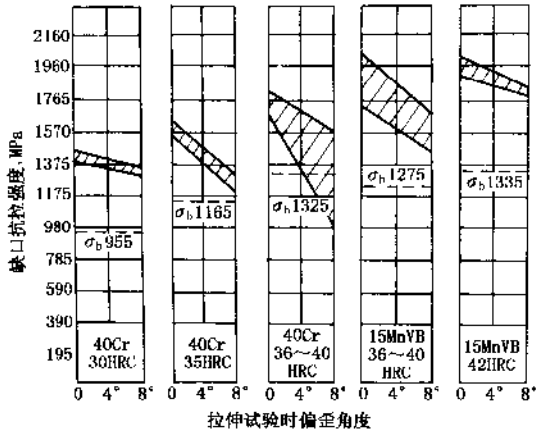


图 1-1-32 40Cr 钢与 15MnVB 钢缺口试样倾斜不同角度拉伸试验结果

钢中含碳量是影响低碳马氏体钢力学性能最主要的元素。低碳钢淬火后得到马氏体组织，其硬度主要取决于含碳量，随着钢中含碳量的增加，淬火后低碳马氏体的硬度和强度性能增加，表明低碳马氏体的增化主要是碳的固溶强化。低碳马氏体的塑性与韧性则随着钢中含碳量的增加而不断下降。

奥氏体化加热温度对低碳马氏体钢的力学性能也有影响。在 900℃以下随着加热温度升高，钢材的强度和韧性都提高，这是由于游离铁素体溶于奥氏体中淬火后马氏体增加而引起的。在 900℃以上加热到 1 000℃、1 100℃和 1 200℃强度、塑性和韧性指标均平缓下降。

(4) 我国应用低碳马氏体钢的实例

强度大于 1 200MPa 时，就容易发生延迟断裂。

用硬度值为 37HRC 的 15MnVB 钢与 40Cr 钢的缺口试样进行了延迟断裂试验，将试样浸泡在充满腐蚀介质的容器内进行静拉伸试验，作出 σ（应力）$-t$（断裂时间）延迟断裂曲线，以加载 100h 试样不断时的最大应力（用 σ_{100}表示）作为钢的延迟断裂应力值，σ_{100}数值越大，则钢的延迟断裂抗力越高，试验结果示于图 1-1-33.

(3) 影响低碳马氏体钢力学性能的因素

断面尺寸、钢材的淬透性能，钢中含碳量和奥氏体化加热温度都会影响低碳马氏体钢的力学性能.

断面尺寸增大，心部将淬不透，马氏体数量降低，硬度和强度性能将降低。钢的淬透性能增加，能淬透的断面尺寸增加，钢材的硬度和强度性能增加。

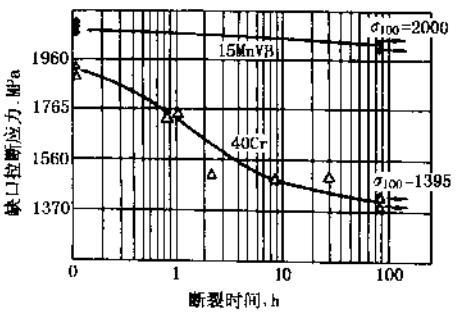


图 1-1-33 15MnVB 钢与 40Cr 钢的延迟断裂曲线（硬度均为 37HRC）

解放牌载货汽车上的高强度螺栓如连杆螺栓、气缸盖螺栓和半轴螺栓原来用 ML38Cr 中碳钢制造，使用效果不满意。

改用 ML15MnVB 低碳马氏体钢制造，淬火后低温回火处理，硬度、抗拉强度和抗剪强度均有提高，工艺性能良好，不易产生表面裂纹和脱碳，而且由于钢材塑性好，易于冷镦成形，模具寿命长。

ML38Cr 钢和 ML15MnVB 钢制造的螺栓的性能对比数据列于表 1-1-99。ML15MnVB 钢制造的连杆螺栓及缸盖螺栓淬火低温回火后的最大拉力和最大剪切力均大于 ML38Cr 钢调质的螺栓。

表 1-1-99 ML38Cr 钢和 ML15MnVB 钢螺栓的性能对比

钢号	热处理	连杆螺栓			缸盖螺栓		
		硬度 (HRC)	最大拉力 (kN)	冲断消耗功 (J)	硬度 (HRC)	最大拉力 (kN)	最大剪切力 (kN)
ML15MnVB	880℃加热淬油 200℃回火	38～41	124.95	155	41～42	112.21	126.91
			132.3			112.21	121.52
			127.89	173		110.74	119.56
			131.32	231		115.64	126.42
ML15MnVB	880℃加热淬油 400℃回火	30～34	107.31		–	–	–
			107.31	–			

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢 号	热处理	连杆螺栓			缸盖螺栓		
		硬度 (HRC)	最大拉力 (kN)	冲断消耗功 (J)	硬度 (HRC)	最大拉力 (kN)	最大剪切力 (kN)
ML38Cr	860℃加热淬油 600℃回火	30～33	74.44	175	31	78.89	95.31
			78.40	170		79.87	89.43
				198		78.50	95.55

用ML15MnVB和ML38Cr钢的柱螺栓（M12×1.25）进行了疲劳试验，螺栓在滚丝后进行热处理，试验在AMSELER高频疲劳试验机上进行，试验时选用螺栓的平均应力为392MPa，频率为9 000/min，试验结果见图1-1-34。虽然ML15MnVB钢与ML38Cr钢的螺栓的硬度有区别，前者为42HRC，后者为31HRC，但是滚丝后再热处理的两种螺栓的疲劳性能相同，即疲劳应力幅值 σ_a 均为39MPa。

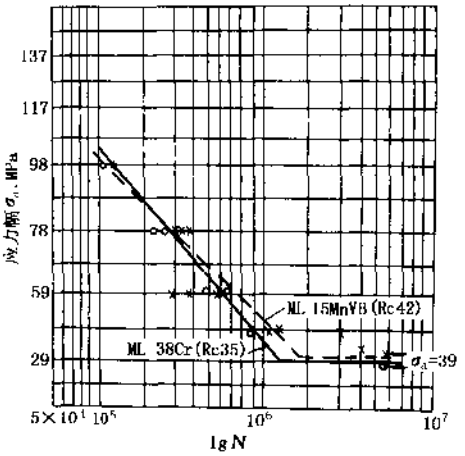


图1-1-34 ML15MnVB钢与ML38Cr钢柱螺栓的疲劳曲线

（5）我国标准中列出的低碳马氏体钢

在我国的“GB6478-86冷镦钢技术条件”中列出了九种低碳马氏体钢，它们都是冷镦钢，其化学成分和力学性能分别列于表1-1-100和表1-1-101。

除了化学成分和力学性能外，ML15MnB和ML15MnVB钢还应作淬透性能试验并符合下列要求：

ML15MnB：J_9≥28HRC

ML15MnVB：J_9≥30HRC

表1-1-100 低碳马氏体冷镦钢的化学成分

序号	牌 号	化学成分（%）								
		C	Si	Mn	Cr	V	B	Ti	P	S
1	ML15Cr	0.12～0.18	≤0.30	0.40～0.70	0.70～1.00	-	—	—	≤0.035	≤0.035
2	ML20Cr	0.17～0.24	≤0.30	0.50～0.80	0.70～1.00	—	—	—		
3	ML15MnB	0.14～0.20	≤0.30	1.20～1.60	- -	—	0.005～0.0035	—		
4	ML15MnVB	0.12～0.18	≤0.30	1.20～1.60	—	0.07～0.12	0.005～0.0035	—		
5	ML20MnTiB	0.17～0.24	≤0.30	1.30～1.60	- -	- -	0.005～0.0035	0.04～0.10		

表1-1-101 低碳马氏体冷镦钢的化学成分

序号	牌 号	热处理制度	力学性能					硬度HB	
			σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	α_k J/(cm²)	热轧	退火
			不大于					不大于	
1	ML15Cr	一次淬火880℃，二次淬火800℃，水、油冷回火200℃，水冷	686	490	10	45	69	-	179
2	ML20Cr		785	588	10	40	59	-	179

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

序号	牌号	热处理制度	力学性能					硬度 HB	
			σ_b (MPa)	σ (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	a_k J/(cm²)	热轧	退火
			不大于					不大于	
3	ML15MnB	淬火 880℃，水冷 回火 200℃，水、空冷	1128	932	9	45	69	-	
4	ML15MnVB	淬火 880℃ 油冷 回火 200℃，水、空冷	1079	883	10	45	69	207	-
5	ML20MnTiB	淬火 860℃ 油冷 回火 200℃，水、空冷	1128	932	10	45	69	-	187

注：直径大于和等于 25mm 的钢材，试样毛坯尺寸为 25mm，直径小于 25mm 的钢材试样毛坯尺寸按钢材实际尺寸。

（撰稿人：姚贵升）

1.1.4 特殊用途钢

1.1.4.1 易切削钢

1）易切钢的特点

易切钢具有良好的可切削加工性能，因为在这种钢中加入一种或几种合金元素，利用其本身或与其它元素形成一种对切削加工有利的夹杂物作用的缘故。目前使用最广泛的元素是硫、磷、铅，也使用钙、硒、碲等。

影响钢材可切削加工性能的因素很多，外部因素有机床的状态、刀具材料与形状、切削液的种类以及切削参数等等，但是钢材本身的因素如化学成分、金相组织和力学性能等也影响其可切削加工性能。

（1）化学成分的影响

①碳：碳决定着钢的强度、硬度和韧性，因此决定着刀具的磨损情况、加工后的表面粗糙度和机床的功率消耗等。碳含量在 0.25% 以下时，钢的可加工性能随着碳含量的增加而改善。碳含量过低，组织中有大量铁素体，钢的硬度低，切屑易粘在刀刃上形成刀瘤，加之切屑不易断，导致可加工性下降，加工零件表面粗糙。钢中碳含量超过 0.25% 时，再增加碳含量，组织中珠光体数量增加，硬度增加，使刀具的磨损加剧，也使可加工性能恶化。

②硫：硫是常用来改善钢的可加工的元素，硫加入于钢中与锰形成硫化锰（MnS），它破坏钢的基体的连续性，使切屑短而易断，此外它还有润滑减磨作用，降低刀具的磨损，延长刀具的使用寿命。低碳钢和中碳钢的可加工性通常随着硫含量的提高而不断提高。

硫有导致钢材热脆的作用，使钢材轧制困难；硫含量高的钢材焊接性能不好，不能用来制造需经焊接的零件。

③铅：铅是有意加入于钢中改善其可加工性能的元素。铅在钢中呈细小颗粒（3μm）状均匀分布，有断屑和润滑减磨作用，使切屑易断，降低刀具的磨损，延长刀具的使用寿命。加铅于硫含量高的钢中改善可加工性的作用特别明显。铅的含量一般为 0.10%～0.30%，由于铅的密度大，易产生铅的重力偏析，而且铅的蒸气有毒，炼钢时要加以防范。

④钙：钙是有意加入于钢中改善其可加工性能的又一元素。在钢中钙与铝、硅等形成低熔点复合氧化物，在刀具表面形成薄的具有润滑作用的覆盖物，从而减少刀具的磨损，改善钢在高速切削条件下的可加工性能。

⑤磷：在碳素易切钢中与硫同时加入，磷溶于固溶体，提高钢的强度并降低韧性，使切屑易断，排屑容易，有利于改善表面粗糙度，磷的含量通常为 0.08%～0.15%，再高则有害作用显著。磷增加钢的冷脆倾向，且冷拔时易断。

⑥氮和氧：氮提高钢的强度和脆性，有利于断屑，氮含量稍高时对可加工性有利，氧在钢中易形成硬

度高的氧化物，加速刀具磨损，不利于可加工性能，但在低碳易切钢中，氧促使硫化物呈纺锤形分布，降低硫化物的长、宽比值，改善切削性能

⑦硅与铝：它们都是脱氧元素。硅部分溶于固溶体中增加硬度，部分与氧结合形成硬度高的夹杂物。铝在钢中也形成硬度高的三氧化二铝质点，都增加了刀具的磨损，对钢材的可加工性能起不利作用。在低碳易切钢中，硅和铝由于脱氧作用而降低钢中含氧量，使硫化物呈长条状分布，降低可加工性能。

（2）金相组织的影响

基体组织、夹杂物的种类、数量和形状都对钢材的可加工性能有显著影响，合金元素和热处理往往是通过改变钢材的金相组织而影响可加工性能的。

①基体组织：对于低碳钢，凡是有助于提高硬度和降低塑性的组织变化都改善可加工性；对于高碳钢，凡是有助于降低硬度的组织变化，也都改善其可加工性。因此，低碳钢通过正火或冷拔提高其硬度，而高碳钢通过球化退火降低其硬度都可以改善其可加工性能。

不同碳含量对钢材可加工性最有利的基体组织见表 1-1-102。

表 1-1-102 碳含量不同的钢材可加工性最佳的基体组织

含碳量（%）	基 体 组 织
0.06～0.20	热轧或高温正火状态：粗大铁素体＋珠光体；冷拔塑性变形，铁素体＋珠光体
0.21～0.30	正火状态：铁素体＋珠光体
0.31～0.40	退火状态：铁素体＋珠光体
0.41～0.60	退火状态：粗珠光体＋铁素体
0.61～1.00	球状化退火：球状珠光体

②非金属夹杂物：非金属夹杂物对钢材可加工性的影响有两种情况。氧化硅与氧化铝等硬度高的夹杂物加速刀具磨损，对钢的可加工性有害；硫和钙的夹杂物和铅可以分割金属基体、切屑易断、润滑刀具，降低刀具磨损，对可加工性有利。

一般碳素易切钢中主要夹杂物为 MnS，它的形态对钢的可加工性有显著影响，硫化锰的长、宽比值小，即趋于纺锤形，钢材的可加工性得到改善，当钢中含氧量高时，硫化锰成纺锤形。半镇静钢脱氧不彻底，钢中含氧量高（约为 $200\times10^{-4}\%$），其可加工性能比镇静钢好。

2）易切削钢的性能数据及其选用

过去应用的主要是碳素易切钢，用来制造一些标准件。随着汽车工业的发展，合金易切钢的应用日益广泛，用来制造承受载荷大的齿轮和轴类零件。

（1）中国的易切削钢

在国家标准 GB8731—88 中列出中国的易切削钢，其化学成分、热轧状态的力学性能和冷拉状态的力学性能分别列于表 1-1-103、表 1-1-104 和表 1-1-105。

表 1-1-103 易切钢的化学成分

牌 号	化 学 成 分（%）						
	C	Si	Mn	S	P	Pb	Ca
Y12	0.08～0.16	0.15～0.35	0.70～1.00	0.10～0.20	0.08～0.15	–	–
Y12Pb	0.08～0.16	≤0.15	0.70～1.10	0.15～0.25	0.05～0.10	0.15～0.35	–
Y15	0.10～0.18	≤0.15	0.80～1.20	0.23～0.33	0.05～0.10	–	–
Y15Pb	0.10～0.18	≤0.15	0.80～1.20	0.23～0.33	0.05～0.10	0.15～0.35	–
Y20	0.17～0.25	0.15～0.35	0.70～1.00	0.08～0.15	≤0.06	–	–
Y30	0.27～0.35	0.15～0.35	0.70～1.00	0.08～0.15	≤0.06	–	–
Y35	0.32～0.40	0.15～0.35	0.70～1.00	0.08～0.15	≤0.06	–	–
Y40Mn	0.37～0.45	0.15～0.35	1.20～1.55	0.20～0.30	≤0.05	–	–
Y45Ca	0.42～0.50	0.20～0.40	0.60～0.90	0.04～0.08	≤0.04	–	0.002～0.006

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-104 热轧易切削钢的力学性能

牌号	力学性能			布氏硬度 HB 不大于
	σ_b (MPa)	δ_5 (%) 不小于	ψ (%) 不小于	
Y12	390～540	22	36	170
Y12Pb	390～540	22	36	170
Y15	390～540	22	36	170
Y15Pb	390～540	22	36	170
Y20	450～600	20	30	175
Y30	510～655	15	25	187
Y35	510～655	14	22	187
Y40Mn	590～735	14	20	207
Y45Ca	600～745	12	26	241

表 1-1-105 冷轧易切削钢的力学性能

牌号	力学性能				布氏硬度 (HB)
	σ_b (MPa) 钢材尺寸 (mm)			δ_5 (%) 不小于	
	8～20	>20～30	>30		
Y12	530～755	510～735	490～685	7.0	152～217
Y12Pb	530～755	510～735	490～685	7.0	152～217
Y15	530～755	510～735	490～685	7.0	152～217
Y15Pb	530～755	510～735	490～685	7.0	152～217
Y20	570～785	530～745	510～705	7.0	167～217
Y30	600～825	560～765	540～735	6.0	174～223
Y35	625～845	590～785	570～765	6.0	176～229
Y45Ca	695～920	655～855	635～835	6.0	196～255

(2) 日本的易切削钢

在日本的 JISG4804—1983 中列出了日本易切钢的化学成分，允许的表面缺陷深度和尺寸公差。易切钢的化学成分列于表 1-1-106。

(3) 美国的易切削钢

美国 ASTMA29/A29M—91 中列出了易切钢的化学成分，见表 1-1-107。

比较了中国、日本和美国易切削钢的化学成分之后可以看出有很多相似之处。按成分可以分为以下几类，对其应用情况和特点加以讨论。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-106 日本易切钢的化学成分

牌号	化学成分（%）				
	C	Mn	P	S	Pb
SUM11	0.08～0.13	0.30～0.60	≤0.040	0.08～0.13	–
SUM12	0.08～0.13	0.60～0.90	≤0.040	0.08～0.13	–
SUM21	≤0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.16～0.23	–
SUM22	≤0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.24～0.33	–
SUM22L	≤0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.24～0.33	0.10～0.35
SUM23	≤0.09	0.75～1.05	0.04～0.09	0.26～0.35	–
SUM23L	≤0.09	0.75～1.05	0.04～0.09	0.26～0.35	0.10～0.35
SUM24L	≤0.15	0.85～1.15	0.04～0.09	0.26～0.35	0.10～0.35
SUM25	≤0.15	0.90～1.40	0.07～0.12	0.30～0.40	
SUM31	0.14～0.20	1.00～1.30	≤0.040	0.08～0.13	–
SUM31L	0.14～0.20	1.00～1.30	≤0.040	0.08～0.13	0.10～0.35
SUM32	0.12～0.20	0.60～1.10	≤0.040	0.10～0.20	
SUM41	0.32～0.39	1.35～1.65	≤0.040	0.08～0.13	
SUM42	0.37～0.45	1.35～1.65	≤0.040	0.08～0.13	–
SUM43	0.40～0.48	1.35～1.65	≤0.040	0.24～0.33	–

注：①通常，没有规定Si的含量。如需要，可以由用户和生产厂共同商量选用下列的范围或极限值：≤0.10%，0.10%～0.20%或0.15%～0.35%。

②铅的含量为：0.10%～0.35%。当分析含铅的易切削钢产品中的铅含量时，其偏差为规定的上限值加上0.03%或规定的下限值减去0.03%。

表 1-1-107 美国易切钢的化学成分

牌号	C%	Mn%	P%	S%	Pb%
1108	0.08～0.13	0.60～0.80	0.040	0.08～0.13	–
1109	0.08～0.13	0.60～0.90	0.040	0.08～0.13	–
1110	0.08～0.13	0.30～0.60	0.040	0.08～0.13	–
1116	0.14～0.20	1.10～1.40	0.040	0.16～0.23	–
1117	0.14～0.20	1.00～1.30	0.040	0.08～0.13	–
1118	0.14～0.20	1.30～1.60	0.040	0.08～0.13	–
1119	0.14～0.20	1.00～1.30	0.040	0.24～0.33	–
1132	0.27～0.34	1.35～1.65	0.040	0.08～0.13	–
1137	0.32～0.39	1.35～1.65	0.040	0.08～0.13	–
1139	0.35～0.43	1.35～1.65	0.040	0.13～0.20	–
1140	0.37～0.44	0.70～1.00	0.040	0.08～0.13	–
1141	0.37～0.45	1.35～1.65	0.040	0.08～0.13	–
1144	0.40～0.48	1.35～1.65	0.040	0.24～0.33	–
1145	0.42～0.49	0.70～1.00	0.040	0.04～0.07	–
1146	0.42～0.49	0.70～1.00	0.040	0.08～0.13	–
1151	0.48～0.55	0.70～1.00	0.040	0.08～0.13	–
1211	≤0.13	0.60～0.90	0.07～0.12	0.10～0.15	–
1212	≤0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.16～0.23	–
1213	≤0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.24～0.33	–
1215	≤0.09	0.75～1.05	0.04～0.09	0.26～0.35	–
12L13	≤0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.24～0.33	0.15～0.35
12L14	≤0.15	0.85～1.15	0.04～0.09	0.26～0.35	0.15～0.35
12L15	≤0.09	0.75～1.05	0.04～0.09	0.26～0.35	0.15～0.35

a. 含硫碳素易切钢

这类钢含碳量低，多为≤0.13，含硫量为0.08%～0.13%，含磷量为≤0.040%，日本的钢号为SUM11，SUM12，美国钢号为1108、1109、1110。

汽车论坛 http://www.qclt.com

b. 含硫、磷易切削钢

这类钢也是低碳钢，含硫量有所提高，最高可达0.30%～0.40%，含磷量也提高到0.07%～0.12%。中国钢号有Y12、Y15，日本钢号有SUM21、22、23、25，美国钢号有1211、1212、1213和1215。

上述低碳硫、磷易切削钢多用于自动车床加工标准件，其可切削加工性能比碳钢有很大改善，切削速度和生产效率可显著提高。

c. 中碳硫、磷易切钢

在中国、日本和美国标准中还列入含碳量为0.40%左右，含Mn量约为1.30%～1.60%和含硫量约为0.20%～0.30%的易切钢，其牌号分别为Y40Mn、SUM43和1144。

d. 加铅易切削钢

在高硫磷钢的基础上再加0.15%～0.35%Pb，钢的可切削加工性能可以进一步提高。特别应该提出的是钢中加铅后对力学性能的有害影响小，因此很多优质碳素和合金钢中也通过加铅来改善其可加工性能并用来制造承受载荷较大的零件。

日本大同制钢曾对S22C、S45C和S53C钢进行了加铅和不加铅的钢材的切削性能试验，其结果示于图1-1-35。

从图1-1-35看出，当切削速度为80m/min时，切削S45C与S45CL钢相比，刀具寿命从200min提高到300min；切削S53C与S53CL相比，刀具寿命从95min提高到220min。

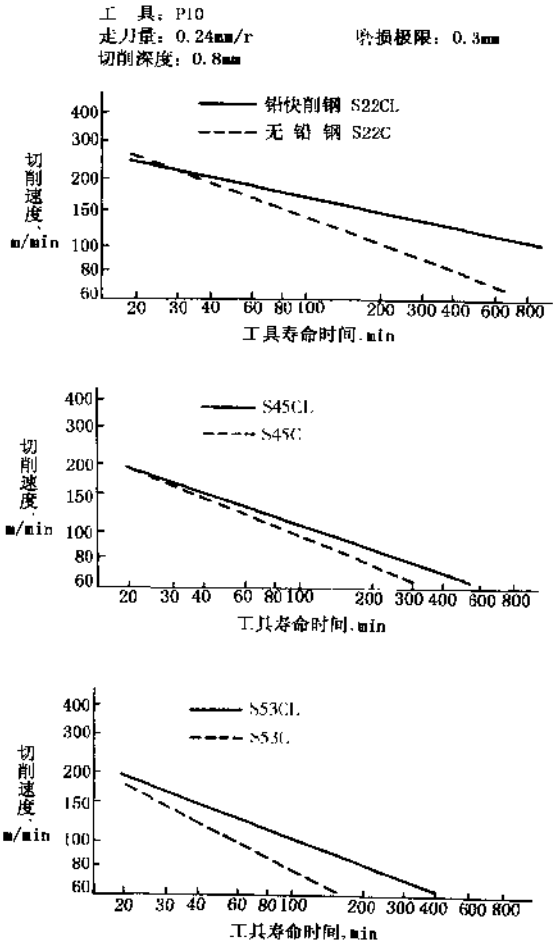


图1-1-35 加铅与不加铅的S22C、S45C和S53C钢切削性能试验结果

e. 加钙易切削钢

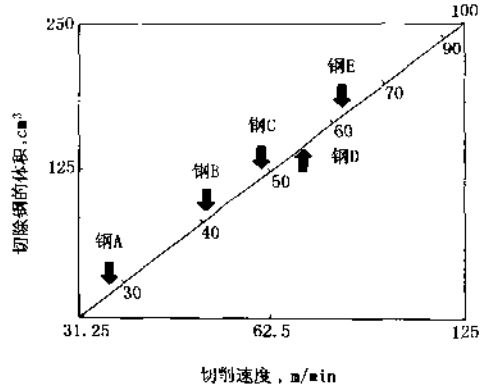
从70年代开始，在炼钢工艺中加钙处理得到了很大的发展，当引入喷粉技术并且工业化之后，钙处理得到了突破，近来又引入了喂丝技术更推进了钙处理钢的发展。

加钙处理后，氧化物转变成较软的铝酸钙并被软的硫化物所包围，这些夹杂物的磨粒磨损作用小，而且在高速切削时在刀具表面与工件之间形成润滑膜，减少了刀具的磨损，延长了刀具寿命，改善了钢材的可加工性能，而且加钙处理对力学性能影响很小，所以加钙处理后的优质钢可以用来制造齿轮和调质零件。

图1-1-36示出含钙量和含硫量对8620齿轮钢可切削加工性能的影响，含钙量越高，钢的可加工性能越好，*E*钢的含钙量小于*D*钢，但*E*钢的可加工性能优于*D*钢，这是由于*E*钢的含硫量高的缘故。

跃进汽车集团公司曾对40Cr和40CrCa钢进行了切削性能对比试验。试验时刀具采用TiC硬质合金，试验钢材的硬度为169HB，走刀量为0.35mm/r，切削深度1.5mm，得出两种钢材的切削速度与刀具耐用度的关系曲线（$v-t$曲线）示于图1-1-37，可以看出，当切削速度为160m/min，切削40Cr钢的刀具耐用度为25min，而40CrCa钢为104.5min；当刀具耐用度为60min时，40Cr钢的切削速度v_{60}为112m/min，而40CrCa钢为196m/min。（撰稿人：毛志强）

汽车论坛 http://www.qclt.com



编 号	S	Ca	O₂	Al	其它成分(%)（名义）
	ppm				
A	240	3	16	340	C：0.20
B	340	18	26	320	Mn：0.90
C	380	23	51	240	Si：0.40
D	380	50	20	330	Cr：0.50
E	470	31	40	170	Ni：0.50
					Mo：0.20

A为基础钢

图 1-1-36 不同含钙量和含硫量对 8620 钢可加工性能的影响

1.1.4.2 弹簧钢

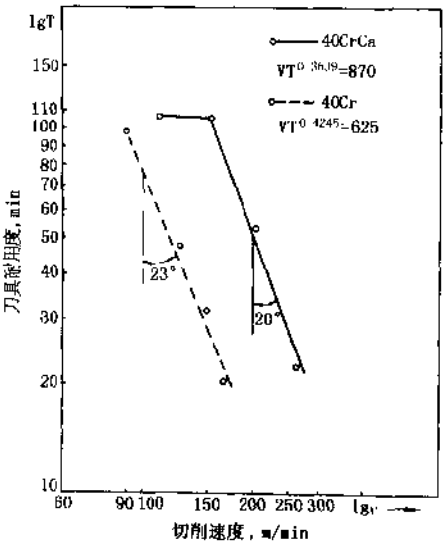


图 1-1-37 40Cr 钢与 40CrCa 钢的 $v-t$ 曲线

弹簧是汽车的重要构件，也是重要的基础件应用于汽车的各个部位，具有能量储存、自动控制、缓冲平衡、固定复位，安全减振等作用。通常一辆汽车上装有 50～60 种 100 多件弹簧，广泛用于悬架、发动机、离合器、制动器等重要部位。其典型的弹簧有悬架弹簧如板簧、扭杆弹簧和螺旋弹簧，发动机气阀弹簧，广泛分布于汽车的其它各部位的拉、扭各类弹簧，座椅弹簧，和膜片弹簧等。

汽车弹簧是在反复交变的应力下工作的，根据其使用部位不同，它可能承受弯曲，拉压、扭转、冲击、疲劳、腐蚀、磨损等单一或多种载荷的复合作用。由于工作条件十分恶劣，再加汽车弹簧的可靠性要求较高，因此对弹簧和弹簧钢的性能要求十分严格。近年来，由于减轻汽车自重以节约能耗的要求，作为汽车悬架的变截面板簧正在发展，在美国，这类板簧的用量已超过板簧总量的 60%；采用这种结构板簧可减轻板簧质量 10%～30%，减少片数 50%～70%；从而可以节约钢材。同时改善汽车的平顺性和舒适性。但这种板簧的使用应力增加，板簧厚度增加，可靠性要求增加，因而对弹簧钢的性能亦提出了新的要求；此外，发动机转速提高，气阀弹簧的工作负荷增大，如斯太尔发动机和康明斯发动机，其气阀弹簧的工作应力 $\tau=920$MPa，如按屈雷斯卡准则，换算为拉伸应力 $\sigma=1\,840$MPa，对这类弹簧的高应力下的高周疲劳寿命亦有更高的要求。为了满足上述汽车弹簧的各类性能要求，对弹簧钢提出了如下要求：

1）对弹簧钢力学性能的要求

①硬度和强度性能：作为使用条件恶劣，受力复杂的弹簧用钢应具有良好的综合力学性能，即具有高强度（屈服强度和抗拉强度）和适当的延性、塑性和韧性。对于采用热成形工艺制作的弹簧，热处理后的硬度代表了弹簧在使用时的强度，通常在 500HB 以下，淬火回火后的硬度与疲劳强度成正比关系；汽车弹簧要求有较高的弹性极限和疲劳极限，故希望硬度高一些；但硬度（即强度）过高时，钢的缺口敏感性

汽车论坛 http://www.qclt.com

会增加，脆性断裂的危险性增加；而硬度过低，则强度不足。因此需选用合适的硬度和强度，即良好的综合力学性能。

②淬透性：通常认为弹簧的整个截面都应得到均匀的回火索氏体组织和性能，因此对于热处理弹簧用钢的淬透性，尤其是截面厚度较大的变截面板簧用钢，其淬透性的要求较高，而从目前的生产和使用情况出发，可以认为：弹簧截面中心得到95%以上的马氏体时，弹簧将具有较高的综合力学性能和疲劳性能，因而，可以用此标准选取弹簧钢的淬透性。但是，随着冷却介质的改进，可望对弹簧钢的淬透性要求相应的放宽。

③弹性松弛抗力：弹性松弛是指弹簧钢在低于其弹性极限的静荷或动荷作用下，由于蠕变和内耗而产生的弹性减退，导致产生永久变形，并使该钢所制弹性元件产生失效的一种现象，板簧或螺簧由于发生弹性松弛，将会使它的静载弧高或静载高度发生改变；为避免弹性元件由于弹性松弛而失效，弹簧钢应具有较大的弹性松弛抗力。尤其是近年来，弹簧的设计应力提高，对弹簧钢的这一性能要求也越来越高。有关弹簧钢、弹簧的松弛抗力的测定方法、表征参量及其物理意义，以及有关松弛抗力的研究进展，研究松弛抗力具有实际意义。

④断裂韧性：过去对弹簧钢的断裂韧性并无要求；近年来，随着人们对钢的组织与性能之间关系认识的深化，并发现某些强化工艺对弹簧性能的改善与弹簧钢断裂韧性的提高有关。断裂韧性的提高，意味着增加了弹簧钢的韧性储备。这对于高强度高应力下使用的板簧不发生危险性脆断也具有重要意义。因此，断裂韧性作为权衡弹簧钢性能的一个指标已渐渐引起了人们的重视。

⑤疲劳裂纹扩展速率：任何材料断裂失效都要经历裂纹的产生、裂纹扩展、裂纹的失稳扩展直至最后断裂的过程。弹簧钢也是如此，尤其是弹簧钢材的表面不可避免存在一些裂纹源或其它缺陷。如果材料具有较高的裂纹扩展抗力（即慢的裂纹扩展速率和高的门槛值），则裂纹的起始扩展应力较高，并且在裂纹产生后，也会有较长时间的裂纹扩展过程，从而有利于延长构件的使用寿命。如新近发展的中低碳弹簧钢具有较小的裂纹扩展速率，这与该类钢具有较高的韧性储备和较高的疲劳寿命相一致。

⑥应变疲劳：通常的旋转弯曲疲劳性能对于材质比较和选材是需要的。对于某些弹簧构件（如汽车钢板弹簧），其材料的弯曲疲劳性能较接近于使用条件下的受力状态；最近发展的应变疲劳实验方法可以反映材料在闭环循环应力应变下的疲劳寿命情况，并可以反映材料在应变控制下的低周和高周循环疲劳特性，从而为人们有限寿命设计提供依据，低周循环疲劳寿命受塑性影响较大，而高周疲劳寿命则受强度影响和控制，因此应变疲劳曲线可以更为全面的反映材料的疲劳特性；目前弹簧钢的应变疲劳寿命已日渐引起人们的兴趣。

2）弹簧钢的工艺性能

①合金成分应较简单，价格便宜，冶炼工艺容易进行。目前大部分弹簧钢的主要合金元素是Si和Mn；部分弹簧钢含有显著提高淬透性的元素B；少部分弹簧钢含有Cr、V；个别弹簧钢含有Mo。对冶炼工艺无特殊要求，可用顶吹转炉或普通电炉冶炼。

②具有较好的热成形性及表面质量，一般弹簧钢材系钢坯热轧或热轧后再经拉拔而成，轧制或拉拔后的表面一般不再经任何机械加工。因此，要求弹簧钢应具有较好的热轧成形性，较小的脱碳敏感性，小的石墨化倾向，以保证弹簧钢材表面的质量好，脱碳少，以及无氧化皮压入等缺陷。

③具有良好的制簧成形性和热处理工艺性能。作为热加工成形的弹簧须经过下料和锻制工艺，要求这类弹簧钢的交货状态硬度低（HB≤306），冷加工（切头、冲孔）性能好，淬火、回火温度范围宽，在热处理过程中的脱碳敏感性小，并具有良好的喷丸强化和预压强化性能。

3）化学成分对弹簧钢性能的影响

在汽车弹簧制造中广泛应用的各弹簧钢中，主要靠加入合金元素Si、Mn、Cr、B、V、Nb和适量的碳（C）相配合，来保证各弹簧钢所要求的性能，这些合金元素的作用和含量特点如下：

①碳含量：现行的弹簧钢的碳含量都较高，钢中的中限碳含量几乎都在0.50%～0.55%以上。弹簧钢中的碳赋予弹簧钢以必要的淬透性和淬硬性，保证弹簧热处理后达到所要求的硬度，并保证回火后有足够的碳化物析出，从而保证弹簧钢具有较高的弹性极限、屈服极限和抗拉强度及足够的疲劳极限。研究结

汽车论坛 http://www.qclt.com

果表明，碳可以显著地提高弹簧钢的弹性松弛抗力；而弹簧钢中的碳含量一般是根据淬火和回火后的组织分别为孪晶马氏体和屈氏体来确定的。基于马氏体形态和钢强韧化关系的认识以及弹簧钢形变热处理强化机理的认识，国内研究开发了含碳量为0.35%（中限成分）的中低碳弹簧钢，这类弹簧钢脱碳敏感性低，轧制抗力小，冶炼容易，成材率高，强韧性匹配好，价格便宜，很适合于变截面板簧的应用，其牌号为35SiMnB，35SiMnVB。

②合金元素：弹簧钢中的主要合金元素是Si、Mn、Cr以及为细化晶粒而加入的V和为提高淬透性而加入的微量B。

Si是固溶强化元素，它的原子半径较大，Si固溶到铁素体中可使铁素体晶体产生畸变。从而可以有效地提高铁素体基体的强度，Si还可以促进钢在回火时的碳化物析出，促进沉淀强化。在SAE5160钢中（含Si0.24%），淬火后回火时析出的Fe_3C（渗碳体）的形状为棒状，并且比较粗大、间距也大；而在含Si2.2%的SAE920钢中，析出的Fe_3C的形状为细小的椭球状，其粒子间距小，粒子数量多。这不仅提高了弹簧钢的抗回火稳定性，而且也可改善其弹性松弛抗力。正是因为Si的这种良好作用，一般弹簧钢中均含有Si。但高Si会增加钢的轧制抗力，促进钢的脱碳和石墨化以及白点的产生，对钢锭表面产生不良影响。

Mn的主要作用是提高淬透性，从而改善热处理工艺性能，在与Cr、B配合使用时，其效果更佳。当Si含量在0.60%以上时，则可强化Mn对淬透性的良好作用。一般弹簧钢中均含有1%以上的Mn，当淬透性要求较高时，Mn含量可提高至1.30%~1.60%。

Cr在弹簧钢中的作用是提高淬透性，并对氧化和腐蚀抗力有一定改善。同时含Cr钢的脱碳敏感性较Si-Mn系钢为低；石墨化倾向很小；其晶粒粗化程度亦较不含Cr的钢低；Cr会降低钢的比例极限，并且使回火时析出的碳化物粗化并呈棒状析出，这些都对弹簧钢的松弛抗力产生不利影响。

B在弹簧钢中的主要作用是提高淬透性；微量B的加入可以代替大量的合金元素满足对钢的淬透性的要求，降低钢的成本，节约合金元素，同时B对弹簧钢的松弛抗力有良好的影响，并具有阻止先共析铁素体的形成，阻止钢出现第一类回火脆性的作用。

V、Nb等碳化物形成元素可以细化晶粒，沉淀析出的细小碳化物，氮化物可以改善钢的强韧性和松弛抗力；Si、Mn、V同时存在还可有效提高钢的淬透性；但这类合金元素价格较高，加入这类元素会使钢的成本有一定提高；其加入量一般很少（通常在500~1000ppm）；通常在要求较高的一些弹簧钢中应用。

4）弹簧的寿命及影响寿命的因素

汽车弹簧的寿命是由其疲劳特性和弹簧特性（刚度、静载荷弧高——对钢板弹簧，或静载荷高度——对螺旋弹簧，弹性松弛性能等）所决定的。为使这些特性更加优化，对弹簧的制造方法和工艺进行了一系列的研究和开发。例如，采用优化的合理的喷丸工艺和预压工艺。喷丸（或抛丸）可使弹簧表面的脱碳层变薄，使表面层的亚结构发生变化，使表面强化，从而使表面裂纹萌生抗力和裂纹扩展抗力提高，喷丸可以造成很大的表面压应力（高达600~1200MPa），从而降低弹簧表面的疲劳拉应力幅，这些都可以明显提高弹簧的疲劳寿命；应变喷丸可以造成弹簧表面的更大的残留压应力，因此可以更有效地提高弹簧的疲劳强度。各种不同喷丸工艺所获得的残余应力分布比较示于图1-1-38。由于喷丸引入的残余压应力，使喷丸试样的疲劳试验时裂纹的萌生点发生在次表层，而避开了表面缺陷对弹簧疲劳性能的不利影响。

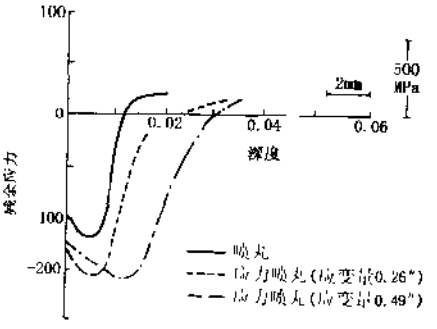


图1-1-38 各种喷丸工艺获得的残余应力分布的比较

弹簧的预压可以消除弹簧的残留变形，分检弹簧制造中的性能缺陷，稳定弹簧形状，引入残留压应力等作用，可进一步改善弹簧制造质量，提高其疲劳寿命。但预压工艺必须结合弹簧钢热处理状态的流变曲线、喷丸强化工艺和喷丸引入的残留应力综合考虑，合理制定；否则达不到预期的强化

汽车论坛 http://www.qclt.com

效果。

形变热处理由于可以有效的改善弹簧钢的强韧性匹配，并可改变淬火的马氏体形态和细化回火时的碳化物析出，从而可以明显提高弹簧钢的疲劳寿命；日本屈切弹簧厂将变截面锥形板簧的生产与形变热处理工艺相结合，从而得到形变强化与材料节约的综合效果。

弹簧钢的冶金质量、表面脱碳、非金属夹杂物含量对弹簧的疲劳寿命影响很大。因此，人们都努力改善弹簧钢的冶金质量，减少表面脱碳，降低钢中非金属夹杂物的含量。对于一些重要的高应力下使用的螺旋弹簧（如气门弹簧）用钢丝的质量要求而言，非金属夹杂物含量是其重要问题，而非金属夹杂物在钢中是不可避免的，而新的冶金技术是尽可能降低非金属夹杂物的有害作用。非金属夹杂物对弹簧钢疲劳强度的影响与它的硬度有关；当其为硬质夹杂物时，其危害较大；因而使非金属夹杂物生成软质的夹杂物是减少其危害的有效方法。

近年来，采用顶吹转炉、连续铸造和连轧技术，可以降低弹簧钢的生产成本，提高劳动生产率和成材率，并可改善弹簧钢材的表面质量；采用顶吹转炉，炉外精炼，钢包喷粉等技术，可进一步改善弹簧钢的内在质量。采用这些新技术，满足我国日益增长的对弹簧钢质量和数量的需求。

5）国内外应用的弹簧钢性能数据

弹簧钢有热加工用和冷成形用之分，热加工用有扁钢和圆钢，分别用来制造板簧和螺旋弹簧，钢厂提供钢材，在弹簧制造厂成形并进行热处理，得到需要的力学性能。冷成形用钢是由钢厂提供冷拔钢丝或油淬回火钢丝，其力学性能是在钢厂通过冷拔和热处理得到，弹簧制造厂只需成形和去除应力退火即可制成产品。

（1）中国的弹簧钢性能数据

中国热加工用弹簧钢钢号的化学成分和力学性能分别列于表 1-1-108 和表 1-1-109。

表 1-1-108 中国热加工用弹簧钢化学成分

序号	牌号	化学成分（%）								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	其它
						不大于				
1	65	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	0.25	0.25	0.035	0.035	
2	70	0.62~0.75	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	0.25	0.25	0.035	0.035	
3	85	0.82~0.90	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25	0.25	0.25	0.035	0.035	
4	65Mn	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.25	0.25	0.25	0.035	0.035	
5	55Si2Mn	0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35	0.35	0.25	0.035	0.035	
6	55Si2MnB	0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35	0.35	0.25	0.035	0.035	B：0.0005~0.004
7	55SiMnVB	0.52~0.60	0.70~1.00	1.0~1.30	≤0.35	0.35	0.25	0.035	0.035	V：0.08~0.16 B：0.0005~0.004
8	60Si2Mn	0.56~0.64	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35	0.35	0.25	0.035	0.035	
9	60Si2MnA	0.56~0.64	1.60~2.00	0.60~0.90	≤0.35	0.35	0.25	0.030	0.030	
10	60Si2CrA	0.56~0.64	1.40~1.80	0.40~0.70	0.70~1.00	0.35	0.25	0.030	0.030	
11	60Si2CrVA	0.56~0.64	1.40~1.80	0.40~0.70	0.90~1.20	0.35	0.25	0.030	0.030	V：0.10~0.20
12	55CrMnA	0.52~0.60	0.17~0.34	0.65~0.95	0.65~0.95	0.35	0.25	0.030	0.030	
13	60CrMnA	0.56~0.64	0.17~0.34	0.70~1.00	0.70~1.00	0.35	0.25	0.030	0.030	
14	60CrMnMoA	0.56~0.64	0.17~0.34	0.70~1.00	0.70~0.90	0.35	0.25	0.030	0.030	Mo：0.25~0.35
15	50CrVA	0.46~0.54	0.17~0.34	0.50~0.80	0.80~1.10	0.35	0.25	0.030	0.030	V：0.10~0.20

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

序号	牌 号	化学成分（%）								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	其 它
						不大于				
16	60CrMnBA	0.56~0.64	0.17~0.34	0.70~1.00	0.70~1.00	0.35	0.25	0.030	0.030	B：0.0005~0.004
17	30W4Cr2VA	0.26~0.34	0.17~0.34	≤0.40	2.00~2.50	0.35	0.25	0.030	0.030	V：0.50~0.80 W：4.0~4.5

注：①详见 GB1222—84。

②根据需方要求（在合同中注明），钢中残余铜含量不大于 0.20%。

表 1-1-109 弹簧钢力学性能

序号	牌 号	热处理制度			力学性能不小于				
		淬火温度（℃）	淬火	回火温度（℃）	σ_s（MPa）	σ_b（MPa）	δ（%） δ_5	δ（%） δ_{10}	ψ（%）
1	65	840	油	500	800	1 000		9	35
2	70	830	油	480	850	1 050		8	30
3	85	820	油	480	1 000	1 150		6	30
4	65Mn	830	油	510	800	1 000		8	30
5	55Si2Mn	870	油	480	1 200	1 300		6	30
6	55Si2MnB	870	油	480	1 200	1 300		6	30
7	55SiMnVB	860	油	460	1 250	1 400		5	30
8	60Si2Mn	870	油	480	1 200	1 300		5	25
9	60Si2MnA	870	油	440	1 400	1 600		5	20
10	60Si2CrA	870	油	420	1 600	1 800	6		20
11	60Si2CrVA	850	油	410	170	1 900	6		20
12	55CrMnA	830~860	油	460~510	1 100（$\sigma_{0.2}$）	1 250	9*		20
13	60CrMnA	830~860	油	460~520	1 100（$\sigma_{0.2}$）	1 250	9*		20
14	60CrMnMoA	–	–	–	–	–	–	–	–
15	50CrVA	850	油	500	1 150	1 300	10		40
16	60CrMnBA	830~860	油	460~520	1 100（$\sigma_{0.2}$）	1 250	9*		20
17	30W4Cr2VA	1 050~1 100	油	600	1 350	1 500	7		40

注：①除规定热处理温度上下限外，表中热处理温度允许偏差为：淬火 ±20℃，回火 ±50℃。根据需方特殊要求，回火可按 ±30℃ 进行。在保证力学性能的条件下，热处理工艺可以调整。

②30W4Cr2VA 除抗拉强度外，其它性能检验结果供参考。

在中国的 GB2271—84、GB4359—84 和 GB436—284 分别列出阀门用油淬火—回火弹簧钢丝的技术条件，在 GB4360—84 和 GB4361—84 列一般用途和汽车悬挂弹簧用淬火—回火弹簧钢丝的技术条件，把这些钢丝的性能数据汇总列于表 1-1-110。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-110 中国油淬火—回火弹簧钢丝的牌号、应用范围和抗拉强度

钢类	主要化学成分(%) 直径范围及用途	钢丝直径(mm)	抗拉强度 钢丝类型								
			阀门用 Cr-V	阀门用碳素	阀门用 Cr-Si	普通用碳素		一般及悬挂弹簧用			
						A类	B类	A类	B类	C类	
阀门用 Cr-V 弹簧钢丝	C:0.46~0.54 Cr: 0.80~1.10 V: 0.10~0.20	1.00	1667~1863								
		1.20	1667~1863								
		1.40	1667~1863								
		1.60	1667~1863		1961~2108						
阀门用碳素弹簧钢丝	70钢和65Mn钢	1.80	1667~1863		1961~2108						
		2.00	1618~1765	1422~1569	1912~2010	1618~1765	1716~1863				
		2.20	1618~1765	1422~1569	1912~2010	1569~1716	1667~1814	1659~1716	1667~1814	1765~1912	
		2.50	1618~1765	1422~1569	1912~2010	1569~1716	1667~1814				
		3.00	1618~1765	1422~1569	1912~2010	1500~1667	1618~1765				
阀门用 Cr-Si 弹簧钢丝	C:0.50~0.60 Si: 1.20~1.60 Cr: 0.50~0.80	3.20	1569~1716	1422~1569	1863~2010	1471~1618	1569~1716	1520~1667	1618~1765	1716~1863	
		3.50	1569~1716	1422~1569	1863~2010	1471~1618	1569~1716				
		4.00	1520~1667	1422~1569	1814~1961	1442~1569	1520~1667				
		4.50	1520~1667	1373~1520	1814~1961	1373~1520	1471~1618				
		5.00	1471~1618	1373~1520	1765~1912	1324~1471	1422~1569	1471~1618	1569~1716	1667~1814	
		5.50	1471~1618	1324~1471	1765~1912	1275~1422	1373~1520				
普通用碳素弹簧钢丝	55、60、60Mn、65、65Mn、70和70Mn钢	6.00	1471~1618	1324~1471	1716~1863	1275~1422	1373~1520				
		6.50	1422~1569		1716~1863	1275~1422	1373~1520				
		7.00	1422~1569		1667~1814	1226~1373	1324~1471				
		8.00	1373~1520		1667~1814	1226~1373	1324~1471	1422~1569	1520~1667	1618~1765	
		9.00	1373~1520			1226~1373	1324~1471				
一般用 Si-Mn 弹簧钢丝 AB 类~一般用 C 类汽车悬挂用	60Si2MnA钢 C:56~0.64 Si:1.60~2.00 Mn:0.60~0.90	10.00	1373~1520			1177~1324	1275~1422				
		11.00				1177~1324	1275~1422				
		12.00				1177~1324	1275~1422				
		13.00						1373~1520	1471~1618	1569~1716	
		14.00									

(2) 美国的弹簧钢性能数据

在调质钢一节中列出的美国钢号，其含碳量为0.60%左右的调质钢如4161H、5160H、6150H、9260H均可作为热加工弹簧钢使用，其化学成分与淬透性能数据均在调质钢中列出，在此不再赘述。

(3) 日本的弹簧钢性能数据

汽车论坛 http://www.qclt.com

日本 JISG4801（1984）中列出热加工的弹簧钢的化学成分和力学性能，它们分别列于表 1-1-111 和表 1-1-112。

表 1-1-111 化 学 成 分

钢号	化学成分（%）								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	B ≥
SUP3	0.75～0.90	0.15～0.35	0.30～0.60	≤0.035	≤0.035	～	～	～	～
SUP6	0.56～0.64	1.50～1.80	0.70～1.00	≤0.035	≤0.035	～	～	～	～
SUP7	0.56～0.64	1.80～2.20	0.70～1.00	≤0.035	≤0.035	～	～	～	～
SUP9	0.52～0.60	0.15～0.35	0.65～0.95	≤0.035	≤0.035	0.65～0.95	～	～	～
SUP9A	0.56～0.64	0.15～0.35	0.70～1.00	≤0.035	≤0.035	0.70～1.00	～	～	～
SUP10	0.47～0.55	0.15～0.35	0.65～0.95	≤0.035	≤0.035	0.80～1.10	～	0.15～0.25	～
SUP11A	0.56～0.64	0.15～0.35	0.70～1.00	≤0.035	≤0.035	0.70～1.00	～	～	0.0005
SUP12	0.51～0.59	1.20～1.60	0.60～0.90	≤0.035	≤0.035	0.60～0.90	～	～	～
SUP13	0.56～0.64	0.15～0.35	0.70～1.00	≤0.035	≤0.035	0.70～0.90	0.25～0.35	～	

注：Cu 作为杂质，不超过 0.30%

表 1-1-112 钢 的 力 学 性 能

钢号	热处理		力学性能				
	淬火	回火	$\sigma_{0.2}$（MPa）	σ_b（MPa）	δ（%） No.4 或 No.7 试样	ψ（%） No.4 试样	硬度 HB
SUP3	油淬	450～500	≥834	≥1079	≥8	～	341～401
SUP6	油淬	480～530	≥1079	≥1226	≥9	≥20	363～429
SUP7	油淬	490～540	≥1079	≥1226	≥9	≥20	363～429
SUP9	油淬	460～510	≥1079	≥1226	≥9	≥20	363～429
SUP9A	油淬	460～520	≥1079	≥1226	≥9	≥20	363～429
SUP10	油淬	470～540	≥1079	≥1226	≥10	≥20	363～429
SUP11A	油淬	460～520	≥1079	≥1226	≥9	≥20	363～429
SUP12	油淬	510～570	≥1079	≥1226	≥9	≥20	363～429
SUP13	油淬	510～570	≥1079	≥1226	≥10	30	363～429

日本的 JISG3561（1988）、3565（1988）、3566（1988）、3567（1988）和 3568（1988）分别列出碳素，Cr-V 和 Cr-Si 气阀弹簧钢丝和 Si-Mn、Si-Cr 其它用途的弹簧钢丝的化学成分与抗拉强度，把这些钢丝的数据汇总列于表 1-1-113。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-113 日本油回火钢丝的牌号、应用范围和抗拉强度

钢类	钢号	主要化学成分（%）直径范围及用途	钢丝直径（mm）	抗拉强度（MPa） 钢丝牌号 SWO-V	SWOCV-V	SWOSC-V	SWSM-C	SWOSC-B
油回火碳素气阀弹簧钢丝	SWO-V	直径 2.0～6.0mm 用于气阀弹簧	1.60			1960～2110		1960～2110
			1.80			1960～2110		1960～2110
			2.00	1620～1770	1570～1720	1910～2060		1910～2060
			2.30	1620～1770	1570～1720	1910～2060		1910～2060
			2.60	1620～1770	1570～1720	1910～2060		1910～2060
油回火 Cr-V 合金气阀弹簧钢丝	SWOCV-V	直径 2.00～10.0mm 用于气阀弹簧 C：0.45～0.55 Mn：0.65～0.95 Cr：0.80～1.10 V：0.15～0.25	2.90	1620～1770	1570～1720	1910～2060		1910～2060
			3.20	1570～1720	1570～1720	1860～2010		1860～2010
			3.50	1570～1720	1570～1720	1860～2010		1860～2010
			4.00	1570～1720	1520～1670	1810～1960	1670～1810	1810～1960
			4.50	1520～1670	1520～1670	1810～1960	1670～1810	1810～1960
油回火 Cr-Si 合金气阀弹簧钢丝	SWOSC-V	直径 1.6～8.0mm 用于气阀弹簧 C：0.50～0.60 Si：1.20～1.60 Mn：0.50～0.80 Cr：0.50～0.80	5.00	1520～1670	1470～1620	1760～1910	1670～1810	1760～1910
			5.50		1470～1620	1760～1910	1670～1810	1760～1910
			6.00	1470～1620	1470～1620	1710～1860	1670～1810	1710～1860
			6.50		1420～1570	1710～1860	1670～1810	1710～1860
			7.00		1420～1570	1660～1810	1620～1770	1660～1810
油回火 Si-Mn 合金钢丝	SWOSM-A SWOSM-B SWOSM-C	直径 4.0～12.0mm 一般用途或汽车悬架弹簧 C：0.56～0.64 Si：1.50～1.80 Mn：0.70～1.00	8.00		1370～1520	1660～1810	1620～1770	1660～1810
			9.00		1370～1520		1620～1770	1660～1810
			10.00		1370～1520		1570～1720	1660～1810
			10.5				1570～1720	1660～1810
油回火 Si-Cr 合金钢丝	SWOSC-B	直径 1.0～14.0mm 一般弹簧	11.0				1570～1720	1660～1810
			11.5				1570～1720	1660～1810
			12.0				1570～1720	1610～1760
			13.0				～	1610～1760
			14.0				～	1610～1760

（撰稿人：马鸣图）

1.1.4.3 轴承钢

轴承钢用来制造轴承的套圈和滚动体，要求有良好的耐磨性、抗滚动接触疲劳性能、耐冲击性能和尺寸稳定性。对于特殊用途的轴承，还要求耐腐蚀和耐高温性能。

1）轴承钢的生产

过去，我国轴承钢大多用普通电弧炉冶炼，工艺比较落后，钢中含氧量为 30～40ppm，钢中夹杂物含量高，轴承钢的抗滚动接触疲劳性能差，轴承的使用寿命低。

80 年前后，我国开始采用电弧炉加钢包真空脱气法（VAD）或钢包真空精炼法（VLF）冶炼轴承钢，钢中含氧量下降到 10～15ppm。但是发展不平衡，有些钢厂还没采用。

上钢五厂采用 30t 电弧炉与 40tVLF 炉生产轴承钢，1991 年其含氧量已降至 15ppm 以下，全年的平均

汽车论坛 http://www.qclt.com

值为 11.7ppm。

大冶钢厂曾用普通电弧炉和普通电弧炉加 VAD 冶炼轴承钢，对比其氧、氢和氮的含量，其统计 188 批，结果见表 1-1-114。

表 1-1-114 轴承钢氧、氢、氮含量

含量 / 工序	氧含量（ppm）		氢含量（ppm）		氮含量（ppm）	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均
精炼前	21～54	34.85	3.3～10.6	6.41	71～112	84.9
精炼后	8～21	12.66	1.0～5.71	2.74	51～79	63.8
去气效率（%）	40.22～77.78	63.89	17.94～78.83	57.26		24.8

从表 1-1-114 可以看出：脱氧效果平均为 63.89%；脱氢效果平均为 57.26%；除氮效果平均为 24.8%。

2）轴承钢的质量要求

（1）轴承钢的非金属夹杂物

轴承钢的非金属夹杂物对轴承的寿命有显著影响，因此评价轴承钢的质量时，非金属夹杂物是主要指标之一。

按照 GB10561—89 钢中非金属夹杂物评定方法的评级图，相当于美国 E45 标准中规定的 J_K 评级图进行 A 类（硫化物）、B 类（Al_2O_3 氧化物）、C 类（硅酸盐）和 D 类（点状氧化物）四种类型，每种类型又分粗大和细小两类进行评定。

根据 YB（T）1—80 对高碳铬轴承钢的规定，评定的夹杂物级别均不应超过表 1-1-115 的规定。

表 1-1-115 高碳铬轴承钢夹杂物级别

非金属夹杂物类型	合格级别		非金属夹杂物类型	合格级别	
	细小	粗大		细小	粗大
A	2.5	1.5	C	2.0	1.5
B	2.0	1.5	D	1.5	1.5

美国 ASTMA485—91 高淬透耐磨轴承钢标准规定夹杂物检查与我国 YB（T）1—80 相比，但比我国要求严一些，见表 1-1-116。

表 1-1-116 高淬透耐磨轴承钢夹杂物标准

非金属夹杂物类型	合格级别		非金属夹杂物类型	合格级别	
	细小	粗大		细小	粗大
A	2.5	1.5	C	1.0	1.0
B	2.0	1.0	D	1.5	1.0

钢中含氧量对 B 类和 D 类夹杂物的影响较大，B 类夹杂物以 Al_2O_3 为主，D 夹杂物主要以 CaO 点状夹杂物为主，D 类夹杂物除了与钢中含氧量有关外，还与冶炼时精炼渣的化学成分有关，D 类夹杂物对接触疲劳性能的危害性比 B 类夹杂物还大。

A 类夹杂物主要为硫化锰，它的塑性比较好，轧制时沿轧制方向变形，成长条状分布。硫化物对轴承接触疲劳寿命的影响，目前有两种观点，大多数认为硫化物破坏了基体的连续性，是一个疲劳源，对接触疲劳有不利影响。但是，瑞典 SKF 公司的研究成果认为：当钢中含硫量≤0.040%时，硫化物对轴承寿命

汽车论坛 http://www.qclt.com

没有明显的有害作用，而对可切削加工性能还有有利作用。SKF 公司生产的轴承钢硫的实际含量控制在 0.015%～0.024%，平均为 0.020%。

近年来，国外某些轴承公司还严格控制轴承钢中的钛含量，因为钛在钢中形成的碳、氮化物，成方块形或菱形，对轴承钢的接触疲劳性能有不利影响。

大冶钢厂用电炉加 VAD 处理工艺生产的 100 炉钢，按 GB10561—89 标准的评级图（相当于美国 E45 标准中 JK 评级图）进行非金属夹杂物的评定，结果列于表 1-1-117

表 1-1-117 大冶钢厂夹杂物标准

夹杂物类型	A 系（细小）					B 系（细小）			
级别	0	0.5	1	1.5	2.0	0	0.5	1	1.5
百分比（%）		10	38	39	13	25	32	35	8

从表 1-1-117 可以看出：电炉 + VAD 处理后非金属夹杂物可以达到 A 系（细小）≤2.0 级；B 系（细小）≤1.5 级水平，完全符合我国 YB（T）1—80 高碳铬轴承钢要求。

（2）轴承钢的接触疲劳性能

轴承的损坏多为接触疲劳损坏，因此钢材的疲劳性能是其质量的另一重要指标。

为了了解钢材的接触疲劳性能，我国上钢五厂用电炉 + VLF 精炼的与瑞典用 SKF－MR 法精炼的 GCr15 轴承钢进行了接触疲劳性能对比试验　试验用钢的化学成分列于表 1-1-118。非金属夹杂物的评定结果见表 1-1-119。氧化物与硫化物金相定量分析结果见表 1-1-120 和表 1-1-121。滚动接触疲劳试验结果见表 1-1-122。滚动疲劳试样热处理规程为：(845 ± 5)℃保温 25min 淬油，160℃回火 3h，热处理后的硬度为 62.0～63.6HRC。疲劳试验在 TLP 型推力片接触疲劳试验机上进行，试验应力 4 116MPa，转速为 2 040r/min，用 20 号机油循环润滑。接触疲劳试验数据采用 Weibull 数理统计方法处理。

表 1-1-118 上钢五厂化学成分标准

厂　家	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
上钢五厂	1.01	0.33	0.255	0.009	0.009	1.50	0.03	0.11	0.02	-
瑞典 SKF	0.99	0.34	0.25	0.006	0.022	1.46	0.18	0.27	0.05	0.043

表 1-1-119 上钢五厂夹杂物标准

厂　家	A		B		C		D	
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
上钢五厂	1.0	0.5	0.5	0	0	0	0	0
瑞典 SKF	1.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0

表 1-1-120 氧化物定量金相结果

厂　家	最大面积（μm^2）	最小面积（μm^2）	总面积（μm^2）	平均面积（μm^2）	总个数
上钢五厂	143.19	0.29	566.61	17.17	33
瑞典 SKF	32.97	0.29	206.34	3.49	56

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-121 硫化物定量金相结果

厂 家	总量（%）	最大面积 (μm^2)	最小面积 (μm^2)	总面积 (μm^2)	平均面积 (μm^2)	总个数
上钢五厂	0.0641	349.6	4.398	7156	76.95	93
瑞典 SKF	0.1952	991.8	4.398	21800	53.56	407

表 1-1-122 滚动接触疲劳试验结果

厂 家	L10 寿命 $\times 10^7$	比值	L50 寿命 $\times 10^7$	比值	斜率 α	应力水平 (MPa)
上钢五厂	1.5392	1	4.6174	1	1.7142	4116
瑞典 SKF	1.7446	1.13	5.3703	1.16	1.6754	4116

从上述试验结果看出：上钢五厂产轴承钢的接触疲劳寿命为 1.5392×10^7，而瑞典的轴承钢的为 1.7446×10^7，比上钢五厂的高 13%，这是由于瑞典轴承钢的氧化物颗粒数量多而面积小。

3）轴承零件的热处理

轴承零件的毛坯热处理采用等温退火工艺，要求退火后珠光体成细小、均匀球状分布，它能改善轴承零件的切削性，另外均匀、细小的球状珠光体，使得合金元素在加热时能均匀的溶入奥氏体中，也使得轴承零件在最终热处理前有一个比较细小和均匀分布的碳化物，为以后淬火和回火创造一个良好条件。

轴承淬火和回火后的金相组织应由隐晶、细小结晶马氏体、均匀分布的细小残留碳化物和少量残留奥氏体组成。GCr15 钢制成的套圈、滚柱和滚针淬火后的硬度不应小于 63HRC，回火后的硬度不应小于 61HRC，GCr15SiMn 钢制的零件淬火后的硬度不应小于 62HRC，回火后不应小于 60HRC。

热处理工艺不同，轴承钢中碳化物的细化程度不同，其接触疲劳性能也不同。北京钢铁总院与大冶钢厂用 GCr15 钢进行过试验，一组样品为常规热处理，一组样品采用超细化碳化物热处理，两种热处理后碳化物的情况见表 1-1-123。

表 1-1-123 两种热处理的碳化物情况

测定结果 / 工艺类型 / 测定项目	常规热处理工艺	特殊超细化热处理工艺
碳化物平均直径（μm）	0.785	0.09
最大碳化物直径（μm）	2.152	0.15
最小碳化物直径（μm）	0.20	0.04
K = 最大碳化物直径/最小碳化物直径	10.8	3.6
$10\times10\mu m^2$ 内碳化物数	20	138
平均间距（μm）	2.14	0.27

接触疲劳试验在 JPJ-70 型接触疲劳试验机上进行，试验时接触应力为 3 920MPa，转数为 1 450r/min，用 5 号锭子油润滑，油温不超过 60℃。试验结果见表 1-1-124。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-124 接触疲劳试验结果

接触应力（MPa）	热处理工艺	L_{10}	L_{50}
3 920	常规热处理	4.9×10^5	6.0×10^6
	特殊超细化热处理工艺	40.0×10^5	13.0×10^6

从表 1-1-124 可以看出：轴承钢经过特殊超细化热处理后，可提高接触疲劳寿命，为提高轴承寿命提出了新的途径。

4）国内外应用的轴承钢性能数据

轴承钢可以分为高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、高碳铬不锈轴承钢、高温轴承和高温不锈轴承钢。

（1）高碳铬轴承钢

由于价格便宜、可切削加工性能好，耐磨性能和抗滚动接触疲劳性能好，得到国内外广泛应用。

中国高碳铬轴承钢的化学成分见表 1-1-125〔YB（T）1—80〕、美国的见表 1-1-126（ASTM A 535－85）、日本的见表 1-1-127（JIS G4805—90）。

表 1-1-125 中国高碳铬轴承钢化学成分

牌号	化学成分（%）					
	C	Si	Mn	Cr	P	S
					不大于	
GCr9	1.00～1.10	0.15～0.35	0.25～0.45	0.90～1.20	0.25	0.25
GCr9SiMn	1.00～1.10	0.45～0.75	0.95～1.25	0.90～1.20	0.25	0.25
GCr15	0.95～1.05	0.15～0.35	0.25～0.45	1.40～1.65	0.25	0.25
GCr15SiMn	0.95～1.05	0.45～0.75	0.95～1.25	1.40～1.65	0.25	0.25

表 1-1-126 美国高碳铬轴承钢化学成分

牌号	化学成分（%）						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
						不大于	
52100	0.95～1.10	0.25～0.45	0.15～0.35	1.30～1.60	–	0.015	0.015
52100－1	0.95～1.10	0.95～1.25	0.45～0.75	0.90～1.20	–	0.015	0.015
52100－2	0.85～1.00	1.40～1.70	0.50～0.80	1.40～1.80	–	0.015	0.015
52100－3	0.95～1.10	0.65～0.90	0.15～0.35	1.10～1.50	0.20～0.30	0.015	0.015
52100－4	0.95～1.10	1.05～1.35	0.15～0.35	1.10～1.50	0.45～0.60	0.015	0.015

表 1-1-127 日本高碳铬轴承钢化学成分

牌号	化学成分（%）						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
						不大于	
SUJ1	0.95～1.10	≤0.50	0.15～0.35	0.90～1.20	–	0.025	0.025
SUJ2	0.95～1.10	≤0.50	0.15～0.35	1.30～1.60	–	0.025	0.025
SUJ3	0.95～1.10	0.95～1.15	0.40～0.70	0.90～1.20	–	0.025	0.025
SUJ4	0.95～1.10	≤0.50	0.15～0.35	1.30～1.60	0.10～0.25	0.025	0.025
SUJ5	0.95～1.10	0.95～1.15	0.40～0.70	0.90～1.20	0.10～0.25	0.025	0.025

汽车论坛 http://www.qclt.com

(2) 渗碳轴承钢

要求有高耐磨性、高的滚动接触疲劳性能和高韧性的轴承，采用低碳合金钢渗碳工艺制造。

我国渗碳轴承钢的化学成分见表 1-1-128（GB3203—82）。

表 1-1-128 我国渗碳钢的化学成分

牌号	化学成分（%）								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
							不大于		
G20CrMo	0.17～0.23	0.20～0.35	0.65～0.95	0.35～0.65		0.08～0.15	0.25	0.030	0.030
G20CrNiMo	0.17～0.23	0.15～0.40	0.60～0.90	0.35～0.65	0.40～0.70	0.15～0.30	0.25	0.030	0.030
G20CrNi2Mo	0.17～0.23	0.15～0.40	0.40～0.70	0.35～0.65	1.60～2.00	0.20～0.30	0.25	0.030	0.030
G20Cr2Ni4	0.17～0.23	0.15～0.40	0.30～0.60	1.25～1.75	3.25～3.75	—	0.25	0.030	0.030
G10CrNi3Mo	0.08～0.13	0.15～0.40	0.40～0.70	1.00～1.40	3.00～3.50	0.08～0.15	0.25	0.030	0.030
G20Cr2Mn2Mo	0.17～0.23	0.15～0.40	1.30～1.60	1.70～2.00	≤0.30	0.20～0.30	0.25	0.030	0.030

美国的 SAE4118 相当于 G20CrMo，SAE8620 相当于 G20CrNiMo，这两个牌号淬透性能低，只适用于中、小尺寸的轴承。尺寸大、要求冲击韧性好的轴承，可选用我国 G20CrNi2Mo，相当美国 SAE4320 钢和日本 SNCM420 钢。

(3) 高碳铬不锈轴承钢

中国的高碳铬不锈轴承钢的化学成分列于表 1-1-129（GB3086—82），美国的列于表 1-1-130（ASTM A756—90）。

表 1-1-129 中国铬不锈轴承钢化学成分

牌号	化学成分（%）						
	C	Cr	Mo	Si	Mn	P	S
				不大于			
9Cr18	0.90～1.00	17.0～19.0	—	0.80	0.80	0.035	0.030
9Cr18Mo	0.95～1.10	16.0～18.0	0.40～0.70	0.80	0.80	0.035	0.030

表 1-1-130 美国铬不锈轴承钢化学成分

牌号	化学成分（%）								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	P	S
						不大于			
440C	0.95～1.10	0.30～1.00	0.30～1.00	16.00～18.00	0.40～0.65	0.75	0.50	0.025	0.025

我国的 9Cr18Mo 的化学成分与美国的 440C 相当。

汽车论坛 http://www.qclt.com

（4）高温轴承钢与高温不锈轴承钢

中国的高温轴承钢Cr4Mo4V（YB688—76）和高温不锈轴承钢Cr14Mo（YB1205—80）的化学成分列于表1-1-131。美国的高温轴承钢M50（ASTM A600－89）和高温不锈轴承钢440C MOD（ASTM A 756－90）的化学成分列于表1-1-132。

表1-1-131 中国的高温与高温不锈轴承钢的化学成分

牌号	化学成分（%）							
	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	P	S
					不大于			
高温轴承钢 Cr4Mo4V	0.75～0.85	3.75～4.25	4.00～4.50	0.90～1.10	0.35	0.35	0.020	0.027
高温不锈轴承钢 Cr14Mo4	0.95～1.10	13.00～16.00	3.80～4.30	≤0.20	0.80	0.80	0.020	0.025

表1-1-132 美国的高温与高温不锈轴承钢的化学成分

牌号	化学成分（%）									
	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	Ni	Cu	P	S
							不大于			
高温轴承钢 M50	0.78～0.88	3.75～4.50	3.9～4.75	0.80～1.25	0.15～0.45	0.20～0.60	Ni+Cu	0.75	≤0.03	≤0.03
高温不锈轴承钢 440C MOD	1.00～1.10	13.00～15.00	3.75～4.25	—	0.30～1.00	0.20～1.00	0.75	0.50	0.025	0.025

（撰稿人：毛志强）

1.1.4.4 耐热钢

1）概况

汽车上用耐热钢制造的零部件有发动机的进排气门、涡流室镶块、涡轮增压器转子、排气净化装置等，但是，应用最普遍的还是进排气门，因此我们重点是介绍气门用钢。

发动机气门的作用是换气-进气-排气。气门是发动机中承受高载荷、高温和在腐蚀环境中工作的零件。从前一个气缸只有两个气门，现在有的发动机已发展到4个甚至5个气门，一台4缸发动机有16个或20个气门。

发动机的气门承受高的燃烧爆发压力，对4缸汽油发动机是7～9MPa，对柴油发动机是10～16MPa，甚至更高，每10MPa的燃烧压力在密封面上产生的应力大约为70～100MPa。

进气门盘部承受的温度为300～500℃，排气门为700～900℃，在这样高的温度和燃气的氧化与腐蚀作用下，气门材料要有良好的高温强度、耐腐蚀性和耐磨性。

根据设计情况，发动机气门可以分为整体气门，对焊气门和空心气门三种，对焊气门和空心气门见图1-1-39。整体进气门为马氏体钢而排气门为奥氏体钢；对焊排气门为奥氏体钢与马氏体钢对焊在一起，杆部为马氏体钢，盘部为奥氏体钢。对于负荷较大的汽油机和大部分柴油机的排气门在阀面堆焊耐热合金，负荷更大的发动机排气门采用镍基合金。

为了减轻气门杆部与气门导管之间的磨损，气门杆部进行镀铬或氮化处理，为了增加气门端部的耐磨性能，气门端头进行感应加热淬火或堆焊耐磨合金。

汽车论坛 http://www.qclt.com

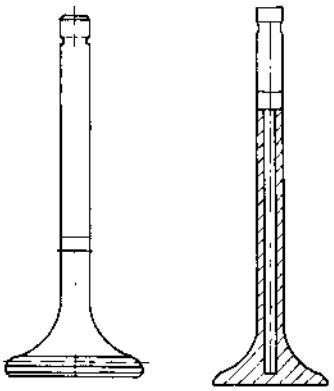
为了降低排气门温度可以采用空心气门，空心气门一般在内腔填充占内腔体积45%～65%的金属钠，钠在97℃即溶化，采用空心气门后，排气门的温度可以降低约100℃，如美国福特轿车的4气门发动机的排气门就采用空心气门。

近年来，我国引进了多种轿车，它们的发动机所用的进、排气门材料列于表1-1-133。

下面对发动机进、排气门所用的马氏体钢、奥氏体钢、阀面堆焊合金和镍基合金的情况作一简要介绍。

2）马氏体气门钢

这类钢主要用于进气门，低负荷的排气门及对焊气门的杆部，典型的钢种是Cr-Si钢，其使用温度为425～500℃，如4Cr10Si2Mo（相当日本SUH3）和45Cr9Si3钢（相当日本SUH1、美国HNV3、德国X45CrSi93），近几年来我国应用的4Cr9Si2钢已渐渐被45Cr9Si3钢所代替，因45Cr9Si3钢含碳和硅均比4Cr9Si2高，热处理后耐磨性和抗氧化性较好，目前我国标准中还没有列入45Cr9Si3钢，还处于新产品试制阶段，但引进轿车发动机已广泛应用该钢；另一类为高碳高铬马氏体钢8Cr20Si2Ni（相当日本SUH4、美国NHV6、XB）和85Cr18Mo2V（相当德国X85CrMoV182），其使用温度为500～600℃，8Cr20Si2Ni钢已列入我国标准，85Cr18MoV钢还需试制。我国常用马氏体钢化学成分见表1-1-134，典型三种马氏体钢室温性能和高温性能见表1-1-135。



a）双金属阀门　　b）空间阀门

图1-1-39 对焊气门与空心气门

表1-1-133 我国引进轿车进、排气门材料

引进车型	进气门材料	排气门材料
夏利轿车	SUH3B（4Cr10Si2Mo）	SUH35（21-4N）+SUH1（45Cr9Si3）+阀面堆焊Stellite（司太立）合金
桑塔纳轿车	X45CrSi93（45Cr9Si3）	X55CrMnNi208（21-2N）-X45CrSi93（45Cr9Si3）+阀面堆焊VF-5（司太立F）合金
标致505SW8轿车	Z45CS9（45Cr9Si3）	Z52CMN219（21-4N）+Z45CS9（45Cr9Si3）
奥迪100轿车	MS330（硅铬马氏体钢）	SAE EV8（21-4N）或SAE EV12（21-2N）
依维柯轻型汽车（S系列）	X53CrMnNiNS219（21-4NS）+X45CrSi8（45Cr9Si3）	X53CrMnNiNS 219（21-4NS）+X45CrSi8（45Cr9Si3）或X50CrMnNiNb2WN219（21-4N+Nb+W）+X45CrSi8（45Cr9Si3）
斯太尔重型载货车（WD615柴油机）	X85CrMoV182（85Cr18MoV）	X60CrMnMoVNbN2110（6Cr21Mn10MoVNbN）+X45CrSi93（45Cr9Si3）+阀面堆焊StelliteF（司太立F）

表1-1-134 马氏体气门钢的化学成分

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
4Cr9Si2	0.35～0.50	2.00～3.00	≤0.70	≤0.035	≤0.030	8.00～10.00	≤0.60		
45Cr9Si3*（X45CrSi93）	0.40～0.50	2.70～3.30	≤0.80	≤0.040	≤0.030	8.00～10.00	≤0.60		
4Cr10Si2Mo	0.35～0.45	1.90～2.60	≤0.70	≤0.035	≤0.030	9.00～10.50	≤0.60	0.70～0.90	
8Cr20Si2Ni（XB）	0.75～0.85	1.75～2.25	0.20～0.60	≤0.030	≤0.030	19.00～20.50	1.15～1.65	1.15～1.65	
85Cr18Mo2V*（X85CrMoV182）	0.80～0.90	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	16.50～18.50	2.00～2.50	2.00～2.50	0.30～0.60

注：* 属试制新钢种。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-135 马氏体气门钢的力学性能

钢号	室温力学性能			高温瞬时抗拉强度（MPa）						高温硬度（HB）		1 000h持久强度（MPa）	
	σ_b（MPa）	σ_s（MPa）	HB	500℃	550℃	600℃	650℃	700℃	750℃	650℃	760℃	500℃	650℃
45Cr9Si3（X45CrSi93）	900～1 100	700	266～325	500	360	250	170	110		63	31	190	40
8Cr20Si2Ni（XB）	940	840					200		100*	85	40		
85Cr18Mo2V（X85CrMoV182）	1 000～1 200	800	296～355	550	400	300	230	180	140			260	52

注：* 试验温度为760℃。

3）奥氏体气门钢

5Cr21Ni4Mn9N（21-4N）钢是目前世界各国制造排气门主要钢种，这是由于它不仅有优良的高温性能，而且还有良好的耐氧化铅腐蚀，同时经济上也相对比较便宜，因此得到各国汽车工业广泛应用。

（1）21-4N钢的化学成分

在21-4N钢中，因为锰与镍均扩大γ区，所以可以用提高锰的办法，替代一部分镍。在21－4N钢中将锰提高到9%，镍下降到4%，同时为了提高奥氏体耐热钢的固溶强化和析出强化，采取增加碳和氮的办法，另外在21－4N钢中，为了进一步提高耐氧化铅腐蚀性能，将钢中硅作了限制，如美国、德国标准限制硅≤0.25%；我国和日本标准限制硅≤0.35%。

虽然21-4N钢的高温强度和耐氧化铅腐蚀性能比较优越，成分也比较简单和经济，但近20年来，又在21-4N基础钢中派生出不少新钢，有的为了进一步降低成本，也有的为了提高高温性能，已纳入各国阀门钢的牌号，见表1-1-136。

表 1-1-136 各国阀门钢牌号

国别	牌号	C	Si	Mn	P ≤	S ≤	Ni	Cr	W	N	其它
中国	5Cr21Mn9Ni4N（21-4N）	0.48～0.58	≤0.35	8.00～10.0	0.040	0.030	3.25～4.5	20.0～22.0	-	0.35～0.50	
	Y5Cr21Mn9Ni4N（21-4NS）（试制）	0.48～0.58	≤0.35	8.00～10.0	0.040	0.04～0.09	3.25～4.5	20.0～22.0	-	0.35～0.50	
	5Cr21Mn9Ni2N（21-2N）（试制）	0.50～0.60	≤0.25	7.0～9.5	0.040	0.030	1.50～2.75	19.25～21.5	-	0.20～0.40	
	5Cr21Mn9Ni4Nb2WN（21-4N+W、Nb）（试制）	0.48～0.58	≤0.35	8.0～10.0	0.040	0.030	3.25～4.5	20.0～22.0	0.8～1.2	0.35～0.50	Nb 1.8～2.5
日本	SUH35（21-4N）	0.48～0.58	≤0.35	8.0～10.0	0.040	0.030	3.25～4.5	20.0～22.0	-	0.35～0.50	
	SUH36（21-4NS）	0.48～0.58	≤0.35	8.0～10.0	0.040	0.04～0.09	3.25～4.5	20.0～22.0	-	0.35～0.50	
美国	EV8（21-4N）	0.48～0.58	≤0.25	8.0～10.0	0.050	0.035	3.25～4.5	20.0～23.0	-	0.38～0.55	
	EV12（21-2N）	0.50～0.60	≤0.25	7.0～9.5	0.050	0.035	1.50～2.75	19.25～21.5	-	0.20～0.40	
	XEV-F（21-4Nb）	0.45～0.55	≤0.45	8.0～10.0	0.050	0.030	3.5～5.5	20.0～22.0	0.8～1.5	0.4～0.6	Nb+Ta 1.8～2.5

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

国别	牌 号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	N	其 它
德国	X53CrMnNiN219 (21-4N)	0.48~0.58	≤0.25	8.0~10.0	0.050	0.030	3.25~4.5	20.0~22.0	-	0.35~0.50	
	X55CrMnNiN208 (21-2N)	0.50~0.60	≤0.25	7.0~10.0	0.050	0.030	1.50~2.75	19.5~21.5	-	0.20~0.40	
	X50CrMnNiNbN219 (21-4N+W、Nb)	0.45~0.55	≤0.45	8.0~10.0	0.050	0.030	3.5~5.5	20.0~22.0	0.8~1.5	0.4~0.6	Nb+Ta 1.8~2.5
	X60CrMnMoVNbN2110 (21-4N+Mo、V、Nb)	0.57~0.65	≤0.25	9.5~11.5	0.050	0.025	≤1.5	20.0~22.0	-	0.4~0.6	V0.75~1.0 Mo0.75~1.25 Nb1.0~1.2

(2) 21-4N 钢的高温力学性能

德国 DIN17480-92 标准中提供了 21-2N、21-4N 和 21-4N+W+Nb 及 21-4N+Mo+V+Nb 钢的高温瞬时强度和 1000h 高温持久强度，其数据见表 1-1-137。

表 1-1-137 21-4N 系列气门钢的高温力学性能

钢 号	试验温度(℃)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	1000h 持久强度 (MPa)	钢 号	试验温度(℃)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	1000h 持久强度 (MPa)
X55CrMnNiN208 (21-2N)	500	640	300		X50CrMnNiNbN219 (21-4N+Nb)	500	680	350	
	550	590	280			550	650	330	
	600	540	250			600	610	310	
	650	490	230	160		650	550	285	220
	700	440	220			700	480	260	
	725			85		725			120
	750	360	200			750	410	240	
	800	290	170	45		800	340	220	55
X53CrMnNiN219 (21-4N)	500	650	350		X60CrMnMoVNbN2110 (21-4N+Mo、MV、Nb)	500	800	500	
	550	600	330			550	780	480	
	600	550	300			600	750	450	
	650	500	270	200		650	680	430	240
	700	450	250			700	600	400	
	725			110		725			120
	750	370	230			750	500	380	
	800	300	200	50		800	400	350	55

4) 镍基合金

对少数重负荷汽车发动机和特殊用途汽车如赛车的发动机，为了进一步提高高温强度和抗氧化腐蚀能力，可以选用镍基合金制造排气门，目前普遍应用的镍合金有美国的 InconelX750、Nimonic 80A、Pyromet31V 等，德国的 NiCr20TiAl。其化学成分列于表 1-1-138。美国的镍基合的高温性能见表 1-1-139。

5) 堆焊合金

为了提高阀面耐磨性能和耐腐蚀性能，有时在排气门的阀面堆焊合金。

Stellite（司太立）合金应用的最广泛，由于它有高的高温硬度、良好的耐腐蚀性能和耐磨性能。可防

止气门阀面产生冲击损坏、磨损和烧蚀。

表 1-1-138 美国、德国汽车排气门用镍基合金化学成分（%）

国别	牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	其它
美国	Inconel X750	≤0.08	≤0.50	≤1.0	-	≤0.010	14.0～17.0		≥70.0	Ti：2.0～2.75 Al：0.4～1.0 Cu：≤0.5 Fe：5.0～9.0
	HEV3 Inconel X751	0.03～0.10	≤0.50	≤0.5	≤0.015	≤0.015	14.0～17.0	≤0.50	余量	Ti：2.0～2.6 Al：1.1～1.3 Ta+Nb：0.7～1.2 Co：≤1.0 Fe：5.0～9.0
	HEV5 Nimonic 80A	≤0.10	≤1.0	≤1.0	≤0.045	≤0.030	18.0～21.0	-	余量	Ti：1.8～2.7 Al：1.0～1.8 Co：≤2.0 Fe：≤3.0
	HEV8 Pyromet 31V	0.03～0.06	≤0.20	≤0.20	≤0.015	≤0.015	22.3～22.9	1.70～2.3	55.0～58.0	Ti：2.1～2.4 Al：1.15～1.40 Nb：0.75～0.95 B：0.003～0.007 Cu：≤0.50 Co：≤1.0 Fe：痕迹
	XEV-H Waspaloy	0.03～0.06	≤0.75	≤1.0	≤0.030	≤0.030	18.0～21.0	3.5～5.0	余量	Ti：2.75～3.5 Al：1.2～1.6 Zr：0.02～0.12 B：0.003～0.010 Cu：≤0.50 Co：12～15 Fe：≤2.0
德国	NiFe25Cr20NbTi	≤0.10	≤1.0	≤1.0	≤0.030	≤0.015	18.0～21.0	-	余量	Al：0.3～1.0 Nb+Ta：1.0～2.0 Ti：1.0～2.0 Fe：23.0～28.0 B：≤0.008
	NiCr20TiAl	0.04～0.10	≤1.0	≤1.0	≤0.020	≤0.015	18.0～21.0	-	≥65.0	Al：1.0～1.8 Ti：1.8～2.7 Co：≤2.0 Cu：≤0.2 Fe：≤1.5

表 1-1-139 美国汽车排气门用镍基合金的力学性能

牌 号	试验温度 (℃)	σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ (%)	ψ (%)
HEV3	室温	1 120	630	—	30
Inconel X751	650	830	570		21
	760	550	450	10	22
HEV5	室温	1 070	620	39	38
Nimonic80A	650	790	550	—	17
	760	590	500	—	20
HEV8	室温	1 300	770	—	45
pyromet 31V	650	1 150	750	—	15
	760	850	730	—	23
HEV-H	室温	1 280	1 030	—	15
Waspaloy	650	1 000	860	-	12
	760				

美国常用的阀面堆焊合金的成分见表 1-1-140。

下面介绍几种合金的应用情况。

表 1-1-140 美国常用的阀面堆焊合金的化学成分

商业牌号	SAE 牌号	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co	W	Mo	Fe	其它
Stellite6	VF2	0.90~1.40	≤1.0	≤0.030	≤0.030	0.40~2.0	26.0~32.0	≤3.0	余	3.0~6.0	≤1.0	≤6.0	≤0.50
Eatonite	VF3	2.0~2.75	≤0.50	≤0.030	≤0.030	0.50~1.0	27.0~31.0	余	9.0~11.0	14.0~16.0	—	≤8.0	
X782	VF4	1.75~2.25	≤1.0	≤0.030	≤0.030	≤0.50	25.0~27.0	余	≤0.50	8.0~9.50	—	≤4.0	
StelliteF	VF5	1.50~2.0	≤1.0	≤0.030	≤0.030	0.80~1.50	23.0~27.0	20.5~23.5	余	10.5~13.5	≤1.0	≤6.0	
StelliteL	VF6	2.0~3.0	≤1.0	≤0.030	≤0.030	0.40~2.0	26.0~33.0	≤3.0	余	11.0~14.0	≤1.0	≤6.0	≤0.50
StelliteL2	VF7	1.20~1.70	≤1.0	≤0.030	≤0.030	0.40~2.0	26.0~33.0	≤3.0	余	7.0~9.50	≤1.0	≤6.0	≤0.50

①Stellite F

我国引进的桑塔纳轿车和斯太尔重型汽车气门阀面堆焊合金大多为 Stellite F，该合金应用广泛，它与其它司太立合金不同之处，在于成分中有 22.5%镍，用镍代替了部分昂贵的钴元素，由于镍代钴降低的热硬度，被较高的碳和钨所补偿，其性能相当于 Stellitel.2 合金。它与其它堆焊合金一样，可以被制成连续铸棒，用于氧乙炔焊，或被惰性气体雾化成粉末，用于等离子堆焊（PTA）。

汽车论坛 http://www.qclt.com

②Stellite 6

Stellite 6 也是被广泛应用的合金，因其有良好的高温性能，大多数用在柴油机气门阀面。

在司太立合金系列中，该合金的碳、钨含量最低，合金为亚共晶组织，在焊接凝固后形成网状碳化物，从而决定该合金性能

③StelliteL12

该合金在早期气门设计中应用，现在大多已被 StelliteF 合金所取代。该合金碳和钨含量中等，使其有良好的韧性和合适的硬度。

④StelliteL 1

该合金含碳量最高，达 2.8%，钴、铬和钨含量也较高，在焊接过程中，合金被熔化，形成大量的富铬碳化钨，这种过共晶形式的碳化物，使该合金具有所有堆焊合金中最高的硬度和耐磨性，但也使该合金最脆。它与 Stellite 6 和 Stellite 12 提供三种硬度和韧性范围，Stellite 6 硬度较低，韧性较好；Stellite 1 硬度最高，韧性较差；而 Stellite 12 介于中间。而 StelliteF 是替代 Stellite 12 合金。

Stellite 1 适合于剧烈磨损的应用场合，例如，天然气发动机中出现干的气门锥面，对于这些应用场合中的气门座圈也要堆焊 Stellite 1 合金。

⑤X-782

X-782 是一种镍基合金，镍、铬提供良好的耐腐蚀性能，铬和钨的碳化物提供良好的抗磨损性能。

东风汽车公司 6100 汽油机阀面堆焊该合金。（撰稿人：毛志强）

1.1.4.5 工具钢

1）工具的特性及对工具钢性能的要求

汽车零件加工，采用各种加工方式，使用不同的工具，它们应具备的特性差别较大。工具的种类及要求的主要性能列于表 1-1-141。切削工具包括钻头、丝锥、滚刀、拉刀及车刀等。剪切工具包括剪刀、落料模、修边模及冲头等。成型工具包括深拉延、翻边及胀形模具等。挤压工具包括冷拔、顶锻、压印及滚丝等。热锻包括锤锻模、机锻模、切边模及冲头等。压铸模包括塑料和各种金属件用的模型。冲击工具包括凿、风动工具等振动力较大的工具。量具包括精密测量用的各种界限量规、通用量具及量仪等。

表 1-1-141 工具应具备的特性

工具种类	主要特性	次要特性
切削	耐磨性、热稳定性	韧性、加工性能
剪切	耐磨性、韧性	不变形性、淬透性能
成形	耐磨性	韧性、加工性能
挤压	耐磨性	不变形性、淬透性能
热锻	耐磨性、热稳定性能	韧性、淬透性
压铸	热稳定性、耐磨性能	韧性、加工性能
冲击	韧性	耐磨性
量具	耐磨性、尺寸稳定性	加工性能

根据表 1-1-141 所列各类工具要求的主要性能，对工具钢提出如下要求：

表 1-1-141 所列的多种工具都要求耐磨性能，而钢的耐磨性主要取决于硬度，因此硬度是工具钢的最重要性能，它代表压应力状态下抗塑性变形能力。硬度提高引起强度提高，但是，超过某一定值后强度反而下降。硬度愈高，韧性愈低。淬火硬度值取决于钢的含碳量。

淬透性代表工具截面上的硬度分布，即淬硬层深度。它取决于钢的合金元素含量。

强度代表钢的断裂抗力，它随钢中碳和合金元素含量的增加而增加，但是，超过某一定值后强度降

汽车论坛 http://www.qclt.com

低，而硬度继续提高。此外，晶粒粗大、碳化物分布不均匀、会引起强度降低。

韧性是钢的重要性能 冲击韧性代表钢在动载荷下断裂抗力，它可以用一次冲断时所吸收的功表示，即冲击值 a_k。

热稳定性是钢在热状态下保持力学性能的能力。在常温下，热稳定性低的钢和热稳定性高的钢的硬度和耐磨性差别较小，但是，随着温度升高，超过200℃以后，后者的硬度和耐磨性比前者显著高。切削刀具，热锻模及压铸模，除硬度外，热稳定性是最重要的，钢的热稳定性取决于合金元素含量。

抗热疲劳性是钢在反复加热和冷却过程中对产生表面裂纹的抗力。热作模具承受反复加热和冷却，表面产生体积变化引起热应力，形成微裂纹。抗热疲劳性取决于这些微裂纹的扩展速度，韧性高的钢扩展缓慢，而脆性高的钢迅速扩展。

重要的工艺性能有加工性能（主要是磨削性，磨削效率和磨削裂纹倾向）、淬火变形及淬火裂纹形成倾向和脱碳倾向。此外，钒、钼、钨、钒、镍及铬价格高，影响钢的成本，其中钴最贵，依次递减。

2）工具钢分类及钢材牌号选择

一种牌号的钢材，它不可能所有性能都达到最佳值，往往是一种或几种性能改进，引起其它性能损失。选择时要根据工具类别，满足主要特性要求，使次要特性损失尽可能小。一种工具可以有几个选材方案，比较耐用度，加工性能和热处理费用，钢材价格，按照综合经济效果选定钢号，同时也选定热处理要求。

根据国标，工具钢共有55种牌号，列于表1-1-142。

常用钢号性能比较列于表1-1-143。

表1-1-142 国家标准工具钢牌号

标 准 号	钢材种类	钢 材 牌 号
GB1298—88	碳素工具钢	T7～T13及T8Mn（共8种）
		T7A～T13A及T8MnA[①]
GB1299—85	合金工具钢	
	量具刃具钢	9SiCr、8MnSi、Cr06、Cr2、W
	耐冲击钢	4CrW2Si、5CrW2Si、6CrW2Si
	冷作模具钢	Cr12、Cr12Mo1V1、Cr12MoV、Cr5Mo1V、9Mn2V、CrWMn、9CrWMn、Cr4W2MoV、6Cr4W3Mo2VNb、6W6Mo5Cr4V
	热作模具钢	5CrMnMo、5CrNiMo、3Cr2W8V、5Cr4Mo3SiMnVAl、3Cr3Mo3W2V、5Cr4W5Mo2V、8Cr3、4CrMnSiMoV、4Cr3Mo3SiV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi
	无磁模具钢	7Mn15Cr2Al3V2WMo
	塑料模具钢	3Cr2Mo
GB9943-88	高速工具钢棒钢	W18Cr4V、W18CrVCo5、W18Cr4VCo8、W12Cr4V5Co5、W6Mo5Cr4V2、CW6Mo5Cr4V2、W6Mo5Cr4V3、CW6Mo5Cr4V3、W2Mo9Cr4V2、W6Mo5Cr4V2Co5、W7Mo4Cr4V2Co5、W2Mo9Cr4VCo8、W9Mo3Cr4V、V6Mo5Cr4V2Al
GB9942-88	高速工具钢大截面锻件	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W9Mo3Cr4V
GB9941—88	高速工具钢钢板	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W9Mo3Cr4V、W6Mo5Cr4V2Al（锯条）
GB3080—82	高速工具钢钢丝	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2

注：①带A的为高级优质钢，例如T10A，S不大于0.02%，P不大于0.03%。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-143 工具钢常用钢号性能比较

钢号	耐磨性	热稳定性[1]	韧性[2]	淬透性[3]	不变形性	淬火安全性	加工性能
碳素工具钢							
T8A	可	低	好	低	差	差	更好
T10A	可	低	好	低	差	差	更好
耐冲击钢							
4CrW2Si	较好	中	好	中	可	好	可
6CrW2Si	较好	中	好	中	可	好	可
量具刃具钢							
9SiCr	较好	低	可	中	好	好	好
Cr2	较好	低	差	中	好	好	好
冷作模具钢							
9Mn2V	较好	低	可	中	好	可	差
CrWMn	较好	低	可	中	好	可	可
Cr12MoV	更好	较高	差	更高	更好	更好	差
Cr5Mo1V	好	中	可	高	更好	更好	可
6Cr4W3Mo2VNb	好	较高	可	高	好	可	可
热作模具钢							
5CrNiMo	较好	中	好	更高	好	好	可
3Cr2W8V	好	较高	好	高	好	好	可
8Cr3	较好	中	可	中	可	好	可
4Cr5MoSiV1	好	较高	更好	高	好	好	可
高速工具钢							
W18Cr4V	好	高	差	高	好	好	可
W6Mo5Cr4V2	好	高	差	高	好	可	可

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢 号	耐磨性	热稳定性(1)	韧性(2)	淬透性(3)	不变形性	淬火安全性	加工性能
W9Mo3Cr4V	好	高	差	高	好	可	可
W6Mo5Cr4V2Co5	好	更高	差	高	好	可	可
W6Mo5Cr4V2Al	更好	更高	更差	高	好	差	差
W2Mo9Cr4VCo8	更好	更高	更差	高	好	差	可

注：①热稳定性：低——200℃以下回火，保持60HRC；中——400～450℃回火，保持45HRC，屈服强度1 000MPa；较高——590～630℃回火，保持45HRC；高——620℃×4h回火，保持60HRC；更高——630～650℃×4h回火，保持60HRC。

②韧性：差——冲击值α_k（带缺口）低于15J/cm²，可——α_k=15～30J/cm²，好——α_k=30～50J/cm²，更好——α_k=50～70J/cm²。

③淬透性：低——直径大于30mm时，硬化层深度1～1.5mm（水淬）；中——可淬透直径（油淬）φ25～φ70mm；较高——φ70～φ125可淬透；更高——φ300～φ400可淬透。

碳素工具钢由于心部硬度低，故韧性较好，便于加工，价格便宜，适宜做形状简单、负荷轻、在常温下工作的小型模具、量具、凿及手工工具等。

合金工具钢共有33种钢号。9SiCr适用于低速刀具，木工刀具及切削刀具的刀体。Cr2适用于量具，生产中常采用GCr15（高碳铬轴承钢），两者碳铬含量等同，而GCr15非金属夹杂物为检验项目，有助于降低表面粗糙度。为了提高尺寸稳定性，它应作冷处理。Cr12MoV是典型的冷冲模钢，适用于重载荷复杂形状冲模、滚丝模及木工刀具。Cr12MoV有两种典型的热处理工艺：980～1 020℃淬火，200～240℃回火（1～2次），硬度为59～64HRC，称为一次硬化，强度和韧性较高，淬火变形小；1 080～1 100℃淬火，500～520℃回火（2次），硬度为58～62HRC，称为二次硬化，耐磨性较高，而强度和韧性有所下降。CrWMn、9Mn2V适用于中等负荷冷冲模，但是，9Mn2V残余奥氏体多，容易磨裂。5CrNiMo为典型的锤锻模钢。4Cr5MoSiV1（H13）有更好的韧性，耐磨性和抗热疲劳性，用于机锻模，比5CrNiMo提高寿命70%，它亦适用于压铸模，但是，它的加工性能较差。

高速工具钢棒钢共有14种牌号，其中通用型钢3种，即W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2和W9Mo3Cr4V。W18Cr4V的使用已经有100年历史，用量已减少到约占5%，它的缺点是共晶碳化物粗大，并成鱼骨状，不容易破碎，引起强度和韧性降低，但是，它的磨削性和热处理安全性较好。W6Mo5Cr4V2的强度和韧性较好，但是，磨削性差。W6Mo5Cr4V2Co5（M35）含碳量近似于通用型钢，力学性能亦近似，由于加入钴，使热稳定性提高，称为高性能高速钢，但是，价格也升高了。上述4种钢号热处理后的硬度以65HRC左右为佳，对于小直径刀具，可选择62～64HRC，因为它们常在未磨损之前，因碎裂而失效，应该采用较低的淬火温度，得到细晶粒组织和较低的硬度，保持较高的强度和韧性。

W2Mo9Cr4VCo8（M42）是知名的超硬高速钢，淬火硬度可达67～69HRC，它的热稳定性和耐磨性高，磨削性较好，但是，韧性下降，并且价格贵。W6Mo5Cr4V2Al是中国研制的超硬高速钢，适用于圆孔拉刀、扩孔钻和立铣刀，相对价廉，但是，韧性差，磨削性差，容易磨裂，淬火时容易产生混晶。

通用高速钢切削速度可达40m/min，超硬高速钢可达50～60m/min（均带冷却液）。

高速钢适用于各种切削刀具，也适用于冷挤模、冷镦模和冲头。

此外，工具生产中亦采用不锈钢8Cr17和11Cr17作刀具和量具，采用65Mn、45、40Cr、42CrMo作刀体，采用渗碳结构钢20、20Cr及渗氮钢38CrMoAl作量具、刀体等，并且采用铝合金作量具（无磁性）。

3）工具的耐用度和提高耐用度的方法

耐用度是衡量工具质量的主要指标，它不完全取决于工具钢，其影响因素包括：①工具设计，对称、

汽车论坛 http://www.qclt.com

均衡及圆弧过渡；②工具钢性能，化学成分、冶炼条件；③热处理；④机加工、表面粗糙度、缺口、磨削烧伤、应力及裂纹；⑤表面改性处理、表面硬度、应力状态及摩擦系数；⑥工具的工作条件，切削规范、冷却及机床刚性；⑦被加工材料及其热处理

好的设计的基本原则，就是要减少应力和应力集中，引起破坏的力有两种：①机加工和热处理产生的内应力；②服役条件下所受外力。有时，热处理产生的内应力超过了钢的强度极限，工具在淬火时产生了裂纹。如果内应力值已达到了强度极限的大部分，甚至90%，在相当轻的负载条件下，工具就会失效，淬火冷却不均匀是产生内应力的最显著原因，而冷却不均匀大体上是工件形状尺寸的函数，换句话说，也就是设计的函数。截面突然变化，存在尖角，会引起应力集中现象。这种设计弊端，不仅影响到淬火内应力产生裂纹，而且影响到热处理后磨削产生裂纹，服役时引起负载应力集中导致产生裂纹，使工具失效。当然，对热处理来说，应尽量做到均匀加热冷却。如果采用油淬钢或气淬钢，对设计要求可以宽松一些。这些原则图解如图1-1-40所示。

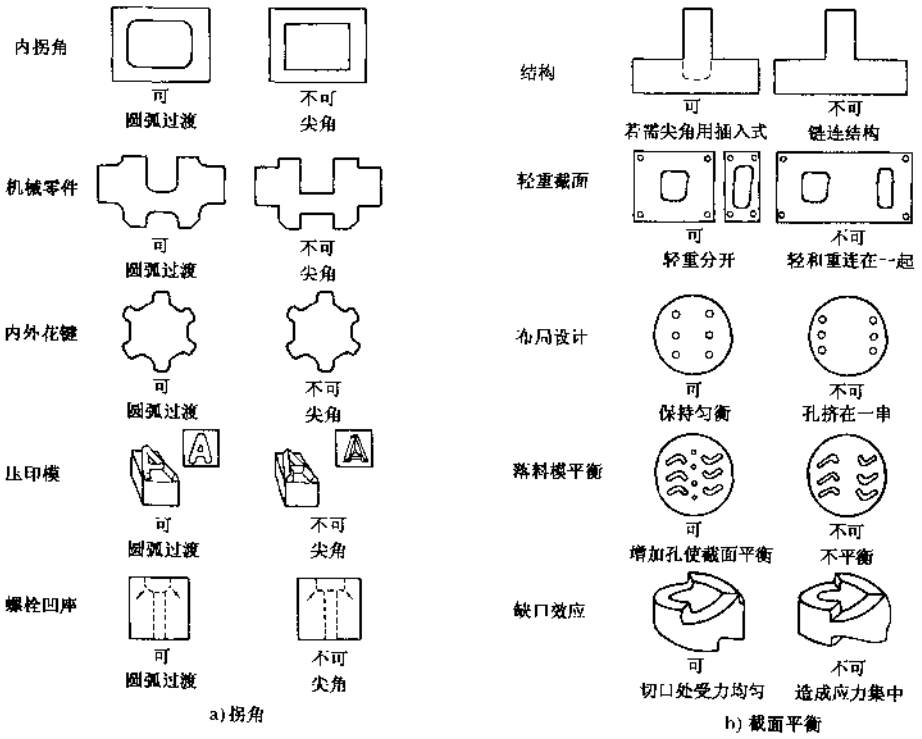


图1-1-40 工模具设计提示

真空熔炼法可以降低钢中气体和非金属夹杂物含量，提高韧性和疲劳强度，主要适用于动载荷形状复杂的热成型模具钢。

电渣重熔法可使钢中硫含量降低，有利于碳化物均匀分布，疏松、孔隙减小，可以提高在高硬度下（60～67HRC）的韧性和强度（5%～10%），适用于高速钢和大尺寸模具钢。某汽车厂采用电渣重溶3Cr2W8V做铜合金压铸模，寿命提高1倍以上。

粉末高速钢可以得到最佳碳化物颗粒和均匀分布。熔化钢水在氮气保护下雾化，形成100～600μm球状粉末，大多数是150～200μm。将粉末装入容器中，并在冷状态下施加400MPa压力，然后，将容器抽真空，并缓慢加热至1 150～1 180℃，在140～150MPa压力下，使粉末毛坯压实到所要求尺寸。钢中碳化物颗粒极小，约2～3μm，而常规冶炼或电渣重熔的高速钢，碳化物颗粒为8～20μm。它的强度增加30%～40%，韧性增加80%～90%，耐磨性提高20%～30%，磨削效率提高2～3倍，表面粗糙度降低2级。

汽车论坛 http://www.qclt.com

用这种方法生产的高速钢，称为ASP钢．如钢号ASP23、ASP30、ASP60。最近，生产方法改进，采用电渣加热法（ESH），使杂质含量降低至90%，得到极为纯净的钢，韧性约提高20%，刀具刃口上微观缺口减小，因此，刀具寿命延长，分散性缩小，即可靠性增加。钢号改名为ASP2023、ASP2030、ASP2060．它们的化学成分列于表1-1-144。冶金过程示意图如图1-1-41所示。粉末冶金W6Mo5Cr4V2、φ120钢心部金相组织如图1-1-42所示，粉末冶金钢的密度稍低于铸态钢，颗粒的中心部分可能形成微孔，此外，价格较贵．发达国家φ120滚刀毛坯及φ240剃齿刀毛坯，是用粉末高速钢棒锯切而成，它预示着高速钢发展方向

表1-1-144 粉末高速钢化学成分（%）

钢材牌号	C	Cr	Mo	W	V	Co
ASP2023	1.28	4.2	5.0	6.4	3.1	
ASP2030	1.28	4.2	5.0	6.4	3.1	8.5
ASP2060	2.30	4.2	7.0	6.5	6.5	10.5

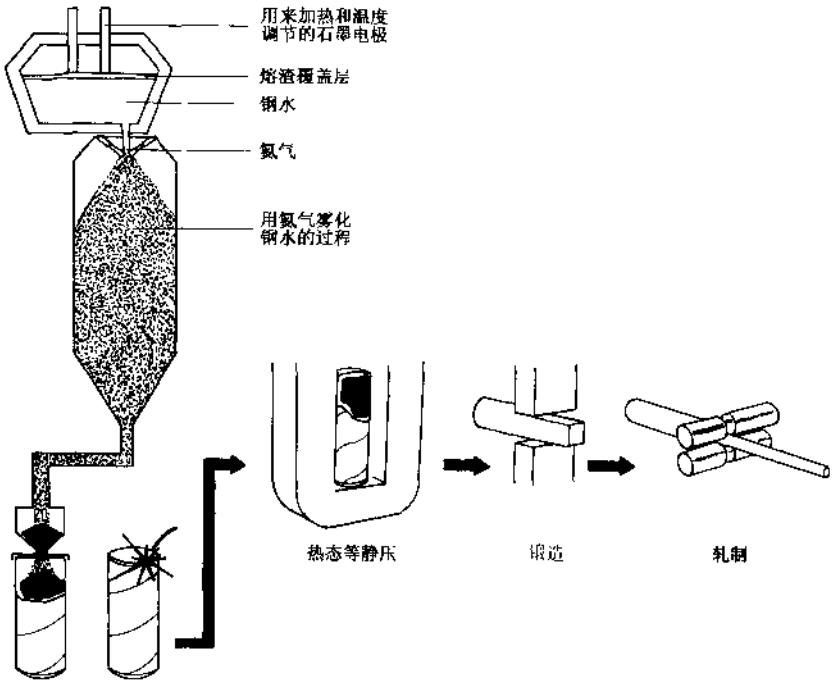


图1-1-41 粉末高速钢冶炼过程示意图

真空热处理，由于真空的保护，避免了表面脱碳、氧化，提高强度和韧性，可实现均匀加热和冷却，因此，可以提高工具耐用度。我国自制真空淬火炉（0.2MPa气淬），在80年代已成功应用于Cr12MoV滚丝模、搓丝板。90年代，我国自制真空高压气淬炉（0.5MPa）已成功应用于高速钢麻花钻、滚刀、剃齿刀、大型锯片铣刀和3Cr2W8V钢大型压铸模。真空热处理对环境无污染。它正在逐步取代盐浴炉，标志工具热处理发展前景。

镀硬铬，铬层厚度0.02～0.05mm，硬度900～1 000HV（65～68HRC），适用于量具、模具和刀具导向部。

氮碳共渗，层深0.02～0.08mm，硬度900～950HV，表层为压应力状态。对于麻花钻，层深应为0.01～0.02mm，可以提高耐用度30%以上。对于丝锥，层深应为0.01～0.015mm，轻微的磨削烧伤可以得到修补，提高耐用度1倍以上。对于压铸模，应采用较深的渗层深度。此外，提高工艺过程控制精度，

汽车论坛 http://www.qclt.com

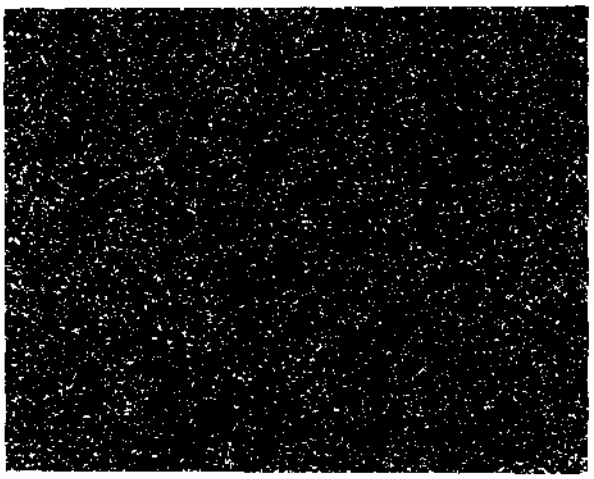


图 1-1-42 W6Mo5Cr4V2 粉末钢碳化物，100X（φ120 棒，心部）

可望提高可靠性。

碳钢渗硼后表面硬度为 1 800～2 000HV，合金钢渗硼层硬度更高，碳钢渗硼深度一般为 0.4～0.8mm，随碳和合金元素含量增加而降低，3CrW8V，Cr12MoV 的渗硼层深度为 0.04～0.06mm。渗硼效果最好的是动载荷小、磨损严重的工具。某汽车厂压铸浇口模渗硼，提高寿命 1 倍以上。

气相沉积，是在真空状态下工件表面沉积产生 TiN、TiC、Al_2O_3、DLC（类金刚石）、CBN（立方氮化硼）等的薄膜，又称为涂层，它分为化学气相沉积（CVD）和物理气相沉积（PVD）两类。PVD 又称为离子镀。PVD、TiN 膜的特性：金黄色，厚度 2～5μm，硬度＞1 900HV，滑动摩擦系数 0.2～0.3。PVD、TiN 高速钢齿轮滚刀切削速度可达 86m/min，耐用度可提高两倍以上；花键滚刀寿命达到 3 240 件（5 707.4m），未涂层者为 840 件（1 478.4m）；麻花钻耐用度试验结果如图 1-1-43。PVD、TiN 亦适用于冷作模具，可使火花塞、紧固件冲头寿命提高 3 倍以上。PVD、TiN 已在汽车工业广泛应用，某汽车公司全部切齿刀具和部分丝锥、磨制钻采用它，经济效果显著。（撰稿人：陈湘一）

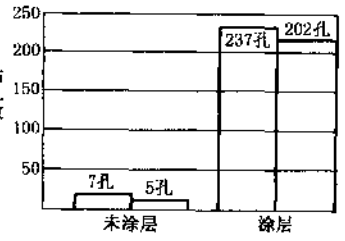


图 1-1-43 涂层钻头切削试验

1.1.5 粉末冶金用粉

粉末冶金是制造金属粉末和利用金属粉末制造金属材料与异形制品的工艺和技术。其原料有各种金属粉末和非金属粉末，其中，铁粉是粉末冶金生产中所用原材料最多的粉末，其次是铜粉，锡粉、铝粉等。

1.1.5.1 铁粉的种类和制造方法

各种工业方法生产的铁粉有还原铁粉、雾化铁粉、羰基铁粉、电解铁粉以及用流化床还原生产的铁粉。国际上雾化铁粉在销售的铁粉中所占的比例最大，其次是氧化物还原铁粉；我国情况正好相反，氧化物还原铁粉销售比例比雾化铁粉大。其原因除了结构件的比例相差较大以外，还有两种铁粉的价差正好相反。

1）用铁氧化物还原生产铁粉

用还原铁氧化物生产铁粉，特别是用碳还原铁矿石，是生产铁粉最古老的方法。它是在低于铁熔点的温度下，将矿石直接还原成金属铁，再经破碎、筛分、退火等方法制成金属粉末。20 世纪初，瑞典 Höganäs 最早研制成此法并投入工业化生产，其工艺流程如图 1-1-44 所示。

我国主要是还原轧钢铁鳞而制取还原铁粉。还原剂有固体碳还原剂（如无烟煤、焦炭屑、木炭、炭黑

汽车论坛 http://www.qclt.com

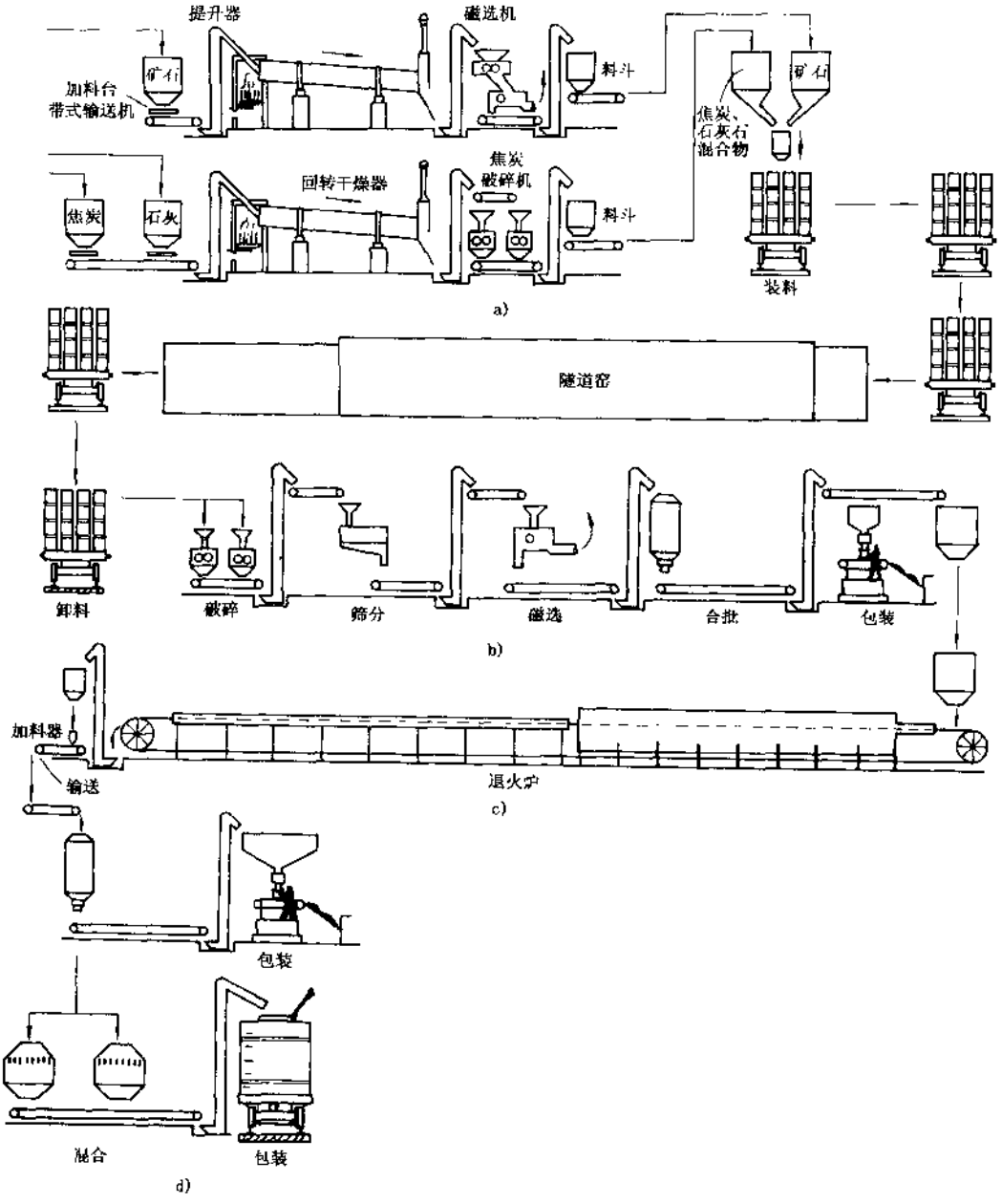


图 1-1-44 Höganas 工艺流程图

a）铁矿、焦炭—石灰石混合料的制备和装入陶瓷管中；b）在隧道窑中将研磨的铁矿还原成海绵铁；c）海绵铁的退火炉；d）退火海绵铁粉的包装和混合

等）和气体还原剂（如氢、一氧化碳、工业煤气及转化天然气等）。用固体碳还原法是当前生产铁粉的主要方法。图 1-1-45 是用固体碳还原法制取铁粉的典型工艺流程。整个流程大致可分为还原前原材料准备、还原、海绵铁粉碎、二次精还原、粒度分级合批等主要工序。

原料铁鳞必须符合 Fe≥72%，Si≤0.2%，Mn≤0.4%，S≤0.05%，P≤0.05%的技术条件

汽车论坛 http://www.qclt.com

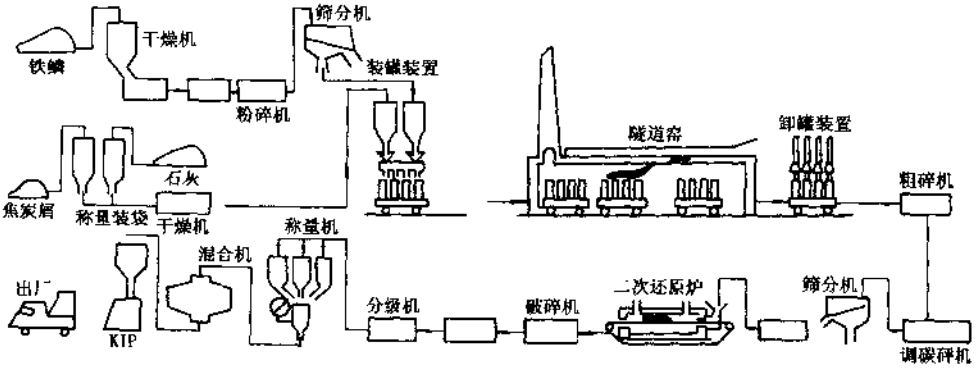


图 1-1-45 用焦炭屑还原铁磷生产铁粉

固体还原剂必须烘干，木炭的粒度最好不大于 8mm；焦炭屑的粒度不大于 5mm。在使用焦炭屑或无烟煤粉作还原剂时，由于含硫量较高，还须加入 10%的干石灰（CaO）作脱硫剂。

将处理后的铁鳞与还原剂按一定比例装入耐火罐中，环状法装料传热效果好，可提高还原速度，装罐、出罐操作方便，也易于机械化和自动化。

用固体碳还原氧化铁的窑炉常用的有反射窑、管式炉、隧道窑等。我国的铁粉绝大部分是用隧道窑生产，还原温度根据还原剂类型和炉身结构而不同，一般为 1 060～1 200℃。

还原出的海绵铁经清理、粉碎（粗碎和细碎）、磁选后进行二次精还原。在炉子进料端通入混的分解氨气（含水量 6%），使铁粉在前半部进行脱碳；出料端通入干的分解氨气（含水量＜4%），使铁粉在后半部进行脱氧。二次精还原温度一般为 800～950℃为宜。

用固体碳还原法制造铁粉与其它方法相比具有如下特点：

①所用原料（氧化铁鳞，磁铁矿精矿粉、铁矿粉、黄铁矿等）资源丰富，价格便宜；

②还原剂（焦炭屑、木炭、无烟煤粉等）价廉易得；

③可根据不同产量进行连续或间歇生产；

④与其它方法相比，固体碳还原法生产的铁粉成本较低，生产效率高；

⑤隧道窑操作方便，需用劳动力少，并可实现机械化生产；

⑥可较稳定地生产优质铁粉。

2）水雾化生产铁粉

雾化法生产铁粉的方法很多，目前国内外普遍采用的有气体雾化法和水雾化法，其中以水雾化法较为多见。图 1-1-46 是水雾化法生产铁粉的设备工艺流程图。

水雾化制取铁粉一般采用感应电炉，也有使用电弧炉熔化低碳废钢。喷嘴是制取优质粉末的关键部件，以前使用环孔形喷嘴，现在发展到使用板状流 V 型喷嘴和 V 型帘式喷嘴。为了得到不规则形状的粉末，一般采用高水压（大于 7MPa），较小的喷射顶角（一般在 45°）进行雾化。水雾化制得的铁粉表面含氧量可达 1%左右。为了降低其含氧量，雾化粉末尚需在还原性气氛（分解氨，或氢气）中进行还原。若在露点为－40℃的氢中还原后，其含氧量可降到 0.15%左右，含碳量为 0.01%～0.05%。还原温度在 1 000℃左右。被还原的雾化粉有少量烧结，故必须进行粉碎、过筛及合批自混。

水雾化生产铁粉的特点：

①采用高压水作雾化介质，水的粘度与密度都比气体介质大，所以破碎能力大；

②水雾化工艺制得的粉末，其颗粒为不规则状，成形性较好；

③水雾化法由于冷却凝固速度很快，因此，粉末颗粒的晶粒细小，碳化物及合金元素的偏析很小，成分均匀；

④水雾化粉末的含氧量较高，一般为 0.5%－1.0%。为了降低粉末的含氧量，应在保护气氛中进行

汽车论坛 http://www.qclt.com

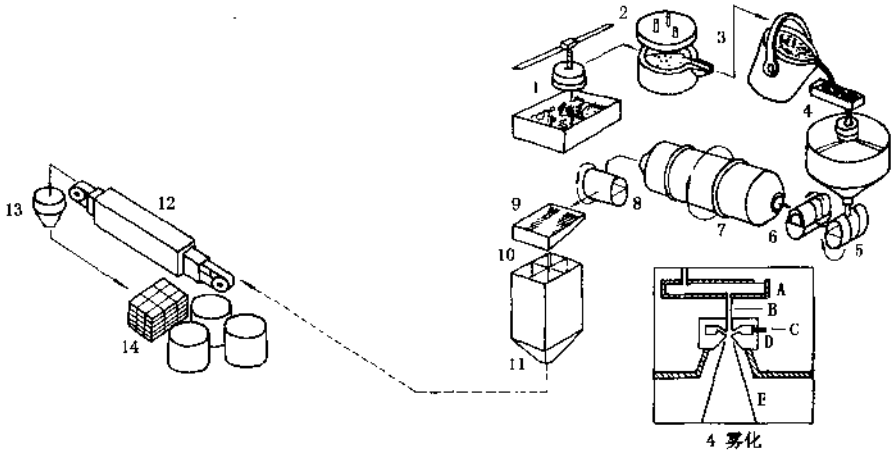


图 1-1-46 用低碳铁水雾化生产铁粉

1-选择的废铁；2-电弧炉；3-钢液；4-雾化；A-漏包；B-钢水流；C-高压水；D-喷嘴；E-雾化铁粉；5-湿磁选；6-脱水；7-回转干燥器；8-干磁选；9-筛选；10-混均匀；11-退火与自动包装；12-在带式炉中于 800～900℃下退火；13-混均匀；14-自动包装

还原处理；

③水雾化投资少，生产成本较低。

3）合金钢粉

合金钢粉可分成完全合金化粉、部分合金化粉、预合金粉和中间合金粉。完全合金化粉是指每一粉末颗粒具有与整体粉末相同而均匀的化学成分的合金粉末，它同预合金粉一样，通常是将熔体雾化制成的合金粉。部分合金化粉是指粉末颗粒成分尚未达到完全合金化状态的合金粉末，它是在纯铁粉中混入微粒状的预合金粉，通过热处理使预合金粉在纯铁粉表面部分地扩散使之合金化而生产出来的。中间合金粉是指含有一种或多种浓度较高的元素的合金粉末，这些元素难于以纯金属状态加入，将这种中间合金粉末与其它粉末混合烧结后达到所要求的最终成分。

4）电解法生产铁粉

电解法制造金属粉末，可分别采用如下两种方法：一是在不锈钢阴极上直接形成松散粘附的粉末沉积物；二是在阴极上沉积出精炼金属的平滑的致密层，随之将之进行研磨，以制造粉末。

电解铁粉多用于制造磁芯和粉末冶金磁体。近年来，扩大应用于作干式上色剂，普通纸复印机中的显色介质载体和用作食品的富铁添加剂。

1.1.5.2 铁粉的性能

金属或合金粉末具有自己独有的性能，严格说来，包括单颗粒的性能与团粒的性能。单颗粒的性能与粉末材料和粉末的生产方法有关。由粉末材料所决定的单颗粒性能有晶体结构、理论密度、熔点、塑性、弹性、纯度及夹杂物等。由粉末生产方法所决定的单颗粒性能有颗粒大小、颗粒形状、密度、孔隙度、表面状态、显微结构、点阵缺陷、颗粒内气体含量、吸附气体量、表面氧化膜的厚度、粉末的活性等。

粉末性能从使用角度出发可分为：化学性能、物理性能和工艺性能。工艺性能是一种综合性能，与化学性能、物理性能有关。

化学性能主要指化学成分，铁粉的化学成分包括 Fe、杂质、夹杂物和以化合状态、吸附状态或溶解状态存在的气体含量。

物理性能包括颗粒的形状与大小，平均颗粒大小、粒度分布、颗粒的密度和表面、比表面、显微结构、活性等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

工艺性能指松装密度、振实密度、流动性、压缩性和成形性。

表 1-1-145 和表 1-1-146 分别为我国主要铁粉生产单位的还原铁粉和雾化铁粉主要性能指标。

1）化学成分

铁粉的化学成分主要取决于所用原料的化学成分与制造方法。羰基铁粉、用氢还原纯氧化铁制造的铁粉、电解铁粉纯度都较高。雾化铁粉的杂质大部分来源于原料、炉衬材料、漏包材料、铁水包的材料及雾化过程中铁粉颗粒表面的氧化。硅是铁粉中要特别引起注意的杂质，对于用铁鳞或铁矿还原法制造铁粉尤须重视。铁粉中的硅有两种存在方式，一种是熔解在铁中的硅，另一种是以 SiO_2 状态存在。

铁粉中的 O_2、Mn、S、P、C、SiO_2 影响压制性和烧结性，一般均视为杂质加以严格控制。

矿石或铁鳞中有时含有 Cu、Ni、W、Mo 等合金元素，它们与氧的亲合力比铁小，可被还原而进入铁粉中。这些合金元素一般是微量的，对铁粉的性能无明显影响。

2）物理性能

铁粉的物理性能包括很多，下面仅就与粉末冶金成形和烧结关系较密切的颗粒形状、粒度和粒度组成等性能进行介绍。

铁粉的颗粒形状是决定铁粉工艺性能（松装密度、流动性等）的主要因素。表面光滑的粉末颗粒，其流动性好，对提高压坯的密度有利。在相同的压力下，球形粉末所获得的压坯密度高，多角形粉末次之，树枝状和针状粉末较差。形状复杂的粉末，其流动性不如球形粉末好，但对提高制品的压坯强度有利。粉末形状不同，对烧结的影响也不同，形状复杂、表面粗糙的粉末能促进烧结。

粉末粒度是指颗粒大小。从定性方面来说，细粉比粗粉好，因为细粉颗粒的接触面大，烧结件的性能好，但是，粉末越细烧结收缩越大。细铁粉制品在 600℃ 时开始收缩，而粗铁粉要在 1 200℃ 以后才开始急剧收缩。实际生产中，粗细粉末应搭配使用。

3）工艺性能

粉末的工艺性能包括：松装密度、摇实密度、流动性、压缩性与粉末的成形性。

粉末的松装密度对粉末的压制成形、烧结过程及产品的性能都有重要的影响。

粉末的流动性对实现自动压制很重要，如果铁粉的流动性很差，对压制复杂形状机械零件时带来困难。

粉末的压缩性是指粉末在压制过程中的压缩能力。粉末的塑性好则压缩性好。松装密度高则压缩性好。压缩性好的粉末易于得到密度高的制品。

粉末的成形性是指粉末压制后，压坯保持既定形状的能力。成形性好的粉末，压坯强度高，表面无裂纹。

4）各类铁粉（钢粉）比较

还原铁粉的颗粒形状为多角不规则形，表面较粗糙，粉末的松装密度较低，压缩成形时，相邻颗粒之间联结面积大，压坯强度高。所以还原铁粉成形性好，适合于中密度和复杂形状的制件成形。在还原铁粉中，铁鳞还原铁粉比矿石还原铁粉纯度高，且压缩性和烧结性好。

雾化铁粉颗粒形状更接近于球形，表面较光滑，粉末的松装密度较高，压缩性好，但成形性较差，适合于中高密度或形状简单的零件成形。

合金钢粉中有完全合金化钢粉和部分合金化钢粉两种。前者每个粉末颗粒的硬度比铁粉高，压缩性和成形性差；后者由于每个铁粉颗粒基本上保持原有硬度，其压制性虽略次于铁粉，但比完全合金化钢粉要好多了，适于压制中高密度的压坯。

为了用合金钢粉生产高强度零件，新型烧结用原料粉不断出现。如：4Ni-14Cu-0.5Mo 系钢粉，ZNi-1Mo 系部分合金化钢粉。使用这种钢粉制造的烧结体，经过处理后抗拉强度最高可达 2 000MPa，硬度达 HRC50，冲击值达 60J 的超高强度材料。

为了防止在混料和压制过程中的石墨粉产生偏析，又新开发了一种防偏析处理铁粉。它是在铁粉或合金钢粉中添加粘结剂，使石墨附着在粒子上的新型预混合粉，改善了混合料的压制性和烧结性，提高烧结件性能的均匀性。（撰稿人：周喜生）

汽车论坛 http://www.qclt.com

1-1-145 还原铁粉性能

品种	牌号	级别	化学成分（%）									工艺性能			粒度组成（目）%							
			Fe ≥	Mn	Si	C	S	P	H损	盐酸不溶物	Mo	松装密度 (g/cm³)	滚动性 (s/50g) ≤	压缩性 (g/cm²) ≥	-40 (>425μm)	-40+60 (250~425μm)	-80+100 (150~100μm)	100+150 (106~150μm)	-150+200 (75~106μm)	-200 (<75μm)	-200+500 (63~75μm)	-250+320 (45~63μm)	-320 (<45μm)
				≥																			
	WHF80·240		98.50	0.35	0.10	0.05	0.025	0.025	0.5	0.20	—	2.4±0.1	40	6.40	—	—	—	余量					<20
		二	98.00	0.40	0.15	0.07	0.030	0.030	0.5	0.20	—	2.40±0.1	40	6.35	—	—	—	余量					<20
	WHF100·255		98.50	0.35	0.10	0.04	0.025	0.025	0.4	0.20	—	2.55±0.1	36	6.45	—	—	—	<5	余量				<30
		二	98.00	0.40	0.15	0.07	0.03	0.030	0.5	0.20	—	2.55±0.1	36	6.35	—	—	—	<5	余量				<35
	WHF100·270		98.50	0.35	0.10	0.04	0.025	0.025	0.4	0.20	—	2.7±0.1	32	6.70	—	—	—	<2	余量				<30
	WHF100·290		98.50	0.35	0.10	0.04	0.020	0.020	0.4	0.20	—	2.90±0.1	32	6.40	—	—	—	<2	余量				<20
	GHo40Mo		98.00	0.35	0.10	0.05	0.030	0.030	0.5	0.20	0.38~0.48	2.65±0.1	32	6.40		—	<1	<15	余量				<20
	GHo54Mo		98.00	0.35	0.10	0.05	0.030	0.030	0.5	0.20	0.49~0.59	2.65±0.1	32	6.40	—		<1	<15	余量				<20
	BK25Cu		余	0.35	0.10	0.05	0.030	0.030	0.5	0.20	Cu2~3	2.30±0.1	40	6.40		—	<2		余量				<20
	BK90Cu		余	0.35	0.10	0.05	0.030	0.030	0.5	0.20	Cu8~10	2.50±0.1	40	6.40		—	<1		余量				<20
	BKNi-Mo-Cu		余	0.35	0.10	0.05	0.030	0.030	0.5	0.20	Ni1.5~1.7 Mo0.4~0.6 Cu1.7~2.0	2.6~2.90	36	6.70	—	—		<5	余量				<30
	WHD40·290		98.50	0.35	0.15	0.05	0.020	0.020	0.4	—	—	2.90±0.1	32	—	<1	5~20	余量			<20	-		-
	WHD40·370		98.00	0.35	0.15	0.05	0.020	0.020	0.4	—	—	3.70±0.1	30	—	<1	5~25	余量			<20	—		—
	WHD40·370		98.00	0.35	0.15	0.80~0.12	0.020	0.020	0.4	—	—	3.70±0.1	30		<1	5~25	余量			<20	—		-
	WHD100·250		98.00	0.35	0.15	0.05	0.020	0.030	0.5	—	—	2.50±0.1	35	—			<5	10~25	—	余量			<25
	WHZ150		98.00	—	0.15	0.05	0.030	0.030	0.7	0.25	—	2.50~3.25	—	—	—	—	—	—	<5	余	<10	—		
	WHZ150A		96.00	—	0.15	0.30	0.030	0.030		-	—	2.50~3.25	--	—	—	—	—	—	<5	余量				
	WHZ200		98.00	—	0.15	0.05	0.030	0.030	0.8	0.30	—	2.50~3.25	—	—	—	—	—	—	—	<5	余量			
	WHP		98.00	0.35	--	0.20	0.030	0.030	--	—	--	—	30	—	—	—	<10	—						
	WHG120		97.00	—	—	0.10	0.030	—	—	-	—	—	35	—	—	—	—	<2	余	量	<10			

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-1-146 水雾化铁粉、类别、牌号

类别	牌号	等级	F.Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
			%	%						
水雾化纯铁粉	FSY200.26	优等		0.020	0.05	0.15	0.015	0.015		
		一等		0.020	0.05	0.15	0.015	0.020		
		合格		0.025	0.10	0.20	0.020	0.025		
	FSY200.28	一等		0.020	0.05	0.15	0.015	0.020		
		合格		0.025	0.10	0.20	0.020	0.025		
	FSY200.30	优等		0.020	0.05	0.15	0.015	0.015		
		一等		0.020	0.05	0.15	0.015	0.020		
		合格		0.025	0.10	0.20	0.020	0.025		
	WN160.26			0.020	0.05	0.15	0.015	0.020		
	WN160.28			0.020	0.05	0.15	0.015	0.020		
	WN160.30			0.020	0.05	0.15	0.015	0.020		
水雾化预合金铁粉	FJSY200.28	一等		0.020	0.05	0.15	0.015	0.015	1.7~2.0	0.5~0.6
		合格		0.025	0.10	0.20	0.020	0.025	1.5~2.2	0.4~0.7
	FJSY200.30	一等		0.020	0.05	0.15	0.015	0.015	1.7~2.0	0.5~0.6
		合格		0.025	0.10	0.20	0.020	0.020	1.5~2.2	0.4~0.7
水雾化含易削剂铁粉	W200.26S			0.020	0.05	0.30~0.37	0.015	0.20~0.24		
	W200.28S			0.020	0.05	0.30~0.37	0.015	0.20~0.24		
	W200.30S			0.020	0.05	0.30~37	0.015	0.20~0.24		
水雾化电焊条涂料用铁粉	WW400.29			0.05	0.08	0.15	0.015	0.015		
	WW400.37			0.05	0.08	0.15	0.015	0.015		
	WW400.39			0.05	0.08	0.15	0.015	0.015		
	WW400.41			0.05	0.08	0.15	0.015	0.015		
	WW500.37			0.05	0.08	0.15	0.015	0.015		
水雾化铁粉	W90.28			0.020	0.08	0.15	0.015	0.020		
	W80.30			0.020	0.08	0.15	0.015	0.020		
	W50			0.020	0.08	0.15	0.015	0.020		

及主技术性能一览表 (%)

AIC	HL	松装密度 (g/cm³)	流动性 ≥ (s/50g)	压缩性 (g/cm³), ≥ 392MPa	588MPa	粒度组成 (μm) >200	200~160	160~63	<63
0.10	0.20	2.6±0.1	33	6.55	7.05	<1	<20	余量	15~55
0.15	0.25	2.6±0.1	33	6.50	7.00	<1	<20	余量	15~55
0.20	0.35	2.6±0.1	33	6.40	6.90	<3	余量		15~55
0.15	0.25	2.8±0.1	33	6.50	7.05	<1	<20	余量	15~55
0.20	0.35	2.8±0.1	33	6.40	7.00	<3	余量		15~55
0.10	0.20	3.0±0.1	28	6.60	7.05	<1	20	余量	15~55
0.15	0.25	3.0±0.1	28	6.55	7.00	<1	<20	余量	15~55
0.20	0.35	3.0±0.1	28	6.50	6.95	<3	余量		15~55
						<160	160~100	100~71	<71
0.08	0.25	2.55~2.70	33		7.00	≥1	20~40	20~40	35~50
0.08	0.25	2.70~2.85	33		7.00	≥1	20~40	20~40	35~50
0.08	0.25	2.85~3.05	30		7.02	≥1	20~40	20~40	35~50
0.20	0.20	2.80±0.1	30	6.30	6.80	<1	<20	余量	10~55
0.20	0.35	2.80±0.1	30	6.20	6.70	<3	余量		10~55
0.20	0.20	3.0±0.1	30	6.30	6.80	<1	<20	余量	10~55
0.20	0.35	3.0±0.1	30	6.20	6.70	<3	余量		10~55
0.10	0.25	2.55~2.70	33		6.80	<1	余量		30~50
0.10	0.25	2.70~2.85	33		6.80	<1	余量		30~50
0.10	0.25	2.85~3.05	30		6.80	<1	余量		30~50
						>400	400~160	160~63	<63
0.10	0.25	2.85~3.00	33			<3	>60	5~25	<5
0.10	0.25	3.65~3.75	25			<3	>70	5~15	<5
0.10	0.25	3.85~3.95	23			<3	>75	5~15	<5
0.10	0.25	4.05~4.15	22			<3	>80	5~10	<5
						>500	500~160	160~63	<63
0.10	0.25	3.65~3.75	25			<1	>70	5~15	<5
								>90	<90
0.15	0.40	2.65~2.95	35					<3	余量
								>80	<80
0.15	0.40	2.85~3.15	35					<3	余量
								>50	<50
0.20	0.40							<3	余量

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.2 铸 铁

铸铁是以铁、碳、硅为基础并含有锰、磷、硫等元素的多元合金，一般含碳量在2.0%～4.0%之间变动，含硅量在0.5%～3.5%之间变动。根据石墨形态的不同，铸铁可分为灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁。此外，为满足特殊用途的要求，在常规元素含量之外通过加入一定数量的合金元素或采用特殊的铸造工艺以获得某种特殊性能，这类铸铁另归入一类，称为特种铸铁。

1.2.1 灰铸铁

1.2.1.1 特点

灰铸铁是含片状石墨的铸铁，其断口呈灰色，因片状石墨具有自润滑性、吸振性和高的导热性，故在减摩、耐磨、消震及抗热冲击等方面有其独特优点；但由于片状石墨对金属基体的削弱作用和石墨尖端的应力集中效应，灰铸铁的力学性能较低。

灰铸铁的优势在于其优良的工艺性能，即有良好的铸造性能和切削性能，尤其是灰铸铁件的材料成本和工艺成本较低，质量容易稳定，是汽车零件特别是发动机零件重要的结构材料。随着汽车向轻量化发展，灰铸铁件在汽车中的应用呈下降趋势，但无论如何，灰铸铁在汽车材料中仍将长期占有重要的地位。

灰铸铁要应用得当，就必须充分考虑它的一系列性能特点，做到用其长而避其短，发挥材料潜力，达到节约金属、提高质量、利于加工的目的。应用中应予考虑的特点主要有：

①与铸钢、球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁相比，灰铸铁强度性能的一个显著特点是抗压强度与抗拉强度之比较高，此比值达到3～4。因此，灰铸铁特别适用于作机器底座等承受压应力的构件。对于受弯矩作用的灰铸铁构件，设计时应使铸件受压应力的截面较小而受拉应力的截面较大，使材料得到充分利用。

②相对于拉—压疲劳极限而言，灰铸铁具有较高的弯曲疲劳极限和特别高的扭转疲劳极限。灰铸铁的扭转疲劳极限在绝对数值上甚至十分接近钢，因此，灰铸铁可作为承受以扭转交变应力为主的零件。

③灰铸铁具有很小的缺口敏感性，例如，灰铸铁的抗弯疲劳强度几乎不受缺口的影响，其缺口作用系数（无缺口疲劳强度与缺口疲劳强度之比）约等于1，而铸钢的缺口作用系数约等于1.5。这说明铸钢的性能虽优于灰铸铁，但当有缺口存在时，它的性能就得不到充分发挥，这种倾向在强度越高的钢中表现越为明显。

④灰铸铁具有优良的减振性能，在高速运转的机器中采用灰铸铁构件能减小振动。因为机器的振动（特别是发生共振时）会影响精度和运转的稳定性和安全性，所以许多机器的支架、底座、壳体和运动零件常用灰铸铁制造。

⑤灰铸铁是一种脆性材料，塑韧性很差，冲击韧性指标相当低，故不推荐用于承受大能量冲击的场合。对于小能量多次反复冲击，灰铸铁具有相当高的抗力，且随着抗拉强度的提高，其经受重复冲击的抗力增加。

⑥灰铸铁的断面敏感性较大，且牌号越低，敏感性越大。因此，灰铸铁件过分增大截面厚度未必能有效提高其承载能力。

⑦灰铸铁具有激冷倾向（白口倾向），牌号越高，激冷倾向越大。在灰铸铁铸件设计中，材质牌号的选择和铸件形状、结构及壁厚的确定，都要考虑激冷特性，防止出现白口。

⑧灰铸铁的工作温度不超过400℃时力学性能基本稳定，但超过此温度以后，强度和硬度明显下降。非合金灰铸铁的最高工作温度为500℃，高于500℃时应考虑采用低合金灰铸铁。灰铸铁在低温下的力学性能是相当稳定的。用于室温工作的灰铸铁零件在低温条件下（－50℃）使用同样是合适的。

⑨灰铸铁由于含有自润滑性的片状石墨而使其在许多摩擦工况下具有广泛的适用性，这是许多摩擦副配对零件选用灰铸铁的重要原因，但赋予灰铸铁良好耐磨性的前提是保证其金相组织为：片状珠光体＋中

等尺寸A型石墨，严格限制D型石墨与铁素体。

⑩与其它黑色金属比较，灰铸铁具有较高的导热率与较低的弹性模量。灰铁铸件同其它黑色铸件比较，在同一外部温度条件下产生的热应力和热变形较小，因此，较高含碳量的灰铸铁具有良好的抗热冲击能力。

⑪钢、球铁、可锻铸铁及其它大多数工程合金在相当大的应力范围内都具有固定的弹性模量，而灰铸铁则没有固定的弹性模量，在很小的应力作用下就会发生塑性变形，也就是说，受载的灰铸铁零件卸载后产生残留变形是不可避免的；灰铸铁的牌号越低，残留变形越大。这表明，灰铸铁零件在服役中尺寸稳定性较差。但是，如果对零件多次反复加载、卸载，累积的总残留变形量虽增加，但每一次反复的残留变形量却逐次减小。利用这一特点，对尺寸稳定性要求特别高的零件可在精加工前通过一定次数的反复预加载来减小塑性变形。

⑫灰铸铁有优良的切削加工性能，这是它获得广泛应用的重要原因之一。但就灰铸铁而言，牌号越高，强度和硬度越高，切削性能也越差。在零件设计中，如果不存在摩擦、磨损问题，在满足强度要求的前提下，应尽可能选用较低硬度的牌号，以利于切削加工。

1.2.1.2 技术标准与性能指标

我国仅有通行于各行各业的一般灰铸铁件技术标准，即GB9439—88。国际上有代表性的专用于汽车行业的汽车灰铸铁技术标准是美国SAE J431，其主要内容列于表1-2-1及表1-2-2。

表1-2-1 汽车用的通用和专用灰铸铁(SAE J431)

SAE牌号	化学成分(%)					力学性能				基体组织
	C[①]	Si	Mn	P	S	硬度(HB)	弯曲载荷(N)	挠度(mm)	抗拉强度(MPa)	
G1800	3.40～3.70	2.80～2.30	0.50～0.80	≤0.15	≤0.15	≤187	≥7 644	≥3.6	≥118	铁素体—珠光体
G2500	3.20～3.50	2.40～2.00	0.60～0.90	≤0.12	≤0.15	170～229	≥8 918	≥4.3	≥173	铁素体—珠光体
G3000	3.10～3.40	2.30～1.90	0.60～0.90	≤0.10	≤0.15	187～241	≥9 800	≥5.1	≥207	珠光体
G3500	3.00～3.30	2.20～1.80	0.60～0.90	≤0.08	≤0.15	207～255	≥10 878	≥6.1	≥241	珠光体
G4000	3.00～3.30	2.10～1.80	0.70～1.00	≤0.07	≤0.15	217～269	≥11 564	≥6.9	≥276	珠光体
G2500a(专用)	≥3.40	1.60～2.10	0.60～0.90	≤0.12	≤0.12	170～229	≥8 918	≥4.3	≥173	A型石墨，2～4级；基体主要为片状珠光体，铁素体≤15%
G3500b(专用)	≥3.40	1.30～1.80	0.60～0.90	≤0.08	≤0.12	207～255	≥10 682	≥6.1	≥241	A型石墨，3～5级；基体为细片珠光体，碳化物、铁素体≤5%
G3500c(专用)	≥3.50	1.30～1.80	0.60～0.90	≤0.08	≤0.12	207～255	≥10 682	≥6.1	≥241	A型石墨，3～5级；基体为细片珠光体，碳化物、铁素体≤5%
G4000d(专用)	3.10～3.60	1.95～2.40	0.60～0.90	≤0.07	≤0.12	241～320	≥11 564	≥6.9	≥276	A型石墨，4～7级；基体为细片珠光体+碳化物

注：①用铸态 ϕ30.5试棒测定性能。

②如果碳量靠上限，则硅量应靠下限；如果碳量靠下限，则硅量应靠上限。

③G4000d牌号含0.85%～1.25%Cr，0.40%～0.60%Mo，0.20%～0.45%Ni；其它牌号的合金元素虽未列入，但根据需要可提出含量要求。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-2 SAE 牌号的灰铸铁在汽车上的应用

SAE 牌号	典 型 应 用
G1800	各种硬度较低的铸件(铸态的或退火的)，主要考虑容易切削加工，强度不作为主要条件
G2500	小型气缸体、气缸盖、风冷气缸、活塞、离合器片、油泵体、传动箱壳体、离合器壳体及轻负荷的制动鼓等
G2500a	中等负荷的制动鼓和离合器片，本牌号的含碳量较高，是为了提高抗热冲击性能以减少热疲劳裂纹
G3000	汽车和柴油发动机的气缸体、缸盖、飞轮、差动器托架、活塞、中等负荷的制动鼓和离合器片
G3500	柴油机缸体，载货汽车和拖拉机的缸体和缸盖，重型飞轮，拖拉机传动箱，重型齿轮箱
G3500b	重负荷的制动鼓和离合器片；这类零件既要求有高的抗热冲击能力，又要求有足够高的强度
G3500c	超重负荷的制动鼓
G4000	柴油机的各种铸件，如轴承盖、轴承座及气缸、活塞等承受高应力的零件
G4000d	凸轮轴

抗拉强度是灰铸铁最重要、最基本的力学性能指标，灰铸铁是按照抗拉强度来划分牌号等级的，在一般情况下，抗拉强度是灰铸铁件材质验收的基本依据。因抗拉强度的检查是破坏性的，不能普遍地应用于铸件本体的检查验收，而灰铸铁的抗拉强度与硬度存在着对应关系，故可通过检查铸件硬度来判断材质是否达到牌号要求，因此，硬度也是控制材质性能和质量的常规检查项目，硬度检查既可对材质强度进行评定，同时，硬度值也可作为评估耐磨性能和切削性能的参考指标。

根据 GB9439—88，灰铸铁的硬度（HB）和抗拉强度（σ_b）的经验关系式为：

当 $\sigma_b > 196MPa$ 时，$HB = RH\ (100 + 0.438\sigma_b)$。

当 $\sigma_b < 196MPa$ 时，$HB = RH\ (44 + 0.724\sigma_b)$。

式中 RH 称为相对硬度，其数值主要由冶金因素所决定，其变化范围通常为 0.80～1.20。

抗弯强度常常代替抗拉强度作为材质性能验收的依据。抗弯试验采用不加工的试棒，测试方便；同时，弯曲试验断裂前产生的挠度在一定程度上也能表示灰铸铁的韧性，这也是弯曲试验的优点。但是抗拉强度比抗弯强度更能代表材料整个断面的承载能力，并且，抗拉试棒经过机械加工，试验结果比较稳定，因而目前世界各国公认灰铸铁以抗拉强度为主要验收依据，而抗弯试验仅在特定条件下作为质量控制的补充手段。

由于硬度、抗弯强度和挠度等性能指标在灰铸铁的性能与质量控制中仍有相当重要的实际意义，所以，世界上一些国家的灰铸铁牌号标准在规定了抗拉强度的同时，也常常规定硬度与抗弯性能指标。

灰铸铁常用的性能数据列于表 1-2-3。

灰铸铁当其工作温度从 -50℃ 至不超过 300℃ 时，组织和性能相当稳定；但若工作温度≥350℃ 就开始发生蠕变，如果工作温度超过 400℃，强度性能就急剧下降。不同工作温度的灰铸铁零件的安全设计应力可参照表 1-2-4 及表 1-2-5 选取。

表 1-2-3 灰铸铁的常用性能数据

牌 号	抗拉强度 (MPa) ≥	抗弯强度 (MPa) ≥	挠度 (mm) ≥	抗压强度 (MPa) (近似值)	弯曲疲劳强度(无缺口) (MPa) ≥	扭转疲劳强度(无缺口) (MPa) ≥	硬度 HB	弹性模量 E (GPa)	线膨胀系数 (10^{-6}/K) 20℃	线膨胀系数 (10^{-6}/K) 20～400℃	导热系数 (W/m·K) 100℃	导热系数 (W/m·K) 400℃
HT100	100	300	3.5	420	-	-	149～201	85	10	12.5	—	—
HT150	150	345	4.0	570	62	62	163～212	100	10	12.5	65	47
HT200	200	390	5.0	700	80	80	170～233	113	10	12.5	57	45
HT250	250	430	5.5	875	98	98	179～241	125	10	12.5	50	43
HT300	300	475	5.5	960	114	114	187～262	135	10	12.5	47	41
HT350	350	515	5.5	1085	130	130	197～277	140	10	12.5	45	40

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-4 灰铸铁的安全设计应力(适用于工作温度 -50℃至 300℃)

安全设计应力 \ 牌号	HT150	HT200	HT250	HT300	HT350
抗拉应力(MPa)	38	50	63	75	88
抗压应力(MPa)	156	208	260	312	364
无缺口弯曲疲劳应力(MPa)	23	30	38	45	50

表 1-2-5 灰铸铁在高温条件下的安全设计抗拉应力

牌号	安全设计的抗拉应力(MPa)		
	350℃	400℃	450℃
HT200	50	28	16
HT250	52	30	17
HT300	54	32	18

1.2.1.3 化学成分

灰铸铁的化学成分在一定程度上决定了材质的力学性能，而且对铸造性能也有大的影响。汽车灰铸铁件大多数情况下只规定牌号，有时根据使用要求补充规定了铸件本体强度、硬度及金相组织的要求，而化学成分一般不作规定。有时，产品技术条件也提出一个比较宽的化学成分范围，这时，铸造厂要按照要求的化学成分范围，结合生产工艺条件确定一个用于工艺控制的比较窄的化学成分范围，以保证铸件性能上有较小的偏差。对某些特种铸件或重要铸件，技术条件常常对那些对性能与质量有着重要影响的化学成分作出明确的、有约束力的规定。

确定灰铸铁件的化学成分必须遵循如下原则：

①灰铸铁的化学成分是与牌号相对应的，而牌号等级是根据 $\phi30$ 的砂型铸造试棒的抗拉强度指标来划分的，牌号等级所代表的是试棒的强度指标，不是铸件本体的强度指标，不论什么样的铸件，只要采用了相同的牌号，就可以采用相同的化学成分；而对于不同厚度、尺寸和形状的铸件来说，由于铸造时的冷却速度不同，即便化学成分相同，其铸件本体的强度和硬度的差别会是相当大的。所以，设计师在确定灰铸铁件的材质牌号时，一定要考虑铸件几何形状对强度和硬度的影响。例如，薄壁铸件若选用过高的牌号，就可能由于铸造时冷却过快而形成白口；而厚壁铸件若选用过低的牌号则可能因铸造时冷却缓慢而引起石墨粗大，造成强度不足。也就是说，低牌号的薄壁铸件仍可得到较高的本体强度，而厚大的铸件只有采用较高的牌号才能得到较高的本体强度。

②灰铸铁的牌号基本上是由共晶度 $\left(\text{共晶度 } S_c=\dfrac{C}{4.3-\frac{1}{3}(Si+P)}\right)$ 所决定的。共晶度的高低受碳的影响最大，而硅、磷的影响相对较小。所以，确定灰铸铁的化学成分首先是确定适宜的含碳量。碳对抗拉强度的影响极为敏感。在生产中应尽可能严格地控制其变动范围。灰铸铁中碳量变动 ±0.1%，抗拉强度的波动范围大约为 ± (7% ~10%)；碳对切削性能和缩孔、缩松倾向的影响也是比较敏感的，把碳量控制准确了，大体上就为力学性能和工艺性能的稳定打下了基础。

③确定灰铸铁的化学成分既要首先着眼于保证力学性能和使用性能，也要兼顾铸造和切削加工等工艺性能。较低的碳当量 $\left(\text{碳当量 } C_E=C+\dfrac{Si+P}{3}\right)$ 可得到较高的力学性能，但工艺性能较差；相反，提高碳当量对工艺性能有利，但却降低了力学性能。高牌号的灰铸铁在给定的碳当量下提高硅碳比 $\left(\dfrac{Si}{C}\right)$ 能提高力学性能，降低断面敏感性，但却增加了缩孔、缩松倾向。

④合金元素对灰铸铁能起某种独特的有利作用，或提高力学性能，或提高耐热性、耐磨性、耐蚀性

汽车论坛 http://www.qclt.com

等；但某些合金元素对工艺性能有不利影响，特别是多数合金元素价格昂贵，所以要控制使用。表 1-2-6 列出常用合金元素单位重量的相对比价。

表 1-2-6 常用合金元素单位重量的相对比价

合金元素	Fe	Si	Mn	Cr	Sb	Al	Cu	P	Ti	Mg	Ni	Sn	W	Mo	V
比价	1	5	6	9	10	10	12	25	26	35	60	72	100	120	145

注：Si、Mn、Cr、P、Ti、W、Mo、V按这些元素的常用铁合金价格折算；Fe按生铁价格计算；Sb、Al、Cu、Ni、Sn等按作为工程原材料的纯金属价格计算。

普通灰铸铁的化学成分可参照表 1-2-7 确定。

表 1-2-7 普通灰铸铁的化学成分(%)

牌 号	C	Si	Mn	P	S
HT100	3.5~3.7	2.5~2.2	0.4~0.6	≤0.25	≤0.15
HT150	3.4~3.6	2.4~2.1	0.5~0.7	≤0.20	≤0.15
HT200	3.3~3.5	2.2~1.9	0.6~0.8	≤0.15	≤0.12
HT250	3.1~3.3	2.1~1.8	0.7~0.9	≤0.12	≤0.12
HT300	3.0~3.2	1.9~1.6	0.8~1.0	≤0.10	≤0.10
HT350	2.9~3.1	1.7~1.4	0.8~1.0	≤0.10	≤0.10

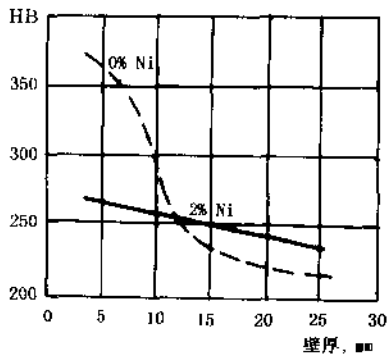
常用的合金元素在灰铸铁中的作用及其对力学性能的影响见表 1-2-8。

表 1-2-8 低合金灰铸铁常用的合金元素

元素名称	在灰铸铁中的作用	对力学性能的影响	常规用量
铬	稳定、细化珠光体，使石墨细化，提高白口倾向，提高高温组织稳定性和抗蚀性	每加入 0.1% Cr 提高抗拉强度约 3%~4%，提高硬度约 5~7 个 HB 单位	0.2%~1.0%（取决于壁厚）；大部分汽车铸件铬的常规加入量不超过 0.5%
铜	在共晶凝固中促进石墨化，其作用约为硅的$\frac{1}{4}$，能减小白口倾向；在共析转变中促进形成珠光体；能减小断面敏感性	每加入 1% Cu 提高抗拉强度约 10%~12%，提高硬度约 10~20 个 HB 单位	0.5%~2.0%（取决于壁厚）；汽车铸件常规用量为 0.5%~1.0%
钼	Mo<0.6%时稳定碳化物的作用比较温和，主要用于细化珠光体和石墨。钼与磷能形成 P-Mo 四元共晶，使材质变脆，故含钼时磷应低于 0.15%	每加入 0.1% Mo 提高抗拉强度 4%~4.5%，提高硬度 2~4 个 HB 单位	0.25%~1.0%；价格昂贵
钒	钒是强烈促进形成共晶碳化物的元素，其作用大于铬。钒超过 0.6% 时即使在相当厚的断面也易出现碳化物。钒能促进珠光体的形成，提高珠光体的稳定性，并能细化石墨	当 V<0.5% 时每加入 0.1% V 提高抗拉强度 5%~8%，提高硬度 8~10 个 HB 单位	0.15%~0.35%；价格昂贵

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

元素名称	在灰铸铁中的作用	对力学性能的影响	常规用量
镍	作用与铜相似，是共晶凝固的石墨化元素，其作用相当于硅的$\frac{1}{3}$；有促进、稳定珠光体的作用，但比铜弱；能显著降低断面敏感性	每加入1%Ni能提高抗拉强度约5%～10%，对不同厚度的硬度的影响见图：  	0.25%～3.0%；价格贵，常用铜代替
锡	是促进珠光体形成的有效元素，能提高珠光体的热稳定性；锡不促进形成游离渗碳体，但易在共晶团边界形成$FeSn_2$偏析化合物而引起脆性	当Sn<0.1%时，每加入0.01%Sn可提高抗拉强度约1%，提高硬度约3个HB单位	0.04%～0.10%
锑	是促进珠光体最有效的元素，其作用约为锡的两倍。0.05%Sb能使100mm厚的灰铸铁得到全珠光体基体；锑提高珠光体的热稳定性。Sb>0.1%时会促进生成游离渗碳体，也促进形成D型石墨	含锑由0增至0.05%，随珠光体量的增加相应提高强度和硬度，一般至0.03%Sb时，强度达最大值。若Sb超过形成珠光体的量，则强度下降，脆化加剧	<0.05%；因对组织和性能的影响比较敏感，慎用
钛	在铸铁中形成碳化钛、氮化钛、氧化钛和硫化物，可用于脱氧、脱硫和中和氮的影响。在灰铸铁中0.05%～0.15%的钛有促进石墨化、细化共晶团和细化石墨的作用；0.1%～0.2%的钛有促进形成D、E型石墨的作用	碳化钛和氮化钛质点具有高硬度，故钛能提高灰铸铁的耐磨性。钛在0.15%以下对抗拉强度和硬度的影响不明显	0.03%～0.15%；常由生铁带入或含钛的孕育剂带入

1.2.1.4 用于生产缸体、缸盖的灰铸铁

缸体、缸盖是发动机中尺寸大、形状复杂、技术要求高的壳体零件，因汽车轻量化要求降低发动机的单位功率重量，故缸体、缸盖在保证强度、刚度的前提下，力求减小壁厚，降低重量。为了保证发动机的使用性能和可靠性，对缸体、缸盖铸件在内在质量、材料均匀性、尺寸精度及尺寸稳定性、表面粗糙度和内腔清洁度等方面提出了严格的要求。

灰铸铁一直是制造缸体、缸盖的传统材料。虽然随着现代汽车轻量化技术的发展，铝合金的应用不断扩大，轿车和轻型车采用铝缸体、特别是铝缸盖日益增多，但灰铸铁因其生产成本低廉，以及在耐磨性、耐热性、减振性、线收缩及铸造工艺性能等方面的独特优势，目前在汽车缸体、缸盖上仍广泛应用。

灰铸铁缸体、缸盖材质上的技术要求主要是：

①具有足够高的结构强度和刚度。发动机工作时作用于缸体、缸盖的应力包括：气缸中燃料燃烧的气体压力在缸壁造成的应力；曲柄连杆机构高速运转产生的机械应力；系统振动产生的附加应力；气缸由于

汽车论坛 http://www.qclt.com

水套通水冷却或风冷散热冷却而引起的温差应力；等等。在这些反复变化的应力作用下，要求缸体、缸盖强度上能胜任，不产生裂纹，并保持足够的结构刚度。随着薄壁高强度灰铸铁生产工艺技术的进步，目前缸体、缸盖大多采用 HT250 牌号生产，只有一些小功率的车用发动机缸体、缸盖采用 HT200 牌号。

②因大多数的发动机是不镶缸套的，故要求缸体的缸筒具有良好的耐磨性。缸筒的磨损决定着发动机的大修里程，而磨损特性又是由金相组织所决定的。为此，要求缸筒加工后的表面金相组织应是：在片状珠光体的基体上均匀分布着中等尺寸的 A 型石墨，D 型石墨越少越好（≤5%）。

③对于柴油机缸盖来说，要求材料有较高的抗热疲劳性能。柴油机缸盖最高工作温度可达 480～540℃。在机械应力和热应力的作用下，特别是发动机反复起动、停止产生的热冲击的作用下，缸盖常见的失效是在气门座之间的过桥处产生裂纹。因此，柴油机缸盖，特别是对那些通过增压或增压加中冷来提高爆发压力从而提高发动机输出功率的缸盖，要求有高的抗热冲击能力，即希望有较高的常温强度和高温强度、较高的疲劳强度、较高的组织稳定性，以及尽可能高的导热性。

④缸体、缸盖的形状和结构十分复杂。现代发动机缸体被设计成包含水泵壳、机油泵壳和机油冷却器壳的集成件，像这样一个复杂的薄壁空腔结构零件，对铸造工艺技术要求很高，因而要求铸铁具有良好的铸造性能，以利于铸造出健全的铸件。

⑤有良好的切削加工性能。铸件要求没有硬点及边角白口，有良好的组织上和性能上的均匀性，硬度波动小，以利于切削加工。

⑥内应力小，具有良好的尺寸稳定性。

用灰铸铁生产缸体、缸盖，技术上的关键在于处理好材质力学性能与工艺性能之间的矛盾。从力学性能上考虑，希望尽可能采用较高牌号的灰铸铁生产，但牌号越高，工艺性能越差，生产薄壁缸体、缸盖的困难也就越大。这些困难具体表现在：

①灰铸铁铸件的最小壁厚受铁水流动性及白口倾向的制约，而灰铸铁牌号越高，流动性越低，白口倾向越大，越不能适应薄壁化的要求。现代轿车缸体、缸盖，壁厚小至 3.5mm，如此薄的铸件，用高牌号灰铸铁生产是有一定难度的。

②灰铸铁牌号越高，凝固时的收缩越大，而在缸体、缸盖的薄壁结构中，包含着许多局部较厚大的热节（如轴承座及螺栓搭子等处），这些热节部位补缩困难。高牌号灰铸铁的缸体、缸盖容易出现缩漏缺陷。

③缸体、缸盖基本上是封闭及半封闭的薄壁框式结构，且有局部热节，因铸造中各部位的冷却速度不一致，铸造应力会是相当大的。过高的铸造应力会引起铸件产生裂纹；铸件的残余内应力也会影响加工后缸体、缸盖成品尺寸的稳定性。灰铸铁随牌号的提高弹性模量提高而导热系数降低，在同样的铸造条件下，高牌号灰铸铁铸件的铸造应力比低牌号的大。

④灰铸铁牌号越高，强度和硬度也越高，而工件材料的强度和硬度越高时，则机加工时的切削力和切削时消耗的功率及产生的切削热量就越大，切削温度也越高，刀具的磨损也就越快。因此，高牌号的灰铸铁缸体、缸盖加工时刀具寿命较短。

20 多年来，国内外对薄壁高强度灰铸铁的工艺技术进行了许多研究，并在缸体、缸盖的生产应用上取得了大量的实践经验。这项技术概括地说，就是在适当提高铸铁碳当量使之具有良好铸造性能的基础上，通过适当的孕育处理和低合金化来提高材质的强度和组织均匀性，从而使力学性能和工艺性能得以兼顾。目前 HT250 灰铸铁基本上已取代了 HT200 灰铸铁成为缸体、缸盖的常规材料。

国内若干发动机缸体、缸盖用的灰铸铁的化学成分见表 1-2-9，国外典型的灰铸铁缸体、缸盖的材质技术条件列于表 1-2-10。

表 1-2-9 国内若干发动机缸体、缸盖用灰铸铁

铸件	牌号	化学成分（%）							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo
CA1091 汽车发动机缸盖	HT250	3.2～3.4	1.8～2.0	0.6～0.9	<0.07	<0.12	0.20～0.45		

续上表

铸 件	牌 号	化学成分（%）							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo
EQ1090 汽车发动机缸盖	HT250	3.2～3.4	1.9～2.1	0.6～0.9	≤0.08	≤0.12	0.25～0.35	—	—
475Q 汽油机缸体	HT250	3.15～3.4	2.1～2.5	0.65～0.75	0.06	0.06	0.25～0.35	0.3～0.4	—
Q376 汽油机缸体	220MPa*	3.2～3.4	2.0～2.3	0.70	<0.1	<0.1	Sb 0.02～0.04	—	—
船用柴油机缸盖	HT250	3.1～3.3	1.6～2.1	0.75～1.0	≤0.2	≤0.1	0.2～0.4	0.5～1.0	0.3～0.5
130 系列（四缸、六缸、8V、12V）柴油机缸体	HT250	3.0～3.2	1.7～1.9	0.8～1.0	0.06	<0.1	—	—	-
R100 系列柴油机缸体、缸盖	HT250	3.25～3.45	1.8～2.2	0.6～0.9	≤0.09	≤0.10	0.25～0.35	0.35～0.45	-
195 柴油机缸盖	HT250	3.2～3.5	2.0～2.4	0.6～1.0	≤0.15	≤0.1	0.2～0.4	0.7～1.0	-

* 非标牌号，其 $\sigma_b \geqslant 220$MPa。

表 1-2-10 国外一些典型的缸体、缸盖技术条件

名 称	化学成分（%）								金相组织	性能要求
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn		
法国某公司轿车缸体	3.0～3.4	2.0～2.5	0.6～1.0	≤0.15	≤0.15	≤0.30	≤0.30	0.05～0.10	缸孔：A 型石墨尺寸 4 级珠光体≥95%，游离碳化物≤2%	缸孔壁硬度 207～241HB（可对应检查与缸盖的结合平面）
日本柴油机四、六缸缸体	3.2～3.6	1.6～2.2	0.7～0.9	<0.06	0.07～0.12	—	—	—	缸孔：A 型石墨尺寸 4 级珠光体≥95%，游离碳化物≤2%	φ30 试棒 σ_b=250～280MPa，挠度 6～11mm，本体硬度 170～241HB
日本柴油机缸盖	3.2～3.6	1.6～2.2	0.7～0.9	<0.06	0.07～0.12	—	—	0.03～0.06	缸孔：A 型石墨尺寸 4 级珠光体≥95%，游离碳化物≤2%	φ30 试棒 σ_b=260～290MPa，挠度 7～12mm，本体硬度 187～229HB
美国 C 公司柴油机缸体	3.2～3.5	1.9～2.2	0.7～0.9	≤0.20	≤0.15	合金元素由铸造厂确定，以保证力学性能为原则			铸件本体：A 型石墨，尺寸 2～6，B、D、E 型各少于 10%，总量≤20%	φ30 试棒 $\sigma_b \geqslant 236$MPa，本体 $\sigma_b \geqslant 186$MPa，硬度在缸体顶平面为：179～235HB，其它部位：≤241HB
美国 C 公司柴油机缸盖	3.2～3.5	1.9～2.2	0.7～0.9	≤0.20	≤0.15	同上			铸件本体：A 型石墨，尺寸 2～6，B、D、E 型各少于 10%，总量≤20%	φ30 试棒 $\sigma_b \geqslant 236$MPa，本体 $\sigma_b \geqslant 203$MPa
德国某轿车缸体	3.0～3.5	1.8～2.7	0.3～1.0	≤0.14	≤0.2	0.15～0.45	<0.8	<0.1	A 型石墨，尺寸 3～5，珠光体基体，铁素体≤5%	本体 $\sigma_b \geqslant 200$MPa，硬度 195～235HB

从国内外缸体、缸盖材质技术条件提供的化学成分看，规定的范围一般都比较宽，但各个工厂在实际生产中还必须根据本厂的生产条件和用户的要求来确定更窄的成分范围，以确保铸件具有稳定的性能和质量。生产 HT250 牌号的薄壁缸体、缸盖，化学成分的严格控制是极其重要的，特别是含碳量，不仅对强

汽车论坛 http://www.qclt.com

度和硬度影响很大，对铸造性能和机加工性能的影响也很敏感。表 1-2-11 以 HT250 灰铸铁为例表明含碳量的波动范围对抗拉强度的影响。

表 1-2-11 含碳量波动对 HT250 灰铸铁抗拉强度的影响

含碳量（%）			平均抗拉强度及其波动幅度（MPa）
上限	下限	波动范围	
3.35	3.25	±0.05	261±11
3.35	3.15	±0.10	272±22
3.35	3.05	±0.15	283±33

注：Si 含量 2.0%，Mn、P、S 为常规含量。

为了达到 HT250 牌号的最小抗拉强度，就必须控制含碳量上限不超过 3.35%，这是生产 HT250 的前提；至于含碳量的下限便由生产中碳的波动范围所决定。从表 1-2-11 可看出，含碳量大的波动既提高了抗拉强度的平均水平，也增大了抗拉强度的波动幅度；同样地，碳的波动也必定会提高铸件的平均硬度和硬度的波动幅度。由此可见，缩小灰铸铁生产中含碳量的波动范围，对力学性能及与其相联系的切削加工性能的改善和稳定是十分重要的。同时，若因碳量无法控制准确而不得不降低碳的下限，也必然使铸造性能产生大的波动，增加缩孔、缩松、白口等铸造缺陷的产生。总之，尽可能准确地控制含碳量是薄壁高强度灰铸铁成分控制中的首要要求，离开了碳量的严格控制，高强度薄壁缸体、缸盖的大量稳定生产就无从谈起。

现代铸造厂生产灰铸铁件通过严格的配料和熔炼工艺过程的控制，结合炉前的化学成分快速检查和监控，已有可能把含碳量控制在±0.05%，但我国一般的铸造厂只能达到±0.10%的水平，个别厂甚至为±0.15%。

除了首先控制碳量外，其次是控制硅量。在一定的碳当量下，硅碳比（Si/C）一般控制在 0.60 至 0.75 之间。高硅碳比可得到较高的抗拉强度，较小的断面敏感性，但铸铁的缩孔、缩松倾向有所增加。为使碳当量尽可能稳定，当碳量为上限时，硅应控制在下限，而碳量为下限时，硅应控制在上限。硅量希望控制在±0.10%范围。

磷对灰铸铁产生缩松十分敏感，尽管灰铸铁技术条件常常规定含磷量允许至 0.15%，但为防止缸体、缸盖产生渗漏缺陷，希望磷量控制在 0.06%以下。

硫在灰铸铁中在不含锰的条件下具有强烈的促进白口的作用，使材质力学性能和切削加工性能降低。但在锰、硫共存时，在满足 Mn≥1.7S+0.3 条件下，锰与硫化合成硫化锰，不仅消除了硫的有害作用，而且硫化锰成为灰铸铁石墨化的结晶核心，促进 A 型石墨的形成，有利于改善灰铸铁的综合性能；锰与硫化合后剩余的量在铸铁中则起促进与细化珠光体的作用，在一定程度上促进材质强度和硬度的提高。由于锰是灰铸铁的基本元素之一，在含锰的条件下，硫不是越低越好，一般锰量在 0.6%～1.0%范围，而硫则希望控制在 0.06%～0.10%为好。

关于合金元素含量，有一些缸体、缸盖技术条件没有规定，但实际剖析铸件实物，却常含有低量的铬、镍、铜、锡之类的合金元素，这些合金元素有的是铸造厂为保证金相组织和力学性能而特意加入的，有的则是由炉料中的废钢带入的。大多数的技术条件对合金元素含量有明确规定，主要是为了保证缸体缸筒的金相组织和硬度，以及保证缸盖的抗热疲劳性能。

缸体、缸盖的技术条件须规定铸件本体指定部位的硬度，有的还规定本体的抗拉强度。因缸体、缸盖结构复杂，内腔由树脂砂芯形成，散热条件差，铸件在铸造过程中的冷却速度比较缓慢，所以本体的抗拉强度比 ϕ30 试棒的抗拉强度约低一个牌号。

关于缸体、缸盖铸件要不要通过退火消除内应力的问题，各个厂家的规定并不一致。大中型柴油机缸体、缸盖大多进行退火消除内应力，但车用汽油机和小功率的柴油机缸体、缸盖一般不需退火，但在铸造过程要采取适当措施来减小残余应力，其常规做法是：铸件浇注后在铸型中冷却至 650℃左右，然后带砂取出，放在悬链的托盘中缓冷，或者带砂取出后用叉车运到指定地点堆放缓冷，至 250℃以下再落砂。

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.2.1.5 用于生产制动鼓、制动盘的灰铸铁

该类零件于汽车运转中在制动力的作用下通过干摩擦把动能转变为热能，从而达到减速或制动的目的。对制动零件材质的要求是：

①良好的导热性；

②具有抗咬合的能力；

③良好的摩擦特性，即具有较高的摩擦系数，又有良好的耐磨性；

④适宜的强度；

⑤变形小，尺寸稳定性好；

⑥低的弹性模量，由此而相应地可降低热应力。

灰铸铁有适中的摩擦系数，较高的导热系数，良好的抗咬合性能，足够的强度和较低的弹性模量，与其它材料比较，灰铸铁能较好地满足上述要求。钢有高的强度，但弹性模量高，抗咬合性能差；球墨铸铁也有相当高的强度，但抗咬合能力不如灰铸铁，弹性模量介于钢和灰铸铁之间，主要问题是在温度反复变化的工况下会产生较大的变形。钢和球墨铸铁实际上不被采用于制造制动鼓和制动盘。蠕墨铸铁的性能介于球铁与灰铸铁之间，国内外有用珠光体蠕墨铸铁试生产制动鼓和制动盘的报导。一汽近年来曾用蠕墨铸铁进行过数百辆份解放牌载货车的制动鼓生产试验，行车试验表明，蠕墨铸铁制动鼓的使用寿命比灰铸铁的高3倍左右，现在一汽已正式将蠕铁制动鼓投入生产。实际上当今汽车的制动鼓、制动盘大部分仍用灰铸铁来制造。近年来个别车型出现铝合金制动鼓，但也是镶嵌灰铸铁衬套的。

制动鼓、制动盘的工作温度一般不超过500℃，频繁制动时可至700℃，这时铸铁氧化加速并发生珠光体基体组织的分解，使磨耗加剧。如果在短时间内快速反复制动，制动鼓的表面可能超过900℃，在其随后的快速冷却中会形成马氏体，结果，摩擦系数降低，并产生很高的热冲击应力。磨损和由热冲击引起的龟裂是制动零件失效的基本形式，而严重的龟裂将加速磨损甚至引起断裂，出现这种情况就必须及时更换，这对于行车安全是十分重要的。

用于制造制动鼓、制动盘的灰铸铁一般希望适当提高含碳量，使组织中的石墨量增加，以提高其导热性；但若含碳量过高，会引起强度降低，这时就要加入Cr、Mo等合金元素来促进并稳定珠光体，以提高其常温及高温的强度和耐磨性。

1.2.2 球墨铸铁

1.2.2.1 特点

在一般灰铸铁的铁水中加入适量的镁、稀土等球化元素，利用镁和稀土的脱硫、脱氧作用，使硫、氧等杂质元素的含量大大降低，同时控制未与硫、氧化合的残留镁和残留稀土保持在一定的含量范围（0.03%～0.06%Mg及0%～0.03%RE），则结晶过程中原本应析出片状石墨的铸铁就会改变为析出球状石墨，成为球墨铸铁。虽然球墨铸铁的化学成分仅比灰铸铁多含了万分之几的球化元素，但如此微量的球化元素却使铸铁中的石墨结晶形态发生了根本的改变——由分支很多的片状转变为圆整的球状，从而使铸铁的性能发生重大的变化。球墨铸铁具有如下特点：

①由于球状石墨对铸铁基体的削弱作用和应力集中效应比片状石墨小得很多，因而球墨铸铁的力学性能大大地高于灰铸铁，既有高的强度，也有一定的塑韧性。球铁可以根据设计上对力学性能的不同要求，通过冶金控制（包括铸造过程的控制、合金化及热处理等），以得到强度与塑韧性的不同结合，使之适应广泛的工程应用。灰铸铁完全没有塑性，延伸率几乎等于零，其最高牌号不过HT350。相比之下，高韧性铁素体球铁在最低抗拉强度为350MPa时，延伸率可达22%以上；高强度的贝氏体球铁，在抗拉强度为1 000MPa时，延伸率也能达到5%以上。

②球铁的组织相当于在含硅2%～3%的低合金钢的基体上分布了球状石墨，与铸造碳钢相比，其强度指标（特别是屈服强度$\sigma_{0.2}$）较高，而塑性指标较低。以常用的含碳量0.3%的铸钢ZG230－450与铸

汽车论坛 http://www.qclt.com

态铁素体球铁 QT450－10 相比，两个牌号抗拉强度相同，球铁的屈服强度（$\sigma_{0.2}$≥310MPa）比铸钢（$\sigma_{0.2}$≥230MPa）提高 35%，但球铁的塑性指标（δ≥10%）低于铸钢（δ≥22%）。在机械设计中，$\sigma_{0.2}$常是确定设计许用应力的依据，在许多情况下选用有一定塑韧性（虽然不很高）而 $\sigma_{0.2}$较高的球铁比选用塑韧性很高而 $\sigma_{0.2}$较低的铸钢更为有利。

③与可锻铸铁比较，球铁石墨呈球状，可锻铸铁中的石墨为絮状，前者对基体的削弱作用比后者小，所以当基体组织相同时，球铁的综合力学性能高于可锻铸铁；在同一塑性指标下，球铁的抗拉强度比可锻铸铁一般可提高 20%。

④球铁的无缺口疲劳强度比钢低，但两者的带缺口疲劳强度却大体相等。由于实际零件往往不可避免地有油孔、键槽、螺纹、台阶等造成的缺口，所以在许多情况下球铁零件常能胜任在交变负荷工况下工作。

珠光体球铁与 45 号锻钢试样的弯曲疲劳强度的对比见表 1-2-12。

表 1-2-12 珠光体球铁与 45 号锻钢试样的弯曲疲劳强度

材料	弯曲疲劳强度(MPa)			
	光滑试样	光滑带孔试样	带肩试样	带孔带肩试样
珠光体球铁	255	205	175	155
45 号锻钢(正火)	305	225	195	150

⑤球铁的冲击韧性比强度性能相当的钢低。这里所指的冲击韧性是以标准的 V 型缺口冲击试样在大能量一次冲击下断裂所吸收的功（α_K 值）来量度的。球铁的 α_K 值虽较低，但对小能量多次重复冲击的抗力却较高。在实际使用中，多数机器零件不会像冲击试验那样经受一次性的摆锤大能量冲击，而是在较小能量多次重复冲击的载荷下工作的，因此，球铁在许多情况下仍然可用于制造重要的零件。

⑥无论是润滑摩擦还是无润滑摩擦，铸铁组织中的石墨对耐磨性起着重要的作用。在无润滑条件下，石墨作为润滑剂，在铸铁中起自润滑作用；在润滑条件下，石墨能够吸附和保存润滑油，保持油膜的连续性；石墨在摩擦中脱落后留下的空穴还可以储存润滑油。但是石墨也有削弱基体的不利作用，特别是片状石墨尖端的应力集中，很容易引起裂纹而加速磨损。相比之下，球铁既在一定程度上保持了石墨的有利作用，又大大减小了石墨的不利作用。因此，球铁无论在润滑条件下还是无润滑条件下，其耐磨性优于同样基体的钢和灰铸铁。

⑦球铁具有良好的耐热性。铸铁在空气中加热至 570℃以上时，表面生成氧化膜，由于球铁含硅量（2%～3%）较高，所以在铁的氧化膜之下有一层致密的 Fe_2SiO_4 及 SiO_2 薄膜，阻止氧的进一步侵入，因而球铁的抗氧化性优于普通碳钢。在 450～1 050℃之间加热时，球铁的表面氧化程度比一般钢材为轻。在灰铸铁中，分支很多的石墨片互相交叉连接，成为氧侵入铸铁的通道，而在球铁中，分散分布的石墨球一个个地被包围、封闭于基体中，所以球铁的抗氧化性又优于灰铸铁。

⑧球铁在大气中的耐蚀性主要受相对湿度和大气污染程度的影响。在相对湿度＞70%时，球铁的腐蚀将是不可避免的；当大气中的工业污染物质（如 SO_2）含量增加时，腐蚀也随之增加。置球铁于水介质中，其所受到的腐蚀比在大气中更要严重得多。在铸铁组织中，石墨的电位最高，在电化学反应中，高电位的石墨几乎不腐蚀，石墨残留物与氧化铁的水合物一起附着在金属表面，能阻止反应物的侵入，起防止进一步腐蚀的保护作用。因此，无论哪一种铸铁，其在大气中及水中的耐蚀性均优于普通碳钢。

⑨球铁的熔点比铸钢低 300℃以上，合金流动性好，有利于浇注薄壁铸件。球铁的凝固特性既不同于铸钢，也不同于灰铸铁。球铁为糊状凝固，铸钢为层状凝固，而灰铸铁介于糊状凝固与层状凝固之间。球铁和灰铁在凝固时发生共晶转变，析出石墨，根据析出的石墨量能够部分地甚至全部地抵消液态收缩，所以球铁和灰铁在铸造中用于补缩的冒口比铸钢小。必须着重指出的是，球铁的缩孔、缩松倾向不仅取决于凝固时石墨的析出，还与铸型的刚度密切相关。这是由于球铁的糊状凝固导致铸件凝固时在较长时间内不能形成硬壳，这时，析出石墨产生的膨胀力直接传递至铸型，若铸型没有足够的刚度，就会引起型壁移

动，使铸件外形尺寸变大，并促使铸件内部产生缩孔与缩松。总的说来，球铁的缩孔、缩松倾向主要取决于凝固中石墨析出的数量和铸型的刚度。

⑩球铁铸件的残余应力主要来自热应力。热应力随着弹性模量和线膨胀系数的增大及导热系数的下降而增加。球铁的弹性模量比灰铸铁高40%～100%，线膨胀系数大致相等，导热系数比灰铸铁低10%～40%。综合上述因素，在同样的几何形状和尺寸以及同样的冷却条件下，球铁的铸造应力约为灰铸铁的2.0～3.5倍。由于球铁的常温及高温抗拉强度比灰铸铁高得多，因此，球铁的铸造应力虽较大，但产生裂纹的倾向还是比较小的。

⑪球铁组织中的石墨在切削加工中起润滑作用及断屑作用，因此球铁属于切削加工性能优良的材料。一般认为，球铁的切削加工性能大致接近硬度相同的灰铸铁而大大地优于钢，就加工成本而言，加工球铁件比加工钢件要低得多。

⑫球铁的焊接性能与灰铸铁基本相同，即焊区容易产生渗碳体和马氏体，有较大的形成内应力和裂纹的倾向。采用球铁焊条施焊时，若镁和稀土含量不足，则焊缝形成灰铸铁的组织，使力学性能降低；若镁和稀土含量过高，又进一步促进渗碳体或马氏体的形成，增加形成内应力和裂纹的危险。因此，对球铁的焊接或焊补提出了更高的要求，一般要求焊前预热，焊后保温缓冷。

1.2.2.2 技术标准与性能指标

球墨铸铁是以常规力学性能（σ_b、$\sigma_{0.2}$、δ、α_K及硬度）进行牌号划分的。表1-2-13汇总列出各国的国家标准（包括国际标准）所规定的牌号和相对应的常规力学性能。从表1-2-13可以看出，我国和英国、法国基本采用了国际标准，都采用了国际单位制，牌号的分级也大体相同。美国仍采用以英制单位的力学性能来表示牌号，例如80－55－06表示抗拉强度不低于80 000磅/吋^2、屈服强度不低于55 000磅/吋^2、延伸率不低于6%的球墨铸铁。德国、日本和原苏联则用公制单位来表示牌号。

各国的国家标准是通行于各行各业的一般性标准。由于汽车铸件具有某种特殊性，一些国家有专用于汽车行业的标准，如美国汽车工程协会标准SAE J434C（表1-2-14）便是国际上有代表性的汽车球铁件行业标准。

表1-2-13 主要国家的球墨铸铁标准（含国际标准）一览表

国别及标准号	牌号	抗拉强度 σ_b (MPa) ≥	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa) ≥	延伸率 δ (%) ≥	冲击值 (J) ≥ 室温 三次平均	室温 单个值	-20℃ 三次平均	-20℃ 单个值	-40℃ 三次平均	-40℃ 单个值	硬度 (HB)	基体金相组织（供参考）
中国 GB1348－88	QT400－18	400	250	18	14	11		－	－	－	138～180	铁素体
	QT400－18L	400	250	18	－	－	12	9	－	－	138～180	铁素体
	QT400－15	400	250	15	－	－	－	－	－	－	138～180	铁素体
	QT450－10	450	310	10	－	－		－	－	－	160～210	铁素体＋珠光体
	QT500－7	500	320	7	－	－	－	－	－	－	170～230	铁素体＋珠光体
	QT600－3	600	370	3	－	－	－	－	－	－	190～270	珠光体＋铁素体
	QT700－2	700	420	2	－	－	－	－	－	－	225～305	珠光体
	QT800－2	800	480	2	－	－	－	－		－	245～335	珠光体或回火组织
	QT900－2	900	600	2	－	－			－	－	280～360	贝氏体或回火马氏体

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

国别及标准号	牌号	抗拉强度 σ_b (MPa) ≥	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa) ≥	延伸率 δ (%) ≥	冲击值 (J) ≥ 室温 三次平均	室温 单个值	-20℃ 三次平均	-20℃ 单个值	-40℃ 三次平均	-40℃ 单个值	硬度 (HB)	基体金相组织 (供参考)
国际标准 ISO 1083-1987(E)	900-2	900	600	2	-	-	-	-	-	-	280~360	贝氏体或回火马氏体
	800-2	800	480	2	-				-	-	245~335	珠光体或回火组织
	700-2	700	420	2	-	-	-			-	225~305	珠光体
	600 3	600	370	3		-	-	-	-		190~270	珠光体+铁素体
	500-7	500	320	7		-	-	-	-		170~230	铁素体+珠光体
	450-10	450	320	10	-	-		-	-	-	160~210	铁素体+珠光体
	400-15	400	250	15		-	-	-	-	-	130~180	铁素体
	400-18	400	250	18	14	11			-	-	130~180	铁素体
	400-18L	400	250	18	-	-	12	9		-	130~180	铁素体
	350-22	350	220	22	17	14	-		-	-	≤150	铁素体
	350-22L	350	220	22	-	-	-	-	12	9	≤150	铁素体
英国 BS 2789:1985	900/2	900	600	2	-		-	-	-	-	302~359	回火马氏体
	800/2	800	480	2	-	-		-	-	-	248~352	珠光体或回火组织
	700/2	700	420	2	-	-	-	-	-	-	229~302	珠光体
	600/3	600	370	3	-			-	-	-	192~268	珠光体/铁素体
	500/7	500	320	7		-	-		-	-	170~241	铁素体/珠光体
	450/10	450	320	10	-	-	-	-		-	160~221	铁素体/珠光体
	420/12	420	270	12		-	-	-	-	-	≤212	铁素体
	400/18	400	250	18	14	11	-	-	-	-	≤179	铁素体
	$400/18L_{20}$	400	250	18	-	-	12	9		-	≤179	铁素体
	350/22	350	220	22	17	14	-	-	-	-	≤160	铁素体
	$350/22L_{40}$	350	220	22	-	-	-	-	12	9	≤160	铁素体
美国 ANSI/ ASTM A536-84	60-40-18	414	276	18	-	-		-	-	-	-	铁素体(退火)
	65-45-12	448	310	12	-	-	-	-	-	-	-	铸态或经热处理
	80-55-06	552	379	6		-		-	-	-	-	铸态或经热处理
	100-70-03	689	483	3	-	-	-	-	-	-	-	淬火、回火或正火、回火
	120-90-02	827	621	2	-	-	-	-	-	-	-	淬火、回火或正火、回火
德国 DIN 1693-1973	GGG-40	400	250	15	-		-	-	-	-	-	主要铁素体
	GGG-50	500	320	7	-	-	-	-	-	-	-	铁素体/珠光体
	GGG-60	600	380	3	-	-	-	-	-	-	-	珠光体/铁素体
	GGG-70	700	440	2	-	-	-	-	-	-	-	主要珠光体
	GGG-80	800	500	2	-	-	-	-	-	-	-	珠光体
	GGG-40.3	400	250	18	16	14	14	11	-	-	-	铁素体
	GGG-35.3	350	250	22	19	17	-	-	14	11	-	退火铁素体

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

国别及标准号	牌号	抗拉强度 σ_b (MPa) ≥	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa) ≥	延伸率 δ (%) ≥	冲击值 (J) ≥ 室温 三次平均	室温 单个值	-20℃ 三次平均	-20℃ 单个值	-40℃ 三次平均	-40℃ 单个值	硬度 (HB)	基体金相组织 (供参考)
法国 NF-A32-201-1987	900-2	900	600	2		-	-	-	-	-	280~360	贝氏体或回火马氏体
	800-2	800	480	2	-	-	-	-	-	-	245~335	珠光体或回火组织
	700-2	700	420	2	-		-	-	-	-	225~305	珠光体
	600-3	600	370	3	-	-		-	-	-	190~270	珠光体+铁素体
	500-7	500	320	7	-		-	-	-	-	170~230	铁素体+珠光体
	450-10	450	310	10	-		-			-	160~210	铁素体
	400-15	400	250	15	-	-	-	-	-	-	130~180	铁素体
	400-18	400	250	18	14	11		-	-		130~180	铁素体
	$400-18L_{-20}$	400	250	18	-	-	12	9	-	-	130~180	铁素体
	350-22	350	220	22	17	14	-	-		-	≤150	铁素体
	$350-22L_{-40}$	350	220	22	-	-	-	-	12	9	≤150	铁素体
前苏联 ГОСТ 7293-85	ВЧ35	350	220	22		-	-	-		-	140~170	
	ВЧ40	400	250	15	-		-	-	-	-	140~202	-
	ВЧ45	450	310	10	-	-	-	-	-	-	140~225	-
	ВЧ50	500	320	7	-	-	-	-	-	-	153~245	-
	ВЧ60	600	370	3	-	-		-	-	-	192~277	-
	ВЧ70	700	420	2	-	-	-	-	-	-	228~302	-
	ВЧ80	800	480	2	-	-	-	-	-	-	248~351	-
	ВЧ100	1000	700	2	-		-	-	-	-	270~360	-
日本 JIS G5502 1989	0类 FCD370	370	230	17	-	-	-	-	-	-	≤179	-
	1类 FCD400	400	250	12	-	-	-	-	-		≤201	-
	2类 FCD450	450	280	10	-	-	-		-	-	143~217	-
	3类 FCD500	500	320	7	-		-	-	-	-	170~241	-
	4类 FCD600	600	370	3	-		-		-	-	192~269	-
	5类 FCD700	700	420	2	-	-	-	-	-	-	229~302	-
	6类 FCD800	800	480	2	-		-	-	-	-	248~352	-

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-14 汽车用球墨铸铁(SAE J434C)

牌号	化学成分*(%)	金相组织		力学性能					应用
				硬度 HB	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	延伸率 δ (%)	弹性模量 E (GPa)	
D4018	C_E:3.20~4.10 Si:1.80~3.00 Mn:0.10~1.00 P:0.015~0.100 S:0.005~0.035	Ⅰ类+Ⅱ类石墨≥80% 无初生碳化物	铁素体	≤170	≥414	≥276	≥18	152	要求有好的延展性与切削加工性,承受中等应力的零件,如悬挂零件
D4512			铁素体+珠光体	156~217	≥448	≥310	≥12	152	要求有适当切削加工性的承受中等应力的零件,如差速器壳、减速器壳等
D5506			铁素体+珠光体	187~225	≥552	≥379	≥6	152	要求具有良好韧性的承受高应力的零件,如汽车发动机曲轴
D7003			珠光体	241~302	≥689	≥483	≥3	152	适用于局部淬火要求有很好耐磨性的零件,如齿轮
DQ&T			回火马氏体	按供货协议				152	要求有均匀一致的金相组织,能承受高应力的零件,如摇臂

* 编者注:工厂应规定比上述更窄的化学成分范围,并根据不同铸件和不同的牌号要求规定球化元素和合金元素的含量范围。

抗拉强度和延伸率是球墨铸铁最基本的力学性能指标,是球铁材质验收的基本依据,但在特殊情况下,经供需双方同意,允许根据铸件本体所测得的硬度值进行验收,为此,我国国家标准 GB 1348—88 附录 A 规定了以硬度分级的球铁牌号规格(见表 1-2-15)。

表 1-2-15 按硬度分级的球铁牌号(GB 1348~88 附录 A)

硬度牌号	硬度 (HB)	主要基体组织	参考值		
			抗拉强度 σ_b (MPa) ≥	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa) ≥	延伸率 δ (%) ≥
QT-H330	280~360	贝氏体或回火马氏体	900	600	2
QT-H300	245~335	珠光体或回火组织	800	480	2
QT-H265	225~305	珠光体	700	420	2
QT-H230	190~270	珠光体+铁素体	600	370	3
QT-H200	170~230	铁素体+珠光体	500	320	7
QT-H185	160~210	铁素体	450	310	10
QT-H155	130~180	铁素体	400	250	15
QT-H150	130~180	铁素体	400	250	15

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-16 球墨铸铁的常用性能数据

牌 号	抗拉强度 (MPa) ≥	延伸率 (%) ≥	抗拉 0.2% 屈服强度 (MPa) ≥	抗压 0.2% 屈服强度 (MPa) ≥	抗剪强度 (MPa) ≥	弯曲疲劳强度(无缺口) (MPa) ≥	弯曲疲劳强度(带缺口 $r=0.25mm$) (MPa) ≥	轴向拉压疲劳强度 (无缺口) (MPa) ≥	扭转疲劳强度 (无缺口) (MPa) ≥	冲击值 (无缺口) 20℃时 (J)	硬 度 (HB)	拉伸弹性模 量 (GPa)	扭转弹性模量 (GPa)	线膨胀系数 (10^{-6}/K)		导热系数 (W/m·K)	
														20℃	20～400℃	100℃	400℃
QT400－18	400	18	250	275	380	185	115	160	130	12～15	130～180	169	63	10	12.5	37	36
QT400－15	400	15	250	275	380	185	115	160	130	10～13	130～180	169	63	10	12.5	37	36
QT450－10	450	10	310	340	425	205	128	175	145	5～10	160～210	169	63	10	12.5	37	36
QT500－7	500	7	320	350	475	225	135	190	160	2～5	170～230	169	63	10	12.5	36	35
QT600－3	600	3	370	415	570	250	150	210	175	2～5	190～270	172	63	10	12.5	33	32
QT700－2	700	2	420	460	665	270	162	230	190	2～5	225～305	172	63	10	12.5	31	31
QT800－2	800	2	480	530	760	280	169	240	195	2～5	245～335	172	63	10	12.5	31	31
QT900－2	900	2	600	660	855	290	176	245	200	2～5	280～360	172	63	10	12.5	31	31

汽车论坛 http://www.qclt.com

在实际工程应用中，由于屈服强度常常是设计时确定最大许用应力的依据，故其性能数据也是必需的。对于铸态球铁、退火球铁及正火球铁，屈服强度与抗拉强度之比（$\sigma_{0.2}/\sigma_b$）约等于0.6～0.7；对于淬火再回火的球铁，此比值约等于0.7～0.8。

球墨铸铁的常用性能数据列于表1-2-16。

球铁在425℃以下组织和性能相当稳定。铁素体球铁的硬度和强度在高于425℃时开始下降，至600℃时硬度已降至50HB左右。珠光体球铁在高于540℃时珠光体开始粒化，高于600℃时珠光体开始分解，硬度下降加快，并逐渐接近铁素体球铁的硬度，球铁在300～350℃之间已有蠕变产生，这时的设计应力应以持久断裂强度为依据，对于要求尺寸长期稳定的零件，应考虑蠕变问题。

球铁随着温度的下降逐渐发生由塑性向脆性的转变，尤其在脆性转变温度以下，延伸率急剧下降。常温塑韧性低的珠光体球铁随温度下降变得更脆，抗拉强度也随之下降；常温塑韧性高的铁素体球铁虽然随温度下降塑性逐渐丧失，但低温抗拉强度提高。球铁的脆性转变温度取决于化学成分和金相组织，对于在低温下工作的球铁件应选用高韧性的低磷、低硅铁素体球铁。

球墨铸铁在20℃至300℃的最大抗拉设计应力列于表1-2-17。

表1-2-17 球铁的最大抗拉设计应力*

球铁牌号	推荐的最大抗拉设计应力(MPa)			
	20℃	100℃	200℃	300℃
QT400-15	135	130	120	120
QT450-10	140	135	125	125
QT500-7	145	140	130	130
QT600-3	150	145	135	135
QT700-2	175	155	150	150
QT800-2	200	165	160	155

* 按最大设计应力=0.75×比例极限。

1.2.2.3 化学成分

汽车用的球铁件大都采用不热处理的铸态毛坯直接用于切削加工和装配，这主要是为了节省热处理工序及后继的清理氧化皮工序，以缩短生产周期和降低生产费用，并避免热处理可能引起的变形。铸态球铁的组织和性能主要靠正确确定与严格控制化学成分来保证。

1）碳

与灰铸铁不同，球铁中的碳对力学性能的影响相对较小，但对生产出优质铸件却起着相当重要的作用。碳促进石墨化，减小白口倾向，增加铁素体。碳促进镁吸收率的提高，改善球化。碳还改善流动性，增加凝固时石墨析出的体积膨胀，在铸型刚度大时可利用石墨化膨胀来补偿凝固收缩，减小缩孔、缩松倾向。另外，碳提高吸振性、减摩性和导热性。因此，希望球铁的含碳量尽可能地控制在较高的水平。但是碳太高会引起石墨漂浮，特别对厚大铸件，石墨漂浮问题更为突出。铸件出现石墨漂浮会对材质的力学性能和表面粗糙度产生不良的影响。概括起来，确定含碳量的原则是，在保证不产生石墨飘浮的前提下尽可能采用较高的含碳量。通常，球铁原铁水的含碳量为3.8%～3.9%，球化处理后的含碳量为3.6%～3.8%。

2）硅

硅是促进石墨化的元素。随着硅量的增加，铸件的白口倾向减小，铁素体量增加，石墨细化，圆整度提高。硅能固溶于铁素体，使基体强化。硅提高韧性—脆性转变温度，提高低温脆性，因而对在低温条件下工作的铸件，含硅量应严格控制。

确定含硅量主要考虑要求的基体组织的类型及铸件的壁厚。对于珠光体球铁，应在不产生游离渗碳体的前提下把硅量控制得低些，通常控制在2.5%以下；对于铁素体球铁，以在最低工作温度下不发生低温脆变为原则，在此前提下可将硅量控制得高一些。对于汽车底盘的铁素体球铁件，硅量一般不超过2.8%。由于硅降低碳在奥氏体中的溶解度，促进石墨的析出，而壁厚大的铸件，凝固时间长，产生石墨漂浮的倾向大，因此，厚壁铸件应选用较低的含硅量。

3）锰

锰在球铁中作为合金元素而起作用，不像在灰铸铁中有相当一部分的锰和硫化合成硫化锰。在球铁中，锰促进共晶碳化物的形成，在薄壁铸件，碳化物均匀分布在整个断面，在冷却缓慢的厚大铸件，碳化物偏析于共晶团边界而呈网状分布，结果使力学性能恶化。

锰是对铸态球铁力学性能有较大影响的元素。锰促进珠光体的形成，锰量增加，珠光体量随之增加，硬度、屈服强度和抗拉强度也随之提高而延伸率下降。

对铸态铁素体球铁而言，锰必须限制在很低的水平。当铸件壁厚≤20mm时，希望锰控制在0.3%以下。对铸态珠光体球铁而言，由于锰促进白口和偏析，锰也不宜过高，以不超过0.6%为宜。

4）磷

如同在灰铸铁一样，磷促进在共晶团边界形成磷共晶，也增加铸态珠光体的含量。磷使铁素体球铁的韧性—脆性转变温度升高。当含磷量升高达到一定程度时，甚至在室温也会出现脆性断裂。总之，在球铁中磷是有害的元素，特别对铸态铁素体球铁为害尤甚。因此，对球铁的含磷量应十分严格地控制。通常，铁素体球铁要求磷≤0.05%，珠光体球铁可放宽至≤0.07%。法国PSA标准规定汽车铸态铁素体球铁保安件（如转向节）含磷量必须≤0.03%。

5）硫

镁和稀土等球化元素都是强有力的脱硫剂，加入铁水后首先起脱硫反应，脱硫后剩余的球化元素才起球化作用。因此，原铁水中硫含量越高，消耗的镁和稀土越多，产生的镁、稀土硫化物也越多，这些硫化物一部分上浮进入渣中，一部分以夹杂物的形式存在于铸件中。硫化镁的密度为2.8，大部分能上浮到表面；稀土硫化物是高熔点化合物，密度较大（约5.7～7.2），不易从铁水中去除而成为铸件内部的夹杂物；过量的夹杂物会导致球铁力学性能的降低。

长期以来铸铁冶金界认为生产镁处理球铁要求硫越低越好；但近年来的研究表明，在稀土镁球铁的生产中，一定量的高熔点的稀土硫化物可作为石墨化的结晶核心。在薄壁铸态球铁中一定量的硫（约0.02%）具有降低共晶过冷度、减小白口倾向、增加石墨球数、减缓球化衰退及孕育衰退、促进铁素体化和提高球化率的作用。电炉铁水的含硫量一般为0.02%～0.03%，此含硫量范围对稀土镁球铁的稳定生产是有利的。

6）镁和稀土

控制球铁中的残留镁量和残留稀土量对于球铁铸件的稳定生产是至关重要的，既要保证石墨球化所必需的残留镁量和稀土量，又要防止残留镁量和稀土量过高而引起一系列铸造缺陷。残留镁量和残留稀土量对球铁质量的影响及其控制范围如表1-2-18。

表1-2-18 残留镁量和残留稀土量对球铁质量的影响及其控制范围

元素	残留量过低	残留量过高	残留量控制范围(%)
镁	1. 石墨不球化或球化不良； 2. 球化衰退过快	1. 白口倾向增加； 2. 缩孔缩松增加； 3. 夹杂物增加，尤其促进墨渣的形成； 4. 促进生成皮下气孔	0.03～0.06

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

元素	残留量过低	残留量过高	残留量控制范围（%）
稀土	1. 中和干扰元素的作用不足，影响石墨球化等级； 2. 孕育衰退与球化衰退过快	1. 白口倾向增加； 2. 促进碳化物在晶界偏析； 3. 增加珠光体量，不利于铸态铁素体球铁的生产； 4. 石墨圆整度差； 5. 夹杂物增加	0.01~0.03

7）合金元素

①铜——铜是生产铸态珠光体球铁的首选合金元素。在铸态球铁中，随着铜量的增加珠光体量增加，当含铜量从0至0.2%，珠光体增加较缓慢，含铜量从0.2%至0.5%，珠光体增加很快，当含铜量在0.5%以上，珠光体增加又减缓了。铜也是适中的共晶石墨化元素，在球铁中有一定的减小白口倾向的作用，特别在薄壁处。对于铁素体球铁，尤其是铸态铁素体球铁，任何含量的铜都是有害的，其最大允许含量为0.1%。根据铸铁中其它促进珠光体元素的含量及铸件的断面尺寸，铸态珠光体球铁的含铜量在0.5%～1.2%之间选定，铸态混合基体球铁的含铜量在0.2%～0.5%之间选定。

②锡——锡是比铜作用更强的促进珠光体元素，也用于生产铸态珠光体球铁，但不如铜的应用普遍。锡不促进共晶碳化物的形成，在通常的加入量范围对石墨形状也无不利影响。锡促进珠光体的作用10倍于铜，用于铸态珠光体球铁的常规加入量为0.08%～0.10%。锡含量的波动对珠光体量的变化很敏感，所以很少用于生产混合基体球铁。

③铬——铬也是强烈的促进珠光体元素，同时又是强烈的白口化元素，生产铸态铁素体球铁，铬应严格控制在0.05%以下。生产铸态珠光体球铁时，为降低铜的加入量以降低成本，有时加入铬0.1%～0.3%以代替铜，但这时必须降低锰量并加强孕育，以防止形成渗碳体。

④锑——锑是球化干扰元素，球铁中若不含稀土元素，锑的含量必须严格地控制在0.005%以下。锑也是有效的强力促进珠光体的元素，对于含稀土的球铁可加入高达0.05%的锑来获得珠光体球铁。大断面（~300mm）球铁中心部位经常出现粗大的不规则石墨，使力学性能恶化，若含有稀土时加锑0.005%能有效地促进球化并使石墨球数增加。

⑤铋——一方面铋是很强的反球化元素，另一方面铋以微量（0.01%～0.03%）加入球铁铁水中又有增加石墨球数与促进铁素体化的作用。铋的熔点为271℃，沸点为1560℃，在铁中的溶解度极小。铋在铁水中以液相的微粒形式存在，形成许多新的界面，共晶凝固时石墨就在这些界面上析出；此外，铋及其氧化物的密度比铁水大，能够长时间地在铁水中呈悬浮状态，成为石墨球的结晶核心。所以生产铸态铁素体球铁时，铋可作为孕育元素加到铁水中。

镍和铝也有促进珠光体的作用，但作用较弱，因价格昂贵，通常只用于特殊用途的球铁，一般牌号的球铁是不加镍和铝的。

普通牌号的铸态球墨铸铁的化学成分推荐如表1-2-19。

1.2.2.4 热处理

在球铁的实际生产中，有时必须借助于热处理来保证要求的组织和性能，它主要应用于如下场合：

①由于铸件断面太薄而难以避免组织中的过量游离渗碳体时；

②生产高塑韧性的铁素体球铁但不能提供高纯优质金属炉料因而铸态性能达不到要求时；

③服役于低温工况的铁素体球铁件由于必须严格限制含硅量而使铸态得不到完全的铁素体基体时；

表 1-2-19 推荐的铸态球墨铸铁化学成分(%)

牌 号	元 素	铸件壁厚 (mm)			
		<13	13~25	25~50	50~100
QT700-2 QT600-3	C	3.6~3.8	3.6~3.8	3.5~3.7	3.5~3.7
	Si	2.5~2.8	2.2~2.5	2.0~2.3	1.8~2.1
	Mn	0.4~0.5	0.4~0.5	0.5~0.6	0.5~0.6
	P	≤0.06	≤0.06	≤0.06	≤0.06
	S	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.03
	Mg残	0.03~0.05	0.03~0.05	0.035~0.06	0.035~0.06
	RE残	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03
	Cu	0.5	0.5	0.6	0.7
QT500-7	C	3.6~3.8	3.6~3.8	3.5~3.7	3.5~3.7
	Si	2.5~2.8	2.2~2.5	2.1~2.4	2.0~2.3
	Mn	0.3~0.4	0.3~0.4	0.4~0.5	0.4~0.5
	P	≤0.06	≤0.06	≤0.06	≤0.06
	S	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.03
	Mg残	0.03~0.05	0.03~0.05	0.035~0.06	0.035~0.06
	RE残	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03
	Cu	0.3	0.3	0.3	0.4
QT450-10	C	3.6~3.8	3.6~3.8	3.5~3.7	3.5~3.7
	Si	2.5~2.8	2.2~2.5	2.1~2.4	2.0~2.3
	Mn	≤0.3	≤0.3	≤0.35	≤0.35
	P	≤0.06	≤0.06	≤0.06	≤0.06
	S	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.03
	Mg残	0.03~0.05	0.03~0.05	0.035~0.06	0.035~0.06
	RE残	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03
QT400-15	C	3.6~3.8	3.6~3.8	3.5~3.7	3.5~3.7
	Si	2.5~2.8	2.2~2.5	2.1~2.4	2.0~2.3
	Mn	≤0.2	≤0.2	≤0.25	≤0.3
	P	≤0.05	≤0.05	≤0.05	≤0.05
	S	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.03
	Mg残	0.03~0.05	0.03~0.05	0.035~0.06	0.035~0.06
	RE残	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.03

说明：表中的含碳量为炉后碳量，原铁水碳量应高出0.1%~0.2%，碳分析以白口样为准。硅量为终硅量。

④生产厚大断面的球铁需通过改善基体组织提高综合力学性能时；

⑤生产上需要用一种基本成分相同的铁水生产多个牌号的球铁时；

⑥铸态球铁硬度过高影响机械加工时；

⑦由于原材料货源上或生产中冶金控制上条件的限制，铸态球铁的组织和性能波动较大而需通过热处理来弥补铸态的不足以保证质量稳定时；

⑧球铁在焊补时产生局部白口需通过热处理消除时；

⑨球铁件在铸造、焊补或机加工中产生的内应力若足以造成变形、开裂或影响到零件的使用质量需借助热处理来消除或降低内应力时。

对于铸件是否要求热处理或者是否允许热处理，在铸件的供货技术条件中要作出规定，否则由铸件生产厂自行决定。汽车球铁件的热处理可以被规定作为铸件生产中的一个必不可少的工序，也可以作为铸态铸件在组织和性能出现偏差时的一种补救手段。

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.2.2.5 贝氏体球墨铸铁

贝氏体球铁在国外称为等温淬火球墨铸铁（Austempered Ductile Iron，简称 ADI），我国通常称之为奥氏体—贝氏体球墨铸铁，简称奥贝球铁，是 20 世纪末研究开发成功的一种新型球铁，它的出现受到世界各国的普遍重视，被认为是铸铁冶金方面的重大成就。

贝氏体球铁一般是通过等温淬火获得的。当钢铁中的奥氏体过冷到珠光体转变温度区以下马氏体相变温度区以上的中温区内，便发生过冷奥氏体向贝氏体转变，形成贝氏体组织。和钢不同，球铁等温淬火有两个显著的特点：一是球铁含硅量高，因而在等温淬火时抑制了碳化物的析出，可获得无碳化物的贝氏体组织；二是球铁含碳量高，奥氏体比较稳定，因而等温淬火后组织中可保留有相当数量的奥氏体。正是由于这两个特点，使贝氏体球铁具有优异的综合力学性能。

等温淬火的保温温度是决定贝氏体组织和性能的主要因素。当等温温度较高（375℃左右）时，得到上贝氏体＋奥氏体；等温温度较低（280℃左右）时，得到下贝氏体＋奥氏体；当等温温度更低（240℃左右）时，得到下贝氏体＋奥氏体＋马氏体。随着等温保温温度的降低，残余奥氏体含量减少（由 40%左右降至 10%左右），组织细化，强度和硬度提高，而延伸率和冲击韧性下降。总之，贝氏体球铁通过选用不同的等温保温温度可获得强度和韧性综合覆盖面相当宽的力学性能范围。表 1-2-20 列出了贝氏体球铁和其它球铁及钢的力学性能范围的对比。

表 1-2-20 贝氏体球铁与其它球铁及钢的常规力学性能范围

材　料	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	硬　度 (HB)	延伸率 δ (%)
贝氏体球铁	800～1600	600～1100	250～480	16～1
铁素体球铁、混合基体球铁及珠光体球铁	400～960	250～610	130～300	28～2
淬火＋回火球铁	500～1300	350～910	300～400	5～1
调　质　钢	700～1800	450～1450	210～510	25～8

国内外普遍认为，贝氏体球铁是一种具有广阔发展前途的新型铸铁，其优点主要是：

①贝氏体球铁兼有高强度、高韧性和高耐磨性，密度比钢低 10%，有较好的减小噪声的阻尼性能，在综合力学性能上优于碳素锻钢和一般的合金铸钢，可与合金锻钢相媲美，通过采用不同的等温保温温度可获得强度与塑韧性具有不同组合的系列力学性能，能满足多种用途的需要。

②贝氏体球铁具有一般球铁所固有的铸造性能和铸造工艺上的优势，能根据产品和工艺要求更好地对零件进行构形、设计。

③贝氏体球铁在等温淬火的贝氏体相变中，应力小、变形小，所以可用铸态或退火态铁素体球铁（硬度仅 130～180HB）的毛坯于淬火前先进行充分的切削加工，而把等温淬火后的切削加工减少到最低限度。相比之下，调质钢和渗碳钢在淬火时的马氏体相变中，应力与变形要大得多，甚至会产生淬火裂纹，且材质的切削性能无论在热处理前或热处理后均较差。

④贝氏体球铁含有相当数量的残余奥氏体，能有效地通过表面的冷作强化（如滚压或喷丸）来提高疲劳强度。另外，贝氏体球铁零件表面受到外力作用后，该处会有马氏体转变，可使耐磨性提高。

目前，贝氏体球铁的应用还不普遍，其制约因素主要是：

①适用于汽车零件大量生产的等温淬火设备必须在加热温度、升温速度、炉内保护气氛以及淬火介质的加热与冷却等方面具有精确的调控功能，与淬火介质（如熔盐、高温油）相关的防护、环保技术措施必须充分保证，而所有这些都需要较大的投资。曾企图通过增加 Ni、Cu、Mo 等合金元素以求不经等温淬火

汽车论坛 http://www.qclt.com

而直接生产铸态贝氏体球铁，但到目前为止，铸态贝氏体球铁的性能，特别是塑韧性指标，与等温淬火球铁相比差距还相当大。

②贝氏体球铁的切削性能很差，这是由于基体中残留的奥氏体在加工时发生加工硬化或发生马氏体转变所引起。尽管力求做到大部分切削加工在等温淬火前进行，但等淬后的精加工总需进行，这也在一定程度上影响了贝氏体球铁的推广应用。

贝氏体球铁的牌号综合列于表 1-2-21。

表 1-2-21 各国贝氏体球墨铸铁牌号标准

国 别	牌 号	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	延伸率 δ (%)	冲击韧性 α_K 值 (J/cm^2)	硬 度 (HB)
日本（工业标准）	FCD 900A	>900	>600	>8		
	FCD 1000A	>1 000	>700	>5		
	FCD 1200A	>1 200	>900	>2		340～420
瑞士（Sulzer）	GGG 80	800		8		250～310
	GGG 100	1 000		5		280～340
	GGG 120	1 200		2		330～390
芬兰（Kymenite）	K－9007	900	730	>7		280～310
	K－10005	1 000	800	>5		300～350
	K－12003	1 200	1 000	>3		380～430
英国（BCIRA）	950/6	950～1 020		6～12		300～310
	1050/3	1 050～1 130		3～8		345～355
	1200/1	1 200～1 300		1～6		390～400
美国（球铁协会）	1	860	550	10	102	269～321
	2	1 035	690	7	88	302～363
	3	1 200	830	4	61	363～444
	4	1 310	965	1	41	388～477
	5	1 450	1 105			418～512
	6	1 580	1 240			444～555
德国（铸造协会）	GGG80B	800	500	8～15		250～310
	GGG90B	900	650	5～12		270～340
	GGG120B	1 200	950	2～5		330～390
	GGG140B	1 400	1 200	1～2		(43～47 HRC)
	GGG160B					(45～50 HRC)

1.2.2.6 典型的汽车球铁件

1）曲轴

曲轴是球墨铸铁在汽车上应用最成功的典型零件。曲轴是发动机最重要的运动件之一，它在周期变化的气体压力和旋转运动质量的惯性力及其力矩的共同作用下，既承受转矩，又承受弯曲疲劳载荷。大量的统计数据表明，曲轴的失效绝大多数属于弯曲疲劳破坏。

传统的汽车发动机曲轴材料以调质锻钢为主，常用钢号有 45 碳钢、35CrMo 及 40Cr 低合金钢等。自球铁问世以来，从 20 世纪 50 年代起球铁曲轴在汽车中获得应用，并且很快地在汽油机中占有优势；但国外球铁曲轴在柴油机上应用还较少。我国在球铁曲轴的材料、工艺方面进行了大量的试验研究工作，在生产应用方面有较多的经验。

东风 5t 载货汽车的 6100 汽油机采用球铁曲轴已有 20 多年。曲轴主要技术条件为：材质牌号为 QT700－2(铸态)；金相组织为球化等级不低于 4 级，珠光体量 70%～90%，磷共晶量≤2%，渗碳体量≤2%，

磷共晶+渗碳体≤3%；铸件化学成分范围为 C:3.7%～3.9%，Si:1.8%～2.2%，Mn:0.5%～0.7%，P≤0.07%，S≤0.03%，Cu:0.50%～0.70%，Mg:0.04%～0.06%，RE:0.01%～0.02%。铸件 100%通过音频检查球化质量。曲轴硬度：铸态 225～285HB；轴颈经中频淬火后硬度≥50HRC；淬火硬化层厚度 2.4～4.0mm。球铁曲轴经长期的应用考验，证明具有良好的结构强度和优越的耐磨性。据对 100 辆汽车在四川西北平均海拔 2 500mm 山区(80%为碎石路面)的使用跟踪，15 万 km 行驶里程后的拆检表明，曲轴的轴颈椭圆度仅 0.02～0.05mm，圆柱度仅 0.02～0.04mm，仍具有相当长的继续使用寿命。

东风公司在 6100 汽油发动机球铁曲轴取得成功的基础上，又开发了 6102D 柴油发动机球铁曲轴。此曲轴是在 6100 汽油机曲轴基础上将连杆轴颈加大 2mm。由于柴油机的爆发压力比汽油机大 1 倍左右，因而原设计的曲轴采用了 35CrMo 锻钢制造，但即便如此，锻钢曲轴在实际应用中仍时有断轴情况发生。显然，在此情况下直接用球铁取代锻钢生产柴油机曲轴是行不通的。实际上曲轴轴颈与曲柄连接的圆角处是强度最薄弱的部位，曲轴的断裂破坏大都在这里发生，所以关键是寻找一种有效方法对曲轴圆角进行强化处理。于是进行了一系列试验，试验结果见表 1-2-22。

表 1-2-22 6102D 柴油机不同曲轴的对比试验

序号	曲轴材料	强化处理情况	极限疲劳弯矩(N·m)	安全系数 n
1	40Cr	调质，圆角未强化	1 075	1.10
2	35CrMo	调质，圆角未强化	992	0.98
3	QT700－2(铸态)	未强化	668	0.65
4	QT700－2(铸态)	圆角与轴颈激光表面强化	＜1 000	
5	QT700－2(铸态)	圆角与轴颈钢丸喷丸强化	＜900	
6	QT700－2(铸态)	离子氮化	900～1 000	
7	QT700－2(铸态)	离子氮化＋玻璃丸喷丸	1 080	1.09
8	QT700－2(铸态)	圆角滚压强化	1 285～1 619	1.30～1.72

从表 1-2-22 可以看出，QT700－2 铸态曲轴经圆角滚压后弯曲疲劳强度提高 1 倍左右，安全系数达到 1.3 以上，能满足 6102D 柴油机的使用要求。在上述试验基础上，选定圆角滚压的球铁曲轴装机考核，通过了全速全负荷整机台架试验，验证了滚压的球铁曲轴的可靠性。由于原设计采用 35CrMo 锻钢曲轴，改为球铁后，材料的弹性模量由 210GPa 降为 170GPa，系统刚度发生了变化，扭转减振器相应地重新匹配。滚压强化的球铁曲轴已开始批量装车投放市场。与 35CrMo 锻钢曲轴相比，降低成本 50%～60%，且切削加工性能明显优于锻钢，用球铁代替锻钢制造曲轴，效益十分显著。

目前世界各国的汽车发动机球铁曲轴相当广泛地采用了轴颈中频淬火和圆角滚压强化的工艺，但球铁曲轴选用的牌号差别较大，从 550－6（SAE J434 推荐的用于曲轴的牌号）至 600－3、700－2、800－2、900－2，甚至更高的牌号（如意大利菲亚特球铁曲轴采用的 GH90－52－5 牌号，$\sigma_b \geqslant 900MPa$，$\sigma_{0.2} \geqslant 520MPa$，$\delta \geqslant 5\%$），材质的珠光体量也从 60%至＞90%不等。事实上与其追求高牌号不如采用圆角滚压强化，因为提高牌号对提高曲轴的疲劳强度作用不大，其效果远不及圆角滚压强化。至于珠光体量，只要保证中频淬火的工艺要求在 75%左右就可以了，过高的珠光体量反而影响滚压效果，而且冲击韧性及延伸率也有所下降，且切削性能也降低。

2）驱动桥壳体

驱动桥壳体是汽车底盘中最大的壳体零件。通常的桥壳有两种：一是用冲压件焊接组合；一是整体铸造。整体铸造的桥壳具有强度高、刚性大的特点，因而载货汽车应用较多。

东风 5t 载货汽车的后桥壳原设计系采用可锻铸铁（KT350－10），在投产时决定改用退火铁素体球铁，以后又改用为铸态铸素体球铁，牌号为 QT450－10。近 20 年来，已有上百万辆装有铸态铁素体球铁

桥壳的汽车投入使用，曾重点跟踪考查高寒地区（黑龙江省）及地形复杂的高原地带（四川、云南地区）桥壳实际使用的可靠性，结果表明，铸态铁素体球铁桥壳能胜任各种苛刻条件下的使用，经得起汽车在高原山区的砂石路面或泥泞路面的超载行驶，也经得起在 -40℃高寒地区长时间行驶考验。

第一汽车集团公司在CA1090汽车改型时，为适应新车型载货量增加、功率加大、车速加快的要求，也将原来的可锻铸铁桥壳等底盘铸件改为铸态铁素体球铁。桥壳的化学成分、金相组织和力学性能见表1-2-23。

表 1-2-23 CA1090球铁桥壳的化学成分、金相组织和力学性能*

化学成分（%）							金相组织			力学性能		
C	Si	Mn	P	S	Mg	RE	石墨	基体	游离碳化物	σ_b(MPa)	δ(%)	HB
3.6	2.6				0.03	0.01	球化等级	铁素体		460	13	152
~	~	≤0.5	≤0.06	≤0.02	~	~	2~3级	≥75%	无	~	~	~
3.8	2.8				0.05	0.02	球径5~6级			550	21	159

* 根据一个月的检查记录汇总。

铸态铁素体球铁与原可锻铸铁相比，抗拉强度提高30%。桥壳经台架试验，可锻铸铁桥壳的疲劳寿命在50万次左右，而铸态铁素体球铁桥壳超过100万次仍无任何损坏。

3）发动机齿轮

东风汽车公司从美国康明斯（Cummis）公司引进了B系列柴油发动机产品技术，该发动机的六只传动齿轮（即凸轮轴齿轮、燃油泵齿轮、曲轴齿轮、空压机驱动齿轮、惰轮及主动齿轮）原采用AISI1022锻钢轮坯加工成形，再经渗碳、精磨齿。为降低生产成本，康明斯公司经过五年的试验研究，成功地实现用贝氏体球铁代替渗碳钢制造上述齿轮。和表面渗碳钢齿轮相比，贝氏体球铁齿轮有如下优点：

①重量轻：由于球铁中含有石墨，密度比钢小10%；

②运转时噪声小：石墨可使振动衰减，故可减小噪声；

③石墨本身具有自润滑作用，又有吸收及储存润滑油的作用，因而齿轮副具有优良的减摩与耐磨性能；

④因铸造方法可得到形状复杂、尺寸精确的齿轮毛坯，加工余量小，金属利用率高；

⑤贝氏体球铁齿轮的毛坯材料是退火铁素体球铁，具有十分优越的切削性能，刀具磨损小，加工效率高；

⑥等温热处理周期短，可大幅度节约能源，同时由于等温淬火变形小，可省去淬火后的精磨工序；

⑦贝氏体球铁基体组织中存在着对应变较敏感的残余奥氏体，它们在受力时转变为马氏体，使表面硬度和耐磨性提高；

⑧原材料及工艺成本低，齿轮的综合制造成本低。

贝氏体球铁齿轮铸坯的化学成分、金相组织和力学性能列于表1-2-24，等温淬火的热处理规范及热处理后的金相组织和力学性能列于表1-2-25。

表 1-2-24 贝氏体球铁齿轮铸坯的化学成分、金相组织和力学性能

化学成分（%）							金相组织(退火态)		力学性能(退火态)		
C	Si	Mn	P	S	Mg	RE	石墨	基体	σ_b (MPa)	δ (%)	HB
3.5 ~3.8	2.6 ~3.0	≤0.4	≤0.06	≤0.025	0.03 ~0.05	0.01 ~0.03	球化等级 1~3级 石墨大小 5~7级	珠光体 ≤5% 游离碳化物≤2%	≥400	≥15	130 ~180

表 1-2-25 贝氏体球铁齿轮等温淬火规范及热处理后的金相组织和力学性能

等温淬火规范	金相组织*(基体)			力学性能**		
加热温度 900℃ 保温时间 2h 等温温度(235±5)℃ 等温保温时间 2h	贝氏体	白亮区	铁素体	σ_b (MPa)	δ (%)	硬度 HRC
	1～3 级	1～3 级	1～3 级	1248～1406	2.2～3.6	45～52

* 金相试样取自齿轮本体，评级按 JB3021－B1；

** 力学性能中的抗拉强度和延伸率按照砂型铸造的模型试块（厚度 25mm）加工的标准试棒随炉等温热处理后测试；硬度按照齿轮本体测试。

由于齿轮采用等温温度较低的热处理规范，齿轮轮齿的接触疲劳强度较高而弯曲疲劳强度相对较低，为了提高抗疲劳综合性能，等淬热处理后的齿轮在磨孔及表面精整后必须进行齿面喷丸强化处理。通过对贝氏体球铁齿轮进行单齿弯曲疲劳性能试验，并与表面硬化钢齿轮进行对比，结果列于表 1-2-26。从表中的数据可以看出，喷丸强化处理大幅度提高了等温淬火球铁齿轮的疲劳性能，基本达到目前我国表面硬化钢齿轮所达到的水平。

表 1-2-26 等温淬火球铁齿轮与常用硬化钢齿轮抗弯曲疲劳性能的对比

齿轮材料	处理工艺	齿轮疲劳极限应力(MPa)	寿命基数
贝氏体球铁	235℃等温淬火，未喷丸强化	179	10^7
贝氏体球铁	235℃等温淬火，经喷丸强化*	324	10^7
20CrMnMo 钢	渗碳淬火	246	3×10^5
20Cr2Ni4 钢	渗碳淬火	325	3×10^5
25Cr2MoV 钢	渗碳淬火	345	3×10^5
25Cr2MoV 钢	气体氮化	331	3×10^5

* 喷丸丸粒为 ϕ0.6 铸钢丸，喷丸强度为 0.35～0.45（阿尔门 A 型试片弧高值），覆盖率≥98%。

球铁铸件以其在性能上及价格上的优势而为各个工业部门所广泛采用。在国际市场上，几种毛坯的平均价格比大致为：灰铸铁件∶球铁件∶可锻铸铁件∶碳钢铸件＝1∶1.5∶2∶2.3。应用球铁件比应用其它黑色金属毛坯，常能以同样的成本花费换取更高的性能回报。表 1-2-27 列出 1970 年及 1997 年全世界各类黑色金属铸件总产量的对比。从表可看出，1997 年比 1970 年，灰铸铁件、可锻铸铁件及铸钢件的产量分别下降 36.1%、65.1%及 46.5%，而球铁件产量提高了 235.1%。

表 1-2-27 1970 年及 1997 年世界黑色金属铸件产量对比

	产量 (万 t)			
	灰铸铁件	可锻铸铁件	铸钢件	球铁铸件
1970 年①	5085.11	318.91	1035.80	394.28
1997 年②	3249.91	111.45	554.01	1321.24
$\frac{1997\text{年产量}-1970\text{年产量}}{1970\text{年产量}}\times100\%$	−36.1%	−65.1%	−46.5%	+235.1%

资料来源：①辽宁科学技术出版社于 1988 年出版的《国外铸造生产》。

②Modern Casting，1998 年第 12 期。

汽车工业是球铁的主要用户，在发达的工业化国家中，球铁件产量中大约 20%～40%用于汽车。表 1-2-28列出国内外一些汽车球铁件的简要技术数据。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-28 一些汽车球铁件的化学成分、金相组织和力学性能

零件名称	化学成分（%）									金相组织		力学性能				备注
	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE	Cu	其它	石墨	基体	σ_b（MPa）	δ（%）	α_k 值（J/cm²）	硬度（HB）	
索菲亚汽车发动机曲轴（意大利）	3.56	2.24	0.32	0.024	0.006	0.034	无	0.70	–	球化 2～3级 大小 6级	珠光体 90% 铁素体 10%	850	4.0	51	轴颈中频淬火 HRC≥48	从零件本体取样测定
花冠轿车转向节（日本）	3.62	2.60	0.31	0.021	0.005	0.025	<0.01	<0.03		球化 1～2级 大小 7级	铁素体 100%	未测定			未测定	从零件本体取样测定
花冠轿车制动臂（日本）	3.30	2.74	0.32	0.019	0.007	0.026	<0.01	<0.03	–	球化 1～2级 大小 7级	铁素体 90%～95% 珠光体 5～10%	未测定			134～149	从零件本体取样测定
花冠轿车制动鼓（日本）	3.57	2.86	0.35	0.020	0.012	0.032	<0.02	<0.03	–	球化 1～2级 大小 7级	铁素体 90%～95% 珠光体 5%～10%	未测定			174	从零件本体取样测定
花冠轿车曲轴（日本）	3.30	2.24	0.32	<0.03	0.011	0.04	0.014	无	–	球化 1～2级 大小 7级	珠光体 90%～95% 铁素体 5%～10%	870	–	47.6 56.4 51.0	269～277	从零件本体取样测定

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

零件名称	化学成分（%）									金相组织		力学性能				备注
	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE	Cu	其它	石墨	基体	σ_b（MPa）	δ（%）	a_K值（J/cm²）	硬度（HB）	
D6114球铁曲轴（中国）	3.60~3.90	2.20~2.60	≤0.4	≤0.05	≤0.03	0.05~0.07	0.01~0.03	0.5~0.7	Mo 0.20~0.35	球化1~3级	珠光体≥90%	Y型试块（正火）σ_b≥850MPa δ≥3% HB≥255				根据技术条件（曲轴正火后经氮化及圆角滚压）
IVECO轻型载货车国产化后桥壳（中国）	3.80~3.95	2.20~2.60	≤0.4	≤0.05	≤0.02	0.03~0.06	0.02~0.04	0.3~0.4	–	球化1~2级 大小6级	珠光体35%~45% 铁素体65%~55%	Y型试块（铸态）σ_b≥600MPa δ≥8% 187~213HB				根据技术条件
东风载货车后桥壳（中国）	3.60~3.90	2.50~3.0	≤0.4	≤0.07	≤0.03	0.03~0.05	0.03~0.05	–		球化1~4级 大小5~6级	铁素体≥75% 珠光体≤25%	Y型试块（铸态）σ_b≥450MPa δ≥10%				根据技术条件
重型载货车轮毂（前苏联）	3.40~3.70	2.60~2.90	≤0.4	≤0.06	≤0.012	0.03~0.06	微量	≤0.1	Ni ≤1.0 Ti ≤0.03	球化1~3级	铁素体+珠光体的混合基体	Y型试块（铸态）σ_b:549~637 δ:7%~14% 175~205HB				根据技术条件及实测性能统计

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.2.3 蠕墨铸铁

1.2.3.1 特点

金相组织中石墨主要呈蠕虫状的铸铁称为蠕墨铸铁。蠕虫状石墨是介于球状石墨和片状石墨之间的一种石墨形态，在光学显微镜下，石墨呈蠕虫状，与片状石墨相比，石墨较短、较厚，端部较圆；但在扫描电镜下观察，蠕虫状石墨结构上接近于球状石墨，呈致密状，故蠕墨铸铁在美、英等国又称为致密石墨铸铁。1977年国际铸造技术委员会对这种铸铁定名为致密/蠕虫状石墨铸铁（Compacted/Vermicular Graphite Cast Iron，简称C/V铸铁）。在我国，这种铸铁的正式命名为蠕墨铸铁，简称蠕铁。蠕墨铸铁有如下特点：

①由于蠕虫状石墨是介于片状石墨与球状石墨之间的过渡型石墨，所以蠕铁的性能大体上介于灰铁与球铁之间，但采用不同的工艺方法制取蠕铁，能得到不同类型的蠕虫状石墨，它们对蠕铁的力学性能有一定的影响（见表1-2-29）。

表1-2-29 蠕墨铸铁的石墨类型及力学性能

蠕虫状石墨类型	制取条件	石墨形状特征			抗拉强度 σ_b (MPa)	延伸率 δ (%)
		最大长度 l (μm)	最小厚度 d (μm)	长厚比 l/d		
I	用钙对铁水强烈脱硫至S<0.002%，然后快速凝固	20	10	2～4	300～450	2～5
II	用铈或以铈为主的稀土合金处理铁水得到	150	50	2～5	350～500	3～9
III	用镁钛复合合金处理铁水得到	150	20	3～10	300～450	1～3.5

②在蠕墨铸铁的金相组织中一般含有少量的球状和团块状石墨，通常规定蠕虫状石墨占石墨总量的百分率（即蠕化率）必须≥80%，但在某种情况下也允许将蠕化率放宽至≥50%。由于蠕铁中所含的球状石墨比例越高，其力学性能也越高，因此，离开了对蠕化率的严格控制，单纯地满足于达到规定的性能指标是没有任何意义的。蠕化率的严格控制是评定蠕铁性能的基础和前提，蠕化率是蠕铁质量验收的基本指标。

③蠕铁基体组织对力学性能的影响不同于灰铁和球铁。在灰铁中，基体只影响强度和硬度，随着基体中珠光体量的增加（或铁素体量的减少），强度和硬度提高，而不论基体是什么组织，延伸率基本上都接近于零。在球铁中，基体不仅影响强度和硬度，而且强烈地影响塑韧性，随着基体中铁素体量的增加及珠光体量的减少，在降低强度和硬度的同时，大幅度地提高延伸率和冲击韧性。蠕铁中基体的珠光体量对提高抗拉强度、屈服强度和硬度作用较大，对降低延伸率有影响，但影响的程度不像球铁那样显著（见表1-2-30）。

表1-2-30 不同基体的灰铁、球铁及蠕铁的力学性能

铸铁类别 / 基体 / 力学性能	灰铁		球铁		蠕铁	
	珠光体	铁素体	珠光体	铁素体	珠光体	铁素体
最小抗拉强度（MPa）	200	80	700	350	450	250
最小屈服强度（MPa）	—	—	420	220	315	175
最小延伸率（%）	≈0	≈0	2	22	1	3
硬度HB	≥180	≤150	229～302	≤160	207～269	≤170

汽车论坛 http://www.qclt.com

④蠕墨铸铁壁厚超过15mm时，其断面敏感性比灰铸铁小得多，即随着断面厚度的增加，力学性能的下降比较缓慢。但当蠕铁壁厚在15mm以下时，随着断面厚度的减小，冷却速度提高，组织中的球状石墨增多，蠕化率降低，力学性能向球铁靠近。汽车铸件大多数是薄壁结构件，有的壁厚仅5mm左右或更小，要得到高蠕化率是比较困难的，在这种情况下往往不得不放宽对蠕化率的要求，例如把铸件的蠕化率规定为≥50%，而不是≥80%。

⑤屈服强度是金属的重要性能，设计时要采用适当的安全系数以保证整个结构不超过屈服极限。蠕铁的屈强比（$\sigma_{0.2}/\sigma_b$）为0.7－0.8，球铁为0.6－0.65，铸钢为0.5－0.55。较高的屈强比是蠕墨铸铁力学性能的一个特点。

⑥在一定温度下，铸铁的弹性模量主要决定于石墨在基体中的削弱作用。由于蠕铁的石墨形态介于球铁与灰铁之间，所以其弹性模量也介于球铁与灰铁之间；但蠕铁和球铁一样，在弹性范围内存在比例极限，当应力低于比例极限时，应力与应变成正比，弹性模量为常数。灰铸铁没有比例极限，弹性模量不是常数，而是随应力的增加而下降（见表1-2-31）。

表1-2-31 球铁、蠕铁及灰铁在不同温度及应力下的弹性模量（GPa）

材质 / 温度 / 拉伸应力（MPa）	球铁				蠕铁				灰铁			
	20℃	100℃	200℃	300℃	20℃	100℃	200℃	300℃	20℃	100℃	200℃	300℃
0	168	162	158	152	152	150	150	145	125	117	115	115
100	168	162	158	152	152	150	150	145	115	110	105	100
200	168	162	158	152	152	150	150	145	105	92	90	85

⑦蠕墨铸铁具有优良的综合抗热疲劳性能。热疲劳是材料在交变温度作用下的疲劳破坏。热疲劳失效有变形、龟裂与开裂三种形式。蠕铁的抗变形能力优于球铁，特别是优于铁素体球铁，而抗开裂能力与抗龟裂能力比球铁差但优于灰铁。从抗变形、抗开裂与抗龟裂综合考虑，蠕铁有一定优势。

⑧铸铁中的石墨对于耐磨性具有两重性：一方面石墨有自润滑性能，又能吸附、储存润滑油，无论在干摩擦条件下或在润滑下对耐磨性起有利作用；但另一方面，石墨削弱基体组织，又对耐磨性起不利作用。蠕虫状石墨是介于片状石墨和球状石墨之间的过渡形态的石墨，对基体的削弱作用不似片状石墨严重，但其自润滑性与吸油、储油能力，即在保持良好润滑性方面优于球状石墨。因此，蠕铁具有较好的耐磨与减摩的综合性能。

⑨蠕铁的物理性能和工艺性能大致介于灰铁和球铁之间，但随着蠕化率降低，这些性能逐渐向球铁靠近。生产蠕铁铸件时，一般可采用和灰铸铁大体相同的铸造工艺，但对于致密性要求高或蠕化率波动范围较宽时，则应按球铁铸造工艺考虑，注意补缩问题，以保证铸件的内在质量。蠕铁有较高的强度和一定的塑韧性，其切削加工一般可按加工相同硬度的球铁来选用刀具及确定加工工艺。

⑩生产蠕铁比生产球铁需要更严格的工艺控制。制取球铁只需保证球化，球化元素含量允许范围较宽；制取蠕铁希望得到高蠕化率，既要防止球化，又要防止出现片状石墨，因而铸铁中镁、稀土等元素的含量允许范围较窄，只有具备了一定的工艺技术条件才能实现铸件的大批量稳定生产。

1.2.3.2 技术标准和性能指标

目前只有很少数的国家公布了正式的蠕铁技术标准。下面提供的是美国的ASTM A842－85和我国的JB 4403—87所规定的蠕铁力学性能指标（表1-2-32）。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-32 蠕铁的常规力学性能

标准号	牌号	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	延伸率 δ (%)	硬度 HB	基体组织
JB 4403—87	RuT260	≥260	≥195	≥3.0	121～197	铁素体
	RuT300	≥300	≥240	≥1.5	140～217	铁素体－珠光体
	RuT340	≥340	≥270	≥1.0	170～249	珠光体－铁素体
	RuT380	≥380	≥300	≥1.0	193～274	珠光体
	RuT420	≥420	≥335	≥1.0	200～280	珠光体
ASTM A842－85	250	≥250	≥175	≥3.0	≤179	铁素体
	300	≥300	≥210	≥1.5	140～207	铁素体－珠光体
	350	≥350	≥245	≥1.0	163～229	珠光体－铁素体
	400	≥400	≥280	≥1.0	197～255	珠光体
	450	≥450	≥315	≥1.0	207～269	珠光体

在实际工程应用中，最常用的牌号是 RuT300，其基体组织为铁素体≥50%，采用铸态生产，无需加入合金元素，力学性能上兼顾了强度和一定的塑韧性，硬度适中，利于切削加工。此牌号蠕铁的常用性能数据列于表 1-2-33。

表 1-2-33 RuT 蠕墨铸铁的常用性能数据

力学性能									
抗拉强度 (MPa)	0.2%屈服强度 (MPa)	延伸率 (%)	抗弯强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	抗剪强度 (MPa)	弯曲疲劳强度 (MPa)		弹性模量 (GPa)	硬度 HB
						无缺口	带缺口		
≥300	≥240	≥1.5	≥500	≥600	≥290	≥135	≥85	152	140～217
导热系数 (W/m·K)						线膨胀系数 $\alpha^{10^{-6}}$/K			
20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	20～100℃	20～400℃	20～600℃	
44	44	45	43	42	39	12.1	13.2	13.7	

1.2.3.3 化学成分

通常的蠕铁铸件是以金相组织和力学性能作为材质验收的依据，如果技术条件没有特别提出要求，化学成分是不作为验收依据的。实际上化学成分是保证铸件组织、性能与质量的基础，严格控制化学成分是生产优质蠕铁铸件的重要条件。

对蠕铁化学成分中碳、硅、锰、磷、硫五个基本元素含量的要求与球墨铸铁是相同的，但在合金元素与微量元素的含量要求上却有所不同：

①蠕墨铸铁金相组织的显著特征之一是在蠕虫状石墨的周围伴随着大量的铁素体，通常得到的蠕铁基本上都是铁素体量多而珠光体量少。为了获得珠光体量 50%以上的蠕铁，就必须加入促进形成珠光体的合金元素，其加入量应高于制取同一基体类型的球铁近一倍。

②在球铁生产中，钛是球化干扰元素，对于不含稀土的镁球铁，钛量要求≤0.05%，对稀土镁球铁，钛量最大也只能至 0.1%。在蠕铁生产中当用镁作为变质元素时，钛却起抑制球化、促进蠕化的作用，钛常被特意加入使之在铸铁中的含量达到 0.08%以上，甚至可至 0.20%。

③在球铁生产中，通常残留镁量范围为 0.03%～0.06%，残留稀土量范围为 0.01%～0.03%，即便超过上限，也不影响得到球铁。在蠕铁生产中，对残留镁量和残留稀土量的上下限要求都很严格，低于下限，出现

汽车论坛 http://www.qclt.com

片状石墨，可能成为灰铁，高于上限，出现过多球状石墨，可能成为球铁，所以允许的含量范围较窄。

表 1-2-34 为推荐的铸态蠕铁（壁厚≤25mm）的基本元素含量；表 1-2-35 为以增加蠕铁珠光体为目的的合金元素推荐含量；表 1-2-36 为控制蠕铁蠕化的残留元素的含量范围。

1.2.3.4 热处理

虽然用于灰铁和球铁的各种热处理均适用于蠕铁，但实际生产中蠕铁铸件采用热处理的并不多，其基体组织和力学性能的保证主要是通过化学成分的合理搭配和铸造工艺的控制来实现的，只有当铸态的组织和性能达不到要求时才借助于热处理。

蠕铁的热处理主要应用于如下场合：

①当铸态铸件中含有过多的游离渗碳体甚至出现白口时，可通过高温退火以消除之。

②蠕铁的铸态组织通常有大量铁素体存在，可通过正火来提高珠光体量，以提高强度和耐磨性；但正火仍难以得到 90%以上的珠光体，如果要得到完全的珠光体基体，还必须适当加入铜、锡等珠光体化合金元素。

③生产高塑韧性牌号的蠕铁（RuT260）一般需通过退火热处理。

④低温下应用的铁素体蠕铁需对含硅量严格限制以防止冷脆性，但硅量不足又会影响铸态的充分铁素体化，因此常需再进行铁素体化退火。

表 1-2-34 推荐的铸态蠕墨铸铁的基本元素含量范围

元素（%） 壁厚（mm） 蠕铁类型	碳当量		碳		硅		锰		磷		硫	
	≤10	>10~25	≤10	>10~25	≤10	>10~25	≤10	>10~25	≤10	>10~25	≤10	>10~25
铁素体蠕铁	4.6~4.8	4.6~4.8	3.7~3.9	3.7~3.9	2.8~2.5	2.8~2.5	≤0.3	≤0.4	≤0.06	≤0.06	≤0.025	≤0.025
混合基体蠕铁	4.5~4.7	4.5~4.7	3.7~3.9	3.7~3.9	2.5~2.2	2.5~2.2	0.4~0.5	0.5~0.6	≤0.08	≤0.08	≤0.025	≤0.025
珠光体蠕铁	4.5~4.7	4.5~4.7	3.7~3.9	3.7~3.9	2.5~2.2	2.3~2.0	0.5~0.6	0.5~0.6	≤0.08	≤0.08	≤0.025	≤0.025

注：①表中的化学成分是炉后铸件的成分；

②碳当量＝碳＋$\frac{1}{3}$（硅＋磷）；

③珠光体量≥50%的蠕铁还需加合金元素。

表 1-2-35 蠕铁中促进珠光体元素的含量范围

基体要求的珠光体量（%）	合金元素含量（%）
50~75	Cu：0.6~1.2
75~100	Cu（0.5~1.0）＋Sn（0.06~0.10） 或 Cu（0.5~1.0）＋Sb（0.03~0.05） 或 Cu（0.8~1.2）＋Cr（0.2~0.4）

表 1-2-36 控制蠕铁蠕化的残留元素含量范围

制取蠕铁方法	原铁水平均含硫量（%）	残留元素含量范围（%）
用稀土合金对铁水变质处理	0.025	RE：0.045~0.075
	0.075	RE：0.055~0.12
用 Mg-Ti 合金对铁水变质处理	0.03	Mg：0.015~0.03 RE：0.005~0.01 Ti：0.08~0.20

⑤当铸件断面差大且形状复杂时，可通过时效处理来消除内应力。

1.2.3.5 蠕墨铸铁的应用

自1947年球铁问世起，人们同时也发现了蠕铁，但初期把它仅仅看成为球铁球化的不良产物而未加以重视。60年代后期，国内外对蠕铁开始给予重视，认为它是一种具有独特性能和用途的新型铸铁材料，开发出镁钛系及稀土系的系列蠕化剂，开始了蠕铁的工业生产和应用。与灰铁和球铁相比，蠕铁生产中对工艺控制有更严格的要求，在大量生产中要使铸件的组织和性能稳定，技术上有更高的要求。目前国内外蠕铁的生产和应用还不够普遍。

90年代初，瑞典Sintercast公司开发出适用于蠕铁大量流水生产的新工艺，该工艺用单一的镁作为蠕化变质元素，把喂丝变质处理、热分析法快速检测与电子计算机技术结合起来形成一个依靠电子仪器对蠕化处理过程自动控制与调整的运行系统，从出铁水至蠕化变质处理完毕，全程仅需4min，得到的蠕铁蠕化率≥80%。Sintercast公司宣称，从1992年至1995年，此工艺系统在世界30多个铸造厂试用取得成功。德国奥贝尔汽车公司采用此项工艺试制排量2.5L的V6发动机缸体，用于Calibra牌赛车上。试制的蠕铁缸体与原设计的灰铁缸体的对比见表1-2-37。

表1-2-37 2.5LV6发动机蠕铁缸体与灰铁缸体的比较

	项 目	单 位	灰铁缸体（牌号250）	蠕铁缸体	效 果
质量	气缸间的壁厚	mm	7	3	-57%
	珩磨面粗糙度 Ra	μm	0.32	0.18	-44%
	气缸圆柱度	μm	32	9	-72%
	气缸磨损量	比率	100	60	-40%
性能	质 量	kg	56.5	45.0	-20%
	功 率	kW	126	344	+172%
	缸体质量/功率	kg/kW	0.25	0.07	-71%

蠕墨铸铁主要应用于如下场合：

①铁素体蠕铁用于制造在温度交替变化工况下服役的零件，特别是要求有综合的抗热疲劳性能（抗变形、抗开裂、抗龟裂）的零件。

②珠光体蠕铁用于制造经受剧烈滑动摩擦和热冲击，并对机械强度和耐磨性有高要求的零件。

③混合基体蠕铁用于制造对强度有较高要求，或者要求兼有耐磨性、致密性、耐热性的零件；原设计为灰铸铁，为了轻量化的目的要求减小壁厚减轻重量时，可考虑改用混合基体蠕铁。

JB 4403—87附录B列出各种牌号的蠕铁性能特点与应用举例，可作为选用蠕铁的参考（见表1-2-38）。

蠕铁在车用零件上的应用实例见表1-2 39。

表1-2-38 各种牌号蠕墨铸铁的性能特点与应用举例

牌 号	性 能 特 点	应 用 举 例
RuT420 RuT380	强度高，硬度高，具有高的耐磨性和较高的导热率。铸件材质中需加入合金元素或经正火热处理，适用于制造要求强度或耐磨性高的零件	活塞环、气缸套、制动盘、玻璃模具，制动鼓、钢珠研磨盘、吸淤泵体等

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

牌号	性能特点	应用举例
RuT340	强度高和硬度较高，具有较高的耐磨性和导热率，适用于制造要求较高强度、刚度及要求耐磨的零件	带导轨面的重型机床件、大型龙门铣横梁、大型齿轮箱体、盖，座、制动鼓、飞轮、玻璃模具，起重机卷筒、烧结机滑板等
RuT300	强度和硬度适中，有一定的塑韧性，导热率较高，致密性较好，适用于制造要求较高强度及承受热疲劳的零件	排气管、变速器壳、气缸盖、纺织机零件，液压件，钢锭模，某些小型烧结机齿条等
RuT260	强度一般，硬度较低，有较高的塑韧性和导热率，铸件一般需退火热处理，适用于制造承受冲击负荷及热疲劳的零件	增压器废气进气壳体、汽车、拖拉机的某些底盘零件等

表 1-2-39 蠕铁在汽车零件上的应用实例

公司名称	零件名称	化学成分	金相组织	力学性能	应用情况
东风汽车公司	6100 汽油机排气管	C：3.7%～3.9% Si：2.4%～2.8% Mn：≤0.5% P：≤0.1% S：≤0.035% Ti：0.06%～0.15% Mg 残：0.02%～0.03% RE 残：0.01%～0.02%	蠕化率≥50% 铁素体≥50%	σ_b≥300MPa δ≥1.5% HB≤221	用于东风 5t 载货汽车，比灰铁排气管抗裂性好，寿命提高约 3 倍；与球铁排气管比较，变形小。从 1985 年至 1997 年累计生产 17 万根
第一汽车集团公司无锡柴油机厂	6100 柴油机缸盖	C：3.6%～3.9% Si：2.4%～2.8% Mn：0.5%～0.8% P：≤0.1% 原铁水 S：0.06%～0.09% 铸件 S：≤0.035% RE 残：0.05%～0.10%	蠕化率≥50% 铁素体≥50%	σ_b≥300MPa δ≥1.5% 140～217HB	用于中型载货车，与原来的 Cu-Mo 合金铸铁缸盖比较，提高抗裂性，降低渗漏率。年产量 5 万件
英国 Parkfield Ltd	制动盘	C：3.5%～3.8% Si：1.8%～2.2% Mn：≤0.45% P：≤0.05% S：≤0.02% Ti：≥0.03% Cu：～1.3% Mg 残：0.02～0.03	蠕化率≥80% 珠光体≥75%	σ_b≥385MPa δ≥2% 179～222HB	用于时速 200km 的高速内燃机车，经 16 万 km 行车试验，灰铁制动盘摩擦面产生严重龟裂，磨损 1～2mm，蠕铁制动盘不产生龟裂，磨损量≈0

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

公司名称	零件名称	化学成分	金相组织	力学性能	应用情况
德国奥贝尔汽车公司	2.5L V6缸体	C：3.65% Si：2.14% Mn：0.40% S：0.015% Mg残：0.012% Cr：0.03% Cu：0.29% Sn：0.043%	蠕化率 90% 珠光体 70%	σ_b≥420MPa 179～192HB	用于350kW发动机的Calibra赛车。

1.2.4 可锻铸铁

1.2.4.1 分类

可锻铸铁由白口铸铁经退火热处理而得到。退火有石墨化退火与脱碳退火之分：石墨化退火得到的可锻铸铁，断口呈黑绒色，传统上称之为黑心可锻铸铁；脱碳退火得到的可锻铸铁，断口呈白色，称之为白心可锻铸铁。实际上各国对可锻铸铁的分类并不一致。英国、意大利、丹麦、瑞典、日本、印度和我国以及国际标准化组织把黑心可锻铸铁定义为只限于铁素体可锻铸铁，因此，他们将可锻铸铁分为三类：即黑心可锻铸铁（限于铁素体基体的）、珠光体可锻铸铁和白心可锻铸铁。德国、法国、比利时及挪威等国将可锻铸铁只分成黑心与白心两类，石墨化退火得到的铁素体可锻铸铁和珠光体铸铁都归入黑心可锻铸铁一类中。

球墨铸铁问世以后，在我国出现了一种介于球铁与可锻铸铁之间的球墨可锻铸铁，其组织和性能基本上处于球铁与可锻铸铁之间。这种铸铁目前未建立牌号标准。

各种可锻铸铁的退火工艺、退火后的组织特征及化学成分的大致范围列于表1-2-40。

表1-2-40 各类可锻铸铁的退火工艺、组织和化学成分范围

类别	退火工艺	组织	化学成分范围（%）
黑心可锻铸铁	白口铸铁坯料加热到奥氏体化温度（950℃）保温，进行第一阶段石墨化，使共晶碳化物分解，析出团絮状石墨，然后冷却到共析转变温度（730℃）再充分保温，使奥氏体分解为铁素体和石墨。一般退火周期需40～60h，若铸造白口铸坯时经孕育处理（加入0.005%～0.01%铋及0.0015%～0.0025%硼）可缩短退火周期	铁素体＋团絮状石墨，断口呈黑绒色	C：2.2%～3.0% Si：0.8%～1.6% Mn：0.25%～0.6% P：≤0.2% S：≤0.15%
珠光体可锻铸铁	白口铸铁坯料加热到奥氏体化温度（950℃）保温，进行第一阶段石墨化，析出团絮状石墨，然后冷却到840～870℃使奥氏体中的化合碳降至0.75%左右时空冷或油淬，再经回火处理。回火温度取决于牌号所要求的最低屈服强度和硬度，回火时间约2h	空冷后得到细片珠光体加团絮状石墨，高温回火（650～720℃）则珠光体粒化。油淬后得到马氏体加团絮状石墨，回火后根据回火温度得到不同的回火组织	C：2.0%～2.7% Si：1.0%～1.8% Mn：0.3%～1.0% P：≤0.1% S：≤0.2%

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

类 别	退 火 工 艺	组 织	化学成分范围（%）
白心可锻铸铁	1. 固体脱碳退火：白口铸坯与氧化铁（赤铁矿或轧钢、锻钢的氧化皮）装入退火罐密封加热至 980～1050℃充分保温（约 40h）后缓冷至 550～650℃出炉 2. 气体脱碳退火： 白口铸坯装入脱碳炉中加热升温，同时吹入潮湿空气形成氧化性炉气在 980～1050℃充分保温后缓冷至 550～650℃出炉	表面组织为铁素体，从外到内珠光体渐增多，有时还有少量渗碳体。断口为红色	C：2.8%～3.4% Si：0.7%～1.1% Mn：0.4%～0.7% P≤0.2% S≤0.2%
球墨可锻铸铁	经球化处理得到的白口铸坯（允许有含球状石墨的麻口组织）进行石墨化退火，其加热、保温、冷却几个阶段的温度规范与黑心可锻铸铁相同，但两个阶段的石墨化时间可缩短一半	石墨接近球状，基本上与球铁中的球状石墨相同。若进行两阶段石墨化退火得到铁素体基体，若只进行第一阶段石墨化退火得到珠光体基体	C：2.4%～3.2% S：1.2%～2.2% Mn：0.1%～0.6% P：≤0.1% S：≤0.03% Mg：0.03%～0.06% RE：0.02%～0.05%

1.2.4.2 牌号及力学性能

各主要国家的可锻铸铁牌号及其常规力学性能按照我国的分类法分成黑心可锻铸铁（铁素体可锻铸铁）、珠光体可锻铸铁和白心可锻铸铁三类分别列于表 1-2-41、表 1-2-42 及表 1-2-43。表 1-2-43 只列出国际标准的牌号和日本国家标准的牌号的力学性能要求；我国和英、德、法等国等效采用国际标准，所以表 1-2-43 中附上这些国家白心可锻铸铁牌号与国际标准牌号的对照表。美国不生产白心可锻铸铁，没有白心可锻铸铁的国家标准。

表 1-2-41 黑心可锻铸铁（铁素体可锻铸铁）的牌号和力学性能

国 别	标准号	牌 号	试棒直径（mm）	力学性能			
				σ_b（MPa）≥	$\sigma_{0.2}$（MPa）≥	δ（%）≥	硬 度（HB）
中国	GB 9440—88	KTH300—06	12 或 15	300		6	≯150
		KTH330—08		330	–	8	
		KTH350—10		350	200	10	
		KTH370—12		370		12	
国际标准	ISO 5922—1981（E）	B30—6	12 或 15	300		6	≤150
		B32—12		320	190	12	
		B35—10		350	200	10	

续上表

国 别	标准号	牌 号	试棒直径 (mm)	力学性能 σ_b (MPa) ≥	$\sigma_{0.2}$ (MPa) ≥	δ (%) ≥	硬度 (HB)
美国	ANSI/ASTM A47—84	22010	15.9	345	224	10	≤156
		24018		365	241	18	
	ANSI/ASTM A197—87 冲天炉可锻铸铁		15.9	276	207	5	
	ANSI/ASTM A602—87 机动车辆可锻铸铁	M3210		345	221	10	≤156
英国	BS 6681: 1986	B30—06	12	300	–	6	≤150
		B32—12	15	320	190	10	
		B35—12		350	200	12	
德国	DIN 1692—1982	GTS-35-10	12 或 15	350	200	10	≤150
法国	NF A32—701—82	MN350—10	15	350	230	10	≤150
		MN380—18		380	250	18	
日本	G 5702—1988	1类 FCMB 270	14 或 12	270	165	5	≤163
		2类 FCMB 310		310	185	8	
		3类 FCMB 340		340	205	10	
		4类 FCMB 360		360	215	14	
前苏联	ГОСТ 1215—79	Кч30—6	16 12 8	294		6	100～163
		Кч33—8		323	–	8	
		Кч35—10		333	–	10	
		Кч37—12		362		12	110…163

表 1-2-42 珠光体可锻铸铁的牌号和力学性能

国 别	标准号	牌 号	试棒直径 (mm)	力学性能 σ_b (MPa) ≥	$\sigma_{0.2}$ (MPa) ≥	δ (%) ≥	硬度 (HB)
中国	GB 9440—88	KTZ 450—06	12 或 15	450	270	6	150～200
		KTZ 550—04		550	340	4	180～250
		KTZ 650—02		650	430	2	210～260
		KTZ 700—02		700	530	2	210～290

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

国别	标准号	牌号	试棒直径 (mm)	力学性能			
				σ_b (MPa) ≥	$\sigma_{0.2}$ (MPa) ≥	δ (%) ≥	硬度 (HB)
国际标准	ISO 5922 1981（E）	P45—06	12或15	450	270	6	150～200
		P50—05		500	300	5	160～220
		P55—04		550	340	4	180～230
		P60—03		600	390	3	200～250
		P65—02		650	430	2	210～260
		P70—02 P80—01		700	530(油淬回火) 430(空冷)	2	240～270
				800	600	1	270～310
美国	ANSI/ASTM A220M—88	280M10	15.9	400	280	10	149～197
		310M8		450	310	8	156～197
		310M6		450	310	6	156～207
		340M5		480	340	5	179～229
		410M4		550	410	4	197～241
		480M3		590	480	3	217～269
		550M2		650	550	2	241～285
		620M1		720	620	1	269～321
	ANSI/ASTM A602—87 机动车辆可锻铸铁	M4504(空冷回火)		448	310	4	163～217
		M5003(空冷回火)		517	345	3	187～241
		M5503(油淬回火)		517	379	3	187～241
		M7002(油淬回火)		621	483	2	229～269
		M8501(油淬回火)		724	586	1	269～302
英国	BS 6681:1986	P45—06	12或15	450	270	6	150～200
		P50—05		500	300	5	160～220
		P55—04		550	340	4	180～230
		P60—03		600	390	3	200～250
		P65—02		650	430	3	210～260
		P70—02		700	530	2	240～290
德国	DIN 1692—1982	GTS—45—06	12或15	450	270	6	150～200
		GTS—55—04		550	340	4	180～230
		GTS—65—02		650	430	2	210～260
		GTS—70—02		700	530	2	240～290
法国	NF A32—702—82	MN 450—6	φ19铸态试棒加工成φ15	450	290	6	150～210
		MN 550—4		550	350	4	180～240
		MN 650—3		650	430	3	210～270
		MN 700—2		700	530(油淬) 480(空冷)	2	240～290

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

国 别	标准号	牌 号	试棒直径(mm)	力学性能 σ_b(MPa) ≥	$\sigma_{0.2}$(MPa) ≥	δ(%) ≥	硬度(HB)
日本	JIS G5704 1988	1类 FCMP 440	14	440	265	6	149～207
		2类 FCMP 490		490	305	4	167～229
		3类 FCMP 540		540	345	3	183～241
		4类 FCMP 590		590	390	3	207～269
		5类 FCMP 690		690	510	2	229～285
前苏联	ГОСТ 1215 79	КЧ 45－7	16、12、8	441		7_1	150～207
		КЧ 50 5		490	–	5_1	170～230
		КЧ 55－4		539	–	4_1	192～241
		КЧ 60－3		588	–	3	200～269
		КЧ 65 3		637	–	3	212～269
		КЧ 70－2		686		2	241～285
		КЧ 80 1.5		784	–	1.5	270～320

注①根据制造商与用户协商允许降低1%

表 1-2-43 国际标准及日本国家标准规定的白心可锻铸铁牌号和力学性

标 准 号	牌 号	主要壁厚(mm)	试棒直径(mm)	力学性能 σ_b(MPa) ≥	$\sigma_{0.2}$(MPa) ≥	δ(%) ≥	硬度(HB)
国际标准 ISO 5922－1981(E)	W35－04	–	9	340		5	≤230
		–	12	350		4	
			15	360	–	3	
	W38－12		9	320	170	15	≤200
			12	380	200	12	
		–	15	400	210	8	
	W40－05	–	9	360	200	8	≤220
		–	12	400	220	5	
		–	15	420	230	4	
	W45 07	–	9	400	230	10	≤220
		–	12	450	260	7	
		–	15	480	280	4	

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

标准号	牌号	主要壁厚(mm)	试棒直径(mm)	力学性能 σ_b(MPa) ≥	$\sigma_{0.2}$(MPa) ≥	δ(%) ≥	硬度(HB)
日本国家标准 JIG G5703 1988	1类 FCMW330	<5	6	310	–	8	≤207
		≥5, <9	10	330	165	5	
		≥9	14	350	195	3	
	2类 FCMW370	<5	6	350		14	≤192
		≥5, <9	10	370	185	8	
		≥9	14	390	215	6	
	3类 FCMW440	–	14	440	265	6	149~207
	4类 FCMWP490	–	14	490	305	4	167~229
	5类 FCMWP540	–	14	540	345	3	183~241

附录：中、英、德、法等国的白心可锻铸铁牌号与ISO 5922牌号的等效对照表

国际标准 ISO 5922-1981(E)	中国国家标准 GB 9440-88	英国国家标准 BS 6681:1986	德国国家标准 DIN 1692 1982	法国国家标准 NFA 32-701-82
W35-04	KTB 350-04	W35-04	GTW-35-04	–
W38-12	KTB 380-12	W38-12	GTW-S38-12	MB 380-12
W40-05	KTB 400-05	W40 05	GTW-40-05	MB 400-5
W45-07	KTB 450-07	W45-07	GTW-45-07	MB 450-7

1.2.4.3 特点与应用

可锻铸铁具有一定的强度和良好的塑韧性，和铸钢相比，虽然在力学性能上有些距离，但在以下几个方面的性能却优于铸钢：铸造性能好，较容易铸出薄壁、复杂且加工余量小的铸件；具有减振性；切削加工性能好；等等。在球墨铸铁问世之前，可锻铸铁是汽车制造业的一种重要金属材料。其中铁素体可锻铸铁主要用于要求一定强度和良好塑韧性的底盘零件如后桥壳、减速器壳、差速器壳、转向器壳、轮毂、制动踏及悬置支架等。珠光体可锻铸铁主要用于要求有较高强度或良好耐磨性而允许适当降低塑性指标的场合，典型零件有曲轴、连杆、凸轮轴、万向接头、变速器拨叉、摇臂、衬套等。白心可锻铸铁在欧洲和日本的汽车上有少量应用，典型零件有管接头、车门铰链及变速器拨叉等。美国只发展铁素体可锻铸铁和珠光体可锻铸铁，不生产白心可锻铸铁。

可锻铸铁在性能、生产工艺和成本上优势不及球铁，主要表现为：

①黑心可铸铁的石墨呈团絮状，它比较松散，外形不规则，石墨内部夹有金属相，不及球状石墨圆整、紧密，对基体的削弱作用大一些，因而其力学性能不及球铁，在同等的塑性指标下，球铁的抗拉强度一般比可锻铸铁高20%左右；相应地在同等的强度指标下，球铁的延伸率比可锻铸铁也高许多。白心可锻铸铁经表面深度脱碳，组织不均匀，其力学性能还不及黑心可锻铸铁。

汽车论坛 http://www.qclt.com

②可锻铸铁的铸坯是白口铸铁，这就要求限制铸坯壁厚，以保证快速凝固，从而得到全白口的组织。球墨铸铁铸件的壁厚没有这种限制。

③白口铸铁的碳、硅量较低，铸铁熔化的配料需大量废钢，受到废钢货源的限制。特别是由于碳、硅量低，铁水流动性差，凝固收缩及线收缩较大，比较容易产生缩孔、缩松及裂纹等铸造缺陷。

④可锻铸铁无论是石墨化退火还是脱碳退火，热处理周期很长，加热温度高，能耗大，热处理变形也较大，同时铸件在热处理过程中表面会严重氧化，增加了抛丸清理的工作量。一般可锻铸铁的生产成本比铸态球铁要高出30%左右。

由于提高性能及降低成本的目的，从70年代起，世界各国出现了用球铁取代可锻铸铁的趋势，而且这种趋势逐年加强。以美国为例，1960年，可锻铸铁产量为62万t，而球铁仅12.4万t，可锻铸铁为球铁的5倍；1980年，可锻铸铁产量降至32.8万t，而球铁产量增加到239.4万t，球铁产量为可锻铸铁的7.3倍；到了1997年，可锻铸铁产量又进一步降至20.7万t，而球铁产量却达到412.8万t，球铁产量达到可锻铸铁的20倍。

尽管可锻铸铁被球铁取代的趋势不可逆转，但可锻铸铁本身也有球铁所不及的一些优点，因而在当今的汽车工业中，可锻铸铁仍保留着小小的一席之地。可锻铸铁主要应用于：

①生产薄壁小件如杠杆类、接头类零件。这类铸件如用球铁生产，困难较多。因为铁水球化处理每次的铁水量不宜太少，处理后的铁水又要求尽快浇注完毕，这些都会成为特小铸件生产中的问题；同时，球铁小件不易去除浇冒口，材质组织中又易出现过多的渗碳体，最终还是要进行高温退火。既是这样，倒不如浇铸成白口铁铸坯再经石墨化退火成为可锻铸铁，这样，质量既稳定，又容易组织生产。

②生产要求耐寒的零件。铁素体球铁的含硅量通常在2.4%～3.0%范围，珠光体球铁的含硅量在1.6%以上，而硅对提高脆性转变温度比较敏感。因此，对于在高寒地区服役并可能承受机械冲击载荷的零件，用铁素体可锻铸铁制造能更好地满足材质的低温韧性的要求。

③生产对质量稳定性要求高的零件如轿车发动机连杆。这类零件珠光体球铁与珠光体可锻铸铁均有应用，但后者比前者更容易保证性能与质量稳定，因而国外一些厂家宁愿用珠光体可锻铸铁连杆而不用珠光体球铁连杆。除连杆外，那些要求强度和耐磨性的较小零件也较多地应用了珠光体可锻铸铁。在日本，珠光体可锻铸铁铸件产量中的80%左右是用在汽车制造上。

④生产用钎焊连接的铸焊结构件。这类铸件主要用白心可锻铸生产。白心可锻铸铁实际上是钢的组织，具有与钢相近的性质，塑韧性好，耐冲击，有良好的可焊性。白心可锻铸铁的铸坯可以采用含碳量较高（3.0%～3.5%C）的成分，因而铸造性能好，可铸形状复杂及壁薄的铸件（最小壁厚可至2.5mm）。钎焊结构可用白心可锻铸铁零件相互连接，也可与钢制件连接。

1.2.5 特种铸铁

1.2.5.1 用于气缸套的铸铁

1）对缸套材料的要求

①有好的抗粘着磨损性能。这是首要条件，目的是保证摩擦副在跑合期内不发生擦伤或咬合，为进入正常磨损创造条件。灰铸铁在这方面有突出的优点，这主要归因于组织中石墨的自润滑性和石墨优良的导热性以及石墨在磨损中脱落后产生的空穴的储油作用。灰铸铁的抗粘着磨损特性优于球墨铸铁、可锻铸铁和蠕墨铸铁，更优于钢，这是灰铸铁广泛用作缸套材料的重要原因。在不多见的情况下也有用球墨铸铁、可锻铸铁或钢来生产缸套的，但缸孔表面必须镀铬或涂覆某种涂层来改善抗粘着性能。灰铸铁的金相组织特别是石墨的类型对抗粘着磨损性能有着特别重要的影响：D型石墨及其伴生的铁素体大大增加粘着磨损倾向；当石墨随着D型转变为无定向A型并且尺寸为中细片时，则产生粘着磨损的倾向逐渐减小。粗大的C型石墨对抗粘着磨损有利，但它削弱了基体而加速了自身和活塞环的正常磨损，也加大了机油消耗。

②有耐正常磨损的能力。在跑合期之后的正常磨损阶段，除粘结磨损外还有磨料磨损。提高缸套材料

汽车论坛 http://www.qclt.com

的硬度对提高抗磨料磨损是有利的，而硬度的提高可通过加入合金元素或淬火热处理达到。例如工况特别苛刻的缸套就可采用淬火缸套，其材料常为低合金铸铁（含铬约0.3%及含钼约0.4%），油淬后300℃回火，硬度达到400～500HB。但实际上在大多数的汽车发动机中，如果空气和润滑油通过滤清器很好过滤，气缸密封良好，没有产生碳的沉积，在润滑条件下，以珠光体为基体、石墨为中等A型的灰铸铁就能满足耐磨性的一般要求。所以，轿车的灰铸铁缸体大都是不镶缸套的，即利用缸体本身的珠光体铸铁形成缸孔。

③有一定的常温及高温强度。缸套是薄壁零件，应保证它在加工及装配过程中不变形，不断裂；同时在发动机工作中也必须能经受热应力和机械应力的作用，具有抵抗热变形和机械变形的能力。为使发动机结构紧凑，希望缸套壁厚尽可能小，但干式缸套的壁厚受材料性能的限制。例如：中磷铸铁（约0.5%P）缸套比较脆，其壁厚一般为缸孔直径的2.5%，低磷铸铁（约0.2%P）缸套的壁厚可为缸孔直径的1.5%～2.0%，而钢的缸套壁厚可小至缸孔直径的1.0%～1.5%。

④低的材料成本和工艺成本。镍、钼、钒、铌等合金元素价格昂贵，缸套材料应尽量少用或不用这些元素。材料的加工性及缸套是否热处理与工艺成本密切相关，这些价格因素在大量生产中尤其要充分考虑。

引起发动机气缸产生磨损的原因是多种多样的，对缸套材料的要求必须从多方面综合考虑。有人以为缸套材料的硬度越高越耐磨，实际上这种观点是片面的，缸套材料的硬度仅是影响缸孔磨损的因素之一，硬度与耐磨性之间没有绝对的关系；硬度太高，往往走合性反而不好。为了提高缸套的使用寿命，减少缸孔磨损，首先要从发动机本身及油品上采取措施，如提高空气和润滑油的滤清效果，迅速提高发动机起动时的温度，降低燃料和润滑油的含硫量等等，通过这些来减少气缸中的磨损微粒及酸性腐蚀物质。对缸套材料来说，着眼点首先应放在金相组织的保证上，即在灰铸铁金相组织中的石墨应以无定向的中等尺寸的A型为主，B型石墨尽可能，没有D型和C型，基体为全珠光体，这是基本的要求；如果分布着一定数量的分散的硬化相，则耐磨性还能进一步提高。

2）缸套材料的种类及选用

缸套按材料种类可分为灰铸铁缸套、球墨铸铁缸套、可锻铸铁缸套、蠕墨铸铁缸套、奥氏体铸铁缸套和钢缸套等；按铸铁组织中的硬化相类型可分为磷铸铁缸套、硼铸铁缸套、钒钛铸铁缸套和铌铸铁缸套等；按硬度高低可分为软缸套和硬缸套；按是否热处理可分为铸态缸套和热处理缸套；按铸造方法可分为离心铸造缸套和砂型铸造缸套等等。各种缸套又可以有不同的合金元素（如Cr、Cu、Ni、Mo、V、Ti、Nb、Sn、Sb等）的搭配。下面列举车用发动机行业正在应用或曾经应用的有代表性的缸套材料。

（1）磷铸铁

这种铸铁含磷从0.2%～0.75%不等，含磷0.4%～0.5%的居多，硬度范围在200HB至280HB之间。对磷铸铁缸套金相组织的基本要求是：在中细片状珠光体基体上均匀分布着中等片状的A型石墨和细密的断续网状的磷共晶；尽可能没有过冷石墨、游离铁素体和游离渗碳体，尤其不允许聚集析出。磷铸铁兼有良好的抗擦伤性和耐磨性。随着含磷量的提高，铸铁的硬度升高，切削性能降低，但在不出现成块的三元磷共晶和游离渗碳体的前提下切削加工性还是可以的。磷共晶熔点低，它在共晶团边界形成，促进晶间缩松倾向，因此，随着含磷量的增加，铸件的致密性降低；因铸铁缸套生产普遍采用金属型离心铸造工艺，结晶凝固快，又有离心力的作用，磷在这方面的不利影响大大减小。在磷铸铁中常常搭配加入铬作为合金元素，其常用量为0.3%～0.5%左右，有时还加入Ni、Cu、Mo、V等，目的是强化和稳定珠光体，抑制铁素体，提高耐磨性、耐热性、耐蚀性和综合力学性能。含铬的磷铸铁能比较全面地满足缸套的要求，材料价格便宜，是车用发动机缸套应用最多的一种材料。

（2）硼铸铁

铸铁含硼0.05%～0.10%时，硼形成分散细小块状或断续网状硼碳化物，镶嵌在珠光体基体上。硼碳化物的显微硬度（960～1 280HV）高于磷共晶的显微硬度（420～740HV）。硼碳化物的熔点比磷共晶高，故硼铸铁的抗粘着磨损和抗磨料磨损性能优于磷铸铁。硼铸铁中含有一定的磷（>0.1%）时，磷共晶和硼碳化物一起以复合物的形式析出，这有利于促进硼碳化物的均匀分布，但含磷量以不超过0.5%为限度；若磷过

汽车论坛 http://www.qclt.com

高反而抑制了硼碳化物的耐磨作用，并降低力学性能和加工性能。一般认为，硼铸铁缸套的使用寿命比磷缸套的提高20%～50%，硼铸铁的切削加工性能比磷铸铁差，因而限制了它的广泛应用，尤其在大量生产条件下。

(3)铌铸铁

在铁水中加入0.4%铌时，珠光体基体上可见到均匀分布的铌碳氮化合物球形颗粒(直径3～10μm，数量约100个/mm²)。铌碳氮化合物的硬度为2 000～2 500HV，远高于硼碳复合物，所以耐磨性比硼铸铁好。铌铸铁有低的摩擦系数，抗咬合性好，综合力学性能也很好。铌是十分昂贵的合金元素，这一点极大地限制了铌铸铁在缸套上的应用。

(4)高镍奥氏体铸铁

这种铸铁含镍高达12%～17%，并加入7%左右的铜，一般还加入一定量的铬，其组织是在奥氏体基体上除了片状石墨以外分布着硬的游离渗碳体，利用奥氏体和渗碳体之间在工作状态下的磨损差，以渗碳体支承对磨面，而奥氏体基体用以储油及嵌藏磨料，从而获得一定的减摩和耐磨性能。同时，基体为高合金元素的单相组织，具有极好的耐腐蚀性。这种铸铁在早期的汽车发动机缸套上应用，随着汽油中硫量的降低，这种缸套已不多见；因其含镍量很高，价格昂贵，抗磨料磨损的能力也较差，这也是极少应用的原因。

(5)淬火铸铁

对于高速大功率发动机，尤其是拖拉机发动机，为提高抗磨料磨损性能，也有采用淬火铸铁缸套的。这种缸套经过860～880℃油淬，300℃回火，得到回火马氏体基体，硬度达到400～500HB；在湿式厚壁缸套中，也有不少是内壁采用感应淬硬的。马氏体的抗磨料磨损性能比珠光体有较大的提高，但抗擦伤性较差，加工性也不好。如果使抗擦伤性得到改善，可提高回火温度使硬度降到240～330HB，但这样基本也就失去了淬火的意义。

除了铸铁缸套以外，还有用深拉或挤压工艺生产薄壁钢缸套的。对于干式钢缸套，壁厚可以薄到缸孔直径的1.0%～1.5%。钢缸套应镀铬以保证抗擦伤性和耐磨性。有些湿式钢缸套的外表面也要镀铬，目的是提高气缸外壁的抗穴蚀性能。

国外有一种在缸孔表面碾嵌碳化硅的工艺，通过一种高压珩磨操作，将碳化硅微粒嵌入软质的缸孔表面，同时进行精珩及抛光。碳化硅嵌入表面很浅，一般仅0.010～0.012mm。据报导，经过35万km的道路试验表明，嵌入碳化硅的铸铁缸套的磨损量仅为镀铬缸孔磨损量的一半。缸孔表面碾嵌碳化硅的工艺可用于钢缸套和经退火的铸铁缸套。

表1-2-44列举一些车用发动机缸套材料的技术规格。

表1-2-44 车用发动机气缸套材料及技术规格举例

材料牌号	化学成分(%)	金相组织	力学性能	应用说明
GLCI(法)	C:3.2～3.5 Si:2.0～2.8 Mn:0.8～1.0 S:≤0.12 P:0.35～0.45 Cr:0.4～0.6	A型石墨4～5级；珠光体基体上均匀分布细小磷共晶；铁素体≤3%；游离渗碳体≤2%	硬度207～277HB	金属型离心铸造
PSA标准(法)	C:3.3～3.5 Si:2.0～2.4 Mn:0.7～0.9 S:≤0.15 P:≤0.12 Cr:0.4～0.6	A型石墨4～5级，珠光体，铁素体≤3%，游离碳化物≤2%	硬度207～255HB	壳型铸造

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料牌号	化学成分（%）	金相组织	力学性能	应用说明
RIK－61（日）	C:2.8～3.5 Si:1.6～2.6 Mn:0.5～1.0 S:≤0.15 P:0.4～0.7 Cr:0.2～0.5 Ti:≤0.07 V:0.1～0.4		抗拉强度＞300MPa 抗弯力＞11 000N 挠度＞5.5mm	用于汽车、摩托车等通用发动机
RIK－81（日）	C:2.8～3.5 Si:1.6～2.6 Mn:0.5～1.0 S:≤0.15 P:0.2～0.5 Cr:0.6～1.0 Mo:0.1～0.4 Cu:0.2～0.5		抗拉强度＞300MPa 抗弯力＞11 000N 挠度＞5.5mm	用于严酷条件的汽车发动机缸套
EQ厂标（中）	C:3.2～3.5 Si:1.8～2.4 Mn:0.6～0.9 S:≤0.10 P:0.3～0.5 Cr:0.2～0.4	A型石墨4～6级、允许少量B型;中细片珠光体基体上均匀分布断网状磷共晶	硬度217～262HB	用于6100汽油机缸套 离心铸造生产
EQ厂标（中）	C:3.1～3.5 Si:2.0～2.4 Mn:0.6～0.9 S:≤0.10 P:0.2～0.4 Cr:0.2～0.4 B:0.04～0.07 Cu:0.5～0.7	A型石墨4～6级，允许少量B型;细片珠光体基体上分布断网状磷共晶及硼复合碳化物6%～10%	硬度232～278HB	用于6102柴油机离心铸造生产
DANA 110－9A（美）	C:2.9～3.5 Si:1.8～2.5 Mn:0.5～0.8 S:≤0.12 P:≤0.3 Cr:0.2～0.8 Cu:0.25～1.0 Ni:≤1.0	A型石墨为主4～6级，允许少量B型;细片珠光体基体上分布断网状二元磷共晶;铁素体≤5%，碳化物≤5%	硬度212～293HB或95～104HRB 壁厚6.4～8.9mm时，抗拉强度≥241MPa 壁厚≥8.9mm时，抗拉强度≥207MPa	离心铸造，可退火至140～180HB，加工后淬火至400HB以上
DANA 110－63	C:3.35～3.65 Si:2.3～2.6 Mn:0.5～0.7 S:≤0.10 P:≤0.2 Cr:0.2～0.4 (Cu+Ni):0.5～0.8 Ni:≤0.5	A型石墨为主，4～6级，允许少量B型 细片珠光体基体上分布断网状二元磷共晶;铁素体≤5%，碳化物≤5%	硬度194～267HB 抗拉强度≥207MPa	薄壁离心铸造，可退火至140～180HB

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料牌号	化学成分(%)	金相组织	力学性能	应用说明
DANA 110－63	C:2.9～3.5 Si:1.8～2.5 Mn:0.5～0.9 S:≤0.12 P:≤0.2 Cr:0.2～0.8 (Cu＋Ni):0.25～1.0 Ni:≤1.0	石墨A型加B型,缸套从毛坯外表面至4mm深允许D、E型,基体为珠光体,铁素体≤10%,磷共晶及游离渗碳体≤5%	硬度212～293HB,壁厚6.4～8.9mm时抗拉强度≥241MPa;壁厚≥8.9mm时抗拉强度≥207MPa	离心铸造,可退火至140～180HB,加工后淬火至400HB以上
DAN 110 83(美)	C:3.3～4.0 Si:1.7～2.7 Mn:0.2～0.8 S:≤0.03 P:≤0.4 Ni:≤1.5 Mg:0.02～0.07	球状石墨(Ⅰ型＋Ⅱ型≥80%),尽可能避免蠕虫状石墨;基体为珠光体,铁素体≤10%,碳化物≤5%	退火后硬度140～200HB或70～90HRB 抗拉强度≥414MPa 屈服强度≥310MPa 延伸率≥10%	离心铸造,退火
DANA 110－611	C:3.3～4.0 Si:1.7～2.7 Mn:0.2～0.8 S:≤0.03 P:≤0.4 Ni:≤1.5 Mg:0.02～0.07	球状石墨(Ⅰ型＋Ⅱ型≥80%),基体为珠光体	硬度241～302HB 抗拉强度≥690MPa 屈服强度≥483MPa 延伸率≥3%	离心铸造,正火
DANA 110 612	C:3.3～4.0 Si:1.7～2.7 Mn:0.2～0.8 S:≤0.03 P:≤0.4 NiL≤1.5 Mg:0.02～0.07	球状石墨(Ⅰ型＋Ⅱ型≥80%),基体为回火马氏体	硬度根据需要而定 抗拉强度≥827MPa 屈服强度≥621MPa 延伸率≥2%	离心铸造,淬火后回火
DANA 110－616	C:3.3～4.0 Si:1.7～2.7 Mn:0.2～0.8 S:≤0.03 P:≤0.4 Ni:≤1.5 Mg:0.02～0.07	球状石墨(Ⅰ型＋Ⅱ型≥80%),基体为铁素体珠光体	硬度187～277HB 抗拉强度≥551MPa 屈服强度≥379MPa 延伸率≥6%	离心铸造,正火

1.2.5.2 用于活塞环的铸铁

1)对活塞环材料的要求

①有适度的弹性,保证活塞环对气缸壁的径向压力稳定而合理的分布。弹性的特性值用弹性模量E表示。弹性模量主要取决于组织中石墨的类型和数量,合金元素的种类及含量也有一定影响,但与基体组织的类型关系不大。单体铸造的合金铸铁环因含碳量高,E值大致在75～95GPa之间;筒体铸造的合金铸铁环含碳量较低,E值大致在105～125GPa之间;球铁环和可锻铸铁环的E值一般在150～170GPa之

汽车论坛 http://www.qclt.com

间；钢环 E 值在 200～220GPa 之间。

②有足够的机械强度，有耐疲劳折断的能力，能经受制造、装配和服役中各种应力的作用。通常用抗弯强度作为活塞环材料强度的特性值，以 σ_{bb} 表示。活塞环抗弯强度高，不容易折断，但 E 值随 σ_{bb} 的提高而提高，而 E 值高、工作应力大，活塞环也易折断。因此可用 E/σ_{bb} 作为活塞环耐折断能力的指数，即 E/σ_{bb} 越低，耐折断性越好。合金灰铸铁环的 E/σ_{bb} 值通常在 190～240 范围；球铁环在 130～160 范围，可见球铁环的耐折断性比合金灰铸铁高得多。

③有低的摩擦系数，在边界润滑条件下有良好的走合性和耐磨性。提高活塞环这方面的性能，一是改善材质组织的摩擦特性，一是对活塞环表面进行镀覆或喷涂处理。在缸套—活塞环摩擦副中配对零件硬度的选择有着不同的看法。有一种意见认为活塞环的硬度应高于缸孔的硬度 50～100 个 HB 单位，理由是活塞环的单位摩擦功大于气缸的单位摩擦功；但也有另一种意见认为活塞环与相匹配的气缸硬度应基本相当，以不超过 10 个 HB 单位为宜，理由是在摩擦副中活塞环应以减摩为主，其本身磨损了更换起来比较省事，所以没有必要追求过高的硬度。事实上在实际应用中上述两种情况都是存在的，例如轿车和轻型汽车的发动机普遍不镶缸套，缸体的气缸壁硬度通常为 170～210HB，而匹配的磷铬铸铁活塞环硬度为 215～290HB，活塞环硬度明显高于缸孔硬度。也有相当多的发动机缸体镶了磷铬合金铸铁缸套，其硬度为 220～280HB，与活塞环硬度基本相同。对活塞环—缸套摩擦副要求的是减摩与耐磨的结合，摩擦副配对工作，首先要不易擦伤，其次是把正常磨损降至最低，而金相组织往往更能综合体现材料的摩擦特性。换句话说，为了得到良好的摩擦性能，金相组织的保证是第一位的。实际上对使用性能较好的活塞环和缸套进行分析，常常发现它们除了具有正常的片状珠光体基体和 A 型石墨以及磷共晶细密且分布均匀以外，并无其它特点。但是硬度毕竟是活塞环生产控制与验收的必检性能指标，通过硬度的测定可以方便地综合判断材质的组织、性能和均匀性。为了进一步提高活塞环表面的摩擦性能，环面的涂镀处理也是十分重要的。要求第一道气环及撑簧油环的外圆面应镀铬或喷钼以改善走合性、耐磨性和耐蚀性；其它环则应磷化、镀锡或其它表面处理，既提高走合性，也作为防锈保护。

④有良好的弹力保持性，在工作温度下有抗松弛的能力，能保持尺寸、弹性、强度和硬度的稳定。活塞环的最高工作温度大致在 350℃左右，到达或高于此温度时，铸铁的强度和硬度开始下降，弹力丧失，并发生蠕变。铸铁的强度和硬度在 400℃以下还是比较稳定的，但非合金灰铸铁活塞环在 350℃时就开始逐渐失去弹性。合金灰铸铁、球墨铸铁和钢有较高的弹力保持性。合金灰铸铁活塞环大约在 400℃失去弹性，而球铁环和 12CrMo 钢环则可工作到 450℃。

弹力保持系数是评定活塞环弹力保持能力的性能指标。弹力保持系数 $\delta=\dfrac{\text{加热后弹力}}{\text{加热前弹力}}\times 100\%$。

2）活塞环按材质的分类及选用

活塞环按材质主要分为四类：合金铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁（含半可锻铸铁）和钢。此外，在个别的应用中还有蠕墨铸铁活塞环和粉末冶金活塞环。

（1）合金铸铁活塞环

a. 筒体铸造的活塞环

采用接近共晶成分的铸铁，含碳量一般在 3.2%～3.5%范围；根据环的大小不同，硅量差别较大，若采用金属型离心铸造或者形成碳化物的合金元素含量高时，硅量可高达 3.0%以上，若用筒体砂型铸造以及形成碳化物的合金元素含量低时，含硅量可低至 2.0%以下。筒体铸造的活塞环在化学成分和铸造工艺得到正常控制的条件下，石墨组织主要为 A 型为主加 B 型。

b. 单体铸造的活塞环

因活塞环单件尺寸小，应采用高碳、高硅的过共晶成分，碳量一般在 3.6%～3.9%范围，硅量约 2.4%～3.0%。石墨为 F 型石墨及许多细小的 A 型石墨片。F 型石墨形如星状，故称之为星形石墨。因星形石墨上的小石墨片呈 A 型形态分布，故国外把这类石墨也归入 A 型中。在我国的铸铁石墨分类标准中则把这种石墨规定为 F 型。F 型石墨实质上也是过共晶石墨，是高碳铁水在较大过冷条件下形成的，它相当于初生石墨，这是单体铸造的小断面铸铁活塞环所特有的石墨类型。单体铸造的活塞环铸铁含碳量高，

汽车论坛 http://www.qclt.com

有丰富的石墨析出量，因之抗擦伤性能特别好。因铸造时冷却快，石墨呈结节状（星状），结晶细密，故仍能有较高的强度，耐磨性也不错，弹性模量比筒体活塞环低。

我国钨的资源较丰富，故钨作为活塞环的合金元素在国内应用较多而国外较少。钨有强化基体的作用，既提高常温性能，也提高高温强度和弹性保持性；它又是较弱的促进碳化物元素，因而有利于在活塞环中应用。钼同样地提高常温和高温综合力学性能，尤其在提高抗蠕变能力方面作用显著，但钼促进形成碳化物的作用比钨强。单独采用钨或钨与少量铬、钼的复合低合金化是国产活塞环的一个特色。

硬质相是活塞环铸铁组织的重要组成，它在提高材料在边界润滑条件下的减摩性和耐磨性方面起着独特的作用。活塞环通过加入合金元素可得到不同的硬质相，有关它们的特征、性质、作用和应用的比较见表 1-2-45。

表 1-2-45 合金铸铁活塞环组织中硬质相的类型及其比较

铸铁类型	磷铸铁	硼铸铁	钒钛铸铁	铌铸铁
形成硬质相的合金元素常规含量（%）	P：0.3～0.7	B：0.03～0.05（P：0.2～0.3）	V：0.15～0.25 Ti：0.1～0.2 （P：0.2～0.4）	Nb：0.3～0.4 （P：0.2～0.4）
硬质相类型	磷共晶	硼碳化合物＋（磷共晶）	钒钛碳氮化合物＋（磷共晶）	铌的碳氮化合物＋（磷共晶）
硬质相的显微硬度（HV）	420～740 （平均 570）	硼碳化合物 960～1 280	钒钛碳氮化合物 960～1 840	铌碳氮化合物 2 000～2 500
硬质相在铸铁中存在的形态	呈细小分散块状或细密断网状均匀分布	呈断网状分布或分散分布	呈规则或不规则外形的细小质点弥散分布	以直径 3～10μm 的细小质点弥散分布
对力学性能的影响	随磷量增加略提高强度和硬度，并增加脆性	在 0.03%～0.05%B 的含量下无明显影响	每增加 0.1%V 提高 σ_b15～30MPa，提高硬度 8～10HB	提高强度和韧性
对摩擦、磨损性能的影响	提高走合性和耐磨性	比磷铸铁活塞环可提高耐磨性 20%～30%	提高耐磨性	提高耐磨性
对加工性的影响	在 P：≤0.4% 时影响不显著	降低	降低，尤其是磨削性能	降低
对铸造性能的影响	提高流动性，增加缩松倾向	增加白口倾向	增加白口倾向	无影响
经济性	便宜	因加入硼量低成本增加不多	钒价格昂贵	铌价格十分昂贵
应用	十分普遍，适用于各类车用发动机	因加工性降低，应用不广	很少	很少

（2）球墨铸铁活塞环

由于球铁活塞环的弹性、抗折断性和热稳定性等性能指标比合金铸铁环高得多，因此，现代强化的汽车发动机的第一道活塞环越来越多地应用球铁环，球铁因石墨成球状，自润滑性和储油性不如灰铸铁，走合性较差，故球铁环外圆表面必须进行表面镀覆处理，常用的是镀铬，有时上下端面也镀铬。

球铁活塞环无论单体砂型铸造或筒体离心铸造，通常都采用相同的碳、硅量，为了减小白口倾向和缩松倾向，碳、硅量都比较高。由于减摩性和耐磨性依靠表面镀铬而不依靠硬质相，所以磷含量不高。对于采用淬火、回火热处理的球铁环，为了防止回火脆性，保证韧性，提高抗冲击性能，磷量最好限制在 0.04% 以下。球铁的综合力学性能本来就相当高，所以合金元素可不加或少加。国外的球铁环常含有镍，

汽车论坛 http://www.qclt.com

这与国外在球铁活塞环生产中用镍镁合金作球化剂有关，不一定非加镍不可。球铁铁水白口倾向较大，活塞环的铸态组织有时难免出现游离碳化物，有时又会出现牛眼铁素体，也就是说，组织和性能会有较大的波动。因此，和合金灰铸铁环不同，球铁环大都采用淬火、回火工艺，目的是消除游离碳化物和铁素体，提高综合力学性能（强度和韧性）和活塞环组织与性能的均匀性，减小同一环的硬度差，提高活塞环性能和质量的稳定性，也可为活塞环材料提供不同的强度和韧性的配置，满足产品的不同要求。淬火时将环重叠并在夹具上压紧，在有保护气氛的炉内加热，通常加热温度为880～900℃，保温40～60min。淬后经碱水清洗并烘干后回火，回火温度取决于活塞环要求的硬度，回火时间约90～120min。

（3）可锻铸铁（包括半可锻铸铁）活塞环

在球墨铸铁问世以前，珠光体或马氏体可锻铸铁已经用于制造要求较高弹力和强度的活塞环。其典型生产工艺是先用金属型离心铸造方法浇注白口的筒体坯料，经高温石墨化退火得到铁素体可锻铸铁筒体；此时硬度低（低于150HB），切削加工性非常好，经机加工成单片环，再在保护气氛下加热至850℃左右进行正火处理（得到珠光体基体）或油淬回火（得到回火马氏体基体）。不同的热处理方法，再加上不同的化学成分和不同的熔炼工艺，使得到的活塞环性能有一个很宽的范围。

半可锻铸铁是另一种有特色的活塞环材料。半可锻铸铁又称碳化物可锻铸铁，实质上是第一阶段石墨化退火不完全的可锻铸铁，其典型化学成分为：C：2.6%～2.9%，Si：1.6%～2.0%、Mn：0.6%～0.8%，P：≤0.12%，S：≤0.12%，Mo：0.4%～0.6%，Cr：0.4%～0.6%。半可锻铸铁和一般可锻铸铁一样先浇铸成白口坯料，再经高温石墨化退火，但退火中只发生莱氏体的部分分解，即大部分碳化铁分解为铁和石墨，小部分则被保留下来，随后经不同的热处理得到不同的基体（珠光体或马氏体的回火组织）和6%～10%碳化物及团絮状石墨。这种铸铁具有一定的自润滑性和储油性能，同时由于基体上均匀分布着小块状碳化物而具有较好的耐磨性；因加入铬、钼等一些合金元素，耐折断性和热稳定性也比较高。

总的说来，可锻铸铁活塞环和半可锻铸铁活塞环在性能上与球铁环相当接近，就石墨形态而言，团絮状石墨在自润滑性和储油性上优于球状石墨，但球铁含碳量高，石墨量比可锻铸铁多。不过，可锻铸铁和球铁的抗擦伤性均不如灰铸铁。因此，可锻铸铁环和球铁环要求工作表面镀铬或喷钼处理；如不镀覆，则应和镀铬缸套配合使用。目前可锻铸铁环应用已不多见，半可锻铸铁环在欧洲尤其在英国应用多一些；实际上当需要应用较高强度的活塞环时更多地选用了球铁环。

不同铸铁活塞环材料的力学性能对比见表1-2-46。

表1-2-46 不同铸铁活塞环材料的力学性能

材料名称 / 力学性能	合金铸铁（珠光体铸铁及针状铸铁）	球墨铸铁（正火及淬火、回火）	可锻铸铁（正火及淬火、回火）	半可锻铸铁（淬火+回火）	半可锻铸铁（珠光体型）
抗拉强度 σ_b (MPa)		≥570	≥540	≥400	
抗弯强度 σ_{bb} (MPa)	350～550	1 000～1 700			775～940
硬度	97～107HRB (220～310HB)	20～45HRC (220～450HB)	200～400HB	25～35HRC (250～320HB)	100～102HRB (241～255HB)
弹性模量 E (GPa)	75～120	165～175	155～165	155～167	153～165

表1-2-47及表1-2-48分别列举一些合金铸铁及球铁活塞环材料的技术规格。

表 1-2-47 合金铸铁活塞环材料技术规格举例

材料牌号或资料来源	化学成分（%）	金相组织	力学性能	应用说明
RIK-10（日）	C：3.0~3.5 Si：2.2~3.2 Mn：0.4~1.0 P：<0.2 S：<0.12 Ni：0.8~1.2 Mo：0.8~1.2 V：0.05~0.2 Cr：0.1~0.3	无定向细片状石墨在贝氏体组织上均布	σ_{bb}>500MPa E：120GPa 硬度 108~114HRB	筒体离心铸造，用于汽车用汽油机
RIK-11（日）	C：3.0~3.5 Si：2.0~2.8 Mn：0.4~1.0 P：<0.3 S：<0.12 Mo：0.5~1.2 Cu：0.5~1.2 Cr：<0.5	无定向细片状石墨在贝氏体组织上均布	σ_{bb}>450MPa E：110GPa 硬度 102~110HRB	筒体离心铸造，用于柴油机的压缩环及油环
RIK-12（日）	C：3.4~3.9 Si：2.2~3.0 Mn：0.4~1.0 P：<0.3 S：<0.12 Mo：0.5~1.2 Cu：0.5~1.2 Cr：<0.5	无定向细片状石墨或星形石墨在贝氏体组织上均布	σ_{bb}>450MPa E：95GPa 硬度 98~110HRB	单体砂型铸造
RIK-30（日）	C：3.0~4.0 Si：2.0~3.2 Mn：0.5~1.0 P：0.4~0.8 S：<0.12 V：0.05~0.20 Ti：<0.1 Cr：<0.5	无定向细片状石墨或星形石墨在珠光体上均匀分布着磷共晶及钒、钛、铬等的复合碳化物	σ_{bb}>350MPa E：110GPa 硬度 95~107HRB	单体砂型铸造，用于不镀铬的活塞环
RIK-40（日）	C：3.3~3.9 Si：1.7~3.2 Mn：0.5~1.0 P：0.2~0.6 S：<0.12 Cr：<0.5	无定向细片石墨或星形石墨在珠光体基体上均匀分布着断网状磷共晶	σ_{bb}>350MPa E：95GPa 硬度 95~107HRB	单体砂型铸造，用于小型发动机
DANA-110（美）	C：3.5~3.95 Si：2.2~3.1 Mn：0.4~0.8 P：0.3~0.8 S：≤0.13 V：0.05~0.25 Mo：≤0.25 Cu：≤1.0 Cr：0.08~0.35	石墨A+B型为主，尺寸4~6，基体为小、中片珠光体，铁素体≤10%，碳化物≤5%，磷共晶断网状分布	σ_{bb}：379MPa E：83~117GPa σ_b：276MPa 硬度 95~107HRB	单体砂型铸造

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料牌号或资料来源	化学成分（%）	金相组织	力学性能	应用说明
DANA－110C（美）	C：2.9～3.5 Si：1.8～2.5 Mn：0.5～0.9 P：≤0.2 S：≤0.12 Cu：0.25～1.0 Ni：≤1.0 Cr：0.2～0.8	石墨A＋B型为主，尺寸4～8，基体为小中片珠光体，铁素体≤10%，碳化物≤5%	σ_{bb}：379MPa E：83～124GPa σ_b：241～310MPa 当环径＜165mm时，硬度95～107HRB；当环径≥165mm时，硬度92～104HRB	单体离心铸造
福特标准（美）	C：3.6～3.9 Si：2.2～2.9 Mn：0.5～0.8 P：0.3～0.5 S：≤0.12 Mo：≤0.2 Cu：≤1.5 Cr：0.25	石墨A＋B型为主，少量D、E型，基体为细片珠光体，铁素体≤5%，游离渗碳体≤5%，细网状磷共晶均布	σ_{bb}≥441MPa E：86.3～123GPa 硬度95～107HRB	单体砂型铸造
福特标准（美）	C：3.5～3.9 Si：2.2～3.1 Mn：0.4～0.8 P：0.3～0.8 S：≤0.12 Cr：≤0.35	石墨A＋B型为主，少量D型，基体为细珠光体为主，无游离渗碳体，断网状磷共晶均匀分布	厚度≤3.2mm时，硬度96～108HRB；厚度＞3.2mm时，硬度95～106HRB	单体砂型铸造
福特标准（美）	C：3.5～3.95 Si：2.2～3.1 Mn：0.4～0.8 P：0.3～0.8 S：≤0.13 V：0.05～0.25 Mo：≤0.25 Cu：≤1.0 Cr：0.08～0.35	石墨A＋B型为主，少量D型，基体为细珠光体＋≤10%铁素体＋≤5%游离渗碳体，断网状磷共晶均布	硬度95～107HRB	单体砂型铸造
福特标准（美）	C：3.3～3.55 Si：1.8～2.45 Mn：0.7～1.1 P：0.4～0.6 S：≤0.1 Cr：0.3～0.65	石墨A＋B型为主，尽可能少的D型，基体为珠光体＋≤5%铁素体；断网状磷共晶均布	硬度95～105.5HRB E：97～117GPa σ_b＞293MPa	筒体离心铸造
福特标准（美）	C：3.0～3.4 Si：2.75～3.3 Mn：0.4～0.8 P：0.25～0.45 S：≤0.1 Cu：0.75～1.25 Mo：0.75～1.25 Cr：0.2～0.4	片状石墨＋回火马氏体	硬度45～55HRC E：138GPa σ_b：414MPa	筒体离心铸造，退火后切片，经淬火、回火，用于需高抗折断性能时用，建议表面镀覆耐磨层

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料牌号或资料来源	化学成分（%）	金相组织	力学性能	应用说明
福特标准（美）	C：3.5~3.9 Si：2.5~3.1 Mn：0.5~0.8 P：0.35~0.7 S：≤0.1 V：0.05~0.15 Mo：<0.15 Cr：0.08~0.30	石墨A+B型为主，少量D型，基体为珠光体，铁素体≤5%，游离渗碳体≤5%，断网状磷共晶均布	硬度96~106HRB σ_{bb}：448MPa E：82.7GPa	双体（一切二）砂型铸造
福特标准（美）	C：3.3~3.6 Si：2.0~2.5 Mn：0.5~0.8 P：0.25~0.5 S：≤0.13 V：0.05~0.30 Mo：<0.15 Cu：0.3~0.6 Cr：0.08~0.30	石墨A+B型为主，少量D型，基体为珠光体，铁素体≤5%，游离渗碳体≤5%，断网状磷共晶均布	硬度96~106HRC σ_{bb}：448MPa E：82.7GPa	筒体离心铸造
《铸造手册》（中）	C：3.6~3.9 Si：2.2~2.7 Mn：0.6~1.0 P：0.35~0.5 S：≤0.1 W：0.4~0.65		硬度101~103HRB σ_{bb}：459MPa E：86.6GPa	单体砂型铸造，适用于汽车拖拉机发动机
《铸造手册》（中）	C：3.6~3.9 Si：2.2~2.5 Mn：0.6~1.0 P：0.3~0.6 S：≤0.1 W：0.3~0.5 V：0.15~0.2 Ti：0.1~0.2		硬度100~102HRB σ_{bb}：475MPa E：93.1GPa	单体砂型铸造，适用于汽车拖拉机发动机
《铸造手册》（中）	C：3.6~3.8 Si：2.2~2.7 Mn：0.7~0.9 P：0.3~0.5 S：≤0.1 W：0.35~0.45 Mo：0.2~0.3 Cr：0.2~0.3		硬度98~102HRB σ_{bb}：490MPa E：75~82GPa	单体砂型铸造，适用于汽车拖拉机发动机
《铸造手册》（中）	C：3.7~3.9 Si：2.0~2.5 Mn：0.6~0.9 P：0.3~0.5 S：≤0.1 Mo：0.25~0.45 Cr：0.25~0.35		硬度99~102HRB σ_{bb}：439MPa E：72.8GPa	单体砂型铸造，适用于汽车拖拉机发动机
《铸造手册》（中）	C：3.5~3.7 Si：2.4~2.6 Mn：0.8~1.0 P：0.2~0.3 S：≤0.06 B：0.03~0.05		硬度98~103HRB σ_{bb}：460~500MPa E：86~100GPa 弹力保持系数≥90%（300℃保温1h）	单体砂型铸造，适用于汽车拖拉机发动机

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料牌号或资料来源	化学成分（%）	金相组织	力学性能	应用说明
《铸造手册》（中）	C：3.6～3.9 Si：2.6～2.8 Mn：0.7～1.0 P：0.2～0.3 S：≤0.06 B：0.03～0.05 W：0.3～0.6 Cr：0.2～0.4		硬度 100～106HRB σ_{bb}：480～540MPa E：90～108GPa 弹力保持系数≤92% （300℃保温 1h）	单体砂型铸造，适用于汽车拖拉机发动机
《铸造手册》（中）	C：3.6～3.9 Si：2.6～2.8 Mn：0.7～1.0 P：0.2～0.3 S：≤0.06 B：0.03～0.05 V：0.1～0.25 Ti：0.05～0.15		硬度 100～108HRB σ_{bb}：500～590MPa E：96～110GPa 弹力保持系数≥94% （300℃保温 1h）	单体砂型铸造
《铸造手册》（中）	C：2.9～3.3 Si：1.8～2.2 Mn：0.9～1.2 P：0.2～0.3 S：≤0.06 B：0.03～0.045 Cr：0.2～0.3 Mo：0.3～0.4 Cu：0.8～1.2		硬度 100～108HRB σ_{bb}：570～620MPa E：120～134GPa 弹力保持系数≥94% （300℃保温 1h）	筒体离心铸造
《特许公告》昭 43403（日）	C：3.45 Si：2.49 Mn：0.7 P：0.21 S：0.01 Nb：0.55	珠光体基体上均匀分布着铌的碳氮化物；石墨以 A 型为主	σ_{bb}：450MPa E：112～7GPa	筒体铸造，环径 90mm
一汽试验报告（中）	C：3.6～3.9 Si：2.4～2.8 Mn：0.6～0.9 P：0.3～0.4 S：≤0.1 Nb：0.3～0.4 W：0.2～0.3 Cr：0.25～0.35 Mo：0.25～0.35		硬度 103～107HRB E：91～116GPa E/σ_{bb}：173～218	单体砂型铸造
FI4 合金格茨标准（德）	C：2.5～3.3 Si：3.8～4.8 Mn：0.8～1.2 P：≤0.35 S：≤0.15 Nb：0.1～0.4 W：0.8～1.2 V：0.3～0.7 Ti：0.1～0.3 Ni：0.5～1.0 Cu：0.5～1.0 Cr：0.2～0.4 Mo：0.5～1.0		硬度 110～116HRB σ_{bb}：≥650MPa E：130～160GPa	

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-48 球墨铸铁活塞环材料技术规格举例

材料牌号或资料来源	化学成分（%）	金相组织	力学性能	应用说明
RIK－25（日）	C：3.5～4.2 Si：2.2～3.4 Mn：0.2～0.8 P：≤0.2 S：≤0.05 Mo：0.5～1.0 Cu：0.5～1.0	在回火马氏体或贝氏体基体上均匀分布球状石墨	σ_{bb}＞1 000MPa E：170GPa 硬度 35～48HRB	用于环径＜200mm的柴油机压环；淬火、回火
DANA110－64（美）	C：3.3～4.0 Si：1.7～2.7 Mn：0.2～0.8 P：≤0.04 S：≤0.03 Mg：0.02～0.07	球状石墨，Ⅰ＋Ⅱ型＞80%，不希望有蠕虫状石墨（Ⅳ型）；基体为回火马氏体，无铁素体，碳化物≤5%	σ_{bb}：1 724MPa E：152～179GPa σ_b：827MPa σ_s：689MPa 硬度 35～45HRC	砂型重力铸造；淬火、回火；或离心铸造后退火切环再淬火、回火
DANA110－204（美）	C：3.3～4.0 S：1.7～2.7 Mn：0.2～0.8 P：≤0.04 S：≤0.03 Mg：0.02～0.07 Ni：≤1.5	球状石墨，Ⅰ＋Ⅱ型＞80%，不希望有蠕虫状石墨（Ⅳ型）；基体为回火马氏体，无铁素体，碳化物≤5%	σ_{bb}≥1 379MPa E：152～179GPa σ_b：758MPa σ_s：552MPa 硬度 28～38HRC	砂型重力铸造；淬火、回火；或离心铸造后退火切环再淬火、回火
福特标准（美）	C：3.1～3.7 Si：2.0～2.6 Mn：0.6～0.9 P：≤0.05 S：≤0.052 Mg：0.02～0.07 Ni：0.7～1.0 Mo：0.15～0.35 Cr：0.15～0.35	球状石墨，Ⅰ＋Ⅱ型＞80%，基体为回火马氏体，游离碳化物＋铁素体＜10%	σ_{bb}＞758MPa σ_s：517MPa E：152GPa 硬度 100～108HRB（成品环） 269～321HRB（筒体铸件）	离心铸造
福特标准（美）	C：3.5～4.0 Si：2.1～2.9 Mn：0.2～0.5 P：≤0.3 S：≤0.05 Mg：0.01～0.06 Ni：≤1.0	球状石墨，Ⅰ＋Ⅱ型＞80%，基体为回火马氏体，游离碳化物＋铁素体＜10%	σ_{bb}＞1 034MPa E：150GPa 硬度 28～40HRC（104～112HRB）	单体砂型重力铸造
福特标准（美）	C：3.5～4.1 Si：2.4～2.9 Mn：0.2～0.8 P：≤0.15 S：≤0.03 Mg：0.02～0.07 Ni：≤0.7 Mo：≤0.3	球状石墨，团片状及蠕虫状石墨尽量少，基体为细小的回火马氏体，游离碳化物≤5%，不允许有成块珠光体和游离铁素体	σ_{bb}≥1 373MPa E：142～181GPa 硬度 28～38HRC（104～113）HRB	淬火、回火

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料牌号或资料来源	化学成分（%）	金相组织	力学性能	应用说明
福特标准（美）	C：3.0～4.0 Si：4.0～5.5 Mn：0.25～0.5 P：≤0.2 S：≤0.04 Mg：0.01～0.06	球状石墨，Ⅰ+Ⅱ型>80%，基体为珠光体+≤40%铁素体，≤5%的碳化物分散分布	σ_{bb}：1310MPa E：145GPa 硬度98～108HRB	单体砂型重力铸造
福特标准（美）	C：3.6～4.0 Si：2.4～2.9 Mn：0.2～0.7 P：≤1.0 S：≤0.05 Mg：0.01～0.07 Ni：≤0.1	球状石墨，Ⅰ+Ⅱ型>80%，基体为细小的回火马氏体或索氏体，游离碳化物≤5%，不允许有成块珠光体和游离铁素体	σ_{bb}≥965MPa E：152～193GPa 硬度20～31HRC或98～106HRB	
格茨 K_1 标准（德）	C：3.6～4.0 Si：2.1～2.9 Mn：0.2～0.5 P：≤0.3 S：≤0.05 Cr：≤0.2 Ni：≤1.0 Mg：0.02～0.07			

1.2.5.3 用于凸轮轴及挺杆的铸铁

1）凸轮挺杆摩擦副的工况特点和失效形式

在发动机运行过程中，在配气机构的弹簧力和惯性力的作用下，凸轮与挺杆之间的接触应力很大，且不断变化，并伴随着表面敲击。同时，摩擦副处于边界润滑条件下的高速相对滑动中，接触表面产生很大的摩擦力。高的接触应力和摩擦力及滑动速度对凸轮、挺杆的失效起着决定性的作用。随着发动机向高速、大功率发展，凸轮与挺杆间的接触应力和相对滑动速度不断提高，这对摩擦副的工况将越来越为苛刻。

凸轮和挺杆的失效主要有三种类型，即擦伤、剥落（点蚀）和研磨磨损。

（1）擦伤

擦伤是多种失效形式中最严重的一种，它是最先出现的一种失效形式，可能发生在整个凸轮桃尖表面和挺杆基面上，在发动机运行后的短时期内就可发生。擦伤实质上是由接触面上的微小焊合所引起。擦伤往往发生在发动机投入使用的初期，凸轮和挺杆同时发现，发展迅速，很快将凸轮尖磨掉，挺杆端面磨出凹坑，被认为是灾难性的磨损。影响凸轮、挺杆擦伤的因素主要有产品设计、润滑、表面处理及材料冶金学特性等。

（2）点蚀（剥落）

点蚀（剥落）是凸轮和挺杆失效的主要形式，属于接触疲劳损坏。研究表明，最高的接触应力区是在表面以下<0.5mm的次表层处，作为疲劳源的微裂纹主要萌生于此。提高凸轮—挺杆摩擦副的接触疲劳寿命主要从降低最大接触应力和提高材料的抗点蚀性能两方面采取措施。影响最大接触应力的主要因

汽车论坛 http://www.qclt.com

素有：

a. 气门弹簧负荷——随着弹簧负荷降低最大接触应力减小；

b. 挺杆球面半径——随着挺杆球面半径的增大最大接触应力下降；

c. 凸轮尖部曲率半径——随着凸轮尖部曲率半径增大最大接触应力降低；

d. 凸轮和挺杆的材料弹性模量——随着凸轮和挺杆的材料弹性模量的减小最大接触应力减小。

从材料方面提高抗点蚀性能主要从两方面着手：一方面通过合金化或热处理或其它处理来提高基体组织的强度，增强对碳化物硬化相的支承作用，控制低强度相（如石墨、铁素体等）；另一方面尽量减少或消除材料中能够引起应力集中的因素，如减少或消除各种冶金缺陷（如偏析、疏松、夹杂、气孔、缩孔等）及工艺过程中可能产生的微裂纹（如热处理裂纹、磨削裂纹等）。

（3）研磨磨损（磨料磨损）

松散的磨料微粒在压力作用下在金属接触表面之间滑行，其作用就像研磨剂一样，通过研磨而使金属表面发生磨损，同时也使接触面变得非常光滑。这种类型的磨损称为研磨磨损或磨料磨损。作为磨料的微粒可能是润滑油的污垢，也可能是由接触表面脱落的微粒。凸轮—挺杆摩擦副的磨料磨损实际上发生于整个工作过程中。由于润滑剂在摩擦副的接触面之间能够形成低摩擦系数的油膜，防止金属对金属的直接接触，对提高耐磨性起着重要的作用，因此要根据摩擦副的材料匹配及工况条件选用适宜的润滑油及其添加剂。就凸轮、挺杆的材料而言，一般来说，耐磨性随硬度的提高而提高。钢和铸铁通过淬火提高硬度能显著地改善耐磨料磨损的能力，但马氏体是一种亚稳定组织，随着温度的升高，它要转变为更稳定的组织，因而马氏体不适用于高温下的耐磨性。由于在钢和铸铁中的碳化物是稳定的高硬度相，因此随着磨损表面碳化物颗粒数量的增加，耐磨性增加。

2）凸轮挺杆摩擦副材料的技术要求与材料选择

凸轮轴和挺杆的材料首先应能满足设计和使用上的要求，这些要求主要是：

①凸轮和挺杆互为配对的工作面（包括一定的表层深度）在高的接触应力和高的相对滑动速度下应具有优良的走合性能、抗擦伤性能、耐接触疲劳性能和耐磨性能，使这对摩擦副具有高的工作寿命；

②凸轮轴应具有一定的结构强度和刚度，使其胜任工作中所受到的弯矩和扭矩的作用；

③凸轮轴的轴颈表面性能应与轴承的材料性能相匹配；

④如果凸轮轴上做出用以驱动机油泵和分电器的齿轮，则凸轮轴选用的材料也应能满足该齿轮所要求的性能；

⑤凸轮—挺杆摩擦副的材料应与使用的润滑油及添加剂相适应。

除上述各点以外，还要考虑材料的工艺性能、实际的生产工艺条件和成本。

目前，凸轮轴和挺杆的材料种类较多，现归纳列于表 1-2-49。

除了表 1-2-49 列出的材料以外，近年来也有关于烧结粉末冶金凸轮轴及随动件的试验与应用的报导，例如用合金铁粉烧结成凸轮，然后用钎焊方法把凸轮装配固定到钢管上。粉末冶金凸轮轴在摩擦副的材料匹配方面和制造工艺方面还不十分成熟，目前尚未达到大量生产的实用阶段。

3）冷激铸铁凸轮轴的应用

冷激铸铁凸轮轴是当今世界各国汽车凸轮轴应用最多的一种。氩弧重熔铸铁凸轮轴（包括正在起步发展的激光重熔铸铁凸轮轴）从铸铁冶金学的角度看也属于冷激铸铁凸轮轴的范畴，但目前世界上普遍应用的是在铸型内利用冷铁的激冷作用生产得到的凸轮轴。

冷激铸铁凸轮轴的材质冶金质量对凸轮轴与挺杆摩擦副的服役寿命影响很大，其材质的基本技术要求是：

①保证凸轮（包括偏心轮）的冷激面有足够高的硬度和一定的冷激层深。一般地说，工作表面硬度越高，耐磨性和接触疲劳强度也越高；由于白口铸铁的脆性随硬度的提高而增大，所以冷激硬度也不是越高越好，过高也容易引起工作表面的剥落。

②冷激铸铁凸轮轴不需冷激的那部分灰铸铁材质应有一定的强度，以保证轴杆和轴上的螺旋齿轮必需的强度。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-49 凸轮轴和挺杆材料分类及其工艺与应用特点

材料		主要工艺及金相组织特征	性能特点及应用
名称	工艺类别		
冷激铸铁	铸态	铸造时在铸型内对应于凸轮和挺杆工作表面的部位放置冷铁，当铁水浇入型腔时利用冷铁的激冷作用，使铸件与冷铁接触的表面得到 3～6mm 深度的白口层，白口层中的碳几乎全部以化合碳存在，形成许多垂直于冷激表面的针状渗碳体。从激冷表面往里，断面由白口层（渗碳体＋珠光体）、麻口层（珠光体＋渗碳体＋石墨）过渡到灰口层（珠光体＋石墨），凸轮轴上的凸轮心部、轴颈和螺旋齿轮以及挺杆的杆部等未受冷激作用的部分是有一定强度和韧性并可以进行正常切削加工的珠光体灰铸铁	铸态冷激铸铁具有非常好的抗擦伤性和耐磨性；耐疲劳剥落的性能较差，但一般能满足使用要求（设计上推荐的最大许用接触应力为 950MPa）。对润滑油品种不敏感，要求较宽。广泛用于生产各种凸轮轴；尤其适用于接触应力较低而转速很高的顶置凸轮轴。也用于挺杆，但一般需再进行磷化或氮化处理
	热处理态（淬火、回火）	冷激铸铁毛坯经时效消除应力后进行初步加工，再经 850℃ 淬火，180℃ 回火。热处理应选择合适的加热温度及时间，尽可能使碳化物少分解。通过淬火、回火，基体由珠光体转变成细回火马氏体，提高了强度和硬度，有力地支持了碳化物	抗疲劳剥落性能比铸态冷激铸铁有了明显提高，但抗擦伤性降低。为防止擦伤，润滑油一般需增加抗擦伤添加剂。广泛用于生产挺杆。若需要进一步提高抗擦伤和抗点蚀疲劳能力，可以淬火后进行硫氮共渗或离子渗氮处理
	高频堆焊，喷水冷激淬火再回火	此工艺可用于挺杆。杆体用 20 钢挤压成形，采用 Ni、Cr、Mo 低合金铸铁焊条经高频加热熔化堆焊于挺杆工作端面，然后喷水冷激淬火，并经 300℃ 回火。堆焊层≥1.5mm，其金相组织碳化物＋回火马氏体，硬度可达 60～66HRC	性能基本上与淬火、回火的冷激铸铁相同，但堆焊层易产生气孔、夹杂等缺陷，冶金质量不易稳定
可淬硬铸铁	表面淬火（凸轮）	合金铸铁凸轮轴不经激冷，组织为含有一定量碳化物的麻口组织，凸轮经火焰加热或感应加热表面淬火，得到层深≥3mm 的淬硬层，经低温回火，其金相组织主要由回火马氏体和一定量的碳化物（10%～20%）及细条状石墨组织所组成。非淬硬的心部是含有少量碳化物的珠光体灰铸铁	在淬硬层中，碳化物硬度高，而马氏体基体的强度和硬度也相当高，同时又有石墨起储油和自润滑作用。这种组织兼顾了抗点蚀性和抗擦伤性。抗擦伤性仅次于冷激铸铁而优于钢，其耐接触疲劳能力优于冷激铸铁而比钢差。如需进一步提高抗擦伤性、抗点蚀性和耐磨性，于淬火及加工后可补充进行氮碳共渗、软氮化或硫氮共渗等表面处理。常用于制造凸轮轴
	整体淬火（挺杆）	整体淬火的可淬硬铸铁用于生产挺杆。毛坯为合金麻口铸铁，经整体淬火回火（860～880℃ 淬火，180℃ 回火），得到的组织为回火马氏体＋10%～30%的条状和断网状碳化物＋细片状石墨	其性能与表面淬火的可淬硬铸铁相当
球墨铸铁	表面淬火	珠光体球铁经中频表面淬火，得到金相组织为马氏体＋球状石墨的淬硬层，层深 2.5～4.5mm，硬度 45～55HRC。非淬硬层仍为珠光体球铁	抗疲劳剥落性能优于冷激铸铁和可淬硬铸铁，但比钢差；抗擦伤性不如冷激铸铁和可淬硬铸铁，但比钢好。可用于生产凸轮轴，也用于赛车发动机挺杆。应用时润滑油应加入抗擦伤添加剂。因球铁凸轮轴铸造的工艺质量问题较多，故应用不如可淬硬铸铁凸轮轴多

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料 名称	工艺类别	主要工艺及金相组织特征	性能特点及应用
表面重熔（熔凝）铸铁	等温淬火	球铁毛坯经半精加工后进行等温淬火（加热温度 860～880℃，等温温度 235～250℃），得到下贝氏体＋10%～15%马氏体＋少量残余奥氏体＋球状石墨的金相组织，硬度 42～50HRC	具有很高的综合力学性能，接触疲劳强度高于淬火回火的球铁，但不如渗碳钢；抗擦伤性与淬火回火球铁相当。因铸造及热处理工艺较复杂，切削加工性不好，故应用不多
	氩弧重熔	在氩保护气氛中，借助不熔化的钨棒与凸轮表面之间产生的电弧使铸铁表面熔化，再快速凝固而获得冷硬层，其金相组织与冷激铸铁基本相同，只是渗碳体被珠光体分隔得更细，凸轮表面硬度高达 54～64HRC，硬化层深 2～2.5mm。	耐磨性、抗擦伤性和抗点蚀性和冷激铸铁相当。其突出优点是铸坯的化学成分对金相组织的影响不像冷激铸铁那么敏感，也省去铸造时放冷铁的工序，对凸轮间距小、安放冷铁有困难的凸轮轴尤其适用。但需专用的氩弧重熔设备，一次性投资费用较大
	激光重熔	利用激光使工件表面超高速熔化，并与本体产生很大的温度梯度，随之靠自身的热传导高速急冷。金相组织分三层：表层为细密条状渗碳体＋少量针状马氏体＋一定数量微晶奥氏体；过渡层为更细小的莱氏体和较多的粗针状马氏体＋残留奥氏体＋未熔石墨；里层为未熔区，由细小的高碳针状马氏体＋残留奥氏体＋石墨组成。硬化层深 1～1.3mm，硬度 60～68HRC	因表层的相结构为大量的高硬度细密条状渗碳体，故具有特别高的耐磨性，但硬化层深较小，对防止次表层疲劳裂纹的萌生可能不能起大的作用。激光重熔工艺已有用于生产凸轮轴和摇臂的报导，但基本上还处于刚起步阶段
钢	表面淬火	常用 45 碳钢通过感应淬火使表层得到马氏体组织。淬硬层深 3～5mm，硬度可达 54～58HRC	抗点蚀性优于可淬硬铸铁和冷激铸铁，相当广泛地用于生产凸轮轴；但抗擦伤性差。润滑油需加抗擦伤剂
	渗碳淬火	常用 20、20Cr、20CrMnTi 钢进行渗碳淬火、回火，表层组织除细针状马氏体外，还有断续或连续细网状的碳化物。渗碳层一般 1～2mm，硬度不低于 58HRC	具有很高的抗疲劳剥落能力，抗点蚀性抗擦伤性和耐磨性均优于淬火的中碳钢；但抗擦伤性不及各种铸铁材料。可用于高接触应力而转速比较低的凸轮轴和挺杆；挺杆用得较多
	整体淬火	可用于生产挺杆，有一实例用 50Mn2 钢制造挺杆，820℃油淬，300℃回火，金相组织为回火马氏体，硬度 47～54HRC	抗擦伤性差，实际应用不多
	盐浴渗氮	用低碳钢（如 20 钢）在 550～570℃下用氰酸盐盐浴处理，使表面产生一层很薄的含氮化物的硬化层	渗氮能显著改善抗擦伤性，也能提高疲劳强度，可用于生产凸轮轴和挺杆

③凸轮轴非冷激部分的硬度应适中。过高则影响机械加工，并且太脆，容易折断；太低则影响轴颈及螺旋齿轮的耐磨性。

④凸轮（包括偏心轮）激冷层的金相组织应主要是由含有大量针状碳化物的莱氏体与细片珠光体所组成，碳化物含量≥40%；仅允许有很少量的点状石墨，冷激面上即使出现局部的少量的共晶团石墨也是有害的。

⑤凸轮轴的非激冷区的金相组织应主要由细片状珠光体及片状石墨（以 A 型、B 型为主，石墨长度 4～6 级）所组成。一般要求碳化物含量≤10%，铁素体含量≤5%。

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑥凸轮轴铸件毛坯不允许有缩孔、缩松、夹渣、气孔、砂眼、裂纹等影响加工、外观和使用要求的缺陷。

⑦凸轮轴应进行消除内应力的时效处理。

某些典型的冷激铸铁凸轮轴的化学成分及组织与性能列于表 1-2-50。

表 1-2-50 某些典型的冷激铸铁凸轮轴的化学成分和组织、性能的要求

铸铁牌号或应用车型	化学成分（%）							对材质组织、性能的要求
	C	Si	Mn	P	S	Cr	其它	
Monikrom	3.1～3.5	1.8～2.5	0.5～0.8	≤0.2	≤0.15	0.7～1.0	Ni：0.15～0.25 Mo：0.15～0.25	$\sigma_b \geqslant$ 236MPa，$\sigma_{bb} \geqslant$ 472MPa，桃尖硬度≥40HRC，非冷激区硬度 240～300HB
Lydalloy	3.1～3.9	1.5～2.4	0.6～0.9	≤0.2	≤0.15	≤0.3	必要时 Mo：0.6～0.8 Cu：0.6～0.8	桃尖硬度 53～56HRC，轴颈硬度 197～241HB，加 Mo、Cu 时的轴颈硬度 275～325HB
GLAI（法，PSA）	3.2～3.7	1.7～2.2	0.6～1.1	≤0.18	≤0.15			桃尖没有石墨，硬度≥50HRC，轴颈石墨 A 型，3～5 级，基体为珠光体、铁素体，游离碳化物＜2%
EK 型、HB 形轴、凸轮轴（日、本田）	3.0～3.5	1.8～2.4	0.5～0.8	≤0.1	≤0.05	0.45～0.65	Mo：0.45～0.65 Ni：0.9～1.1 Te：0.0004～0.0007	白口层深≥4.5mm 桃尖硬度≥50HRC
"R1K－C_t"（原理研）	3.0～3.6	1.8～2.4	0.5～1.0	≤0.3	≤0.15	≤0.1		桃尖硬度≥45HRC，可与多种材质挺杆摇臂配合使用
上海牌轿车凸轮轴（国产）	3.4～3.6	1.6～2.0	0.5～0.7	≤0.08	≤0.1	0.3～0.5	Mo：0.2～0.5 Cu：0.9～1.1	$\sigma_b \geqslant$ 200MPa，$\sigma_{bb} \geqslant$ 400MPa，桃尖硬度 47～52HRC，非冷激区硬度 200～280HB

正确确定冷激铸铁的化学成分是保证凸轮轴组织和性能的重要条件。冷激铸铁白口层的硬度主要靠由碳所形成的碳化物的量来控制。提高含碳量增加白口层硬度，但减小白口层深。增加硅量减小白口层深，却对白口层硬度没有影响。在生产中，碳量配合冷铁的冷激作用用于控制白口层硬度，而硅量主要用来控制白口层深。在冷激铸铁中，碳、硅含量既对白口层的硬度和深度影响十分敏感，对非冷激区的灰铸铁材质的影响也十分敏感，满足了白口层硬度和深度的要求，未必能满足灰铸铁强度和硬度的要求。因此，在冷激铸铁凸轮轴的生产中往往要借助合金元素来使冷激层与非冷激层两方面的性能取得协调。世界上用于生产冷激铸铁凸轮轴的铸铁以英国米德兰汽车缸体公司开发的"Monikrom"合金铸铁最为著名，这种铸铁在欧洲已用了近半个世纪，到目前仍为世界许多厂家所沿用。这种铸铁的凸轮轴一般都带有驱动机油泵一分电器的小齿轮，因为，齿轮有高的强度和耐磨要求，所以在化学成分中除常规的五个基本元素外，还

汽车论坛 http://www.qclt.com

含有合金元素，其中含铬量高达0.7%～1.0%（参见表1-2-50）。近年来随着对冷激铸铁凸轮轴冶金过程研究的深入，对铬在冷激铸铁凸轮轴中的负面作用有了新的认识，对“Monikrom”牌号中的含铬量提出了异议。因为铬在冷激铸铁中扩大麻口区，过高的铬量使冷激区与非冷激区的组织和性能的协调控制发生困难：保证了冷激层的碳化物含量和硬度，则会导致非冷激区碳化物含量过高而影响强度和加工性；反之，保证了非冷激区较低的碳化物含量和硬度，则又会出现冷激层硬度偏低。英国莱德梅特公司（Lydmet Ltd）在分析、总结了含铬量较高的“Monikrom”铸铁的不足之后，开发出商品名称为“Lydalloy”的低铬（<0.3%Cr）的冷激铸铁凸轮轴专用铸铁（参见表1-2-50），通常该牌号是不加合金元素的，如果要求非冷激区有较高的强度和硬度，则可加入适量的钼和铜。

冷激铸铁凸轮轴一般铸后只作消除内应力处理，有的加工后还经过磷化或氮化，多数情况是不经表面处理就装机使用。

4）冷激铸铁挺杆的应用

国内外的汽车发动机以采用冷激铸铁挺杆为最多，这种挺杆广泛用于和同样材料的凸轮配对，也常常和可淬硬铸铁、钢和球墨铸铁凸轮轴配对。根据产品的设计和使用要求、润滑油的条件及摩擦副的配对材料，冷激铸铁挺杆可采用铸态的淬火或回火处理；如果需要，加工后还可进行表面处理（磷化、氮化、硫化或蒸汽氧化等）。

（1）铸态冷激铸铁挺杆

铸态冷激铸铁挺杆最突出的优点是抗擦伤性和耐磨性特别好，它与任何一种材料的凸轮配对在润滑油不用加抗擦伤添加剂的条件下均容易不产生擦伤，但其弱点是抗点蚀性较差。国外用淬火一回火的冷激铸铁比较多，因其抗点蚀性较好，但抗擦伤性较差。在国外，擦伤问题主要靠采用含有抗擦伤添加剂的高级润滑油来解决。在我国，润滑油升级以及升级后的大批量供应和应用还需要一个过程，在当前高级润滑油还难于普遍采用的情况下，汽车发动机采用铸态冷激铸铁挺杆比较符合国情，更容易为广大汽车用户所接受。因为铸态冷激铸铁挺杆的耐磨性和抗擦伤特别好，再加上不需热处理，工艺成本低，因而国外汽车发动机采用的为数也不少。

为了使铸态冷激铸铁挺杆具有良好的摩擦、磨损性能，特别是在铸态条件下能有较高的耐疲劳剥落性能，对其金相组织的要求是：

a. 冷激层的渗碳体含量应适当地高。坚硬耐磨的渗碳体在组织中起骨架支撑作用，渗碳体含量不足，则表面硬度降低，接触疲劳强度和耐磨性达不到要求，但渗碳体含量过多则脆性增加，也容易造成挺杆剥落。一般要求渗碳体数量在45%以上。

b. 希望渗碳体按照垂直于冷激面的方向凝固结晶，防止莱氏体枝晶“倒伏”，但这并不是要求渗碳体越细长、垂直于端面越直以及排列越整齐越好。经试验和观察发现，渗碳体比较粗、短、钝，形状和排列不甚整齐的对提高抗剥落性更为有利，因为这种形状的渗碳体不易断裂，这种分布形式也不易产生裂纹的扩展。

c. 珠光体组织应细密，分布均匀，防止聚集。聚集的珠光体一般以团块状出现，在冷激面形成软点带。

d. 尽可能减少白口层的石墨数量，只允许点状石墨存在，不允许有片状石墨。

e. 既要保证端面的白口层深度，又要防止白口与麻口延伸进入杆部而影响加工。

国内外几种典型的铸态冷激铸铁挺杆的化学成分和端面硬度要求列于表1-2-51。

表1-2-51 国内外几种典型的铸态冷激铸铁挺杆的化学成分和端面硬度

材料牌号或应用车型	化学成分（%）						端面硬度HRC	附注
	C	Si	Mn	P	S	其它		
Brico Alloy 1号（英）	3.5～3.6	2.1～2.8	0.6～0.8	≤0.25	≤0.12	Cr：0.1～0.25	≥48	英国常用成分

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

材料牌号或应用车型	化学成分(%)						端面硬度HRC	附注
	C	Si	Mn	P	S	其它		
Brico Alloy 4号(英)	≤3.45	≤2.4	0.6~1.2	≤0.3	≤0.12	Cr: 0.1~0.3 Mo: 0.4~0.8	≥45	英国倒置桶形挺杆常用成分
PSA-GLDI(法)	3.4~3.7	2.1~2.6	0.6~1.0	≤0.15	≤0.15		≥50	白口层金相组织为渗碳体+珠光体，无石墨；杆部珠光体≥50%，石墨为A(4~5级)+B+D
日野(日)	3.61	1.98	0.62	0.067	0.018	Cr: 0.32 Mo: 0.18 Cu: 0.78	≥54	时效，磷化
五十铃(日)	3.52	2.44	0.78	0.066	0.027	Cr: 0.56	≥52	时效，磷化
活塞环公司(日)	3.5	2.23	0.59	0.18	0.10	Cr: 0.65 Mo: 0.39	≥56	时效，磷化
伊顿(美)	3.1~3.6	2.2~2.3	0.85~1.25	≤0.2	≤0.1		≥52	时效，磷化
南汽NJD433柴油机	3.5~3.7	1.8~2.2	0.5~0.9	≤0.2	≤0.12	Cr: 0.4~0.8 Mo: 0.3~0.5	≥55	时效、磷化
东风EQ6100汽油机	3.55~3.75	2.1~2.3	0.5~0.7	≤0.12	≤0.12	Cr: 0.25~0.35 Mo: 0.35~0.45	≥52	时效、磷化
南通柴油机厂	3.2~3.6	1.8~2.4	0.4~0.6	0.05~0.12	≤0.1	Cr: 0.5~0.8 Mo: 0.5~0.7 Ni: 0.1~0.3	≥54	时效，磷化

(2)淬火—回火的冷激铸铁挺杆

冷激铸铁挺杆经淬火、回火后，强化了基体，减小了碳化物与基体之间的硬度差，加强了基体对碳化物的支撑作用；在热处理加热、保温过程中，针条状的碳化物的尖角变钝、变圆，这对于降低碳化物的脆性，减小碳化物的应力集中，延迟点蚀裂纹的萌生与扩展也起着有利的作用。但也因为马氏体与碳化物之间的硬度差缩小，不能依靠其磨损差形成储油沟槽来保持连续润滑油膜，再因为马氏体本身在高温下组织不稳定，使淬火挺杆的抗擦伤、抗粘着能力下降。因此在淬火挺杆的应用中常常不得不借助于在润滑油中加入抗擦伤添加剂以解决擦伤问题。国外在车用润滑油升级方面进展很快，因而淬火挺杆应用十分普遍，广泛用于和各种不同材料的凸轮轴匹配上。我国在润滑油升级方面和国外尚有差距，但淬火挺杆与铸态冷激铸铁凸轮轴匹配对于润滑油的品种等级并不敏感，因而适于目前在我国推广应用。在凸轮—挺杆摩擦副中，挺杆更容易产生剥落，把铸态冷激铸铁凸轮轴与淬火、回火冷激铸铁挺杆结合起来，一方面利用不淬火凸轮轴在耐磨性和抗擦伤性方面的优点，一方面又发挥淬火挺杆在抗疲劳剥落方面的优势，将能从整体上提高这对摩擦副的服役性能。

淬火挺杆的化学成分要在不淬火挺杆的成分基础上适当调整，例如不淬火挺杆含铬量一般在0.3%以下，而淬火挺杆铬可提高到0.5%~1.0%。铬提高碳化物的高温稳定性，适当提高铬量能防止碳化物在加

汽车论坛 http://www.qclt.com

热、保温中过份分解。又如钼、镍、锰等元素含量也可适当提高，以利于淬透性。典型的淬火、回火冷激铸铁挺杆的化学成分和热处理工艺规范列于表 1-2-52 中。

表 1-2-52 典型的淬火、回火冷激铸铁挺杆的化学成分和热处理规范

化学成分(%)	热处理工艺规范	端面硬度(热处理后)
C:3.5～3.7 Si:2.1～2.3 Mn:0.6～0.8 P:≤0.2 S:≤0.12 Cr:0.5～0.7 Mo:0.4～0.6	500℃预热，在 850～860℃盐浴加热，油淬。 200～250℃回火 1.5～2h	60～65HRC

5)可淬硬铸铁凸轮轴及挺杆的应用

由可淬硬铸铁生产的凸轮轴采用火焰或感应淬火的方法对凸轮、偏心轮进行局部表面硬化以得到耐磨的硬化表层，而可淬硬铸铁挺杆则采用整体淬火、回火的热处理工艺对整个零件进行强化。凸轮轴和挺杆的淬火、回火组织是回火马氏体＋少量(5%～20%)的针状和网状碳化物＋少量残留奥氏体＋细条状石墨。这种组织在摩擦过程中，其中的碳化物起耐磨骨架作用，马氏体基体起强化组织作用，而细条状石墨则起自润滑作用和储油作用，故兼有好的耐磨性、抗擦伤性和抗点蚀性。其耐磨性和抗擦伤性比钢好，仅次于冷激铸铁；其抗点蚀性比冷激铸铁好，但比钢差。可淬硬铸铁的铸件造型工艺简便，一般不需冷铁，但对铸态和淬火后组织中的碳化物的形态和数量以及材质的硬度要求比较严格，而且机加工性能也较差。

可淬硬铸铁凸轮轴和挺杆在美国应用十分广泛，通用、福特和克莱斯勒汽车公司生产的汽车大都采用这种凸轮轴和挺杆。美国在发展汽车工业的同时，积极推进润滑油的升级，为可淬硬铸铁凸轮轴和挺杆的广泛应用创造了条件。在欧洲，冷激铸铁凸轮轴和挺杆一直占优势，但也有一些发动机采用了可淬硬铸铁凸轮轴和挺杆。如德国大众、英国罗佛、法国雪铁龙和西姆卡和瑞典沃尔沃等的不少轻、轿车型也采用了可淬硬铸铁凸轮轴和挺杆。

用于生产凸轮轴及挺杆的可淬硬铸铁实际上是合金麻口铸铁，在其金相组织中要求含有一定数量的针状碳化物和网状碳化物。因铸坯通常采用砂型铸造，冷却速度不够快，碳化物的形态、分布和数量主要靠铸铁中的合金元素(主要是铬)来保证。各国典型的可淬硬铸铁凸轮轴和挺杆的化学成分、金相组织和性能要求分别列于表 1-2-53 及表 1-2-54 中。从表可以看出，世界各国的可淬硬铸铁无论用于生产凸轮轴或用于挺杆，在化学成分、金相组织和力学性能方面的技术要求差别不大；其化学成分大致相当于在 HT200 或 HT250 灰铸铁的基础上加入 0.8%～1.2%铬、0.4%～0.7%钼及 0.2%～0.8%镍；抗拉强度(φ30 铸态试棒)不低于 250MPa。铸态金相组织为珠光体＋少量针状和(或)网状碳化物＋细条状石墨。淬火、回火后得到细针状的回火马氏体基体，碳化物数量有所减少，其边缘棱角也不如铸态清晰，连续网状也可能变为断网状；石墨的形态和数量也有类似情况。金相组织中碳铸化物的类型及材质的硬度要求如表 1-2-55。

表 1-2-53 典型的可淬硬铸铁凸轮轴的化学成分、金相组织和性能

牌 号	化学成分(%)	力学性能	金相组织	附 注
SAE J431 G 4000D (美)	C:3.1～3.6 Si:1.95～2.4 Mn:0.6～0.9 P:≤0.07 S:≤0.12 Cr:0.85～1.25 Mo:0.4～0.6 Ni:0.2～0.45	非淬硬区： 硬度 241～320HB σ_b≥276MPa 抗弯力≥11 564N 挠度≥6.9mm (按 φ30.5 铸态试棒)	铸态组织： 细片珠光体基体上含初生碳化物及尺寸 4～7 的 A 型或 E 型石墨	金相组织在凸轮表面以下≥3.2mm 处测量

续上表

牌　号	化学成分(%)	力学性能	金相组织	附　注
GM120－M（美）	总碳:3.1～3.45 化合碳:0.85～1.25 Si:2.1～2.4 Mn:0.6～0.9 P:≤0.2 S:≤0.15 Cr:0.85～1.25 Mo:0.4～0.6 Ni:0.2～0.45	非淬硬区: 硬度 248～311HB σ_b≥276MPa 抗弯力≥13 809N 挠度≥5.6mm (按 φ30.5 铸态试棒)	铸态基体: 珠光体＋碳化物	电炉熔炼;化学成分是制约性的
	C:3.25～3.5 Si:2.15～2.45 Mn:0.6～0.8 P:≤0.15 S:≤0.15 Cr:0.9～1.1 Mo:0.4～0.6 Ni:≤0.4	非淬硬区: 硬度 241～321HB σ_b≥276MPa 抗弯力≥13 809N 挠度≥5.6mm (按 φ30.5 铸态试棒)	铸态基体: 珠光体＋碳化物	电炉熔炼;化学成分是制约性的
GM6016－M（美）	C:3.25～3.5 Si:2.15～2.45 Mn:0.6～0.8 P:≤0.15 S:≤0.15 Cr:1.3～1.5 Mo:0.4～0.6 Ni:≤0.4	非淬硬区: 硬度 241～321HB σ_b≥311MPa (按 φ30.5 铸态试棒)	铸态基体: 珠光体＋碳化物	电炉熔炼;化学成分是制约性的
标准 123A（美）	C:3.1～3.4 Si:2.1～2.4 Mn:0.5～0.8 P:≤0.2 S:≤0.15 Cr:0.8～1.1 Mo:0.4～0.6	淬后桃尖: 硬度 50～58HRC 轴部: 硬度 248～311HB	成品桃尖: 马氏体＋针状碳化物＋细片状石墨	
标准 123B（美）	C:3.1～3.45 Si:2.1～2.4 Mn:0.6～0.9 P:≤0.2 S:≤0.2 Cr:0.85～1.2 Mo:0.4～0.6 Ni:0.2～0.45	淬后桃尖: 硬度 50～58HRC 轴部: 硬度 248～311HB	成品桃尖: 马氏体＋针状渗碳体＋细片状石墨	
标准 123C（美）	C:3.4～3.75 Si:2.1～2.35 Mn:0.6～0.9 P:≤0.5 S:≤0.15 Cr:1.0～1.25 Cu:1.4～1.7	淬后桃尖: 硬度 50～58HRC 轴部: 硬度 248～311HRC		

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

牌 号	化学成分(%)	力 学 性 能	金 相 组 织	附 注
"日环"可淬硬铸铁 A1	C:3.0～3.6 Si:1.5～2.5 Mn:0.5～1.0 P:≤0.03 S:≤0.1 Cr:0.5～1.0 Mo:0.2～0.8 Ni:0.2～0.8 Cr:0.2～0.8	淬后桃尖: 硬度>50HRC 轴部: 硬度 241～302HB	淬火层: 马氏体+碳化物+片状石墨	Cu 或 Ni 任选加入一种
"日环"可淬硬铸铁 A2	C:2.8～3.5 Si:1.5～2.5 Mn:0.5～1.0 P:≤0.03 S:≤0.1 Cr:0.7～1.6 Mo:0.2～0.8 Ni:0.2～0.8 Cu:0.2～0.8 V:<0.5	淬后桃尖: 硬度>50HRC 轴部:硬度 241～321HB	淬火层: 马氏体+碳化物+片状石墨	Cu 或 Ni 任选加入一种
PSA－GLA2（法）	C:3.2～3.5 Si:2.0～2.5 Mn:0.6～0.9 P:≤0.15 S:≤0.15 Cr:0.65～0.85 Mo:0.35～0.55 Ni:≤0.3	淬后桃尖: 硬度>50HRC 凸轮侧面(非淬硬区): 硬度 241～285HB	铸态组织: 石墨 A+D+E 型 珠光体,碳化物	
"Cromel"（英）	C:3.3～3.75 Si:1.95～2.6 Mn:0.6～1.1 P:≤0.2 S:≤0.15 Cr:0.85～1.2 Mo:0.35～0.45	轴部: 硬度 255～310HB $\sigma_b \geq 243$MPa (BS 0.564 时试棒)		

表 1-2-54 几种典型的可淬硬铸铁挺杆的化学成分、金相组织和性能

牌号或应用车型	化学成分(%)	金相组织和性能要求	附 注
Taunus12M 发动机 Ford Zephyt 发动机 （德）	C:3.0～3.4 Si:2.0～2.4 Mn:0.7～0.9 P:≤0.2 S:≤0.1 Cr:0.9～1.25 Mo:0.4～0.7 Ni:0.4～0.7	金相组织: 回火马氏体+针状及网状碳化物+细片状石墨; 铸态硬度:31～36HRC 热处理态硬度:端面中心≥55HRC 推杆座≥50HRC	热处理工艺: 加热至 860～880℃ 保温 3min,油淬,175℃ 回火 1h

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

牌号或应用车型	化学成分(%)	金相组织和性能要求			附注
Brico Alloy 41（英）	C:3.1~3.3 Si:2.1~2.4 Mn:0.7~0.9 P:≤0.2 S:≤0.1 Cr:1.0~1.25 Mo:0.5~0.7 Ni:0.4~0.7	热处理后硬度≥53HRC			865℃油淬 220℃回火 1h
切诺基（美）	C:3.0~3.4 Si:2.0~2.4 Mn:0.5~1.0 P:≤0.08 S:≤0.04 Cr:0.9~1.2 Mo:0.5~0.8 Ni:0.5~0.8	部位	碳化物(%)	硬度HRC	φ23液压挺杆
		端面中心	7~15	55~58	
		$\frac{1}{2}$半径	15~25	57~58	
		边缘	25~35	58~62	

表 1-2-55 可淬硬铸铁凸轮轴及挺杆的碳化物类型及零件的硬度

零件名称	部位	碳化物类型	硬度	
			铸态	淬火、回火后
凸轮轴（感应淬火）	桃尖	针状为主	28~35HRC	50~60HRC
	凸轮心部轴杆	细网状为主	241~320HB	
挺杆（整体淬火）	端面	针状为主	31~36HRC	≥55HRC
	杆座	细网状为主	241~320HB	≥50HRC

1.2.5.4 用于气阀座的铸铁

1）气阀座的工况及材料技术要求

气阀座通过进、排气阀的配合，起着保持燃烧室气密性的重要作用。气阀座与气阀是发动机中服役工况最为严峻的一对摩擦副。当配气机构工作时，气阀以高达每分钟上千次的频率反复敲击气阀座的上端内锥面，产生很大的冲击力，特别对排气阀门来说，排气温度最高可达800℃以上，当排气阀打开时，高温、高压、高腐蚀性并含有颗粒尘埃的气流冲刷着排气阀座的内壁，使磨损工况变得十分复杂，存在着多种磨损形式，即：

①阀座在座面受到气阀拍打及撞击引起变形，出现毛刺，经燃烧气体冲刷、腐蚀、氧化后脱落而引起的磨损；

②气阀落座时的旋转运动与阀座面之间引起的滑动磨损；

③在爆发过程中由于排气阀菌部变形，阀面与座面相对滑动而引起的磨损；

④高温燃烧气体对阀座面的腐蚀磨损；

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑤燃烧产物、金属微粒等的磨料磨损。

汽油机排气阀座的磨损与汽油中的含铅量有密切的关系，铅含量多，燃烧产物的铅化合物沉积物也多，这些铅化合物成为气阀与阀座之间的润滑剂，对减小座面的粘着磨损起着重要的作用。由于铅对大气污染这一公害问题越来越受到全世界的关注，因而从70年代起降低车用汽油中的含铅量以至无铅化便成为世界汽车发展的趋势。无铅汽油的应用使作为润滑剂的铅化合物不再存在，这一来，排气阀与阀座之间的接触成为干态的金属直接接触，磨损也就成为十分突出的问题。

气阀座尤其是排气阀座的工况条件，决定了其材料应具有如下性能要求：

①高温稳定性

理想的阀座要求在高温下连续工作期间不应发生金相组织的变化，保持物理、力学性能和几何尺寸的稳定。

②耐燃气腐蚀性

汽车发动机中的燃料燃烧产物含有水蒸汽，其中含有腐蚀性气体，如氧化硫、氧化碳和氧化氮等；如果蒸汽发生冷凝，则腐蚀性气体溶于水而形成酸类，加剧了腐蚀磨损；含铅汽油燃烧生成的氧化物也起腐蚀作用。

③耐磨性能

耐磨性能包括抗磨粒磨损、粘着磨损和耐冲击—滑动磨损的能力。这里，既要求材料具有承受气阀锤击的金属基体整体强度，又要求有弥散分布的高硬度硬化相，使之具有良好的抗磨损性能，同时也又希望在金属骨架中含有均匀分布的稳定的固体润滑剂，这种润滑剂一方面减小接触面之间的摩擦，一方面也防止彼此之间的“粘着”。

④热膨胀系数

对于镶嵌式阀座，热膨胀系数要与配合座接近，如果热膨胀系数不适应，则在发动机运行时阀座可能脱落而把发动机打坏。

⑤热传导性能

发动机的热量相当大的部分由排气阀通过阀座传入气缸盖上的冷却水套。提高阀座的导热性能降低气阀的工作温度，有利防止气阀烧蚀。

⑥切削性能

理想的阀座材料应有高的耐磨性而又具有可切削性。一些钢、铁阀座材料经淬火后其硬度可提高到65－56HRC，甚至更高，淬火后耐磨性也相应提高，但随之而来的是切削加工性的恶化，这就大大地限制了这类阀座的应用。

2）整体式感应淬火阀座的应用

整体式阀座指的是阀座直接在灰铸铁缸盖本体上形成，不另镶座圈。为了提高耐磨性，必须对缸盖上的各个阀座孔进行感应淬火，淬火层的金相组织为：马氏体＋贝氏体＋细小珠光体＋细片状石墨。硬度≥50HRC。整体式感应淬火阀座的最大优点是阀座与缸盖之间不存在界面，导热性能好，因而能降低阀座及气阀阀头的温度，有利于提高气阀的寿命。这种阀座在使用无铅汽油的汽油机上或柴油机上均有采用。如康明斯B系列柴油机在灰铸铁缸盖上采用了整体式感应淬火阀座，经1 000h发动机台架强化试验，阀座磨损（下沉量）在0.9－1.5mm之间。

3）镶嵌式阀座的应用

镶嵌式阀座是用特殊的合金制成阀座圈镶嵌到缸盖的阀座孔中，一般地说，镶嵌式阀座可得到比整体式阀座更高的耐磨性，更能满足发动机的使用要求。

用于镶嵌的阀座材料大体上可分为四大类，即铸铁、钢、有色合金和粉末冶金材料。铸铁和钢应用较多，对于工况条件特别苛刻的大功率发动机排气阀座，在个别情况下也采用了价格昂贵的镍基合金和钴基合金。近十多年来，粉末冶金阀座的发展极为迅速，目前，美、日及欧洲各国的大部分汽车发动机使用了粉末冶金的进、排气阀座。不过，在我国现阶段，阀座的生产和应用仍以铸铁材料为主。表1-2-56列举了典型的铸铁阀座的化学成分、组织、性能及应用特点。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-2-56 典型的铸铁阀座材料的化学成分、金相组织、性能及应用特点

铸铁类型	化学成分（%）							金相组织及主要性能	应用特点	牌号或资料来源
	C	Si	Mn	P	S	Cr	其它			
磷合金铸铁	≤3.6	1.9～2.2	0.6～0.9	0.2～0.35	≤0.1	0.2～0.25		珠光体基体上分布着网状或断网状磷共晶和片状石墨，硬度210～260HB	加工性好，用于低负荷的阀座	《内燃机铸铁》（英）
	3.6～3.8	2.6～2.9	0.7～0.9	0.4～0.6	≤0.06	0.8～1.2	V:0.25	在细珠光体基体上均匀分布着细小磷共晶和网状碳化物及片状石墨，允许有少量C型石墨，硬度241～302HB	用于进气阀座及负荷不高的排气阀座	PSA－GLEI（法）
铬钼合金铸铁	2.8～3.1	2.2～3.0	0.6～1.0	≤0.35	≤0.1	1.6～2.4	Mo:1.8～2.5	经高温退火，退火后金相组织为：小块状碳化物＋珠光体＋团絮状石墨，退火后硬度40～45HRC	用于进气阀座及普通的排气阀座	Brico 42#（美）
	2.5～3.0	1.5～2.0	0.5～0.8	≤0.2	≤0.1	2.8～3.25	Mo:4～5	退火态使用，金相组织为：渗碳体＋屈氏体＋马氏体；退火后硬度≥50HRC	加工性较差，用于汽车发动机阀座	高尔基汽车厂（原苏联）
高铬铸铁	2.4～2.7	0.9～1.5	0.6～0.9	≤0.12	≤0.1	13～16		退火态：高铬共晶碳化物＋二次碳化物（圆粒状）＋铁素体；硬度30～35HRC	加工性好，抗腐蚀性及耐热性也好，但圆粒状二次碳化物容易从铁素体基体脱落，可用于一般阀座	Brico 52#（美）
								淬火态：退火后加工再淬硬，基体转变为马氏体，硬度提高至55HRC左右	耐磨性比退火态提高，但加工困难	
	2.4～2.7	0.9～1.5	0.6～0.9	≤0.1	≤0.1	13～16	Cu:6～8 Mo:0.8～1.2	高温退火态：高铬共晶碳化物＋二次碳化物（多角状）＋铁素体＋粒状游离铜；硬度38～44HRC	多角状二次碳化物不易从铁素体脱落；铜有减摩作用，故耐磨性优于退火态Brico 52#合金，加工性尚可	东风公司厂标（中）
高镍奥氏体铸铁（Ni－Resist）	≤3.0	1.0～2.5	1.0～2.5	–	≤0.12	1.75～2.5	Ni:13.5～17.5 Cu:5.5～7.5	单一的奥氏体基体上分布着片状石墨和少量碳化物，硬度130～160HB，抗拉强度170～210MPa	耐热，耐腐蚀，热膨胀系数与铝合金相当	

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.2.5.5 用于涡轮增压器壳体等耐热零件的铸铁

1)增压器耐热零件的材质性能要求

现代增压发动机中以废气涡轮增压器壳体为代表的耐热零件是由特种耐热铸铁生产的.这种类型的铸铁应具备如下性能:

(1)高温抗氧化性好

普通铸铁在400℃以上就开始氧化,600℃以上氧化特别剧烈。石墨形状对铸铁的抗氧化性能有重大影响,灰铸铁中的片状石墨基本上互相连接,它成为氧进入金属内部的通道,故氧化速度很快;球铁的石墨是孤立的,没有这样的通道,氧化速度明显降低;蠕墨铸铁中的石墨基本上不是孤立的,但紧密程度较高,故其氧化速度介于灰铁与球铁之间。加入合金元素是提高铸铁抗氧化性能的主要手段。通过加入某些合金元素在铸铁表面生成稳定的、高熔点的致密合金氧化膜,具有良好的保护作用,能使铸铁的抗氧化能力显著加强。具有这种作用的元素有硅、铬、铝等。

(2)抗生长性好

在高温下工作的铸铁在长期加热或经受反复加热冷却的交变温度循环的作用中,其尺寸会发生不可逆的膨胀,即所谓的"生长"。生长不仅使铸铁降低强度,还会损坏与之联接的零件。生长的原因首先是铸铁中各元素被氧化后产生的氧化物体积大于金属本身的体积;其次是高温下发生的组织变化,如渗碳体分解出石墨所引起的体积增加。由于氧化是铸铁生长的主要原因,而且组织变化又促进这一过程的发展,所以那些提高抗氧化性能及提高共析相变温度的元素如Si、Al、Cr等都能提高铸铁的抗生长能力。镍扩大奥氏体区,含高镍的铸铁的共析相变点降低到室温以下,成为奥氏体铸铁,高温下无相变,因而也具有高的抗生长性能。

(3)高温力学性能好

涡轮增压器壳体属保安件,它对高速旋转的涡轮转子起着防护作用,保证壳体在高温下的结构强度是增压器安全运行的基本要求。在各种类型的铸铁中,就高温抗拉强度、断裂强度和蠕变强度而言,以高镍奥氏体球墨铸铁最好,中硅铁素体球铁次之。这两类铸铁中如果加入适量的钼,高温性能还能进一步提高。因此,现代发动机的涡轮增压器铸件包括某些要求特别高的耐热性能的排气管主要是用这两种铸铁制造的。

(4)耐热疲劳或热冲击性能好

在增压发动机中,增压系统与排气系统互相联接,当温度发生变化时,相关零件在热应力作用下要求变形小,且不开裂。高镍奥氏体球铁这方面的性能是相当好的。虽然镍和硅一样是降低铸铁导热率的元素,随着镍含量的增加,铸铁的导热率下降,但是由于高镍球铁在高温下没有相变,并且又有较高的高温强度和韧性,所以在各类耐热铸铁中,其抗热疲劳或抗热冲击性能还是最好的。

2)耐热铸铁的选用

耐热铸铁有铝系铸铁、铬系铸铁、硅系铸铁和高镍奥氏体铸铁四大体系。从高温抗氧化、抗生长性能上看,铝系和铬系铸铁最为突出,高温强度也相当高,但耐热冲击性能较差。铝系耐热铸铁在发动机耐热零件上很少应用,主要问题是铝铸铁在熔炼、浇注及在铸型中,铝被氧化形成Al_2O_3的膜,当氧化膜卷入铁水中会形成夹杂及冷隔缺陷。铬系铸铁有高的耐热性能,且在高温下有一定的耐磨性,但脆性较大。高铬铸铁有较大的冷裂倾向,并且也有形成氧化膜及冷隔的倾向,铸造性能较差,尤其是切削加工性特别差。

硅系耐热铸铁的抗氧化、抗生长性能不及铝铸铁和铬铸铁,高温力学性能和耐热冲击性能不及高镍奥氏体铸铁,但因成本低,铸造性能和切削性能较好,所以还是得到广泛应用。特别是硅系球墨铸铁,通过硅、钼等元素的合理配置,兼顾了耐热性能、常温及高温力学性能、工艺性能和成本,从而在增压器铸件和某些排气管上得到相当多的应用。

高镍奥氏体铸铁虽然抗氧化、抗生长性能比高铝铸铁和高铬铸铁差,但在各种温度下却有良好的综合性能。高镍奥氏体球铁的高温蠕变极限和抗热冲击性能高于其它耐热铸铁,这是它的最大优点,尽管这类铸铁价格昂贵,但仍为许多要求高的涡轮增压器零件所采用。70年代初美国开发出一种含34%~36%Ni、5%~6%Si和1.5%~2.5%Cr的耐高温奥氏体球铁,它在温度高达980℃的空气里有很好的抗氧化性,同时,从20℃至810℃的热循环中显示出优越的综合性能,如尺寸稳定性、抗裂性等,并且有足够的抗蠕变与断裂特

汽车论坛 http://www.qclt.com

性;如果再加入0.5%～1.0%的钼,高温断裂强度与蠕变强度还能进一步提高。这种铸铁被公认为制造废气涡轮增压器壳体的最佳材料;不过因含镍量很高,价格昂贵。对于工作温度不超过700℃的增压器壳体,为降低成本可选用含镍20%及含铬2%～3%的奥氏体铸铁。从常温及高温强度看,两种材料差别不大,但在抗氧化性、抗热冲击能力及高温韧性等方面后者不及前者,而且,热膨胀系数后者也较大。

一些汽车上常用的耐热铸铁列于表1-2-57中。

表1-2-57 用于汽车耐热零件的典型耐热铸铁牌号

铸铁类型	牌号	化学成分(%) C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	其它	金相组织	性能	应用
中硅耐热球铁	PSA－GSD(法)	3.1～3.5	3.8～4.2	≤0.5	≤0.05	≤0.02	≤1	≤0.1	Mo:0.5～0.7 Cu:≤0.1 Sn:≤0.05	球状+团状石墨≥85%铁素体≥85%细小网状碳化物≤5%	硬度:197～241HB	排气温度≥750℃的排气管
	RIK－TC－1(日)	<3.4	3.5～4.5	<0.3	<0.05	<0.03			必要时加Mo:0.5～1.0	球化率≥80%基体为铁素体	硬度:160～240HB σ_b>450MPa σ_s>300MPa δ>5%	工作温度≤650℃的涡轮增压器壳体
高镍奥氏体球铁	ASTM D_2(美) GGGNiCr202(德)	≤3.0	1.5～3.0	0.5～1.5	≤0.08	≤0.03	18～22	1.0～2.5	必要时加Mo:0.5～1.0	在奥氏体基体上分布球状石墨及共晶碳化物	σ_b:370～480MPa σ_s:210～250MPa δ: 7%～20% 冲击值(V缺口)14～27J E:112～130GPa 硬度:140～200HB 线膨胀系数$18.7^{10^{-6}}$/℃	工作温度至700℃的涡轮增压器壳体
	ASTMD_2S(美) GGGNiSiCr3552	≤2.0	4～6	0.5～1.5	≤0.08	≤0.03	34～36	1.5～2.5	必要时加Mo:0.5～1.0	在奥氏体基体上分布球状石墨及共晶碳化物	σ_b:370～500MPa σ_s:200～290MPa δ:10%～20% 冲击值(V缺口)12～19J E:110～145GPa 硬度:130～170HB 线膨胀系数$12.6^{10^{-6}}$/℃	工作温度至870℃的涡轮增压器壳体

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.2.6 铸钢

铸钢兼有钢的强韧性与铸造成形的优越性，但也存在铸造凝固收缩大、需要大冒口补缩、钢液工艺出品率低以及由于钢液温度高达1600℃而引起的炉衬、包衬、铸型材料的高耐火度要求等缺点。

铸钢的种类很多，有铸造碳钢、铸造低合金高强度钢以及耐热、耐蚀、不锈、耐磨等特殊用途钢等。汽车用铸钢件常用铸造碳钢。在汽车工业中，除重型载货车部分零件采用铸钢件外，中、轻型载货车及轿车很少采用。

在GB11352—89中，将铸造碳钢分为5个牌号，并对各牌号的化学成分与力学性能作出规定，表1-2-58列出我国和美国铸造碳钢的化学成分，表1-2-59列出了我国、美国、日本和ISO铸造碳钢力学性能的下限值。

表1-2-58 一般工程用铸造碳钢的化学成分[①]（%）

标 准	牌 号	C[③]	Si	Mn	S	P	残余元素[④]				
							Ni	Cr	Cu	Mo	V
我国标准（GB11352—89）	ZG200－400	0.20	0.50	0.80	0.01	0.01	0.30	0.35	0.30	0.20	0.05
	ZG230－450	0.30		0.90							
	ZG270－500	0.40									
	ZG310－570	0.50	0.60								
	ZG340－640	0.60									
美国标准（ASTM A22/A27M）	N－1[②]	0.25	0.80	0.75	0.06	0.05	–	–	–	–	–
	N－2[②]	0.35	0.80	0.60	0.06	0.05					
	U－415－205(60－30)	0.35	0.80	0.75	0.06	0.05					
	415－205（60－30）	0.30	0.80	0.60	0.06	0.05					
	450－240（65－35）	0.30	0.80	0.70	0.06	0.05					
	485－250（70－36）	0.35	0.80	0.70	0.06	0.05					
	485－275（70－40）	0.25	0.80	1.20	0.06	0.05					

注：①表中数值为化学成分的上限值。

②美国标准中除牌号标志外，需规定类别即[(N－1)或(N－2)]。(N－1)类只作成分分析，(N－2)类需要热处理但不作力学性能试验，U－415－250不经热处理但需作力学性能试验。其余需作热处理和力学性能试验。括号内的数值为英制单位的指标。

③C比上限每降低0.01%，允许Mn含量增加0.04%。但Mn含量最高除ZG200—400不超过1.20%，70—40铸钢不超过1.40%外，其余牌号铸钢中不允许超过1.00%。

④需方不要求时，残余元素不作分析。

表1-2-59 铸造碳钢的力学性能下限值

标 准	牌 号	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ (%)	根据订货合同选取		
					ψ (%)	冲击韧度[①]	
						A_{KV} (J)	α_K (J/cm²)
我国标准（GB11352—89）	ZG200－400	200	400	25	40	30	60
	ZG230－450	230	450	22	32	25	45
	ZG270－500	270	500	18	25	22	35
	ZG310－570	310	570	15	21	15	30
	ZG340－640	340	640	10	18	10	20
美国标准[②]（ASTM A27/A27M—87）	U－415－205（60－30）	205	415	22	30		
	415－205－（60－30）	205	415	24	35		
	450－240（65－35）	240	450	24	35		
	485－250（70－36）	250	485	22	30		
	485－275（70－40）	275	485	22	30		
日本标准（JISG5101—91）	SC360	175	360	23	35		
	SC410	205	410	21	35		
	SC450	225	450	19	30		
	SC480	245	480	17	25		
ISO3755—91	200－400	200	400～550	25	40	30	
	230－450	230	450～600	22	31	25	
	270－480	270	480～630	18	25	22	
	340－550	340	550～700	15	21	20	

注：①冲击韧度A_{KV}为冲击吸收功（V形缺口），α_K冲击韧度（U形缺口）。②美国标准中伸长率为δ_{50}值。

（撰稿人：陈勉己）

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.3 有色金属材料

1.3.1 铝合金

铝在地球中分布极广、矿藏丰富，蕴藏量约为铁的两倍，它的产量仅次于钢铁。我国有极其丰富的铝矿资源，为工业上广泛应用提供了有利条件。铝有良好的物理性能、加工性能、力学性能等综合特性，使铝及其合金成为最有竞争力的有色金属材料。纯铝的密度仅为2.7g/cm^3，只有钢、铜或黄铜的三分之一，这对于要求质量轻、强度高的零件最为合适，因此，铝合金一直是航空工业的主要材料。随着汽车节能降耗和轻量化的迫切要求，铝在汽车上的用量迅速增加。

铝及铝合金可生产各种型材（板、带、管、棒、线等）、锻件、铸件、冲压件、粉末冶金件和机械加工零件。

纯铝的强度很低，一般不作为结构材料使用，当在铝中加入其它元素使之合金化后，便能获得高的比强度。根据铝合金的成分和生产工艺特点，可将其分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。

1.3.1.1 铸造铝合金材料

铸造铝合金是在铝中添加其它金属或非金属元素所熔制的合金。借助合金化的作用，使铝合金具有良好的综合性能。铝合金可采用多种铸造工艺方法生产零件，选用铸件的主要目的通常不是追求力学性能，而是为了降低生产零件的最终成本。铸件常以增加断面厚度和采用复杂设计，以补偿较低的强度和减少零件的机械加工量，因而铸件多是外形复杂，并带有孔或内腔的壳体件产品。目前在汽车铝铸件生产中，多选用压力铸造、金属型重力铸造、低压铸造、挤压铸造和实型铸造等工艺。零件形状不同、质量要求不同和产量规模不同，选择的铸造工艺也不同，但最重要的因素应是可生产性、质量和成本。对于需要用砂芯成形内腔的厚壁复杂铸件，可选用金属型重力铸造、低压铸造和挤压铸造工艺，并可借助热处理进一步改善力学性能。压力铸造工艺多用于制造薄壁且强度要求不太高的零件。

铸造铝合金中常添加的合金元素有Si、Cu、Mg、Zn、Ni、Sn和稀土（RE）等。目前世界各国的铸造铝合金均根据主要化学成分进行分类，我国铸造铝合金按所含基本合金元素不同，在国标GB/T1173—1995中分为如下五个合金系列。

铸造铝合金
- 铸造Al-Si（包括Al-Si-Cu）合金系
- 铸造Al-Cu合金系
- 铸造Al-Mg合金系
- 铸造Al-Zn合金系
- 铸造Al-RE合金系

各类铸造铝合金牌号及化学成分列入表1-3-1中。

铸造铝合金力学性能可用单铸试样或从铸件本体切取试样测得。在国家标准GB/T1173—1995中，规定了铸造铝合金标准试样（砂型和金属型）及浇冒系统，铸件本体上切取试样的尺寸要求。表1-3-2中列出了汽车生产中应用最广的铸造Al-Si合金试样力学性能。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-1　铸造铝合金牌号及化学成分(GB/T1173—1995)

合金牌号	合金代号	化学成分(%)																
		Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ni	Sn	Pb		Fe		杂质总和		Al
													S	J	S	J	
ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5	0.2	0.25~0.45	0.3	0.35	Ti+Zr 0.25			0.01	0.05	Be 0.1	0.5	0.9	1.1	1.5	余量
ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5~7.5	0.1	0.25~0.45	0.1	0.1	0.08~0.20	0.2		0.01	0.03		0.2	0.2	0.7	0.7	
ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0	0.3	0.1	0.1	0.5	0.2						0.7	1.0	2.0	2.2	
ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5	0.1	0.17~0.35	0.25	0.2~0.5	Ti+Zr 0.15			0.01	0.05		0.6	0.9	1.1	1.4	
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6	0.3	0.5	Ti+Zr 0.15			0.01	0.05	Be 0.1	0.6	1.0	1.1	1.4	
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.55	0.1	0.1				0.01	0.05		0.2	0.2	0.5	0.5	
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	7.5~8.5	1.0~1.5	0.3~0.5	0.2	0.3~0.5	0.1~0.25			0.01	0.05		0.6	0.8	0.9	1.0	
ZAlSi7Cu4	ZL107	6.5~7.5	3.5~4.5	0.1	0.3	0.5				0.01	0.05		0.5	0.6	1.0	1.2	
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0	0.2	0.3~0.9	0.2		0.3	0.01	0.05			0.7		1.2	
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.3	0.2	0.2	0.2		0.8~1.5	0.01	0.05			0.7		1.2	
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	8.0~10.0	1.3~1.8	0.4~0.6	0.1	0.10~0.35	0.10~0.35			0.01	0.05		0.4	0.4	1.0	1.0	
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	6.5~7.5	0.2	0.45~0.60	0.1	0.1	0.1~0.2	Ti+Zr 0.2		0.01	0.03	Be 0.04~0.07	0.2	0.2	0.75	0.75	
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	4.8~6.2	0.1	0.40~0.65	1.2~1.8	0.1				0.01	0.05	Sb 0.10~0.25	0.3	0.3	0.8	1.0	

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

合金牌号	合金代号	化学成分（%）																
		Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Zr	Ni	Sn	Pb		Fe		杂质总和		Al
													S	J	S	J	
ZAlSi8MgBe	ZL116	6.5~8.5	0.3	0.35~0.55	0.3	0.1	0.1~0.3	0.2	B 0.1	0.01	0.05	Be 0.15~0.4	0.6	0.6	1.0	1.0	余量
ZAlCu5Mn	ZL201	0.3	4.5~5.3	0.05	0.2	0.6~1.0	0.15~0.35	0.2	0.1				0.25	0.30	1.0	1.0	
ZAlCu5MnA	ZL201A	0.1	4.8~5.3	0.05	0.1	0.6~1.0	0.15~0.35	0.15	0.05				0.15		0.4		
ZAlCu10	ZL202	1.2	9.0~11.0	0.3	0.8	0.5			0.5				1.0	1.2	2.8	3.0	
ZAlCu4	ZL203	1.2	4.0~5.0	0.05	0.25	0.1	0.2	0.1		0.01	0.05		0.8	0.8	2.1	2.1	
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	0.06	4.6~5.3	0.05	0.1	0.6~0.9	0.15~0.35	0.15	0.05			Cd 0.15~0.25	0.15	0.15	0.4		
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	0.06	4.6~5.3	0.05		0.3~0.5	0.15~0.35	V:0.05~0.3 Zr:0.05~0.2		0.01	Cd:0.15~0.25 B:0.005~0.06		0.15	0.15	0.3	0.3	
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	1.6~2.0	3.0~3.4	0.15~0.25	0.2	0.9~1.2		0.15~0.25	0.2~0.3			RE 4.4~5.0	0.6	0.6	0.8	0.8	
ZAlMg10	ZL301	0.3	0.1	9.5~11.0	0.15	0.15	0.15	0.2	0.05	0.01	0.05	Be 0.07	0.3	0.3	1.0	1.0	
ZAlMg5Si1	ZL303	0.8~1.3	0.1	4.5~5.5	0.2	0.1~0.4	0.2						0.5	0.5	0.7	0.7	
ZAlMg8Zn1	ZL305	0.2	0.1	7.5~9.0	1.0~1.5	0.1	0.1~0.2					Be 0.03~0.1	0.3		0.9		
ZAlZn11Si7	ZL401	6.0~8.0	0.6	0.1~0.3	9.0~13.0	0.5							0.7	1.2	1.8	2.0	
ZAlZn6Mg	ZL402	0.3	0.25	0.5~0.65	5.0~6.5	0.1	0.15~0.25			0.01		Cr 0.4~0.6	0.5	0.8	1.35	1.65	

注：表中未列出成分范围者，为杂质最大值

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-2 铸造 Al-Si 合金力学性能(GB/T1173—1995)

合金牌号	合金代号	铸造方法*	合金**状态	力学性能(不低于)		
				抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	布氏硬度 HBS (5/250/30)
ZAlSi7Mg	ZL101	S、R、J、K	F	155	2	50
		S、R、J、K	T2	135	2	45
		JB	T4	185	4	50
		S、R、K	T4	175	4	50
		J、JB	T5	205	2	60
		S、R、K	T5	195	2	60
		SB、RB、KB	T5	195	2	60
		SB、RB、KB	T6	225	1	70
		SB、RB、KB	T7	195	2	60
		SB、RB、KB	T8	155	3	55
ZAlSi7MgA	ZL101A	S、R、K	T4	195	5	60
		J、JB	T4	225	5	60
		S、R、K	T5	235	4	70
		SB、RB、KB	T5	235	4	70
		J、JB	T5	265	4	70
		SB、RB、KB	T6	275	2	80
		J、JB	T6	295	3	80
ZAlSi12	ZL102	SB、JB、RB、KB	F	145	4	50
		J	F	155	2	50
		SB、JB、RB、KB	T2	135	4	50
		J	T2	145	3	50
ZAlSi9Mg	ZL104	S、J、R、K	F	145	2	50
		J	T1	195	1.5	65
		SB、RB、KB	T6	225	2	70
		J、JB	T6	235	2	70
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	S、J、R、K	T1	155	0.5	65
		S、R、K	T5	195	1	70
		J	T5	235	0.5	70
		S、R、K	T6	225	0.5	70
		S、J、R、K	T7	175	1	65
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	SB、R、K	T5	275	1	80
		J、JB	T5	295	2	80

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

合金牌号	合金代号	铸造方法*	合金**状态	力学性能(不低于)		
				抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	布氏硬度 HBS (5/250/30)
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	SB	F	175	1	70
		JB	T1	195	1.5	70
		SB	T5	235	2	60
		JB	T5	255	2	70
		SB	T6	245	1	80
		JB	T6	265	2	70
		SB	T7	225	2	60
		J	T7	245	2	60
ZAlSi7Cu4	ZL107	SB	F	165	2	65
		SB	T6	245	2	90
		J	F	195	2	70
		J	T6	275	2.5	100
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	J	T1	195	-	85
		J	T6	255		90
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	J	T1	195	0.5	90
		J	T6	245	-	100
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	S	F	125	-	80
		J	F	155	-	80
		S	T1	145	-	80
		J	T1	165	-	90
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	J	F	205	1.5	80
		SB	T6	255	1.5	90
		J、JB	T6	315	2	100
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	SB	T5	290	2	85
		J、JB	T5	310	3	90
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	S	T4	225	4	70
		J	T4	275	6	80
		S	T5	275	3.5	90
		J	T5	315	5	100
ZAlSi8MgBe	ZL116	S	T4	255	4	70
		J	T4	275	6	80
		S	T5	295	2	85
		J	T5	335	4	90

* S——砂型铸造；J——金属型铸造；R——熔模铸造；K——壳型铸造；B——变质处理。

** 合金热处理状态见以后的表 1-3-6。

汽车论坛 http://www.qclt.com

Al-Si 系合金是铸造铝合金中品种牌号最多、应用最广的一类合金，它具有优良铸造工艺性能，耐腐蚀性能，力学性能和可切削加工性能，适于铸造形状复杂承受中等载荷的结构件和壳体件。在 Al-Si 系合金中，因 Si 含量较高，为使共晶 Si 变质细化，提高其力学性能，特别是提高合金的伸长率，通常对含 Si 量大于 6%的合金，需用 Na、Sr 或 Sb 等进行变质处理。

ZL107 合金有较好的铸造工艺性能、气密性和可切削加工性，可在热处理强化和变质处理状态下使用，多用于生产形状复杂壁厚不均，要求强度高和尺寸稳定性好的铸件，如柴油发动机曲轴箱、齿轮室罩盖、飞轮壳、化油器等零件。ZL108 和 ZL109 属共晶 Al-Si 合金，耐热性和耐磨性优良，热膨胀系数小，导热率高，经熔炼变质处理和热处理后，有良好的室温和高温力学性能，是典型的汽车发动机活塞材料。ZL109 中加 Ni，因而比 ZL108 合金的高温性能稍优。ZL101、ZL104 和 ZL105 为 Al-Si-Cu（Mg）系合金，依 Si、Mg、Cu 的含量不同而区分，它们有较好的铸造工艺性能、好的气密性，随各种合金元素含量的不同，热处理后的力学性能也有所差异，常用于生产发动机缸体、缸盖、曲轴箱、油底壳和油泵壳等零件。

铸造 Al-Si 合金生产工艺性能对比见表 1-3-3，汽车用几种铸造 Al-Si 合金高温力学性能列入表 1-3-4 中。

表 1-3-3 铸造 Al-Si 合金工艺性能比较

合金代号	浇注温度（℃）	收缩率（%）		流动性	气密性	抗热裂性	缩孔倾向	气孔倾向	切削加工性	焊补性能	耐腐蚀性	抛光性	阳极氧化处理能力	适合铸造工艺		
		线收缩	体收缩											S	J	Y
ZL101	680～780	1.1～1.2	3.7～3.9	优	优	优	良	良	中	良	中	中	中	○	○	–
ZL101A	680～780	1.1～1.2	3.7～3.9	优	优	优	良	良	中	良	中	中	中	○	○	–
ZL102	670～780	0.9～1.0	3.0～3.5	优	优	优	良	中	劣	良	良	劣	差	–	–	○
ZL104	680～760	1.0～1.1	3.2～3.4	优	良	优	良	中	中	中	中	差	差	○	○	○
ZL105	680～760	1.15～1.2	4.5～4.9	良	良	良	良	良	中	良	中	中	差	○	○	–
ZL105A	680～760	1.15～1.2	4.5～4.9	良	良	良	良	良	中	良	中	中	差	○	○	–
ZL106	680～760	1.2～1.3	6.2～6.5	优	良	良	良	良	良	良	中	差		○	○	–
ZL107	680～760	1.1～1.2		良	良	良	良	良	良	良	差	差		○	○	–
ZL108	680～760	0.9～1.1		优	优	优	良	中	良	良	中	差		–	○	–
ZL109	680～760	0.9～1.1		良	良	优	良	良	良	良	中	差		–	○	–
ZL111	680～760	0.9～1.1		良	良	优	良		良	良	差	差		○	○	–
ZL114A									差	优		中		○	○	–
ZL115				优	良	良	良		差	优		中		○	○	–
ZL116				优	优	优	优		差	优		中		○	○	–

注：S——砂型；J——金属型；Y——压力铸造。

“○”表示适合铸造工艺；“—”表示不适合。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-4 汽车用几种铸造 Al-Si 合金高温力学性能（参考）

合金牌号及状态	温度 / 力学性能		100℃			150℃			200℃			250℃			300℃		
			σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)
ZL101	J	T6	205	170	6.0	145	115	10.0	85	65	30.0	55	35	55.0	35	30	50.0
		T7	185	160	10.0	145	115	20.0	85	60	40.0	50	35	55.0	30	20	70.0
ZL102	Y	F	225	140	5.0	220	130	8.0	165	105	15.0	90	60	29.0	50	35	35.0
ZL104	Y	F	295	165	3.0	235	160	5.0	145	90	14.0	75	45	30.0	45	30	45.0
ZL105	J	T6	275	185	5.0	220	170	10.0	130	90	20.0	70	35	40.0	40	20	50.0
ZL109	J	T5	240	170	1.0	215	150	1.0	180	105	2.0	125	70	5.0	70	30	10.0
ZL112	Y	F	310	165	4.0	235	150	5.0	165	110	8.0	90	55	20.0	50	30	30.0
ZL113	Y	F	315	170	1.0	260	165	2.0	180	125	6.0	95	60	25.0	50	30	45.0

压力铸造是汽车铝合金铸件生产的重要工艺。压铸件尺寸精确、表面光洁、力学性能较高，可铸造形状复杂的薄壁零件，生产效率高，铸件质量稳定，重现性好，是少、无切削加工的重要工艺，最适合批量大的汽车零件生产，得到广泛应用。汽车上的铝合金壳体、罩盖等类零件均选用压铸工艺生产。压力铸造工艺已向铸件质量高、机械化和自动化程度高及大型化方向发展。压铸用铝合金，要求有较好的流动性、补缩能力和抗热脆性等特性，因此 Al-Si 系（包括 Al-Si-Cu 系）合金是汽车上应用最广的压铸合金，用于生产发动机缸体、曲轴箱、离合器壳、变速器壳、转向器壳等重要零件，表 1-3-5 列出主要国家常用压铸铝合金牌号、化学成分及力学性能。为防止压铸生产中，液体合金粘模现象出现，压铸铝合金铁含量应适当提高。压铸件不需进行热处理。

铸件服役在不同的工况条件，对合金的性能有不同的要求，同一种铝合金，可采用不同的热处理工艺规范，获得所需的性能，以满足铸件的不同使用要求。汽车生产中使用较广泛的是铸造 Al-Si 系合金，其热处理工艺规范列入表 1-3-6 中。

国内外铸造 Al-Si 合金牌号对照见表 1-3-7。

表 1-3-5　主要国家压铸铝合金化学成分及力学性能

国别	合金牌号	化学成分（%）												力学性能（不低于）		
		Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Ti	Sn	Pb	杂质总和	Al	σ_b（MPa）	δ（%）	HBS
中国	YZAlSi12（YL102）	10.0～13.0	0.6	0.05	0.6	1.2	0.3						余量	220	2	60
	YZAlSi10Mg（YL104）	8.0～10.5	0.7	0.17～0.30	0.2～0.5	1.0	0.3			0.01	0.05			220	2	70
	YZAlSi12Cu2（YL108）	11.0～13.0	1.0～2.0	0.4～1.0	0.3～0.9	1.0	1.0	0.05		0.01	0.05			240	1	90
	YZAlSi9Cu4（YL112）	7.5～9.5	3.0～4.0	0.3	0.5	1.2	1.2	0.5		0.1	0.1			240	1	85
	YZAlSi11Cu3（YL113）	9.6～12.0	1.5～3.5	0.3	0.5	1.2	1.0	0.5		0.1	0.1			230	1	80
	YZAlSi17Cu5Mg（YL117）	16.0～18.0	4.0～5.0	0.45～0.65	0.5	1.2	1.2	0.1	0.1					220	＜1	
日本	ADC1	11.0～13.0	1.0	0.3	0.3	1.3	0.5	0.5		0.1			余量	240	1.8	
	ADC3	9.0～10.0	0.6	0.4～0.6	0.3	1.3	0.5	0.5		0.1				295	3.0	
	ADC10	7.5～9.5	2.0～4.0	0.3	0.5	1.3	1.0	0.5		0.3				296	2.0	
	ADC12	9.6～12.0	1.5～3.5	0.3	0.5	1.3	1.0	0.5		0.3				296	2.0	
德国	GBD-AlSi9Cu3	8.0～11.0	2.0～3.5	0.1～0.5	0.1～0.5	1.2	1.2	0.3		0.1	0.2	0.2	余量	240～310	0.5～3	80～120
	GBD-AlSi12	10.5～13.5	0.1	0.05	0.001～0.4	1.0	0.1		0.15			0.2		220～280	1～3	60～100
	GBD-AlSi12(Cu)	10.5～13.5	1.2	0.4	0.1～0.5	1.2	0.5	0.2	0.15		0.2	0.2		220～300	1～3	60～100
	GBD-AlSi10Mg	9.0～11.0	0.1	0.2～0.5	0.001～0.4	1.0	0.1		0.15			0.2		220～300	1～3	60～100

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

国别	合金牌号	化学成分（%）												力学性能(不低于)		
		Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Ti	Sn	Pb	杂质总和	Al	σ_b (MPa)	δ (%)	HBS
美国	360.0	9.0~10.0	0.6	0.4~0.6	0.35	2.0	0.5	0.5		0.15		0.25	余量	300	2.5	
	A360.0	9.0~10.0	0.6	0.4~0.6	0.35	1.3	0.5	0.5		0.15		0.25		320	3.5	
	380.0	7.5~9.0	3.0~4.0	0.1	0.5	2.0	3.0	0.5		0.35		0.5		320	2.5	
	A380.0	7.5~9.0	3.0~4.0	0.1	0.5	1.3	3.0	0.5		0.35		0.5		320	3.5	
	384.0	10.5~12.0	3.0~4.5	0.1	0.5	1.3	1.0	0.5		0.35		0.5		330	2.5	
	390.0	16.0~18.0	4.0~5.0	0.5~0.65	0.1	1.3	0.1		0.2			0.2		280	<1	
	B390.0	16.0~18.0	4.0~5.0	0.5~0.65	0.5	1.3	1.5	0.1	0.2			0.5		320	<1	
	413.0	11.0~13.0	1.0	0.1	0.35	2.0	0.5	0.5		0.15		0.25		300	2.5	
	A413.0	11.0~13.0	1.0	0.1	0.35	1.3	0.5	0.5		0.15		0.25		290	3.5	
	C443.0	4.5~6.0	0.6	0.1	0.35	2.0	0.5	0.5		0.15		0.25		230	9	
法国	A-S9V3	8.0~10.0	2.7~3.7	0.1~0.3	0.6	1.0	1.2	0.5	0.2	0.2			余量	200	1	90

注：表中未列出成分范围者，为杂质最大值

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-6 铸造铝合金热处理工艺规范

合金代号	热处理状态	固溶处理			时效		
		加热温度 (℃)	保温时间 (h)	冷却介质及温度 (℃)	加热温度 (℃)	保温时间 (h)	冷却介质
ZL101	T1	–		–	230±5	7~9	空 冷
	T2	–	–	–	300±10	2~4	空冷或随炉冷
	T4	535±5	2~6	水 (60~100)		–	
	T5	535±5	2~6	水 (60~100)	150±5	2~4	空 冷
	T6	535±5	2~6	水 (60~100)	200±5	3~5	空 冷
	T7	535±5	2~6	水 (60~100)	225±5	3~5	空 冷
	T8	535±5	2~6	水 (60~100)	250±5	3~5	空 冷
ZL101A	T4	535±5	6~10	水 (60~100)	–	–	
	T5	535±5	6~10	水 (60~100)	155±5	6~8	空 冷
	T6	535±5	6~10	水 (60~100)	165±5	6~10	空 冷
ZL102	T2	–	–	–	300±10	2~4	空冷或随炉冷
ZL104	T1	–	–	–	175±5	5~10	空 冷
	T6	535±5	2~6	水 (60~100)	175±5	5~10	空 冷
ZL105	T1	–	–	–	180±5	5~10	空 冷
	T5	525±5	3~5	水 (60~100)	180±5	5~10	空 冷
	T6	525±5	3~5	水 (60~100)	200±5	3~5	空 冷
	T7	525±5	3~5	水 (60~100)	230±5	3~5	空 冷
ZL105A	T5	525±5	4~12	水 (60~100)	160±5	3~5	空 冷
	T6	525±5	4~12	水 (60~100)	180±5	3~5	空 冷
	T7	525±5	4~12	水 (60~100)	230±5	3~5	空 冷
ZL106	T1	–	–	–	230±5	~8	空 冷
	T5	515±5	5~12	水 (80~100)	150±5	~8	空 冷
	T7	515±5	6~8	水 (60~100)	230±5	~8	空 冷
ZL107	T5	515±5	6~8	水 (60~100)	175±5	6~8	空 冷
ZL108	T1	–	–	–	190±5	8~12	空 冷
	T6	515±5	6~8	水 (60~100)	200±5	6~10	空 冷
	T7	515±5	5~12	水 (60~100)	240±5	6~10	空 冷
ZL109	T1		–	–	205±5	8~12	空 冷
	T6	515±5	6~8	水 (60~100)	200±5	6~10	空 冷
	T7	515±5	6~8	水 (60~100)	250±5	6~10	空 冷

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

合金代号	热处理状态	固溶处理			时效		
		加热温度（℃）	保温时间（h）	冷却介质及温度（℃）	加热温度（℃）	保温时间（h）	冷却介质
ZL111	T6	分级加热 490±5 500±5 510±5	 4 4 8	水（60～100）	175±5	～6	空冷
	T6	分级加热 515±5 525±5	 4 8	水（60～100）	175±5	～6	空冷
ZL114A	T5	535±5	～10	水（60～100）	160±5	4～8	空冷
ZL115	T4	540±5	10～12	水（60～100）	–	–	–
	T5	540±5	10～12	水（60～100）	150±5	3～5	空冷
ZL116	T4	535±5	～10	水（60～100）	–	–	–
	T5	535±5	～10	水（60～100）	175±5	～6	空冷
ZL201	T4	分级加热 530±5 545±5 545±5	 5～9 5～9 10～12	 水（60～100） 水（60～100）	 – –	 – –	 – –
	T5	分级加热 530±5 545±5 545±5	 5～9 5～9 10～12	 水（60～100） 水（60～100）	 175±5 175±5	 3～5 3～5	 空冷 空冷
ZL201A	T5	分级加热 535±5 545±5	 7～9 7～9	 水（60～100）	 160±5	 6～9	 空冷
ZL203	T4	515±5	10～15	水（80～100）	–	–	–
	T5	515±5	10～15	水（80～100）	150±5	2～4	空冷
ZL204A	T6	分级加热 530±5 540±5	 7～9 7～9	 水（60～100）	 175±5	 3～5	 空冷
	T7	分级加热 530±5 545±5	 7～9 7～9	 水（60～100）	 190±5	 3～5	 空冷
ZL205A	T5	538±5	10～18	水（60～100）	155±5	8～10	空冷
	T6	538±5	10～18	水（60～100）	175±5	3～5	空冷
	T7	538±5	10～18	水（60～100）	190±5	3～5	空冷
ZL207	T1		–	–	200±5	5～10	空冷
ZL301	T4	435±5	8～12	水（80～100）或60℃油	–	–	–
ZL303	T1	–	–	–	170±5	4～6	空冷
ZL305	T4	分级加热 435±5 490±5	 8～10 6～8	 水（80～100）	 –	 –	 –

续上表

合金代号	热处理状态	固溶处理			时效		
		加热温度（℃）	保温时间（h）	冷却介质及温度（℃）	加热温度（℃）	保温时间（h）	冷却介质
ZL401	T1		--	-	200±10	5~10	空冷
	T2		-	-	300±10	2~4	空冷
ZL402	T1	-	-	-	180±10	-10	空冷
	T1	-		-	常温	21 天	-
	T1	-	-	-	157±5	6~8	空冷

合金状态代号：T1——人工时效；T2——退火；T4——固溶处理加自然时效；T5——固溶处理加不完全人工时效；T6——固溶处理加完全人工时效；T7——固溶处理加稳定化处理；T8——固溶处理加软化处理。

1.3.1.2 变形铝合金材料

变形铝合金是指采用压力加工方法制成的各种型材或锻件的铝合金。按照性能和用途可分为工业纯铝（L）、防锈铝（LF）、硬铝（LY）、超硬铝（LC）、锻铝（LD）和特殊铝（LT）等。按照热处理特点又可分为不可热处理强化和可热处理强化的铝合金。变形铝合金概括表示如下：

- 变形铝合金
  - 不可热处理强化合金
    - 工业纯铝
    - 防锈铝
      - Al-Mn 系
      - Al-Mg 系
  - 可热处理强化合金
    - 硬铝
      - Al-Cu-Mg 系
      - Al-Cu-Mn 系
    - 超硬铝
      - Al-Zn-Mg 系
      - Al-Zn-Mg-Cu 系
    - 锻铝
      - 普通锻铝
        - Al-Mg-Si 系
        - Al-Mg-Si-Cu 系
      - 耐热锻铝 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系
  - 包覆铝
  - 钎焊铝

变形铝合金经压力加工制成各种半成品，供各工业部门使用。有色金属加工厂常采用的压力加工方法有热轧、冷轧、挤制、拉拔、覆合轧制及锻压。根据加工生产方法及型材的几何外形，变形铝合金的各种半成品常分为五大类，即轧制板带材（包括厚板、薄板及箔）、棒材和线材、管材、型材及锻件。

工业变形铝合金最常用的添加元素有 Mn、Mg、Cu、Zn、Si 等，它们对合金性能有重要影响，表 1-3-8 列出铝及铝合金加工产品化学成分。通过控制合金的化学成分、变形加工量和热处理，使材料获得需要的

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-7 国内外铸造 Al-Si 合金牌号对照

中国		相近国外牌号								
GB/T1173—1995		美国			日本	英国	德国	法国	前苏联	国际
牌号	代号	AA	SAE	ASTM	JIS	BS	DIN	NF	DOCT	ISO
ZAlSi7Mg	ZL101	356	323	A03560	AC4C	LM25	G-AlSi7Mg	A-S7G	Ал9	Al-Si7Mg(Fe)
ZAlSi7MgA	ZL101A	A356	336	A13560	AC4CH				Ал9-1	Al-Si7Mg
ZAlSi12	ZL102	413 A413	305	A04130 A14130	AC3A	LM6 LM20	G-AlSi12	A-S12	Ал2	Al-Si12
ZAlSi9Mg	ZL104	360	309	A03600 A13600	AC4A	LM9	G-AlSi10Mg	A-S9G A-S10G	Ал4	Al-Si10Mg
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	355	322	A03550	AC4D	LM16	G AlSi5Cu		Ал5	Al-Si5CuMg
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	C355	335	A33550					Ал5-1	
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	328	327	A03280 A03281	AC4B	LM27	G-AlSi8Cu3		Ал32	
ZAlSi7Cu4	ZL107	319 A319	326	A03190 A03191	AC2B	LM21	G-ALSi6Cu4	A-S5U2	Ал7-4	Al-Si6Cu4
ZAlSi12Cu2Mg1	ZZL108	B332	328			LM2	G-AlSi12Cu			
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	A332	321		AC8A	LM13		A-S12UNG	Ал25 Ал30	
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	354		A03540			G-AlSi8Cu3		Ал4М	
ZAlSi7TMg1A	ZL114A	A357		A13570						
ZALSi8MgBe	ZL116	B356							Ал34	

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-8 铝及铝合金加工产品化学成分(GB3190—82)

组别	合金代号	化学成分(%) Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Cr	Ti	Be	其它	Fe+Si	其它杂质 单个	其它杂质 合计	Al
工业高纯铝	LG5	0.005	–	–	0.003	0.0025								0.002		99.99
	LG4	0.005			0.015	0.015								0.005		99.97
	LG3	0.01	–	–	0.04	0.04								0.007		99.93
	LG2	0.01	–	–	0.06	0.06								0.01		99.9
	LG1	0.01	–	–	0.10	0.08								0.01		99.85
工业纯铝	L1	0.01			0.16	0.16							0.26	0.03		99.7
	L2	0.01			0.25	0.20							0.36	0.03		99.6
	L3	0.015			0.30	0.30							0.45	0.03		99.5
	L4	0.05			0.35	0.40							0.60	0.03		99.3
	L4-1	0.05	0.10	0.01	0.15~0.3	0.1~0.2	0.02	0.01		0.02				0.03		99.3
	L5	0.05			0.50	0.50							0.9	0.05	0.15	99.0
	L5-1	0.05~0.2		0.05			0.10						1.0	0.05	0.15	99.0
	L6	0.10	0.10	0.10	0.50	0.55	0.10						1.0	0.05	0.15	98.8
防锈铝	LF2	0.10	2.0~2.8	或 Cr 0.15~0.4	0.40	0.40				0.15			0.60	0.05	0.15	余量
	LF3	0.10	3.2~3.8	0.3~0.6	0.50	0.5~0.8	0.20			0.15				0.05	0.10	
	LF4	0.10	4.0~4.9	0.4~1.0	0.40	0.40	0.25		0.05~0.25	0.15				0.05	0.15	
	LF5	0.10	4.8~5.5	0.3~0.6	0.50	0.50	0.20							0.05	0.10	
	LF5-1	0.10	4.5~5.6	0.05~0.2	0.40	0.30	0.10		0.05~0.20	0.15				0.05	0.15	
	LF6	0.10	5.8~6.8	0.5~0.8	0.40	0.40	0.20			0.02~0.10	0.0001~0.005			0.05	0.10	
	LF10	0.20	4.7~5.7	0.2~0.6	0.40	0.40				0.15			0.60	0.05	0.10	
	LF11	0.10	4.8~5.5	0.3~0.6	0.50	0.50	0.20			Ti 或 V: 0.02~0.15				0.05	0.10	
	LF12	0.05	8.3~9.6	0.4~0.8	0.30	0.30	0.20	0.10		0.05~0.15	0.005	Sb: 0.004~0.05	0.05	0.10		
	LF13	0.05	9.2~10.5	0.4~0.8	0.30	0.30	0.20	0.10		0.05~0.15	0.005	Sb: 0.004~0.05	0.05	0.10		
	LF14	0.10	5.8~6.8	0.5~0.8	0.40	0.40	0.20			0.1~0.3	0.0001~0.005			0.05	0.10	
	LF33	0.10	6.0~7.5	0.10	0.35	0.35	0.5~1.5			0.05~0.15	0.0005~0.005	公0.10~0.30		0.05	0.10	
	LF43	0.10	0.6~1.4	0.15~0.4	0.40	0.40				0.15				0.05	0.15	
	LF21	0.20	0.05	1.0~1.6	0.70	0.60	0.10			0.15				0.05	0.10	

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

组别	合金代号	化学成分（%）													
		Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Cr	Ti	Be	其它	Fe+Si	其它杂质 单个	其它杂质 合计	Al
包覆铝	LB1	0.015			0.30	0.30	0.9～1.3						0.45	0.03		余量
	LB2	0.015	0.05	0.05	0.30	0.30	Zn+Cu 0.05						0.45	0.03		99.5
硬铝	LY1	2.2～3.0	0.2～0.5	0.20	0.50	0.50	0.10			0.15				0.05	0.10	余量
	LY2	2.6～3.2	2.0～2.4	0.45～0.7	0.30	0.30	0.10			0.15				0.05	0.10	
	LY4	3.2～3.7	2.1～2.6	0.5～0.8	0.30	0.30	0.10			0.05～0.4	0.001～0.01			0.05	0.10	
	LY6	3.8～4.3	1.7～2.3	0.5～1.0	0.50	0.50	0.10			0.003～0.15	0.001～0.005			0.05	0.10	
	LY8	3.8～4.5	0.4～0.8	0.4～0.8	0.50	0.50	0.10			0.15				0.05	0.10	
	LY9	3.8～4.5	1.2～1.6	0.3～0.7	0.50	0.50	0.10			0.15				0.05	0.10	
	LY10	3.9～4.5	0.15～0.3	0.3～0.5	0.20	0.25	0.10			0.15				0.05	0.10	
	LY11	3.8～4.8	0.4～0.8	0.4～0.8	0.70	0.70	0.30	0.10		0.15			Fe+Ni 0.7	0.05	0.10	
	LY12	3.8～4.9	1.2～1.8	0.3～0.9	0.50	0.50	0.30	0.10		0.15			Fe+Ni 0.5	0.05	0.10	
	LY13	4.0～5.0	0.3～0.5		0.60	0.70	0.60			0.15				0.05	0.10	
	LY16	6.0～7.0	0.05	0.4～0.8	0.30	0.30	0.10			0.1～0.2		Zr 0.20		0.05	0.10	
	LY17	6.0～7.0	0.25～0.45	0.4～0.8	0.30	0.30	0.10			0.1～0.2				0.05	0.10	
锻铝	LD2	0.2～0.6	0.45～0.9	或 Cr 0.15～0.35	0.50	0.5～1.2	0.20			0.15				0.05	0.10	余量
	LD2-1	0.1～0.4	0.4～0.8	0.1～0.3	0.40	0.75～1.15	0.15			0.01～0.04				0.05	0.10	
	LD2-2	0.15～0.4	0.5～1.2	0.4～1.0	0.50	1.0～1.7	0.25		0.10	0.15				0.05	0.15	
	LD5	1.8～2.6	0.4～0.8	0.4～0.8	0.70	0.7～1.2	0.30	0.10		0.15			Fe+Ni 0.7	0.05	0.10	
	LD6	1.8～2.6	0.4～0.8	0.4～0.8	0.70	0.7～1.2	0.30	0.10	0.01～0.2	0.02～0.1			Fe+Ni 0.7	0.05	0.10	
	LD7	1.9～2.5	1.4～1.8	0.20	0.9～1.5	0.35	0.30	0.9～1.5		0.02～0.1				0.05	0.10	
	LD8	1.9～2.5	1.4～1.8	0.20	1.0～1.6	0.5～1.2	0.30	0.9～1.5		0.15				0.05	0.10	
	LD9	3.5～4.5	0.4～0.8	0.20	0.5～1.0	0.5～1.0	0.30	1.8～2.3		0.15				0.05	0.10	

汽车论坛 http://www.qclt.com

续Ⅰ表

组别	合金代号	化学成分（%）														
		Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Cr	Ti	Be	其它	Fe+Si	其它杂质 单个	其它杂质 合计	Al
锻铝	LD10	3.9～4.8	0.4～0.8	0.4～1.0	0.7	0.6～1.2	0.30	0.10		0.15				0.05	0.10	余量
	LD11	0.5～1.3	0.8～1.3	0.20	1.0	11.5～13.5	0.25	0.5～1.3	0.10	0.15				0.05	0.15	
	LD30	0.15～0.4	0.8～1.2	0.15	0.7	0.4～0.8	0.25		0.04～0.35	0.15				0.05	0.15	
	LD31	0.10	0.45～0.9	0.10	0.35	0.2～0.6	0.10		0.10	0.10				0.05	0.15	
超硬铝	LC3	1.8～2.4	1.2～1.6	0.10	0.20	0.20	6.0～6.7		0.05	0.02～0.08				0.05	0.10	余量
	LC4	1.4～2.0	1.8～2.8	0.2～0.6	0.50	0.50	5.0～7.0		0.1～0.25					0.05	0.10	
	LC9	1.2～2.0	2.0～3.0	0.15	0.50	0.50	5.1～6.1		0.16～0.3					0.05	0.10	
	LC10	0.5～1.0	3.0～4.0	0.2～0.35	0.30	0.30	3.2～4.2		0.1～0.2	0.05				0.05	0.10	
	LC12	0.20	0.5～1.0	0.30	0.35	0.30	5.0～6.5		0.20	0.20		Zr 0.05～0.25		0.05	0.15	
特殊铝	LT1	0.20			0.60	4.5～6.0	Zn+Sn 0.10			0.15				0.05	0.15	余量
	LT13	Cu+Zn 0.15	0.05	0.50	0.50	6.8～8.2				0.15		Ca 0.10		0.05	0.15	
	LT17	Cu+Zn 0.15	0.05	0.50	0.50	11.0～12.5				0.15		Ca 0.10		0.05	0.15	
	LT41	0.10	6.0～7.0	0.3～0.6	0.40	0.40	0.20			0.02～0.1				0.05	0.10	
	LT62	0.01			0.01	0.01								0.005	0.01	99.95
	LT66	0.005	1.5～2.0		0.01	0.005								0.005	0.01	余量
	LT75	0.01			0.02	0.02	0.10					Ce 0.004～0.01		0.005	0.02	99.93
钎焊铝	LQ1	心板 LF21 包覆层 LT17														
	LQ2	心板 LF21 包覆层 LT13														

汽车论坛 http://www.qclt.com

组织结构、物理性能和力学性能供各工业部门使用。表 1-3-9 中列出变形铝合金不同状态的力学性能。

表 1-3-9 变形铝合金力学性能（参考数据）

合金代号	材料状态	抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	抗剪强度 σ_c	布氏硬度（HB）	伸长率 δ	断面收缩率 ψ	正弹性模数 E	抗剪弹性模数 G
		（MPa）				（%）		（MPa）	
工业纯铝	M	80	30	55	25	35	80	71 000	27 000
	Y	150	100		32	6	60	71 000	27 000
LF2	R	175				21		70 000	27 000
	M	185	90	120	45	23	64	70 000	27 000
	Y2	245	205	125	60	6		70 000	27 000
	Y	315	225	145	45	5		70 000	27 000
LF3	R	225	140			14、5		70 000	27 000
	M	200	100	155	50	22		70 000	27 000
	Y2	250	180	160	70	8		70 000	27 000
LF5	M	260	140	180	65	22		70 000	27 000
	Y2	300	200		80	14		70 000	27 000
	Y	420	320	220	100	10		70 000	27 000
LF6	M（板材）	330	165			20		68 000	
	Y2（板材）	440	335			13		68 000	
	M（锻件）	330	165	205		20	25	68 000	
	Y（锻件）	370	275			6		68 000	
LF10	M	265	154	185	70	23		70 000	27 000
LF12	M	430	220			25			
LF21	M	125	50	80	30	23	70	71 000	27 000
	Y2	165	125	100	40	10	55	71 000	27 000
	Y	215	175	110	55	5	50	71 000	27 000
LY1	M	155	60		38	24		71 000	27 000
	CZ	295	165	195	70	24	50	71 000	27 000
LY2	CS（带材）	490	325		115	13	21	71 000	27 000
LY4	CZ	450	275	285	115	23	42	70 000	
LY6	CZ	430	300			20		68 000	
	Y2	530	430			10		68 000	

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

合金代号	材料*状态	抗拉强度 σ_b	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	抗剪强度 σ_τ	布氏硬度(HB)	伸长率 δ	断面收缩率 Ψ	正弹性模数 E	抗剪弹性模数 G
		(MPa)				(%)		(MPa)	
LY8	M	210	110		45	18	58	71 000	27 000
LY9	CZ	420	280		105	18	30	71 000	27 000
LY10	CZ	390		255		20		71 000	27 000
LY11	M	175				20		71 000	27 000
	CZ	400	245	265	115	15	30	71 000	27 000
LY12	M	175	100		42	18	35	71 000	27 000
	C	440	295			17		71 000	27 000
	CZ	510	375	295	130	12	15	71 000	27 000
	CS	460	420			6		71 000	27 000
LF16	CS(挤压材)	390	245	265	100	12	35	71 000	27 000
	CS(板材)	420	300			10		71 000	27 000
LY17	CS	430	350			9	18	71 000	
LC3	CS(线材)	500	430	315	150	15	45	71 000	
LC4	CS	550	520	230				74 000	27 000
LD2	CS	325	275	210	95	16	20	71 000	27 000
LD5	CS	415	300		105	13		71 000	27 000
LD6	CS	405	315				40	72 000	27 000
LD7	CS	410	270		120	13		71 000	27 000
LD8	CS	420	270		120	10	20	71 000	27 000
LD9	CS	440	280		115	13		710 000	27 000
LD10	CS	470	375	285	135	10	25	72 000	27 000

*M：退火；Y：硬；R：热轧、热挤；Y2：1/2硬；CS：淬火（人工时效）；CZ：淬火（自然时效）。

工业纯铝虽有优良的加工性、耐蚀性和导热性，但因强度较低，不适于制作结构部件，如L5-1，在汽车上常用于强度要求不高而成形困难的零件、如铝散热器及罩盖等。

防锈铝合金不太降低纯铝特有的优良性能，而强度稍有提高的合金，如LF21，是汽车散热器、热交换器、冷凝器和蒸发器用材，也用于制作装饰件。国外也有用LF2（5052）之类材料生产汽车车身内板、底板等强度要求不高的结构件。用LF21为基材，表面覆LT13或LT17的覆合带材LQ1和LQ2，是铝散热器的专用材料。

硬铝和超硬铝系合金其强度性能优良，但含Cu量较高，耐蚀性较差，在国外有选用含Cu量较低的合金材料生产车身外板等覆盖零件。

汽车论坛 http://www.qclt.com

锻造铝合金如LD31的变形阻力小，可用于生产壁薄且形状复杂的挤压型材，在汽车上常用作嵌饰条、导轨条之类对强度要求不高的零件。LD30比LD31合金的强度高，国外汽车有用于生产臂类等底盘零件或作为挤压材料而用于保险杠的加强材料。在欧美汽车上，选用有较好成形性能，并且具有涂装烘烤硬化特性的该系合金作为车身外板材料。

1.3.2 铜合金

铜是人类发现和使用最早的金属，纯铜外观呈紫红色，常称为紫铜，铜有优良的导电导热性能，良好的化学稳定性，这些性能上仅次于金和银。铜的电极电位很高，其标准电极电位高于氢，因此在许多介质中，如大气、淡水、海水、盐酸、磷酸及醋酸环境中耐腐蚀性能很好。铜是无磁性金属，常用作抗磁场干扰的零件。铜的摩擦系数很小，铜合金耐磨减摩性能优良，尤以青铜为最佳，因此这类铜合金常用于制造机器设备上的许多重要耐磨零件，汽车上的轴瓦轴套及许多耐磨零件多用青铜制造。

铜的塑性变形能力很高，可采用挤压、压延和拉拔等压力加工方法制成各种形状的铜材，如管、棒、带、箔和丝材，得到工业上的广泛应用，特别是作导电器材，其用量占铜材总用量的一半以上。

在汽车工业所用有色金属材料中，铜合金用量仅次于铝合金。汽车上各类热交换器、散热器、耐磨减摩零件、电器元件、油管和变速器同步器锥环等，均选用了铜合金材料。

纯铜虽有优良的物理化学性能，但力学性能不高，铸造性能差，因此，在工业生产中广泛使用的不是纯铜，而是加入各种合金元素而形成的铜合金。铜基合金按其化学成分的不同，可分为紫铜、黄铜、青铜和白铜，这种分类也正好与铜合金的颜色相一致。分类概括表示为下：

- 铜及铜合金
  - 紫铜（纯铜）
  - 黄铜
    - 普通黄铜
    - 特殊黄铜
  - 青铜
    - 锡青铜
    - 无锡黄铜
  - 白铜（铜镍合金）

锌为主要合金元素的铜合金统称黄铜，镍为主要合金元素的铜合金称为白铜，除锌为主要添加元素的黄铜和以镍为主要添加元素的白铜以外的铜合金均称为青铜。

根据加工工艺、力学性能和用途的不同，黄铜和青铜均可分为变形合金和铸造合金两大类。

变形铜合金在汽车上主要用于散热器、管路系统中的各种管件和各类轴套、垫圈等。目前我国载货汽车均采用铜散热器，制造散热片的带材，选用TG、H62等合金，制造冷却水管专用带材为T2、H90合金，在国家标准中对这些材料均有特殊的要求。散热器的上、下水室和主片所用板材，选用冲压变形性能较好的H68黄铜。锡青铜具有优良的力学性能、抗磨耐磨性能，汽车上多用于制造轴套和耐磨零件等，磨损性能较好的QSn5-5-5、QSn4-4-2.5等合金板材，常用于生产汽车各种冲压卷制轴套。由于锡的价格较贵，大多采用无锡青铜如铝青铜、硅青铜和铅青铜等代替，其中铝青铜在机器制造中应用最普遍。

铅青铜是一种使用广泛的耐磨合金，在高压高转速的工况下，具有较高的疲劳强度，同时铅青铜有很好的导热性，因此在汽车上广泛用于制造高负荷的轴瓦和轴套，是重要的轴承合金。易切削黄铜HPb59-1在汽车生产中，常采用型材或以铸造方式加工成各种类型的零部件。

我国变形铜合金牌号及化学成分见表1-3-10和表1-3-11。铸造铜合金牌号、化学成分及力学性能列入表1-3-12、表1-3-13、表1-3-14和表1-3-15中。

黄铜比青铜熔点低，在汽车生产中，常采用高效的压力铸造工艺制造形状复杂的各种黄铜铸件，常用的压铸铜合金列入表1-3-16中。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-10　变形黄铜牌号及化学成分(GB5232—85)

名称	合金代号	化学成分(%) Cu	Sn	Ni	Al	Fe	Pb	Sb	Bi	P	As	Mn	Si	Zn	杂质总和
普通黄铜	H96	95.0～97.0				0.10	0.03	0.005	0.002	0.01	—	—	—	余量	0.2
	H90	88.0～91.0				0.10	0.03	0.005	0.002	0.01	—	—	—		0.2
	H85	84.0～86.0				0.10	0.03	0.005	0.002	0.01	—		—		0.3
	H80	79.0～81.0				0.10	0.03	0.005	0.002	0.01	—	—			0.3
	H70	68.5～71.5				0.10	0.03	0.005	0.002	0.01	—	—	—		0.3
	H68	67.0～70.0				0.10	0.03	0.005	0.002	0.01	—	—	—		0.3
	H65	63.5～68.0				0.10	0.03	0.005	0.002	0.01	—	—	—		0.3
	H63	62.0～65.0				0.15	0.08	0.005	0.002	0.01	—	—	—		0.5
	H62	60.5～63.5				0.15	0.08	0.005	0.002	0.01	—		—		0.5
	H59	57.0～60.0				0.3	0.5	0.01	0.003	0.01	—	—	—		1.0
镍黄铜	HNi65-5	64.0～67.0		5.0～6.0		0.15	0.03	0.005	0.002	0.01	—	—	-	余量	0.3
	HNi56-3	54.0～58.0	0.25	2.0～3.0	0.3～0.5	0.15～0.5	0.2	—	—	0.01	—	—	—		0.6
铅黄铜	HPb63-3	62.0～65.0			0.5	0.1	2.4～3.0	0.005	0.002	0.01				余量	0.75
	HPb63-0.1	61.5～63.5			0.2	0.15	0.05～0.3	0.005	0.002	0.01					0.5
	HPb62-0.8	60.0～63.0			0.2	0.2	0.5～1.2	0.005	0.002	0.01					0.75
	HPb61-1	59.0～61.0			0.2	0.15	0.6～1.0	0.005	0.002	0.01					0.75
	HPb59-1	57.0～60.0			0.2	0.5	0.8～1.9	0.01	0.003	0.02					1.0

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

名称	合金代号	化学成分（%）													
		Cu	Sn	Ni	Al	Fe	Pb	Sb	Bi	P	As	Mn	Si	Zn	杂质总和
加砷黄铜	HAl77-2	76.0～79.0			1.8～2.3	0.06	0.05	0.05	0.002	0.02	0.03～0.06			余量	0.3
	HSn70-1	69.0～71.0	0.8～1.3			0.1	0.05	0.005	0.002	0.01	0.03～0.06				0.3
	H68A	67.0～70.0				0.1	0.03	0.005	0.002	0.01	0.03～0.06				0.3
铝黄铜	HAl67-2.5	66.0～68.0	0.2		2.0～3.0	0.6	0.5	0.05		0.02		0.5		余量	1.5
	HAl60-1-1	58.0～61.0			0.7～1.5	0.70～1.5	0.4	0.005	0.002	0.01		0.1～0.6			0.7
	HAl59-3-2	57.0～60.0		2.0～3.0	2.5～3.5	0.5	0.1	0.005	0.003	0.01					0.9
	HAl66-6-3-2	64.0～68.0	0.2		6.0～7.0	2.0～4.0	0.5	0.05		0.02		1.5～2.5			1.5
锡黄铜	HSn90-1	88.0～91.0	0.25～0.75			0.1	0.03	0.005	0.002	0.01				余量	0.2
	HSn62-1	61.0～63.0	0.7～1.1			0.1	0.1	0.005	0.002	0.01					0.3
	HSn60-1	59.0～61.0	1.0～1.5			0.1	0.3	0.005	0.002	0.01					1.0
锰黄铜	HMn58-2	57.0～60.0				1.0	0.1	0.005	0.002	0.01		1.0～2.0		余量	1.2
	HMn57-3-1	55.0～58.5			0.5～1.5	1.0	0.2	0.005	0.002	0.01		2.5～3.5			1.3
	HMn55-3-1	53.0～58.0	0.2		0.3	0.5～1.5	0.5	0.05		0.02		3.0～4.0			1.5
铁黄铜	HFe59-1-1	57.0～60.0	0.3～0.7		0.1～0.5	0.6～1.2	0.2	0.01	0.003	0.01		0.5～0.8		余量	0.3
	HFe58-1-1	56.0～58.0				0.7～1.3	0.7～1.3	0.01	0.003	0.02					0.5
硅黄铜	HSi80-3	79.0～81.0	0.2		0.1	0.6	0.1	0.05	0.003	0.02		0.5	2.5～4.0	余量	1.5

注：表中未列出成分范围者，为杂质最大值。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-11 变形青铜牌号及化学成分(GB5233—85)

名称	合金代号	化学成分(%) Sn	Al	Zn	Mn	Fe	Pb	Ni	Si	P	Sb	Bi	其它元素	Cu	杂质总和
锡青铜	QSn4-3	3.5~4.5	0.002	2.7~3.3	—	0.05	0.02	—	0.002	0.03	0.002	0.002		余量	0.2
	QSn4-4-2.5	3.0~5.0	0.002	3.0~5.0	—	0.05	1.5~3.5	—		0.03	0.002	0.002			0.2
	QSn4-4-4	3.0~5.0	0.002	3.0~5.0	—	0.05	3.5~4.5	—	—	0.03	0.002	0.002			0.2
	QSn6.5-0.1	6.0~7.0	0.002	—	—	0.05	0.02	—	0.002	0.1~0.25	0.002	0.002	—		0.1
	QSn6.5-0.4	6.0~7.0	0.002	—	—	0.02	0.02	—	0.002	0.26~0.4	0.002	0.002	—		0.1
	QSn7-0.2	6.0~8.0	0.01	—	—	0.05	0.02	—	0.02	0.1~0.25	0.002	0.002	—		0.15
	QSn4-0.3	3.5~4.5	0.002	—	—	0.02	0.02	—	0.002	0.2~0.4	0.002	0.002	—		0.1
铝青铜	QAL5	0.1	4.0~6.0	0.5	0.5	0.5	0.03	—	0.1	0.01	—	—	—	余量	1.6
	QAL7	0.1	6.0~8.0	0.5	0.5	0.5	0.03	—	0.1	0.01	—	—	—		1.6
	QAl9-2	0.1	8.0~10.0	1.0	1.5~2.5	0.5	0.03	—	0.1	0.01	—	—			1.7
	QAl9-4	0.1	8.0~10.0	1.0	0.5	2.0~4.0	0.01	—	0.1	0.01	—	—			1.7
	QAl10-3-1.5	0.1	8.5~10.0	0.5	1.0~2.0	2.0~4.0	0.03	—	0.1	0.01	—	—			0.75
	QAl10-4-4	0.1	9.5~11.0	0.5	0.3	3.5~5.5	0.02	3.5~5.5	0.1	0.01	—	—		余量	1.0
	QAl11-6-6	0.2	10.0~11.5	0.6	0.5	5.0~6.5	0.05	5.0~6.5	0.2	0.1	—				1.5
	QAl9-5-1-1	0.1	8.0~10.0	0.3	0.5~1.5	0.5~1.5	0.01	4.0~6.0	0.1	0.01	0.002	—	As: 0.01		0.6
	QAl10-5-5	0.2	8.0~11.0	0.5	0.5~2.5	4.0~6.0	0.05	4.0~6.0	0.25	—		—	Mg: 0.1		1.2
铍青铜	QBe2	—	0.15	—	—	0.15	0.005	0.2~0.5	0.15	—	Be: 1.8~2.2			余量	0.5
	QBe1.9	—	0.15	—	—	0.15	0.005	0.2~0.4	0.15	—	Be: 1.85~2.1		Ti: 0.1~0.25		0.5
	QBe1.9-0.1	—	0.15	—	—	0.15	0.005	0.2~0.4	0.15	—	Be: 1.85~2.1		Ti: 0.1~0.25 Mg: 0.07~0.13		0.5
	QBe1.7	—	0.15	—	—	0.15	0.005	0.2~0.4	0.15	—	Be: 1.6~1.85		Ti: 0.1~0.25		0.5

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

名称	合金代号	化学成分（%）													
		Sn	Al	Zn	Mn	Fe	Pb	Ni	Si	P	Sb	Bi	其它元素	Cu	杂质总和
硅青铜	QSi3-1	0.25	—	0.5	1.0～1.5	0.3	0.03	0.2	2.7～3.5	—	—	—	—	余量	1.1
	QSi1-3	0.1	0.02	0.2	0.1～0.4	0.1	0.15	2.4～3.4	0.6～1.1	—	—	—	—		0.5
	QSi3.5-3-1.5	0.25	—	2.5～3.5	0.5～0.9	1.2～1.8	0.03	0.2	3.0～4.0	0.03	0.002	—	As：0.002		1.1
锰青铜	QMn1.5	0.05	0.07	—	1.2～1.8	0.1	0.01	0.1	0.1	—	0.005	0.002	S：0.01 Cr：0.1	余量	0.3
	QMn2	0.05	0.07	—	1.5～2.5	0.1	0.01	—	0.1	—	0.05	0.002	As：0.01		0.5
	QMn5	0.1	—	0.4	4.5～5.5	0.35	0.03	—	0.1	0.01	0.002	—	—		0.9
锆青铜	QZr0.2	0.05	—	—	—	0.05	0.01	0.2	—	—	0.005	0.002	S：0.01 Zr：0.15～0.30	余量	0.5
	QZr0.4	0.05	—	—	—	0.05	0.01	0.2	—	—	0.005	0.002	S 0.01 Zr：0.30～0.50		0.5
铬青铜	QCr0.5	—	—	—	—	0.1	—	0.05	—	—	Cr：0.40～1.1				0.5
	QCr 0.5-0.2-0.1	—	0.1～0.25	—	—	—	—	—	—	—	Cr：0.40～1.0		Mg：0.1～0.25		0.5
	QCr0.6-0.4-0.05	—	—	—	—	0.05	—	—	0.05	0.01	Cr：0.40～0.80		Mg：0.04～0.08 Zr：0.3～0.6		0.5
镉青铜	QCd1	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	Cd：0.8～1.3	余量	0.3
镁青铜	QMg0.8	0.002	—	0.005	—	0.005	0.005	0.006	Mg：0.70～0.85		0.005	0.002	S：0.006	余量	0.3

注：表中未列出成分范围者，为杂质最大值。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-12　铸造黄铜化学成分(GB1176—87)

合金牌号	主要成分（%）						杂质≤									
	Cu	Al	Mn	Fe	Pb	Zn	Fe	Al	Sb	Si	Ni	Sn	Pb	Mn		总和
ZCuZn38	60.0~63.0						0.8	0.5	0.1			1.0	Bi: 0.002	0.3	P: 0.01	1.5
ZCuZn16Si4	79.0~81.0			Si: 2.5~4.5			0.6	0.1	0.1			0.3	0.5	0.5		2.0
ZCuZn33Pb2	63.0~67.0				1.0~3.0		0.8	0.1		0.05	1.0	1.5		0.2	P 0.05	1.5
ZCuZn40Pb2	58.0~63.0	0.2~0.8			0.5~2.5		0.8			0.05	1.0	1.0		0.5		1.5
ZCuZn25Al6Fe3Mn3	60.0~66.0	4.5~7.0	1.5~4.0	2.0~4.0		余				0.1	3.0	0.2	0.2			2.0
ZCuZn26Al4Fe3Mn3	60.0~66.0	2.5~5.0	1.5~4.0	1.5~4.0						0.1	3.0	0.2	0.2			2.0
ZCuZn31Al2	66.0~68.0	2.0~3.0				量	0.8					1.0	1.0	0.5		1.5
ZCuZn35Al2Mn2Fe1	57.0~65.0	0.5~2.5	1.0~3.0	0.5~2.0						0.1	3.0	1.0	0.5	Sb+P+As: 0.4		2.0
ZCuZn40Mn3Fe1	53.0~58.0		3.0~4.0	0.5~1.5				1.0	0.1			0.5	0.5			1.5
ZCuZn38Mn2Pb2	57.0~60.0		1.5~2.5		1.5~2.5		0.8	1.0	0.1			2.0				2.0
ZCuZn40Mn2	57.0~60.0		1.0~2.0				0.8	1.0	0.1			1.0				2.0

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-13　铸造青铜化学成分(GB1176—87)

合金牌号	主要成分（%）							杂质≤										
	Sn	Zn	Pb	Al	Fe	Mn	Cu	Fe	Al	Sb	Si	P	S	Mn	Zn	Pb	Ni	总和
ZCuSn3Zn11Pb4	2.0~4.0	9.0~13.0	3.0~6.0				余量	0.5	0.02	0.3	0.02	0.05						1.0
ZCuSn3Zn8Pb6Ni1	2.0~4.0	6.0~9.0	4.0~7.0	Ni: 0.5~1.5				0.4	0.02	0.3	0.02	0.05						1.0
ZCuSn5Pb5Zn5	4.0~6.0	4.0~6.0	4.0~6.0					0.3	0.01	0.25	0.01	0.05	0.10				2.5*	1.0
ZCuSn10P1	9.0~11.5			P: 0.5~1.0				0.1	0.01	0.05	0.02		0.05	0.05	0.05	0.25	0.1	0.75
ZCuSn10Pb5	9.0~11.0		4.0~6.0					0.3	0.02	0.3		0.05			1.0*			1.0
ZCuSn10Zn2	9.0~11.0	1.0~3.0						0.25	0.01	0.3	0.01	0.05	0.1	0.2		1.5*	2.0*	1.5
ZCuPb10Sn10	9.0~11.0		8.0~11.0					0.25	0.01	0.5	0.01	0.05	0.1	0.2	2.0*		2.0*	1.0
ZCuPb15Sn8	7.0~9.0		13.0~17.0					0.25	0.01	0.5	0.01	0.1	0.1	0.2	2.0*		2.0*	1.0
ZCuPb17Sn4Zn4	3.5~5.0	2.0~6.0	14.0~20.0					0.4	0.05	0.3	0.02	0.05						0.75
ZCuPb20Sn5	4.0~6.0		18.0~23.0					0.25	0.01	0.75	0.01	0.1	0.2	2.0	2.0*		2.5*	1.0
ZCuPb30			27.0~33.0					0.5	0.01	0.2	0.02	0.08		0.3	As: 0.1	Bi: 0.005	Sn: 1.0*	1.0
ZCuAl8Mn13Fe3				7.0~9.0	2.0~4.0	12.0~14.5					0.15		C: 0.1		0.3	0.02		1.0
ZCuAl8Mn13Fe3Ni2			Ni: 1.8~2.5	7.0~8.5	2.5~4.0	11.5~14.0					0.15		C: 0.1		0.3	0.02		1.0
ZCuAl9Mn2				8.0~10.0		1.5~2.5				0.05	0.2	0.1	As: 0.05	Sn: 0.2	1.5	0.1		1.0
ZCuAl9Fe4Ni4Mn2			Ni: 4.0~5.0	8.5~10.0	4.0~5.0	0.8~2.5					0.15		C: 0.1			0.02		1.0
ZCuAl10Fe3				8.5~11.0	2.0~4.0						0.2		Sn: 0.3	1.0	0.4	0.2	3.0	1.0
ZCuAl10Fe3Mn2				9.0~11.0	2.0~4.0	1.0~2.0				0.05	0.1	0.01	As: 0.01	Sn: 0.1	0.5	0.3		0.75

注：有 * 号的元素不计入杂质总和，未列出的杂质计入杂质总和。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-14 铸造黄铜力学性能(GB1176—87)

合金牌号	铸造方法	力学性能，不低于			
		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%)	布氏硬度 (HBS)
ZCuZn38 (38 黄铜)	S	295		30	590
	J	295		30	685
ZCuZn25Al6Fe3Mn3 (25-6-3-3 铝黄铜)	S	725	380	10	1 570
	J	740	400	7	1 665
	Li、La	740	400	7	1 665
ZCuZn26Al4Fe3Mn3 (26-4-3-3 铝黄铜)	S	600	300	18	1 175
	J	600	300	18	1 275
	Li、La	600	300	18	1 275
ZCuZn31Al2 (31-2 铝黄铜)	S	295		12	785
	J	390		15	885
ZCuZn35Al2Mn2Fe1 (35-2-2-1 铝黄铜)	S	450	170	20	980
	J	475	200	18	1 080
	Li、La	475	200	18	1 080
ZCuZn38Mn2Pb2 (38-2-2 锰黄铜)	S	245		10	685
	J	345		18	785
ZCuZn40Mn2 (40-2 锰黄铜)	S	345		20	785
	J	390		25	885
ZCuZn40Mn3Fe1 (40-3-1 锰黄铜)	S	440		18	980
	J	490		15	1 080
ZCuZn33Pb2 (33-2 铅黄铜)	S	180	70	12	490
ZCuZn40Pb2 (40-2 铅黄铜)	S	220		15	785
	J	280	120	20	885
ZCuZn16Si4 (16-4 硅黄铜)	S	345		15	885
	J	390		20	980

表 1-3-15 铸造青铜力学性能(GB1176—87)

合金牌号	铸造方法	力学性能，不低于			
		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%)	布氏硬度 (HBS)
ZCuSn3Zn8Pb6Ni1 (3-8-6-1 锡青铜)	S	175		8	590
	J	215		10	685
ZCuSn3Zn11Pb4 (3-11-4 锡青铜)	S	175		8	590
	J	215		10	590
ZCuSn5Pb5Zn5 (5-5-5 锡青铜)	S、J	200	90	13	590
	Li、La	250	100	13	635
ZCuSn10Pb1 (10-1 锡青铜)	S	220	130	3	785
	J	310	170	2	885
	Li	330	170	4	885
	La	360	170	6	885

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

合金牌号	铸造方法	力学性能，不低于			
		抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%)	布氏硬度 (HBS)
ZCuSn10Pb5 (10-5 锡青铜)	S	195		10	685
	J	245		10	685
ZCuSn10Zn2 (10-2 锡青铜)	S	240	120	6	685
	J	245	140	7	785
	Li、La	270	140	7	785
ZCuPb10Sn10 (10-10 铅青铜)	S	180	80	7	635
	J	220	140	5	685
	L、La	220	110	6	685
ZCuPb15Sn8 (15-8 铅青铜)	S	170	80	5	590
	J	200	100	6	635
	Li、La	220	100	8	635
ZCuPb17Sn4Zn4 (17-4-4 铅青铜)	S	150		5	540
	J	175		7	590
ZCuPb20Sn5 (20-5 铅青铜)	S	150	60	5	440
	J	150	70	6	540
	La	180	80	7	540
ZCuPb30 (30 铅青铜)	J	—	—	—	245
ZCuAl8Mn13Fe3 (8-13-3 铝青铜)	S	600	270	15	1 570
	J	650	280	10	1 665
ZCuAl8Mn13Fe3Ni2 (8-13-3-2 铝青铜)	S	645	280	20	1 570
	J	670	310	18	1 665
ZCuAl9Mn2 (9-2 铝青铜)	S	390		20	835
	J	440		20	930
ZCuAl9Fe4Ni4Mn2 (9-4-4-2 铝青铜)	S	630	250	16	1 570
ZCuAl10Fe3 (10-3 铝青铜)	S	490	180	13	980
	J	540	200	15	1 080
	Li、La	540	200	15	1 080
ZCuAl10Fe3Mn2 (10-3-2 铝青铜)	S	490		15	1 080
	J	540		20	1 175

注：①S：砂型铸造；J：金属型铸造；
Li：离心铸造；La：连续铸造。
②布氏硬度试验力的单位为牛顿。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-16　压铸铜合金化学成分及力学性能（GB/T15116—94）

合金牌号	化学成分（%）																力学性能（不低于）		
	主要成分							杂质（不大于）									抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	布氏硬度 HBS (5/250/30)
	Cu	Pb	Al	Si	Mn	Fe	Zn	Fe	Si	Ni	Sn	Pb	Mn	Al	Sb	总和			
YZCuZn40Pb（YT40-1 铅黄铜）	58.0～63.0	0.5～1.5	0.2～0.5	—	—	—	余量	0.8	0.05	—	—	—	0.5	—	1.0	1.5	300	6	85
YZCuZn16Si4（YT16-4 硅黄铜）	79.0～81.0	—	—	2.5～4.5	—	—		0.6	—	—	0.3	0.5	0.5	0.1	0.1	2.0	345	25	85
YZCuZn30Al3（YT30-3 铝黄铜）	66.0～68.0	—	2.0～3.0	—	—	—		0.8	—	—	1.0	1.0	0.5	—	—	3.0	400	15	110
YZCuZn35Al2Mn2Fe（YT35-2-2-1 铝锰铁黄铜）	57.0～65.0	—	0.5～2.5	—	0.1～3.0	0.5～2.0		—	0.1	3.0	1.0	0.5	Sb + Pb + As 0.4			2.0	475	3	130

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.3.3 锌合金

工业纯锌大量用于热浸镀锌、电镀锌、各种锌板、电池、氧化锌及合金中添加元素等。锌在大气条件下有相当高的耐蚀性，但在酸盐和碱溶液中不耐蚀。当锌和正电极较强的金属接触时，锌先被腐蚀，因此常用锌作为保护层，它是电化学阴极保护技术中广泛应用的牺牲阳极材料。

纯锌的力学性能较差，常加入其它合金元素而配制成合金使用。锌合金的热膨胀系数较大，伸长率、冲击韧度、干摩擦性能和高温性能较差，耐腐性能不好，尤其是在高温下及水蒸汽中易产生晶间腐蚀。锌合金熔点低，铸造工艺性能、切削加工性能和湿耐磨性能都比较好，它广泛用于压铸件、加工产品及轴承轴套等方面。

锌合金按生产方式和用途分类如下：

- 锌合金
  - 铸造锌合金
    - 压铸锌合金
    - 模型用锌合金
    - 耐磨锌合金
    - 高铝（高强度）锌合金
  - 变形锌合金
    - 变形加工锌合金
    - 超塑锌合金

变形锌合金主要以 Zn-Cu 和 Zn-Al 系合金为主。锌合金很容易承受各种压力加工，轧制成带材、薄板和箔材，挤压成棒材和型材，拉拔成棒材和线材，加工成各种冲压零件。超塑锌合金是基于共析成分 78%Zn 和 22%Al 为基础，含有其它合金元素的合金，它塑性极好，能够像塑料一样的成形，可采用真空成形、吹塑和挤压成形等工艺制成各种零件。

变形锌合金化学成分、物理及力学性能和主要用途见表 1-3-17。

锌合金因其熔点低、热容量大、流动性和高温延性好，并具有优良的力学性能和切削加工性能，在工业上作为结构材料主要用于铸造生产，特别是压力铸造。因面，锌合金的重要用途是制造压铸件，它是汽车工业应用较广的传统压铸合金。锌合金易压铸，并能在较低的温度下铸造成形。适宜于铸造尺寸公差要求严格的铸件，还容许化油器制造断面最薄的铸件，任何金属所能采用的电镀层都能适用于锌合金压铸件。汽车上采用锌合金压铸件的有化油器零件、燃油泵体、刮水器零件、转速器框架、液压制动阀体零件、转向盘零件、车门窗手柄、支架、喇叭、加热器及仪表等零件。

用于压铸合金的锌锭，必须采用特级锌，以保证 Fe、Pb、Sn 和 Cd 等杂质的含量非常低，使获得尺寸和性能稳定的压铸件。压铸锌合金化学成分及力学性能见表 1-3-18。

含铝较高的高强度锌合金，如含 12%Al 和含 27%Al 这两种锌合金应用正在日益增长，这类合金有较高的力学性能和耐磨性能，同时密度小于原锌合金，在结构件上应用，以代替铸铁和铜合金引起了人们的注意。由于它们有着相似的特性，而且锌合金具有较好的可加工性，良好的承载和磨损特性，可用作轴瓦轴套及耐磨零件材料。

铸造锌合金化学成分、物理及力学性能列入表 1-3-19 和表 1-3-20 中。

1.3.4 镁合金

地壳中镁元素、蕴藏量非常丰富，约为铁的 40%，我国西部地区镁的产量很高，是世界镁市场的最主要供应商之一。

表 1-3-17　变形锌合金化学成分、物理及力学性能和主要用途

组别	合金代号	化学成分 主要元素（%） Al	Cu	Mg	Zn	物理性能 密度 ρ (g/cm³)	凝固温度范围 (℃)	线胀系数 α (20~100℃) (10^{-6}/℃)	力学性能 弹性模量 E (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)	冲击韧度 a_k (J/cm²)	硬度 (HBS)	主要用途
锌铜合金	ZnCu1.5		1.2~1.7		余量									
	ZnCu1.2		1.0~1.5											轧材和挤制材可作 H68、H70 黄铜代用品，制锁、日用五金等制品
	ZnCu1		0.8~1.2			7.18	420~430	34.8		195~295	20~30	15~20	45~75	
	ZnCu0.3		0.2~0.4											
锌铝合金	ZnAl15	14~16		0.02~0.04	余量	5.7	380~450	27~28	113 000	245~390	10~40	13~16	60~100	挤制材，轴承
	ZnAl10-5	9~11	4.5~5.5			6.3	378~397	27		345~440	12~18	5~10	90~110	挤制材、压床模具，轴套
	ZnAl10-1	9~11	0.6~1.0	0.02~0.05		6.2	380~410	27~28	130 000	390~450	8~12	18~21	90~110	
	ZnAl4-1	3.7~4.3	0.6~1.0	0.02~0.05		6.7	380~385	27.4	130 000	365~430	8~12	18~22	90~105	轧材和挤制材，可为 H59 黄铜代用品，模具
	ZnAl0.2-4	0.2~0.25	3.5~4.5			7.25	424~470		126 000	295~355	20~30	5~7	75~90	轧材和挤制材，尺寸要求稳定的零件

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-18 压铸锌合金化学成分和力学性能(GB/T13818—92)

合金牌号	合金代号	化学成分（%）									力学性能（≥）			
		主要元素				杂质（不大于）					抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)	布氏硬度 HBS (5/250/30)	冲击韧度 α_k (J/cm²)
		Al	Cu	Mg	Zn	Fe	Pb	Sn	Cd	Cu				
ZZnAl4Y	YX040	3.5～4.5	—	0.02～0.06	余量	0.1	0.005	0.003	0.004	0.25	250	1	80	35
ZZnAl4Cu1Y	YX041	3.5～4.3	0.75～1.25	0.03～0.08		0.1	0.005	0.003	0.004	—	270	2	90	39
ZZnAl4Cu3Y	YX043	3.5～4.3	2.5～3.0	0.02～0.06		0.1	0.005	0.003	0.004	—	320	2	95	42

表 1-3-19 铸造锌合金化学成分（参考）

国别	合金牌号	主要元素（%）				杂质含量（不大于）							
		Al	Cu	Mg	Zn	Fe	Pb	Sn	Cd	Si	Cu	Mg	总和
中国	ZZnAl4	3.5～4.3	—	0.03～0.08	余量	0.1	0.015	0.003	0.005	0.05	0.25		0.4
	ZZnAl4-0.5	3.5～4.5	0.5～0.9	0.08～0.15		0.1	0.015	0.003	0.01				0.2
	ZZnAl4-1	3.5～4.5	0.75～1.25	0.03～0.08		0.1	0.015	0.003	0.005				0.2
	ZZnAl4-3	3.5～4.5	2.5～3.5	0.03～0.1									
	ZZnAl9-1.5	8.0～11.0	1.0～2.0	0.03～0.06		0.2	0.03	0.01	0.02	0.1			0.35
	ZZnAl0-5	9.0～12.0	4.0～5.5	0.03～0.06		0.2	0.03	0.01	0.02	0.05			0.35
美国	ZA8	8.0～8.8	0.8～1.3	0.015～0.03	余量	0.1	0.004	0.02	0.03				
	ZA12	10.5～11.5	0.5～1.25	0.015～0.03		0.075	0.004	0.02	0.003				
	ZA27	25.0～28.0	2.0～2.5	0.01～0.03		0.1	0.004	0.02	0.003				
德国	GB-ZnAl4Cu3	3.5～4.3	2.5～3.2	0.03～0.06	余量	0.075		0.002	Pb+Cd 0.006				
	GB-ZnAl6Cu1	5.6～6.0	1.2～1.6			0.075		0.002	Pb+Cd 0.006			0.006	
法国	Z-A4G	3.90～4.30	0.03	0.03～0.06		0.075	0.003	0.001	0.003				
	Z-A4U1G	3.90～4.30	0.75～1.25	0.03～0.06		0.075	0.003	0.001	0.003				

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-20 铸造锌合金物理及力学性能（参考）

合金牌号	物理性能					力学性能					
	密度 (g/cm³)	线胀系数 α (20～100℃) (10⁻⁶/℃)	热导率 λ [W/(m·℃)]	比热容 C [J/(kg·K)]	电阻率 ρ (Ω·mm²/m)	铸造方法	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%)	布氏硬度 HBS	冲击韧度 α_k (kJ/m²)
ZZnAl4	6.6	27	113	418.7	0.0637	Y	250	200	3	70	10.8
ZZnAl4-0.5	6.7	27.4	109	418.7	0.0654	Y	280			75	
ZZnAl4-1	6.7	27.4	109	418.7	0.0654	Y	280	230	2	85	
ZZnAl4-3	6.8		105	419	0.059	Y	310		2	80	
ZZnAl9-1.5	6.2	26.9	100.48			J	320		1	100	
ZZnAl10-5	6.3	27	100.5			J	300		1.5	105	3.5
ZA8	6.3	23.2	115		0.0654	J	220	205	1	90	
						Y	365	285	3	100	80
ZA12	6.0	24.1	116	500	0.0668	J	310		1	90	
						Y	390	310	4	95	
ZA27	5.0	25.9	125.5		0.0701	J	425	365		110	
						Y	410	355	0.5	116	24
GB-ZnAl4Cu3	6.8		105	419		J	240	200	1	100	
GB-ZnAl6Cu1						J	220	170	1.5	80	

汽车论坛 http://www.qclt.com

镁合金是现代有色金属中最轻的一种，纯镁密度约为 1.8g/cm³，只有铝的 2/3，铜的 1/5。镁合金比强度和比屈服强度高，切削加工性能优良，有较高的抗冲击能力，是制造承受剧烈震动零件的良好材料。对有机物和碱有较高的耐蚀性，对酸或其它介质的耐蚀性较低，防止镁合金制件腐蚀的方法是阳极氧化或涂漆保护。

镁合金分为铸造合金和变形合金两大类，其化学成分、物理和力学性能列入表 1-3-21、表 1-3-22 和表 1-3-23 中。

采用镁合金制造汽车零件是轻量化的又一途径，它比铝合金更能有效地减轻车重，尽管目前镁的价格比较高，在汽车上应用的零件还很少，但仍一直为世界汽车行业所关注，并不断寻求应用途径，镁合金是汽车上应用潜力很大的轻有色金属。

铸造镁合金常采用砂型和压力铸造工艺生产各种零件，在汽车上多采用镁合金压铸件。铸镁合金化学成分及力学性能列入表 1-3-24 中，压铸镁合金的典型汽车零件是轿车变速器壳。目前欧美和日本汽车主要在变速器、分动箱、离合器、机油滤清器等壳体件上使用镁合金的铸件，在烟灰盒、仪表板、座椅框架等零件上使用镁合金型材和压铸件，但只在部分轿车上，而且应用范围也不广。镁在汽车上扩大应用的阻力主要是价格，但更重要的条件是车用零件的技术开发工作。

1.3.5 轴承合金

轴承普遍应用于各种工业设备和动力机械上，是机器设备的重要零部件。轴承包括滑动轴承和滚动轴承两大类。滑动轴承因工作平稳能承受较大的压力，在轴的旋转速度很高和承受较重载荷的场合下，大多采用滑动轴承，因此，滑动轴承便成为汽车上不可缺少的重要零部件。轴承合金是用来制造滑动轴承的特定材料。

轴承合金材料一般用于生产轴瓦、轴套和止推垫片等零件。滑动轴承按其结构可分为单体轴承、双金属轴承、三层轴承和四层轴承，按材料又可分为金属材料和非金属材料轴承两大类，金属轴承材料以制造方法可分为铸造轴承材料、粉末冶金轴承材料、压延轴承材料和电镀轴承材料。

根据滑动轴承的服役条件，轴承合金材料应具备特有的性能，如疲劳强度、耐磨减摩性、顺应性、抗咬合性、嵌藏性、耐蚀性、导热性和承载能力等。实际上所有性能都优越的轴承材料是难以得到的，必须根据不同的使用工况要求，以几项主要的性能指标为依据，选取具体适用的轴承材料。

轴承合金常为两相或多相组织所组成，大致可归纳为两类，一类合金的组织为软基体上均匀分布硬质点相，另一类是由较硬的基体和软质点相组成。早期使用的轴承合金大多为前一种，如锡基和铅基巴氏合金，它们虽有较优的表面性能，但在比压力较高的工况下，后种轴承合金材料显示出极大的优越性，它能承受较高的比压力，具有较好的冲击韧度和抗疲劳性能，但表面性能较差，这类合金常用来制造工作温度高、传递功率大、承受冲击载荷及转动速度很高使用工况的轴承，为改善其表面性能，常需在轴承表面加镀第三层合金。

目前工业上使用的轴承合金材料主要是有色金属合金，常以其成分中含量较多的元素命名分类，我国的金属材料轴承合金常按以下分类：

轴承合金
- 锡基轴承合金
- 铅基轴承合金
- 铜基轴承合金
- 锌基轴承合金
- 铝基轴承合金

表 1-3-21　铸造镁合金化学成分表(GB1177—91)

合金代号	牌号	元素含量（%）（未标范围者为不大于）										
		Al	Zn	Zr	RE		Si	Cu	Fe	Ni	杂质总和	Mg
ZM1	ZMgZn5Zr	3.5～5.5		0.5～1.0			0.01	0.10	0.01	0.01	0.30	余量
ZM2	ZMgZn4RE1Zr	3.5～5.0		0.5～1.0	0.75～1.75		0.01	0.10	0.01	0.01	0.30	
ZM3	ZMgRE3ZnZr		0.2～0.7	0.4～1.0	2.5～4.0		0.01	0.10	0.01	0.01	0.30	
ZM4	ZMgRE3Zn2Zr		2.0～3.0	0.5～1.0	2.5～4.0			0.10		0.01	0.30	
ZM5	ZMgAl8Zn	7.5～9.0	0.2～0.8			Mn: 0.15～0.5	0.30	0.20	0.05	0.01	0.50	
ZM6	ZMgRE2ZnZr		0.2～0.7	0.4～1.0	2.0～2.8			0.10		0.01	0.30	
ZM7	ZMgZn8AgZr		7.5～9.0	0.5～1.0		Ag: 0.6～1.2		0.10		0.01	0.30	
ZM10	ZMgAl10Zn	9.0～10.2	0.6～1.2			Mn: 0.1～0.5	0.30	0.20	0.05	0.01	0.50	

表 1-3-22　变形镁合金化学成分表(GB5153—85)

合金名牌	合金牌号	合金元素（%）（未标范围者为不大于）										Mg	其它杂质总和
		Al	Mn	Zn		Cu	Ni	Si	Fe	Be			
一号镁合金	MB1	0.20	1.3～2.5	0.30		0.05	0.007	0.10	0.05	0.01		余量	0.20
二号镁合金	MB2	3.0～4.0	0.15～0.50	0.20～0.80		0.05	0.005	0.10	0.05	0.01			0.30
三号镁合金	MB3	3.7～4.7	0.30～0.60	0.8～1.4		0.05	0.005	0.10	0.05	0.01			0.30
五号镁合金	MB5	5.5～7.0	0.15～0.50	0.50～1.5		0.05	0.005	0.10	0.05	0.01			0.30
六号镁合金	MB6	5.0～7.0	0.20～0.50	2.0～3.0		0.05	0.005	0.10	0.05	0.01			0.30
七号镁合金	MB7	7.8～9.2	0.15～0.50	0.2～0.8		0.05	0.005	0.10	0.05	0.01			0.30
八号镁合金	MB8	0.20	1.3～2.2	0.3	Ce: 0.15～0.35	0.05	0.007	0.10	0.05	0.01			0.30
十五号镁合金	MB15	0.05	0.10	5.0～6.0	Zr: 0.30～0.9	0.05	0.005	0.05	0.05	0.01			0.30

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-23 镁合金物理及力学性能

合金代号		物理性能					力学性能 ≥					
		密度 ρ (g/cm³)	线胀系数 α (20~100℃) (10^{-6}/℃)	热导率 λ (20℃) (W/m·℃)	电阻率 ρ (Ω·mm²/m)	比热容 C (20℃) (J/kg·℃)	状态	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ (%)	硬度 (HBS)	弹性模量 E (MPa)
铸造镁合金	ZM1	1.82	25.8	113	0.062	967	T1	235	140	5	62	42 000
	ZM2	1.85	25.8	117	0.060	964	T1	200	135	2		42 000
	ZM3	1.80	23.6		0.073	1038	F	120	85	1.5	55	44 000
							T2	120	85	1.5		44 000
	ZM4	1.82	23.9	96	0.070	1050	T1	140	95	2	58	43 000
	ZM5	1.81	26.8	78.5	0.150	1050	F	145	75	2	50	45 000
							T4	230	75	6	62	45 000
							T6	230	100	2	78	45 000
	ZM6	1.77	23.2		0.084	904	T6	230	135	3	70	43 400
	ZM7						T4	265		6		
							T6	275		4		
	ZM10	1.81	26.1	78.5	0.170	1050	F	145	85	1		45 000
							T4	230	85	4		45 000
							T6	230	130	1		45 000
变形镁合金	MB1	1.76	22.29	125.6	0.0513	1046.7	R	175		2	40	39 200
	MB2	1.78	26.0	96.3	0.093	1046.7	R	255		5	45	42 140
	MB3	1.79	26.1	96.3	0.120	1046.7						41 160
	MB5	1.80	24.4	69.1	0.153	1046.7	M	255		8	50	42 140
	MB6	1.84	23.4		0.196	1046.7	R	285		7		44 100
	MB7	1.82	26.3	58.6	0.162	1046.7	C	295		8	55	42 140
	MB8	1.78	23.61	134.0	0.0612	1046.7	R	215		3		40 180
	MB15	1.8	20.9	117.2	0.0565	1034.1	S	315		6	75	42 140

注：铸件 T1——人工时效；T2——退火；T4——固溶处理；T6——固溶处理加完全人工时效。

型材 R——热加工；C——淬火；S——人工时效

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-24　主要国家压铸镁合金化学成分及力学性能（参考）

国别	合金牌号		化学成分（%）（未标注范围者为不大于）									力学性能（不低于）			
			Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	杂质总和	Mg	抗拉强度 σ_b（MPa）	屈服强度 $\sigma_{0.2}$（MPa）	伸长率 δ（%）	布氏硬度（HBS）
中国	YZMgAl9Zn（YM5）		7.5~9.0	0.2~0.8	0.15~0.5	0.25	0.1	0.08	0.01	0.5	余量	200		1	65
美国	AM60A		5.5~6.5	0.22	0.13	0.5	0.35		0.03	0.3	余量	220	130	8	55
	AS41A		3.5~5.0	0.12	0.2~0.5	0.5~1.5	0.06		0.03	0.3		210	140	6	60
	AZ91A		8.3~9.7	0.35~1.0	0.13	0.5	0.1		0.03	0.3		230	160	3	63
	AZ91B		8.3~9.7	0.35~1.0	0.13	0.5	0.35		0.03	0.3		230	160	3	63
日本	AZ91	A	8.3~9.7	0.35~1.0	0.13	0.5	0.1		0.03		余量	230	150	3	
		B	8.3~9.7	0.35~1.0	0.13	0.5	0.35		0.03			230	150	3	
		D	8.5~9.5	0.45~0.9	0.17	0.05	0.015	0.004	0.001			230	150	3	
	AM60	A	5.5~6.5	0.22	0.13	0.5	0.35		0.03			240	130	8	
		B	5.7~6.3	0.2	0.27	0.05	0.008	0.004	0.001			240	130	8	
法国	G-A4S1		3.5~5.0	0.1	0.2~0.5	0.5~1.5	0.05	0.02	0.01	0.15	余量				
	G-A6		5.5~6.5	0.1	0.1~0.4	0.1	0.05	0.02	0.01	0.15					
	G-A6Z1		5.5~6.5	0.2~1.0	0.1~0.4	0.1	0.05	0.02	0.01	0.15					
	G-A8Z1		7.0~8.5	0.2~1.0	0.15~0.3	0.1	0.05	0.02	0.01	0.15					
	G-A9Z1		8.0~9.5	0.2~1.0	0.15~0.3	0.1	0.05	0.02	0.01	0.15					
德国	GD-MgAl6		5.5~6.5	0.1	0.1~0.4	0.1	0.05			0.15	余量	190	120	4	50
	GD-MgAl4Si		4.0~5.0	0.1	0.2~0.5	0.4~1.0	0.2			0.15		200	120	3	50
	GD-MgAl6Zn1		5.5~6.5	0.2~1.0	0.1~0.4	0.3	0.2			0.15		200	130	3	50
	GD-MgAl8Zn1		7.0~8.5	0.3~1.0	0.1~0.3	0.5	0.2			0.15		200	140	1	50
	GD-MgAl9Zn1		8.0~9.5	0.3~1.0	0.1~0.3	0.5	0.2			0.15		200	150	0.5	50

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-25 锡基、铅基轴承合金化学成分、性能及主要用途

合金牌号	化学成分（%）										硬度 HB ≥	主要用途
	Cu	Sb	Sn	Pb	Fe	Al	Zn	Bi	As			
ZSnSb12Pb10Cu4	2.5～5.0	11.0～13.0	余量	9.0～11.0	0.1	0.01	0.01	0.08	0.1		29	温度不高的中速中载荷发动机主轴承
ZSnSb12Cu6Cd1	4.5～6.8	10.0～13.0		0.15	0.1	0.05	0.05	–	0.4～0.7	Cd：1.1～1.6 Ni：0.3～0.6	34	
ZSnSb11Cu6	5.5～6.5	10.0～12.0		0.35	0.1	0.01	0.01	0.03	0.1		27	高速高载荷，工作温度低于 110℃的重要轴承
ZSnSb8Cu4	3.0～4.0	7.0～8.0		0.35	0.1	0.005	0.005	0.03	0.1		24	高速高载荷汽车发动机薄壁双金属轴承及止推片
ZSnSb4Cu4	4.0～5.0	4.0～5.0		0.35	–	0.01	0.01	0.08	0.1		20	高速高载荷韧性要求较大的涡轮机、内燃机高速轴承
ZPbSb16Sn16Cu2	1.5～2.0	15.0～17.0	15.0～17.0	余量	0.1		0.15	0.1	0.3		30	工作温度低于 120℃，无显著冲击载荷的高载高速轴承
ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	2.5～3.0	14.0～16.0	5.0～6.0		0.1		0.15	0.1	0.6～1.0	Cd：1.75～2.25	32	船舶机械，小电动机、抽水机轴承
ZPbSb15Sn10	0.7	14.0～16.0	9.0～11.0		0.1	0.005	0.005	0.1	0.6	Cd：0.05	24	中等压力的机械轴承
ZPbSb15Sn5	0.5～1.0	14.0～15.5	4.0～5.5		0.1	0.01	0.15	0.1	0.2		20	低速轻压力机械轴承
ZPSb10Sn6	0.7	9.0～11.0	5.0～7.0		0.1	0.005	0.005	0.1	0.25	Cd：0.05	18	高载荷耐蚀耐磨用轴承

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-26 铜基轴承合金化学成分、性能及主要用途

合金牌号	化学成分（%）													硬度 HBS	主要用途
	Sn	Pb	Zn	Al	Fe	Sb	Ni	Mn	Si	Bi	P	S	Cu		
ZCuSn5Pb5Zn5	4.0～6.0	4.0～6.0	4.0～6.0	0.01	0.3	0.25	2.5		0.01		0.05	0.1	余量	60～65	适用于中速中载荷轴承，如发动机连杆轴套
ZCuSn10P1	9.0～11.5	0.25	0.05	0.01	0.1	0.05	0.1	0.05	0.02	0.005	0.5～1.0	0.05		80～90	承受静冲击载荷的耐磨耐蚀零件及轴瓦轴套
ZCuPb10Sn10	9.0～11.0	8.0～11.0	2.0	0.01	0.25	0.5	2.0	0.2	0.01	0.005	0.05	0.1		65～70	适用于高载荷中速轴承、双金属轴瓦及轴套，如连杆小头轴套
ZCuPb15Sn8	7.0～9.0	13.0～17.0	2.0	0.01	0.25	0.5	2.0	0.2	0.01		0.1	0.1		60～65	适用于中高速中等载荷轴承，内燃机连杆轴承
ZCuPb20Sn5	4.0～6.0	18.0～23.0	2.0	0.01	0.25	0.75	2.5	0.2	0.01		0.1	0.1		45～55	适用于高速中等载荷轴承
ZCuPb30	1.0	27.0～33.0		0.01	0.5	0.2		0.3	0.02	0.005	0.08	As 0.1		25	适用于高速高载荷轴承、发动机主轴瓦、连杆瓦及凸轮套
ZCuAl10Fe3	0.3	0.2	0.4	8.5～11.0	2.0～4.0		3.0	1.0	0.2					100～110	要求强度高、耐磨、耐蚀的重型铸件及轴承

注：表中未列出成分范围者，为杂质最大值。

表 1-3-27 铝基轴承合金化学成分、性能及主要用途

合金牌号	化学成分（%）												硬度 HBS	主要用途
	Sn	Cu	Mg	Ni	Sb	Si	Fe	Mn	Zn	Pb	Ti	Al		
LSn1	6.9～9.0	2.0～3.0		1.0～1.5		0.5	0.8	0.5	0.1	0.1	0.5	余量	45	用于高速高载荷的轴承
LSn2	6.5～7.5	1.0～1.5		0.5～1.0		2.0～2.5	0.4		0.1	0.1			45	
LSn3	2.0～4.0	3.5～4.5	1.0～2.0			0.5	0.8	0.5	0.1	0.1	0.5		100	用于中速中载荷的轴承
LSn20－1	17.5～22.5	0.8～1.2				0.5	0.7						22～32	用于双金属轴瓦材料，制造汽车、拖拉机等各种内燃机轴承
LSn30－1	27.5～32.5	0.8～1.2				0.5	0.7						18～28	
LSbMg			0.3～0.7		3.5～5.5	0.5	0.75						25～28	用于双金属轴瓦材料，制造拖拉机轴承

注：表中未列出成分范围者，为杂质最大值。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-3-28 常用轴承合金性能比较

合金名称	抗咬合性	磨合性	顺应性与嵌藏性	耐蚀性	抗疲劳性	导热性	合金硬度(HBS)	轴颈最小硬度(HBS)	最大容许压力(N/cm^2)	最高容许工作温度(℃)
锡基合金	优	优	优	优	劣	差	20～30	150	600～1 000	150
铅基合金	优	优	优	中	差	差	15～30	150	600～800	150
锡青铜	中	劣	差	优	优	中	50～100	200	700～2 000	200
铅青铜	中	差	劣	劣	良	良	40～80	300	2 000～3 200	220～250
铝青铜	差		差	优	良	劣	100～110	280	1 500	300
磷青铜	劣	劣		优	优		100～200	300	1 500～6 000	250
黄铜	中	劣	差	优	优	劣	80～150	200	700～2 000	200
镉基合金	优	良		劣	差		30～40	200～250	1 000～1 400	250
铝基合金	中	中	中	优	良	优	35～50	300	2 000～2 800	100～150
锌基合金	差		差	优	中	中	80～105	200	2 000	80～120
铸铁	差	劣		优	优		160～180	200～250	3 000～6 000	150
三层金属轴承	优		良	良	良	良	–	200～300	1 400～3 500	170

表 1-3-29 国内外常用轴承合金牌号（参考）

国别	锡基合金	铅基合金	铜基合金	铝基合金
中国	ZSnSb12Pb10Cu4 ZSnSb12Cu6Cd1 ZSnSb11Cu6 ZSnSb8Cu4 ZSnSb4Cu4	ZPbSb16Sn16Cu2 ZPbSb15Sn5Cu3Cd2 ZPbSb15Sn10 ZPbSb15Sn5 ZPbSb10Sn6	ZCuSn5P5Zn5 ZCuSn10P1、ZCuPb10Sn10 ZCuPb15Sn8 ZCuPb20Sn5 ZCuPb30、ZCuAl10Fe3	LSn1、LSn2 LSn3 LSn20－1 LSn30－1 LSbMg
英国（格拉希尔）	L2 HC2	GM155	粉冶：SY、SX、SW、SP、SL 铸造：K1A、LB9、LB10、LB20、CL26	AS15、AS11、AS45、AS78、A11、A12、A8
日本（大同）	W90、W87、W87S		K30、K25、L10、L23	A4Z、A6、A6M、A17X、A17S、A20、A30、A40
美国（SAE）	SAE11 SAE12	SAE13 SAE15	SAE48、SAE49、SAE792、SAE797、SAE794、SAE799、SAE CA510	SAE770 SAE783 SAE770－T101

汽车论坛 http://www.qclt.com

双金属轴承合金带材，是汽车上制造各种轴瓦、轴套和止推片的主要原材料。目前汽车上应用较多的轴承合金是铜基合金（铜铅合金及铅青铜）和铝基合金（铝锡合金、铝铅合金及铝硅合金），锡基和铅基巴氏合金在现代汽车上的应用范围已很小。铜基轴承合金虽有较高的承载能力，但表面性能较差，需要在轴瓦表面镀覆合金层，改善轴瓦的表面特性，使生产工艺复杂。铝锡、铝铅和铝硅合金也具有很高的承载能力，并可不镀第三层合金使用，因此，铝基轴承合金在汽车上的应用越来越多。铜基合金轴承表面的镀层合金成分常有以下几种：90%Pb、8%Sn、2%Cu；82%Pb、9%Sn、9%In 和 90%Pb、10%Sn。

各类轴承合金化学成分、性能及主要用途见表 1-3 25、表 1-3 26 和表 1-3-27。各种轴承合金材料性能对比见表 1 3-28。

目前，世界各国及各公司均无统一的轴承合金牌号表示，成分也各不相同，并无提供详细的成分范围。表 1-3-29 中列出了主要国家及公司的轴承合金牌号、表 1-3-30 为部分铝基合金和铜基合金的大致成分，均为汽车用轴承合金常见牌号，供材料对比分析参考。

表 1-3-30 汽车用轴承合金国外常见牌号成分

合金系列	国家（公司）	合金牌号	参考成分
铝基轴承合金	英国（格拉希尔金属公司）	AS45	40%Sn、余 Al
		AS15	20%Sn、1%Cu，余 Al
		AS11、AS11（P）	6%Sn、1%Cu、1%Ni，余 Al
		AS78、AS78（P）	11%Si、1%Cu，余 Al
		AS104	10%Sn、4%Si、1%Cu，余 Al
		AS124	12%Sn、4%Si、2%Cu，余 Al
		AS124A	12%Sn、4%Si、1%Cu，余 Al
		F66	8.5%Pb、4%Si、1.5%Sn、1%Cu，余 Al
		F85	8.5%Pb、4%Si、1.5%Sn、1%Cu，余 Al
		A11	6%Sn、1%Cu、1%Ni，余 Al
		A12	6%Sn、1.5%Cu、1.4%Ni、0.9%Mg、0.5%Si，余 Al
		A8	5%Zn、1.5%Si、1%Cu、0.9%Pb，余 Al

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

合金系列	国家（公司）	合金牌号	参考成分
铝基轴承合金	日本（大同金属公司）	A4Z	3.5%Zn、2.5%Si、1%Pb、0.8%Cu，余Al
		A6	6%Sn、1%Cu、1%Ni，余Al
		A6M	6%Sn、1.5%Cu、1.5%Ni、1%Mg，余Al
		A17X	12%Sn、2.5%Si、1.7%Pb、0.7%Cu、0.3%Sb，余Al
		A20	20%Sn、1%Cu，余Al
		A30	30%Sn、1%Cu，余Al
		A40	40%Sn、1%Cu，余Al
	美国（SAE）	SAE770	6%Sn、1%Cu、1%Ni，余Al
		SAE783	20%Sn、1%Cu，余Al
铜基轴承合金	英国（格拉希尔金属公司）	SY	10%Sn、10%Pb，余Cu
		SX	22%Pb、4.5%Sn，余Cu
		SW	22%Pb、4.5%Sn，余Cu
		SP	25%Pb、1.5%Sn，余Cu
		SL	30%Pb，余Cu
		KtA	10%Sn、0.5%P、余Cu
		LB9	9.5%Pb、5%Sn，余Cu
		LB10	10%Pb、10%Sn，余Cu
		LB20	20%Pb、5%Sn，余Cu
		CL26	26%Pb、2%Sn，余Cu
	日本（大同金属公司）	K30	30%Pb、1%Sn、<2%Ni，余Cu
		K25	25%Pb、1%Sn、<2%Ni，余Cu
		L10	10%Pb、10%Sn、<1%Ni，余Cu
		L23	23%Pb、3%Sn、<1%Ni，余Cu
	美国（SAE）	SAE48	30%Pb、1%Sn、2%Ni，余Cu
		SAE49	25%Pb、0.5%Sn，余Cu
		SAE792	10%Pb、10%Sn、余Cu
		SAE797	
		SAE794	24%Pb、4%Sn、3%Zn，余Cu
		SAE799	

（撰稿人：袁序弟）

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.4 非金属材料

1.4.1 橡胶

橡胶属于粘弹性高分子材料，具有弹性模量低、弹性极限高、耐疲劳、易硫化粘结等性能；有些胶种还具有耐油、耐化学介质、气密性好及耐高低温等性能。

橡胶的制造过程较为复杂。天然橡胶一般来源于植物，通过过滤、凝胶、脱水、干燥、烟熏及压块等过程，加工成块状烟片胶；而合成橡胶主要来源于酒精或石油产品，经聚合、凝聚、脱水、干燥、压块等过程，加工成块状胶。

为适应使用条件的要求，需选择合适的胶种及胶料配方，对不同类型的橡胶零件，可能采用不同的配合剂与硫化条件。

汽车上橡胶零件约 300 多种，常用胶种达 15 个，橡胶制品分布于汽车发动机及其附件、传动、转向、悬架、制动、电气仪表及车身等系统内，广泛用作密封、减震、胶管、传动带、隔膜与轮胎。汽车使用条件复杂，对各部位的橡胶零件会提出不同要求。

应该提出，橡胶除了具有链长的伸缩、键角的变动而产生的普弹性能之外，还有其它材料所没有的高形变及粘弹性。而制品与配方的设计，试验与技术规范就是橡胶零部件发展的科学基础。

1.4.1.1 橡胶的制造

1）天然橡胶

天然橡胶由植物（三叶橡胶、杜仲树、大山橡胶草等）胶乳制成。天然橡胶的制造工艺见图 1-4-1。

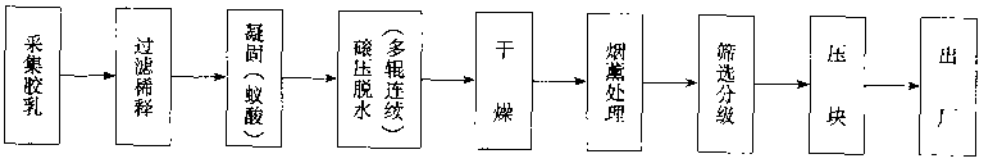


图 1-4-1 天然橡胶的制造工艺

首先，将橡胶树上采集来的胶乳，过滤去杂质后再稀释，用蚁酸凝固后，经多辊连续碾压脱水、干燥，再用烟熏和进一步干燥处理，经检验筛选后压块出厂。

烟片胶中不允许有胶块、分级剪下的不合格的碎胶、撒泡胶、弱胶、烧焦胶、夹生胶、无花纹的烟片和其它杂胶。

天然生胶烟胶片按 GB 8098，分为 5 个等级，即：一级烟胶片（No.1RSS）；二级烟胶片（No.2RSS）；三级烟胶片（No.3RSS）；四级烟胶片（No.4RSS）；及五级烟胶片（No.5RSS）。其中一级烟胶片质量最好，五级烟胶片质量最差。

2）合成橡胶

以石油化工产品作原料，再合成橡胶状高分子，由于分子结构不同，合成橡胶可能具有与天然橡胶不同的特性。以聚合反应方式来区分，合成橡胶有官能团聚合及离子聚合；以反应相来区分，合成橡胶有本体聚合、溶液聚合、乳液聚合和悬浮聚合等四种形式。

人造或合成橡胶的制造工艺，以顺丁橡胶的生产流程为例，见图 1-4-2。

合成橡胶牌号的规定，用橡胶品种代号和四位阿拉伯数字组成。

合成橡胶的品种代号，按 GB 5576 合成橡胶命名规定来表示。

阿拉伯数字位数的有关规定如下：

汽车论坛 http://www.qclt.com

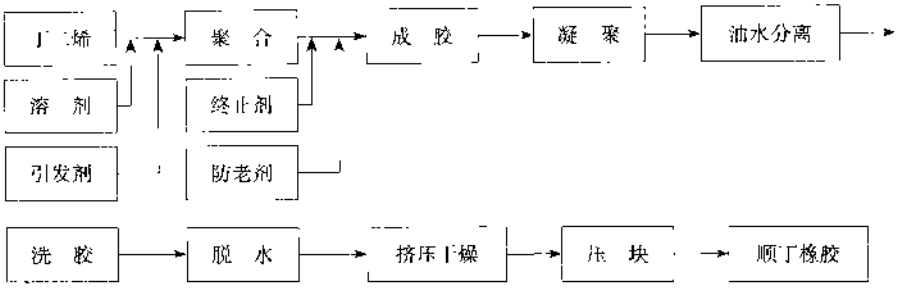


图 1-4-2 顺丁橡胶生产流程

前两位数表示橡胶品种的主要特征。可分别以单体类型、结构含量、结合单体量、催化体系及加工方式等表示。

后两位数是根据填充情况、污染程度、门尼粘度或分子量等不同性能编排的序号（个别橡胶另有规定除外）。产品污染程度和填充情况多以第二位数表示，门尼粘度或分子量以第四位数表示，按低、中、高顺序编排序号。主要特征数码规定如表 1-4-1。

表 1-4-1 主要特征数码规定

橡胶代号	橡胶名称	数码规定	
		第一位	第二位
SBR	丁苯橡胶	与国际合成橡胶生产者协会（IISRP）规定的系列相同	
SBS	热塑丁苯橡胶	4-星型，1-线型	苯乙烯配比
BR	丁二烯橡胶	顺式-1，4结构含量 90-高顺式，65-中顺式，35-低顺式	
CR	氯丁橡胶	1-硫调节，2-非硫调节， 3-混合调节	结晶速度：0-无，1-微， 2-低，3-中，4-高
NBR	丁腈橡胶	结合丙烯腈量	
EPM	二元乙丙橡胶	丙烯含量	
EPDM	三元乙丙橡胶	丙烯含量	
IR	异戊橡胶	顺式-1，4结构含量	
IIR	丁基橡胶	不饱和度	
MQ MVQ MPQ	甲基硅橡胶 甲基乙烯基硅橡胶 甲基苯基硅橡胶	1-高温硫化	0-甲基 1-乙烯基
MPVQ FNVQ MFVQ	甲基苯基乙烯基硅橡胶 腈硅橡胶 氟硅橡胶	3-室温硫化	2-苯基 3-腈乙烯 4-氟烷基
FPM FPNM AFMU	氟橡胶 含氟磷腈橡胶 羧基亚硝基氟橡胶	2-偏氟乙烯 4-四氟乙烯	3-三氟氯乙烯 6-六氟丙烯

续上表

橡胶代号	橡胶名称	数码规定	
		第一位	第二位
CSM	氯磺化聚乙烯	氯含量	
CO ECO PECO	均聚型氯醚橡胶 二元共聚型氯醚橡胶 三元共聚型氯酯橡胶	氯含量	
T	聚硫橡胶	单体类型	交联剂含量
AU EU	聚酯型聚氨酯橡胶 聚醚型聚氨酯橡胶	1-混炼 2-浇注 3-热塑	多羟基化合物种类

注：多羟基化合物种类用下列数值表示：1-聚己二酸-乙二醇-丙二醇，2-聚己二酸-丁二醇，3-ε-己内酯，4-聚丙二醇，5-聚四氢呋喃，6-聚四氢呋喃-环氧乙烷，7-聚四氢呋喃-环氧丙烷。

3）橡胶制品的加工

橡胶制品的加工过程如图 1-4-3：

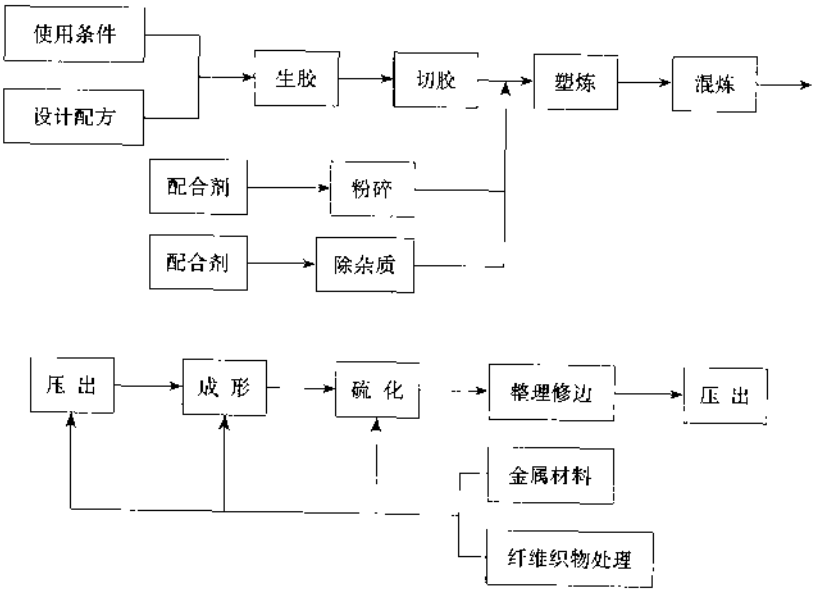


图 1-4-3 橡胶制品加工过程

图 1-4-3 中的加工过程解释如下：

使用条件——工作温度范围、工作压力、工作班次、频率及作用介质。

设计配方——确定生胶类别、硫化系统、胶料的相对密度并选定补强填充剂及增容剂品种和用量、增塑剂品种与用量、防老剂品种与用量及其它专用配合剂。

生胶——橡胶有许多品种，根据聚合物的主链结构，生胶可分为二大类：二烯类橡胶（如天然橡胶、丁苯橡胶）和非二烯类橡胶（如乙丙橡胶、氟橡胶），为改进制品性能，通常进行橡胶并用（如在天然橡

汽车论坛 http://www.qclt.com

胶中掺合顺丁橡胶以提高其耐磨性，在二烯橡胶中掺用氯磺化聚乙烯以提高其耐光性）。

切胶——将大块生胶切成片，便于向炼胶机内投放。

塑炼——生胶因粘度过高或因均匀性较差，往往难于加工。将生胶投入炼胶机内进行加工处理的过程称为塑炼，橡胶在塑炼后弹性下降、可塑度增加、流动性提高，橡胶变得易于加工。

混炼——混炼使橡胶改性，在混炼过程中，炭黑被生胶和软化剂浸润分散，生胶与炭黑活性之间产生吸附和结合，生胶在软化剂中产生溶胀，表面活性剂在混炼中促进粉料分散，并使分散体趋于稳定，在混炼过程中机械-化学反应起着重要作用。通过这一系列的改性过程，对制备的混炼胶工艺性能和最终产品质量具有决定性的影响。因此，不能把混炼看作生胶与配合剂简单的机械混合过程；也不能把混炼胶看作生胶与配合剂简单的机械混合物。

压出——利用压出机，使胶料在螺杆或柱塞推动下，连续不断向前运动，再使用口型压出各种所需形状的半成品。压出工艺的用途正在日益扩大，主要有：塑炼生胶；滤胶、消除胶料杂质；胶料压出成形，供无模连续硫化，或为模压制品提供胶坯；制备轮胎和胶管等制品的半成品；为金属丝或织物线绳作覆盖胶；为压延作业热炼供胶。

成形——除了上述的压出工艺外，橡胶制品的成形工艺还有：注压（注射）、浇铸及模压，而汽车橡胶制品正大量采用模压工艺。

橡胶的硫化——橡胶与硫磺或其它配合剂经一定温度和时间的反应后，减少了不饱和性，同时产生交联而形成体型结构，在物理性质上引起广泛变化的化学反应。这些变化包括：塑性流动降低，表面粘性减少，弹性增加，拉伸强度显著地提高及溶解性大为降低。通过控制硫化各种因素（如硫化温度、硫化时间和硫化配合剂的用量），可以获得不同性能的硫化橡胶。

（1）硫化温度

胶料在一定的温度与压力条件下，有一最适宜的硫化时间，当硫化条件变化时，硫化时间需要调整。各种胶料推荐的硫化温度如表 1-4-2。

表 1-4-2 各种胶料推荐的硫化温度

胶料类型	NR	SBR	IR	BR	CR	IIR	EPDM	NBR	Q	FPM
硫化温度（℃）	143	150	151	151	151	170	160～180	180	160	160

近年来，随着室温硫化胶料的增加及高温硫化的推广，实际上硫化温度有向高、低两端延伸的趋势，而高温硫化，缩短了硫化时间，提高了生产效率。

硫化时间的确定要比硫化压力和硫化温度的确定更为复杂。

常用的硫化介质有：饱和蒸汽、过热蒸汽、过热水、热空气和其它固体介质（低熔点物质）及有机热介质。亦可采用电热和各种射线（红外线、紫外线或 γ-射线等）作硫化能源。

（2）橡胶制品的硫化收缩

橡胶制品自硫化温度逐渐降至室温后，制品与型腔之间会有尺寸差异，称为硫化收缩率。橡胶的硫化收缩率一般为 1.5%～3%。影响收缩率的主要因素有：橡胶品种、配合剂类型与用量以及硫化温度等工艺条件。

橡胶制品硬度与收缩率关系，可表述如表 1-4-3：

表 1-4-3 橡胶制品硬度与收缩率关系

橡胶硬度（邵尔 A）	45	55	65	75	85
橡胶制品硫化收缩率（%）	2	1.8	1.6	1.4	1.3

（3）橡胶硫化制品的最终修整

橡胶模型制品硫化时因受材料与工艺条件的影响，如材料结构、硫化时胶料的流动性、平板硫化机的

汽车论坛 http://www.qclt.com

压力或注压机的锁模力、模具结构和磨损状况等因素的变化。胶料会沿着模具的分型面溢出，形成不同厚度的溢流胶边，或称毛边、飞边，必须从橡胶硫化制品上修除。据统计，橡胶模型制品修边工序所消耗的劳动量，可达制品加工成形所需全部劳动量的38%。因此，最大限度地实现修边加工机械化自动化，提高修边后质量和修边效率，是十分必要的。

(4) 包装

用于汽车工业的橡胶制品，需满足大量流水生产的仓储分类要求。相当一部分内包骨架的橡胶制品，形位公差及防锈蚀性能一般要求较高，尤其要注意制品可靠包装。

1.4.1.2 汽车工业常用橡胶材料的性能及用途

橡胶性能最显著的特点是伸长率特别高，橡胶的使用温度在软化点之上，而一般塑料及纤维的软化点，却在其熔点之下，这也是与橡胶明显不同之处。此外，橡胶的粘弹性也是橡胶具有弹性的重要原因。橡胶高弹性的特点在于：弹性模量低、形变量大；弹性模量是温度与时间的函数；高弹性变形伴有热效应产生；橡胶形变需要时间；橡胶在发生高弹性形变时具有体积不变性。

橡胶的粘弹性在不同的状态下有不同的表现：静态时粘弹现象表现为蠕变或应力松弛，影响因素为：高聚物的结构、硫化程度、补强剂及骨架材料、增塑剂、温度、外力速度；动态时粘弹现象表现为橡胶在交变应力作用下，当变形很小，频率很高时，橡胶会表现出与静态不同的应力、应变、变形频率和温度。简而言之，橡胶在交变应力作用下，会出现滞后现象与力学损耗。

汽车工业常用的橡胶材料近15类，并介绍如下：

①天然橡胶（NR）——是一种结晶性橡胶，自补强性很大，经炭黑补强后，机械物理性能较好，耐寒、耐曲挠、透气性好，多次变形生热少，隔振性亦较好。天然橡胶耐碱性良好，但不耐浓硫酸。天然橡胶在非极性溶剂中膨胀，耐油、耐溶剂性都较差。天然橡胶在汽车工业上一般用作轮胎、传动带、输水胶管、输气软管和机械防振隔振零件。

②丁苯橡胶（SBR）——性能和天然橡胶相似，在光、热和氧的综合作用下，耐老化性能优于天然橡胶，耐臭氧性比天然橡胶差，抗拉、伸长、抗撕裂及耐寒性等都不如天然橡胶。由于丁苯橡胶价格较便宜，常作为天然橡胶的并用材料。主要用于轮胎、机械隔振垫、密封垫片、电绝缘制品、运输带、胶管和海绵制品。

③顺丁橡胶（BR）——顺丁橡胶在主体结构上与天然橡胶相似。弹性、耐候性及耐油性优于天然橡胶和丁苯橡胶。顺丁橡胶滞后生热和永久变形小。脆性温度较低。耐磨性优异，耐曲挠性好，易于填充油脂和炭黑，硫化时流动性好，但拉伸和撕裂强度比天然橡胶、丁苯橡胶低。湿态摩擦系数小，老化后易崩裂，加工时易脱辊，冷流动性大。顺丁橡胶用于轮胎胎面、胶带、胶管及其它要求耐磨、耐寒、高弹性、生热小和耐曲挠的工业制品。

④丁腈橡胶（NBR）——丁腈橡胶具有优异的耐油性，仅次于聚硫橡胶、丙烯酸酯橡胶和氟橡胶。随丙烯腈含量的变化，丁腈橡胶可分为丁腈-18、丁腈-26及丁腈-40等品种。丙烯腈含量愈高，耐油性愈好，但耐寒性愈差。丁腈含量愈高，耐油性愈好，但耐寒性愈差。丁腈橡胶的耐热性优于天然橡胶，丁苯橡胶。丁腈橡胶的气密性及耐水性较好，但它不耐臭氧，且不适宜作绝缘材料。丁腈橡胶常用于油封、O形圈等耐油密封件，输油胶管和耐油胶板等。

⑤氯丁橡胶（CR）——氯丁橡胶的物理性能和天然橡胶相似，但耐天候、耐热、耐油及耐溶剂性都优于天然橡胶。氯丁橡胶阻燃性极好，但是它在低温时变硬，贮存稳定性差，电绝缘性不好，密度大，且加工不易控制。氯丁橡胶用于要求耐老化的门窗密封条、电线电缆包覆层、轨枕垫、耐油印刷胶辊、耐油胶管、石油钻探用零件、耐化学药品的胶板、胶管等制品。

⑥丙烯酸酯橡胶（ACM）——耐高温氧化性和耐油性极好，在硫、磷、氯添加剂的润滑油中性能稳定。耐臭氧，气密性和耐曲挠性优良。但是耐寒性差，不耐水，不耐蒸汽及有机、无机酸和碱。在甲醇、乙二醇、酮、酯等水溶性溶液内严重膨胀。丙烯酸酯橡胶主要用于：工作温度高，丁腈橡胶不能满足要求，而使用硅、氟胶成本又太高的场合。如汽车发动机曲轴后油封，变速器及主传动油封，火花塞护套以

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-4 常用

橡 胶 类 别	相对密度	硬 度（邵尔 A）	门尼粘度 ML_{1+4},100℃	拉伸强度（MPa）	伸长率（%）
天然橡胶(NR)	0.93	20～100	45～150	6.89～27.56	100～700
异戊橡胶(IR)	0.94	20～100	55～90	6.89～27.56	100～750
丁苯橡胶(SBR)	0.94	40～100	30～70	6.89～24.12	100～700
顺丁橡胶(BR)	1.93	30～100	35～55	6.89～20.67	100～700
氯丁橡胶(CR)	1.23	20～90	45～120	6.89～27.56	100～700
丁基橡胶(IIR)	0.91～0.93	20～90	45～80	6.89～20.67	100～700
丁腈橡胶(NBR)	0.96～1.02	30～100	30～130	6.89～27.56	100～600
乙丙橡胶(EPM、EPDM)	0.85	30～100	40～100	6.89～20.67	100～300
硅橡胶(Q)	0.98	20～95	液状	3.45～10.34	50～800
氟橡胶(FPM)	1.4～1.95	60～90	35～160	6.89～16.54	100～350
聚氨酯橡胶(U)	0.85	62～95	25～60 或液状	6.89～55.12	100～700
酸硫橡胶(T)	1.34～1.41	20～80	25～60 或液状	3.45～8.61	100～400
聚丙烯酸酯橡胶(ACM)	1.10	40～100	45～60	6.89～15.16	100～400
氯磺化聚乙烯(CSM)	1.10	50～95	30～115	6.89～19.29	100～500
氯醇橡胶(CO、ECO)	1.27	60～90	60～70(均聚) 85～125(共聚)	6.89～17.23	100～400

汽车论坛 http://www.qclt.com

橡胶性能

使用温度范围(℃)	压缩永久变形	回弹性	电性能	撕裂强度	耐磨耗性	耐割口增长	耐水溶胀性	耐酸性	耐碱性	耐油性	耐燃料油	耐臭氧性	耐候性	与金属粘接
-75～90	良	优	优	优	优	优	优	良	良	差	差	差	中	优
-75～90	中	优	优	优	优	优	优	良	良	差	差	差	中	优
-60～100	良	良	中	中～良	优	良	良～优	良	良	差	差	中	中	优
-100～100	中	优	良	良	优	中	差	良	良	差	差	差	中	优
-60～120	良	优	良	良	优	良	良	良	良	良	中	良～优	优	优
-60～150	中	中	优	良	良	优	优	优	优	差～中	差	优	优	差
-50～120	良	良	差～中	良	优	良	优	良	良	优	良	中	差	优
-60～150	中	良	优	差	良	良	优	优	优	差	差	优	优	中
-120～280	优	良	优	中	中	中	优	中	中	中	差	优	优	优
50～300	优	中	良～优	中	良	中	良～优	优	中	优	优	优+	优	优
-60～80	优	优	中～良	优	优	良	中～良	中	中	优	优	优	优	优
-30～80	差	中	良	中	中	差	良～优	中	良	优	优	良	优	优
-30～180	良	良	差～中	中	良	良	差～中	中	差	优	良	优	优	良
-60～150	良	良	良	良	良	良	良～优	优	优	良	中	优+	优	优
60～150	中	良	中	良	良	优	良	良	良	良	良	良	良	优

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-5 橡胶

主要要求 / 补充要求	硬度	强度	抗撕	耐磨	耐寒	耐热
硬度		U,IR,SBR,CR	U,IR,CR	U,BR,CR	BR,Q,IR,CR,SBR,U	FPM,Q,ACM,EPDM,IIR,CR
强度	U,IR,SBR,CR		U,IR,CR	U,IR,IIR,SBR,CR	BR,IR,SBR,CR,U	FPM,EPDM,CR,EPM,IIR,CSM
抗撕	U,IR,CR	U,IR,CR		U,IR,CSM,CR	IR,CR,U,BR,SBR	FPM,IIR,CR CSM,EPDM
耐磨	U,BR,IR,SBR CR	U,IR,SBR,CR BR	U,IR,CR,CSM		BR,IR,CR,U,SBR	FPM,CSM,EPM,EPDM,ACM,CR,IIR
耐寒	IR,BR,SBR,CR	IR,BR,CR,SBR	IR,CR,U	BR,IR,U,SBR CR		Q,FPM[1] EPM EPDM,IIR,CSM,ACM[1]
耐热	FPM,ACM,EMP,EPDM,CSM,IIR,CR	EPDM,EPM,CR,FPM,CSM,IIR	CR,CSM,IIR,EPDM,EPM,FPM	EPDM,EPM,CR,CSM,FPM,ACM	Q,IIR,EPDM,EPM,CSM,CR	
耐油	U,FPM,CO,NBR,ACM,CR	U,NBR,CSM,CR,FPM,CO	U,CR,CSM,CO,NBR,FPM	U,CSM,CR,CO,FPM,ACM,NBR	Q-F,CR,U NBR[1],ACM[1],CO	FPM,Q-F,ACM,CO,NBR,CR
耐水	EPDM,EPM,IR,IIR,SBR,NBR,BR	EPDM,EPM,IR,SBR,NBR,IIR	IR,IIR,NBR,CSM,EPDM,EPM	IR,BR,EPM,EPDM,CSM,SBR	BR,IR,EPDM EPM,IIR,NBR,CSM	FPM[1],EPDM,EPM,IIR,NBR,CSM
气密	U,IIR,CO,IR,NBR,SBR	NBR,CR,IIR,FPM,CO,CSM	IR,CR,IIR,CO,NBR,CSM	U,BR,IR,CSM,CR,SBR	BR,IIR,CO,NBR[1],IR,CR	FPM,IIR,CO,ACM,EPDM,EPM,CSM
耐候耐臭氧	EPDM,EPM,U,CSM,IIR,CR	U,EPDM,EPM,CSM,IIR,CR	U,CR,IIR,EPM,EPDM,CSM	U,EPDM,CSM,CR	Q,EPDM,EPM,IIR,CR,CO,U	Q,FPM,ACM,EPDM,EPM,CSM,IIR
电绝缘	CR,SBR,EPDM,EPM,IIR,BR	IR,SBR,EPM,EPDM,IIR	IR,IIR,CSM,CR	IR,BR,SBR,EPDM,EPM	Q,BR,IR,SBR IIR,CR	Q,FPM,EPDM,EPM,IIR,CSM
耐辐射	U,IR,SBR,NBR	U,IR,SBR,NBR	U,IR,NBR	U,IR,NBR SBR	Q[1],IR,SBR,NBR[1]	Q[1],,EPDM,EPM,NBR,FPM
耐燃	CR,CSM,FPM,CO	CR,CSM,FPM,CO	CR,CSM,CO	CSM,CR,FPM	Q,CR,CO,CSM	FPM,CSM,CR,CO

注:①特殊牌号橡胶

类型选用表

耐 油	耐 水	气 密	耐候耐臭氧	电 绝 缘	耐 辐 射	耐 燃
U,FPM,NBR,ACM,CR CO	EPDM,EPR,IIR,FPM,NBR,IR,SBR	FPM,IIR,U,ACM,CO,IR	FPM,EPM,EPDM,CSM,U,ACM,IIR	IR,SBR,BR,IIR,EPDM,EPM,Q	U,IR,SBR,NBR	CR,CSM,FPM,CO
U,FPM,SBR,CO,ACM,CR	EPDM,EPM,IIR,NBR,IR,SBR	IIR,U,FPM,CO,IR,CR	IR,EPDM,EPM,CSM,IIR,FPM,CR	IR,SBR,EPM,EPDM,BR,IIR	U,IR,SBR,NBR	CR,CSM,EPM,CO
U,CSM,NBR,ACM,CR,FPM	IIR,EPDM,EPM,NBR,IR	IIR,CO,U,CR IR,FPM	U,CSM,CR,FPM,EPDM,EPM	IR,IIR,EPDM EPM,SBR,BR	U,IR,NBR	CR,CSM,CO
U,FPM,ACM CR,NBR,CSM	EPDM,EPM,IIR,NBR,BR,IR,SBR	FPM,U,BR,IR,CR,NBR	CSM,EPDM,EM,FPM,ACM,CR,U,	U,SBR,BR,EPDM,EPM,IIR	U,IR,SBR,NBR	CSM,CR,FPM
Q-F,U,CO,NBR①,ACM① CR	EPDM,EPM,IIR,NBR,BR,IR,SBR	IIR,CO,U,CR BR,IR	EPDM,EPM Q,U,CSM,IIR CR	IR,Q,BR,SBR IIR,EPDM,EPM,FPM,CSM	Q①,IR,SBR NBR①	Q,CR,CSM CO
Q-F,U,CO,NBR①,ACM① CR	EPDM,EPM,IIR,NBR,BR,IR,SBR	IIR,CO,U,CR BR,IR	EPDM,EPM FPM,Q,ACM IIR	Q,IIR EPDM,EPM,FPM,CSM	Q①,EPDM,EPM	Q,FPM,CSM CO,CR
	FPM,NBR,CR ACM,CSM	FPM,CO,U,ACM,NBR,CR	FPM,Q-F,U,CO,ACM,CSM	Q-F,FPM,CSM,NBR,CO	U,NBR	Q-F,FPM,CR,CSM
FPM,NBR,ACM,CSM		IIR,FPM,EPDM,EPM,NBR,IR,SBR	EPDM,EPM,FPM,IIR,CSM,ACM	IR,SBR,BR,IIR,EPDM,EPM	EPDM,EPM,NBR,IR,SBR	FPM,CSM
FPM,U,CO,ACM,NBR,CR	FPM,IIR,EPM EPDM,NBR,IR,SBR		FPM,ACM,U CO,EPDM,EPM,IIR	IR,SBR,IIR,BR,EPDM,EPM,FPM	U,IR,NBR,SBR,EPDM,EPM	FPM,CO,CR CSM
FPM,U,CO,Q-F,ACM,NBR	EPDM,EPM,FPM,ACM,IIR,CSM,NBR	IIR,FPM,CO U,ACM,CSM		Q,EPDM,EPM,IIR,FPM,CSM	U,EPDM,EPM,Q①	Q,FPM,CO CSM,CR
EPM,Q-F,CO,ACM,NBR,CSM	EPDM,EPM,IIR,IR,SBR,BR	IIR,FPM,IR,BR,SBR,EPDM,EPM	EPDM,EPM,IIR,Q,FPM,CSM		IR,SBR,Q① EPDM,EPM	Q,FPM,CSM CR,CO
U,NBR	EPDM,EPM,NBR,IR,SBR	U,NBR,IR,SBR,EPDM,EPM	U,Q②,EPDM,FPM	IR,SBR,Q①,EPM,EPDM		Q①
FPM,CO,CR,CSM	FPM,CSM,CR CO	FPM,CO,CR,CSM	FPM,CO,CSM,CR,	Q,FPM,CSM,CO	Q①	

汽车论坛 http://www.qclt.com

及需要耐臭氧、气密封、耐曲挠、耐日光老化的橡胶制品。

⑦聚氨基甲酸酯橡胶（PUR）——分为混炼型、浇注型、热塑型三类，通性是：拉伸强度高、伸长率大、弹性好、硬度范围宽、抗撕裂强度高、耐磨、耐热、耐低温、耐老化、耐臭氧及耐油。聚氨酯硫化胶的介电性能相当于天然胶，气密性相当于丁基胶，但是它易水解，在水蒸汽、热水、强酸碱中，也都有分解作用。聚氨酯橡胶滞后和生热大，只宜制作低速运转及薄制品，常用于制造实心轮胎、胶辊、胶带及联轴节等。

⑧聚硫橡胶（ET、EOT）——耐油、耐溶剂、耐天候、气密性和低温曲挠性都很好。它与其它材料有良好的粘接性，但是它在加入炭黑时易变韧，加入硫化剂后若辊筒冷却不当，会早期硫化，若硫化剂选用不当，制品在使用中会变色。聚硫橡胶用作汽车车身不干性腻子，汽车玻璃密封条，大型汽油槽衬里，耐油胶管，地下和水下电缆包覆层，各种耐油密封圈和薄膜制品。

⑨丁基橡胶（IIR）——气密性优异，耐热性、耐候性、减震及电性能都很好，耐酸碱和耐极性溶剂。但是丁基橡胶硫化速度慢，自粘性与互粘性差，由于相容性不好，补强填充母炼胶通常需热处理，才能提高硫化胶的物理机械性能。丁基橡胶常用于汽车内胎，高压或中压电线电缆绝缘胶，蒸汽胶管，减震制品，硫化水胎、胶布、衬里和密封条等。

⑩乙丙橡胶（EPDM）——抗臭氧性、耐天候性和耐热老化性优异，居通常橡胶之首。电绝缘性、耐化学性、冲击弹性都很好，耐酸碱，密度小，可进行高填充配合。但硫化速度很慢，难于同其它橡胶并用。它的自粘性和互粘性很差，不易粘合，给加工带来很大困难。乙丙橡胶用于汽车轮胎胎侧、内胎、汽车门窗密封条、水箱胶管、风扇带、耐热运输带、各种胶布、橡皮船、高低压电线电缆、电气绝缘零件等。

⑪硅橡胶（Q）——热稳定性很高、高低温下具有良好的弹性，耐臭氧，耐紫外线，耐天候，电绝缘性优良，硅橡胶表面疏水性、透气性高，防霉性良好，特种硅橡胶具有耐油、耐辐射、阻燃等性能，但是硅橡胶在常温下抗张强度低、不耐撕裂、耐磨性差。通用型硅橡胶还存在压缩永久变形大、耐油性差，耐酸碱亦较差，且价格较贵。为弥补通用型硅橡胶的不足，常见的还有氟硅橡胶、腈硅橡胶、苯基硅橡胶与硼硅橡胶等品种。硅橡胶适宜在高低温下使用的下述零件：特殊要求的油封、O形圈、活门、减振器、膜片、仪表及电器密封件，可控硅管的外壳，电机定子线圈绝缘，制冷系统密封圈，接触燃气的密封圈，供氧系统密封圈，隔膜、活门，食品机械输送管带，烘箱和锅炉的密封、热收缩管。室温硫化硅橡胶还用于仪表行业浇注精密模具。

⑫氟橡胶（FPM）——氟橡胶品种很多，含氟烯烃共聚物应用最广，产量最大，其中以氟-26消耗量最大。氟橡胶耐热、耐酸碱、耐油、耐过热水与蒸汽，压缩永久变形小，气密性较好，且耐天候、耐臭氧、燃烧自熄。但是氟橡胶的耐寒性差，电绝缘性不好，需要二段硫化，收缩率大，价格昂贵。氟橡胶用于制作耐高温、耐油、耐高真空及耐多种化学药品的油封、O形圈、浸渍板、薄膜、垫片、胶管、腻子、电线电缆、涂料、胶辊、胶带和多种衬里。也可用作玻璃、金属、弹性体及织物的粘结剂。

⑬氯磺化聚乙烯橡胶（CSM）——抗臭氧，耐候、耐磨、耐化学药品、耐低温及耐燃。但不耐芳香族溶剂、压缩永久变形大、低温弹性差。氯磺化聚乙烯可用作汽车衬垫、胶管、胶带、金属与非金属的保护层、制造各种胶布和电线电缆保护层。

⑭异戊橡胶（IR）——异戊橡胶回弹性特优，抗撕裂、耐磨、抗裂口增大、耐水溶胀及电绝缘性能等均属优良，较耐酸碱，与金属粘接性良好，耐候性居中，但是耐油、耐臭氧较差。与天然橡胶的性能几乎完全一样。

⑮氯醇橡胶（CO、ECO）——与金属粘接性及抗裂口增长均属优良，回弹性、撕裂强度、耐磨、耐水溶胀、耐酸碱、耐油、耐臭氧、耐天候等性能居中。

常用橡胶类型及其性能见表1-4-4。

橡胶类型选用表见表1-4-5。

ASTM D 2000/SAE J 200汽车用橡胶材料的分类系统20种橡胶胶料代号的主要特性及用途见表1-4-6。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-6 20种橡胶材料代号的主要特性及用途

材料代号	胶 种	一般工作温度(℃)	基本特性	主要用途
AA	天然、再生、丁苯、丁基、顺丁、乙丙、异戊橡胶	-40~70	较好的强伸、弹性、低温、耐磨以及耐泥水、油污、酒精、甘油	减震、缓冲、防尘、膜片、密封、衬垫、制动液制品
AK	聚硫橡胶	40~70、100	优良的耐油、溶剂性、良好的耐酸碱、天候老化、绝缘、低温曲挠性	耐油、酸碱制品、腻子
BA	丁苯、丁基、乙丙橡胶	-55、-40~100	较好的耐酸、碱、水、低温性	耐酸碱、制动液、水蒸汽制品、护罩、膜片
BC	氯丁、氯化聚乙烯橡胶	-55、-40~100	较好的耐候、热、油、酸、碱、燃、粘着性，较好的综合性能	耐大气环境、耐油、酸碱制品，与织物金属粘着制品
BE	氯丁、氯化聚乙烯橡胶	-55、-40~100	同上。压缩变形较好	同上。密封制品
BF	丁腈橡胶	-55、-40~100	良好的耐油性，较好的综合性能	耐油和乳化液制品，密封制品、防尘罩、圈
BG	聚氨酯、丁腈橡胶	-55、-40、-35~100	良好的耐油、耐磨、弹性、吸声性	耐油、耐磨、密封制品，涂层
BK	聚硫、丁腈橡胶	-80~100、125	优良的耐油、溶剂性，良好的耐酸碱、绝缘、天候性	耐油制品、密封制品、腻子
CA	乙丙橡胶	-55、-40~125	优良的耐臭氧、天候、化学性，良好的绝缘、耐老化、耐制动液，粘着性差	板、条、管、密封制品 耐制动液制品
CE	氯磺化聚乙烯、氯化聚乙烯橡胶	-55、-40~125	优良的耐候性，良好的耐磨、耐热、低温、酸、碱、电绝缘性、耐燃性、可着色	衬垫、护套、板、涂层、管、带、密封制品、浅色制品
CH	氯醇、丁腈橡胶	-40、-35、-18~125	良好的耐油、气密性、致冷剂，较好的低温动态性能	耐油、密封制品、膜片、轴、阀、垫、管
DA	乙丙橡胶	-55、-40~150	良好的耐高低温性、耐酸、碱、水、醇、酯性，较好的耐油性	密封制品、板、管、制动液、水蒸汽制品
DE	氯化聚乙烯、氯磺化聚乙烯橡胶	-40、-35~125、150	优良的耐天候，良好的耐酸、碱、电绝缘、耐燃、耐磨性，较好的耐油性	衬垫、护套、板、管、带、涂层、密封制品
DF	聚丙烯酸酯橡胶	-25、-18~150	良好的耐高温、较好的耐油(包括含硫的油)，耐磨性、耐寒较差	耐油、耐热、密封、板、囊、护套制品
DH	聚丙烯酸酯橡胶	-18、10~150、175	耐高温较优、良好的耐油性。压缩变形较好、耐寒差	耐热、耐油(双曲线齿轮油)、脂、密封、板囊、护套制品
FC	苯基硅橡胶	-75~200、225	优良的耐高温、低温、老化、臭氧、电绝缘、生理惰性、气密性、有较高强度、可着色	耐高温、低温、绝缘、生理制品、衬垫、板、管
FE	苯基硅橡胶	55~200、225	优良的耐高低温、老化、电绝缘、生理惰性、气透性，可着色、有一定的耐油性	同上。耐润滑脂、醇类制品
FK	氟硅橡胶	-55~225	良好的高低温、耐油性、柔韧性、可着色	耐高低温、油、膜片、腻子、密封制品
GE	乙烯基硅橡胶	-55~225、250	优良的高低温性、一定的耐油性、可着色	基本同上，耐酯、醇类制品
HK	氟橡胶	-40、-25~250	优良的耐高温、耐油性、化学性、耐燃性、高真空、压缩变形较好	耐高温、耐油、耐腐蚀、真空制品、板、管、密封制品

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.4.1.3 橡胶的配方

橡胶配方是反映胶料的成分及量的关系。橡胶制品根据使用情况，都有一定的技术要求。要使制品符合技术要求并在加工过程中有良好的工艺性能，正确地选择生胶及橡胶配合剂和确定用量，对橡胶制品的影响较大。

1）工业生产中胶料配方制定的原则

a. 掌握所有配合剂及生胶的特性及其相互间的影响；

b. 要保证胶料符合性能要求，并在不影响成品质量的条件下，尽量节约生胶，采用价廉的配合剂以降低成本；

c. 设备及生产时操作条件不同，对配方的要求也不同，如使用不同的硫化设备或硫化介质时，会改变硫化胶料的受热，胶料配方中的促进剂用量或种类，都要作相应的改变。

2）胶料配方的表示方法

胶料配方有四种表示方法：

a. 以生胶质量为 100 份的表示法；

b. 以胶料中生胶和其它配合剂的含量百分数来表示；

c. 以生胶和其它配合剂的体积百分数来表示；

d. 以炼胶机的容量为基础的表示法。

上述四种方法中，通常采用生胶质量为 100 份的胶料配方表示法。四种胶料配方的各种表示方法，举例如表 1-4-7：

表 1-4-7 四 种 胶 料 配 方

胶料组成 \ 用量	以生胶为 100 份质量	质量百分数	体积百分数	实际使用配方按炼胶机容量计算
生 胶	100	63.49	77.22	96.50
硫 黄	2.75	1.74	0.99	2.60
促进剂 M	0.75	0.48	0.38	0.70
氧化锌	5.00	3.17	0.65	4.73
硬脂酸	3.00	1.91	2.25	2.90
防老剂	1.00	0.62	0.61	0.93
瓦斯炭黑	45.00	28.59	17.90	43.00
总 量	157.50	100	100	151.00

3）橡胶制品的配合剂

橡胶中加入各种配合剂，经硫化后会更好地改善橡胶物理机械性能。橡胶的配合剂种类很多，大体上可分为：硫化剂、硫化促进剂、防老剂、填充剂、软化剂及着色剂等。

硫化剂——使橡胶由线型结构变为体型结构、使生胶塑性降低，变为弹性体。

常见的硫化剂有：硫黄、金属氧化物（氧化锌、氧化镁等）、过氧化物（如过氧化二苯甲酰）、重氮化合物、硝基化合物等。

促进剂——使硫化剂活化，从而加速硫化速度。

促进剂有二类：无机的与有机的促进剂。无机的促进剂有：氧化镁、氧化铅与碳酸钙等；有机的促进剂有：二硫化氨基甲酸盐、黄原酸盐、秋兰姆、胍类、噻唑类及醛胺缩合物等。常用的促进剂如：促进剂 M（硫醇基苯噻唑）、促进剂 DM（二硫化二苯基噻唑）、促进剂 TMTD（二硫化四甲基秋兰姆）、促进剂 DIBS（N，N-二异丙基噻唑次磺酰胺）、促进剂 NA-22（亚乙基硫脲）、促进剂 ZBX（丁基黄原酸锌）、促进剂 H（六甲基四胺）及促进剂 CE（环己基苯并噻唑次磺酰胺）等。

活化剂——几乎所有的有机促进剂，都要使用活化剂才能显著地表现出促进剂的性能。一般所用的活化剂多为金属氧化物，最常用的是氧化锌。

防老剂——防老剂能延缓生胶氧化，延长橡胶制品的使用期。

防老剂有二类：化学与物理防老剂。化学防老剂有：防老剂 4010（N-苯基 N′-环己烷基对苯二胺）、

汽车论坛 http://www.qclt.com

防老剂 A（N-苯基-α-萘胺）、防老剂 BLE（二苯胺-丙酮缩合物）、防老剂 D（N-苯基-β-萘胺）及防老剂 NBC（N，N-二丁基二硫代氨基甲酸镍）；物理防老剂有：石蜡、地蜡。以其薄膜防护橡胶。

填充剂 ——使橡胶的机械性能得到提高或改变胶料性能。

填充剂有二类：活性与非活性填充剂，活性填充剂如：炭黑、陶土、氧化锌；非活性填充剂如：碳酸钙、硫酸钡等。

软化剂——使橡胶分子膨胀软化，减少分子间摩擦，增加橡胶可塑性；使生胶润湿配合剂并将其均匀地分散于生胶中。橡胶软化剂的品种很多，常用的有：机械油、锭子油、变压器油、重柴油、石蜡、凡士林、橡胶沥青、煤焦油、固体古马隆、硬脂酸、邻苯二甲酸二丁酯及癸二酸二辛酯。

其它配合剂——根据橡胶制品使用的特殊要求，而加入的一些其它配合剂，常见的有：发泡剂、阻燃剂、染色剂、防焦剂、分散剂及湿润剂等。

1.4.1.4 热塑性弹性体（TPE）

热塑性弹性体，顾名思义它即可以像热塑性塑料那样成形加工，又具有橡胶一样的弹性，所以在汽车上的应用日趋增加。



图 1-4-4 热塑性弹性体与硫化橡胶分子结构模型

TPE 是由两个相组成，即硬相（树脂相）和软相（橡胶相）。这两个相是化学结合状态，而加硫橡胶则是以硫为主的化学结合。TPE 的树脂相部分是物理结合、是起着交联作用的。TPE 与硫化橡胶的分子结构比较见图 1-4-4。

TPE 开发于 1958 年，最早的 TPE 有苯乙烯系（TPS）、聚氨酯系（TPU）、聚氯乙烯系（TPVC），后来出现了烯烃系（TPO）、聚酯系（TPEE）及二烯类的双链加氢的苯乙烯-乙烯-丁二烯系（SEBS），最近又开发出聚酰胺（TPAE）、含氟系列及动态硫化聚烯烃等新型热塑性弹性体。

TPE 可以用来做汽车的密封件、各种圈垫、罩套及减摩耐磨零件。从减轻重量、减化加工工艺和可回收再利用角度来看，它有着代替传统硫化橡胶的趋势，但是，它的耐热性差的致命缺点也不容忽视，在选用时要予以注意。（撰稿人：刘运长）

1.4.2 塑 料

塑料是树脂为基本原料，在一定的温度和压力下，可塑制成一定的形状、且在常温下保持形状不变的材料。塑料种类很多，一般根据树脂受热特性，分为热塑性塑料和热固性塑料两大类；根据塑料在工业上的用途不同分为通用塑料、工程塑料、功能塑料。热塑性塑料是指在一定温度范围内可以软化乃至熔融流动，冷却后又能固化成一定形状的塑料；热固性塑料是指树脂在加热过程中发生化学反应，由线形高分子变成体形高分子结构，此后遇热不再熔融，也不溶于有机溶剂，如果加热温度过高，只能炭化。通用塑料是指产量大、价格低、应用范围广的塑料，一般只能作为非结构材料使用；工程塑料是指可以作为结构材料，能在较广的温度范围内承受机械应力和较为苛刻的化学物理环境中使用的材料，产量较小，价格较高；功能塑料是指人们用于特种环境的具有特种功能的塑料，如医用塑料、光敏塑料等。

塑料在汽车上的应用范围涉及汽车的内饰件、外装件、功能件，例如：保险杠、转向盘、散热器格栅、仪表板、燃油箱等。

表 1-4-8 列出塑料的一般分类及用途，表 1-4-9 列出汽车常

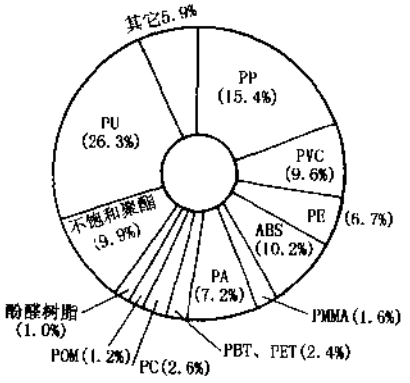


图 1-4-5 汽车用塑料比例（美国）

用塑料的特性，塑料在汽车上应用的比例见图 1-4-5。

下面将对汽车用主要塑料的制造方法、特性及应用进行介绍。

表 1-4-8 塑料的分类及在汽车上的应用

分类		塑料		用途
热塑性（树脂）塑料	通用塑料	PP		柱类、汽车内饰件、仪表板、仪表箱壳、保险杠、燃油箱容器
		PVC		造革、表皮类、仪表板表皮、造型材料
		PE		各种副油箱、空气管道、隔断衬里、顶棚、门内垫、行李箱内衬
		ABS		散热器格栅、仪表板、保险杠、立柱、散热孔类、灯盒
		PMMA		灯盖件、仪表壳盖
	工程塑料	PA		车门外把手、座椅带机件、容器类、油箱类、齿轮、散热器零件、油底壳
		PC		信号灯罩、风扇叶、缓冲件、外门把手
		PBT 玻纤增强 PET		配电器零件、电插座件、雨刮器、后座（仪表）板、前挡泥板（缓冲器）
		POM		门把手、开关类、雨刮器、轴承制品、座、垫带扣制品
		改性 PPO		仪表罩、扬声器格栅、装饰件
		PPS		点火系统件、汽油箱、电气端子、分电器零件、散热器零件
		PSU		熔断器、信号灯壳盖
		聚芳酯		灯类制品
热固性塑料		PF		发动机系统、电器系统、驱动系统、摩擦制动片、盘式衬片
		PY(不饱和聚酯)	SMC	前端板、保险杠、扰流板、灯罩、发动机罩、格栅、箱罩
		PU	发泡体	遮阳板、车门内衬、座垫、悬臂架、保险杠
			弹性体	保护罩、后缓冲橡胶

1.4.2.1 通用型热塑性塑料

1）聚丙烯（PP）

聚丙烯是由丙烯聚合而得的结晶性高分子化合物，分子结构式为$+CH_2-\underset{\underset{CH_3}{|}}{CH}+_n$，分子量 10～50 万，由于丙烯聚合时使用的催化剂不同，制得聚丙烯的分子结构也不同，按甲基在空间的排列方式不同，形成三种不同立体结构的聚丙烯：等规、间规和无规。等规聚丙烯具有高结晶度（60%左右）、高韧性和高熔点等特点；无规聚丙烯像未硫化的橡胶，其熔点、硬度及刚性都较低、分子排列缺乏规整性，不能结晶；间规聚丙烯介于等规与无规之间，目前所产的聚丙烯中 95%都是等规聚丙烯。

聚丙烯典型的生产方法是采用齐格勒—纳塔催化剂的溶剂悬浮聚合法，图 1-4-6 是制造过程的工艺流程图，此种生产方法的缺点是聚合后的分离、回收等工艺复杂。

上述是传统的生产方法，现在各厂家已经向采用简化的生产方法——气相法方向转移，气相法（见图 1-4-7）是采用以固体为载体的高效催化剂，将丙烯以气体形式导入聚合釜进行聚合，这种方法降低催化剂的消耗，另外可以不用溶剂，省去了繁琐的分离工艺，简化了工艺流程，降低了成本。

聚丙烯是通用塑料中用量最大、应用范围最广的一种，属于线性高结晶性聚合物，密度小（0.89～0.91g/cm^3）是塑料中最轻的品种之一。聚丙烯的耐热性优于聚乙烯，熔点 164℃，可在 100～120℃下长期使用。聚丙烯还具有优良的耐腐蚀性、电绝缘性。它的力学性能，包括抗拉强度、压缩强度、硬度等均比低压聚乙烯高，而且还有很突出的刚性和耐折叠性。聚丙烯加工成形容易，可采用注塑、挤出、吹塑等

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-9 各种塑料的特性

塑料名称	物理的性质							力学性能						价格(日元/kg)(1989年)
	熔点(℃)	热变形温度(℃)		玻璃化温度(℃)	相对密度	吸水率(%)	线膨胀系数(1×10^{-5}/℃)	成形收缩率(%)	抗拉		弯曲		冲击强度(J/m)	表面硬度	
		1.82(MPa)	0.46(MPa)						强度(MPa)	伸长率(%)	弹性模量(GPa)	强度(MPa)			
PP	170	57～70	96～110		−0.9(1.13)	<0.01	～11(3～5)	1.7	30～40(70)	200～700(11)	0.9～1.5(4.3)	55(45)	30～70(160)	K85～110	200～230
PVC(硬)	−	54～79	57～82	77	1.4～1.5	0.1～0.4	5～19	0.1～0.5	35～60	2～40	2.8	70～120	20～1050	(ショアー)D70～90	150～160
HDPE	132	43～50	60～82	120	0.94～0.97	<0.01	10～12	1.4	20～40	1000	1～2.9	10～30	100	(ショアー)D60～70	190～220
ABS塑料	−	90～115	98～125	−	1.02～1.06	0.2～0.4	6～10(2.8)	0.3～0.8	30～60(120)	5～60(3)	2～2.9(7.8)	40～90(160)	60～300(70)	K98～115(H125)	430～450
PMMA(注射用)	−	74～99	80～107	72～105	1.17～1.20	0.1～0.4	3～9	0.1～0.8	50～80	2～10	2.7～3.2	90～120	20～30	M85～105	480～500
尼龙6	215～225	65～79	149～185	−65 45	1.14(1.37)	1.3～2.9	8(2～3)	1～2(0.1～0.8)	70(80)	～200(14)	2.7(8)	70～100(180)	60(120)	R114～119	690～730
尼龙66	255～265	66～86	182～185	−65 50	1.14	1.1～1.5	10	0.8～1.5	60～80	60～300	1.3～2.9	40～130	40～110	R108～120	770～810
PC	220～230	129～138	141	150	1.20	0.16	7～8	0.5～0.7	61	200	2.4	100	150～300	M77	900～1000
PBT	225	55～71(210)	154～163(215～228)	−	1.31(1.52)	0.1	9.2	1～2(0.4)	～55(132)	360(4)	9.1	91	50～90(80)	R118	700～750
PET	256	76(235)	−	70	1.47(1.6)	(0.1)	10	0.2～2(0.8)	44(120)	350(3～4)	(8.8～9.8)	(210)	(100～130)	(R120)	−
POM(均聚)	175	124	170	−50	1.42	0.2	12.2	2～2.5	70	15～65	2.8～3.1	97	80～110	R120	650～700
POM(共聚)	165	110	158	−60	1.41	0.2	7～13	2.0	61	60	2.5	98	65	R115	650～700

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

塑料名称	物理的性质								力学性能						价格（日元/kg）（1989年）
	熔点（℃）	热变形温度（℃）		玻璃化温度（℃）	相对密度	吸水率（%）	线膨胀系数（1×10^{-5}/℃）	成形收缩率（%）	抗拉		弯曲		冲击强度（J/m）	表面硬度	
		1.82（MPa）	0.46（MPa）						强度（MPa）	伸长率（%）	弹性模量（GPa）	强度（MPa）			
改性PPO	–	90～130（140）		–	1.06（1.28）	0.14（0.14）	6（2.5）	0.5～0.7（0.1～0.3）	61（120）	55（5）	2.2（6.5）	93（130）	200（100）	R119	650～710
PPS(40%玻纤增强)		>260	–	–	1.64	0.1	0.4～2.2	0.2	130～110	1.3	16.9	285	40～80	R123	–
PSF	–	175（185）	181（190）	190	1.24（1.45）	0.2（0.2）	5.5（2.5）	0.7（0.2）	71（130）	60（2）	2.7（9.8）	137（160）	70（100）	M69	–
聚芳酯		175	–	193	1.21	0.2～0.3	6.1	0.8	72	65	1.9	80	200～300	R125	–
PF(玻纤增强)	–	167～333	–	–	1.69～1.95	0.03～1.2	0.8～1.6	0～0.4	35～130	0.2	13.7～22.6	70～420	–	E54～101	380～430
(SMC)	–	208～278			1.65～2.6	0.1～0.2	1.5～3	0.1～0.4	55～140	1.7	6.9～15.7	70～250	–	50～70（バーコール）	300～340
PS	240	97～122	100～133	85	1.06	0.03	7～10	0.2～0.6	40～50（83）	2～3	～2.8（6.3）	80～100	15～30	H65～75	210～230
AS树脂	–	94～122	–	–	1.08（1.30）	0.2～0.4（0.3）	6～8（2.5）	0.2～0.7（0.1～0.4）	70～80（120）	2～3（2.7）	～3.7（7.6）	100～140（160）	16～40（65）	M75～90	320～340
聚醚砜	–	203（216）	210	230	1.37（1.60）	0.4（0.3）	5.5	0.6（0.2）	85（140）	60（3）	2.5（8.2）	130	86（81）	R120	–
聚醚醚酮	334	152	–	143	1.30（1.52）	0.5	4.6（1.9）	1.1（0.2）	97（173）	80（4.4）	3.7（11.3）	140（230）	–	M98	–
PI聚酰亚胺	-	（>300）	–	240～250	1.40	0.3	5.0	–	92～180	4～10	3.1～4.2	42～100	20～50	R100	–

注：（）内指30%玻纤增强材料。

汽车论坛 http://www.qclt.com

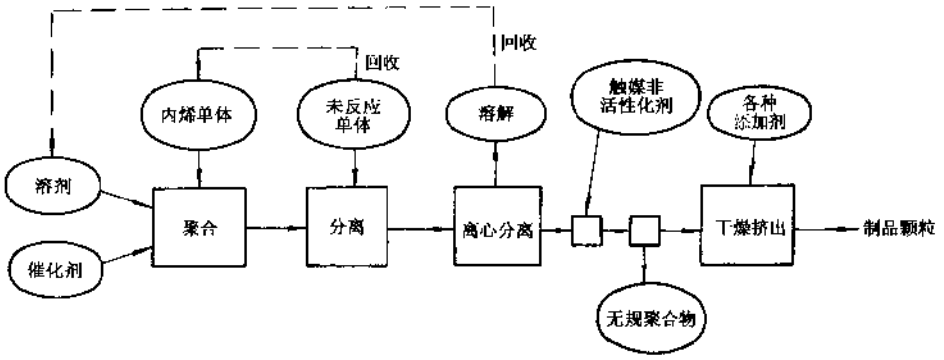


图 1-4-6 PP 溶剂悬浮聚合法工艺流程图

成形方法生产所需的制品。

聚丙烯急待克服的缺点是：成形收缩率大、低温易脆裂、耐磨性不足、热变形温度不高、耐光性差、不易染色等。为了克服这一缺点，通常采用添加抗氧剂和紫外线吸收剂的方法，提高聚丙烯的耐老化性能，采用与乙烯共聚的方法，在不损害刚性的情况下提高聚丙烯的冲击强度，从而使之在汽车上的应用更为广泛。

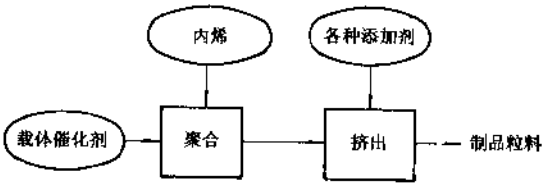


图 1-4-7 PP 气相聚合工艺

聚丙烯在汽车上的用量每辆车达 10～20kg，零件品种可达几十种，主要是车身内装件、通风取暖系统配件、发动机有关配件以及外装件。根据制品在汽车上安装的部位，对制品材料提出不同要求，一般要求材料具有耐热、耐冲击、耐老化、刚性高，因此指标确定后就可选择某一牌号的聚丙烯材料。

聚丙烯材料分类见表 1-4-10。

表 1-4-10 聚丙烯材料分类

序号	材料等级	特点及适用范围
1	均聚物	丙烯均聚物，一般成形用
2	共聚物	乙烯、丙烯共聚物，适用于低温耐冲击制品
3	GF 增强	20%～40%玻璃纤维增强改性，适用于耐热而刚性又好的结构件
4	填充型(1)	20%～30%滑石粉等和 1%～10%乙丙橡胶均匀改性，适用于高冲击和有一定刚性零部件
5	填充型(2)	20%～40%滑石粉、云母、碳酸钙等改性，适用于耐热性零件
6	填充型(3)	5%～19%滑石粉、云母、碳酸钙等改性，适用于一般零部件
7	耐高冲击型	用乙丙或三元乙丙橡胶等添加剂改性，适用于耐高冲击性零部件
8	阻燃型	添加阻燃剂，适用于要求阻燃的零部件

聚丙烯材料性能见表 1-4-11。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-11 聚丙烯材料性能

项目 / 单位 / 分类	拉伸屈服强度	断裂伸长率	挠曲模量	冲击强度	热变形温度
	(MPa)	(%)	(MPa)	(kJ/m)	(℃)
均聚 PP	32	800	1 550	2.0	115
共聚 PP	24	600	1 400	15	100
GF 增强	60	3	3 000	10	120
填充型（1）	20	60	2 000～3 300	20	115
填充型（2）	22	3	2 300	3	120
填充型（3）	22	3	1 800	3	100
耐高冲击型	11	300	800	25	85

由于汽车对塑料制品的要求比民用产品高，普通聚丙烯塑料已远远满足不了汽车上的使用要求，因此近年来改性聚丙烯材料的开发和应用发展很快，通过共混对聚丙烯改性可以获得显著成效，例如聚丙烯与乙-丙共聚物、聚异丁烯、聚丁二烯等共混均可改善其低温脆裂性，提高冲击强度；聚丙烯与尼龙共混不仅增加韧性，而且使耐磨性、耐热性、染色性获得改善；聚丙烯与乙烯-醋酸乙烯共聚物共混在提高冲击强度的同时，改进了加工性、印刷性、耐应力开裂性。改性聚丙烯在汽车上应用很成功的产品就是保险杠。目前中、低档轻型客车及轿车绝大部分使用三元乙丙橡胶改性聚丙烯材料注射成形的保险杠。

2）聚氯乙烯（PVC）

聚氯乙烯（PVC）由氯乙烯聚合制得，其分子式可表示为$\left[-CH_2-\overset{\overset{Cl}{|}}{C}H-\right]_n$，分子量 3 万～10 万。聚氯乙烯可通过四种聚合方法制得，即悬浮法、乳液法、本体法和溶液法。

聚氯乙烯的生产以悬浮聚合法为主，图 1-4-8 是制造工艺流程，其产量约占 PVC 总产量的 85%，国内则占 95%。由于悬浮聚合法比乳液聚合法少了分离工序，所以在价格上占优势，而且聚合时不含皂类凝固剂，所以电绝缘性、热稳定性、树脂色调质量也优越很多。乳液聚合时，采用不同的分散剂能制得颗粒结构不同的两种聚氯乙烯树脂；一种是紧密型树脂，其颗粒表面光滑，内部无孔，呈实心球状结构，另一种是疏松型树脂，颗粒表面粗糙，内部疏松多孔，疏松型树脂易于塑化，吸油性好，浸润性好，成形时间短，制品性能较优。

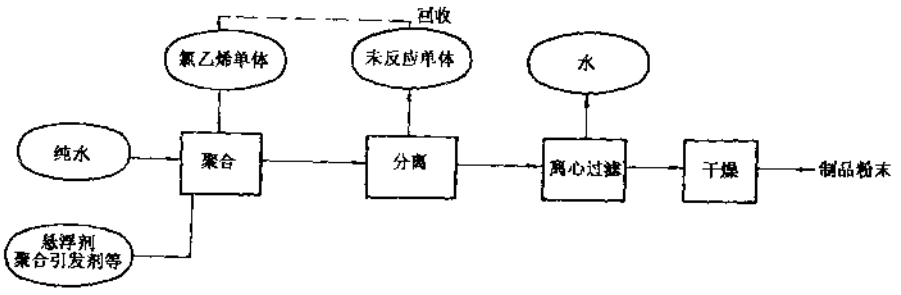


图 1-4-8 PVC 的悬浮聚合工艺

乳液聚合是我国最早使用的生产方法，它的特点是单体分散好，可制出 0.2～5μm 的 PVC 细粒，因而特别适用于制造 PVC 糊、人造革等，缺点是树脂杂质较多，电性能较差，应用范围不如悬浮法 PVC。

汽车论坛 http://www.qclt.com

本体法虽有纯度高，热稳定性好、透明及易吸增塑剂等优点，但合成工艺较难掌握，故产量很少。溶液法 PVC 由于成本高，仅适合直接用作油漆涂料，我国尚未生产。

聚氯乙烯是一种多组分塑料，按不同用途可以加入不同的添加剂，随着组成的不同，聚氯乙烯制品可呈现不同的物理机械性能，例如添加增塑剂可以降低 PVC 的熔融温度和熔体粘度，并可以通过增塑剂添加比例来获得不同软、硬程度的 PVC 产物，稳定剂的加入使 PVC 在成形加工过程及使用过程中不易老化，润滑剂则在加工中起润滑减少摩擦热及使制品表面光滑的作用。

聚氯乙烯塑料的力学性能取决于聚合物的分子量、增塑剂及填料含量，聚合物分子量越大，力学性能、耐寒性、热稳定性提高，但成形加工困难，分子量低则相反。原则上填料含量增加，抗拉强度降低。未加增塑剂的聚氯乙烯塑料是硬质塑料，加入增塑剂后即变软，其柔软程度随添加量的增加而增大。一般通常以增塑剂含量来区分软硬塑料，含量 0～5 份（以 100 份聚氯乙烯计）的为硬质塑料，含量 15～25 份为半硬质塑料，含量 25 份以上为软质塑料；加增塑剂后，柔软性、伸长率、耐寒性增加，玻璃化温度、脆性、硬度、抗拉强度等均降低。

聚氯乙烯具有耐化学性、阻燃自熄、耐磨、隔声减震、强度较高、电绝缘性较好、价廉来源广等优点，但它的主要缺点是热稳定性差，受热引起不同程度的降解；对软质材料还有增塑剂外迁之弊，对应变敏感，变形后不能完全复原，且在低温下变硬。聚氯乙烯性能见表 1-4-12。

表 1-4-12 PVC 性 能

性 能	硬 质	软 质
物理性能		
密度	1.35～1.45	1.16～1.35
透明性	半透明到不透明	
吸水率（%，24h，3.18mm厚）	0.07～0.40	0.15～0.75
机械强度		
抗拉强度（MPa）	34.3～61.7	10.3～24.0
伸长率（%）	2.0～40	200～450
拉伸弹性模量（GPa）	2.4～4.1	–
压缩强度（MPa）	54.9～89.2	6.17～11.66
弯曲屈服强度（MPa）	68.6～109	–
Izod 有缺口冲击强度（J/m）	21～1040	随增塑剂含量而变
肖氏硬度	65～85D	50～100A
热性能		
导热系数［W/（m·K）］	0.13～0.29	0.13～0.17
比热［$\times 10^3$J/（kg·K）］	0.84～1.17	1.26～2.09
热膨胀系数（10^{-5}/℃）	5.0～18.5	7.0～25
连续耐热温度（℃）	65.6～157.2	65.6～157.2
热变形温度（℃）1.8MPa	54.4～157.2	
0.45MPa	117.2～162.2	–
燃烧速率（mm/min）	自熄	慢燃到自燃
电性能		
体积电阻（Ω·cm）		
50%RH，23℃	$>10^{16}$	10^{11}～10^{15}
介电强度（kV/mm）		
厚 3.18mm，短时间	17～51	12～39
介电常数 60Hz	3.2～3.6	5.0～9.0
1kHz	3.0～3.3	4.0～8.0
1MHz	2.8～3.1	3.3～4.5
介质损耗角正切 60Hz	0.007～0.020	0.08～0.15
1kHz	0.009～0.017	0.07～0.16
1MHz	0.006～0.019	0.04～0.14
耐电弧 s	60～80	

聚氯乙烯是在汽车上应用较早的塑料品种之一，一般每辆车用量 2～10kg，主要用做汽车仪表板表

汽车论坛 http://www.qclt.com

皮、地板隔热垫、座垫套、车门装饰条、转向盘、车门内衬、操纵杆盖板、踏板胶垫等。

由于聚氯乙烯的热稳定性差，一般加入稳定剂才能保证制品性能稳定，对于不同的制品还需加入紫外线吸收剂、填充剂、润滑剂、颜料等助剂，以改善聚氯乙烯制品的使用性能，满足汽车的需要。

3）聚乙烯（PE）

聚乙烯（PE）是最重要的通用塑料之一，产量居各种塑料之首位，分子式为$+CH_2—CH_2+_n$，可以用多种方法生产，由于工艺路线和条件的不同，所制得聚乙烯的分子结构（支化度）、分子量、密度、结晶度均有所区别，相应的物理性能也不同。

高压法生产聚乙烯是以氧为引发剂，在200℃、150～200MPa压力下通过自由基聚合反应制得。在此条件下，乙烯聚合易发生链转移反应，导致大分子链支化而且分子量较低，由于支化度高，支链较长，高压法聚乙烯密度低，故又称为低密度聚乙烯（LDPE）。

低压法聚乙烯是使乙烯在常压或稍高于常压下，通过配位阴离子催化剂，于烷烃溶剂中聚合得到的，链转移反应少，因而产物分子基本无支链，且分子量较高、密度高，故低压法聚乙烯称为高密度聚乙烯（HDPE）。

70年代以来新开发的线型低密度聚乙烯（LLDPE）是乙烯与α-烯烃的共聚物，因含共聚单体α-烯烃，所以分子结构虽基本为线型，却有许多短小而规整的支链，其支链数取决于共聚单体的比例。

以上三类聚乙烯的结构示意图见图1-4-9。

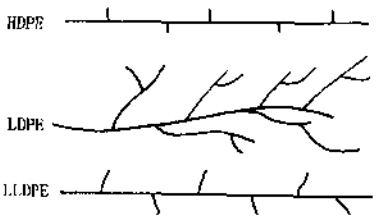


图1-4-9 HDPE、LDPE和LLDPE分子结构示意图

另外，还有一类超高分子量聚乙烯（UHMWPE），它可用低压法、淤浆法和气相法生产，其分子量一般为200万～400万，分子结构与HDPE相同，密度略低于HDPE，介于0.936～0.964g/cm³之间，它的机械强度远远高于低压聚乙烯，并具有优异的抗环境应力开裂性和抗高温蠕变性，还有极佳的消音、高耐磨等特性。

总的来看，HDPE比LDPE具有较高的硬度、拉伸强度、软化温度和较优良的耐化学药品性，而断裂伸长率和缺口冲击强度低于LDPE。LLDPE的大多数性能介于HDPE与LDPE之间。聚乙烯性能见表1-4-13。

表1-4-13 聚乙烯性能

性能		ASTM测试法	低密度	中密度	高密度	高密度
					熔融指数>1	熔融指数为0
物理特性	密度（$\times10^3$kg/m³）	D-792	0.910～0.925	0.926～0.940	0.941～0.965	0.945
	平均分子量		约3×10^5	约2×10^5	约1.25×10^5	$(1.5\sim2.5)\times10^6$
	折光率n_D^{25}		1.51	1.52	1.54	–
	透明性		半透明	半透明	不透明	–
	透气速率（相对值）		1	1/3	1/3	–
	日光影响		变暗	变黄	变黄	–
机械性能	伸长率（%）	D-638	90～800	50～600	15～100	–
	硬度（R）	A785	D41～46	D50～60	D60～70	R55
	Izod带缺口冲击强度（J/m）	D-256	>846.7	26.5～846.7	79.4～1058	1058
	冲击强度（kJ/m²）	D-1822	370.4	123.5	123.5	2058
	拉伸弹性模量（GPa）	D-638	0.12～0.25	0.18～0.38	0.41～1.10	0.69
	抗拉强度（MPa）	D-638	6.86～15.8	8.23～24.0	21.27～37.7	37.04

续上表

性能		ASTM测试法	低密度	中密度	高密度 熔融指数>1	高密度 熔融指数为0
热性能	连续耐热温度(℃)		82.2～100	104～121	121	–
	热变形温度 0.45MPa(℃)	D 648	37.7～49.4	48.9～73.9	60～82.2	72.7
	结晶熔点(℃)		108～126	126～135	126～136	135
	脆化温度(℃)	D 746	80～－55	–	< 140～－100	<－137
	熔融指数 [g/10min]	D 1238	0.2～30	0.1～4.0	0.1～4.0	0
	燃烧速率	D－635	很慢	很慢	很慢	很慢
	热膨胀系数 (×10⁻⁵/℃)		16～18	14～16	11～13	7.2
电性能	耐电弧性(s)	D－495	135～160	200～235	–	–
	介电常数 60～100(Hz)	D 150	2.25～2.35	2.25～2.35	2.30～2.35	2.34
	介电常数 10⁶(Hz)	D 257	2.25～2.35	2.25～2.35	2.3～2.35	2.30
	体积电阻(Ω·cm)		>10¹⁶	>10¹⁶	>10¹⁶	>10¹⁶
	50%RH,23℃ 介质损耗角正切(tanδ)	D－150				
	60～100(Hz)		<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0003
	10⁶(Hz)		<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0002
化学性能	酸 弱酸影响		耐	很耐	很耐	–
	强酸影响		受含氧酸侵蚀	受含氧酸侵蚀较慢	受含氧酸侵蚀较慢	–
	碱 弱碱影响		耐	很耐	很耐	–
	强碱影响		耐	很耐	很耐	–
	有机溶剂影响		耐（<60℃）	耐（<60℃）	耐（<80℃）	–

聚乙烯综合性能优良，成本低，原料来源丰富，为了进一步扩大应用领域，下述缺点有待改进：

①软化点低。HDPE熔点约为130℃，LDPE熔点仅稍高于100℃，因此聚乙烯的使用温度通常低于100℃，若承受载荷，使用温度则更低。

②强度不高。聚乙烯拉伸强度一般小于30MPa，大大低于PA6、PA66、POM、PC等工程塑料。

③耐大气老化性能差。聚乙烯在日光照射下易为紫外线破坏，影响使用寿命。

④对烃类溶剂和燃料油阻隔性不足。

⑤某些品种，如LLDPE、UHMWPE的加工性差。

此外，聚乙烯还有易应力开裂、不易染色等缺点。

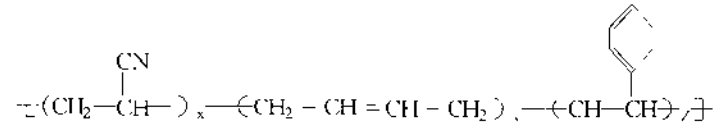
聚乙烯在汽车上的用量每辆车达2～7kg，仅次于PVC、ABS、PP、PUR，居第五位，主要用于制造汽车空气导管、燃油箱和各种储罐等，例如：空气导管、制动液储罐、清洗液罐、挡泥板、衬板、行李箱隔板。近年来欧洲一些车型纷纷采用塑料燃油箱，主要用超高分子量聚乙烯制造，要求耐蠕变、耐应力开裂、耐热、耐大气老化、耐溶剂及化学药品等。

4）丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（ABS）

汽车论坛 http://www.qclt.com

ABS树脂是目前产量最大，应用最广泛的聚合物共混物。它将PS、PBR和PAN的各种性能有机地统一起来，不仅具有韧、硬、刚相均衡的优良性能，而且具有较好的耐化学药品性、尺寸稳定性、表面光泽度、耐低温特性、着色性和加工流动性好等优点。

ABS虽然通常被认为是丙烯腈、丁二烯和苯乙烯二元共聚物，并以下列结构式表示：



但实际上ABS是一类复杂的聚合物共混体系，它由接枝共聚物苯乙烯与丙烯腈的无规共聚物以及未接枝的游离聚丁二烯三种主要成分构成，随着ABS生产技术的发展，由于所用原料的种类、比例、工艺条件、生产方法的多样化，ABS树脂的实际组成千差万别，变动极大。

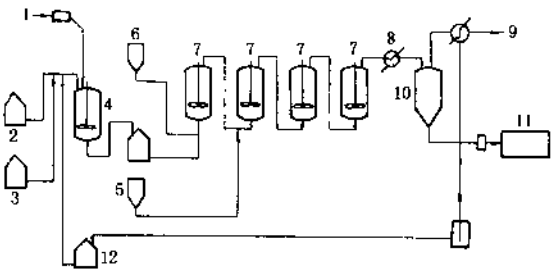


图1-4-10 ABS树脂的连续本体生产工艺

1-橡胶（经粉碎）；2-丙烯腈单体；3-苯乙烯单体；4-橡胶溶解槽；5-链转移剂；6-引发剂；7-聚合反应釜；8-预热器；9-真空系统；10-脱挥槽；11-成品ABS树脂；12-回收溶剂

图1-4-10示出了ABS树脂的连续本体生产工艺。90年代ABS树脂的生产技术将向连续本体法倾斜。连续本体方法的工艺简单，容易操作灵活性大。由于不使用乳化剂等反应助剂，产品质量高，环境污染少。工艺过程为：在混合釜中，将本体法或悬浮法AS树脂的惰性溶剂（如乙苯）溶液与丁二烯单体混合，使丁二烯单体均匀分散于基体树脂中，将此混合溶液连续打入聚合釜中进行本体聚合，生成的橡胶状材料分散于AS树脂中，聚合反应结束后脱除易挥发分。

尽管ABS树脂的综合性能良好，但也存在着透明度差、耐候性不足、难耐高温和不阻燃等缺点。为此，以分子设计原理为依据，通过调整原料的组合与比例，改善生产工艺条件或优化形态结构等措施，已开发了一系列与ABS相似的共混物，可惯称为新型ABS树脂，主要有：

①高抗冲ABS树脂。

②透明ABS树脂：在树脂相中引入MMA，降低ABS的折光率，使之与橡胶相接近，即可得到透明的ABS树脂。主要的透明ABS品种有MBS、MABS和MCS等。

MBS——甲基丙烯酸甲酯、丁二烯、苯乙烯的接枝共聚-共混物称为MBS树脂，透光率90%，比ABS耐紫外线。

MABS——由甲基丙烯酸甲酯、苯乙烯和丙烯腈的共聚物与聚丁二烯接枝橡胶机械混炼而得，此种共混物透光率达85%，其它性能与ABS相近。

③耐候ABS树脂：ABS树脂的丁二烯橡胶组合含有残留的不饱和双键，在光、氧作用下容易老化，若采用不含双键或少含双键橡胶代替顺丁橡胶，即可制得耐候ABS树脂。

ASA树脂——是以丙烯酸酯类橡胶为接枝骨架，将丙烯腈，苯乙烯接枝共聚-共混制备的，与ABS相比，ASA耐候性和耐紫外光性能都有很大提高（约10倍），而抗冲性能下降较少，该树脂在室外曝露9～15月后，冲击强度和伸长率几乎没有变化，使用温度范围比较宽。

ACS树脂——由丙烯腈、苯乙烯和CPE橡胶三种组分构成，耐候性优于ABS树脂，因含有CPE而呈难燃性，耐酸碱腐蚀性略优于ABS。

AES树脂——它含有乙烯、丙烯、苯乙烯和丙烯腈四种组分，耐候性比ABS高4～8倍，热稳定性优于ABS，力学强度与ABS相当。

由于ABS树脂含有侧苯基、氰基和不饱和双键，它与许多聚合物都有比较好的相容性，因此可以通过共混改性，提高ABS的冲击强度、耐热性、耐化学腐蚀性，赋予阻燃性和抗静电性、降低成本，例如

汽车论坛 http://www.qclt.com

ABS与PVC共混、ABS与PC共混、ABS与热塑性聚氨酯共混、ABS与PA共混等，都可不同程度地提高ABS的某一性能，并已得到广泛应用。

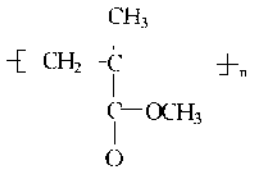
目前ABS在汽车上的用量每辆车达8～12kg，是汽车上用量较多的塑料品种之一，主要是车身内饰件、外装件，例如：杂物箱、副仪表板、散热器格栅、暖风机壳、保险杠装饰条等。ABS性能见表1-4-14。

表1-4-14 ABS材料分类及性能

项目 / 单位 / 分类	拉伸强度 (MPa)	断裂伸长率 (%)	弯曲弹性模量 (MPa)	悬臂梁冲击强度 (J/m)	热变形温度 1.82MPa (℃)	热变形温度 0.45MPa (℃)
超高冲击型	35	15	1400	160	76	83
高冲击型	35	17	1500	120	80	87
中冲击型	46	10	1800	60	81	88
高刚性型	53	10	2100	30	82	90
耐热型	45	10	2000	60	92	99
中等耐冲击、耐热型	38	10	1800	120	80	85
中等耐冲击、耐高温型	36	5	1800	80	90	95
高温下耐高冲击型	36	5	1800	50	100	105
耐高温、高冲击型	38	5	2000	40	105	110
耐高冲击、中等耐热	32	15	1400	220	83	

5）聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）

聚甲基丙烯酸甲酯又称有机玻璃，是丙烯酸类树脂的酯类衍生物，也是丙烯酸塑料中产量最大，用途最广的品种。聚甲基丙烯酸甲酯简称PMMA，是典型的线型聚合物，分子式为：



分子量50万～100万，工业上主要用本体聚合法和悬浮聚合法生产。丙烯酸酯类树脂的发展已有百余年历史，直到1932年才真正制得硬质透明有机玻璃，并用作飞机舱盖、仪表罩、安全玻璃等。

有机玻璃是以甲基丙烯酸甲酯为原料，在平整而光洁的硅玻璃模或者金属模内浇铸聚合而成，它是塑料中透明度最好的一种材料，其透光性比硅玻璃好，透光率95%，加速老化240h后毫无改变，在室外使用10年后仅降至89%，密度1.19g/cm^3，PMMA的机械强度中等，最大的缺点是表面硬度低，容易被硬物擦伤生痕。在玻璃化温度以下进行定向拉伸，可大大提高其冲击强度。它的抗拉强度和韧性大于硅玻璃10倍以上，具有一定的抗裂性和弹性、耐候性好，在温度－50～80℃间其冲击强度几乎保持不变。它的电性能极为优良，良好的耐电弧性和不漏电性使它适用于制作高压电流断路器，在潮湿情况下，对电性能影响较小，酸、碱对它有一定的腐蚀性。

由于PMMA具有许多优越的特性，目前它已在各种汽车上使用，一般每辆车用量在2kg左右，主要用作窗玻璃、罩盖、仪表玻璃、油标、油环、灯罩、标牌等。（撰稿人：陈丽萍）

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.4.2.2 工程塑料

1）尼龙（PA）

尼龙的学名是聚酰胺，40年代由美国人发明，最初是当做合成纤维来应用。做为塑料则始于1941年。

由于制造时所使用的原料分子不同，制品可以有尼龙6、66、610、612、54、68、548、11和12等诸多品种。此外，还可以通过共聚合法派生出更多等级及具有不同性能的新品牌。尼龙属于线型结晶性塑料，具有较高弹性模量、耐冲击韧性、减摩耐磨性、良好的耐化学稳定性及耐油性等优点。但是，由于树脂分子结构中有亲水的胺基存在，所以尼龙的吸水性较强，吸水后会引起制品尺寸变化及机械强度（除冲击强度）降低。

图1-4-11示出尼龙6的制造工艺流程。尼龙6是由ε-己内酰胺的开链聚合而制成，聚合度一般为120～220左右，通常是通过添加水的用量来调节聚合体系排出水的量或使用聚合度调节剂等方法进而对其进行控制。

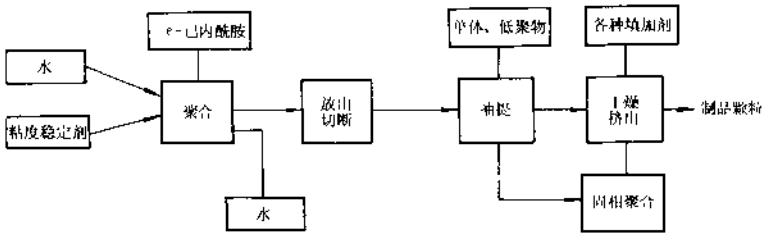


图1-4-11 尼龙6的制造工艺流程

图1-4-12示出尼龙66的生产工艺流程，它是由己二胺与己二酸以等克分子比例先制出尼龙盐再脱水并聚合而成。

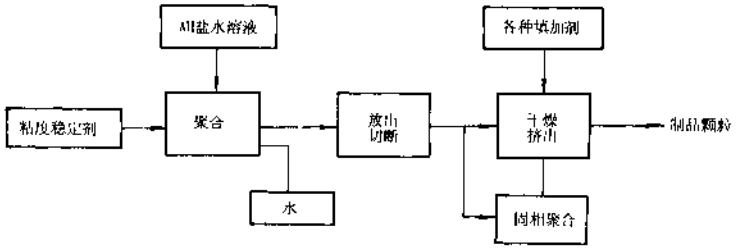


图1-4-12 尼龙66的制造工艺流程

以上所介绍的均为间歇法制造尼龙工艺，此外还有不间断提供原料并不断产出聚合物的连续聚合生产工艺，生产效率更高。

注射成形级尼龙，除其本身具有的等级划分外，还可以通过配合各种填料进行改性，制造出具有不同特性的尼龙新牌号。常用的填料有玻璃纤维、各种矿物粉，目的在于提高材料的力学性能、物理性能及电性能，也可以添加聚四氟乙烯树脂粉、二硫化钼粉、石墨粉、碳纤维及润滑油等以提高其自润滑性及耐磨性。

尼龙的另一条改性途径是合金化，如PA/PPO合金；可以提高材料的耐热变形温度，PA/EPDM合金则可以进一步提高材料的弹性和耐热性，PA/ABS可以提高制品的尺寸稳定性。特别是PA/PPE合金材料，是采用分散聚烯烃改性方法进一步提高其冲击韧性，缺口冲击强度可以成倍的增加。此外，还可以通

汽车论坛 http://www.qclt.com

过合金化来降低尼龙的吸水性、改善流动性以满足薄壁大型零件的加工需要。

在汽车工业中，尼龙6、66、610、11及12使用的较多，特别是尼龙66的应用最独占鳌头。因为它熔点高、耐热性好、综合性能优秀。尼龙6、66用做汽车零件举例见表1-4-15。尼龙11和12的具体应用举例见表1-4-16。

在选用尼龙材料时，要注意尽量不要使其与酚类、高浓度无机酸及甲酸等化学药品接触，另外，还要注意纯尼龙易受紫外线照射而老化这一现象。

尼龙6、66、610、11、12的主要性能见表1-4-17。增强尼龙6、66的性能见表1-4-18。

尼龙具有较低的熔融粘度，成形时能够快速流动，很好的充模。但是，尼龙也存在着熔点范围比较窄、熔体热稳定性差而且容易分解及成形收缩率大的缺点，所以在成形加工时要严格控制料温、模温及其它工艺参数。

表1-4-15 尼龙6、66用做汽车零件举例

种类	机械零件	电气用品等	车身零件
未增强尼龙	机油滤清器 制动液贮罐 动力转向液罐 空滤器芯件	电线接头件 卡扣 电线卡箍 熔断丝盒 速度表齿轮、轴承保持架	车门把手 座椅头枕导杆 遮阳板托架 座椅安全带零件
增强尼龙	空滤器进气管 发动机气门罩盖 油底盘 正时齿轮链罩 散热器水室 水泵壳、转向盘 立柱锁壳、空调机零件、进气歧管	刮水器齿轮 前照灯壳 雾灯壳 车轮毂防尘盖 自动调解座椅 框架及零件	燃油标尺罩盖 后牌照框袋 空调通风窗 保险杠缓冲件 吸风口嘴 内饰件卡扣

表1-4-16 尼龙11、12应用举例

发动机部分	空调机、制动系统	发动机部分	空调机、制动系统
主燃油管路 发动机管路	油压离合器管 冷气管路 气控管路	真空管 燃油箱安全管	车门调整用管 气制动管路

表1-4-17 尼龙6、66、610、11、12主要性能

项目 \ 种类	尼龙6	尼龙66	尼龙610	尼龙11	尼龙12
相对密度	1.13	1.14	1.08	1.02	1.04
熔点（℃）	215	250	210	178	185
吸水率（24h）（%）	10.5	9.5	3.5	1.50	1.85
弹性模量（MPa）	27×10^3	3.2×10^3	2.3×10^3	1.8×10^3	2.0×10^3
缺口冲击强度（J/m）	90	45～90	54	90	81
热变形温度（负荷1.86MPa）（℃）	50	60	54	51	55
耐寒温度（℃）	-10～-25	0～-15	-20	-70	60

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-18 玻璃纤维增强尼龙 6、66 性能

项目 \ 牌号	尼龙 6 45%GF	尼龙 66 30%GF	项目 \ 牌号	尼龙 6 45%GF	尼龙 66 30%GF
抗拉强度（MPa）	133	130	硬度（洛氏 R）	115	113
伸长率（%）	5	5	热变形温度（℃）	182	~230
弯曲强度（MPa）	160	190	（负荷 0.186MPa）		
缺口冲击强度（J/m）	230	130	吸水率（%）	1.9	1.8

成形加工前，必须对尼龙进行严格的干燥处理，有条件时最好进行真空干燥。干燥条件为：真空度要在 94.7kPa 以上，温度为 90～110℃，物料料层厚度应不大于 25mm，干燥时间为 8～12h。如果是普通干燥箱时，干燥温度降至 80～90℃，但干燥时间要延长。

注射成形的成形温度应视尼龙牌号而定，通常料筒温度在 210～315℃之间调节，喷嘴温度为 210～300℃左右，模具温度不得低于 40℃，但一般不得高于 100℃。注射压力在 50～210MPa 范围内。

尼龙除了注射成形外，还可以挤出、吹塑、烧结、浇铸成形。

尼龙做为涂料在汽车上用途日趋广泛，通常是将尼龙粉末在电场中喷涂，使其带电并附着在被涂物体上，再经加热熔融成为涂层。具有无污染、附着性好、耐磨性好、耐化学药品性好等特点。

由于尼龙很容易吸水，所以为了得到稳定的制品外形尺寸，往往要对制品进行后处理，其中包括热处理和调湿处理。前者是将尼龙制品放入水、流体蜡或油中，在高于使用温度 10～20℃情况下进行，处理数小时后缓慢冷却即达到目的。后者是在水中或盐水中煮沸数小时后水洗并干燥即可完成。

2）聚碳酸酯（PC）

聚碳酸酯始创于 1956 年，由德国拜耳公司推出。它属于非结晶性、透明性好的塑料，具有较高的抗冲击性、抗拉性及耐热性，可以在 130～135℃下长期工作。它还兼有优良的尺寸稳定性、电绝缘性和阻燃性，使之在汽车上得到广泛应用。但是，耐化学药品性、加工性、耐擦伤性稍差，选用时应予以注意。

聚碳酸酯的主要原料是双酚-A、碳酸二苯酯和烧碱催化剂，采用光气法或酯交换法进行合成。

聚碳酸酯的代表制造方法——光气界面聚合法的具体工艺过程见图 1-4-13。

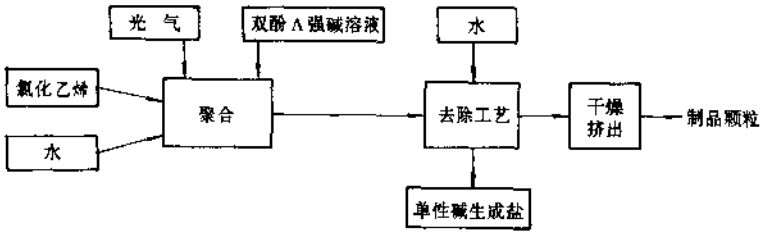


图 1-4-13 聚碳酸酯的制造工艺

化学反应是在 30℃常压下进行，反应速度可通过光气用量及胺系相间催化剂移动的方法进行调节，聚合度则采用苯酚系的分子末端终止剂来控制，即使分子量高达 2 万～15 万的树脂也可以制造成功。

此外，制造方法中还有溶剂法，是用苯基碳酸盐通过酯交换反应再熔融聚合。以上两种方法各有长短，如：光气法制得的产品性能优良、品种繁多，而溶剂法聚合则可以省去回收工序，所以，成本较低。目前，两种方法同时并存，而且，间歇法与连续法也共存。

聚碳酸酯在汽车上大量使用是最近 10 年的事情。主要用于电气、照明系统。此外，暖风机风扇叶、仪表盘、暖风通风格栅、分电器壳，甚至一些高档轿车的一体型主副保险杠也采用聚碳酸酯制造。预计，今后在挡风玻璃、门窗玻璃的应用领域会不断扩大。代表性材料的主要性能见表 1-4-19。

表 1-4-19 代表性聚碳酸酯主要性能

项 目 / 材 料	相对密度	吸水率（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	弯曲弹性模量（MPa）	缺口冲击强度（J/m）	热变形温度（0.186MPa）（℃）
未增强	1.20	0.15	63	110	2.3×10^3	90	135
GF30%增强	1.43	0.11	130	5.5	7.0×10^3	19	148

聚碳酸酯可以通过添加玻璃纤维或有机、无机填料进行改性。此外，还可以与其它塑料进行合金化改性。如：PC/ABS合金材料目的在于改善其融体流动性及材料的抗冲击性。PC/PBT、PC/PET合金材料目的在于提高其耐有机溶剂性及韧性；PC/TPE合金可以提高材料的抗冲击性、阻燃性及耐老化性。

在聚碳酸酯的新品种中，还可以将芳香族二羟酸成分引入到分子中，使其热变形温度、抗低温冲击强度、耐化学药品性均有大幅度提高。

尽管聚碳酸酯有着诸多优点，但它也存在着耐碱、胺、酮及芳烃性差的缺点，特别是在很多有机溶剂或蒸汽中溶胀并导致应力开裂，所以，最好不要在沸水中长期使用。聚碳酸酯虽不像尼龙那样极容易吸水，但吸水率仍很高，所以成形加工之前应充分干燥。干燥条件与尼龙相似。

聚碳酸酯的熔融物粘度很高，流动性较差，这给成形加工带来一定困难。注射成形时，注射机料筒温度通常控制在250～320℃；注射压力为50～80MPa，模具温度控制在85～120℃左右。由于聚碳酸酯容易粘模，所以往往要对模腔内壁涂敷脱模剂，常用的脱模剂有硬脂酸或有机硅油的5%苯溶液。

如果制品有金属嵌件时，成形前一定要对嵌件进行预热，否则容易在嵌件周围产生应力开裂，预热温度通常为200℃左右。为了消除制品的残余应力，往往要对制品进行退火处理，例如在100～130℃下加热，时间为1～2h/mm壁厚为宜。

聚碳酸酯也可以挤出成形，挤出温度为230～350℃之间。挤出时，要注意制品绝对不能直接空气冷却，必须在90℃的热水中冷却。

聚碳酸酯还可以吹塑、粘合及焊接加工。

3）热塑性聚酯塑料（PBT、PET）

聚酯塑料属于结晶性工程塑料，结晶度为35%～45%。它们具有力学性能好、耐热性好、耐疲劳性好、耐摩擦磨损、尺寸稳定、耐化学药品性、良好的电绝缘性和加工性等诸多优点。

聚对苯二酸丁二醇酯（PBT）和聚对苯二酸乙二醇酯（PET）几乎都是采用熔融缩聚法制造工艺。聚对苯二酸丁二醇酯的基本生产工艺过程见图1-4-14。

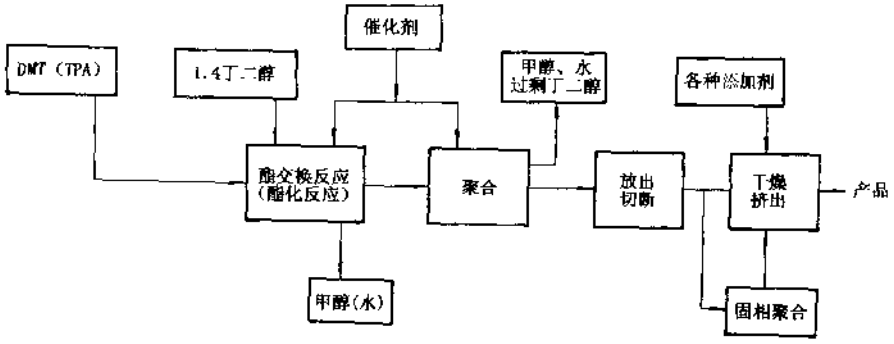


图1-4-14 聚对苯二酸丁二酯的制造工艺

实际生产中，还分为以对苯二甲酸二甲酯（DMT）进行酯交换和以对苯二甲酸直接酯化两种方法。前种方法的副产物是甲醇，后者则是水。所以两种方法的回收工艺略有不同。此外，所使用的催化剂也不

汽车论坛 http://www.qclt.com

同，分别是酞酸酯类及脂酸酯类。

制造聚对苯二酸乙二醇酯时，所需的聚合温度要高于PBT，虽然所使用催化剂是氧化锑系，但制造工程装置与PBT大致相似。

在汽车上，用途广泛的是聚苯二甲酸丁二醇酯，具体应用举例见表1-4-20。材料的主要性能列于表1-4-21。

PBT的改性方法包括玻璃纤维增强及合金化等。填加30%玻璃纤维的材料性能参见表1-4-18。在合金化材料中如：PBT/PC，改性目的在于提高材料的耐有机溶剂性，PBT/ABS合金材料，目的在于提高材料融体的流动性、耐冲击性及制品的外观质量，而PBT/PET合金材料，目的在于提高其耐热性及弯曲变形性。

表1-4-20 PBT在汽车上应用举例

用途部位	用例	要求特性
发动机电气部分	点火装置零件、接线端子、自动控置传感器、调节器、交流发电机零件等	1. 耐热，电绝缘 2. 传感敏感性要可靠
发动机结构件	变速器零件、排放阀盖、燃料混合装置等	1. 轻量、小型化 2. 耐热、耐化学药品性、强度
车身电器零件	电路插座、开关件、小型电机、熔断丝盒、前照灯反射镜	1. 可靠性、电性能及耐热性 2. 尺寸稳定性
车身结构零件	刮水器、除霜装置零件、车门把手、锁扣、安全带座、通风格栅、通风口、外装饰件等	1. 密度小 2. 机械强度高、耐热性好 3. 可以随金属件涂装

表1-4-21 PBT的主要性能

项目 / 类型	相对密度	吸水率(%)	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	弯曲强度(MPa)	弯曲弹性模量(MPa)	缺口冲击强度(J/m)	热变形温度(℃)
未增强	1.31	0.1	55	>200	81	2.4×10^3	45	60
玻璃纤维增强	1.52	0.07	135	5.5	200	8.0×10^3	90	215

PET的耐热性比PBT还要好，经常使用温度为150～155℃，耐疲劳性好是它的突出特点。PET的性能列于表1-4-22。

表1-4-22 PET的主要性能

项目 / 类型	相对密度	吸水率(%)	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	弯曲强度(MPa)	弯曲弹性模量(MPa)	缺口冲击强度(J/m)	热变形温度(℃)
未增强	1.34	0.1	55～65	50～300	80～97	$(2.4\sim2.9)\times10^3$	30	70
玻璃纤维增强	1.56	0.1	162	2～7	236	9.1×10^3	100	224

若要聚酯材料能在汽车上更广泛应用，必须使之具有更高的冲击强度、更高的刚性、良好的阻燃性和尺寸稳定性，此外，最重要的是耐热性，因为装配聚酯零件的汽车能够通过160℃的涂装烘烤线是每个汽车厂家所追求的目标。

汽车论坛 http://www.qclt.com

注射级 PBT 和 PET（包括增强材料）材料在成形时，因为其结晶化速度比较慢，所以必须适当提高模具温度，成形前的充分干燥工艺也必不可少，否则会出现制品性能降低和外观不佳等异常现象。

PBT 的成形温度为 250～270℃左右，而 PET 为 260～300℃，模具温度分别为 38～60℃及 85～100℃，注射压力控制在 60～90MPa 时为适宜。聚酯存在着容易热分解的缺点，在成形加工时应予以注意。

4）聚甲醛（POM）

聚甲醛是高结晶性塑料，具有原材料丰富、综合机械性能好、使用温度范围广、减摩耐磨等优点，特别是抗蠕变性、耐化学药品性、耐疲劳性等尤为突出。但是，因为是高结晶性分子结构，所以存在粘接性差、成形收缩率大、耐老化性较差等缺点。按聚合方法，聚甲醛分为均聚和共聚两大类，均聚甲醛力学性能好，而共聚甲醛的热稳定性及成形加工性优于前者。

均聚甲醛是在胺类催化剂存在下，将甲醛进行阴离子聚合而成，制造工艺示于图 1-4-15。

制造过程中，有必要对聚合物的不稳定末端羟基进行保护，通常是采用无水醋酸（醋酐）予以乙酰化处理。

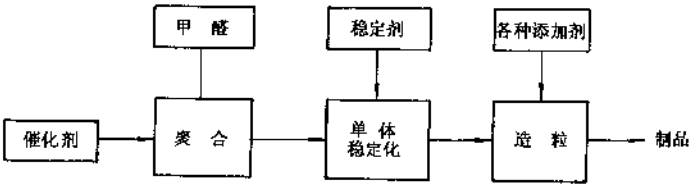


图 1-4-15 均聚甲醛的制造工艺

共聚甲醛是以三氧杂环己烷为原料与乙烯氧化物在三氟化硼系催化剂存在下进行阳离子聚合而制成。因为反应过程中，残留催化剂可以引起产品热稳定性的降低，所以要以胺类化合物予以除去，更进一步也可以采用碱分解法使聚合物分子中的末端变得更稳定。

值得注意的是，聚甲醛极容易燃烧，所以使用过程中要特别当心。

聚甲醛在汽车上的应用日趋广泛，主要应用实例见表 1-4-23。

典型的聚甲醛性能见表 1-4-24。

聚甲醛可以通过含油、添加聚四氟乙烯粉或与钢背复合的方法进一步降低摩擦系数、磨耗并提高抗蠕变能力。

表 1-4-23 聚甲醛在汽车上的应用例

用例 / 系统	应 用 实 例
结构件	机油罐盖、制动液检验阀门、散热器放水阀、水泵叶轮、燃油泵、自动制动泵体、燃油控制阀、化油器零件（空气吸口、缓冲筒、喉管、浮子）、各种排气控制阀、加速踏板衬套、悬臂联轴节、转向连杆止推垫、转向灯有关零部件等
电气零件	速度表计量用齿轮及传动齿轮、悬臂开关件（悬臂、按钮、本体）、照明开关、组合指示灯开关件、挡风玻璃清洗器各种零件、小型电动机零件、车门灯开关、刮水器零部件、各种开关滑动板
外装饰件	外门把手、外把手装饰、后视镜支架
内装饰件	遮阳板托架及夹持器、车门玻璃升降器调整手柄、车门内把手、车门锁零件、车内后视镜支撑件
其 它	暖风风扇叶、暖风控制手柄、空调器真空控制阀、油管、转向节衬套、转向器零件等

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-24 典型聚甲醛主要性能

项目 / 类型	相对密度	吸水率 24h（%）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	弯曲强度（MPa）	弯曲弹性模量（MPa）	缺口冲击强度（J/m）	热变形温度（℃）
均聚甲醛	1.42	0.20	72	25	110	3.2×10^3	70	124
共聚甲醛	1.41	0.22	62	60	98	2.6×10^3	65	110
25%GF 增强共聚甲醛	1.61	0.29	130	3	197	7.7×10^3	86	163

聚甲醛具有以下特点：

①聚甲醛结晶度高达 75%～80%，它是一种高结晶性聚合物；

②熔点为 175℃左右，加工温度范围为 200～205℃，凝固温度为 160℃，凝固速度很快，所以很容易产生应力；

③成形收缩率较大，为 2%～3%左右；

④聚甲醛容易热分解，所以物料在料筒中不能长时间停留。

根据以上特点，聚甲醛的成形条件应是：料筒温度控制在 177～215℃，成形压力为 70～176MPa，模具温度为 60～90℃，如果是薄壁件，模温有时可高达 100～120℃。事实证明，高温模具可以改善制品的尺寸稳定性和外观，特别适宜于有退火处理工艺的场合。

聚甲醛不大适合长期在水中工作，因为长时间容易使水锈沉淀在制品表面上，增加其摩擦力。

聚甲醛的退火工艺条件与尼龙相似，如可在高于最高使用温度 20～30℃下处理 1～2h 后缓慢冷却即可。

5）聚苯醚（PPO 或 PPE）

聚苯醚全称为聚二甲基苯醚或聚苯撑氧。它是 1965 年才被开发的新型非结晶性塑料，耐热性好是其突出特点。聚苯醚的使用温度范围为－170～190℃之间，可以在 120℃下长期工作。此外，还具有高刚性和韧性、较低的吸水性、优秀的化学稳定性等。聚苯醚或改性体在汽车上的应用情况见表 1-4-25。

表 1-4-25 聚苯醚在汽车上的应用举例

零件 / 部位	主要零部件
内装饰件	仪表板（盘）、仪表组、仪表罩、除霜器装饰件、调整零件、杂物箱盖、铰链、扬声器格栅、后视镜框、A 主柱盖、烟灰盒件、空气净化器壳盖
外装饰件	车轮罩盖、轮毂盖、装饰件、前通风护栅、散热器格栅、车门反射镜壳、扰流板、侧密封板条等
电气元件及其它	熔断丝台座及架、转换器盒、闪光器盒、接线端子、前灯反射镜、副反射镜、散热器容器壳及罐体等

聚苯醚的熔点高且流动性不好，所以往往通过共混、合金化改性后予以应用。典型的材料性能列于表 1-4-26。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-26 典型聚苯醚改性材料性能

项目 \ 类别	单位	PPO/PS 合金	30%GF PPO/PS 合金	PPO/PA 合金	30%GF PPO/PA 合金
相对密度		1.06	1.27	1.10	1.33
热变形温度	℃	128	138	120	205
弯曲强度	MPa	88	150	70	190
弯曲弹性模量	MPa	2.5×10^3	6.8×10^3	1.8×10^3	7.2×10^3
抗拉强度	MPa	63	120	51	140
伸长率	%	60	5	150	8
缺口冲击强度	J/m	810	450	990	450

聚苯醚除了可以进行注射、挤出成形而外，还可以进行机加、焊接及粘接加工，粘接加工时，常用氯仿或二氯乙烷做溶剂。

聚苯醚注射成形时，料筒温度为 320～340℃，注射压力应大于 1 050MPa，模具温度为 130℃。

6）其它新型工程塑料

①聚苯硫醚（PPS）：聚苯硫醚是用硫化钠与二氯苯在强极性溶剂中，在 220～225℃下缩聚而成的一种结晶性工程塑料。它具有良好的耐热性、阻燃性、耐化学药品性、尺寸稳定性和综合机械性能等。其熔点为 280℃，热变形温度高达 200～240℃。

虽然聚苯硫醚的优点很多，但由于分子结构中含有硫，所以存在容易腐蚀模具的缺点，使用时应予以注意。

在汽车上，聚苯硫醚主要用来制造信号灯座、接线端子、控制开关等电器元件，此外还用来做电磁件、水泵叶轮、各种阀门及传感元件等。常用的几种玻璃纤维增强材料的主要性能见表 1-4-27。

表 1-4-27 常用 30%玻璃纤维增强材料的性能

项目 \ 类型	单位	普通型	高流动型	高韧性型
相对密度		1.66	1.66	1.66
抗拉强度	MPa	190	165	211
伸长率	%	1.7	1.4	2.0
弯曲强度	MPa	235	201	275
弯曲弹性模量	MPa	13.5×10^2	14.3×10^2	13.7×10^2
缺口冲击强度	J/m	88	88	108
热变形温度	℃	270	270	270

②聚芳酯（U 聚合物）：聚芳酯只有 20 多年历史，它是属于非结晶性透明塑料，具有密度小、耐热性好、弹性好、难燃烧、韧性好等特点。其热变形温度为 164℃，热膨胀系数比其它任何塑料都小，抗蠕变性极好。

聚芳酯在汽车上主要用于电气及照明部分，如点火系统、排放系统、前灯反射镜、灯的托架、熔断丝盒及仪表透明罩壳等制品。

聚芳酯的主要性能见表 1-4-28。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-28 聚芳酯的主要性能

型号 / 单位	通用型	高流动型	耐热型
相对密度	1.21	1.24	1.21
抗拉强度 MPa	75	83	71.5
伸长率 %	62	62	50
弯曲强度 MPa	95	115	97
弯曲弹性模量 MPa	1.9×10^3	2.0×10^3	1.9×10^3
缺口冲击强度 J/m	250～350	250～350	150～250
热变形温度 ℃	140	150	160

聚芳酯在加工前要进行充分干燥，条件是 100～120℃下 2～6h。注射成形时机筒温度为 330～350℃，模温为 120～140℃，注射压力控制在 110～130MPa。

③聚酰亚胺（PI）：聚酰亚胺是由二元酸酐和二元胺缩聚而成，若按其原料单体的不同，可分为可溶性、不溶性及改性三大类。

聚酰亚胺具有良好的机械强度、耐热性和阻燃性，使用温度为 200～250℃，即使在 200℃下，弯曲强度仍高达 300MPa。此外，其减摩、耐磨性也很好。它可以用来制造发动机、空调机及排气净化系统的结构件、电气元件及阀门类制品，而且用量有大幅增加的趋势。

④氟塑料（PTFE、F4）：氟塑料是以聚四氟乙烯为主，它是单体四氟乙烯的均聚物，由于有着卓越的耐化学腐蚀性、耐热性、耐低温性等故有“塑料王”之称。机械强度低是它的致命缺点，通常对其采用玻璃纤维、碳纤维、二硫化钼、铜粉进行填充增强改性，有时还可以通过与钢背复合来提高承载和导热能力。在汽车上，主要用来做减摩、耐磨零件以减少或取消润滑点，特别适合军用车辆。（撰稿人：李树生）

1.4.2.3 热固塑料

1）酚醛树脂（PF）

酚醛树脂是人类使用最古老的合成树脂，迄今已有近百年历史。酚醛树脂是酚类（苯酚、甲酚、二甲酚等）与醛类（甲醛、乙醛、糠醛、丁醛、苯甲醛等）在酸或碱催化剂存在时，相互缩合而制成的。缩聚产物的特征和工艺性质是由原料分子结构、大小、官能度和极性的程度所决定。

事实上，根据起始酚原料的官能度及醛组份的特性、醛和酚的比例及催化剂的种类不同，大致可形成两种类型酚醛缩聚产物；i）热固性树脂，即对其加热能够转变成为不溶和不熔的体型缩聚物。ii）热塑性树脂，它可溶并可熔，对其仅仅加热时并不能固化。

热固性树脂在最初可熔化时称之谓可熔酚醛树脂或甲阶树脂。一旦加热后，则称为不熔酚醛树脂或丙阶树脂。而热塑性树脂则称作线型酚醛树脂。

在诸多型号酚醛树脂中，最常用的是以苯酚和甲醛缩合而成的酚醛树脂，具体制造方法如下：

①热塑性酚醛树脂：它是在酸性催化剂存在时，苯酚比甲醛过量的情况下（6/5 或 7/9）制造而成，若苯酚的量不足，也就是甲醛过量时，所生成的线型初聚物很容易被甲醛所交联，最终结果也能生成热固性树脂。脆性松香状的热塑性酚醛树脂可熔化并能溶于丙酮、醚或酯类溶剂，多用来做涂料、粘接剂或压塑粉等。

②热固性酚醛树脂：如果在甲醛过量的情况下（7/6）并在碱性催化剂中缩聚，就可制得热固性树脂。当甲醛与苯酚是等克分子比时，只要是在碱性介质中，同样可以制造成热固性酚醛树脂。这是因为，在碱性时，反应的中间产物酚醇是稳定的，因此它们之间不容易进一步缩聚，而只能生成二羟和三羟甲基苯酚，以致使部分苯酚没有反应，而以游离状态存在，就等于甲醛仍然过量，故只能生成热固性树脂。

酚醛树脂的制造工艺过程见图 1-4-16。

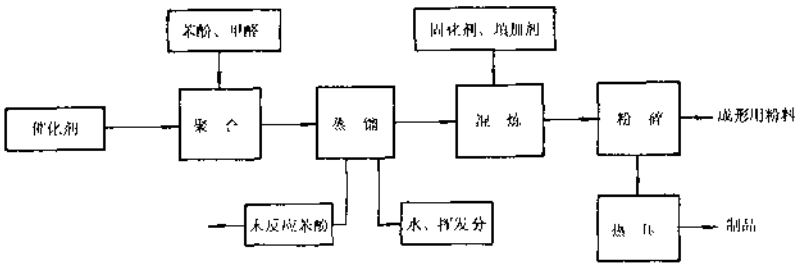


图 1-4-16 酚醛树脂的制造工艺过程

酚醛树脂大多以层压塑料或模压粉等形式被人们应用。层压塑料的填料有棉布、合成纤维布、玻璃布、纸、石棉布、木材薄片等。

纯酚醛塑料性能列于表 1-4-29，酚醛层压塑料主要性能列于表 1-4-30。

表 1-4-29 纯酚醛塑料性能

项 目	性 能 值	项 目	性 能 值
相对密度	1.3	吸水率（%）	0.2～0.5
抗拉强度（MPa）	42～50	弯曲强度（MPa）	63～77
冲击强度（J/m）	60～68	硬度（莫氏）	2.5～3.0
表面电阻（Ω）	10^{10}～10^{12}	体积电阻（Ω·cm）	10^{12}
介电常数	5		

表 1-4-30 各种填料酚醛层压塑料性能

项目 \ 类别	纸 基	棉布基	玻璃布基	石棉布基	木材片基
密度（g/cm^3）	1.8～1.40	1.3～1.40	1.6～1.85	1.6	1.3
抗弯强度（MPa）	80～250	120～160	110	85～100	100～280
抗拉强度（MPa）	80～200	—	100～280	—	140～280
冲击强度（J/m）	130～400	250～350	350～400	20～250	200～280
吸水率（%）	0.5～0.7	0.55～1.5	1.5～5	2	2.5
马丁耐热（℃）	150～160	120～130	185～200	—	140
抗压强度（MPa）	130～250	150～250	270	—	—

酚醛模压塑料可分为粉状或碎屑状两大类，前者是在树脂中添加了有机木粉或无机矿物粉而制成的，后者是将碎布屑、小纸屑或碎木片浸渍酚醛树脂干燥而成的屑状压塑料。使用时，只要经加热、模压即可成形。几种压塑粉模压塑料的主要性能列于表 1-4-31。碎屑基模压塑料性能列于表 1-4-32。

表 1-4-31 压塑粉酚醛塑料的性能

性能 \ 类别	木粉填料		无机物填料	
	热塑性	热固性	热塑性	热固性
密度（g/cm^3）	1.25～1.4	1.25～1.4	1.6～2.0	1.6～2.0
抗拉强度（MPa）	30～60	30～60	28～60	28～60
抗压强度（MPa）	150～160	150～160	125～250	125～250
冲击强度（J/m）	40	45	40	42
抗弯强度（MPa）	55	65	66	60
马丁耐热（℃）	110	100	125	150
吸水率（%）	0.2～0.6	0.2～0.6	0.01～0.3	0.01～0.3

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-32 碎屑基酚醛模压塑料性能

性能 \ 类型	碎布基	碎木片基	碎纸基
密度（g/cm³）	1.3～1.4	1.3～1.4	1.35
抗压强度（MPa）	140～190	20～100	—
抗弯强度（MPa）	65～120	100～110	60
冲击强度（J/m）	120～300	140～250	85
马丁耐热（℃）	100～130	—	120
吸水率（%）	0.4～0.6	1.8～2.0	0.7

酚醛树脂除了用来制造模压制品、型材、板材而外，以粉状、液状做胶粘剂方面用途极广，特别是铸造砂型用胶量最大。

酚醛树脂以各种形式在汽车上的应用示于表 1-4-33。

酚醛树脂最大特点是阻燃且耐热，最大缺点是韧性差，所以，最近，有人在其分子中引入芳烷基及多环型芳香族基，可以大大提高树脂的韧性和耐热性。

表 1-4-33 酚醛树脂及成形材料在汽车上的应用

类型 \ 用途	零部件名称
酚醛树脂成形材料	发动机隔热材料、化油器件、排气叶轮、水泵叶轮、正时齿轮、整流子、起动机磁性开关盖、点火系统零件、发电机集流环、变速器变扭器摩擦片、止推垫圈、盘式制动油缸活塞、制动摩擦片、烟灰盒、阻风手柄等
粉状或液状胶粘剂	制动摩擦片用胶、阻尼减振毛毡粘接剂、发动机隔热片用胶、铸造砂型粘接剂、涂料等

2）不饱和聚酯树脂（UP）

它是由不饱和二元酸和一定量的饱和二元酸与二元醇在引发剂的作用下发生化学反应而制成。使用时再用活泼的乙烯基单体与其不饱和的基团共聚、交联固化而成为体型结构聚合物。

它通常都是以玻璃布、玻璃纤维增强的形式被应用，常称为玻璃钢。普通玻璃钢成形周期很长。最近几年，出现了预制片状模压材料称做为 SMC、TMC、DMC 和 XMC 等，因为可以快速加热模压成形，所以在汽车上的应用日趋广泛。

纯不饱和聚酯塑料、玻璃钢及 SMC、BMC 材料的性能列于表 1-4-34。

玻璃钢的性能虽好，但质量均匀性稍差，适合小批量、形状复杂零件制造。为了提高性能的均匀性，出现了喷射成形、无纺玻璃毡喷胶并伴随橡皮囊加压的成形方法，效果良好。

玻璃钢、SMC、TMC、DMC 材料在汽车上应用例示于表 1-4-35。

表 1-4-34 纯树脂及复合增强材料性能

性能 \ 类型	纯树脂	玻璃钢	SMC	BMC
密度（g/cm³）	1.18	1.8	1.7～2.1	1.8～2.1
抗拉强度（MPa）	65.0	321	220	100
抗弯强度（MPa）	32	43	60～130	60～70
弯曲弹性模量（MPa）	1.0×10^3	4.3×10^4	1.4×10^4	1.4×10^4
填料含量（%）	0	65	40	30

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-35 不饱和聚酯增强材料在汽车上应用

种类 \ 零件	零件名称
玻璃钢	赛车车身覆盖件、扰流板、各种格栅等
SMC	车身覆盖件、车门、座椅部件、扰流板、副保险杠、备胎箱等
BMC	各种结构件、扶手、把手、壳体件、灯罩、发动机气门罩盖等

3）聚氨酯树脂（PU）

聚氨酯的全称是聚氨基甲酸酯，二战期间由德国人发明并工业化。它是一种含有酰胺基团和酯基团的聚合物，通常以硬质、软质、半硬质、发泡体或弹性体形式被应用。

聚氨酯具有弹性好、机械强度高、化学稳定性好、容易改变形态等优点。最早广泛用于汽车是以发泡体形式出现，主要用来做仪表板、转向盘、车门扶手、座椅缓冲件、头枕、转向盘喇叭盖、遮阳板、密封条等零部件。目前，聚氨酯已经扩大了应用范围，特别是用来做车身覆盖件的 RIM 材料，有着广阔的发展前景。因为它可以采取单体低压、低温成形，又容易改性或增强，用来制造挡泥板、装饰条、扰流板、仪表板、格栅、发动机罩等大型零件，对减轻汽车自重、提高车身使用寿命十分有利。聚氨酯弹性体可用来制造减振件、缓冲件、弹性零件、滑动止推件等，对改善汽车舒适性、减少振动噪声有明显效果。此外，聚氨酯还可以制成涂料、粘接剂，用于低极性材料及高分子、非金属材料的涂装和粘接。（撰稿人：李树生）

1.4.2.4 复合材料

这里所叙述的复合材料是指纤维增强塑料复合材料，简称 FRP，它主要由增强纤维和树脂两大类材料组成。纤维起着骨架作用，而树脂主要是将纤维粘结起来，使其与纤维成为一体，起到共同承载的作用。增强用的纤维除玻璃纤维还有碳纤维和合成纤维等，基体树脂分热固型和热塑型两种类型，以热塑性树脂为基体的纤维增强塑料复合材料，简称 FRTP。

纤维增强塑料复合材料不但集中了纤维和树脂的优点，其长处还在于它发挥了在单一材料中所见不到的许多综合特性——轻质高强、耐化学腐蚀、耐热性等。

FRP 可采用多种成形工艺成形，这主要根据产品结构及性能、生产规模及投资数额来综合选择，在确定了成形工艺之后方能确定纤维及树脂的种类。下面针对增强材料、基体树脂种类及成形方法加以叙述。

1）玻璃纤维增强热固性树脂复合材料

在玻璃纤维增强热固性树脂复合材料所用的树脂中，以不饱和聚酯树脂用量最大，当要求高强度时，则使用环氧类树脂。玻璃纤维的种类有连续长纤维、短切纤维及纤维毡等。目前由于机械化程度的提高，已形成大规模生产的热固性树脂复合材料种类很多，但适于制造汽车零件的有 RTM（树脂注入法）、SMC（片状模塑料）、BMC（团状模塑料），以及随着新材料、新工艺的不断更新，而发展起来的 IBMC（注塑成形团状模塑料）等新型复合材料。

（1）RTM 法成形的复合材料

RTM 法是在装入玻璃纤维的封闭模具里压入树脂，常温或加热固化。RTM 法生产的复合材料通常由玻璃纤维毡或预浸玻璃纤维粗纱和不饱和聚酯组成，这种成形方法设备简单、投资小，且制品物理性能优异，但只适于中小批量规模生产。由于树脂注入是用泵把树脂注入到封闭的模具里，因而从树脂中逸出的苯乙烯少，是一种有利于环保的成形方法。

目前国外用 RTM 成形方法生产的汽车零件已推广到全车身外覆盖件。而国内将 RTM 成形技术用于制造汽车零件还处于开发研制阶段，对原材料的力学性能、固化时间、成品率等指标力求达到国外同类制品的生产水平。目前国内 RTM 成形法的材料性能见表 1-4-36，正在开发研究的汽车零件有护风罩、后尾门、导流罩、顶棚、保险杠及富康车后举升门等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-36 RTM 性能检测结果

测试项目	单位	性能数据	测试方法	备注
密度	g/cm^3	1.5～1.6	GB1463	
玻纤含量	%	40～50		
表面性能	LORIA 指数	61	Ashland 指数仪	美国 PPG 公司检测
抗拉强度	MPa	155	GB1447	
抗弯强度	MPa	223	GB1449	
冲击韧性	kJ/m^2	179	GB1451	
制品固化时间	min	<20		

(2) SMC 模压成形的复合材料

所谓 SMC 是一种玻璃纤维增强的片状模压成形的塑料复合材料，它是将不饱和聚酯树脂、填充剂、增粘剂、固化剂、内脱模剂和引发剂等组份混合成糊状物，通过 SMC 预制成形机组（见图 1-4-17）与玻璃纤维毡浸渍后做成片状预制材料，然后按照产品结构进行预制片的铺设，采用热压成形工艺制造所需产品。预制片材要在贮存期内使用，为适应各种需要，可制成不同性能的 SMC，片状模塑料性能见表 1-4-37 和表 1-4-38。

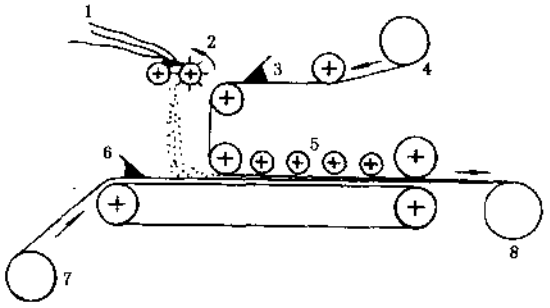


图 1-4-17 SMC 浸渍机模型图

1-玻璃纤维；2-切断纤维；3、6-刮胶；4、7-PE 薄膜；5-压滚；8-SMC

表 1-4-37 普通 SMC 性能

性能		单位	测试方法	性能数据
物理性能	玻纤含量	%	GB/T15568	30
	密度	g/cm^3	GB1463	1.8
	吸水率	%	GB1462	0.25
	阻燃性	级	GB4609	FV-0
	巴氏硬度		GB3854	60
	成形收缩率	%	GB/T15568	0.20
力学性能	热变形温度	℃	GB1634	200
	弯曲强度	MPa	GB1449	150
	弯曲弹性模量	GPa	GB1449	13
	冲击韧性	kJ/m^2	GB1451	55
	抗拉强度	MPa	GB1447	60
	压缩强度	MPa	GB1448	130

表 1-4-38 高强度型 SMC 性能

SMC材料品种 / 性能	单位	高强度型 R—65 (HMX-301)	高强度型 R32.5/C32.5 (HMX-501)	普通型
弯曲强度	MPa	425	752	134
挠曲弹性模量	MPa	15 680	23 520	10 192
抗拉强度	MPa	238	503	74
Izod 冲击强度 扁平	J/m	2 450	2 969	1 303
棱边	J/m	1 636	3 479	1 323

注：①HMX-301、HMX-501 属乙烯酯系；

②R 是指无定向短纤维；

③C 是指连续的长纤维；

④R/C 是指无定向和定向纤维混合体，R32.5 表示无定向短纤维 32.5%。

与 RTM 成形法相比较，随着原材料、片状模塑料预制材料及片状模塑料预制材料的成形技术的发展，对大规模生产来讲，则采用 SMC 模压成形法要优越。这不仅在于 SMC 制品出模后的制品表面粗糙度即能达到 A 级标准，而且还在于 SMC 模压成形法具有生产周期短、操作简便，容易成形肋、凸起部及预埋金属嵌件等优点。RTM 和 SMC 法生产的汽车零件明细见表 1-4-39。

表 1-4-39 用 RTM 和 SMC 法生产的汽车零件明细

1. 左/右前翼子板	7. 顶盖
2. 左/右后翼子板	8. 发动机外罩
3. 左/右上侧板	9. 内发动机罩
4. 左/右下侧板	10. 外后背门
5. 左/右前门	11. 内后背门
6. 左/右后门	12. 前/后保险杠

(3) 块状模塑料复合材料 (BMC)

块状模塑料 (BMC) 是加有填料、化学增稠剂、固化剂、颜料、脱模剂等的树脂糊与短切玻璃纤维混炼的团状物，块状模塑料与片状模塑料同为预制材料。块状模塑料的物理机械性能也相当优异 (BMC 性能见表 1-4-40)，制品的尺寸精度好，作为制造铝压铸件的替代材料极为引人注目。铝压铸件要通过机械加工得到规定的尺寸精度，而块状模塑料则可以直接成形具有规定尺寸精度的制品。

块状模塑料的成形方法有压力成形、传递成形以及注射成形三种方法。传递成形适于制造不带嵌件的小型精密功能部件，压力成形适宜制造外装饰用大型部件，但国外也有用注射成形法制造轿车的前挡板等大型部件 (质量约 7kg)，而它的表面质量、制品质量的均匀性和经济性等均比压力成形优异。

表 1-4-40 块状模塑料制品的特性 (旭玻璃纤维公司 Rosite 制品)

项 目	ASTM 试验	单位	3250A	3250C	3250F	3450C	3550A	3550C	3550F
玻纤含量		%	5	15	30	15	5	15	30
密度	D792	g/cm^3	2.08	1.94	1.80	1.94	2.08	1.94	1.80
吸水率，24h	D570	%	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
弯曲强度	D790	MPa	70	140	175	130	70	130	175
弯曲模量	D790	MPa					10 500	11 000	17 000
压缩强度	D695	MPa	150	160	175	160	130	150	175
抗拉强度	D638	MPa	34	40	60	30	34	40	60
冲击强度 (Izod)	D256	J/m	110	220	715	220	110	220	660
热变形温度	D648	℃	200	200	200	200	200	200	200
可连续使用温度	D794	℃	150	150	150	150	150	150	150

汽车论坛 http://www.qclt.com

近几年国内BMC用量逐年增加，生产的汽车零件有轻型车进气罩下体、护风圈等。用BMC注射成形方法新近开发出夏利轿车前大灯反光罩，该产品表面质量、无缺口冲击强度、生产效率和预制料的储存期均达到国外同类制品的水平。

2）玻纤增强热塑性树脂复合材料

玻纤增强热塑性树脂复合材料简称FRTP，它是玻纤增强PP或PA、PBT、ABS、PUR等热塑性树脂复合材料的总称，它分通用型和特殊型二类。通用型的玻璃纤维长度通常为0.1～0.6mm，含量为10%～40%不等，大都采用注射成形，与未增强级树脂相比，具有机械强度高、热变形温度高、尺寸稳定性好等优点，但是也存在着密度大、表面质量下降、成形流动性差等缺点（通用型FRTP材料性能见表1-4-41）。

表1-4-41 通用型FRTP材料性能表

树 脂	玻纤含量（%）	密度（g/cm³）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）	压缩强度（MPa）	弯曲强度（MPa）	洛氏硬度	冲击强度（J/m）	热变形温度1.86MPa（℃）
ABS	20～40	1.2～1.38	90～110	2～4	90～110	120～140	M97～102	70～81	100～110
SAN	20～40	1.22～1.40	110～130	2～3	140～160	140～160	M92～97	54～59.4	95～105
PS	20～40	1.2～1.38	80～110	2～3	120～130	110～120	M90～93	48.6～64.8	95～105
PC	20～40	1.34～1.52	110～180	4～6	140～170	180～210	M92～97	183.6～216	150
聚砜	20～40	1.38～1.55	110～140	2～3	150～180	150～190	M92	70.2～108	180～190
聚丙烯	20～40	1.04～1.22	60～70	1～3	54～69	80～90	M49～59	75.6～97.2	140～150
尼龙-6	10～60	1.21～1.70	95～230	1～4	110～180	120～340	M86～101 R118～121	54～216	190～215
尼龙-66	10～60	1.21～1.70	98～230	1～4	130～210	140～350	M92～104 R121	43.2～178.2	250～260
PVC	15～35	1.54～1.62	90～130	2～3	80～120	130～180	M78～88	64.8～86.4	68～75
PBT	20～40	1.43～1.62	120～150	3～5	120～150	170～220	M82～86	64.8～118.8	210～230
聚苯硫醚	30～40	1.56～1.65	140～160	3～4		200～220		75.6～81	260～265
改性PPO	20～40	1.20～1.32	110～140	3～4		150～180	M90～94	81～91.8	140～160

为进一步提高冲击强度，新近开发了纤维毡增强冲压成形的叠层热塑性复合材料（GMT）具有各向同性的特点，常用的GMT采用聚丙烯为基材、用连续的随机排列的玻璃纤维增强，其它树脂基材还包括尼龙、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）、聚对苯二甲酸丁二醇酯等。标准的PP基材GMT材料具有优良的机械性能和物理性能，成形工艺性相对比较好，这种材料自身结合强度非常高，表面可进行涂装，达到A级装饰效果，同其它基材的GMT相比，该材料在压制过程中所需的压力较小。

可以采用的玻璃纤维共有三种：连续的随机排列的玻璃纤维、单向排列的连续玻璃纤维以及碎断的玻璃纤维，每种树脂基材都可以和其中的一种复合，对GMT材料来讲，最经济、工艺性好、各项性能均一的玻璃纤维最佳含量是40%。GMT冲压板成形工艺流程图见图1-4-18。

汽车论坛 http://www.qclt.com

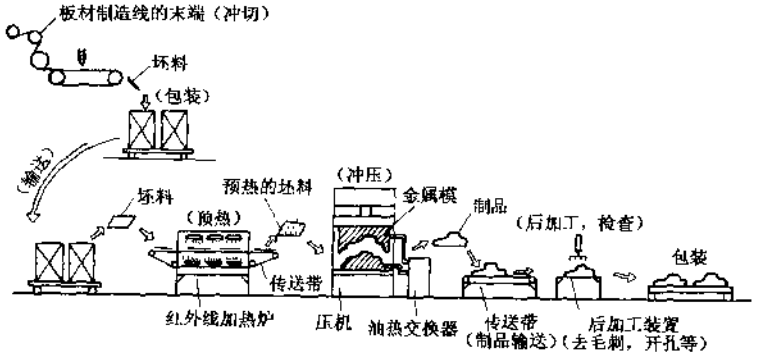


图 1-4-18 GMT 冲压板的成形工艺流程图

目前国外 GMT 片材已广泛用于制造汽车部件，如座椅、保险杠、发动机罩、前缘板、底板、蓄电池托架等。GMPP 性能指标见表 1-4-42。

表 1-4-42 GMPP 片材的性能

检 测 项 目	GM20PP	GM30PP	GM40PP	GM20/UD20PP
玻纤含量（wt%）	20	30	40	43
密 度（g/cm^3）	1.02	1.13	1.22	1.24
弯曲强度（MPa）	90	110	140	230
弯曲模量（MPa）	3 500	4 500	5 500	8 500
抗拉强度（MPa）	55	70	90	240
拉伸模量（MPa）（伸长 0.05%～0.5%）	3 500	4 500	6 000	12 000
断裂伸长率（%）	1.8	1.8	1.7	1.7
－40℃下的冲击强度（kJ/m^2）	60	60	80	145
+23℃下的冲击强度（kJ/m^2）	45	55	75	130
热变形温度（1.82MPa）℃	149	153	156	158
热膨胀系数（$1\times10^{-6}/K$）	32	29	27	26

注：GM：无序玻纤毡；UD：单向增强材料；PP：聚丙烯树脂

同热固性材料相比，热塑性材料的回收利用更简单更经济一些。研究表明当回收的坯料重新加热后仍能保持原有的性能。冲压飞边、零件边部毛刺、报废制品或尺寸不合格件都可重新送入压机中，这些边角余料一般都没有杂质，简单地和坯料一起加热即可。

目前欧洲的一些汽车制造商已经开始将第一次压合成形过程中的边角废料用于再生产，一般再生产的制品都是一些技术要求不很严格的零件，如噪声屏蔽罩等。

3）先进复合材料（ACM）

汽车论坛 http://www.qclt.com

目前高性能的纤维有碳纤维、芳伦（Kevlar）纤维和混杂纤维。作为基础树脂除较优异的环氧树脂，还有正在开发和完善之中的聚酰亚胺、PPS、聚醚醚酮、液晶聚酯（LCP）等。已开发出的高性能复合材料有碳纤维/环氧树脂复合材料和芳伦纤维/环氧树脂复合材料，性能见表 1-4-43 和表 1-4-44。

表 1-4-43 CF/环氧复合材料性能（单向层压品）

项目		单位	T300	项目		单位	T300
单丝数		个	1 000	单丝数		个	1 000
纵向	抗拉强度	MPa	1 764	纵向	挠曲弹性模量	GPa	127
	拉伸弹性模量	GPa	147		剪切强度	MPa	88
	伸长率	%	1.2	纵向线膨胀系数		10^{-6}/℃	0.2
横向	抗拉强度	MPa	49	横向线膨胀系数		10^{-6}/℃	35
	拉伸弹性模量	GPa	9.8	纵向导热系数		W/(m·K)	4.2
	伸长率	%	0.5	横向导热系数		W/(m·K)	0.7
纵向	压缩强度	MPa	1 176	比热		kJ/(kg·K)	0.84
	压缩弹性模量	GPa	123	纵向比电阻		Ω·cm	0.004
	弯曲强度	MPa	1 862	横向比电阻		Ω·cm	6.6

注：①树脂：环氧 828（100 份），BF_3·MEA（5 份）；

②硬化条件：预硬化 150℃，2h。后硬化 170℃，3h；

③纤维含量：按体积 60%CF。

表 1-4-44 Kevlar 环氧复合材料性能（单向层压）

方向	性能	单位	K49/环氧	方向	性能	单位	K49/环氧
纵向	抗拉强度	GPa	1.32	横向	抗拉强度	GPa	0.028
	压缩强度	GPa	0.27		压缩强度	GPa	0.13
	拉伸、压缩弹性模量	GPa	73.0		拉伸、压缩弹性模量	GPa	5.3
密度		kg/m^3	1 380	—		—	—
层间剪切强度		GPa	0.048～0.087	层间剪切强度		GPa	0.048～0.087
泊松比		—	0.34	—		—	—

碳纤维复合材料不仅具有高强度和高刚度，而且具有良好的抗蠕变性、耐腐蚀性、热伸缩性小（-65～105℃之间无伸缩）、耐磨性高、振动衰减快、振动传递小，因此非常适合于制造汽车部件，而芳纶纤维复合材料由于其高抗拉强度及压缩模量、耐破坏性、振动衰减性、疲劳性使其在缓冲器、门梁、托架、铰链、变速器支架、压簧、传动轴等零件的应用中受到重视。（撰稿人：江梅）

汽车论坛 http://www.qclt.com

1.4.3 涂料

1.4.3.1 涂装的目的

涂装的主要目的一是保护，二是装饰。保护作用是保护被涂物，使其免受环境介质的侵蚀，起防腐蚀、抗老化和耐各种介质作用。例如，汽车车身采用优质的涂料和正确的涂装工艺进行涂装后能在各种气候条件下使用 10～15 年，反之仅使用 1～2 年就锈蚀穿孔。至于装饰则是给被涂物以美的视觉。

涂料经涂装（即经涂敷、干燥）才能发挥其作用进而体现其价值，因此可以说涂料只是涂膜的半成品。只有将涂料所具有的功能与涂装技术相结合方可达到预期的目的。鉴于汽车涂装的特点，对涂料有如下基本性能要求：

①涂膜性能：良好的力学性能和耐各种环境介质侵蚀性能，漆膜耐久性好，不变色，不褪色。

②施工性能：涂装作业容易，对涂装施工环境及装备适应性强。

③环保特性：对施工人员无危害，对环境无污染或排放物易处理。

④储运性能：在运输及仓储过程中自身不产生影响施工及涂膜性能的化学变化及分散状态的变化。

1.4.3.2 涂料的组成

涂料要经过施工过程在被涂物表面形成涂膜，因而涂料的组成中包含了完成施工过程和组成涂膜所需要的组份。其中组成涂膜的组份是最主要的，每种涂料中都必须含有，这种组份通称成膜物质。在带有颜色的涂膜中颜料是其组成中的一个重要组份。为了便于施工过程，涂料组成中有时含有溶剂组份。为了施工和涂膜性能等方面的需要，涂料组成中往往含有助剂组份。因此，涂料组成中包含成膜物、颜料、溶剂、助剂四个部分，涂料的组成按成膜过程中的作用来划分，可分为挥发分和不挥发分两大部分，以具有代表性的色漆为例，涂料组成如图 1-4-19 所示。

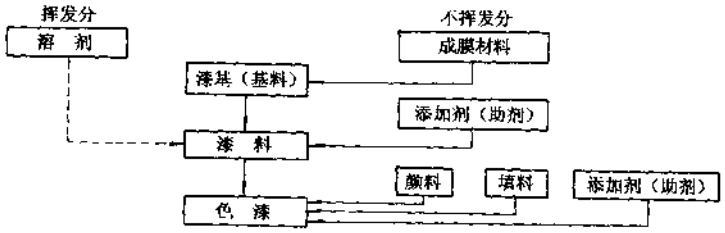


图 1-4-19 色漆组成示意图（漆料是色漆中所有液相组份的总称）

成膜物（漆基）具有粘接涂料中其他组份形成涂膜的功能。现代用作涂料成膜物的化合物在不断发展，越来越多。按其本身结构与所形成涂膜的结构比较来划分，可分为两大类：

①成膜物在涂料成膜过程中组成结构不发生变化，这类成膜物称为非转化型成膜物，它们具有热塑性，受热软化，冷却后又变硬，多具有可溶解性。常用的非转化型漆基材料有纤维素聚合物、氯化橡胶、乙烯树脂、丙烯酸酯类聚合物等。

②成膜物在成膜过程中组成结构发生变化，这类成膜物称为转化型成膜物，它们具有能起化学反应的官能团，在热、氧或其它物质的作用下能够聚合成与原有组成结构不同的不溶不熔的热固性高聚物。常用的转化型漆基材料有油脂和油基树脂、醇酸树脂、氨基树脂、热固性丙烯酸树脂、环氧树脂、聚氨酯树脂等。

颜料是一种微细的粒状物，不溶于它所分散的介质中，而且颜料的物理性质和化学性质基本上不因分散介质而变。颜料是有颜色的涂料的一个主要成分，它不仅使涂料呈现色彩，还能增强涂膜的力学性能和

汽车论坛 http://www.qclt.com

耐久性能。有些颜料还能为涂膜提供某种特定功能，如防腐蚀、导电、防延燃等。颜料品种很多，按其来源可分为天然颜料和合成颜料，按化学成分分为无机颜料和有机颜料，按其在涂料中所起的作用可分为着色颜料、体质颜料、防锈颜料、特种颜料和功能颜料等五类。

1）着色颜料

品种有 TiO_2（钛白）、ZnO（锌白）、Sb_2O_3（锑白）、碳黑、氧化铁黑、铬酸盐颜料、镉系颜料、铁系颜料、偶氮颜料、酞菁颜料、喹吖啶酮颜料、异吲哚啉颜料、还原颜料、氮甲型金属络合颜料、杂环颜料、铝粉、锌粉、铜粉等。

2）体质颜料（填充料）

品种有碳酸钙、硫酸钡、二氧化硅、硅酸盐类（滑石粉、高岭土、硅石灰、云母粉）等。

3）防锈颜料

品种有红丹（Pb_3O_4）、锌铬黄、磷酸锌、铬酸钙、铬酸锶、铬酸钡等。

4）特种颜料

品种有珠光颜料（天然珍珠精、片状碱式碳酸铅、氧氯化铋、云母酞）、荧光颜料、示温颜料等。

5）功能颜料

品种有耐高温色彩复合颜料、含镍不锈钢片颜料、加工颜料（调入颜料）、偏硼酸钡等。

颜料的发展趋势是开发少公害的有机颜料，扩大有机—无机复合颜料新品种，以无公害、无污染、性能优良的有机颜料和白颜料取代有毒的含铅铬酸盐、含镉等无机颜料，增加低毒防锈颜料，替代有毒防锈颜料。

助剂不能单独形成涂膜，它在涂料成膜后可作为涂膜中的一个组分而在涂膜中存在。根据助剂对涂料和涂膜所起的作用，可分为以下四个类型：

①对涂料生产过程发生作用的助剂，如消泡剂、润湿剂、分散剂、乳化剂等；

②对涂料贮存过程发生作用的助剂，如防结皮剂、防沉淀剂等；

③对涂料施工成膜过程发生作用的助剂，如催干剂、固化剂、流平剂、防流挂剂等；

④对涂膜性能发生作用的助剂，如增塑剂、平光剂、防霉剂、阻燃剂、防静电剂、紫外线吸收剂等。

溶剂是为使不包括无溶剂涂料在内的各种液态涂料完成施工过程所必需的一类组分。原则上不构成涂膜，习惯上被称为挥发分。在这种意义上讲，溶剂包括能溶解成膜物的溶剂，能增进溶剂溶解能力的助溶剂，能稀释成膜物溶液的稀释剂和能分散成膜物的分散剂。现代的某些涂料中开发应用了一些既能起溶剂的作用又能在施工成膜过程中与成膜物发生化学反应形成新的物质而存留于涂膜中的化合物，通称为反应性溶剂或活性稀释剂。很多化学品包括水、无机化合物和有机化合物都可以用作涂料的溶剂组分。

在溶剂型涂料生产中，常用的有机溶剂包括萜烯化合物、脂肪烃、芳香烃、醇、酯、酮、醇醚、醚酯和取代烃等。为了获得满意的溶解及挥发成膜效果，在产品中往往采用混合溶剂，很少采用单一的溶剂。

1.4.3.3 涂料制造工艺

尽管涂料的种类很多，制造工艺有所不同，但整个制造过程主要包括两大部分，即半成品漆料生产和成品漆生产。所谓的半成品漆料一般指各种树脂，随着技术进步和工业生产的专业化，成品涂料生产厂商自己生产的半成品漆料越来越少，所用的半成品往往由专业树脂生产厂提供。

1）漆料（基料）的制造工艺

漆料有天然和人工合成之分，一般漆料往往是将天然漆料（植物油或树脂）和合成树脂混合使用。不同的原料，制造工艺过程复杂程度不同，可概括为原料计量、反应、稀释、净化、贮藏几大步骤。

以醇酸树脂为代表的制造工艺示于图 1-4-20。

2）成品漆制造工艺

（1）液态涂料成品漆制造工艺

所谓成品漆制造工艺过程是指将原料和半成品加工成成品的物料传递或转化过程。一般系混合、输送、分散、过滤等化工单元操作过程及仓贮、运输、计量和包装等工艺手段的有机组合。色漆的生产最具

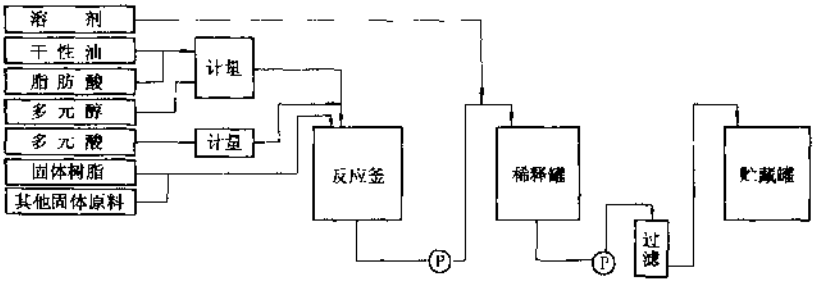


图 1-4-20 合成树脂制造工艺过程

代表性，其生产工艺流程足以色漆产品或研磨漆浆的流动状态、颜料在漆料中的分散性、漆料对颜料的润湿性及对产品的加工精度要求等 4 个方面的考虑为依据，首先选定过程中所使用的研磨分散设备，从而确定工艺过程的基本模式。

常用的研磨分散设备有高速分散机、砂磨机、球磨机、三辊机、单辊机等。高速分散机结构简单、使用灵活、清洗方使、生产效率高，可以和砂磨机配合使用作颜料的预混合设备，也可单独作为超细颜料的研磨设备。砂磨机结构简单、操作方便、生产效率高、便于连续生产，适用于低粘度漆浆，不适用于加工难分散的颜料，换色较难。球磨机可把颜料、漆料投入同时进行混合分散，密闭操作，对于易反粗变稠难分散的颜料有独到之处，但换色困难，不能加工较粘稠漆浆。三辊磨适用于粘度很高且含有难分散颜料漆浆的分散，换色容易，适合于小批量、多品种生产。单辊磨适合于颜料含量低、易分散的中、低粘度漆浆的分散。

图 1-4-21 所示液态涂料的清漆和色漆制造工艺过程，从图中可见，清漆制造过程要比色漆简单，不需研磨分散（不加颜料）也不需调色。

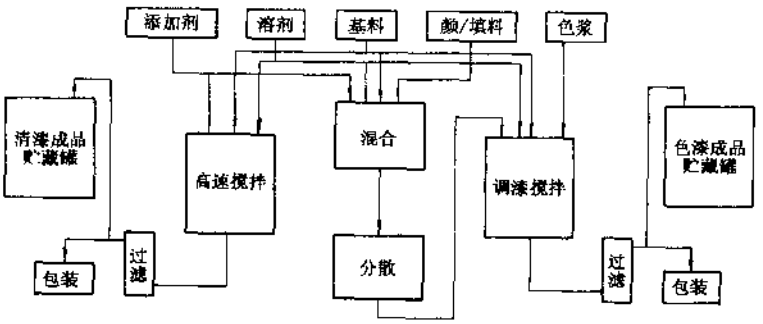


图 1-4-21 液态涂料的制造工艺过程

在色漆生产的研磨分散过程中变换品种及换色比较困难，而市场又要求涂料厂提供颜色尽量丰富的色漆产品。目前在我国一般的通用型色漆生产线上，主要是针对不同的产品规模及品种特点，灵活选用“制备研磨漆浆的方式”来缓解这一矛盾的。例如，以砂磨机为研磨分散设备时，可以采用以下几种不同的方式。

①单颜料磨浆法：对于含有多种颜料的磁漆，可以采用此法制备单颜色研磨漆浆，在调色制漆时采用混合单色漆浆的方法，调配出规定的磁漆产品。该方法适用于品种不多而颜色较多的批量生产，及品种、颜色较多而产量较小的生产场合。

②多种颜料混合磨浆法：这是一种将色漆产品配方中使用的颜料和填料一并混合，以砂磨机研磨制成多颜料研磨漆浆的方法。使用这种漆浆补加漆料、溶剂及添加剂后直接可制成底漆或单色漆，用少量调色

汽车论坛 http://www.qclt.com

浆调整颜色可以制得复色磁漆，此方法适用于颜色品种有限的色漆生产车间。

③综合颜料磨浆法：该方法系上述两种方法的折衷，即将复色漆配方中个别难分散的颜料单独研磨，在和其他混合颜料的研磨漆浆混合调色；或将主色浆与调色用副色颜料分别研磨后，再根据需要混合调色的方法。可以根据实际需要灵活选用这种方法。

色漆生产的调色是一项难度较大的工序，基本上不能自动实现，因为即使同种颜料，不同的批次所呈现的颜色也有差异，所以要用色差计和肉眼辨别相结合进行精确的微调加工，并做成样板，确认和要求的标准色板一致后，此工序才算完成。最后这道工序容易混入杂质，操作时要倍加注意。

(2) 粉末涂料制造工艺

粉末涂料由树脂、固化剂（在热固性粉末涂料中）、颜料、填料和助剂等组成，和一般的填料差不多，就是不含溶剂。制造方法和一般涂料有较大的差别，在某种程度上有些类似于塑料加工。在确定粉末涂料配方的基础上，要得到高性能的粉末涂料，制造粉末涂料过程中需要经过以下四个步骤：

a. 为了使配方中的各种成分混合均匀，必要时把各个成分预先进行粉碎。

b. 固化剂、促进剂、流平剂等用量少的关键成分一定要混合均匀。

c. 整个配方中的成分要分散均匀。

d. 按所要求的粒度分布把混合分散物进行粉碎或造粒，然后进行分级。

这些单元操作过程，可根据不同制造方法进行组合使用。粉末涂料制造方法的分类和工艺流程见图1-4-22。

干混合法制造的粉末涂料中各种成分的分散性和均匀性不好，喷涂的外观差，一般不采用此法。熔融法是目前最广泛的制造方法。湿法制造的粉末涂料比干法制造的粉末涂料品质好，但制造工艺较复杂。

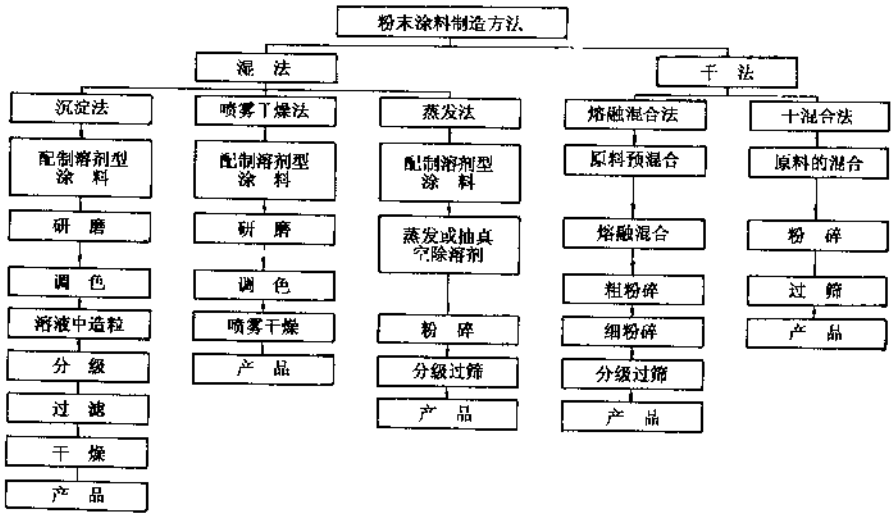


图 1-4-22 粉末涂料制造方法分类及工艺流程

1.4.3.4 涂料及涂膜质量要求

不同的汽车部件，对涂膜的质量要求不同。汽车车身的涂装要求最具代表性，在此就以其为例，介绍汽车涂装中对涂料的质量要求。因为希望汽车用漆膜能发挥出更美观、更充分的保护作用，所以要对汽车车身进行表面处理、电泳、中涂、面漆涂装。每道工序对涂料及涂膜的质量要求分别列于表1-4-45～1-4-47中。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 1-4-45 电泳漆的质量要求与相应技术

项目	性能	要求	对应技术
防锈	应形腐蚀	涂膜内在质量均匀，无局部薄弱环节，不发生斑点状腐蚀	各种防锈材料的应用，提高涂膜的附着力
	抗石击	涂膜在汽车高速行驶时，受飞起的砂粒冲击而不损坏	提高涂膜的弹性
	边角防锈性	涂膜对板件不易涂装的边角部位有较好的覆盖性	固化时涂膜收缩及涂膜粘着性控制
	空腔及焊缝结构防锈	对空腔结构的内表面及焊缝内部有较强的涂着能力，避免早期穿孔腐蚀	增加湿膜电阻，提高泳透力
	烘烤不足部位防锈	避免因厚板件或车身底板部位烘干温度不足而导致防腐能力降低	降低涂料固化温度
外观	平滑性	涂膜平滑、无桔皮、缩孔及水迹等弊病	湿膜再溶性、固化时涂膜的收缩及涂膜粘着性的控制
	耐溶剂性	不被后序涂层的溶剂或接触的其它溶剂所溶解	交联密度控制
耐候性	双涂层耐候附着性	在双涂层体系中，不因老化而影响涂层间附着力；电泳涂层自身具有一定的耐候性	树脂分子光分解性的控制
施工性能	稳定性	原漆储存期长，长更新期或较高温度下使用时槽液稳定性好	加水分解性及热凝聚性的控制
	油烟、泛黄性	烘干时油烟少，涂浅色面漆不泛黄	树脂成分热分解及挥发物的控制
经济	加热减量	降低加热减量	烘干时挥发物的控制
	烘干温度	降低烘干温度	低温反应性的控制
环保	溶剂含量	降低原漆中助溶剂含量及工作液中助溶剂的补加量，甚至不用助溶剂	助溶剂种类选择，树脂柔顺性的控制及成膜固化剂的选择
	毒性	不含有毒物质	优质的不含铅颜料的应用

表 1-4-46 中涂涂膜的质量要求与相应技术

项目	性能	要求	对应技术
涂膜性能	抗石击	具有一定弹性，使涂膜抗砂粒冲击不脱落	涂膜物理性能的控制
	附着力	与底漆及面漆均有良好的配套性，不需打磨、层间附着力良好	基料官能团及润湿性的控制
	打磨性	有较好的可打磨性，易打磨不粘砂纸	基料和颜料配方的控制
	耐候性	涂膜抗紫外线，性能保持稳定	耐紫外线树脂的设计

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

项目	性能	要求	对应技术
施工性能	遮盖填充性	对底涂层的漆膜缺陷及打磨痕等具有遮盖填充能力	基料分子量、颜料种类及用量的设计
	平滑性	容易施工，不产生桔皮、缩孔、流挂等弊病	基料分子量及固化收缩的控制
经济与环保	固化温度	降低固化温度	低温反应性控制
	湿碰湿施工	可与电泳漆或面漆湿碰湿施工，减少烘干次数	树脂固化特性的调整
	溶剂使用	高施工固体份，减少溶剂用量或水性化	树脂特性控制

表 1-4-47 面漆质量要求与相应技术

项目	性能	要求	对应技术
外观	光泽及雾影	具有良好的光学反射特性	颜料分散技术
	鲜映性	漆膜丰满，映像清晰度高	固化反应的涂膜收缩及涂膜粘性控制
	手感	手摸涂膜，有平滑的质感	树脂分子量及涂膜收缩的控制
耐候性	保光性	使用3～5年，光泽无明显降低	耐老化高分子树脂的应用
	变色	使用3～5年，颜色不发生变化	颜料种类选择，紫外线吸收剂添加
	褪色	使用3～5年，不发生明显褪色	颜料种类选择，颜料浓度控制
其他性能	附着力	与底涂层附着良好，不产生脱落现象	基料官能团的调整
	耐溶剂性	涂膜不被溶剂溶解	涂膜的交联密度控制
	耐药品性	耐各种化学品的腐蚀	涂膜的交联密度控制，交联剂的选择
	抗擦伤性	对擦拭后产生的机械划痕有自然恢复能力	涂膜的交联密度控制，基料树脂弹性的调整
施工性能	遮盖填充性	对底涂层的漆膜缺陷及打磨痕等具有遮盖填充能力	基料分子量、颜料种类及用量的设计
	平滑性	容易施工，不产生桔皮、缩孔、流挂等弊病	基料分子量及固化收缩的控制
经济与环保	固化温度	降低固化温度	低温反应性控制
	湿碰湿施工	底色与罩光漆可湿碰湿施工，减少烘干次数	树脂固化特性的调整
	溶剂使用	高施工固体份，减少溶剂用量或水性化	树脂特性控制

对车体的防锈作用是靠车身表面磷化处理膜和电泳底漆涂膜共同实现，所以要求涂料能够泳涂到复杂车体结构的缝隙及空腔内侧，即泳透性要好。此外，还要进一步提高钢板端面尖角部位的防锈能力。为提高面漆的整体平滑性，如何提高电泳底漆漆面的平滑性，也是汽车厂家目前追求的新目标。在采用两涂层体系的场合，为提高涂层的抗石击性能，要求底漆涂层有一定的抗石击性。中涂涂膜要起到抗行车时飞起石砂的冲击作用，同时还期望它能对底漆涂层有良好填充遮盖性以提高面漆的鲜映性，另外要求其与底漆和面漆有良好的配套性，以确保综合涂层的耐久性。保持车身良好的外观、光亮持久、耐化学药品及耐划伤性是面漆的主要功能。特别是近年来由于环境污染而导致世界性酸雨问题，提高面漆的抗酸雨腐蚀能力已是当务之急。

1.4.3.5 新的涂装材料

随着汽车制造业的不断发展，要求汽车涂料不断朝着高品质、低能耗、低环境污染和低涂装成本方向

汽车论坛 http://www.qclt.com

发展。为满足环保法规对涂装 VOC 排放的要求，最新开发出低 VOC 阴极电泳漆、水性中涂涂料、水性底色漆、水性清漆、高固体份涂料及粉末清漆等。此外，为满足汽车厂家对施工性、降成本方面要求，制造出了低温固化型涂料，减少车身内外表面膜厚差的高泳透力低密度（低颜料分）电泳漆；适应高效涂装技术和设备的涂料，如中涂/面漆湿碰湿工艺，电泳底漆/中涂湿碰湿工艺，对施工环境湿度要求范围宽的水性涂料也进入实际应用阶段。汽车外观装饰性、颜色及其耐久性要求在不断提高，耐酸雨抗擦伤面漆、多色中涂和采用粘度控制技术的涂料得到采用。采用无毒材料生产高性能涂料已成为今后的发展趋势，无铅阴极电泳漆、非异氰酸酯低温快速固化涂料等已开发应用。根据最新要求所需的新型涂料概要介绍于 1-4-48 中。

表 1-4-48 各种要求的新涂料

观点	预期目的	涂料/系列实例
社会	保护资源 环保 提高安全性	水性涂料（低 VOC 无铅无乙基溶纤剂和丁基溶纤剂阴极电泳漆、水性中涂、水性底色、水性罩光清漆、水性汽车修补漆等） 少溶剂涂料（高固体份涂料、使用反应型溶剂涂料） 无毒溶剂涂料 粉末涂料
涂料要求	施工容易程度 省力化 节省能源 涂装效率 快速、低温干燥	电泳涂料（低颜料份、低油烟、常温干燥型电泳涂料） 紫外线（UV）光固化涂料 长活化期组份型涂料 电子束固化涂料 低温烘烤型涂料 高施工固体份、低粘度、防垂流涂料 低施工环境湿度要求水性涂料
涂膜要求	防锈性 可靠性 耐大气老化性 美观	阴极电泳涂料（高泳透力、高边角涂敷性、高耐候性、抗石击） 无机富锌涂料 氟树脂涂料（抗擦伤、耐酸雨） 金属涂料（含珠光涂料） 高光泽高鲜映性、高流平性涂料 不需维护涂料（憎水性、防污性、耐剥落）

（撰稿人：吴 涛）

1.4.4 纤维

1.4.4.1 内饰用纤维

随着汽车舒适性和美观性要求的日益提高和我国轻纺工业的迅速发展，越来越多的纺织纤维材料受到汽车设计者的青睐和采用。汽车内饰用纤维的主要部位有座椅蒙皮、顶盖表皮、地毯、遮阳板表皮、安全

汽车论坛 http://www.qclt.com

带和车门内护板表皮等，它们要求纤维有良好的力学性能、色牢度、耐磨性以及耐光老化性，所用纤维种类主要有涤纶纤维、丙纶纤维、锦纶纤维、腈纶纤维以及羊毛类天然纤维等。其中涤纶纤维、丙纶纤维主要用于座椅蒙皮、顶盖表皮、遮阳板表皮和车门内护板表皮，锦纶纤维主要用于安全带，腈纶纤维主要用于纺织地毯。表 1-4-49 仅对用量较大的合成纤维的特性和制法予以叙述。

表 1-4-49 主要合成纤维的特性

性能		涤纶	锦纶 6	锦纶 66	丙纶	腈纶
密度（g/cm³）		1.38	1.14	1.14	0.91	1.14～1.17
软化点（℃）		238～240	180	230～235	140～160	190～240
熔点（℃）		255～260	215～220	250～260	165～173	—
耐光性		强度几乎不降低	强度稍降低、变黄	强度稍降低、变黄	强度几乎不降低	强度几乎不降低
公称回潮率（%）		0.4	4.5	4.5	0	2.0
拉伸强度（gf/d）	干	4.3～9.0（f）	4.8～10.0（f）	4.8～10.0（f）	4.5～7.5（s）	2.5～5.0（s）
	湿	4.3～9.0（f）	4.2～9.0（f）	4.2～9.0（f）	4.5～7.5（s）	2.0～4.5（s）
染色性		染色性差	染色性好	染色性好	染色性差	染色性好

注：（f）——长丝单纤维，（s）——人造短纤维

1）纤维的特性

（1）涤纶纤维

涤纶纤维的强度为 4.3～9.0gf/d，在湿态下强度不变；其弹性接近羊毛，当伸长 5%～6%，几乎可以完全恢复；耐皱性超过其它一切纤维，即织物不皱折，保形性好；耐热性较好，在 150℃的空气中加热 1000h 稍有变色，强度下降不超过 50%；在标准大气条件下的公称回潮率为 0.4%～0.5%，因而电绝缘性良好，织物易洗易干；由于吸水率低，染色性差；涤纶纤维的耐光性与腈纶纤维不相上下。

（2）锦纶纤维

锦纶纤维强度比天然纤维高，在合成纤维中也是比较高的；耐磨性优于其它一切纤维；染色性虽不及天然纤维及人造纤维，但在合成纤维中还算较易染色，可用酸性染料、分散性染料及其它染料染色；耐热性能不够好；耐光性能差，长期在光照射下，颜色发黄、强度下降。

（3）丙纶纤维

丙纶纤维是所有合成纤维中最轻的一种；吸水性很小；有较高的强力，且湿态时强度不会下降；染色性、耐光性和耐热性均较差。

（4）腈纶纤维

腈纶纤维具有毛型手感，织物轻柔；有良好的保湿性能；耐热性好，在 125℃条件下加热 720h 强力保持不变；耐光及耐候性良好；有较好的染色性能，其染色后的颜色较羊毛更鲜艳；具有良好的防霉防蛀性能。

2）纤维的制法

代表涤纶、锦纶和丙纶纤维的制造工艺流程如图 1-4-23。首先将聚合物颗粒溶解成粘稠性溶液或熔融成流体，用齿轮泵定量供料，通过喷丝口模进行喷丝，喷出的丝立即进入冷却介质中（通常是空气），经

冷却固化后再按一定速度拉卷。刚喷出的纤维丝由于伸缩率过大不能直接使用，这种丝称为未拉伸丝，只有进一步进行拉伸工艺将其拉长数倍，或进行适当的热处理后才能制成成品。

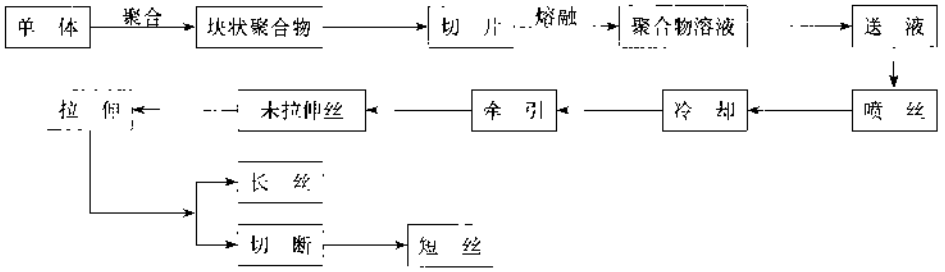


图 1-4-23 熔融纺丝生产合成纤维的工艺流程

1.4.4.2 增强用纤维

1）玻璃纤维

玻璃纤维具有一系列优越性能，作为增强材料的增强效果十分明显。它产量大、价格低廉，因而就目前来说，与其它增强材料相比，它的使用最占优势。目前汽车上主要采用 30% 的玻璃纤维增强尼龙材料和聚丙烯材料制造结构零件。玻璃纤维采用的原料成分见表 1-4-50。

表 1-4-50 各种玻璃纤维成分比例（%）

成 分	无碱玻璃	高碱玻璃	中碱玻璃	高强玻璃	耐碱玻璃
SiO_2	52～56	72.0	65.0	65.0	71.0
Al_2O_3	12～16	0.6	4.0	25.0	1.0
CaO	16～25	10.0	14.0	—	-
MgO	0～6	2.5	3.0	10.0	—
B_2O_3	8～13	-	6.0	—	-
Na_2O	0～3	14.2	8.0	—	11.0
ZrO_2	—	—	—	—	16.0

制造玻璃纤维的方法很多，主要可分为定长纤维拉丝法和连续纤维拉丝法两类，因为热塑性玻纤增强塑料材料采用的玻璃纤维主要是连续纤维拉丝法生产，因而将此法的制造工艺流程列于图 1-4-24。

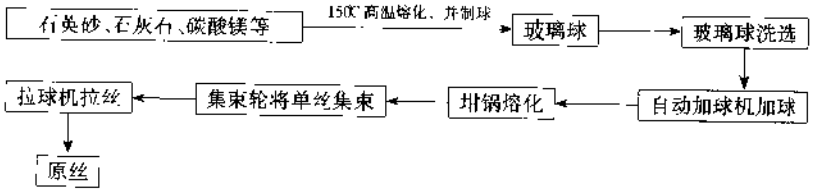


图 1-4-24 玻璃纤维拉丝工艺流程图

2）碳纤维

高强度、高弹性模量的新型碳纤维的出现特别引人注目，它已进入商品化生产，在热固性增强塑料中，碳纤维已有相当规模的应用，尤其是在宇宙、航空方面，发展其为迅速。由于汽车用塑料材料绝大多数为热塑性材料，因此目前碳纤维增强的塑料材料仍未应用于汽车制造行业。

碳纤维与玻璃纤维比较，它的特点是弹性模量高，在湿态下的力学性能保持良好，它导热系数大，导电性、蠕变性小，耐磨性好。表 1-4-51 为碳纤维与玻璃纤维的性能比较。

表 1-4-51 碳纤维与玻璃纤维的性能比较

项 目		单 位	碳纤维	无碱玻璃纤维
密 度		g/cm^3	1.8	2.54
弹性模量		MPa	210 000	74 000
拉伸强度		MPa	2 100	3 500
伸 长 率		%	1.2	4.8
导热系数		W/（m·℃）	8.6	0.98
纤维平均直径		μm	7.5	9～13
热膨胀系数	纵	1×10^{-6}/℃	-1.0	2.9
	横	1×10^{-6}/℃	17.0	7.2

碳纤维由有机纤维在高温下烧制而成，有机纤维指的是：人造丝、聚丙烯腈、沥青、木质素—聚乙烯醇等，其制造工艺有两种，如图 1-4-25 所示。

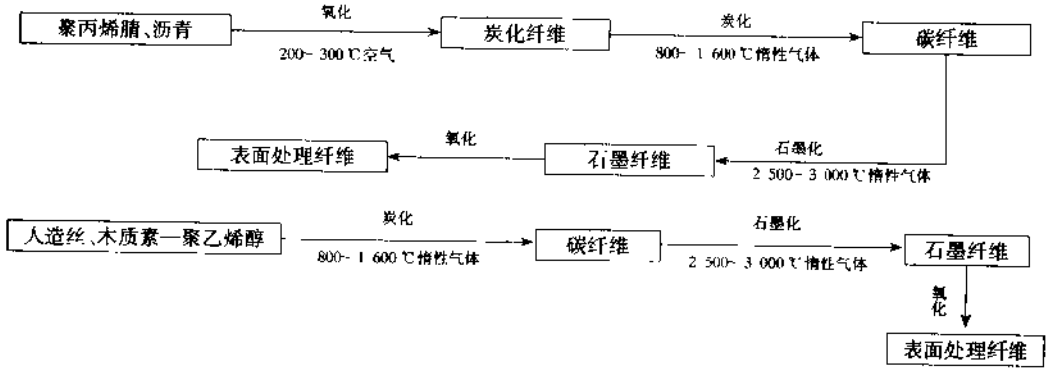


图 1-4-25 碳纤维的两种制造工艺流程图

（撰稿人：黄江玲）

1.4.5 粘接密封材料

1.4.5.1 汽车生产工艺用粘接密封材料

1）汽车用粘接剂、密封胶的分类

汽车用胶按照生产工艺过程主要分为汽车车身用粘接剂、密封胶；汽车内饰用粘接剂、密封胶；发动机底盘用粘接剂、密封胶和汽车零部件用粘接剂、密封胶。见表 1-4-52。

表 1-4-52 汽车用粘接剂、密封胶分类

车身用胶	内饰用胶	发动机底盘用胶	零部件用胶
点焊密封胶	顶棚粘接剂	结合面用液态密封胶	制动摩擦片用胶
折边胶	风挡玻璃粘接剂	管接头丝堵用密封胶	灯具胶
增强防振胶	风窗密封胶	螺纹件锁固密封胶	滤清器滤芯胶
指压密封胶	地毯粘接剂	工艺堵盖密封胶	油箱密封胶
焊缝胶	地板密封胶	浸渗堵漏剂	
抗石击隔热胶	车门防水膜用胶		
隔热阻尼胶板			

2）车身粘接剂、密封胶的应用

（1）车身焊装用粘接剂、密封胶

a. 折边粘接剂

汽车的车门、发动机罩盖和行车箱盖板等隔板部件通常是将内、外盖板经折边后点焊连接的。但是这种工艺使车身表面增添了许多由焊接而造成的凹坑，严重影响车身的外观质量，有些汽车制造厂家不得不把凹坑处用腻子修补平整，不仅增加了成本，也不适应大批量生产的要求。

为了解决这个问题，汽车制造商从 70 年代开始采用以粘接取代焊接的方法来生产汽车的车门、发动机罩、行李箱盖的折边结构，所使用的粘接剂称为折边粘接剂。目前汽车生产中使用的折边粘接剂主要有环氧树脂类、聚氯乙烯类金属粘接剂、聚丙烯酸酯类粘接剂等。

汽车生产中所使用的折边粘接剂必须具有良好的工艺性，加热不流挂，可以用涂胶机来挤涂，对涂胶工艺表面清洁度要求不严，在含油表面上有较好的附着性。经过预固化以后的工件，其剪切粘接强度要达到 2.0MPa 以上，最终剪切粘接强度达到 10.0MPa 以上。

b. 点焊密封胶

点焊密封胶是在焊接前涂布在钣金件搭接处的一种密封胶，对被密封冲压件的附贴性有比较严格的要求，点焊后间隙不得超过 0.3mm。

点焊密封胶几乎可以用于所有的车身焊缝处，尤其适用于焊装之后被零件遮蔽的或不宜涂布的焊缝密封胶的竖立缝隙，提高车身的抗腐蚀能力。

点焊密封胶从使用性能上可以分为膨胀型和非膨胀型两大类，按化学组成分，有合成橡胶类、合成树酯类，如以丁苯橡胶、丁腈橡胶为主体的和以聚酯树脂为主体配制的点焊密封胶。膨胀型点焊密封胶受热后体积可以膨胀到原来体积的 150%，可以密封较大的焊缝。

汽车生产中使用的点焊密封胶要求具有好的施工工艺性，在经过后序涂装工艺前处理时，不被冲洗掉，同时不能污染电泳液。点焊胶中不能含有机硅树脂成分，微量的硅树脂都会对电泳漆和面漆涂层质量造成危害。

c. 膨胀型防雾粘接剂在车身制造中的应用

车身覆盖件（如驾驶室顶盖、发动机罩、行李箱盖、车门、侧围等）的外板与加强梁之间存在着一定的缝隙，行车中可能因振动而产生噪声。

为了克服以上缺点，可以在焊装前将膨胀型防振粘接剂涂布在冲压外板与加强梁结合处的缝隙中，经过涂装烘干设备加热固化后，胶层受热膨胀将加强梁与盖板紧密地结合成为一个整体，避免在行车中外板及加强梁振动而产生噪声。

膨胀型防振粘接剂通常为液态膏状物，也有的制成胶带，在车身组件焊装过程中，将胶或胶带涂在或

汽车论坛 http://www.qclt.com

铺放在加强梁上，然后再组合焊接。对于施胶面积较小的可以选用液态的防振粘接剂，如果施胶面积大，则应选用防振胶带，以缩短操作时间。

d. 车身焊装中指压密封胶的应用

在车身焊装过程中，除了用到前面所述的粘接剂和密封胶外，还可以用到指压密封胶。所谓指压密封胶，实际上是一种密封腻子，用手指涂抹、压实在被密封工件的表面，主要用于车身焊装后所形成的较大缝隙、工艺孔等处。

指压密封胶通常以聚氯乙烯树脂为主体材料，加入增粘剂、增塑剂、填料等组成。无毒、无味，施工过程中不粘手，与涂装钢板有很好的附着性，在涂装线烘干炉中加热固化。

指压密封胶在密封较大工艺孔、缝上较焊缝密封胶有很大的优越性，涂布后及烘干过程中不流挂、不收缩，在客车、载货车驾驶室等生产中有广阔的应用前景。

(2) 涂装线用密封胶

①焊缝密封胶

焊缝密封胶是在车身焊装之后，涂在焊缝外表面的密封胶，既有密封防漏、增强车体防锈蚀能力的作用，又有填补焊缝，增加车体美观性的作用。

目前通用的焊缝密封胶主要有 PVC 型焊缝密封胶、橡胶型焊缝胶、聚氨酯焊缝密封胶等。

a. PVC 型焊缝密封胶

PVC 型焊缝密封胶是以聚氯乙烯树脂为主体材料，加入增粘剂、增塑剂、无机填料、触变剂等组成的一种均质糊状物，一般为单组份。有些密封胶生产厂家考虑到产品运输时间长影响贮存性能，而以双组份或三组份包装，使用前将各组份按比例混合，由专用的行星式搅拌机搅拌均匀后使用。混合均匀的 PVC 焊缝密封胶有三个月以上的贮存期。

PVC 型焊缝密封胶加热塑化后成为具有一定粘接强度的弹性体，密封性、耐挠曲性、耐化学试剂性能优异，与电泳漆有很好的结合力。广泛用于车身内、外焊缝的密封。

汽车用 PVC 焊缝密封胶要求比较高，首先要求其粘度适宜，能够用涂胶泵涂布。具有良好的触变性，在涂布后不流淌，经过加热塑化后外观平整、光滑，无裂纹。通用型 PVC 焊缝密封胶的剪切粘接强度大于 0.5MPa，拉伸强度大于 0.8MPa，断裂伸长率达 120% 以上，塑化后硬度为 50（邵氏 A 硬度）左右。

b. 橡胶型焊缝密封胶

目前常用的橡胶型焊缝密封胶有聚硫橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶、丁基橡胶、聚氨酯等类型。这类焊缝密封胶可以在室温或 80℃ 左右的温度下硬化，对于那些客车制造厂或不具备高温烘漆设备的中小型汽车制造厂，采用这类密封胶是非常恰当的。

聚硫橡胶型焊缝胶是以液态聚硫橡胶为主体材料，配以活性金属氧化物为固化剂，以及促进剂组成的二组份或三组份密封胶。由于聚硫橡胶的主链是饱和分子链，而且含有相当量的硫原子，所以配制的密封胶有良好的气密性和耐老化性，主链两端的硫醇基团与密封胶中的环氧树脂反应形成极性基团，增加了与焊缝的结合强度。

氯丁橡胶密封胶是汽车车体密封中常用的焊缝密封胶之一，它是以氯丁橡胶为主体材料，叔丁基酚醛树脂为增粘剂配制的单组份溶剂型密封胶，该胶对各种金属材料、涂装钢板及非金属材料具有良好的粘接性能，固化后的胶膜耐水、耐老化性满足使用要求。

氯丁橡胶密封胶通常是以单组份包装，适用于涂装烘干温度在 120℃ 以下的车型或汽车修配厂使用。由于胶中含有溶剂，固化后胶的体积收缩率比较大，如果溶剂挥发时间短，在加热烘干过程中可能出现鼓泡现象。固化后的氯丁橡胶密封胶，表面可以涂装。

聚氨酯密封胶是一种耐候性好，粘接性优异的密封材料，胶膜耐冲击、挠曲性好。因此后体积收缩率小。单组份聚氨酯密封胶有吸湿固化型和加热固化型两种，在国外高档客车车体、行李舱等处作为密封胶使用。

②抗石击、隔热阻尼涂料

即以沥青为主体材料的溶剂型隔热阻尼涂料，以合成树脂为主体材料的水基隔热涂料和以聚氯乙烯树

汽车论坛 http://www.qclt.com

脂为主体材料的无溶剂型抗石击阻尼涂料。

沥青基隔热阻尼涂料是以沥青为主体材料，加入隔热性能较好的石棉、硅石、珍珠岩等无机填料组成的溶剂型涂料，分为加热硬化型和室温自干型两种。

沥青基隔热涂料具有一定的本体强度，与车身底漆之间有很好的附着力，可以用于翼子板内侧、发动机罩内及车架、底板等部位，增加涂胶部位的耐腐蚀能力，起到隔热的作用。这种材料具有价格低廉、施工简便、隔热效果好的优点。但是也有明显的不足之处，即喷涂或刷涂后溶剂挥发造成环境污染比较严重，此外，其阻尼效果也较差。

水溶型隔热阻尼涂料是近几年开始采用的密封防锈材料，是以合成树脂为主要基材，填加隔热填料等组成的水性涂料。由于不含有机溶剂、无毒、无味、不燃，可以明显改善施工现场的操作条件，有利于保障工人的身体健康。同时，其隔热、阻尼性能优良，是一种很有前途的隔音、隔热阻尼材料。

60年代末期，无溶剂PVC塑溶胶在欧洲大陆出现，由于原料来源广泛、生产工艺简单、设备投资小，施工工艺性好，密封抗石击性优异而显现出广阔的应用前景。

无溶剂PVC型抗石击涂料的组成与PVC焊缝密封胶相似，因为不含溶剂，固体含量高，触变性能好，易于涂布，一次喷涂的厚度大，涂后不流挂，在130～160℃温度范围内可以塑化，而且与中涂或面漆涂层可以采取湿碰湿工艺施工，最终与油漆一起加热而不必单独设置烘干设备。PVC抗石击涂料塑化后与车身的附着力好，阻尼系数高，导热系数小，弹性大，柔韧性好，抗石击效果好，防锈能力强。

③防振隔热阻尼胶板

为了给汽车驾驶人员和乘员提供一个安静、舒适的环境，就要设法阻止噪声、热量及振动的传递，防振隔热阻尼胶板就是在汽车上担负此重任的材料之一。

防振隔热阻尼胶板一般是由合成橡胶、天然橡胶、再生橡胶、沥青、隔热无机填料等为主要原料制成的预成形片状材料，按其施工工艺分为热熔型、自粘型和磁性隔热阻尼胶板。

在轿车、旅行车、载货汽车驾驶室底板、前围、轮罩、行李箱等处均可放置隔热阻尼胶板，以减轻车身振动，阻止热量的传递、隔绝车外的噪声。

隔热阻尼胶板属于热熔型密封材料，通常在底漆烘干后铺放在预定位置，经过中涂或面漆烘干时受热软化，与被覆盖处的部件形状吻合并附贴，冷却后与车体牢固结合。这就要求在此温度范围及加热时间中，隔热阻尼胶板即能够软化而与被覆盖件的表面附贴，又不能过度软化而出现流淌，尤其是放置于垂直面或斜面部位的胶板，不能受热后滑落或出现流淌现象。在阻尼胶板背面涂布的压敏胶强度要高，耐热性好，在加热过程中不会失去粘性而使胶片滑落。此外，胶板要有很好的韧性，在弯折时不出现裂纹或断裂。胶板的防振、隔热、阻尼性好，损耗因子高，受热时不会放出有毒、有害气体，不出现鼓泡现象。

在平面部位放置的隔热阻尼胶板一般为热熔型，垂直面或倾斜面贴放的隔热阻尼胶板有两种选择，一种是背面有预涂压敏胶及防粘膜的隔热阻尼胶板，确保胶板受热与工件结合前位置不会变化。另一种是磁性隔热阻尼胶板，是在胶板制做过程中加入磁性材料并经过充磁处理后，使胶板带有磁性力，可以与钢板以磁性暂时附贴，在经涂装烘干室受热过程中不会滑移。

3）汽车装饰用粘接剂、密封胶

从70年代初期开始，汽车装饰材料逐步采用能够吸收冲击能量，减缓撞击的塑料、泡沫、织物、橡胶等非金属材料来制造车门扶手、靠背、枕垫、顶棚、仪表板、门内板等，皮革、合成革、纤维板、毛毡等，材料的组合及装配需要用不同的粘接剂和密封胶。

（1）顶棚、后围、侧围等内饰件装配用胶

顶棚、后围等与顶盖等工件的粘接所用的粘接剂主要有氯丁橡胶粘接剂、丁腈橡胶粘接剂、水基丙烯酸酯粘接剂等。

溶剂型粘接剂起始粘接强度高，粘接性好，但由于含有溶剂，粘接后的工件残留有溶剂气味，污染环境。而水基粘接剂具有无毒、不燃、无污染的特点，受到国外汽车制造厂商的欢迎。

顶棚内饰材料还可以用预涂压敏粘接剂来粘接。即在顶棚内饰材料生产时就把压敏粘接剂预涂在顶棚的背衬上，然后再用隔离纸或隔离膜覆盖以便运输和使用。装配时无需现场涂胶，只要揭去隔离纸即可进

汽车论坛 http://www.qclt.com

行粘接，既节省了时间，加快了生产节拍，又可避免现场涂胶对环境的污染。用于顶棚粘接的预涂型粘接剂必须具有良好的耐热性，耐老化性和粘接耐久性，防止顶盖受热时粘接剂失去粘接力而使内饰材料脱落。

热溶型粘接剂也可以做为一种顶棚粘接剂及内饰粘接剂使用，可采用湿气固化型热熔粘接剂，只有2～3min的粘接有效期，粘接后1h即可达到最终强度的60%，其施工温度为120℃，固化后可以耐温170℃，满足内饰用胶耐热性的要求。

(2) 车内隔热毛毡、地毯的粘接

汽车车内地板上部、前围、顶盖、仪表板下部等处，为了达到隔热、吸收振动噪声等目的，需要放置隔热毛毡。由于溶剂型粘接剂需在毛毡和车体分别涂胶、晾置之后方能粘接，费工、费时、且有污染。使用预涂压敏粘接剂和热熔型压敏粘接剂来粘接是最佳的方法。如泡沫热熔胶工艺，是将普通热熔胶在熔化状态下加入N_2或CO_2等惰性气体混合后再喷涂到隔热毛毡的背面。比通用方法减少用胶量50%左右。

(3) 汽车风窗玻璃粘接剂、密封胶

传统的汽车风窗玻璃装配方法是采用橡胶密封条将玻璃固定在窗框上，为了防止雨水渗入，在密封条与玻璃之间要填充不干型密封胶。

这种车窗玻璃密封胶主要是以丁基橡胶为主体材料、添加少量的聚异丁烯橡胶制成的。使用中不会出现干固现象，保持粘性，具有耐热、耐水、耐老化性，在日晒、雨淋下不会流淌。

目前，高档汽车及轿车的风窗玻璃开始陆续采用D/G（即直接粘接）的工艺来装配，将玻璃直接粘接在窗框上，这种结构既能够增加车身整体刚性，提高密封效果，起到保证乘员安全的作用。

车窗玻璃直接粘接用单组份聚氨酯胶一般包括清洗剂、玻璃底胶、漆面底胶和粘接剂。其剪切强度大于50MPa，扯断强度大于6.0MPa，断裂伸长率在300%以上。

用单组份聚氨酯粘接剂粘接车窗玻璃前，要先用清洗剂将玻璃欲涂胶处擦净、晾干。将玻璃底胶和漆面底胶分别涂在玻璃和涂漆窗框上，晾置3～5min之后，用挤胶枪将粘接剂涂在玻璃底胶上，涂胶后马上进行玻璃装配，并用适当的器具固定。

4) 发动机、底盘用粘接剂、密封胶

粘接剂、密封胶在发动机、底盘装配中主要用于平面（如油底壳、变速器、后桥壳等）的密封、孔盖的密封，装配螺栓的锁紧防松，各种管接头处的密封等，以防止润滑油、燃料油、水、气的泄漏、螺栓的松动等。

(1) 带有垫片的平面部位的密封

后桥壳、变速器侧盖、水泵等有密封垫片的平面部位，为了提高密封效果，通常可以选用溶剂型干性或非溶剂型不干性密封胶与垫片配合使用。使用液态密封胶以后，可以降低对零部件接合面加工精度的要求。

与垫片并用的液态密封胶很多，如铁锚605、GYM—1液态密封胶、MF-2密封胶等不干性的密封胶，也有LG—31高分子液态密封胶、HZ—1213耐油密封胶等半干性粘弹型密封胶以及YH—24R等干性密封胶。

目前还有一种含密封胶的纸质垫片，是将一定形状的垫片预先浸以满足要求的密封胶液，在装配过程中由于受到紧固力的作用，使浸入到纸垫中的密封胶重新释放出来，填满缝隙，起到与现场涂刷密封胶相同的作用。

(2) 无垫片平面的密封

没有密封垫片结合平面的密封，通常选用半干性粘弹型密封胶，如单组份室温硫化硅酮密封胶是比较常用的一种。

在发动机油底壳、变速器侧盖、后桥壳等平面部位涂布有机硅密封胶，可以取消垫片，直接用密封胶密封。该密封胶耐热性好，耐介质、耐老化、施工工艺性能优异。

(3) 厌氧密封胶的使用

厌氧密封胶是发动机、底盘装配中不可缺少的锁固、密封材料，具有良好的密封性、固持性和耐热

汽车论坛 http://www.qclt.com

性，固化速度快，涂布工艺简便，可以用于螺栓的密封紧固、孔盖的固持以及平面的密封。厌氧胶分为低强度、中强度、高强度几类，也可按粘度分为低粘度、中粘度、高粘度和触变性几类。

液态厌氧胶为单组份、无溶剂型密封胶，一旦隔绝空气后，在金属离子的催化作用下发生化学反应形成聚合物，粘接强度高，其工作温度为－54～149℃，短时在180℃下工作仍不丧失密封性能，最大填充间隙为0.10～0.50mm。应根据欲锁紧密封部位的强度要求、密封间隙，是否要拆卸等来选择强度、粘度适宜的厌氧胶。

厌氧胶微胶囊是一种特殊的螺纹锁固密封胶，是将厌氧胶用极其微小的壳体包裹起来制成胶囊，直径在5～500mm之间，其作用及性能与液态厌氧胶相同，但却可以在紧固件生产厂或专门的涂胶厂将厌氧胶微胶囊预先涂布在紧固螺栓的螺纹上，成为一种自锁固、自密封、自防锈的紧固件，使用简便，可靠性高，既能节省时间又可以避免现场涂胶中浪费现象，确保涂胶尺寸及均匀程度。

预涂有微胶囊的螺栓可以在库房中长期存放，装配时拧入螺纹孔内，胶囊受到挤压破裂而释放出厌氧胶液，与粘附剂中所含的促进剂作用而迅速固化，起到锁紧、密封作用。

厌氧胶的固化物能够完全填满啮合螺纹件的间隙，因而不仅对通孔螺栓起紧固作用，还起到良好的密封效力。而普通螺栓不论螺纹加工精度多高，螺栓与螺母啮合也只能是点线接触，在行车振动的影响下，接触点发生磨损，接触面积减小，螺栓发生松动现象。而涂布厌氧胶或厌氧胶微胶囊的螺栓装配后，由于厌氧胶固化物的存在，使接触面积几乎达到了100%，避免螺栓发生松动。

5）汽车零部件用胶

（1）浸渗堵漏剂

汽车制造中所需要的一些零件，如发动机缸体、变速器壳体、缸盖、进气歧管、水泵体、制动管接头等都是铸件，在铸造过程中难免出现个别零件组织缺陷或疏松的现象，如砂眼、细小的裂纹等，致使零件报废。为了减少浪费，可以采用真空浸渗堵漏工艺弥补铸件缺陷，使用的浸渗剂有无机硅酸盐型、厌氧性和聚酯型。碱金属硅酸盐无机浸渗剂，具有成本低、浸渗效果好，时间短等优点。对铸铁、铸铝及铝合金件浸渗效果良好。

厌氧胶真空浸渗技术是国外70年代用于工业生产的新技术，由于密封质量好，浸渗的一次成功率高，用胶量较无机浸渗胶节省85%，没有固化溢出现象，所以对工件不污染，密封质量稳定可靠。

热水固化型树脂是一种含有多种单体的浸渗密封剂，可以在接近沸腾的水中固化。其浸渗设备简单，可以浸渗密封气孔较大的铸件。它不需要催化剂、洗涤剂和固化剂、零件表面的附胶很容易用清水洗掉。清洗后的工件在90℃热水中固化4～10min即可。

聚酯类浸渗剂主要用于微小气孔的密封堵漏，浸渗一次合格率比无机浸渗胶高得多，工作温度高（可达260℃），耐压性好，但是需要加温固化，气味也比较大，有毒，浸渗设备价格较高。

（2）车灯粘接密封胶

汽车车灯灯栅与反射镜的组装，长期以来，一直沿用机械固定的橡胶密封圈密封的方式。采用这种工艺会出现反射镜变形，使光线照射出现偏差，还容易出现密封件老化，水汽侵入灯内，缩短了灯的使用寿命。

现在汽车大量采用塑料反射镜和聚碳酸酯等透明塑料制造灯栅，就要求使用粘接剂来装配车灯。

车灯用粘接剂主要有环氧树脂型、聚氨酯型，还有热熔型粘接剂。热熔型车灯粘接剂不含溶剂，不含破坏灯栅材料性能，耐振动、耐水、粘接速度快，有很好的应用前景。

（3）滤清器滤芯用胶

汽车发动机用燃油滤清器、机油滤清器、空气滤清器的滤芯通常是由上、下端盖、芯筒、滤纸组成，而滤纸与端盖之间则必须通过粘接剂来连接。

目前滤清器用粘接剂主要有以聚氯乙烯树酯为主体的单组份滤芯胶，双组份聚氨酯粘接剂、环氧树脂粘接剂等。这类粘接剂耐介质性好，耐热性优良。其中PVC滤芯胶工艺性能好，可以同时涂在上、下端盖上，一并经烘道加热使其固化，在装配及加热过程中不会出现胶液流挂现象。

（4）制动蹄片、离合器片用粘接剂

汽车论坛 http://www.qclt.com

采用粘接工艺生产制动蹄片、离合器片与机械固定方法比较，成本低、能耗小，摩擦片的有效厚度利用率可以提高20%～50%，而且由于粘接剂具有阻尼、减振作用，以粘接剂粘接的刹车片使用中噪声小。

制动蹄片用粘接剂属于结构用胶，不仅强度高，而且耐热性要好，在250℃高温下，仍要保持足够的强度。常用的有丁腈橡胶和酚醛树脂配制的J—04、YH—240等，另一类是改性环氧树脂粘接剂，固含量为100%。其固化条件为180℃×2h。对制动蹄和摩擦片要在粘接前进行表面处理。对表面进行活化，包括物理方法和化学方法。

(5) 汽车油箱用密封胶

载货汽车的燃油箱由钢板冲压、折边组合制成，如果折边结构密封不严，则可能出现燃油渗漏，既造成浪费，又污染环境。为了解决这个问题，在生产油箱时，通常在燃油箱的折边咬口部位涂布耐油密封胶以密封缝隙。

汽车燃油箱用密封胶必须经过耐汽油、柴油等车用燃油的试验，通常为室温下可以自行固化的胶粘剂，密封后要经过注水压力试验确保不漏后方可出厂。

1.4.5.2 汽车用粘接剂密封胶的基本组成与制造工艺

汽车用粘接剂、密封胶随使用部位要求不同，其组成也不相同，制造工艺要求当然也是多样化。

1) 粘接剂密封胶的基本组成

粘接剂、密封胶是由组成成分中的主体材料和辅助材料决定其物理化学性能的。主体材料一般是具有流动性的液态化合物或是能在溶剂、分散剂、热、压力参与作用下具有一定流动性的物质。如环氧树脂、酚醛树脂、丙烯酸酯树脂、脲醛树脂、不饱和聚酯树脂、有机硅树脂等树脂；氯丁橡胶、丁腈橡胶、天然橡胶、丁苯橡胶、丁基橡胶、聚硫橡胶等橡胶。辅助材料主要有溶剂、固化剂、偶联剂、增塑剂、填料、引发剂、促进剂、防老剂、触变剂、稳定剂、乳化剂、增粘剂等。

表1-4-53列出了几种不同用途粘接剂、密封胶的基本组成。

表1-4-53 粘接剂、密封胶基本组成

粘接剂 密封胶 / 原材料	粘接剂		点焊胶		车身密封胶	外板补强胶(A)	外板补强胶(B)	结构粘接剂(A)	结构粘接剂(B)	聚氨酯	丁基橡胶	减振胶	减振胶条	热熔胶	水基胶	热熔丁基胶	溶剂型橡胶	树脂系列	FRP用胶
	溶剂型	无溶剂型	膏状物	条状物															
CR、SBR、NBR	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	○	—	—	○	○	—	—
PU橡胶	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—
PVC树脂	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
聚氨酯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	○
多元醇树脂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
环氧树脂	—	—	—	—	—	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
乙烯、醋酸乙烯	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—
酚醛树脂	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—

续上表

粘接剂/密封胶 / 原材料	粘接剂		点焊胶		车身密封胶	外板补强胶(A)	外板补强胶(B)	结构粘接剂(A)	结构粘接剂(B)	聚氨酯	丁基橡胶	减振胶	减振胶条	热熔胶	水基胶	热熔丁基胶	溶剂型橡胶	树脂系列	FRP用胶
	溶剂型	无溶剂型	膏状物	条状物															
合成胶乳	—		—	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	○	—	—	—	—
潜伏固化剂	—	—	—	—	—	○	○	○	○	—	—		—	—	—	—	—	—	—
交联剂	○	○	○	○	○	—	○	—	○		—		—	—	—	—	—	—	—
引发剂	—	—	—		—		—		—	○		—		—	—		—	—	—
热稳定剂	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
发泡剂	—	—	○	○	—	○	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
增粘剂		○	—	—	○	—	—	—	—		○	○	○	○	—	○	—	—	—
填 料	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○
颜 料	—	○	—	—	—	—	—		—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—
增塑剂	○	○	○	○	○	—	○	—	—	○	○	○	○	○	—	○	—	—	—
溶 剂	○	—	—	—	—	—		—	—	—	○	○	—	—	—		○	○	—
其它助剂	—	—	—	○	—	○	○	○	○	—	○	—		○	○	—	○	○	○

表中○代表含有该种原材料成分。

2）粘接剂密封胶的制造工艺

粘接剂、密封胶要通过对原材料进行合成反应、改性、配合、混合加工等工艺过程制成成品，这些工艺过程大都在搅拌混合设备中进行的。目的是使原料反应合成为主体树脂或橡胶、使各组份充分混合均匀、溶解、溶胀等。

反应、混合搅拌装置的结构、式样、容量可以根据产品的性质、流动性及制造工艺来确定。下面简介几种粘接剂、密封胶生产工艺。

（1）素炼

主要用于天然橡胶、再生橡胶及合成橡胶。它是通过机械方法将橡胶进行撕裂、切断，并不产生热量，进而使橡胶中的基团与空气中的氧发生反应而降低其分子量，降低材料的弹性，提高可塑性和溶解性，以利于下道工序的操作。素炼所用的设备有二辊开炼机和密炼机。

（2）混炼

混炼是将所需的辅助材料（如硫化剂、促进剂、抗氧剂、填料等）混合到已经过素炼的橡胶中的过程。所用设备一类是与素炼设备相同，另一类是能够溶解、混合高粘度或固态物质的机械。

（3）合成

粘接剂、密封胶主体材料很多是要由原材料合成反应制得，如环氧树脂、不饱和聚酯树脂、聚氨酯、乙烯-醋酸乙烯聚合物等。合成设备包括反应釜、加热装置、回馏装置、贮料装置，减（加）压装置等。合成设备必须能够保证从原料投放、反应开始、反应中间过程直到反应终了的整个过程能够进行温度、压力、时间的控制，确保产品质量。

汽车论坛 http://www.qclt.com

(4) 熔融

在制造热熔型粘接剂时，需要将热塑性树脂、橡胶、增粘剂、蜡等在加热熔融的状态下混合制造，其设备为带有加热装置、搅拌装置的罐或槽。

(5) 溶解、混合

以橡胶或树脂为主体材料的溶剂型需要有一个溶解混合工艺过程。所需的溶解、混合设备大都是带有搅拌器的溶解罐或槽。搅拌方式有桨式、刮板式、涡轮式、圆板式等多种。对于制品粘度特别高时，必需采用具有搅拌器能承受大扭矩作用的捏合机，可以产生剪切、压延、撕拉、压缩等多种动作作用于被混合物质，使之在溶剂中充分溶解并混合均匀。如氯丁腻子就需使用捏合机制备。

(6) 减压、搅拌混合

对于有些合成反应的原料要去除水分，则要使用减压搅拌混合装置。有些产品在搅拌中混入气体，影响使用，也要通过减压搅拌脱除气体，如PVC车底涂料及焊缝密封胶的生产工艺过程中，就要经过减压搅拌混合。

(7) 成形

成形是指热熔型的材料或制备胶带（条）的混炼橡胶及其它材料用模具或口模制造出所需形状和尺寸的过程。所用设备为挤出机或压延装置。

(8) 过滤

过滤是除去制造过程所产生的或混入的杂质的过程。

表1-4-54列出了几类粘接剂、密封胶的制造工艺简介。

表1-4-54 粘接剂、密封胶制造工艺

工艺 \ 种类		无溶剂膏状粘接剂	点焊胶	外装饰板增强粘接剂	结构粘接剂	车身密封胶	条状密封胶	热熔胶	溶剂型树脂系
制造工艺	素炼	○	○	○	○	○	○		
	混炼	○	○	○	○	○	○		
	熔融							○	
	溶解、混合	○	○	○	○	○	○		○
	减压搅拌混合			○			○		
	过滤	○	○		○	○		○	○
	填充	○	○		○	○		○	○
	包装	○	○	○	○	○	○	○	○
	制品	○	○	○	○	○	○	○	○

○——为采用此工艺。

1.4.5.3 植物性纤维合成材料的应用

为了保持汽车工业的持续发展，促进农林业产品的增值，植物性纤维合成材料——如用竹黄片和树脂粘结的竹胶板制造车箱底板，在一汽、东风汽车公司、南汽等汽车厂已广泛应用，用木纤维和木屑制造的及用麻纤维树脂粘结的薄板，已用于汽车的内饰板，此外用椰壳纤维和棕树纤维合成的材料在汽车上的应用，也应引起重视。（撰稿人：韩建国）

汽车论坛 http://www.qclt.com

参 考 文 献

1.З. Е. Фельдштейн. Обрабатываемость Сталей. Машгиз. 1953.

2.Chapman. R. D. and Jommy W. E. A Test for measuring Crack Sensitivity of Engineering Alloy Steels. Metal Progress. 1953.

3.Sachs. K. Avoidance of Distortion in Heat Treatment. Metal Treatment and Drop Forging. 1961 July.

4.Holappa, L. E. K. and Helle A. S. Inclusion Control in High-Performance Steels. Journal of Material Processing Technology. 1995.

5.Väinöla R. V. Holappa, Kavvonen P. H. J. Modern Technology for Special Steels. Journal of Material Processing Technology. 1995.

6.Pytel S. M. Garcia and Deardo A. J. Qantitiative Assessment of the Influence of Calcium Additions on Tool wear in 8620 Steel. SAE Paper. 930965.

7.Naylor D. J. The Future for Engineering steels. Ironmaking and Steelmaking. 1990. Vol 7. No1

8. 姚贵升. 渗碳钢的强度. 北京：机械工业出版社，1960.

9.Geoffrey Parrish. The Influence of Microstructure on the Properties of Case-Carburized Components. ASM. 1980.

10.Takeshi Naito. Hideo Veda and Masao Kikuchi. Fatigue Behavior of Carburized Steel with internal Oxides and Nonmartensitic Microstructure Near the Surface. Metallurgical Transactions. 1984 July.

11.Johnson Robert J. and shelton charles H. Progress Report on Nickel Carburizing Steel. Metal Progress. 1973.

12.Cohen R. E.、Haagensen P. J.、Matlock D. K.and Krauss G.Assessment of Bending Fatigue Limits for Carburized steel. SAE Paper 910140.

13.Seung-cheal Jung, Medlin D. J.and Krauss G.Effect of subzero Trestment on the Fatigue Performance of Carburized SAE 4320 and SAE 9310 steels. SAE Paper 960313.

14.ASTM Designation A914/A914M-92 Standard Specification for Steel Bars to Restricted End-Quench Hardenability.

15.ASTM Designation A304-90 Standard Specification for steel Bars, Alloy Subject to End-Quench Hardenability, Requirement.

16.Sponzil John T and Walter Gordon H. W.. Development of Restricted Hardenability Band Steels. SAE Trans. 1987

17.Гост 4543-71 СТалъ Легированная Конструкцдионная Марки и Технические Требования.

18.JISG 4052 (1979) Structural Steels with Specified Hardenability Bands.

19.GB 5216—85 保证淬透性能结构钢技术条件.

20.DIN 17210 1986 Sept. Einsatzstähle Technische Lieferbedingungen.

21.French H. J.、Millor O. M.and Sands J. W.. Some Aspects of Hardenable Steel. Trans. AIME. 1956.

22.Grossmann A. M.. Handenability Calculated from Chenical Composition. Metals Technology. 1942 June.

23.Grossmann A. M.. Element of Hardenability. ASM. 1952

24.ASTM Designation A 255-89 (Reapproved 1994) Standard Test Method for End-Quench Test for Hardenability of Steel. Appendixes xz Method for Calculating Hardenability from Composition.

25.DIN En 10083 1991 Oct. Vergütungsstähle.

26.Korchynchy Michae., Panls John R. Microalloyed Forging Steel-A State of the Art Review. SAE Paper.

汽车论坛 http://www.qclt.com

890801

27. Hirotada Osuzu and Tetsue Shiraga, Keishuro Tsujimura. Hiroshi Kido, Yukiyasu Shiroi and Yoichi Taniguch.. Application of Microalloyed Steel to Achieve Toughness in Hot Forged Components Without Further Heat Tresment. SAE Paper 860131.

28. Ichie Nomura, Yaichi Kawase and Yoshiharo Wakikado, Chikatoshi Maeda, shigeru and Hideo Ihikawa. High Toughness Microalloyed Steel for Vital Automotive Parts. SAE Paper 890511.

29. Hideaki Kuratomi and Minoru Uchino; Yutaka Kurebayashi, Kunio Naruki and Saburo Sugiura. Development of Lightweight Connecting Rod Based of Fatigne Reststance Analysis of Microalloyed Steel. SAE Paper 900454

30. Takayo chiba, Masaki Miyamoto, shozo Ikeshita, Kaneaki Hamada, and Toshio Satoh. Effect of alloying Element on Strength and Toughness of Microalloyed Steels. SAE Paper 960310.

31. Seung-Taik Oh, Won-Suk cho, Eung-Keun Jo, and Do-Chen Hwang. Fracture Behavior of Medium Carbon Microalloyed Steel for Automotive Components. SAE Paper 960311

32. Won. Suk Cho; Kun-Sang Kim, Eung-Keum To, and Seung-Taik Oh. Development of Medium Carbon Microalloyed Steel Forgings for Automotive Components. SAE Paper 940785

33. Sadayuki Nakamura, Kohki Mizuno, Tashihiko Matsubara and Yasunori Sato. Development of High Fatigue Strength Free Machining Microalloyed Steel for Connecting Rods. SAE Paper 930619

34. ASTM Designation A920/A920M-93, Standard Specification for Steel Bars, Microalloy, Hot-Wrought, Special Quality Mechanical Properties.

35. (日) 自動車技術會編. 自動車技術ハニドブック. 東京: 精興社, 1992.

36. 当代汽车. 天津中国汽车技术研究中心. 1990. (2) ～, 天津: 汽车技术研究中心, 1990.

37. 马鸣图, 李志刚. 汽车弹簧的失效与预防对策. 失效分析文集. 中国机械工程学会, 1993.

38. 当代汽车. 天津中国汽车技术研究中心. 1991. (5) ～, 天津: 汽车技术研究中心, 1990.

39. 张英会等. 弹簧手册. 北京: 机械工业出版社. 1997.

40. YB9—68 高碳铬轴承钢

41. YB (T) 1—80 高碳铬轴承钢

42. GB 3203—82 渗碳轴承钢

43. GB 3086—82 高碳铬不锈轴承钢

44. YB 688—76 高温轴承钢

45. YB 1205—80 高温不锈轴承钢

46. ASTM A535—85 特殊质量级滚珠和滚柱轴承钢

47. JIS G4805—90 高碳铬轴承钢钢材

48. JB 1255—91 高碳铬轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件

49. ASTM A756—90 耐磨轴承用不锈钢

50. JB/T 1460—92 高碳铬不锈滚动轴承零件热处理技术条件

51. 日本热处理技术协会. 热处理指南. 北京: 机械工业出版社, 1987.

52. JB/T 2850 Cr4Mo4 高温轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件

53. ASTM A600—89 高速工具钢

54. 王昌生、谢亚庆、周德光. 我国轴承钢生产的发展.' 93 年中国轴承钢论文集.

55. ASTM A485—91 高淬透耐磨轴承钢

56. 王昌生等 (大冶钢厂). 50T 电弧炉轴承钢生产的新进展.' 93 年中国轴承钢论文集

57. VAD 真空精炼 GCr15 轴承钢冶金质量大冶钢厂. 1982 年内部资料

58. 王杰君、叶健熠 (洛洛轴承研究所). 轴承钢材质和接触疲劳寿命的研究.' 93 年中国轴承钢论文集

汽车论坛 http://www.qclt.com

59. 碳化物超细化处理对轴承钢接触疲劳寿命和耐磨性能的影响．北京钢铁研究院、大冶钢厂．1982.
60. GB1221—92 耐热钢棒
61. R Mueller, R, weintz Ventilwerkstoffe fuer VerbrennugsmotorenMat. -u. Werkstofftech 29. 97～130. 1998.
62. 林直義．自動車技術ミソース——自動車の材料技術．日本自動車技術會．1997.
63. GB/T 12773—91 发动机气阀钢技术条件
64. 徐君浩．21-4N 阀门钢的一些工艺和性能问题．大冶钢厂钢研所内部报告．1980.
65. W. Nennmann. J. Koc.s. Selection of Materials for linternal combustion Engine Valves TRW Valve Division 1986.
66. 陈世堂、何清坤．Y35M 易切削钢的研制上钢五厂内部资料．1994.
67. Elliots. Nachtman Free-Machining Steels Machine Design Vol 39 NO. 29 1967. 12
68. 日本大同特殊钢 大同の铅快削钢 DAIDO STEEL NO. SD8101
69. 羊秋林．汽车零件设计与材料选用．重庆汽车研究所．1996.
70. 何维勤、陈厚发、吴殿宗．含微量钙易切削钢（40CrCa）的切削性能试验，南汽技术情报．1980.
71. 约．盖勒．工具钢．周倜武等译．北京：国防工业出版社，1983.
72. SAE Hand Book 8 Tool and Die Steels SAE J4386 SAE J437a 1982
73. 本书编委会．合金钢钢种手册．第三册．北京：冶金工业出版社，1983.
74. 吴元昌．国外真空热处理应用情况．工具展望．1993.2
75. 美国金属学会．金属手册，第九版，第七卷，粉末冶金，北京：机械工业出版社，1994.
76. 中华人民共和国机械工业部．粉末冶金工艺学，第 1 版，北京：科学普及出版社，1987.
77. 本书编委会．机械加工工艺手册．第 1 卷，北京：机械工业出版社，1991.
78. 本书编委会．汽车设计标准资料手册（非金属篇），天津：天津科学技术出版社，1994.
79. 本书编委会．橡胶工业手册（1～3 册）．北京：化学工业出版社，1992.
80. 本书编委会．塑料橡胶加工助剂．北京：化学工业出版社，1983.
81. 橡胶参考资料，西北橡胶研究所，1993
82. E.G. Simler, Engineering Materials and Methed, The Institution of Mechanical Engineers, Lodon, 1977.
83. Robert M. Brick, Alan W. Pense, Robert B. Gordon《Stucture and Properids of Engineering Materials》Mcgraw-Will Book Company New York, 1977
84. 汽车常用非金属标准资料手册，东风汽车工程研究院，1996.
85. 勃．阿．多加德金．橡胶化学与物理．北京：高等教育出版社，1959.
86. 周敬恩、金志浩．非金属工程材料．西安：西安交通大学出版社，1987.
87. 李玉英．高分子物理及化学．北京：化学工业出版社，1996.
88. ASTM Standards "Rubber, Notural and Synthetic-/General Test Methods/Carbon Black", 1982
89. ASTM D 2000/SAE J 200 "Clessififcation for rubber Materials" 1994.
90. ASTM D 3182 "Standard Practice for Rubber-Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheetd"
91. 王树强．涂料工艺．第 3 分册．北京：化学工业出版社．1996.
92. 居滋善．涂料工艺．第 4 分册．北京：化学工业出版社．1994.
93. 吴涛．汽车涂料材料的现状与发展．中国化工报．第 1967、1968 期，1998.
94. 本书编委会．汽车设计标准资料手册．非金属篇．天津：天津科学技术出版社，1995
95. 章学平．热塑性增强塑料．北京：轻工业出版社，1995
96. 中国机械工程学会铸造专业学会．铸造手册第一卷、第二卷。北京：机械工业出版社，1993.
97. 美国金属学会．金属手册第九版第一卷．北京：机械工业出版社，1988.

汽车论坛 http://www.qclt.com

98. 支德瑜等．英国铸铁研究学会资料译文集．东风汽车公司，1992.
99. 上海经济区铸造协会．日本现代铸造技术．上海经济区铸造协会，1990.
100. 黄惠松等．蠕墨铸铁．北京：清华大学出版社，1982.
101. 锐群章等译．高质量球铁的生产方法和保证．BCIRA专题资料．东风汽车公司铸造学会，1993.
102. 中国机械工程学会指导性技术文件．铸态珠光体球墨铸铁及铸态铁素体铸铁生产工艺技术条件．1992.
103. 中国机械工程学会铸造专业学会．铸造手册．北京：机械工业出版社，1993.
104. 武恭，姚良均，李震夏，彭如清，赵祖德等．铝及铝合金材料手册．北京：科学出版社，1994.
105. 孟少农．机械加工工艺手册．第1卷第2章．北京：机械工业出版社，1991.
106. 安继儒．中外常用金属材料手册．西安：西安交通大学出版社，1990.
107. 长春汽车材料研究所编写组．机械工程材料手册．第四版．有色金属材料．北京：机械工业出版社，1991.
108. 中国标准出版社第三编辑室．铸造标准汇编．铸造有色金属．北京：中国标准出版社，1997.
109. 李传榘．铸造工程师手册．北京：机械工业出版社，1997.
110. 李震夏等．世界有色金属材料成分与性能手册．北京：冶金工业出版社，1992.
111. 美国金属学会．金属手册．第九版第二卷．北京：机械工业出版社，1994.
112. 钱知勉．塑料性能应用手册．上海：上海科学技术文献出版社，1990.
113. 李尹熙、骆秀云．汽车塑料应用手册．北京：机械工业出版社，1991.
114. 郭锺福、郭玉琰．合成材料手册．上海：上海科学技术出版社，1991.
115. 罗河胜编．塑料材料手册．广州：广东科技出版社，1995.
116. 程树祥．工程塑料应用手册．南京：江苏科技出版社，1994.
117. 周一兵．汽车粘接剂密封胶应用手册．天津：中国汽车技术研究中心，1995.
118. 彭福泉．机械工程材料手册．北京：机械工业出版社，1995.

汽车论坛 http://www.qclt.com

2 加工技术

2.1 铸 造

2.1.1 概述

铸造可制成各种尺寸和复杂形状的零件。例如，排量为3.3L的发动机缸体与缸盖连铸在一起的六缸整体铸件；东风汽车公司的一种柴油机，水泵壳、机油泵壳以及机油冷却器壳皆与缸体铸在一起，进气管则与缸盖铸在一起。

汽车用铸件的特点是壁厚薄、形状复杂、尺寸精度高、强度高、重量轻、可靠性好等。铸件总质量一般占汽车自身的15%～25%，例如，总质量约4 000kg的EQ1090E载货汽车，铸件质量即达1 100kg。随着汽车的轻量化，铸铝件已占轿车用材的6%～10%。随着铸造技术的不断发展，铸件的应用范围继续扩大，过去普遍采用锻件的曲轴、凸轮轴、连杆、齿轮、转向节等零件，也不断地被铸件取代。

汽车行业铸造的技术水平，在大量流水生产中往往居领先水平。多数汽车工厂都有自己的高水平铸造厂，生产缸体缸盖类的复杂而重要的铸件，以确保品质。中国是一个铸造大国，但铸造厂家分散、规模小，在技术与质量上总体落后。尽管有些技术含量低的铸件出口，但也有不少关键铸件还需要进口。

2.1.2 铸造工艺及设备

铸件生产的工艺方法及设备很多，主要区别于铸型种类、制成材料、相应的金属液充填形式和金属在型中凝固与冷却条件等。用途最广的是砂型铸造，与砂型铸造有显著差别的其它铸造方法统称为特种铸造。汽车用铸件常用的特种铸造方法有熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、离心铸造以及消失模铸造等，还有一些特种铸造方法目前在汽车铸件大量生产中采用较少，例如挤压铸造、陶瓷型铸型、石膏型铸造、连续或半连续铸造以及真空吸铸等等。

铸造工艺主要工艺过程为造型→浇注→凝固与冷却→落砂→去浇冒口→清理→检查入库等。图2-1-1为大量生产砂型铸造工艺流程。

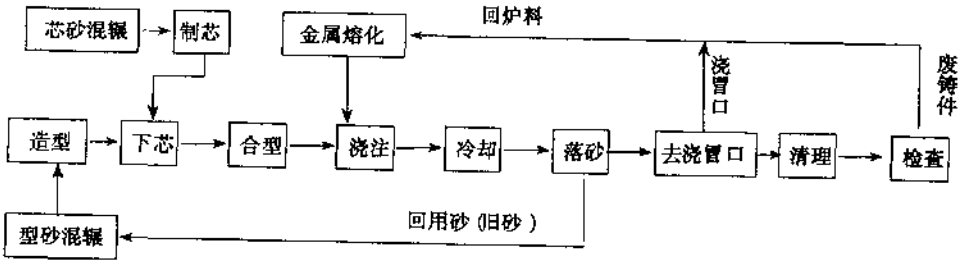


图2-1-1 大量生产砂型铸造工艺流程

下面按砂型铸造和特种铸造两大类铸造工艺及设备进行介绍。

2.1.2.1 砂型铸造

砂型铸造又分湿砂型铸造、壳型铸造、组芯造型铸造、自硬砂型铸造等，其共同特点是铸型主要由砂与粘结剂组成。它适用于铸铁、铸钢、部分有色金属及其合金。由于它可生产尺寸、重量、复杂程度不同

汽车论坛 http://www.qclt.com

的铸件，且生产率高、原材料来源广、成本相对低廉，因此被广泛应用。在汽车铸件生产中，砂型铸造所生产的铸件占整个汽车铸件的90%以上。下面介绍砂型铸造铸件生产的主要工艺过程及设备。

1）铸造工艺设计

（1）主要内容

汽车铸件的铸造工艺设计，首先要对零件结构的铸造工艺性及技术条件以及铸件切削加工的定位点、加工余量、铸造孔槽等进行审定与会签，有些新产品还需进行工艺试制。再根据产量编制出铸造生产过程的技术文件，作为生产准备、管理及铸件验收的依据。技术文件除包括铸造工艺图、铸件毛坯图、铸型装配图、铸造工装图（包括模样、芯盒、砂箱及工位器具）等外，还需编制工艺规程、工艺卡、铸件生产用原材料技术条件及消耗定额等文件。

（2）铸件结构设计要点和铸造工艺性

铸造工艺性就是零件对铸造生产的适应性与合理性，用以简化铸造工艺及设备、减少铸件缺陷。汽车铸件的结构设计，应采用同步工程，设计过程中，充分吸取铸造技术人员的意见。

①铸件最小壁厚：在一定铸造条件下，铸造合金液能充满铸型的最小厚度称为该合金的最小壁厚。铸件最小壁厚与铸造方法、铸件结构与大小等因素有关。为减少铸件浇不足和冷隔等缺陷，铸件设计壁厚应不少于最小壁厚。砂型铸造铸件的一般最小壁厚参考表2-1-1。

表2-1-1 砂型铸造铸件的最小壁厚（mm）

合金种类	铸件最大轮廓尺寸（mm）					
	≤200	200～400	400～800	800～1 250	1 250～2 000	>2 000
灰铸铁	3～4	4～5	5～6	6～8	8～10	10～12
球墨铸件	3～4	5～8	8～10	10～12	—	—
碳素铸钢	8	9	11	14	16～18	20
铸造铝合金	3～5	5～6	6～8	8～12	—	—

随着铸造技术的不断提高，特别是汽车自重的轻量化，铸件的最小壁厚也可设计得更小，例如轮廓最大尺寸为400～500mm的轿车缸体缸盖的最小壁厚可达$4^{+0.5}_{-1.5}$mm，铸铁进气管可达$3^{+0.5}_{-1}$mm；轮廓最大尺寸为800mm的柴油机缸体最小壁厚可达4.5 ± 0.8mm。

②铸件的临界（最大）壁厚：各种铸造合金都存在一个临界壁厚，当铸件壁厚超过这个厚度后，铸件强度并不随壁厚增加而按比例增加，反而会增加铸件重量、引起诸如缩孔、缩松、渗漏等缺陷，各种铸造合金铸件的临界壁厚一般可按其最小壁厚的三倍考虑。但对发动机曲轴之类的铸件，则需按结构与强度需要考虑，对轴颈部分也有铸成空心的，以减小重量，并使壁厚均匀，减少缩松缺陷。

③铸件壁的过渡与连接：正确设计壁连接，对防止铸件缩孔、缩松、裂纹、变形及粘砂等缺陷，提高铸件品质十分重要，壁连接应尽量减少锐角连接，避免壁的交叉以减少与分散热节点，不同壁厚应采取缓慢过渡。

④铸造斜度：为便于起模，简化铸造工艺，铸件应设计适当的斜度，起模斜度在JB/T5105—91中做了具体规定。

⑤加强筋：设计加强筋时应尽量减少与分散热节点并便于起模与清理，考虑到铸铁的抗压强度是抗拉强度的3～4倍的特点，设计加强筋时应尽量使其在承受压力状态下工作。加强筋的厚度一般为与筋连接的铸件壁厚的0.6～0.8倍，加强筋高度≤连接处铸件壁厚。

⑥适应不同合金的补缩特点：对凝固收缩较大、易产生集中缩孔的合金，如铸钢、球墨铸铁、可锻铸铁、某些铜合金及铝硅共晶合金等，宜采用定向凝固方式来设计壁厚，必要时还需局部加厚以形成补缩通道。对于容易产生缩松、且用冒口补缩效果不大的合金，如灰铸铁、锡青铜等，则倾向于采用同时凝固方式来设计壁厚，亦即尽量使铸件壁薄且均匀。

⑦铸件的其它工艺性能：除铸件结构的合理性之外，还应考虑其它一些铸造工艺性。例如，有利于简化模样和芯盒制造，便于起模；简化分型面；设计必要的工艺孔，以便支撑砂芯，方便排气与铸件内腔清理等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

(3) 砂型铸造的工艺方案确定

①生产车间或生产线的选定：一个专业铸造厂可有几个车间或生产线，制订新铸件工艺方案时，要根据砂箱尺寸、合金牌号及其它配套设施选择好生产线或车间。

②造型和制芯方法选择：汽车铸件生产由于产量大、尺寸精度要求高，造型一般采用高压或气冲造型自动线；对小型铸件则常用垂直分型无箱挤（射）压造型线。制芯则采用冷芯盒、热芯盒或壳芯制芯机。由于冷芯盒具有芯子不易变形、生产效率高等一系列优点，在生产中应尽量扩大应用。

③确定模样布置：模样在模板上的布置要有多方案对比。应将重要面及薄壁部分放在下型或侧面，以减少这些面的缺陷。分型面尽量为平面；铸件主要部分置于同一半型，以减少错箱的不良影响；在砂箱尺寸足够时，尽量做到一型多件、并充分设计好共用浇注系统及芯头，以降低成本。

④浇冒口系统的设计：浇口系统是铸型中引导液态金属流入铸型的通道，冒口则是在铸件凝固收缩时进行补缩用，有的还能排出最先浇入的冷而脏的铁水及型腔气体，浇冒口系统一般由浇口杯、直浇道、横浇道、内浇道以及对易缩金属再加上冒口组成。主要设计要求为选择好金属液流动方向和速度，避免紊流，使金属液平稳地充满铸型；并按不同合金的凝固特性，合理调节铸件各部分的温度分布；浇注系统还应有撇渣功能。浇注系统结构应紧凑，以便于充分利用模板面积及提高金属液工艺出品率；内浇口易于打磨，不影响加工夹紧定位等。为加强撇渣，净化铁水，过滤网的应用越来越多，有的设两道过滤网。过滤网用陶瓷或耐高温纤维制成。

浇冒口系统的设计：有很多计算公式与图表可供参考，由于铸件结构及生产条件的变化，还必须辅以设计经验。汽车用同类铸件的大体结构基本相似，随着计算机技术的发展，用计算机的模拟仿真技术设计浇冒口系统，更为科学、合理、可靠。但由于铸造涉及的因素甚多，很多边界条件不完全稳定，例如金属液的温度及化学成分的变化范围、砂型与型芯导热性能的变化、浇注系统本身有披缝泄漏等等，因此，在计算机模拟过程中要作充分考虑。

⑤铸件收缩率：铸造过程中铸件要发生收缩，其中金属液凝固时发生的体收缩由冒口补充解决。而凝固后冷却时的线收缩则会影响铸件尺寸，常以模样与铸件的长度差除以模样长度的百分率来表示，称收缩率，又称“缩尺”。线收缩受很多因素影响，如合金种类、铸件结构、浇冒口系统结构、铸型种类等等。一般铸件可参考经验数值。但对缸体、缸盖等复杂铸件，往往同一个铸件的不同方向和不同部位的线收缩率不同，例如在缸体宽度方向上，形成缸筒部分的线收缩率若为1%，则曲轴箱部分仅0.8%，在设计选用时，必须参考同类铸件的实际值。

⑥铸件的加工余量：铸件的切削加工余量通常按GB/T11350—89标准确定，并与GB6416“铸件尺寸公差”配套使用。汽车铸件比通用标准规定的要小。中、小型汽车的铸件加工余量一般为2～4mm，铸件的各个部分加工余量也不同，因此在铸造工艺设计时要与加工单位商定并会签。

⑦起模斜度：为造型与制芯时便于起模，除了产品本身必须设计有起模斜度外，在模样及芯盒的芯头、浇冒口及排气系统等都应设计出一定斜度。对产品的起模斜度可采取增加铸件厚度、增减铸件厚度和减少铸件厚度三种方法，其大小应根据模样高度、尺寸大小、表面粗糙度以及制芯方法来确定，并有一些经验数据可供参考。汽车铸件由于结构复杂而紧凑，起模斜度既要满足产品设计需要，也要考虑铸造的可能与难度。例如有些轿车缸体缸筒外壁之间的间隙本已非常狭窄，若需做出水流通道，水套芯就非常薄，外加必要的起模斜度，就无法制出合格型芯，故产品设计就将此处铸成实体，不留水流通道。缸盖的水套设计也有类似情况。

⑧最小铸出孔和槽：汽车铸件常设计有很多孔、槽、凸台等，一般应尽可能铸出，既可节约金属，减少机械加工工作量，又可使铸件壁薄均匀，减少缩孔缩松缺陷，对缸体缸盖类铸件，铸出孔还有利于水套芯的支撑固定、浇注时排气以及落砂时水套芯砂的排出。通常对于壁厚不大的汽车铸件，直径大于15mm的加工孔以及产品需要的不加工的圆形及异形孔应尽量铸出。当然，孔的长径比大于4时，则难以铸出。

⑨反变形量：有些铸件由于壁厚不均或其它结构与铸造原因，各部收缩受阻情况不同，铸件可能产生挠曲变形。例如发动机缸盖等由于顶底面壁厚相差很大，存在两端向厚底面挠曲的现象，在模样设计时，需按铸件可能产生变形的相反方向做出反变形量，以抵消铸件的自然变形。反变形量必需通过试制测量及

汽车论坛 http://www.qclt.com

同类老产品的经验来确定。

2）熔化炉及炉前处理工艺

（1）铸铁熔化炉

金属炉料主要采用冲天炉、感应电炉或两者双联进行熔化，过去也有用电弧炉的。铸钢主要采用电弧炉冶炼，也有用感应电炉熔化的。对于某些要求特殊或特种金属，则采用电渣熔铸、等离子熔炼、电子束熔炼等冶炼方法。图 2-1-2、图 2-1-3、图 2-1-4 分别表示铸铁熔化及保温的主要炉型的炉体结构。

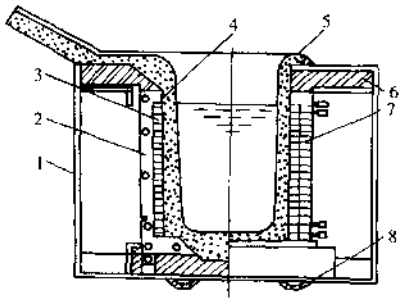


图 2-1-2 无芯感应电炉炉体示意图
1-炉架；2-轭铁；3-感应圈；4-绝缘材料；5-炉衬
6-耐火砖；7-冷却水管；8-槽钢底座

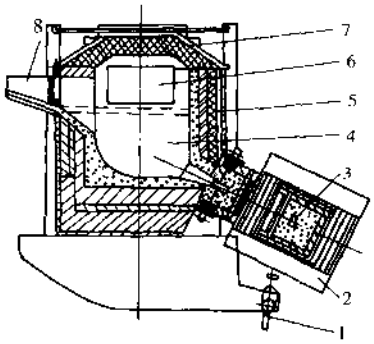


图 2-1-3 有芯感应电炉炉体及感应器示意图
1-倾炉机构；2-感应器；3-熔沟；4-炉膛；5-炉壳
6-工作门；7-炉盖；8-出铁槽

冲天炉是应用最广的连续化铁炉，它是一种依照逆流原理来进行工作的井式熔炉。通过加料口自上将炉料装入炉中，炉料由层层相间的金属层料和燃料层料（主要为焦炭）组成。通过风口自下送入供燃料燃烧用的空气，利用燃料燃烧所发生的热量将金属炉料熔化。由于它能连续作业，铁水成本低，熔化效率高，熔化率可由每小时几百千克到几十吨，应用广泛。但也存在铁水化学成分和温度难于精确控制、排出的大量烟尘增加环保投资等缺点。随着技术不断进步，热风冲天炉、无焦冲天炉以及计算机控制的应用使冲天炉又焕发了青春。我国第一汽车集团公司所用热风冲天炉及其除尘系统居国内前列。

感应电炉又分无芯及有芯两种。无芯感应电炉的原理为坩埚外环绕的线圈（感应器）通入一定频率的交变电流时，在线圈内外产生频率相同的交变磁场，坩埚内的金属炉料相当于副绕组，在交变磁场作用下，产生频率相同、方向相反的感应电流而发热熔化。无芯感应电炉根据输入电源频率不同又分工（业）频（率）炉（50Hz）、中频炉（150～10 000Hz）、高频炉（＞10 000Hz）以及变频炉（100～500Hz）。变频炉的频率将随炉内金属料的状况而变化，使炉子获得较高的功率因素和效率，是无芯感应炉的改进与发展方向。有芯感应炉的感应器是由闭合铁芯、感应线圈和熔沟组成，当交变电流通过感应线圈时，磁力线通过闭合铁芯产生交流磁场，使熔沟内的金属产生强大的感应电流而熔化和加热，由于熔沟与炉膛相通，通过热传导与铁液对流而使整炉铁水保温或升温。

在汽车铸件的大量流水生产中，通常采用冲天炉—有芯工频

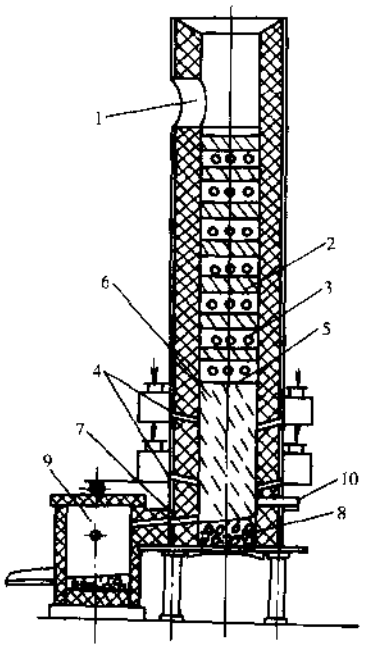


图 2-1-4 双风带送风冲天炉（4t/h）
1-加料口；2-层焦；3-金属炉料；4-进风口；5-熔化带；6-底焦；7-出铁口；8-炉底；9-前炉；10-出渣口

汽车论坛 http://www.qclt.com

炉双联熔炼，以利用冲天炉生产效率高、连续作业、以及解决了汽车车身镀锌钢板废钢熔化时产生大量锌蒸气对感应炉衬侵蚀和导致铸件针孔等问题的优势，又利用了较大容量的有芯工频炉易于调节温度与化学成分的特点，以及对铁水的储存功能，确保铁水质量及稳定生产。对球墨铸铁等要求更高的铁水，也可使用无芯感应炉直接熔化，以确保铁水化学成分及温度更为稳定。有些自动浇注机的浇包，也采用有芯或无芯感应炉的原理与结构，制成保温浇包。

（2）铸铁的炉前处理工艺

①灰铸铁和球墨铸铁的孕育处理：在一定条件下，向铁液加入少量物质，促进石墨成核，从而显著改善铸铁组织和性能的处理方法称孕育处理，所加入的物质称孕育剂。对于灰铸铁，孕育可促进石墨化，生成对铸铁有利的A型石墨，降低白口倾向，还有利于细化珠光体组织、改善力学性能及切削加工性能等等。适用于灰铸铁的孕育剂有上百种之多，大都是以硅铁为基础，加入不同种类的合金元素组成，合金元素有Ca、Sr、Ba、Zr、Ti等等，可根据不同需要而选择。对缸体缸盖等容易出现缩松渗漏的铸件，推荐采用含Sr孕育剂。孕育方式分包内孕育和后孕育两大类。后孕育又包括随流孕育、型内孕育、孕育丝孕育等很多种，由于后孕育无衰退现象，效果更显著。对于球墨铸铁及蠕墨铸铁，孕育可促进石墨化，减小白口、细化石墨与基体组织、改进力学性能，孕育剂与孕育方法与灰铸铁孕育大体相似。

②球墨铸铁的球化处理：生产球墨铸铁的关键工序是球化处理，它是通过加入一定量的球化元素，使铸铁中的石墨变成球状。常用球化元素有Mg、RE等，且多将球化元素熔化到硅铁中形成球化合金，也有将球化元素与铁屑等混合均匀后压制成小块的称之为低硅球化剂。根据铸件及球化工艺的不同需要，不同化学成分的球化合金形成系列产品，供铸造厂家选用。球化处理的方法根据球化合金加入的方式不同而有多种，最常用的为冲入法及转包法，也有用压力加镁法、型内球化法及型上球化法等。近年又开发出球化丝球化法，并逐步得到推广。球墨铸铁在球化处理后或球化处理的同时，一般都进行孕育处理。由于原铁水中的硫与球化剂中的Mg亲和力很强，易反应生成MgS夹杂物，并大量消耗起球化作用的Mg，阻碍石墨球化，因此对球化处理前的原铁水含S量要严格控制，可以采用碱性炉衬冲天炉脱S；也可以采用炉外脱S的方法，如摇包法、多孔塞法等，其原理都是将脱S剂与铁水充分反应，形成S化物进入渣内，一汽集团公司采用多孔塞法，脱S率可达80%以上。

③蠕墨铸铁的蠕化处理：蠕墨铸铁的蠕化处理方法类似于球化处理方法，但控制更为严格。蠕化不足，则会变成高碳当量低力学性能的灰铸铁，蠕化过度则会变成球墨铸铁，失去蠕墨铸铁的优势。常用蠕化剂分为镁系、稀土系及钙系蠕化剂。蠕化方法则以冲入法为主。为稳定蠕化质量，近年来瑞典Sinter Cast SA公司开发出一种新的控制蠕化的方法，其工艺流程见图2-1-5。其原理是铁水经第一次包内蠕化处理后，迅速取样进行热分析，检测蠕化程度。若蠕化不足，其信息一方面反馈到炉前，供炉前对下一包铁

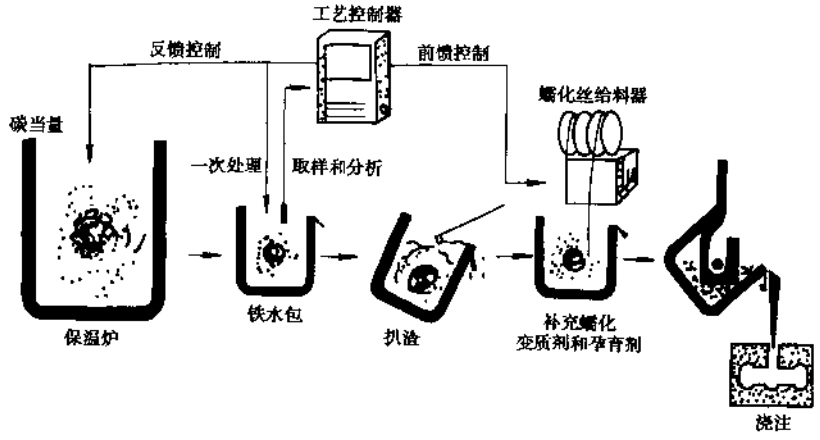


图2-1-5 瑞典Sinter cast SA公司控制蠕化的工艺流程

汽车论坛 http://www.qclt.com

水处理调整工艺用，另一方面反馈到金属丝蠕化处理器，对扒渣后的包内铁水进行二次补充处理，这种工艺能确保蠕化质量，在世界上已有25个以上的工厂使用。

④可锻铸铁的孕育处理：可锻铸铁孕育处理的目的与其它铸铁不同，它是为了促进铸态白口组织，缩短石墨化退火时间或降低退火温度，脱氧去S以利石墨化。常用的孕育剂为铝、铋、硼、锑等，且常同时采用几种元素进行复合孕育。孕育主要采用冲入法。

⑤冷硬铸铁的孕育处理：汽车铸件的挺杆体和凸轮轴等采用冷硬铸铁时，由于耐磨性要求严格，控制白口深度及孕育就显得尤为重要。由于铸件产品的白口深度范围很窄，通常为2～4mm，故炉前试样的白口允许范围也仅为2～4mm。为此，必须在严格控制原铁水化学成分及温度的基础上，对孕育剂及被孕育的铁水必须准确定量、孕育后迅速浇注，以防孕育效果的衰退。

(3) 铸钢的熔炼炉与熔炼工艺

铸钢的熔炼一般用电弧炉和感应电炉。电弧炉炼钢一般采用三相交流电弧炉。目前也有用直流电弧炉的，其优点是噪声小、石墨电极消耗少，且因有恒定方向的磁场产生搅拌作用，使钢液化学成分及温度更为均匀。电弧炉炼钢又分氧化法与不氧化法。氧化法炼钢可以对钢液进行脱氧、脱磷、脱硫等，对炉料要求不高。不氧化法的实质相当于重熔，对炉料要求高。

感应炉炼钢：一般采用无芯工频炉或中频炉，与电弧炉相比，因不用石墨电极，无增碳问题，钢液含气量低，还由于有电磁搅拌作用而使钢液化学成分及温度均匀。感应炉在结构上有利于实施在真空或其它设定气氛下进行冶炼。

铸钢还有一些较新的冶炼方法，如电渣熔铸、等离子熔炼、电子束熔炼、磁悬浮熔炼等，但在汽车铸件生产中很少采用。

(4) 炉前检测

按计算配比的金属炉料熔化后，需检测其温度和化学成分，对球墨铸铁和蠕墨铸铁还要分别检测试样的球化或蠕化程度。

金属液测温可用光学高温计、红外线辐射测温仪以及热电偶测温仪。由于前两者皆受烟尘及金属液面的氧化膜和炉渣的干扰而欠准确，测量误差为±（10～20)℃。热电偶测温仪属接触式测温，比较准确可靠，测量误差在±10℃以下，再配以电子屏幕的显示与记录，在汽车铸件生产中广泛应用。

金属液炉前化学成分的检测方法，常用的有化学分析法、物理化学分析法和光电直读光谱分析法等。前两种方法分析精度较高，但分析速度较慢。而直读光谱仪可同时分析几十种元素，且分析速度快，通过试样的管路气力输送及分析结果的电子反馈，一台设备可担负多个车间多台熔炉的检测任务，因此，在汽车铸件生产中广泛采用。但直读光谱仪对铸铁的碳和硫分析精度较差，为此很多铸造厂还配备有快速碳、硫分析仪。但对一个铸造厂来说，化学分析还是必不可缺的，主要用于进厂原材料分析、仪器分析结果的校对和仲裁分析等。有些厂还配备有X射线荧光光谱仪，它可分析包括固体、粉末、糊状物或液体等金属和非金属样品，可在40s内分析20多种元素。作为炉前检测，还有一种热分析仪，用于快速检测铸铁液的碳、硅含量，并可用于判断铸铁的孕育效果和球化程度，在国外应用非常广泛，国内目前应用不广。

炉前判断铸铁的球化率和蠕化率，比较可靠的方法是快速金相分析；也可凭经验观察试样断口的颜色和组织来判断；有的铸造厂凭化验后的残留镁和稀土量来判断。

3) 砂型造型

造型是获得铸件外部及内腔轮廓形状和尺寸的工艺过程。砂型造型方法根据铸件合金的种类、重量、尺寸大小及精度、生产批量等而分成手工造型和机器造型两大类。手工造型适用于小批单件生产及新产品试制。批量大、要求高的汽车铸件采用机器造型。根据对型砂施加紧实力的方式不同，机器造型又分震击造型、高压造型、气冲造型、射压造型、抛砂造型等。根据砂型粘结剂不同，又分以粘土为粘结剂的粘土砂型和以树脂为粘结剂的壳型和自硬砂型等。粘土砂型又分干砂型与湿砂型，汽车铸件大量生产一般采用湿砂型。

(1) 粘土湿砂型

震击造型以震击紧实为主，随后辅以比压≤0.4MPa的压力进行压实。由于砂型紧实度不高、噪声大

汽车论坛 http://www.qclt.com

等缺点，应用范围越来越小。高压造型以压实为主，辅以微震，比压≥0.7MPa，砂型紧实度及造型效率大为提高，噪声减小，成为60年代至今的主要造型方式。气冲造型是80年代初发展的一种造型方式，是用具有一定压力的气体瞬时膨胀释放出来的冲击波冲击砂箱中的型砂而紧实砂型，其特点是效率高、紧实度均匀且分布合理、造型设备简单，被迅速广泛采用，称为继震击造型和高压造型之后的第三代湿型造型方法。所用瞬时膨胀气体大都为压缩空气，也有用可燃气体与空气混合后点火引爆的气体。属于气流紧实砂型的还有一种静压造型，即对砂箱中的型砂通以压缩空气进行气流加压，压缩空气通过型砂后经模板通气塞排出，气流紧实后再用压实板对砂型上部补压，使砂型紧实度上下均匀，此种造型的突出特点是无震击和气体冲击的噪声，也被一些铸造厂采用。射压造型是借助压缩空气气流将型砂射入砂箱进行预紧实，再用压头补压成形，紧实效果好，效率高。丹麦DISA公司的无箱造型线驰名全球，由于砂型紧实度及强度高、不需砂箱，大大简化了铸造生产线。

为提高生产效率，湿砂型都采用造型生产自动线。用铸型输送带将造型主机与分箱机、合箱机、下芯机、浇注机、压铁机、落砂机等一系列辅机连系在一起，整个造型过程自动化进行，生产率一般为120～300型/h。根据造型线类型不同，其布置方式也多种多样。图2-1-6为东风汽车公司铸造一厂造型自动线的布置。该线采用两台微震多触头高压造型机，砂箱尺寸为（1100×750×400/300）mm。自动线名义生产率240型/h，根据铸件类型不同，实际生产率为120～180型/h，主要生产汽车缸体、缸盖等铸铁件，年产铸件约40 000t。根据国内已有造型线的实践经验，在设计造型线的布置时，应保证浇注后的铸件在砂型内有足够的冷却时间，以避免落砂温度过高而引起铸件内应力增大，产生变形甚至裂纹缺陷。此外，对落砂方式及落砂时铸件落下的高差也应给予足够重视。

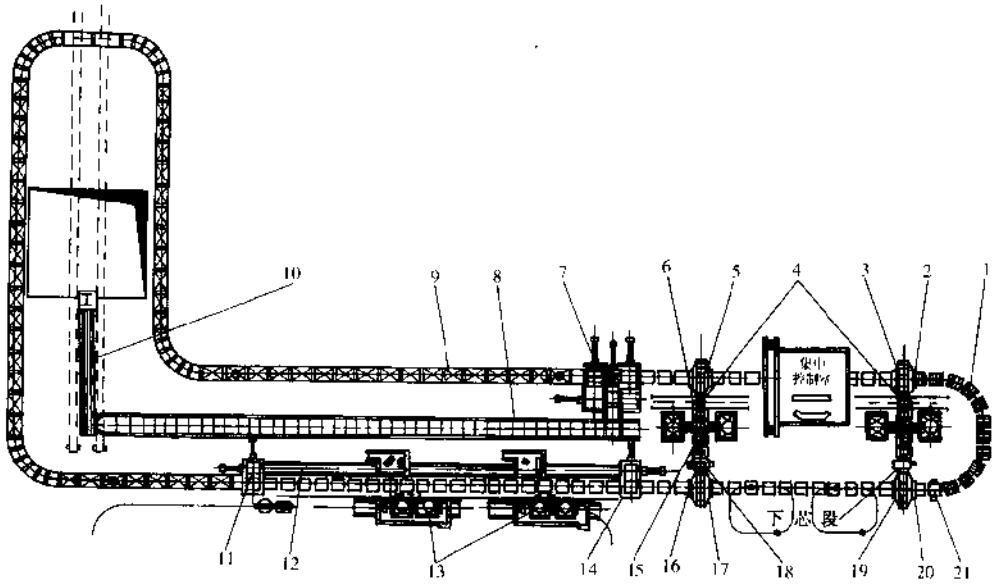


图2-1-6 自动化高压造型生产线

1-铸型输送机；2-下箱造型机；3-升箱机；4-砂箱内腔清扫器；5-分箱机；6-上箱造型机；7-铸型顶出机；8-鳞板输送机；9-冷却罩；10-落砂机；11-压铁机（卸压铁）；12-压铁回送边辊道；13-浇注机；14-压铁机（加压铁）；15-刮砂装置；16-扎气孔器；17-合箱机；18-翻箱机；19-落箱机；20-刮砂装置；21-小车台面清扫机

（2）粘土湿砂型用型砂

砂型铸造，每生产一吨铸件需消耗一吨砂。铸件废品有50%以上与造型材料有关，因而合理选择原材料、混砂设备以及制订严格的混砂与检测工艺显得非常重要。

汽车铸铁件用型砂主要由天然硅砂、膨润土、煤粉以及适量的水混匀而成，其中硅砂是构成形砂的耐

汽车论坛 http://www.qclt.com

火骨料、膨润土被水润湿后用为粘结剂，煤粉则为防止铸件粘砂的附加材料。型砂各组分的配比则是以满足不同造型方法对型砂性能的要求为前提。通常以原砂100%为基数，膨润土量为6%～9%，煤粉为5%～8%。水分则是以满足型砂的造型性能为基准，在我国原材料质量条件下，一般为3.5%～5.0%。对高速高压造型用型砂性能要求见表2-1-2。

表2-1-2 对高速、高压造型用湿型砂的性能要求

型砂性能	高压造型		射压造型（铸铁件）		气冲造型铸件件用	检测频次
	铸铁件用	铸钢件用	有箱造型用	无箱造型用		
湿压强度（kPa）	90～120	90～120	120～150	170～220	170～210	1/h
湿抗拉强度（kPa）	>11.0	>11.0	>15.0	>20.0	>19.0	1/d
湿抗劈强度（kPa）	>17.0	>17.0	>23.0	>31.0	>29.0	1/d
可紧实性（%）	35～45	35～45	35～45	35～45	35～43	1/h
水分（%）	不作具体限定，应在有效膨润土符合要求的条件下保证可紧实性					1/h
透气性	>70	>70	>50	>50	>50	1/h
含泥量（%）	10～14	10～14	10～13	11～14	10～13	1/7d
有效膨润土含量(%)	>8	>8	>8	>8	>8	1/d
挥发分（%）	1.5～3.0	1.0～2.0	1.5～3.0	1.5～3.0	1.5～3.0	1/7d
950℃灼烧减量（%）	3.5～7.5	3.5～6.5	3.5～7.5	3.5～7.5	3.5～7.5	1/7d

根据型砂性能波动的可能性，对砂型与铸件质量影响的大小以及检测的难易程度，对型砂性能检测的频次也有不同要求，见表2-1-2。

表中所列大部分项目是在配砂工部现场进行检测，近年来也研制出能同时检测型砂强度、可紧实性等多项性能的多功能测试仪，以加快检测速度，指导与调整型砂性能。

型砂性能与原材料质量密切相关，原材料进厂时要对其主要性能指标检测。如原砂的粒度及其分布、砂粒形状及表面状态、化学成分、制芯用原砂的PH值和需酸量等；膨润土的粘结强度、膨润性能等；煤粉的挥发物、灰分、硫、水分含量以及光亮碳及结焦性能等。

国内外已有成套的型（芯）砂检测仪器可供选择。

型砂混碾常用碾轮式、摆轮式以及近年发展的高效逆流转子式混砂机。碾轮式混砂机由于有碾压作用，混砂质量最好，但生产率低，仅适用于小批量生产。逆流转子式混砂机效率高，每小时产量可达百吨以下，适用于砂量大的造型自动线生产。还有一种双辗盘连续混砂机（也称“8”字型混砂机），实践证明，混砂质量不均匀不稳定。为保证型砂质量，除混砂机外，还需配以松砂、冷却、磁选、筛分及型砂输送等辅助设备，构成一个砂处理系统。大量流水生产用湿型砂的输送，采用皮带输送更为可靠，采用气力管道输送往往由于堵塞与弯道磨损而停用。大量流水生产的砂处理是一个庞大而复杂的系统，图2-1-7为某柴油机厂供砂能力为150t/h的型砂制备车间布置。

（3）化学粘结剂砂型

壳型造型：是将酚醛树脂粘结剂和乌洛托品硬化剂预覆膜的型砂，吹入热态的型板上而受热硬化成形，待形成硬化薄壳后取出砂型。为节约覆膜砂以及加快浇注后铸件的冷却速度，取出的壳型放入到砂箱中，在壳背填以钢铁丸粒支撑牢固后即可浇注，属于壳型造型方式的还有一种铁型覆砂造型方法，是用与砂箱铸成一体的铁型与覆膜砂吹射粘结一起，代替普通壳型造型的钢铁丸垫背。所制成的壳型刚度好，可实现无冒口铸造；铸型冷却快，能细化石墨及基体组织，但它仅适于固定产品。壳型生产的铸件尺寸精度高，表面质量好，内部金相组织细化，在一些有高要求的铸件上应用。国内外很多轿车曲轴、凸轮轴等轴类零件用此工艺生产。为保证铸件尺寸精度，降低铸件缺陷，所用覆膜砂必须具备较高的耐高温强度，低膨胀率与低发气量等性能。

汽车论坛 http://www.qclt.com

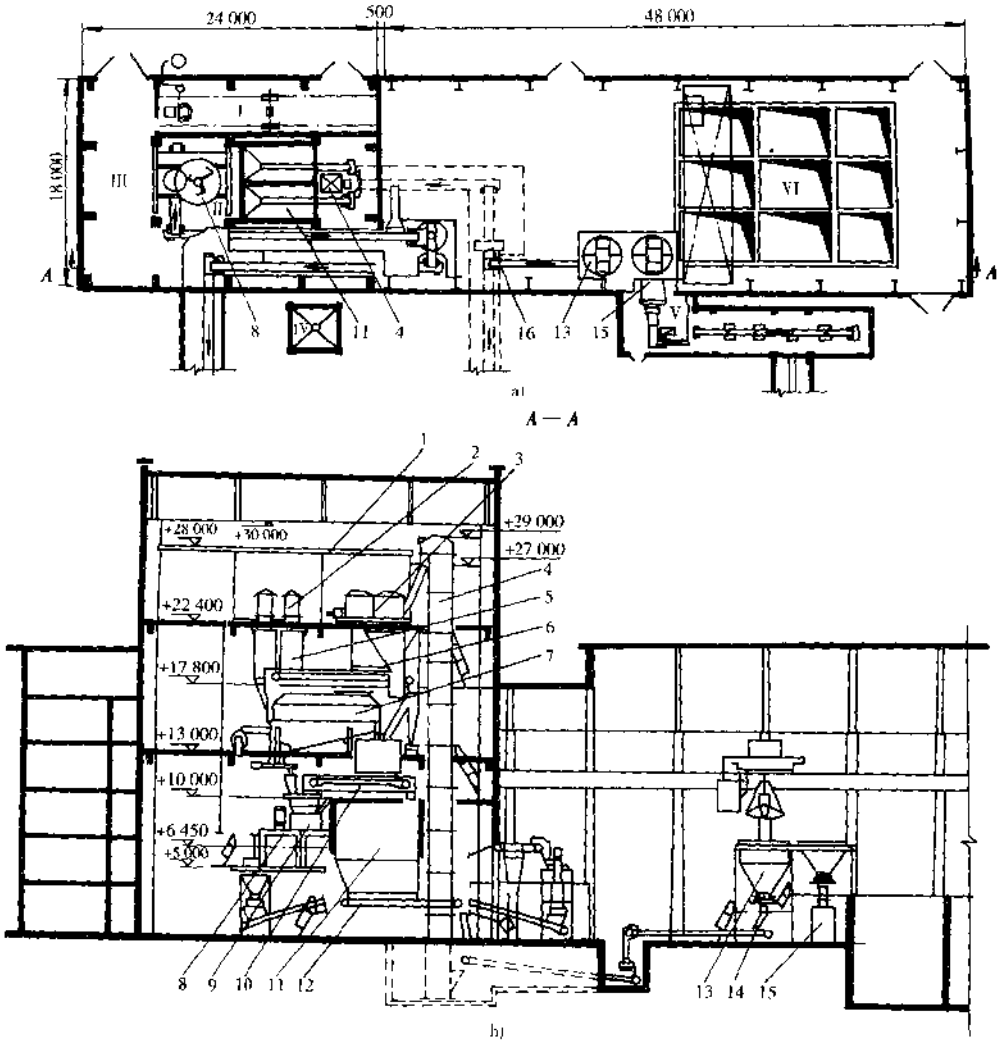


图 2-1-7 某柴油机厂铸造分厂型砂制备车间

a）平面图；b）剖面图

I-粉料贮存发送间；II-旧砂处理和型砂制备区；III-通道；IV-废砂斗；V-新砂烘干区；VI-新砂库

1-单轨起重机；2-粉料卸料器；3-滚筒筛；4-重级斗式提升机；5-粉料斗；6、10-双向带式输送机；7-沸腾冷却床；8-混砂机；9-定量装置；11-旧砂斗；12、14-带式输送机；13-湿新砂斗；15-烘干装置；16-带式磁选机

自硬砂造型：自硬砂造型是用液态树脂及硬化剂与砂混均后进行造型，铸型停留一段时间后自行硬化，硬化后再起型。自硬砂型尺寸精度高，铸型刚性好，硬化后的砂型容易起模，主要用于复杂铸件或大型铸件生产，在汽车铸造中，可用于难于起模的缸盖等复杂铸件和需要下很多冷铁的冷硬凸轮轴等。

用于汽车铸件生产的壳型或自硬砂型造型也是由主机与辅机组成的自动线进行。

4）制芯

型芯主要用于形成铸件内腔，或用于组芯造型形成外型。制芯方法分手工制芯和机器制芯两大类，手工制芯适用于单件小批生产以及新产品试制；机器制芯则适用于大量流水生产，常用的机器制芯方法有热芯盒法、壳芯法及冷芯盒法三种。

汽车论坛 http://www.qclt.com

热芯盒制芯是将呋喃或液体酚醛树脂及其相匹配的固化剂与砂混匀后，用压缩空气射入加热至180～250℃的金属芯盒中，芯砂在热态下硬化后顶出形成形芯。属于热芯盒范畴的还有一种称为温芯盒制芯，与热芯盒的差别仅为芯盒温度较低（80～150℃）。

壳芯法制芯与壳型法造型一样，是将酚醛树脂、乌洛托品及原砂加热预混，冷却破碎后粘结剂包覆在砂粒外表成为覆膜砂。制芯时将覆膜砂吹入加热至200～260℃的金属芯盒中，待芯盒表层的覆膜砂结成5～20mm厚的薄壳后，将远离芯盒的未结壳的覆膜砂倒出，而形成可顶出的空心壳芯。

冷芯盒法制芯是70年代末开始大量应用的新工艺。是将树脂与原砂混匀后射入不需加热的芯盒中，然后通入气体催化剂，使芯砂快速硬化。目前应用最广的有三乙胺法和SO_2法两种。三乙胺法是以液体酚醛树脂和聚异氰酸酯作为粘结剂，用三乙胺与空气的混合气体作为催化剂。SO_2法则是用树脂、有机过氧化物等与砂混匀后射入芯盒，再吹进SO_2，SO_2与过氧化物反应生成硫酸，促使树脂砂迅速硬化。上述两种方法缺点是排出的催化剂污染环境、有害健康，须废气处理装置。目前，人们正研究无毒冷芯盒法，如水玻璃—CO_2法等等。

上述三种适合汽车铸件生产的制芯方法都被大量采用，但各有优缺点。其中冷芯盒法由于芯盒不需加热、能简化芯盒结构、节约能源、改善劳动条件、芯盒不易变形、型芯尺寸准确、硬化快、生产效率高等优点，因而有逐步取代热芯盒法的趋势。此外，根据国内原材料质量较差，特别是南方气温较高，湿度较大等情况，热芯盒砂芯不易射制致密，也易吸潮，目前多倾向于热芯盒使用覆膜砂的制芯工艺。

随着制芯设备与原材料质量水平的提高，制芯生产已发展到采用“制芯中心”的水平，即型芯的吹射、硬化、取出及其以后的去毛刺、组装、上涂料、烘干、储运等皆自动进行。随着冷芯盒技术的应用，型芯组装已开发出一种称为锁芯技术（Key Core System），即将已制成的单个型芯置于冷芯盒制芯机内，通过二次射砂到单个芯间的预留间隙中，硬化后将单个型芯组装成整体，而后上涂料甩干并烘烤。这种组装方法消除了传统的用胶粘结或用螺栓连接方法所难以避免的装配间隙，组装尺寸也更为准确，特别适用于缸体缸盖等复杂铸件的生产。国外已有成套设备可供选择，在汽车行业中应用逐渐增多。

铸造涂料：为提高砂型特别是型芯的表面强度和抗粘砂能力，获得表面光洁的铸件，在汽车铸件生产中广泛采用铸造涂料。涂料主要由防粘砂的耐火材料、粘结剂、悬浮稳定剂以及溶剂载体等组成，根据溶剂载体不同又分水基涂料和快干醇基涂料。上涂料的方法有喷、浸、淋、刷等方式。复杂汽车铸件通常将组装好的型芯整体浸涂料，而后甩干并烘烤。对缸体缸盖等易产生缩松渗漏的铸件，可在相应缩漏部位的型芯上局部刷上锆粉涂料，以加速该部位铸件表层的凝固，减少渗漏。

为提高砂型和型芯涂料层的质量，我国上海交通大学开发出一种被称为“涂层转移法精密铸造”的新技术，其原理见图2-1-8。

按传统方法是在起模后的型或芯表面用不同方法涂敷上涂料，涂层厚度及表面粗糙度难以控制。采用涂层转移法则是先将涂料用适当方法涂在模型或芯盒上，然后充填造型或制芯材料，待砂型或型芯起模后，涂层自发地转移到砂型或型芯表面上。由于涂层完整地复制了模具表面的形状和粗糙度，随后用之浇注的铸件的尺寸精度与表面粗糙度也就更有保证，可以达到精密铸造的水平。

5）铸件的浇注、落砂与清理

（1）浇注

在汽车铸件的流水生产中，浇注都采用机械化、自动或半自动浇注机。浇注机又分倾转式、气压式、（塞杆）底注式等。气压式及底注式撇渣效果好。有的浇注机带有铁水保温及定量装置，有的气压包还带有保护气体，以延缓球墨铸铁的球化衰退。有的浇注机还带有配套的随流孕育装置，一旦铁水流出浇包嘴，通过光电管反应即开始加入孕育剂。

（2）落砂

落砂是分离砂箱、型砂与铸件的工序。根据铸造车间的类型、铸件结构、型砂种类及生产方式采用不同的落砂机结构形式。汽车铸件为大量流水生产，对大、中型铸件多用振动落砂机；对小型铸件，特别是采用无箱挤压造型线时，常采用滚筒落砂机。由于落砂是集高温、高尘、高噪声于一处的工作环境十分恶劣的场所，很多铸造厂采用机械手来完成落砂部位的操作，如分离与分拣铸件与浇冒口、扒去铸件表面型

汽车论坛 http://www.qclt.com

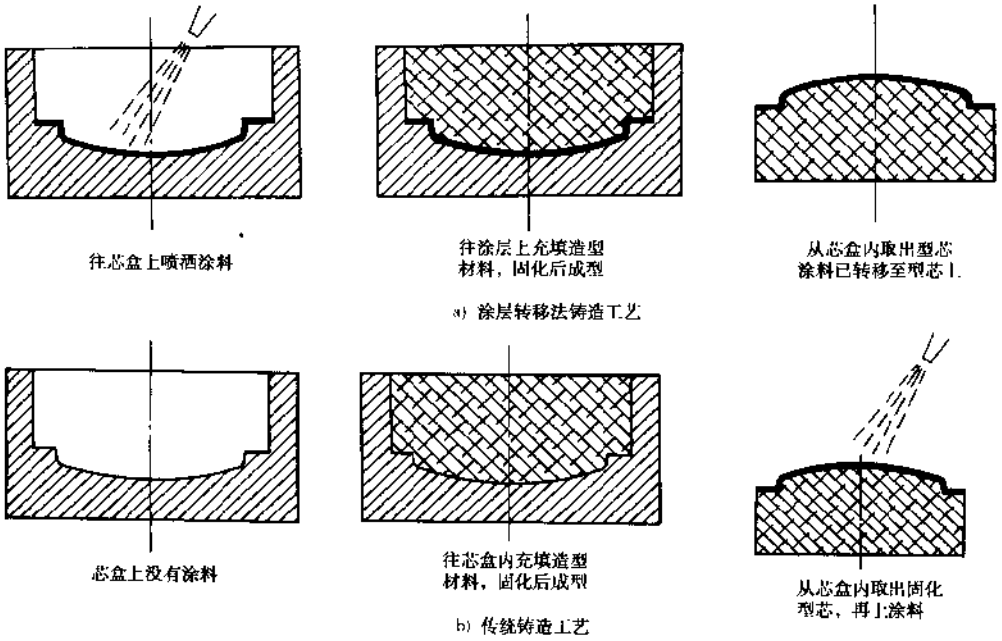


图 2-1-8 涂层转移法工艺过程示意图

砂、压碎大砂块、倒出芯砂、抓取铸件装箱或挂在悬链上进行二次冷却、抓取桶箱后带砂型的铸件装箱缓冷等等。

浇注后的铸型，要待铸件凝固与冷却至 500℃左右才能落砂，过早落砂会使铸件产生内应力，甚至出现裂纹。延缓落砂时间可采用延长铸型输送带、增设冷却鳞板或冷却悬链，或从砂箱中将带有砂型的铸件装箱堆放冷却。对缸体缸盖等还需增设二次落砂，以去除水套的型芯，常用设备为风动型芯落砂机。

(3) 清理

落砂后的铸件要进行清理与检查。汽车铸件常用的清理与检查工艺流程如图 2-1-9。

汽车铸件落砂后，大都用鳞板输送到清理工部。在鳞板输送过程中，铸件可继续冷却、去除浇冒口、铸件与浇冒口的分类存放等。浇冒口去除的难易程度主要取决于铸件的金属种类。对灰铸铁和可锻铸铁铸件，由于材质性脆、强度低，一般用榔头敲打即可去除。对球墨铸铁和铸钢铸件，则由于强度高、韧性好、外加冒口颈面积较大，则用圆盘锯或带锯锯断，或用楔斧式去浇冒口机挤掉等。对铸钢件则可用氧乙炔火焰气割方法。

铸件的表面清理，采用各种结构的抛丸设备，对大、中型汽车铸件，常用连续式抛丸机，对小件则多用滚筒式或履带抛丸机。对缸体缸盖等铸件必须设置专用抛丸机（如鼠笼式抛丸机等），以保证铸件内腔特别是水套内部的抛丸质量。所用金属丸常用经调质处理的铸钢丸，一般采用 φ2.5mm 以下粒度的细钢丸，以得到表面光洁的铸件。经过焊补或热处理的铸件，需经二次抛丸去除表面氧化皮。

随着轿车工业的发展，对铸件，特别是底盘铸件的油漆质量提出了越来越高的要求。如富康轿车底盘铸件，就要求耐盐雾 250h，抗石击＜3 级以及附着力、耐水性、耐热性等质量指标。为满足这些要求，生产厂采用了磷化预处理及粉末涂层等复合工艺来满足质量要求，并建成铸造油漆线。

6) 砂型铸造车间（厂）平面布置示例

综上所述，砂型铸造工序复杂、物料进出量大、耗能多、易产生烟尘废气污染等，因此铸造车间设计比较复杂。图 2-1-10 为国内某汽车厂中型铸造车间的平面布置图，年产发动机铸铁件 10 000t。使用一条高压静压造型线，采用 2 台 5t/h 的冲天炉、1 台 5t 工频炉和 2 台 3t 中频炉双联熔炼。车间总面积 6 820m^2。图 2-1-11 为近年新建成投产的我国某汽车厂大型铸造车间平面设计图。该厂生产包括缸体、曲轴

汽车论坛 http://www.qclt.com

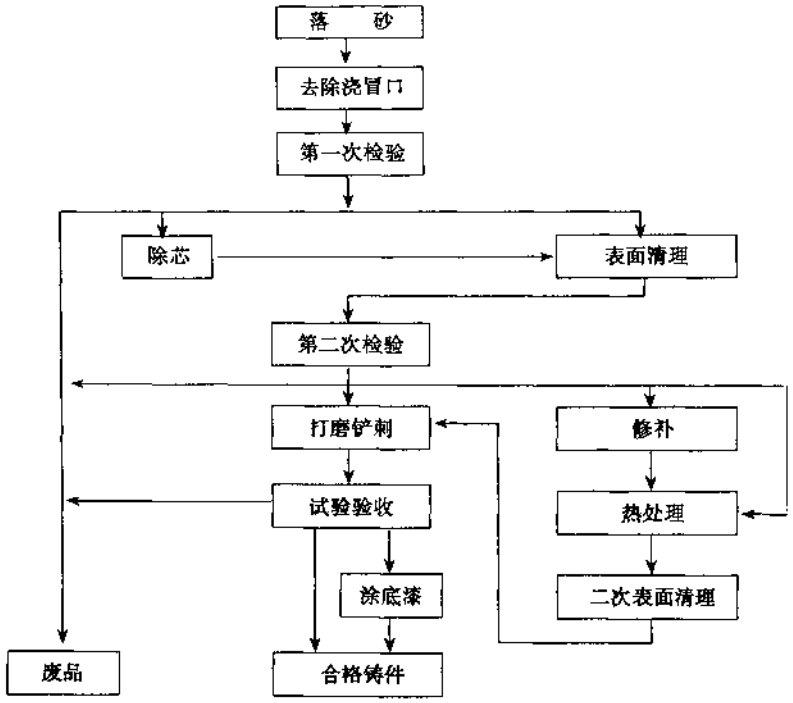


图 2-1-9 铸铁件落砂清理工艺流程

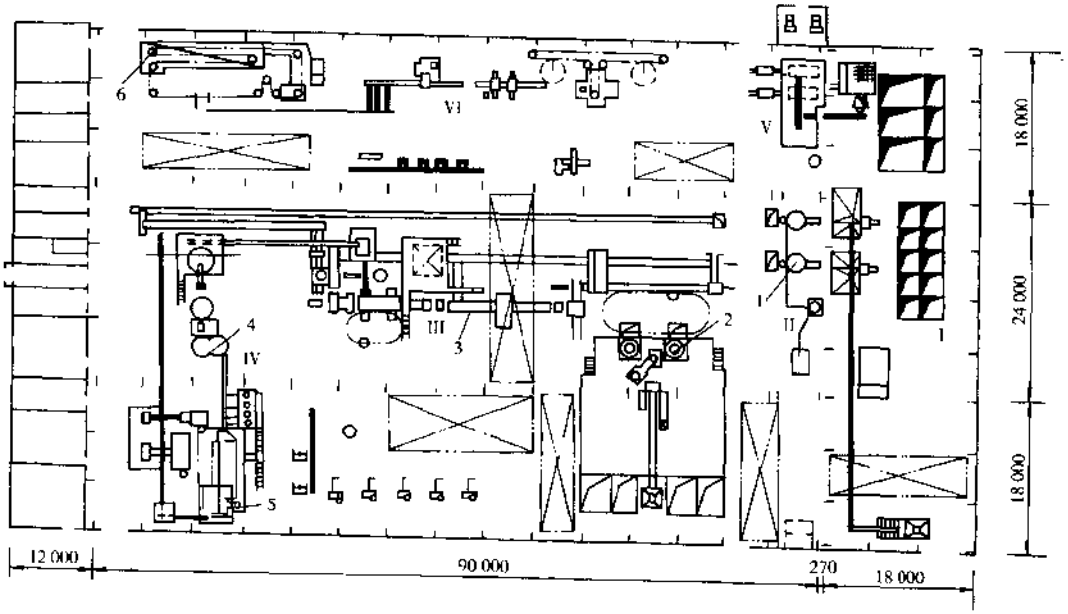


图 2-1-10 年产 10 000t 发动机铸铁件铸造车间平面图

I-炉料库；II-熔炼工部；III-造型工部；IV-砂制备工部；V-造芯工部；VI-清理工部；1-5t/h 冲天炉；2-中频炉；3-静压造型线；4-混砂装置；5-滚筒冷却器；6-喷漆装置

汽车论坛 http://www.qclt.com

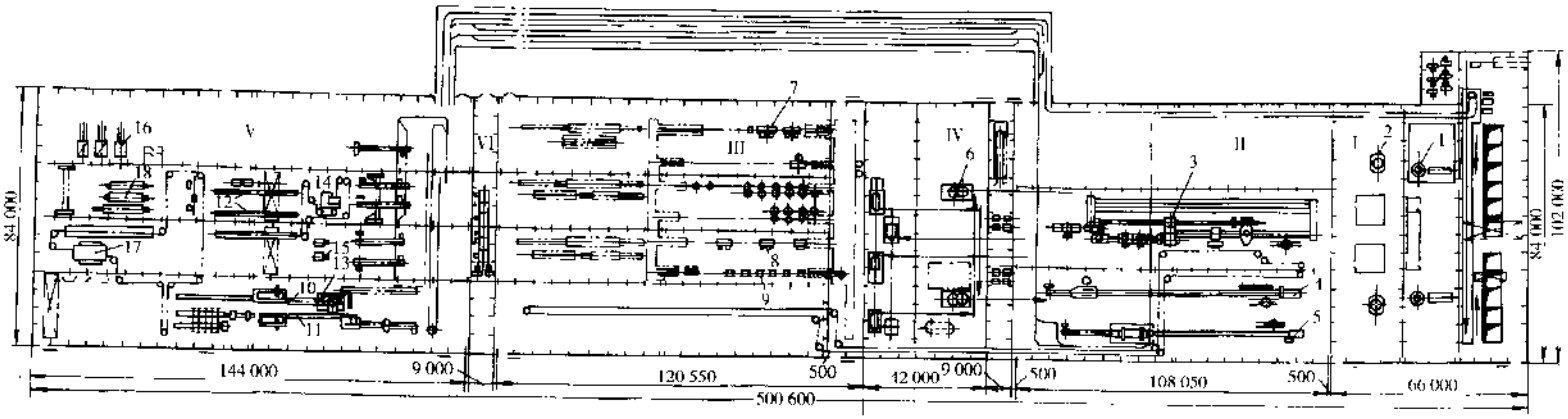


图 2-1-11　年产 50 000t 汽车铸铁铸造车间平面图

I-熔炼工部；II-造型 I 部；III-造芯工部；IV-砂制备工部；V-清理工率；VI-通风除尘间；VII-铸件冷却通廊

1-20t/h 热风水冷冲天炉(2 套)；2-45t 立式有芯工频保温；3-1200×800×400(mm)"GF"气冲造型线；4-DISA2070 挤压造型线；5-DISA2013 挤压造型线；6-200t/h 砂制备系统(2 套)；7-40kg 冷芯盒制芯机 5 台及配套系统(3 套)；8-12kg、6kg 热芯盒双工位射芯机 5 台，9-壳芯机 8 743 台；10-缸体清除线 1 条；11-缸体清理线 1 条；12-其它清理线 4 条；13-鼠笼式抛丸机 1 台；14-抛丸室 1 个；15-履带抛光机 2 台；16-退火炉 3 台；17-涂防锈液线条；18-焊补炉 2 台

汽车论坛 http://www.qclt.com

等灰铸铁和球墨铸铁铸件，年产量50 000t。该厂技术比较先进、大量采用了适合大量流水生产的新型装备。例如，用计算机控制的全自动化热风冲天炉及其除尘环保系统；气冲自动造型线及落砂机械手；大型DISA2070垂直分型挤压造型自动线；小时产量达200t的混碾与冷却等的砂处理系统；冷芯盒、热芯盒、壳芯制芯工艺及其相应的涂料与烘干系统；各种规格的通用与专用抛丸设备及清理线；热处理与焊补炉及铸件防锈表面处理线等，自动化程度高、流程合理、物流通畅、检测手段较齐全，它代表了我国目前汽车铸铁件大量生产的设计水平。

2.1.2.2 特种铸造

在造型材料、造型方法、金属液充型形式和金属在型中的凝固条件等方面，与普通砂型铸造都有显著差别的铸造方法，统称为特种铸造。

特种铸造方法不下十余种，如①熔模铸造、②金属型铸造、③压力铸造、④低压铸造及差压铸造、⑤离心铸造、⑥挤压铸造、⑦消失模铸造、⑧陶瓷型铸造、⑨连续铸造、⑩半连续铸造、⑪真空吸铸、⑫磁型铸造、⑬石膏型铸造、⑭石墨型铸造、⑮电渣熔铸、⑯流变铸造等等。在汽车铸件大量生产中，常用的为前7种。

用特种铸造生产的铸件与砂型铸造相比，一般都具有更高的尺寸精度和表面品质，因此，熔模铸造、压力铸造等又称为“精密铸造”。

特种铸造中的铸铁和铸钢件熔化、制芯及清理等与砂型铸造没多大差别，对有色金属铸件则常采用感应电炉或燃气坩埚炉熔化，有的还用电阻坩埚炉进行熔化与保温。清理工序也有很大差别。例如部分铸件不用抛丸，以免破坏光洁的原始表面，披缝及浇口残余去除后再用砂带打磨，不留痕迹等等。

1）熔模铸造

熔模铸造又称“精密铸造”、“失蜡铸造”，它是用易熔材料制成精确光洁的模样——易熔模，再在易熔模上涂敷多层耐火材料，或浇灌耐高温的陶瓷浆料，硬化干燥后再将铸型中的易熔模熔化排出即成铸型，留下的中空铸型经焙烧后即可浇入熔融金属生产出铸件。为支撑与固定置入砂箱中的型壳，一般都加入填充砂。对于小型铸件，往往将多个单件易熔模粘结在浇口棒上，以达到一型多件的目的。对于复杂铸件可将铸件分解成几部分单独制模，而后粘结在一起，形成复杂的铸件模样。易熔模材料常用石蜡、硬脂酸钙及树脂基材料等。型壳骨料则用硅砂、锆砂、电熔刚玉等，粘结剂常用水玻璃、硅溶胶、硅酸乙酯等。其工艺过程见图2-1-12。

熔模铸造基本上适用于所有铸造合金，包括铸铁、铸钢及各种有色金属。其主要优点是尺寸精度高，可达CT4～CT7级，表面粗糙度可达Ra（1.6～12.5）级，因此可大大减少切削加工余量。它可铸造出壁厚小至0.5mm，质量小到几克的铸件，且可在铸件表面铸出各种文字、图案等。还适用于铸造用普通砂型铸造、锻造、切削加工等方法难以生产出的复杂结构的零件。

熔模铸造生产可由很多专用设备组成的机械化生产线进行。

2）金属型铸造

金属型铸造是在重力作用下将熔融金属浇入到金属铸型中获得铸件的方法。它又称硬模铸造、铁模铸造、永久模铸造、重力铸造等。

在金属型铸造中，为形成铸件内腔，既可用可抽出的活块式金属芯，也可用普通砂芯。金属型铸造由于铸型冷却速度快，改善了铸件凝固条件，具有激冷效果，使铸件晶粒细化、组织细密、能改善铸件的力学性能；金属型铸件尺寸准确、表面光洁；金属型铸造设备紧凑，易于实现自动化，生产效率高。其缺点是金属型寿命相对较短，模具费较高。

金属型适用于大量生产的铝、镁等合金复杂铸件，也可用于黑色金属铸件。在汽车行业中广泛用来生产铝合金缸盖、进气管及活塞等。也有用来生产灰铸铁凸轮轴、球墨铸铁转向节等，但其模具材料往往采用导热性高的铜合金，使铸件快速凝固与出模，同时辅以模型优质涂料，以减少金属液对模具的损伤。一般采用多工位转盘式铸造机，主要由金属型喷涂料、下芯、合型、浇注、开型、顶出铸件等工位组成。

3）压力铸造

汽车论坛 http://www.qclt.com

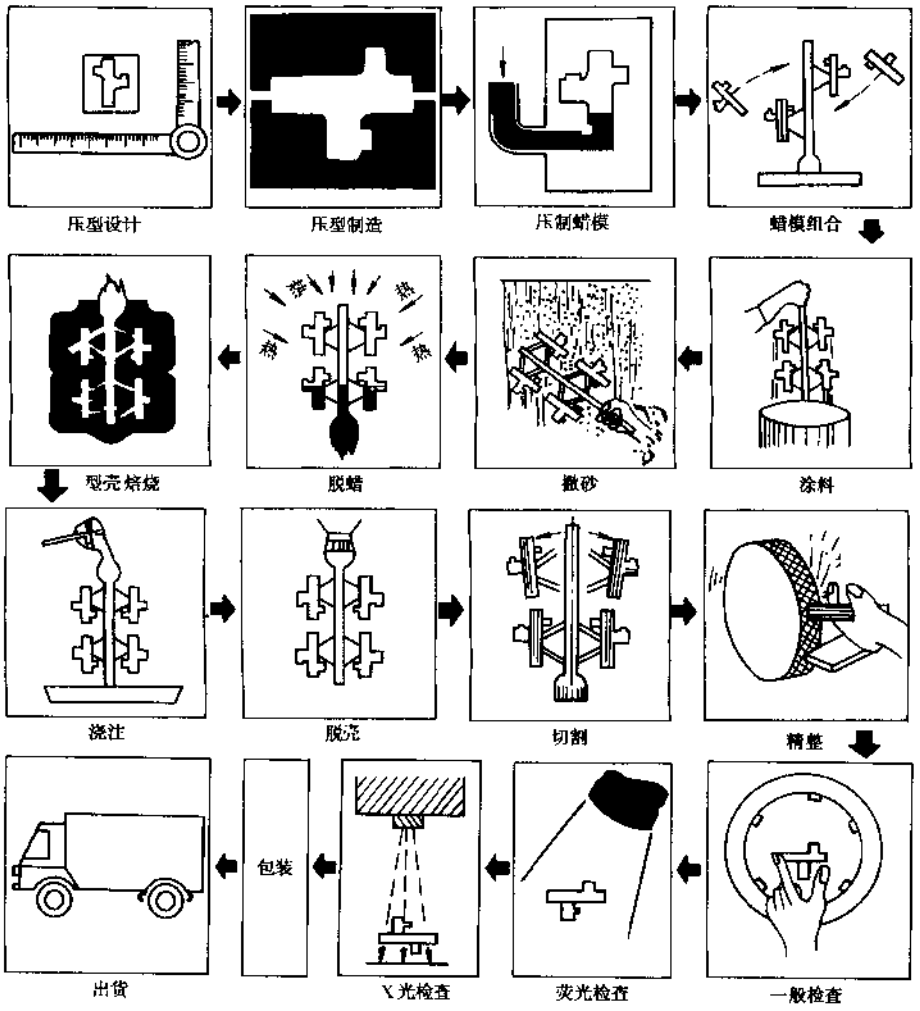


图 2-1-12 熔模铸造工艺过程示意图

压力铸造是将液态金属在压力作用下高速填充金属压铸模型腔，并在压力下快速凝固而获得铸件的方法。常用压力从几兆帕至几十兆帕（即从几十到几百个大气压），填充初始速度在0.5～70m/s范围内，填充铸型的高压高速是压铸法与其它铸造方法的根本区别。其优点是生产效率高，铸件力学性能好，尺寸精度高，表面极光洁。可生产壁厚为0.3～25mm的复杂铸件，重量可从几克到数十千克，还可在铸件表面铸出清晰的文字及图案。其缺点是压铸的铸件易产生气孔，不能进行热处理，压铸高熔点合金铸件还存在困难。压铸法适用于锌、铝、锡、铅、镁等有色金属合金铸件，广泛用于汽车、拖拉机、电器仪表、医疗器械、航空航天工业等。在汽车行业，压铸的零件有上百种之多，其中最复杂的铝压铸件为缸体缸盖等，压铸时除了要下很多型芯之外，对铝缸体还要将铸铁缸套压铸到缸体中。近年来出现的为减少铸件气孔为目的的真空压铸、加氧压铸、半固态金属压铸、为减少铸件厚壁处缩孔的局部冷却与局部加压工艺。以及黑色金属压铸技术等，将大大扩大压铸法的应用范围。

压铸过程循环为：清理模具→喷刷涂料→合模→浇料→压射→凝固→开模→顶出→取出铸件。

压铸机可分为热室和冷室两种形式。冷室式又分立式和卧式两种。根据压铸机合型力的大小而规定其不同规格，例如：国产J11160型压铸机即表示金属型冷室卧式压铸机，合型力为16 000kN，习惯上称为

汽车论坛 http://www.qclt.com

1 600t压铸机。压铸机规格的选用取决于铸件的大小（投影面积）、合金种类、铸件结构及重量等。

4）低压铸造和差压铸造

（1）低压铸造

低压铸造是在装有金属液的密封坩埚中，通入干燥过的压缩空气作用于金属液面上，使金属液沿着中心的升液管自下而上地经浇道注入铸型，充型压力根据铸型与液面的高差、合金液密度及金属液通道的阻力系数计算。待金属液充满型腔后，增大气压至0.05～0.15MPa，使型腔内的金属液在压力下凝固成形，然后卸除压力，未凝固的金属液落回到坩埚中，铸型开启后便获得一个铸件，即完成一个低压铸造的工艺过程。图2-1-13为低压铸造原理图。

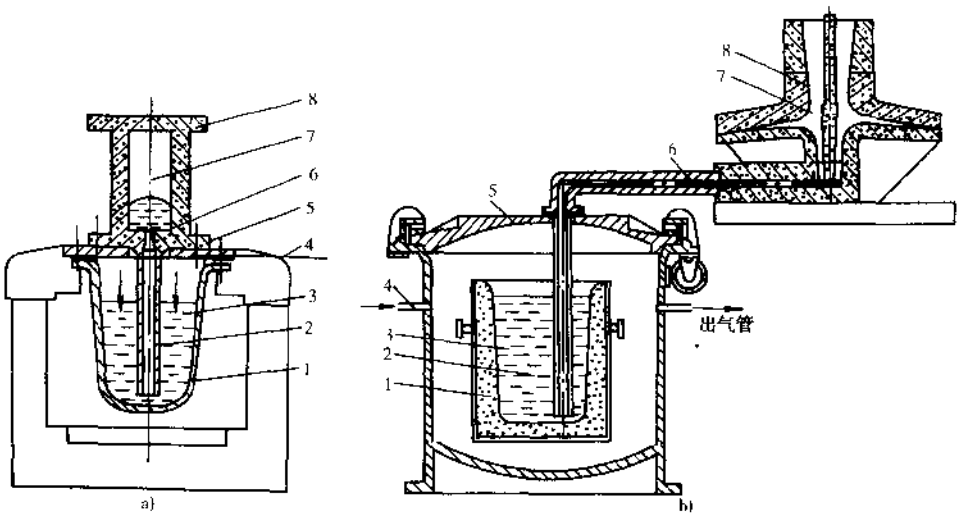


图2-1-13 低压铸造基本原理

a）带保温炉；b）不带保温炉

1-坩埚；2-升液管；3-金属液；4-进气管；5-密封盖；6-浇道；7-型腔；8-铸型

低压铸造的工艺特点是金属液充型平稳，充型速度可调整，在压力下充型有利于获得轮廓清晰的铸件，也有利于凝固补缩，浇注系统简单，工艺出品率高。又因低压铸造既可用金属型，也可用砂型及其它铸型，对合金种类适应范围宽，有色合金、铸铁、铸钢皆可使用。与压铸相比，工艺简单，投资少，广泛用于汽车发动机，机车车辆等工业，例如发动机铝合金缸盖、缸体、活塞、曲轴箱壳、轿车轮毂以及铸铁缸套、球铁曲轴等。

低压铸造机主要由主机（包括机架、保温炉、开合型机构及液压系统等）、液面加压装置、电气控制系统等组成。

（2）差压铸造

差压铸造又称反压铸造、压差铸造。它是在低压铸造的基础上，在铸型外罩一密封罩。浇注时同时向密封坩埚内和铸型密封罩内通入压缩空气，但坩埚内的压力略高于铸型罩内压力，使坩埚内金属液能在压力差作用下经升液管充填铸型，并在比低压铸造更高的压力下凝固，一般的工作压力为0.55～0.6MPa。其优点是凝固过程易于补缩，铸件组织致密。另外，在压力作用下，金属液中的气体溶解度较高，故可减少气体析出形成针孔缺陷。还可通入某些专用气体，熔解到金属液中起到合金化作用，例如在铸钢液中通入氮以提高强度和耐磨性。差压铸造的应用范围与低压铸造相似，还可用于在压铸机上生产受投影面积或壁厚限制的零件，与低压铸造相比，设备要复杂些。图2-1-14为差压铸造装置简图。

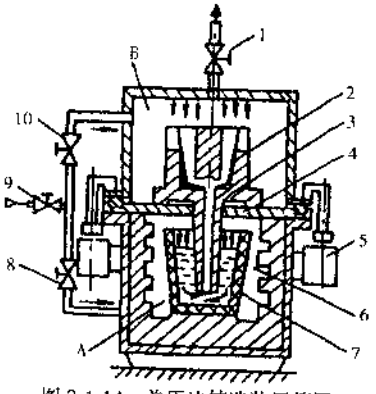


图2-1-14 差压法铸造装置简图

A-下密封室；B-上密封室；1、8、9、10-阀；2-铸型；3-升液管；4-密封盖；5-夹紧装置；6-金属液；7-坩埚

5）离心铸造

离心铸造是将金属液浇入高速旋转的铸型中，在离心力作用下填充铸型而凝固成形的一种铸造方法。根据旋转轴线的方向，而分为卧式和立式离心铸造机两种类型。其特点是金属液在离心力作用下凝固成形，有利于提高铸件的致密度和力学性能；生产中空铸件可不用型芯，特别适用于生产长形管件。离心铸造几乎没有浇注系统和冒口，金属液出品率最高。缺点是对某些合金容易产生密度偏析，铸件内壁表面粗糙，聚有熔渣，故内孔加工余量要大。离心铸造适用多种铸造合金，铸件最小直径可为8mm，最大直径可达2.6m，最大长度则可达8m，铸件质量可为数克至数十吨。在汽车行业中广泛用于铸铁缸套及一些双金属筒套及轴瓦等铸件。

离心铸造机，有通用型和自动化程度很高的专用离心铸造机。图2-1-15为卧式离心铸造示例。

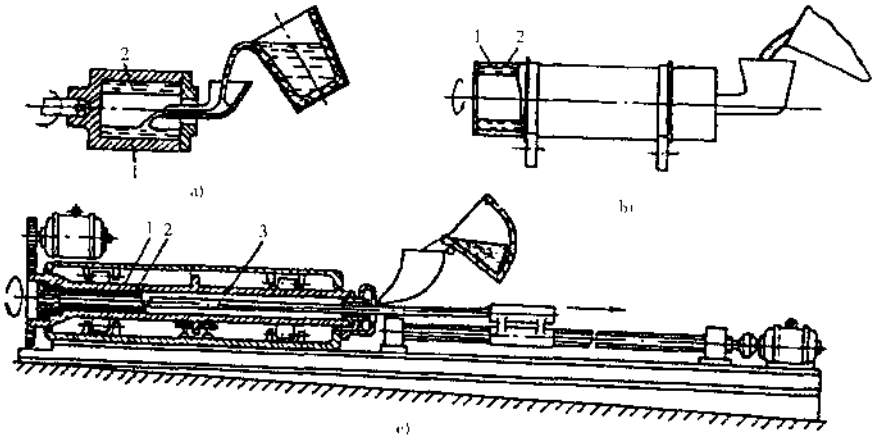


图2-1-15 卧式离心铸造示例

a）卧式悬臂离心铸造；b）滚筒式离心铸造；c）水冷金属型离心铸管

1-铸型；2-铸件；3-移动浇注槽

6）挤压铸造

挤压铸造也称“液态模锻”，它是对进入金属铸型型腔内的液态或液—固态金属用冲头、柱塞等施加较高压力（一般为50MPa以上），使其成形的凝固，从而获得铸件的一种工艺方法。由于凝固是在压力下进行，故铸件组织致密，可防止气孔、缩松及裂纹等缺陷。由于晶粒细化，可以进行淬火热处理，力学性能高于其它普通铸件，可接近同种合金锻件水平。铸件尺寸精度高、表面光洁。其缺点是生产结构复杂的铸件尚有困难。挤压铸造适用于各种铸造合金，但应用最多的是要求力学性能好、致密度要求高的厚壁铝铸件，如汽车、摩托车的铝轮毂，铝活塞等。挤压铸造机相对较简单，可以选用通用液压机，也可选用专用挤压铸造机。图2-1-16为挤压铸造工艺程序示意图。

7）消失模铸造

消失模铸造曾有很多名称，如气化模铸造、实型铸造、消失泡沫（模）铸造（Lost Foam Process）等。1990年美国铸造学会正式采用消失模铸造（Expendable Pattern Casting或缩写为EPC）作为这一工艺的通用标准名。

消失模铸造是用聚苯乙烯（EPS）等泡沫塑料制成模样，将模样组装粘合和上涂料后，放入砂箱中，再加入不加粘结剂的石英砂震实造型，模样不取出而直接浇注金属液，模样受金属液高温作用而气化排出，金属液则填充到已烧失的模样空间，从而得到与模样大小和形状相同的铸件。除常用的充填无粘结剂的石英砂的造型工艺之外，还有一种自硬砂造型消失模工艺，它适用于单件小批的中大型铸件生产，如汽车覆盖件的冲模、机床床身等。属于消失模铸造的还有一种称为“磁型铸造”的方法，它是一种在磁力作用下使消失模样紧固于铁丸中进行浇注的方法，其特点是铁丸导热性能好，铸件冷却快，晶粒细化，力学性能较优。图2-1-17为消失模铸造工艺过程。

汽车论坛 http://www.qclt.com

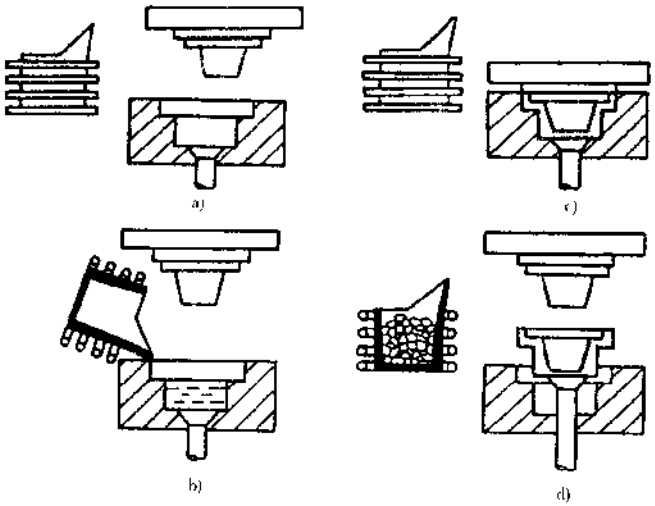


图 2-1-16 挤压铸造工艺程序示意图

a）铸型准备；b）浇注；c）合型加压；d）开型、取出铸件

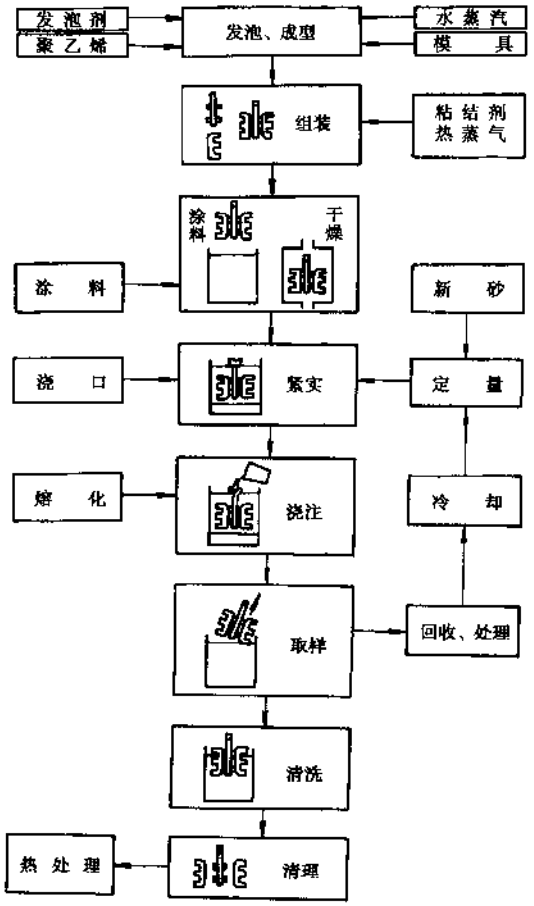


图 2-1-17 消失模铸造工艺过程

消失模铸造的优点在于铸件尺寸与形状准确，具有熔模精密铸造的特点；不用型芯、不用合型、不用取模，大大简化了造型工艺；采用干砂填充，免除了庞大复杂的砂处理系统，还消除了普通湿砂型所引起的气孔、砂眼等铸造缺陷，由于不分型，铸件无飞边毛刺，清理打磨工作量减少50%以上。通过分片制模，而后粘合组装，可以铸造出更为复杂的铸件，代替原为多个零件机械组装的构件，由于工序简化，工厂设备投资可减少30%～50%，铸件成本可下降10%～30%。

消失模铸造已成功地应用于铝合金缸盖和进气歧管等的大量生产，但用于更大更复杂的铝合金铸件、铸铁铸钢件还存在不少问题。对于尺寸大的模样容易变形，对于黑色金属会产生大量热解气体和碳，促使铸件形成气孔、表面光亮碳和皱皮等碳质缺陷，对铸钢件还会产生不均匀增碳现象。所以，汽车行业选用消失模生产铸铁缸体缸盖等复杂铸件的工艺，尚需深入调查研究。

2.1.3 铸造模具（模样、芯盒）的设计与制造

传统的模具设计与制造过程是根据铸件的工艺设计进行模样与芯盒设计，整套蓝图交由制造单位加工与装配。模具经划线检查后，交给铸造单位进行造型、浇注及铸件划线检查，有问题时需经修改后再次调试，一直到铸件合格后投产。

随着计算机技术的发展，CAD/CAM在模具设计与制造中得到应用。目前，大多数模具制造单位，还处于先对产品图纸制定铸造工艺，再用计算机绘制模具图纸，而后交数控编程站编制加工程序，最后将加工程序输入数控机床进行加工。比较先进的模具设计制造，已采用CAD/CAM一体化，首先根据产品图纸或产品图软盘，在计算机上绘制或转换出三维立体图，而后进行工艺设计与模具设计，并编制出加工程序，最后输入数控机床进行加工，大大简化了工序，缩短了制造周期。专业模具厂往往采用多头铣床，可同时加工多套模具。为了验证加工程序的准确性，对复杂模样和芯盒，往往还用木材或易加工的塑料进行试切，确认程序无误后方可正式加工金属模具。对金属模具的某些适当部位，也可采用电火花加工。

在铸造工艺设计时，对复杂铸件还利用计算机数值模拟技术对浇冒口系统进行模拟与设计。

制成的模具已由传统的人工划线改为三坐标测量仪进行检测，并用计算机进行数据处理。

砂模铸造模样所用材料有木材、塑料、铝合金、铸铁和铸钢等。对于大量生产的汽车铸造模样，常用球墨铸铁，也有用铸钢的。铝合金模样的工作寿命为2～6万次，铸铁模样为20～30万次、铸钢模样则可达30～50万次。芯盒一般都用铸铁，对需加热的热芯盒和壳芯芯盒，往往采用加入钼等合金元素的灰铸铁或蠕墨铸铁，以延长芯盒的抗热疲劳寿命。

为了改善模样的起模与耐磨性能，也可对模样进行镀铬或镀镍等表面处理。由于镀层与模样本体在颜色上的差异，模样电镀还有利于发现模样的不均匀磨损。对于模具的局部磨损，可采用刷镀的方法进行修补。

为清除使用过的模具特别是芯盒表面牢固粘结的污垢，除可用传统的用刀刮、用碱水煮、用砂喷等方法外，近年美国又开发出一种先进的干冰抛丸工艺。它是用冰粒（固体CO_2）以压缩空气为载体对污垢进行高速喷射，其优点是干冰不损伤模具，且在喷射后碎裂并升华为CO_2气体逸出，不存在残留物堵塞排气塞等问题。

在压力铸造等特种铸造中，由于模具与金属液直接接触，并承受一定压力与冲击，因而对模具材料有耐高温、抗侵蚀、高韧性、低膨胀的要求，特别是抗热疲劳与抗裂纹的性能，国内外常用铬钼系和钨系热作模具钢。有的模具钢还需经过电渣重熔，以获取更优的性能与寿命。压铸模具也可进行表面氮化处理，减少金属液的粘附；还可局部硼化处理以及对低压铸造模具的金属液入口处采用金属陶瓷等，以延长模具寿命。

2.1.4 铸件热处理

2.1.4.1 铸铁件热处理

1）灰铸铁件热处理

汽车论坛 http://www.qclt.com

（1）时效

用以消除残余应力、提高尺寸稳定性等，时效方法有自然时效、热时效以及振动时效等。热时效是将铸件加热至弹—塑性转变的温度范围（500～600℃）保温一段时间后出炉。振动时效是借助外加激振器产生的激振力，使铸件产生低频共振，从而消除或均匀化残留应力，此工艺还处于开发之中，效果还需验证。

汽车灰铸铁件因为产量大，应尽量通过控制工艺、延长在型内冷却时间、降低落砂温度等措施来减小应力，不要时效。一般中小型铸件，包括中小型发动机的缸体缸盖等，均可不经时效处理。对于较大型的复杂汽车铸件，如中大型柴油机的缸体缸盖等则需要时效处理。时效处理时必须严格控制炉温及时间，注意铸件堆放方法，以免产生新的应力。

（2）石墨化退火

目的是降低硬度以及消除由于工艺控制不当而产生的白口组织，改善切削加工性。按加热温度不同又分为低温退火（650～750℃）和高温石墨化退火。低温退火是使共析渗碳体分解和粒化，降低硬度，改善韧性。高温退火是为了分解铸件中的自由渗碳体，形成铁素体或珠光体基体，从而消除白口组织。实践经验表明，灰铸铁件经高温退火后，尽管能消除白口，但基体组织及石墨将变得粗大，力学性能下降，因而应尽量避免。

（3）表面热处理

耐磨灰铸铁件，如缸套、机床导轨等，采取表面淬火工艺，使工作表面具有耐磨的马氏体组织，内部仍保持良好的韧性。对于缸筒或缸套也有的采用激光淬火工艺的，但应用尚不广泛。

2）球墨铸铁件热处理

（1）退火

根据铸件原始组织不同，又分为低温（720～760℃）退火和高温（900～960℃）退火。前者是使共析渗碳体分解而获得铁素体基体，后者是为消除自由渗碳体和三元或复合磷共晶。若原始组织中碳化物及磷共晶太多时，可采用高温退火＋低温退火两阶段退火工艺。

（2）正火

当铸态珠光体含量达不到产品要求的80%～90%时，可采取正火工艺。即将铸件加热到 Ac_1 上限左右而奥氏体化，而后空冷、风冷或喷雾冷却，以获得珠光体或索氏体组织，提高强度、硬度和耐磨性。为减少正火形成的内应力，对复杂件应再进行回火处理。

（3）等温淬火

等温淬火是获得奥贝球墨铸铁的关键工序。它是将铸件加热到850～950℃，保温，奥氏体化，再迅速过冷到贝氏体转变区（450～250℃），等温转变成上贝氏体或下贝氏体，然后空冷，分别获得上贝氏体＋残余奥氏体或下贝体＋少量马氏体＋残余奥氏体组织的球墨铸铁。

（4）表面高频淬火

表面要求耐磨的铸件，如曲轴、凸轮轴等，往往在加工后对轴颈表面进行高频淬火，使表面具有耐磨的马氏体组织，心部仍保持具有强韧性能的球墨铸件组织。

3）蠕墨铸铁件热处理

蠕墨铸铁件一般不进行消除内应力退火，有时仅为增加铁素体量或消除渗碳体而退火。也有为增加珠光体量而正火的。

4）可锻铸铁热处理

黑心可锻铸铁的石墨化退火一般分五个阶段，即升温、第一阶段石墨化（920～960℃），中间冷却，第二阶段石墨化（650～750℃），出炉冷却，最终得到铁素体基体和团絮状石墨组织。珠光体可锻铸铁则是在石墨化后，再进行空淬或液淬并回火。白心可锻铸铁件则是在强氧化性介质中氧化脱碳退火，小断面（≤6mm）铸件，主要组织为铁素体，无退火碳。大断面铸件则外层为铁素体，中间为铁素体＋珠光体，心部还存在退火碳组织。

5）冷硬铸铁件热处理

对汽车凸轮轴、气门挺杆等铸件，一般仅进行消除内应力退火。

2.1.4.2 铸钢件热处理

汽车常用的碳钢铸件，形状复杂且易变形与开裂的铸件采用退火处理。形状不复杂，壁厚不大的铸件可采用正火处理，厚大铸件则可采用正火＋回火工艺，以提高其力学性能。

2.1.4.3 有色金属和合金铸件的热处理

1）铝合金铸件热处理

铝合金铸件热处理，要根据具体情况决定，例如对压铸铝铸件，由于内部存在气孔、气泡、缩松等，而表层却较致密，因此一般不进行热处理，以免破坏表面致密层。而对金属型生产的缸盖等铸件，为提高其硬度和强度，可采用淬火＋回火处理。

2）镁合金铸件热处理

镁合金铸件为提高力学性能，降低铸造应力等也进行热处理。为提高力学性能而进行固溶处理，但其前提是合金元素在淬火时可以固溶，然后经时效可以析出。固溶处理加热温度根据铝合金成分不同而不同，例如 ZMgAl8Zn 铝合金，加热温度为 415±5℃，保温时间 6～12h，而后进行空冷淬火，人工时效的加热温度为 200±5℃，保温 12～16h，镁合金铸件热处理加热温度超过 400℃时，则需采用 CO_2 等保护性气体，防止铸件表面氧化。

3）锌合金铸件热处理

（1）稳定化处理

因铸造锌合金中的固相脱溶分解及共析转变，容易受到冷却速度和铜、镁等的作用而被抑制，铸态下的组织不稳定，随后会因组织缓慢时效而影响铸件尺寸和性能。在低温（100℃以下）下进行稳定化处理则可加速组织转化，而使尺寸及性能稳定。

（2）均匀化处理

可改善枝晶偏析，并得到细片状共析组织，以提高塑性。均匀化处理温度一般为 320～400℃，保温 5～8h。

4）铜合金铸件的热处理

对于结构较复杂的铸件，常采用退火处理，以防止铸件在使用中尺寸不稳定及变形，退火加热温度为 250～300℃，保温 1.5～2.5h，而后空冷。

2.1.5 铸件品质（质量）

铸件品质包括铸件的外观品质、内在品质和使用品质。铸件的外观品质是指铸件外部状况，包括尺寸精度、形状偏差、质（重）量偏差、表面粗糙度、表面缺陷等；铸件的内在品质是指铸件内部状况，包括铸件的物理性能、力学性能、金相组织、化学成分、偏析、铸造应力、致密度、内部缺陷等；铸件的使用品质是指与使用条件及要求有关的反映铸件效用与寿命的各种性能。

2.1.5.1 铸件外观品质

1）铸件的尺寸精度

铸件的尺寸公差是指其基本尺寸所允许的最大偏差。铸件的基本尺寸包括零件尺寸、机械加工余量和工艺余量等，见图 2-1-18。

铸件尺寸公差的代号为 CT（Casting Tolerance）。根据 GB6416—86 铸件尺寸公差，将铸件公差分成 16 级，见表 2-1-3，表中的公差值包括因分型面及型芯引起的公差增量。该标准对不同合金、不同铸造方法成批大量生产的尺寸公差也作了规定，见表 2-1-3。

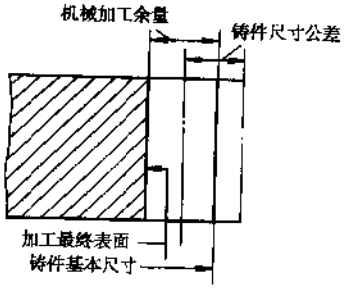


图 2-1-18 铸件尺寸公差与机械加工余量的关系

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-1-3 铸件尺寸公差数值（GB6414—86）（mm）

铸件基本尺寸		尺寸公差等级 CT															
>	≤	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
—	10			0.18	0.26	0.36	0.52	0.74	1.0	1.5	2.0	2.8	4.2	-	—	—	—
10	16			0.20	0.28	0.38	0.54	0.78	1.1	1.6	2.2	3.0	4.4	—	—	—	—
16	25			0.22	0.30	0.42	0.58	0.82	1.2	1.7	2.4	3.2	4.6	6	8	10	12
25	40			0.24	0.32	0.46	0.64	0.90	1.3	1.8	2.6	3.6	5.0	7	9	11	14
40	63			0.26	0.36	0.50	0.70	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8	10	12	16
63	100			0.28	0.40	0.56	0.78	1.1	1.6	2.2	3.2	4.4	6	9	11	14	18
100	160			0.30	0.44	0.62	0.88	1.2	1.8	2.5	3.6	5.0	7	10	12	16	20
160	250			0.34	0.50	0.70	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8	11	14	18	22
250	400			0.40	0.56	0.78	1.1	1.6	2.2	3.2	4.4	6.2	9	12	16	20	25
400	630				0.64	0.90	1.2	1.8	2.6	3.6	5	7	10	14	18	22	28
630	1000					1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	6	8	11	16	20	25	32
1000	1600						1.6	2.2	3.2	4.6	7	9	13	18	23	29	37
1600	2500							2.6	3.8	5.4	8	10	15	21	26	33	42
2500	4000								4.4	6.2	9	12	17	24	30	38	49
4000	6300									7.0	10	14	20	28	35	44	56
6300	10000										11	16	23	32	40	50	64

注：①CT1 和 CT2 级尚未规定公差值，是为将来更精密的公差保留的。

②铸件基本尺寸小于 16mm 的 CT13～CT16 级公差值需单独标注，可提高 2～3 级。

表 2-1-4 成批大量生产铸件的尺寸公差等级（GB6414—86）

铸造工艺方法	公差等级 CT								
	铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铜合金	锌合金	轻金属合金	镍基合金	钴基合金
砂型手工造型	11～13	11～13	11～13	11～13	10～12		9～11		
砂型、机器造型，壳型	8～10	8～10	8～10	8～10	8～10		7～9		
金属型		7～9	7～9	7～9	7～9	7～9	6～8		
低压铸造		7～9	7～9	7～9	7～9	7～9	6～8		
压力铸造					6～8	4～6	5～7		
熔模铸造	5～7	5～7	5～7		4～6		4～6	5～7	5～7

铸件壁厚公差——铸件壁厚公差可比该铸件其它尺寸的一般公差低一级选用。汽车铸件主要壁厚及公差一般都单独注明。

2）铸件错型量

由于上下铸型定位不准而引起的上下型形成的铸件位错，称为错型，俗称错箱。错型量应被包括在铸件尺寸公差值之内。错型量的规定见表 2-1-5。

表 2-1-5 铸件错型量（GB6414—86）

公差等级 CT	3～4	5	6	7～8	9～10	11～13	14～16
错型量（mm）	在表 2-1-3 的公差以内	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.5

注：必要时错型量可由供需双方商定。

3）铸件质（重）量公差

铸件的公称质量包括零件自身、加工余量、工艺余量等的金属质（重）量。质量公差是衡量铸件品质稳定性的参数之一，能反映铸件尺寸及内在品质的稳定性。对成批大量生产的铸件，是从首批合格铸件中

汽车论坛 http://www.qclt.com

随机抽取 10 件，取其平均质量作为公称质量。质量的公差等级见 GB/T11351—89 铸件质（重）量公差。

目前把铸件质（重）量公差作为验收条件应用尚不广泛。

4）铸件表面粗糙度

铸件表面上具有的较小间距和峰谷所组成的微观几何形状特性，称为表面粗糙度。铸件表面粗糙度的评定常用标准样块对比的方法，即用符合 GB6060.1—85 规定的、与被检铸件的合金和工艺方法相同的表面粗糙度的比较样块，凭视觉或触觉对比被检铸件，来评定该样块的标定等级。

2.1.5.2 铸件品质（质量）检测

1）外观品质检测

外观品质检测包括尺寸偏差、形状偏差、表面粗糙度、表面缺陷及清理品质等的检测。对大量生产的汽车铸件，尺寸与形状偏差可用划线方法或检验夹具检测。由于人工划线及三坐标测量仪检测速度慢，只能按一定比例进行抽检，但它可测量的尺寸数量较多。用检验夹具检测是以铸件加工定位点作基准，检测铸件的一些主要尺寸。有的检验夹具还采用计算机记录与处理测量数据，分析尺寸变化的规律，给模具的维修与报废提供依据。由于检验夹具效率高，可对流水生产的铸件全数检查。尺寸偏差特别是形状偏差的检测还可采用专用的样板。

表面粗糙度、表面缺陷及清理品质则用目视、粗糙度标准样块或用放大镜进行检查。

铸件清洁度检查——是针对汽车用复杂铸件的一项检查，是以铸件经抛丸、清理与吹灰之后，尚存在铸件内外表面的浮砂与灰尘量作为清洁度指标。被检铸件是在煤油中浸泡，并用毛刷刷下铸件表面的浮砂与灰尘，刷下物经过滤与烘干，称出重量。根据铸件复杂程度不同，规定的浮砂与灰尘量为几毫克到几克。

内窥镜检查——缸体缸盖水套内部，往往由于水流通道狭窄，型芯容易局部被浇结而堵塞水流通道。这种用目视看不见的地方可用光导纤维内窥镜检查。

2）铸件材质检测

重要的汽车铸件要检测铸件本体性能，并相应地采用各种不同的检测方法。例如，用通过式数显硬度计 100%检测铸件指定部位的硬度；用磁滞涡流法检测铸件基体组织，间接地衡量铸件硬度；按一定比例抽检部分铸件，解剖后测定指定部位的硬度及力学性能；用音频或超声波法检测球墨铸铁件的球化率；用气压法检测有防渗漏要求铸件的渗漏情况等等。

3）铸件内部缺陷的无损检测

a. 渗透探伤——利用渗透剂渗入铸件表面显示缺陷图像痕迹的方法称渗透探伤。它可用来判别表面开口气孔、渣眼、砂眼、表面缩松、裂纹及冷隔等表面缺陷，并能确定缺陷的位置、大小和形状，但难以确定缺陷的深度，此种方法须经预处理、渗透处理、乳化处理、洗涤、显像、缺陷判定等步骤，仅适用于单件小批生产的重要铸件。

b. 磁粉探伤——用荧光磁粉探伤可检测出铸件表面及近表面的缺陷，如裂纹、冷隔、夹渣、缩松等。很多汽车保安铸件都需全数磁粉探伤。

c. 超声波探伤——用频率 20kHz～20MHz 的超声波探测铸件内部缺陷的方法称超声被探伤。超声波探伤有脉冲反射法、穿透法和谐振法。应用最多的是脉冲反射法。超声波探伤能发现的最小缺陷通常为 $\lambda/2$（即 1/2 波长），因此频率越高，探伤灵敏度也越高，但频率过高，穿透厚度减小。超声波不适用于粗晶材料（如奥氏体铸钢）和形状复杂或表面粗糙的工件。

d. 射线探伤——它是利用射线的直线透射及衰减的特性检测工件内部缺陷的方法，常用射线有 X 射线、高强 X 射线和 γ 射线。其中 X 射线应用最广。射线探伤可分为透射照相法、荧光屏观察法和工业电视法。在现代化汽车铸件生产中，多采用工业电视法，它可连续显示铸件各部位内部有无缺陷，对缺陷部位可放大图像。工件放置在可以不同方向旋转的夹具中，便于对不同方向的不同部位进行检测。图 2-1-19 为工业电视检测与显示原理图。

汽车铸件生产中可将铸件检测与探伤设备配以机械手及传输装卸置组成检测自动线。例如，将缸体铸

汽车论坛 http://www.qclt.com

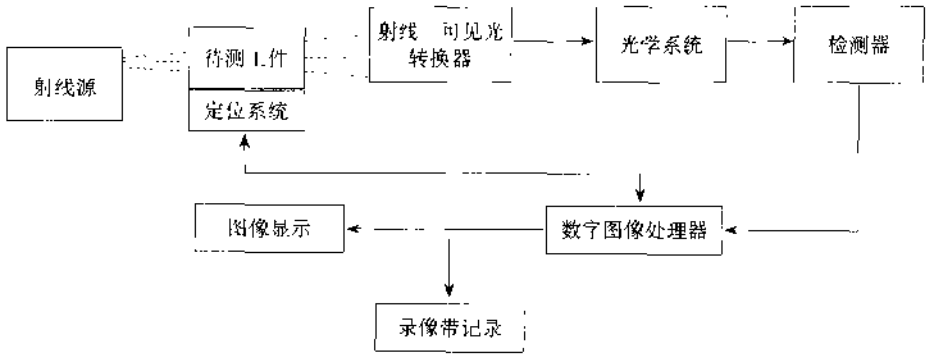


图 2-1-19 工业电视的检测、显示原理示意图

件的渗漏试验、铸件打硬度、铣定位点及主要尺寸检测组成一台联合机床。将超声波检测球化率、涡流法检测硬度和磁力探伤检查裂纹等仪器设备组成为多项检测线，从而能对铸件 100% 逐个检测与探伤，将 X 射线检测设备配以铸件随行夹具、上下料机构及传输机构等组成检测线，100% 检测转向节等保安件的内部缺陷。

2.1.5.3 铸件缺陷修复

铸件的某些缺陷，如气孔、夹渣、夹砂、冷隔、渗漏等，可按技术条件规定范围进行修复。修复方法有焊补、渗补、熔补、环氧树脂粘补、塞补、腻补、金属喷镀等方法。汽车工厂主要用焊补和渗补两种方法。

焊补——铸钢由于焊接性能好，各种缺陷皆可用焊补修复。铸铁由于焊接性能差，焊后常产生气孔、变形、硬度高等问题。因此对非加工面可用冷焊、半热焊（250～450℃），对加工面则需将铸件加热至 600℃左右，用氧—乙炔及铸铁专用焊条进行焊补，焊后还需退火处理，以消除内应力。较大型的铸铝缸体缸盖等也可用金属极电弧焊进行修复。

渗补——浸渗修补是将液态材料（浸渗剂）渗透到铸件的疏松等缺陷内部，浸渗剂硬化后堵塞孔洞而修复铸件。广泛用于各种耐气压或液压的铸件。如发动机缸体、缸盖等大都 100% 先经过渗漏检查，而后对渗漏件进行渗补。对于有防渗要求的压铸件，由于内部常出现破碎激冷层，与正常组织之间存在界面缝隙，以及由于凝固速度快，易存在气孔等缺陷，需 100% 进行渗漏检测与渗补。渗漏检测与渗补不但在铸造厂进行，而加工厂切削加工后再次进行逐件渗漏检测和渗补。

2.1.6 计算机在铸造生产中的应用

2.1.6.1 计算机检测与控制

利用计算机及微电子技术，对生产设备与生产过程进行检测与控制是生产优质铸件的必备条件，也是铸造生产现代化的一个重要标志。特别是在汽车铸件大量生产中在各种铸造方法过程中运用微机检测与控制很广泛，仅在砂型铸造就有以下方面：

a. 型砂性能及砂处理过程的检测与控制。

b. 冲天炉熔炼过程的配料、风量、风压、冷却水及温度的自动控制。

c. 金属液品质的炉前快速检测及微机处理，包括金属的温度、C 和 Si 含量、共晶度、强度及硬度等的检测。

d. 金属液流动性和铸型性能的检测、造型线主辅机工作状态的监控。

e. 铸件的内部缺陷、表面粗糙度、尺寸精度的检测等。

随着科技的发展，铸造行业计算机检测与控制越来越强调在线监控，强调集成化和信息化，不再处于分离与独立状态，各监控系统能相互配合与协调，成为一个有机整体，以达到高效、低耗、优质的目的。

2.1.6.2 计算机辅助设计（CAD）

广义的铸造CAD包括工艺设计和模拟仿真技术。

目前国内外开发的铸造工艺CAD系统可分为两类，一类为通用铸造CAD系统，主要用于砂型铸造工艺设计，它又分为铸钢、灰铸铁、球墨铸铁及有色合金铸件等几种，功能包括浇注及补缩系统设计；分型面、拔模斜度、加工余量的确定；尺寸标注及工艺图、工艺卡的输出等。另一类为专用铸造CAD系统，主要用于某些特定范围，例如压铸模CAD、齿轮类CAD等。

2.1.6.3 计算机辅助工程（CAE）

与CAD不同，CAE更侧重于预测、分析与优化，故目前学术界倾向于将铸造模拟仿真技术列入CAE范畴。

铸造数值模拟技术是利用传热学、流体力学、力学等理论建立能够准确描述铸造某一过程的数学模型，采用数值计算方法对模型进行求解，以此得到求解对象的全过程动态的模拟分析结果，以判断铸造工艺的优劣与预测缺陷。例如，用温度场模拟凝固过程，预测缩孔缩松及冷隔等缺陷；用流动场模拟充型过程，预测卷气、夹渣、冲砂等缺陷；用应力场模拟分析铸件的应力分布，预测热裂、冷裂及变形等缺陷；用组织模拟来计算形核数、枝晶生长速度、组织转变、预测铸件的组织与性能。此外，还在开发压铸、低压铸造、熔模铸造等特种铸造的模拟仿真技术。

2.1.6.4 专家系统

专家系统是一种基于知识的智能系统，用于求解那些人类专家才能解决的高难度问题。铸造生产是一个复杂的过程，产品品质受诸多因素影响，在处理一些突发事件时，往往需要丰富的知识与经验，为此已开发出一些铸造专家系统来处理这些错综复杂的问题，以得到正确的诊断结果，及时准确地解决问题。正因为铸造生产过程复杂、知识类型繁多、知识表达困难、决策空间大、多目标和多重约束、模糊性和不确定性等的制约，要开发出一套真正实用的铸造专家系统困难很多。

2.1.7 先进制造技术在铸造上的应用

2.1.7.1 CAD/CAE/CAM一体化

用以综合考虑铸件的可使用性、可制造性、铸件生产的投资、成本及市场等因素，快速准确的预测铸件的价格、性能等，缩短设计与制造周期。

2.1.7.2 快速成形技术（Rapid Prototyping Technology，简称RPT）

快速成形技术被誉为铸造CAD/CAM技术进入21世纪的主要标志，它是建立在CAD、CAM和CNC技术基础上，利用激光使树脂或其它粉末材料逐层硬化、胶结或烧结，快速制造出铸件原样、模样及芯盒等的高新技术，可大幅度地提高工效。

2.1.7.3 并行工程（Concurrent Engineering）

并行工程也称同步工程，是对产品及其相关过程进行并行一体化设计的一种系统化工作模式，以减少出现制造、测试、市场和产品维护等的设计错误、铸件生产由于过程复杂，更有必要推行并行工程。

2.1.7.4 发展绿色集约化铸造

所谓绿色，是指包括铸件生产、使用、回收及废弃处理等都符合环保要求，最大限度地利用自然资源和节约能源。集约化则指通过增大科技和资本的投入，精心经营，以获得最大的产出和效益，绿色集约化铸造是实现铸造可持续发展的重要途径。（撰稿人：彭元亨）

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.2 锻 造

2.2.1 概述

2.2.1.1 锻件在汽车上的应用

锻件的强度及可靠性很高，广泛应用于汽车发动机、变速器、转向器、行走部分总成的零件上。主要有：

①发动机：曲轴、连杆、连杆盖、凸轮轴、进排气阀门等；
②前悬架：上悬臂架、下悬臂架、转向横拉杆球铰接头等；
③前桥：转向节、转向节臂等；
④转向：转向扇形轴、转向摇臂、变速器等；
⑤后桥：后车轴、外壳末端；
⑥驱动轴：驱动轴、十字轴、轴叉、TM 齿轮；
⑦差速器：主动小齿轮、环齿轮、凸缘叉；
⑧等速万向节、半轴齿轮轴、轴承外座圈、内轴承座圈。

2.2.1.2 锻造的实质及基本条件

①锻造是利用金属材料的可塑性，借助外力（加压设备）和工模具的作用使坯料或铸锭产生局部或全部变形而形成为所需要的形状、尺寸和一定组织性能的锻件的加工方法。包括热锻、温锻、冷锻、等温锻造等工艺。

②锻造成形的基本条件主要有：一是在变形过程中材料能承受所需的变形量而不致破坏；二是设备要通过工模具向变形件施行足够大的压力。

2.2.1.3 制订锻造工艺的基本原则

锻造工艺方案的制订或选择随成形设备的条件、锻件要求精度、生产纲领大小的不同而各异，仅以载货汽车发动机连杆成形工序而言，同一种连杆可以利用不同的设备或不同的工艺方法来完成。若在模锻锤上成形时，坯料在同一副模块的拔镦、预终锻模膛中完成；若在机械锻压机上模锻，则需预先采用辊锻制坯；若用成形辊锻方法生产，则可通过精密辊锻后再加上一道整形工序而获得合格件；而对精密度很高的轿车连杆、变速器齿轮等其成形工艺方案的选择，则灵活性相应受到一定的制约，这时连杆最宜采用辊锻制坯、机械压力机生产线的方式生产；变速器齿轮最宜采用高速精密热锻造机成形。总之，在保证锻件产品的外部质量（如尺寸精度、表面缺陷精度等）、内部质量及生产率的前提下，还应体现出有良好的经济效益。具体应做到：

①节约原材料尽量采用小、无飞边和少、无加工余量成形，前者以提高锻件材料利用率，后者为减少切削加工量。如挤压、预锻、扩辗、摆辗、楔横轧、斜轧、径向锻造、高速精密锻造等工艺都是节约原材料的工艺。如大批量生产的汽车变速器齿轮组件，采用高速热精锻成形工艺，其材料利用率可达到 95% 左右（一般成形方法为 76%～82%）；又如形状复杂的汽车转向节采用正、反挤相结合的挤压成形工艺，其材料利用率可达 83%，比一般模锻工艺高出 5%～6%。

②减少能耗系指减少制造过程的总能耗。如冷锻工序因省去加热工序，能耗下降，但还应考虑冷锻前的软化处理及工序间的退火所消耗的能量。锻后余热淬火及应用非调质钢等都是节能降耗的有效方案，非调质钢的采用毋须锻后热处理一项可节电 1.0kW·h/kg；余热淬火工艺，后序只须回火，可节电 2/3。

③降低变形力尽量采用省力的成形方法，这不仅可以减少设备吨位和初投资，还可提高模具寿命，如回转成形工艺等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

④工艺稳定性好，能实现长期、连续、稳定地生产。

2.2.1.4 锻造工艺

锻造工艺基本流程如图 2-2-1 所示。

锻造按所用工具与模具的安置情况的不同可分为自由锻、胎模锻、模锻等类型，如表 2-2-1 所示。模锻按成形温度不同可分为热锻、冷锻、温锻、等温锻等类型，如表 2-2-2 所示。模锻按工具及工件的相对运动方式不同可分为普通模锻、辊锻、横轧、斜轧、扩辗、摆辗、径向锻造等类型，如表 2-2-3 所示。

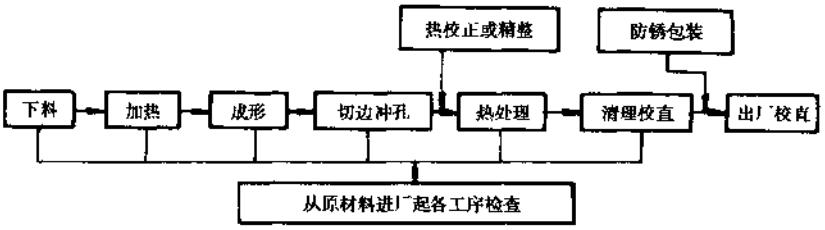
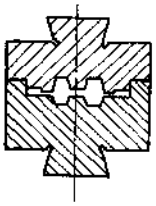
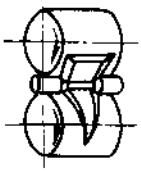
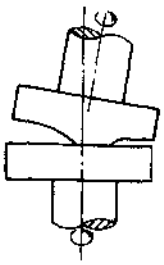
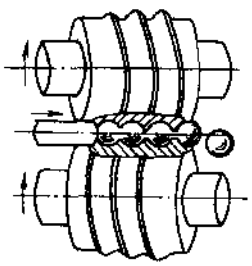


图 2-2-1 锻造工艺基本流程

表 2-2-1 工模具按安置情况分类

名　　称	特　　点
自 由 锻	靠固定的平砧或型砧成形
胎 模 锻	锻模为可移动式
模　　锻	锻模为固定式

表 2-2-2 模锻按相对运动方式分类

名　　称	特　　点	名　　称	特　　点
普通模锻 	模具相对于坯料作直线往复运动。如锻锤、锻压机、平锻机上进行的各种开式、闭式模锻	横轧 	轧辊轴线相互平行，旋转方向相同，轧件旋转轴线与轧辊旋转轴线平行，但旋转方向相反。如汽车转向蜗杆、直拉杆、中间轴及凸轮轴等的成形横轧
摆辗 	转头除自转外还作公转，工件不转动但有轴向进给运动。如盘类件、法兰件、法兰盘的成形摆辗。汽车后桥半轴可用成形摆辗法兰部分	斜轧 	轧辊轴线交叉成一个小角度，其旋转方向相同，轧件在两辊交叉中心线上作与轧辊旋转方向相反的运动。如各种类型的螺纹件、球形件的轧制

续上表

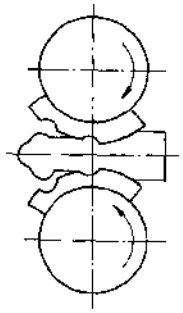
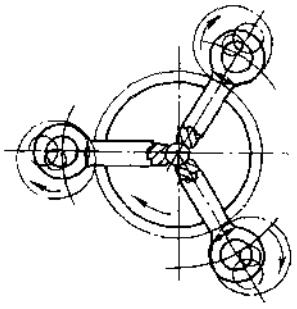
名　称	特　点	名　称	特　点
辊锻 	毛坯作直线运动，两辊锻模作旋转运动，旋转方向相反，其旋转轴线与毛坯运动方向垂直。如辊锻机上进行的汽车前轴、曲轴、连杆等毛坯的辊锻	径向锻造 	坯料周围对称分布几个锤头，沿坯料径向进给，高频率同步锻打，坯料通常边旋转边送进常用于汽车直拉杆等多台阶轴类件的成形锻制

表 2-2-3　模锻按成形温度分类

名　称	特　点
热　锻	终锻温度高于再结晶温度、工件温度高于模具温度
温　锻	介于热锻和冷锻之间的加热锻造
冷　锻	指室温进行的或低于工件再结晶温度的锻造
等温锻	模具带加热和保温装置，成形时模具与坯料等温

2.2.2　锻造加工工序及相应设备

2.2.2.1　切断（原材料剪断）工序及设备

热锻前的坯料切断，由于热锻工序生产率很高，目前多使用坯料切断机来切断型钢，即使是冷锻、温锻，一般也是用切断机。对断面质量要求高的采用锯切（如圆盘锯、带锯、高速带锯进行高速切断）和精密切断等。具体剪切方法应根据生产条件、生产纲领和毛坯的精度要求确定。表 2-2-4 所示为常用的几种剪断方式。图 2-2-2 所示为精密切断机的平面布置。

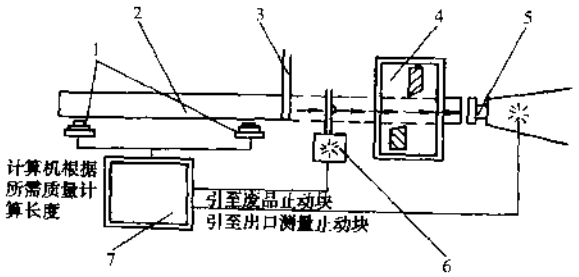


图 2-2-2　精密切断机平面图

1-负载单元；2-棒料；3-基本止动块；4-剪断机；5-测量定位探头；6-废品测定止动块；7-计算机

表 2-2-4 下料工艺及设备分类

分类	设备	适应范围
剪切下料	棒料剪切机	适用于成批及大批量生产，可冷剪切中碳钢及低合金钢，对直径大的高碳钢、高合金钢棒料，剪切前要进行预热（到蓝脆区以下）
	联合冲剪机	适用于农机厂以型钢为主的中小型锻工车间或锻冲焊的联合厂房内使用
	鳄鱼式剪断机	适用于剪切扁钢，建筑工地剪切钢筋
	曲轴压力机	适用于大批量生产，也可与其它工序合用一台压力机，同样适用于小批及成批生产切削下料
切削下料	往复锯床	适用于单件小批生产，锯切中小截面棒料、管料、料头等
	圆盘锯和带锯床	适用于各类锻工车间，可作为主要下料设备，可弥补剪断机不足之处，锯切部分精度要求较高的坯料等
	砂轮切割机床	适用于其它方法下料困难的金属，如高温合金钢等
	管子切割机	专用于切割管料

对高速热锻（立式或卧式）机目前多配用型钢局部加热到始锻温度自动等体积连续下料方式。

2.2.2.2 热锻工序及设备

钢的热锻工艺，坯料加热到（1 200±50）℃的高温，在该温度范围内，材料具有了良好的可锻性能（即降低了变形抗力，增加了延展性），可进行大变形。近年来热锻的精密化与高速化，以及柔性的自动化发展较快。作为精密锻造技术，多在推广闭式锻造以谋求提高产品精度与无飞边锻造。另外，针对多品种、小批量生产趋向，以及改善劳动条件和作业环境等原因，选用多工位成形机、镦锻机、回转成形机（如扩辗机、摆辗机、横轧和斜轧机、成形辊锻机）等来取代以前的锻锤逐渐成为锻造设备的主流。在锻件的高精度化方面，金属模的最佳设计技术、改良润滑技术、模具预热和冷却技术等起了很大的作用。今后从坯料切断及锻造工序开始到锻件的热处理、清理校正、检验为止，在谋求锻件制造的全过程的系统化并通过加入其它的加工方法，资源、能源、人的最高效利用等都成了锻造工艺的课题。下面就热锻设备的特征、用途，按工序进行叙述。

1）加热工序及设备

热锻毛坯的加热温度过高会造成坯料的过热（甚至过烧）、氧化皮厚、表面脱碳等情况的发生，影响锻件质量。加热温度过低会造成坯料可塑性低、成形困难、使锻件易产生充不满等不合格品，同时对模具寿命、设备精度状态都有不利影响。作为锻造坯料加热炉，重要条件是温度控制性要好、升温快、氧化少。因此，适应锻造的自动化、高速化，中频感应加热装置成了主流。以下介绍几种常用加热炉。

a. 柴油或煤油加热炉：直接加热的锻造加热炉有连续炉和间歇式炉。连续式加热炉容易实现自动化，但氧化皮损失大、热效率低。间歇式加热炉设备费用便宜、通用性好，但不易保持加热温度的均匀性，现在仅少数厂家在使用，近年来开始采用间接加热式的陶瓷管式炉。

b. 中频感应加热装置：感应加热是使用加热线圈，使通过线圈的中频（一般在 1 000～2 500Hz）交流电产生的感应电流在坯料内部发生涡流热进行加热的方式。中频电源的变换是从 MG 方式更换到效率高的可控硅变频方式，在较小输出机方面也出现了晶体管。中频感应加热的特征有：①加热效率高，单位质量（kg）坯料耗电为 0.5～0.3kW·h。②加热温度均匀。③散热少，我国锻造加热用煤、油、气炉的平均能耗分别为：0.82、0.69、0.556kg 标准煤/kg 锻件，而中频机组感应加热炉平均能耗 0.122kg 标准煤/kg 锻件。④通过快速加热（汽车中小件锻件的坯料加热速度一般在 1 245s 内），很少产生氧化皮，坯料的烧损可控制在 0.5%以下（一般油炉、煤气炉为 1%～3%）。⑤操作方便。⑥装置为盒式，占地面积小等。

2）辊锻工序及设备

汽车论坛 http://www.qclt.com

辊锻机用于预锻、终成形，在大量生产时与锻压机或锻锤相配合，可显著地提高锻件的生产效率。辊锻工序也正在采用自动化，通过机械手可将热坯料自动送进和送出辊锻件。

3）锤锻工序及设备

锤锻是利用其落下部分的冲击力进行锻造，由于锤的落下速度是作业者通过对踏板进行操作，需要熟练的技术，还有震动、噪声和锻件脱模等技术问题，难以适应自动化及锻件的高精度要求，现生产中已逐渐改用压力机。但是，锻锤由于适应范围较广，对于复杂形状件、薄壁件、小批量、大型件较为适用。为了提高锻造精度，已有用计算机进行打击力控制的实例；为了节约能源和改善作业环境已用电液锤或将锻锤动力部分改气动为液压动力。

常用锻锤种类及特征：

①自由锻锤有固定下砧和运动的上锤头；

②模锻锤有固定下模座，只有上锤头运动；

③高速锤无固定下模座，锤头运动速度高于模锻锤锤头的运动速度，主要靠上锤头运动；

④对击锤无固定下模座，锤头的运动速度低于模锻锤的锤头运动速度，上下锤头的运动速度及位移量基本相等。

4）机锻工序及设备

机械压力机具有易于自动化、作业环境好、不需熟练工等优点，已成为热锻工艺设备的主流。特别是近年来，通过少、无飞边和少、无切屑锻件的锻压以提高锻件精度与生产率，采用闭式锻造方法的立式多工位压力机、卧式多工位成形机的厂家逐渐增多。如卧式多工位热成形机 AMP30～AMP70 系列规格的设备（每分钟可生产锻件 50～100 件）已在国内多家使用。这些都是对少品种、大批量生产有利的生产设备。但是由于用户需求的多样化，生产批量有小型化的倾向，在立式多工位压力机上，国外正在试制一种通过油压—DC 伺服式多工位送料，可以实现每个产品的最佳生产条件。此外还涉及自动进出料装置的高速化（如 16MN、20MN、25MN“温-热锻”压力机的自动进出料机械手），润滑装置的改良（如改单机多点式润滑为多机或多线式集中自动、自控润滑），换模的迅速化（如与主机一体式或专用式快速换模装置，可提高工效 1～2 倍）等多方面。图 2-2-3 所示为热锻压力机的构造简图，图 2-2-4 所示为 120MN 压力机生产前轴及发动机曲轴生产线平面图。

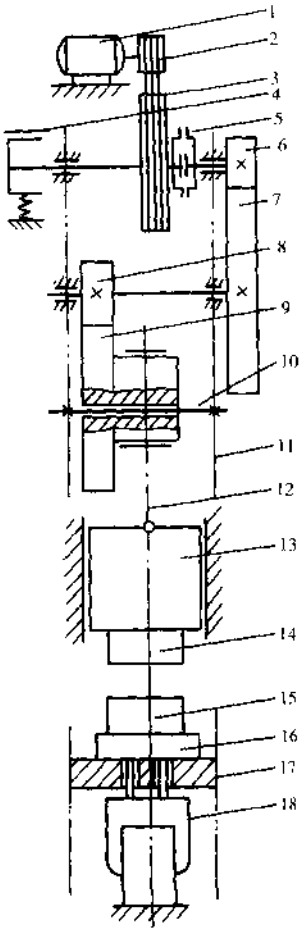


图 2-2-3 曲柄压力机运动原理

1-电动机；2-小带轮；3-大带轮；4-制动器；5-离合器；6、8-小齿轮；7-大齿轮；9-偏心齿轮；10-芯轴；11-机身；12-连杆；13-滑块；14-上模；15-下模；16-垫板；17-工作台；18-气垫

常用压力机及特征：

①螺旋压力机以摩擦压力传动的螺旋压力机（又称摩擦压力机）为三盘传动，主要用于简单形状中小型模锻件的单模膛模锻和模锻件的校正工序。螺旋压力机具有不定行程、定能量和限力的工作特性，适宜用于精密模锻。近年通过重大改进，实现了大型化，目前世界上最大的螺旋压力机公称压力达到 140MN，最大冷击力达到 31.5MN。

②热模锻压力机具有固定的工作行程和限力的工作特性，有利于提高模锻件的尺寸精度和锻模寿命；并宜于实现模锻工序的机械化和自动化；使用手工操作，也可减小工人操作技巧对锻件质量的影响。

③平锻机具有与热模锻压力机基本相同的工作特性，现代平锻机的主要特点是提高了夹紧力与镦锻力的比例，由（0.75～1.25）:1 提高到（1.5～2）:1。由于夹紧力的提高，可以在平锻机上实现热挤压成形。长棒料和长管料的头部局部镦粗成形是平锻机上特有的模锻工艺。

汽车论坛 http://www.qclt.com

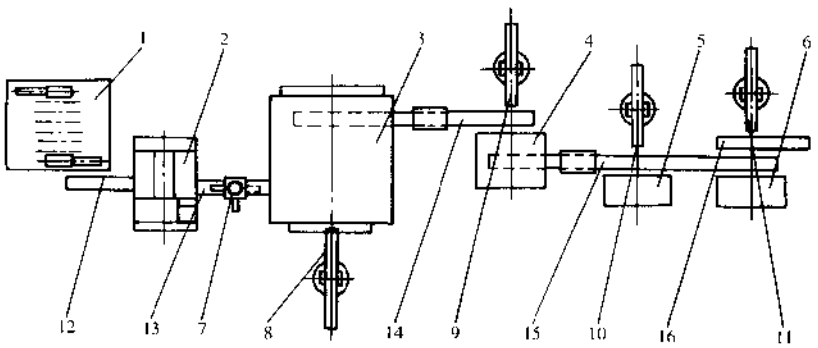


图 2-2-4 前轴、曲轴锻造生产线平面图

1-热机床；2-930mm 辊锻机；3-120MN 锻压机；4 12.5MN 切边压床；5-1.8MN 曲轴扭转机；6-16MN 液压校正机；7～11-机械手；12、16-转送带

④高速多工位自动热锻机具有与热模锻压力机相同的工作特性，其特点是行程速度更高、工位多(包括棒料切断和冲孔或切边在内可达 5～6 个工位)，工位之间自动送料。主要用于回转体或类似回转体类型的锻件成形，而且终锻多采用闭式模锻，是大批量和少品种生产条件下生产率和锻模寿命最高的模锻设备。

5）切边工序及设备

在开式模锻时，模锻件周围都有飞边；对于具有透孔的锻件，模锻后在孔内一般都有连皮。为了得到合格的锻件，飞边和连皮都必须切除。其切除工序通常采用切边机，亦有在锻压机、锻锤上切除的。切边机的结构和工作特点与热模锻压力机基本相同。

2.2.2.3 锻件的清理、精压和校正及设备

1）锻件清理

为了提高黑皮锻件的表面质量、或减少锻件在切削加工时的刀具磨损、显露锻件表面缺陷为检验质量创造条件等目的须对锻件进行表面清理。

2）锻件清理的方法及设备类型

①滚筒清理：将锻件（或加入一定比例的磨料和填加剂）装在旋转的滚筒中，借助于相互的撞击和摩擦作用，清除锻件表面的氧化铁皮、毛刺和油污等。普通式的清理滚筒结构简单、操作方便，清理效果可以满足要求，但生产效率低、噪声大，一般用于可承受一定撞击而不易变形的中小锻件。

②喷丸（砂）清理：以压缩空气为动力将金属弹丸（铁丸或钢丸）或石英砂高速喷射到工件上以去除氧化铁皮。

③抛丸清理：利用高速旋转的叶轮将弹丸抛射到锻件表面上以去除锻件表面氧化铁皮。

④酸洗：将锻件装入酸洗筐或专用夹具，浸入酸洗槽。酸洗后应立即进行水洗，继而进行中和。对汽车用锻件材料，如碳素钢和低合金钢多采用硫酸酸洗，有的也采用盐酸酸洗。

⑤此外还有风扇清理、砂轮清理、火焰清理等方式以清除局部表面缺陷。

3）锻件精压

为提高模锻件的尺寸精度和降低表面粗糙度，通常采用精压的方法。经过精压后的锻件，可获得精确的尺寸和平整光洁的表面。一般精压锻件的尺寸精度，其公差可达到 ±0.25mm，经过多次精压可达到 ±0.10mm；表面粗糙度一般可降低到 0.8～1.6μm。由于精压还可使锻件表面层硬化，从而提高了零件的耐磨性。

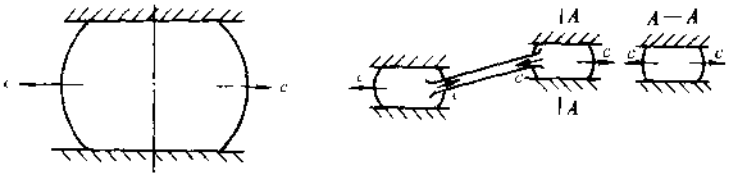
精压可以在精压机、曲柄压力机、摩擦压力机或模锻锤等压力设备上进行。由于精压机采用曲柄肘杆式的铰链机构，具有滑块行程小、加压时间长、压力大以及刚度好等特点，能满足精压变形工艺的特点和要求（即变形小、抗力大），得到广泛应用。关于精压机的结构和技术规格见其它有关章节。

汽车论坛 http://www.qclt.com

（1）精压的分类

根据精压时金属流动的情况可以分平面精压和体积精压两种类型。

①平面精压：在两平面压板之间压缩金属，金属沿水平方向流动，如图 2-2-5 所示。平面精压可以对一个或数个平行平面进行精压。



a) b)

图 2-2-5 平面精压

a）单平面精压；b）双平面精压

②体积精压（整体精压）：金属在模膛中不仅在受压方向受到压挤，而且在模膛侧壁阻碍着金属沿水平方向流动，最后多余的金属被迫挤出模膛，在分模面上产生飞边或毛刺，称为体积精压。如图 2-2-6 所示。由于体积精压时，锻件所有的表面均受到压挤，变形抗力较大，受到精压设备的吨位限制，一般多应用于精压截面形状复杂的中小型锻件。

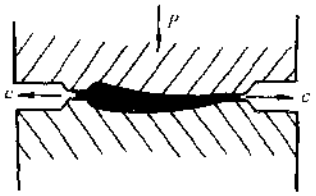


图 2-2-6 体积精压

（2）精压时所需压力的确定

精压时，一般变形速度较低，变形量也小，其所需的压力主要与变形体的材料的力学性能、变形温度、变形物体与工具接触面之间摩擦及受力状态等有关。其所需压力可按公式近似估算，也可用查表法确定。

①公式法：

$$P = p_1 \times F \tag{2-2-1}$$

式中：P——所需的精压压力，N；

F——锻件的精压投影面积，cm^2；

p_1——平均单位压力，MPa。

如果有飞边精压时，精压投影面积应包括飞边部分的投影面积。

对于热精压时的平均单位压力可取相应材料冷精压时的 30%～50%。

②查表法：根据经验，各种材料在冷精压时的平均单位压力可查表 2-2-5。

表 2-2-5 各种材料冷精压时的平均单位压力（MPa）

材料	平面精压	体积精压
铝合金	100～120	140～170
10，15	130～160	180～220
20，25	180～220	250～300
35，45，T7，T8	250～300	300～400

4）锻件校正

锻件在锻造生产的各生产工序及其传递过程中，产生了弯曲、扭转等变形，如锻件的急冷收缩变形、锻件的出模阻力导致变形、锻件的切边或冲孔变形等，为消除这种变形，需要进行校正。

a. 校正分类：锻件校正分热校正和冷校正两类。在热状态下的校正称为热校正，通常是与模锻工序同一火次，在切飞边与冲切连皮之后进行。热校正一般用于大型锻件、高合金钢锻件及易在模锻和切飞边、冲切连皮工序中产生变形的复杂形状件，如汽车前轴、曲轴、连杆、驻车制动器操纵杆等锻件。

冷校正，在锻件清理工序后进行，作为最终的精整工序之一。

b. 校正设备：热校正可以用热模锻压力机（的校正模膛）、摩擦压力机等设备（上的校正模）进行，

汽车论坛 http://www.qclt.com

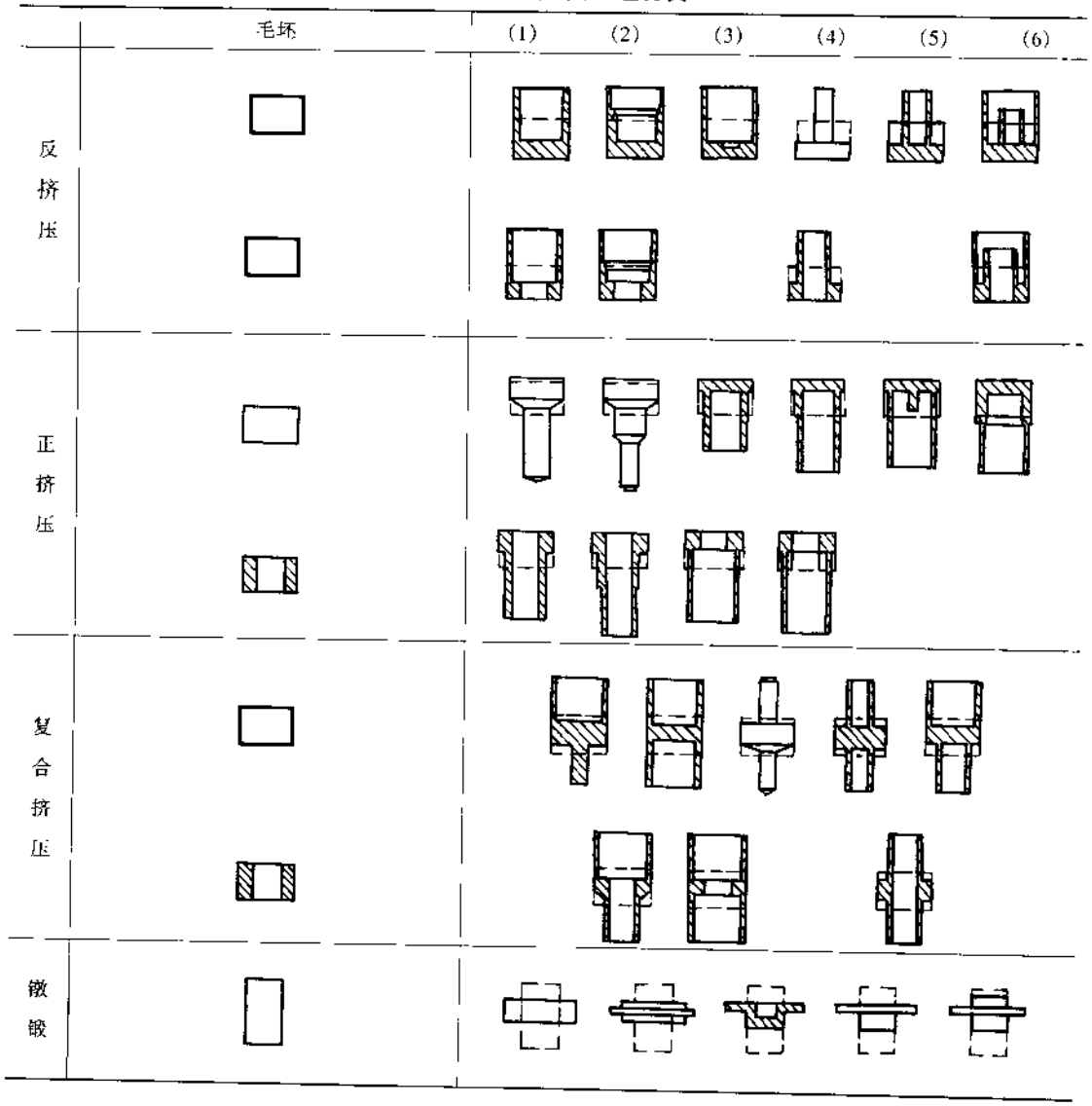
这时摩擦压力机与模锻设备、切边压力机组成一条生产流水线。也可在切边压力机上的连续式或复合式切飞边—校正或冲切连皮—校正模具内进行，亦有用液压专用热校正机（如120MN前轴、6BT曲轴生产线的1.6MN液压校正机）进行校正的。

冷校正，在摩擦压力机和曲柄压力机、油压校正机等设备上进行。一般适应于中小型锻件及易于在冷切边、冷切冲连皮、热处理过程中产生变形的锻件，如汽车前轴、后桥法兰半轴、U形螺栓等。

2.2.3 冷锻

冷锻技术是根据金属塑性变形原理，利用安装在压力机上的模具并施以相当大的单位压力以及一定的变形速度使金属毛坯在常温下成形为所需要的形状、尺寸及具有一定性能的零件。冷锻的变形方式有冷挤压、冷镦锻。冷挤压包括正挤压、反挤压、复合挤压、冷镦锻、镦粗、镦挤等。冷成形工艺分类如表2-2-6所示。

表2-2-6 冷成形工艺分类



汽车论坛 http://www.qclt.com

2.2.3.1 冷锻工艺的特点

冷锻与热锻比，具有产品精度高、产品强度指标高、材料利用率高、生产效率高、劳动条件好等一系列优点和变形抗力大、加工硬化、延伸性能差、对设备和模具要求很高等不足。因为金属材料在常温下的变形抗力很大，如15钢，当加热到1 200℃时，σ_b可由430MPa降低到13.72MPa。常温下变形抗力为热锻下的31.3倍多 加上冷作硬化的双重影响，要求变形设备具有很大的压力、能量和刚度，对模具强度和寿命也提出了较高要求。为降低变形抗力和减少摩擦及模具磨损，对冷锻坯料一般需要进行中间退火和润滑处理。最新动向是冷锻与其它的加工方法相结合，合成化的趋势正在加强，冷锻设备也在从单工位压力机向多工位压力机方面转移。

2.2.3.2 冷锻设备

冷锻设备有机械压力机和液压压力机，除长轴类零件外，多用生产率高的机械压力机，机械压力机分为立式和卧式两大类。立式压力机为了节省人力和提高生产率，采用多工位压力机自动传送更为合适。卧式高速多工位成形机是使用卷料进行大批量生产的设备。此外，开发使用快速换模系统，以适应多品种小批量生产。

2.2.3.3 冷锻压力的确定

关于冷锻压力的计算，目前各种理论计算公式对摩擦、加工硬化因素均未能作出严密的分析和评价，即使是简单形状件可以进行理论解析的也只限于轴的对称变形和平面变形等，若是形状复杂件就更困难。目前，实际生产中常用经验数据和资料来选择设备吨位或校验模具强度。

1）影响冷锻变形力的主要因素

①材料的真实应力（变形抗力）；

②冷锻变形方式（如正挤压、反挤压、复合挤压、径向挤压等）；

③变形程度和挤余厚度；

④毛坯形状、毛坯相对高度；

⑤零件形状（如杆形件、杯形件、异形断面零件等）；

⑥模具几何形状，工作宽度；

⑦变形速度；

⑧润滑效果等。

2）经验数据和资料

①表2-2-7所示为正挤杆形钢件的单位冷挤压力（MPa）；

②表2-2-8所示为正挤杆形铝件的单位冷挤压力（MPa）；

③表2-2-9所示为杯形铝、铜、钢件反挤的单位冷挤压力（MPa）；

④表2-2-10所示为钢的冷锻单位压力（MPa）；

表2-2-7 正挤杆形钢件的单位冷挤压力（MPa）

材料及含碳量	σ_b（MPa）	挤压比							
		1.25	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	10.0
0.1	400	570	745	1 030	1 480	1 860	2 100	2 500	2 600
0.15	380－400	330	630	960	1 440	2 100	2 350	2 520	–
0.2	450	610	810	1 140	1 580	–	2 140	–	2 900
0.3	500	680	900	1 260	1 710		2 390	–	3 260
0.4	–		1 170	1 700	2 280	2 710	–		–

续上表

材料及含碳量	σ_b (MPa)	挤压比							
		1.25	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	10.0
0.45	550	460	760	1 170	2 160	–	–	–	
1.0	–	–	1 040	1 940	2 660	–			
1Cr18Ni9	–	–	1 430	2 100	2 820				–
纯铁	–	–	600	930	1 350	1 630	1 860	2 470	–

表 2-2-8 正挤杆形铝件的单位冷挤压力（MPa）

材料	σ_l (MPa)	挤压比						
		2	4	5	10	20	50	100
铝	90～100	300	460	500	640	780	970	1 110
LC4	200	500	850	1 000	1 160	1 460	-	–

表 2-2-9 反挤杯形件的单位冷挤压力（MPa）

材料	σ_b (MPa)	截面收缩率 ε（%）					
		65	70	80	85	90	95
铝	95	-	700	740	750	770	940
铝(99.7%)	70	500		530		640	740
铜	210	1 340	1 360	1 500	1 560	1 750	2 350
钢	380	2 270	2 350	2 600	2 750		–

表 2-2-10 钢的冷锻单位压力 p（MPa）

冷锻方式	含碳量至0.1%的碳钢		含碳量至0.3%的碳钢		含碳量至0.5%的碳钢及合金钢	
	变形率（%）	p	变形率（%）	p	变形率（%）	p
杆件正挤	50～80	1 400～2 000	50～70	1 600～2 500	40～60	2 000～2 500
杆件缩颈	25～30	900～1 100	24～28	1 000～1 300	23～28	1 150～1 500
杆件反挤	40～70	1 600～2 200	40～70	1 800～2 500	30～60	2 000～2 500
自由镦粗	50～60	500～700	50～60	800～1 000	50～60	1 000～1 500
闭式镦粗	30～50	1 000～1 600	30～50	1 600～2 000	30～50	1 800～2 500
压印	–	2 000～2 500		2 000～2 500	–	2 000～2 500

2.2.3.4 冷锻坯料前处理及中间处理

冷锻前坯料的表面处理与润滑对降低冷挤压力、提高模具寿命与挤压件质量是非常重要的。常用的润滑剂有猪油、羊油、羊毛脂、豆油、菜籽油、矿物油、硬脂酸钠、硬脂酸锌及皂化液等。动物油和植物油含大量脂肪酸，能够在坯料表面形成均匀的润滑膜，其润滑效果比矿物油要好。水溶性 HP 型高分子润滑剂更能运用于紧固件原材料高速拉拔工艺。

通过软化热处理以提高恢复材料塑性、降低变形阻力、改善金相组织、消除内应力，使毛坯获得良好的冷锻性能。毛坯的前处理采用软化退火、球化退火，另外还进行磷化处理（磷酸锌被膜处理）、二硫化钼处理或钙系统被膜处理以提高润滑性能。

在冷锻工序之间，因金属材料发生冷作硬化，影响下道冷锻的进行，要进行中间球化退火和润滑处理。碳钢及合金钢的球化退火实例如图 2-2-7。

汽车论坛 http://www.qclt.com

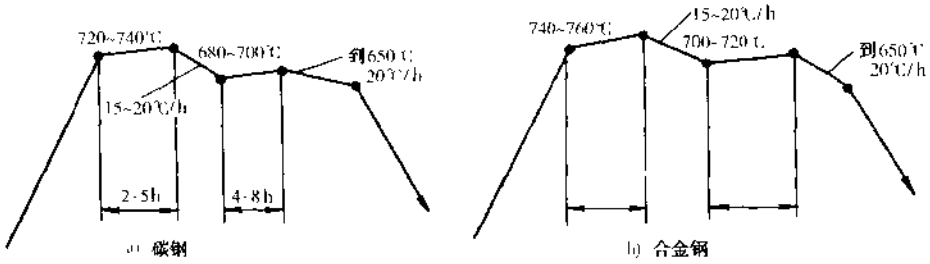


图 2-2-7 碳钢及合金钢球化处理的温度和时间

2.2.3.5 冷锻工艺新材料

冷锻工艺用材料近年来开发了一些特种结构钢，如冷锻钢可冷锻成形，能取代热锻钢成形和切削加工，用于汽车螺栓、齿轮、轴类零件等。其中一种冷锻钢，化学成分 0.25%C、0.10%Si、0.60%Mn、0.006%P、0.005%S、0.40%Cr、0.0016%B，能在轧制状态下冷成形并进行感应热处理，不须进行预调质处理。用此种钢制造轮轴，可使成本下降 15%。

2.2.4 温锻

温锻的变形温度通常是：黑色金属为 200～850℃；有色金属为室温以上到 350℃以下。即基本上是处于金属的不完全冷变形与不完全热变形的温度范围。为避免在 300～500℃的蓝脆的影响，钢质锻件温锻坯料加热温度宜控制在 600～850℃。

2.2.4.1 温锻工艺的特点

温锻成形在一定程度上兼备了冷锻与热锻的优点。

①由于金属被加热，坯料的变形力比冷锻成形所需变形力小，成形比冷锻也容易，可采用比冷锻大的变形量，从而减少压力机的吨位及模具消耗费用。因为可采用刚性不很大的通用锻压设备（如螺旋压力机），模具寿命也比冷锻时要高。此外还可省去坯料的前、中间处理工序。

②由于加热温度低，工件氧化、脱碳比热锻轻，产品尺寸公差等级和表面质量要高，如在低温范围内温锻，产品的力学性能与冷锻产品差别不大。对不易冷锻的材料，例如析出硬化相的不锈钢和中、高碳钢、含铬量高的一族钢、高温合金以及镁和镁合金、钛及钛合金等改用温锻可减少加工难度。甚至对合金工具钢和高速工具钢也可以顺利地进行一定变形程度的温锻成形。

③温锻的不足处是模具寿命比热模锻短，由于必须使用润滑剂，对作业环境有污染（对冷锻而言），劳动条件较差。

表 2-2-11 为钢在温锻、冷锻与热锻时的技术经济比较。

表 2-2-11 温锻与冷锻、热锻的技术经济比较

项目	变形方法		
	热锻	温锻	冷锻
变形温度范围（℃）	850～1200	200～850	室温
产品精度（mm）	±0.5	±（0.05～0.25）	±（0.03～0.25）
产品组织	晶粒粗大	晶粒细化	晶粒细化
产品表面质量	严重氧化、脱碳	几乎没有氧化、脱碳	无氧化、脱碳
工序数量	少	比较少	多
能耗消耗	大	少	少
劳动条件	差	较好	好
模具寿命	高	中	低

2.2.4.2 温锻的应用范围

①冷锻变形时硬化剧烈或变形力高的不锈钢、合金钢、轴承钢和工具钢等；
②冷锻变形时塑性差、容易开裂的材料，如铝合金 Lc4、铜合金 HPb59-1 等；
③冷锻难加工，而热锻时严重氧化、吸气的材料，如钛、钼、铬等；
④变形程度较大，或者零件尺寸较大，以致冷锻时现有设备能力不足时；
⑤形状复杂，或者为了改善产品综合力学性能而不宜采用冷锻时；
⑥为了便于组织连续生产。

国内外目前已有各种汽车零件使用温锻的方式生产，如紧固件、齿轮、齿条、气缸、活塞、轴承套圈、万向节叉、后车轴等。这些零件原先用热锻、冷锻或者用机械加工生产，采用温锻后，均取得较好的经济效益。

2.2.4.3 温锻设备

①一般采用机械压力机或液压压力机等设备进行温锻。当温锻用压力机成形时要考虑模具冷却润滑。

②影响温锻变形力的因素，除了加热温度以外，其余各点与影响冷锻变形力的主要因素类似，如材料性能、变形方式（正挤压、反挤压、复合挤压或镦挤等）、变形程度、模具结构、润滑剂种类。相对冷锻而言，加热温度影响经试验表明在复合挤压时，当加热到 150～200℃时，往往单位变形压力减少 10%；反挤时，当加热到 100～200℃时，单位压力减少 20%～40%（对钢）。在一般情况下，低温温挤压可减少变形力 15%，中温温挤压及高温温挤压可使变形力减少到室温时的 25%～50%。可见，温挤压变形力比冷挤压时有显著下降，对冷作硬化敏感的材料效果更加显著。

2.2.4.4 加热、润滑

为防止加热过程中脱碳和氧化，对坯料进行石墨涂覆（石墨的耐热温度为 900～1 000℃），为保持石墨的润滑效果，常使用中频感应加热以进行快速加热。石墨涂覆装置一般设置在加热床入口处，对已预热到 150～200℃的坯料进行连续浸渍。另外，对金属模喷上石墨系润滑剂进行润滑与冷却。

2.2.5 特殊锻造

2.2.5.1 辊锻

1）辊锻的特点及应用

辊锻属于回转压缩局部变形的范畴，如图 2-2-8 所示为辊锻变形原理简图，辊锻机的上下两个辊轴线平行，转向相反，安装在辊轴上随其旋转的辊锻模借助摩擦力将纵向送进的毛坯卷入连续地对其局部施压，使毛坯受压部位的截面积和高度都减小，宽度略有增加，长度的延伸较大。即辊锻是以延伸为主的变形过程，比模锻具有较高的技术经济效益。其特点有：

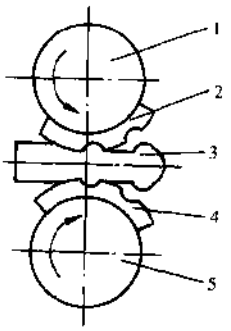


图 2-2-8 辊锻变形原理图
1-上辊轴；2-辊锻上模；3-毛坯；4-辊锻下模；5-下辊轴

①所需工作载荷小连续地对毛坯局部施压，所需成形力较模锻小。

②生产效率高，单型槽一次辊锻成形的生产率约为锤上模锻的 5～10 倍。

③材料消耗少，材料利用率一般都在 80%以上。

④辊锻件内在质量优良，力学性能好，疲劳强度高。

⑤劳动条件好，无冲击，振动和噪声都小，易于实现机械化和自动化。如图 2-2-9 所示 ϕ960mm 辊锻机自动辊制汽车前轴和曲轴平面图。

辊锻工艺的应用：国内外目前多用辊锻为模锻制坯，国内亦有多家采用成形辊锻工艺预成形汽车前

汽车论坛 http://www.qclt.com

轴、连杆等较复杂的锻件，而后采用锻压机或螺旋压力机进行终成形。

2）辊锻工艺参数的确定

①变形区及其参数：辊锻变形中，坯料与模具接触部分的区域都处于塑性变形阶段，称该接触区域为变形区。用平辊模辊锻矩形坯料是简单的辊锻变形，其变形区用阴影线表示于图 2-2-10 中，图中的 l_d、h_0、b_0、h_1、b_1、R_g 及 α 等均为变形区的基本参数。了解基本参数间的关系及其控制对实现辊锻变形、制定工艺过程、设计型槽等都有重要作用。

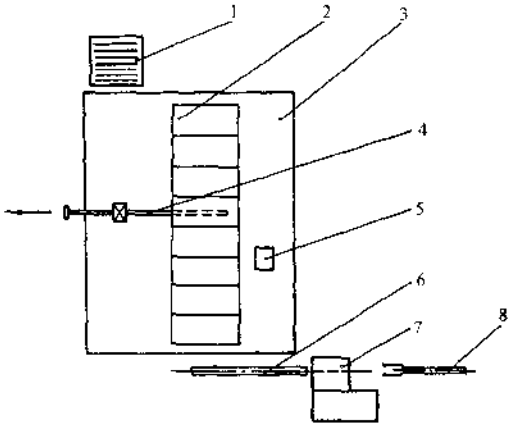


图 2-2-9 辊锻自动化平面图

1-自动提升料斗；2-感应加热器；3-中频发生器及平台；4-程控推料器；5-控制台；6-辊锻传入带；7-辊锻机；8-辊锻机械手

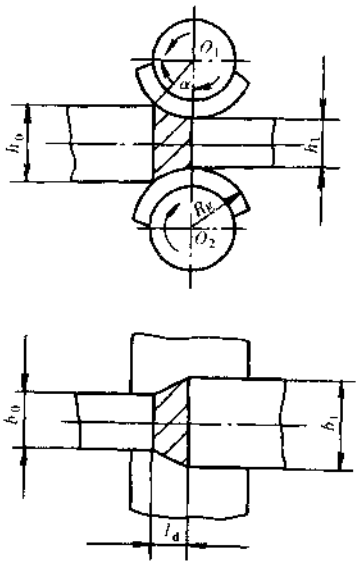


图 2-2-10 辊锻变形区及其基本参数

h_0、b_0-坯料的原始高度与宽度；h_1、b_1-坯料变形后的高度与宽度；α-咬入角；R_g-辊锻模工作半径；l_d-辊锻变形区长度

②坯料的咬入角：简单辊锻的自然咬入借助摩擦实现曳入坯料的方式称为自然咬入。自然咬入的条件为坯料端部开始接触模具瞬间摩擦力水平分量大于径向力的水平分量（径向力包括接触瞬间模具作用于坯料上的径向力）。复杂辊锻变形的自然咬入根据咬入角与极限压下量、强化坯料咬入措施等可参看相关手册。

③前滑与后滑：如图 2-2-11 所示，辊锻时靠近变形区出口处的金属相对模具向前滑动，而靠近变形区入口处的金属则相对模具向后滑动。变形区内有一个与模具圆周速度水平分量相同的 NN 断面，称为临界面，其位置偏向出口的一侧。位于临界面之前的区域称为前滑面，其金属流动速度大于锻模圆周速度的水平分量，这就是前滑。临界后面区域称为后滑区，其金属流动速度小于锻模圆周速度的水平分量，这就是后滑。实验测定证明，无论是否有展宽的变形，金属在 NN 面上的纵向流动速度分布是均匀的，而在前滑区和后滑区的各断面上的分布是不均匀的。因此，坯料的延伸由其对模具的相对滑动所形成，必须伴随有前滑和后滑。前滑 S_q 与后滑 S_h 常用相对速度关系表示如下：

$$\left.\begin{aligned} S_q &= \frac{v_1}{v_m} - 1 \\ S_h &= \frac{v_0}{v_m \cos\alpha} - 1 \end{aligned}\right\} \tag{2-2-2}$$

式中：v_1——金属在出口处的流速；

v_0——金属在入口处的流速；

v_m——模具的圆周速度。

a. 考虑展宽影响后的前滑计算为：

$$S_q=\frac{R_g}{h_1}\left[\frac{\alpha\left(\frac{b_1}{b_0}+1\right)}{3\left(\frac{b_1}{b_0}\right)+1}-\left(1-\frac{\alpha}{2\mu}\right)\right]^2 \tag{2-2-3}$$

b. 复杂辊锻变形时的前滑确定：辊制断面变化复杂的辊锻件时，由于型槽的截面高度和宽度尺寸多数是变化的，即型槽截面积和压下量等都不同，往往使辊出的毛坯或锻件的长度与型槽的长度不符。因此，合理确定前滑值很重要，一般用理论计算法、经验公式法或实验测定法解决，用实验测定法更能准确地反映实际情况。但没有模具时不能测定。一般多是先由计算确定前滑，再经调试确定、修改模具。为稳定工艺和辊锻件质量，生产中往往将经调试确认的第一套模具留作再复制模具的母模。

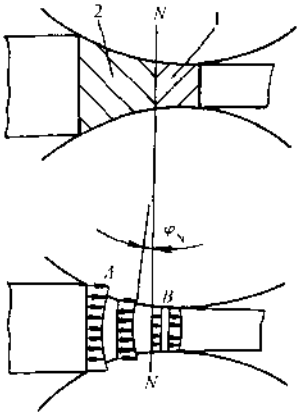


图 2-2-11 变形区内金属纵向流动速度分布图

1-前滑区；2-后滑区

3）辊锻力参数的计算

辊锻时，变形金属经由模具作用到锻辊上的总压力称为辊锻力。平辊模辊锻时，总压力指向垂直方向，如图 2-2-12 所示。一般情况下，辊锻时的总压力与垂直线有一很小的交角，可近似地取其垂直分量作为辊锻力。它是设计、选用辊锻机及计算辊锻力矩以确定电机功率的依据。

辊锻力按下式计算：

$$P=p_{av}F \tag{2-2-4}$$

式中：p_{av}——变形区的平均单位压力；

F——变形区的水平投影面积。

p_{av}的近似计算法在制坯和简单件成形辊锻中可用下式：

$$p_{av}=1.08n_\mu\sigma_s' \tag{2-2-5}$$

式中：n_μ——与外摩擦及变形区尺寸有关的系数，可由图 2-2-13 中查出；

σ_s'——金属的流动应力，当辊锻后有飞边，$n_\mu=2.5\sim3.0$。统计资料介绍，对连杆辊锻力参数的实际测定表明，公式计算的结果比较接近实际测定值。

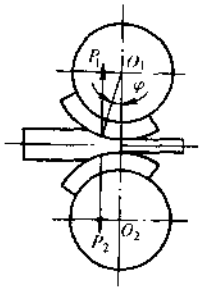


图 2-2-12 金属对锻辊的作用力

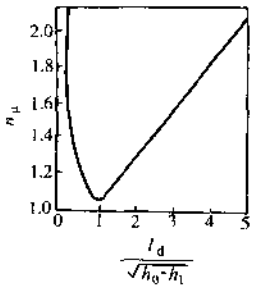


图 2-2-13 n_μ 曲线图

2.2.5.2 辗环

辗环又称扩辗，是环形件特有的成形方法之一。图 2-2-14 所示为辗环成形原理图：辗压轮（主轮）1 与芯辊 2 的两辊轴线平行。辗环时，旋转的辗压轮与环形坯件接触，靠摩擦力曳入毛坯并连续施压，环形坯与芯辊之间的摩擦力带动芯辊转动，同时辗压轮与芯辊之间的中心距逐渐缩小，直至变形结束。经辗环

汽车论坛 http://www.qclt.com

变形的工件，截面积和径向厚度都减小、环形件外径和孔径都相应地增加。辗环实质上主要是工件径向压缩、切向延伸的锻造过程。

①辗环锻造是环形毛坯的径向轧制，但又需要制坯、预制形状规范的环形毛坯。其特点除生产率较低外，其它与辊锻类似。

②辗环工艺目前在国内外的应用比较广泛。如汽车从动齿轮、火车轮箍、轴承内外套圈、齿轮圈、法兰、衬套等。环形件的成形有较大的经济技术优越性。

2.2.5.3 横轧与斜轧

(1) 横轧与斜轧的运动特点

①横轧如图 2-2-15 所示，两个轧辊轴心线平行，其旋转方向相同，轧件作平行于轧辊轴心线并与轧辊旋转方向相反的运动，圆形坯料旋转时，在轧辊孔形作用下局部连续成形为零件，进出料设有专门的装置。

②斜轧如图 2-2-16 所示，两个轧辊轴心线交叉一个不大的角度（一般在 2°～7°之内），其旋转方向相同，轧件在两轧辊的交叉中心线上作与轧辊旋转方向相反的旋转运动外，还作前进直线运动，圆形坯料旋转前进时，在轧辊孔形的作用下，局部连续成形加工出零件。进出料靠轧辊自动完成。

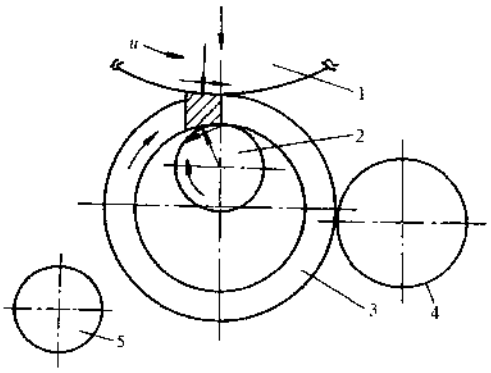


图 2-2-14 辗环成形原理图
1-辗压轮；2-芯辊；3-环形坯；4-压力辊；5-信号辊

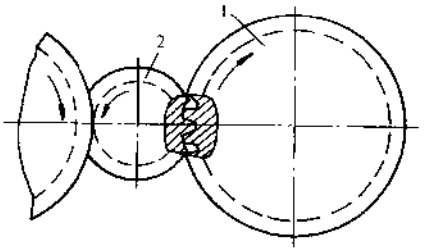


图 2-2-15 横轧成形原理图
1-轧辊；2-轧件

(2) 横轧与斜轧的工艺特点与应用

横轧（含楔式横轧）、斜轧都是用来轧制回转体类零件。与一般锻造工艺比较均具有生产效率高、节约材料、模具寿命长、设备造价较低、无冲击、少噪声等特点。可以轧制齿轮、链轮、花键轴、ϕ3～ϕ20mm 的螺纹件（螺纹斜轧）、各种形状的实心或空心台阶轴（楔式横轧）等。

2.2.5.4 摆动辗压

(1) 摆动辗压成形原理

如图 2-2-17 所示。在摆辗成形过程中，摆动机构带动锥形模 1 沿毛坯 2 表面连续摆动和滚动，油缸 4 不断推动滑块 3 把毛坯送进加压而达到整体成形。锥模轴线 OO' 与机身轴线 OZ 夹角 γ 称为摆角。在摆辗成形过程中锥模母线相对于工件轴线作螺旋运动，当锥模母线是一条直线时，则工件上表面为一平面；若锥模母线是一条曲线时，则工件上表面也可获得一定形状。下模和一般锻压成形基本相同。为使锥模母线简单，常将工件较复杂的一面设计在下模型槽内。

(2) 摆动辗压的特点和应用

由于摆动辗压是局部接触、顺次加压连续成形，接触面积和单位压力都比较小，故有如下特点：

①锻造同样大小的锻件，摆辗变形力只有一般锻造变形力的 20%～50%左右；

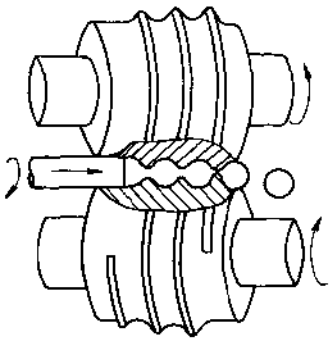


图 2-2-16 斜轧成形原理图

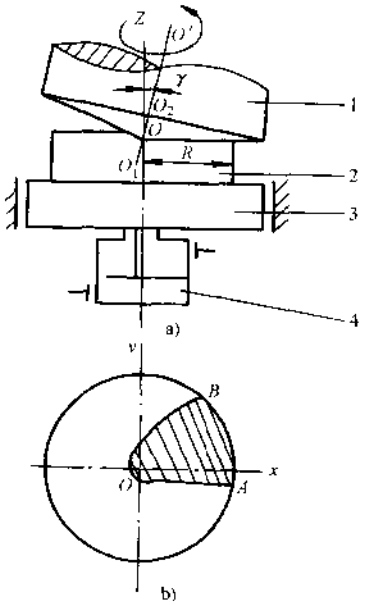


图 2-2-17 摆动辗压成形原理图
1-上模；2-毛坯；3-滑块；4-油缸

②产品质量好，不易开裂；

③适合薄盘类零件成形；

④无噪声，无振动，劳动环境好；

⑤投资少，能耗低，设备制造费用低等。

但要求预先制坯，设备结构较为复杂，机架刚度要求较高。

摆动辗压应用范围较为广泛，如汽车后桥法兰半轴、后桥从动齿轮及各种饼盘类、环形类、带法兰的轴类件及铆接、粉末压制、粉末烧结体的预制坯，以提高产品的致密度等。图 2-2-18 所示为摆辗典型工艺图。

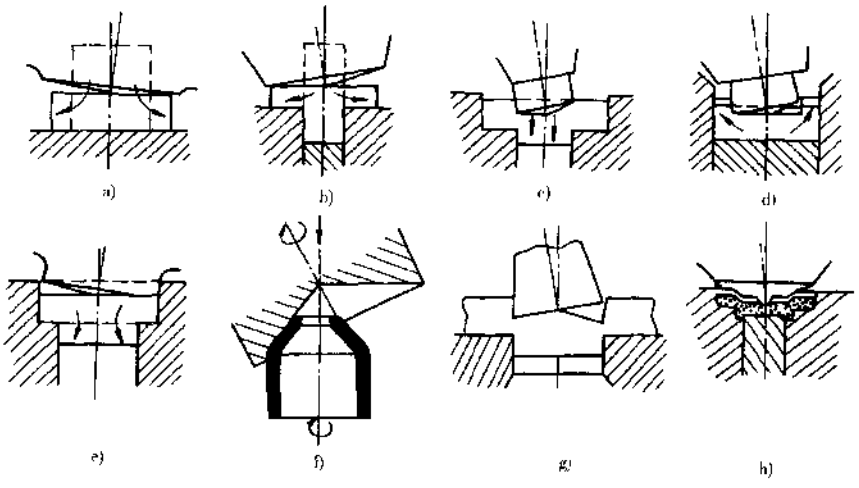


图 2-2-18 摆辗典型工艺图
a) 镦粗；b) 法兰镦粗；c) 垂直成形；d) 反挤压；e) 正挤压；f) 缩径；g) 精冲；h) 粉末压实

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.2.6 锻模

锻模是变形金属在热态或冷态下进行体积成形时所用模具的统称。锻模按模锻设备和工艺用途的不同可分为锤用锻模、螺旋压力机用锻模、热模锻压力机用锻模、平锻机用锻模、水压机用锻模、高速锤用锻模、辊锻机、楔横轧机、锯环机、摆辗机用锻模以及锻造、挤压、冷镦、切边、冲孔、校正、压印、精整、精锻等等类型的模具。

2.2.6.1 锻模设计

设计锻模时应当综合分析各类锻件塑性成形的规律和工艺特点；被加工材料和模具材料的力学、物理、化学特性以及各类锻压设备的工作特点、结构特点等，包括以下要素：

1）常用金属的锻造温度范围

金属的锻造温度范围是指其始锻温度和终锻温度间的一段温度区间。在锻造温度范围内，金属应具有良好的可锻性（即足够的塑性、低的变形抗力等）和合适的金相组织。锻造温度范围是通过各种试验和分析金相状态图而确定的。钢的锻造温度范围见表 2-2-12。

表 2-2-12 钢材的锻造温度范围

钢类	钢号	锻造温度（℃）	
		始锻	终锻
普通碳素钢	A0、A1、A2	1 300	700
	A3、A4、A5	1 250	700
	A6、A7	1 200	750
合金结构钢	10Mn2、15Mn2、20Mn2、30Mn2、35Mn2、40Mn2、45Mn2、50Mn2、27SiMn、35SiMn、42SiMn	1 200	800
	20MnV、35SiMn2MoV、20Mn2B、20MnTiB、40CrV、45CrV、18CrMnTi、20CrMnTi、30CrMnTi、35CrMnTi、40CrMnTi、12CrMo、15CrMo、20CrMo、20CrNi、12CrNi2、12CrNi3	1 200	800
	20Mn2V、42Mn2V、30SiMn2MoV、20SiMn2VB、30CrMo	1 180	800
	12SiMn2WV、40CrMnMo、38CrMoAl、20CrNi3、37CrNi3、12CrNi4、20CrNi4、18Cr2Ni4W	1 180	850
	15SiMn3MoWV、15CrMn2SiMo、15CrMnMo、20CrMnMo	1 200	900
	40B、45B、40MnB、45MnB、40MnVB、40MnWB、38CrSi、40CrSi、30CrMnSi、35CrMnSi、35CrMo、42CrMo、12Cr01MoV、35CrMoV、18Cr3MoWV、20Cr3MoWV、40CrNi、45CrNi、40CrNoMo	1 150	850
	30Mn2MoTiB、12CrMoV、24CrMoV、25CrMoV、25Cr2Mo1V	1 100	850
优质碳素钢	08F、08、10F、10、15F、15、20F、20、25、30、35、15Mn、20Mn、30Mn	1 250	850
	40、45、50、55、60、40Mn、45Mn、50Mn	1 200	800

2）常用金属的线膨胀系数及收缩率

线膨胀系数表示摄氏温度升高一度时单位长度材料尺寸的变化，表 2-2-13 列出了一些金属的线膨胀系数。

表 2-2-13 金属的线膨胀系数

金属种类	Fe	Al	Mg	Cu	Ni	Ti
膨胀系数（$\times10^{-6}$/℃）	11.7	23.9	26	16.5	13.6	8.5

汽车论坛 http://www.qclt.com

收缩率是指由终锻温度到室温这段温度区间内单位长度金属材料的尺寸变化，它与材料的线膨胀系数和终锻温度两者相关。

模膛设计时，需要考虑锻件的收缩率；精密模锻时还需要考虑模具的热胀冷缩问题。

热锻时钢料的收缩率一般取1.2%～1.5%；而对细长杆件类和扁薄的锻件，因冷却快或打击次数多，终锻温度低，收缩率取0.8%～1.2%；带大头的长杆锻件，头部和杆部的收缩率应取不同值；不锈钢的收缩率较大，一般取1.5%～1.8%，铝合金取0.8%～1.0%，镁合金取0.8%，钛合金取0.5%～0.7%，铜合金取1.0%～1.3%；温锻时，由于终锻温度低，收缩率应当适当小些。

3）常用金属的变形抗力 σ_s。

通常金属的变形抗力 σ_s 与金属材料的化学成分、组织、变形温度（T）、应变速率（$\dot{\varepsilon}$）及变形程度（ε）、材料物理学化性质（x）等有关。

在热锻温度下，变形抗力可以用强度极限 σ_b 表示，如表2-2-14所示为常用钢材（退火状态下）在高温下的变形抗力；表2-2-15为钢在模锻结束温度下的强度极限；表2-2-16为各种锻压设备的工作速度和应变速率。

表2-2-14 常用钢材（退火状态）在高温下的真实应力

（应变速率为 $5\times10^{-4}s^{-1}$，变形量为20%）

钢号	应力 (MPa)						
	600℃	700℃	800℃	900℃	1 000℃	1 100℃	1 200℃
A3	160	112	80	50	30	21	16
A5	200	124	82	52	36	22	15
10	140	98	68	47	32.5	22.6	15.8
50	215	136	86	56	35.5	22.8	14.6
30Mn	196	126	83	54.5	35.5	23.2	15.2
10Mn2	158	108	74	50	33.4	22	15.1
30CrMnSi	265	170	108	69	44	28	18
40Cr	220	139	86	57.5	36.5	23.2	15
12CrNi3	194	130	89	60.5	41	28	19
12Cr2Ni4	202	137	93	63.5	43	29.5	20
45CrNiMoV	243	160	104	67	44	29	18.5
T8	228	144	93	61	38	24	15.9
T10	235	150	93	58	37	21.5	13
5CrMnMo	231	145	90	59	36	24	15.4
3Cr2W8V	370	248	163	105	69	45.5	30
W9Cr4V2	500	325	206	132	85	55	35

表2-2-15 钢在模锻结束温度下的强度极限

钢的特性	强度极限 σ_b (MPa)			
	锤上模锻	平锻	曲柄压力机模锻	热切边
含碳量小于0.25%的碳素结构钢（如：10、20及钢2）	55	60	70	100
含碳量高于0.25%的碳素结构钢或低于0.25%的低合金结构钢（如45、20Cr等）	60	65	80	120
含碳量高于0.25%的低合金结构钢(如40Cr、45CrNi等)	65	70	90	150
高合金结构钢（如GCr15、45CrNiMoA等）	75	80	100	200
合金工具钢（如3Cr2W8V、7Cr3等）	90～100	100～120	120～140	250

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-2-16 各种锻压设备的工作速度和应变速率

设备类型	工作速度 (cm/s)	应变速率 (1/s)
水压机	1~30	0.03~0.5
机械压力机	6~150	1~5
螺旋压力机	6~120	2~10
锻锤	300~900	10~250
高速锤	600~2 400	—

4）锻模的设计程序和一般要求

锻模设计首先应根据产品零件的尺寸、形状、技术要求、生产批量大小和车间的具体条件确定变形工艺和成形设备，再进行锻模的设计，程序如下：

①分析产品的形状研究产品的锻造工艺性；

②根据产品图设计锻件图并标注技术条件；

③确定制造方法—模几件和设备种类，计算所需吨位；

④确定模锻工步和设计模膛其顺序是先设计终锻模膛，后设计预锻模膛和制坯模膛；

⑤设计锻模模体或模具组合体；

⑥设计切边模和冲孔模；

⑦设计校正模和压印模；

⑧确定模具材料。

锻件图制定的工作内容包括：

①确定分模面位置和形状；

②确定加工余量、公差和余块；

③确定模锻斜度（即顶出角）；

④确定锻件的圆角半径；

⑤确定冲孔连皮的形状及尺寸；

⑥确定辐板和筋的形状及尺寸；

设计锻模时应满足下列要求：

①保证获得满足尺寸精度要求的锻件；

②锻模应有足够的强度和高的寿命；

③锻模工作时应当稳定、安全可靠，便于操作、安装、调整、维修方便；

④模具制造简单，有较好的加工工艺性；

⑤锻模的外廓尺寸等应符合设备的技术规格；

⑥在保证模具强度的前提下尽可能节约锻模材料；

⑦锻模设计实例请参看《锻模设计手册》各相应章节。

5）锻模设计与模具寿命的关系

锻模寿命在很大程度上影响生产成本。热锻模失效的主要形式有破裂、磨损、热疲劳裂纹和模具发生压塌等，其中磨损和热疲劳裂纹属正常失效，而破裂和压塌属非正常失效。设计模具时，为提高其使用寿命应同时考虑如下的因素：

①模具材料的冲击韧性，尽量选用冲击韧性高的锻模材料，且对模坯的锻造和纤维方向的布排提出合理意见。造成模具破裂的主要原因可能是模具材料冲击韧性低、模块没有锻透（组织不均匀）、纤维方向安排不当（如与打击力方向平行最易导致破裂）、或热处理不当（如有淬裂裂纹源、时效裂纹或回火不透）等；

②尽量减少应力集中情况；避免裂纹源存在；

③多余能量的吸收，多余能量主要由模具组合体及设备的弹性变形所吸收；

④模锻时，模具的应力值应低于材料的允许强度，保证模具有足够的承受压应力面积。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.2.6.2 锻模材料

1）热锻模材料应具备的性能

①在400～500℃下具有较高的强度、硬度、冲击韧性和耐磨性；

②较好的耐热疲劳性，使锻模在冷热交变的工作条件下不易产生热疲劳裂纹，寿命高；

③良好的回火稳定性，使锻模不致因受热而产生硬度下降现象；

④良好的淬透性，使整个模块具有必要的和均匀的力学性能；

⑤良好的导热性和抗氧化性，以避免模具因工作部分表面温度过高而降低其力学性能和耐磨性能，保持模具工作部分表面的粗糙程度；

⑥良好的加工工艺性，包括切削加工性能和热加工性能。

2）冷锻模具材料应具备的性能

①具有高强度、硬度和较好的冲击韧性；以便能在承受高的工作应力时不发生变形和破裂，同时应具有良好的耐磨性；

②较好的耐疲劳性，以便在工作负荷下，经过多次的反复作用而不破坏；

③良好的导热性，以便冷锻时由于热效应而使传导至模具的热量迅速扩散，保持模具应有的硬度；

④良好的淬透性和良好的加工工艺性。

2.2.6.3 锻模材料的选用

①锻模常用材料及技术要求见表2-2-17。

表2-2-17 各类锻模对材料性能的基本要求

锻模种类	使用要求	锻模种类	使用要求
热锻模具	硬度、耐冲击性、耐疲劳性	热辊轧	模耐热疲劳性
热镦模具	耐热疲劳性	冷镦模具	硬度、耐磨性、耐冲击性
热挤压模具	红硬性、耐磨性、耐热疲劳性	压印模具	硬度、强度
高速锻模具	韧性、硬度、耐热疲劳性	切边冲孔模	硬度、耐磨性、耐冲击性
精密锻模具	高温强度、抗回火稳定性、耐磨、耐热疲劳		

②各类锻模材料的选用：根据模锻设备特性或工艺特性选用锻模材料。锤锻模、胎模、螺旋压力机、热模锻压力机、切边机、平锻机、下料剪刀片用锻模材料及其硬度见表2-2-18、表2-2-19、表2-2-20、表2-2-21、表2-2-22 表2-2-23及表2-2-24。

表2-2-18 锤锻模用材料及其硬度

锻模种类	锻模或零件名称	锻模材料		锻模硬度	
		主要材料	代用材料	模膛表面（HB）	燕尾部分（HB）
锻钢锻模	小锻模用（<1t锤）	5CrNiMo	5CrMnMo	387～444 304～415	321～364
	中小锻模用（1～2t锤）	5CrNiMo	5CrMnMo	364～415 340～387	302～340
	大型锻模用（>5t锤）	5CrNiMo	5CrMnMo	321～364	286～321
	校正模用	5CrMnSi-MoV	5Cr2NiMoVSi	390～460	302～340
镶块锻模	模体用	2G50Cr	2G40Cr	硬度要求与锻钢锻模相同	
	镶块用	5CrNiMo 3Cr2W8V 5CrMnSi-MoV	5CrMnMo 5CrMnSi		
铸钢堆焊锻模	模体用	EG45Mn2	—	硬度要求与锻钢锻模相同	
	堆焊材料	5CrNiMo 5Cr2MnMo	—		

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-2-19 胎模材料及其硬度

胎模或零件名称		主要材料	代用材料	硬度 (HRC)
甩子、扣模和弯曲模	上下模	45、40Cr	—	37～41
		T7	—	40～44
	模把	20	A3	—
垫模、套模	模套	5CrMnMo 5CrNiMo 5SiMnMoV	45、40Cr 45Mn2	38～42
	垫套、冲头、模垫	同模套	T7、T8、45Mn2	40～44
合模	小型	同垫模、套模	T7、T8、40Cr	40～44
	中型		45Mn2	40～44
	大型		40Cr、45Mn2	38～42
	导销	40Cr	45、T7	38～42
冲切模	热切冲头	7Cr3 5CrMnMo	T7、T8	42～46
	热切凹模	45	T7、T8	42～46
	冷切冲头	T8	T8	46～50
	冷切凹模			
热切工作繁重的胎模零件（垫模、冲头、拼分模镶块）		3Cr2W8V	5CrMnMo 5CrNiMo	46～50

表 2-2-20 螺旋压力机锻模材料及硬度

锻模零件及名称	锻模材料		硬度 (HB)
	主要材料	代用材料	
凸模镶块	4Cr5W2VSi、3Cr2W8V	5CrNiMo、5CrMnMo	390～490
凹模镶块	3Cr2W8V	5CrNiMo、5CrMnMo	390～440
凸凹模模体	45Cr	45	349～390
整体凸凹模	5CrNiMo	8Cr3	369～422
上下压紧圈	45	40、35	349～390
上下垫板、上下顶杆	T7	T8	369～422
导柱、导套	T8	T7	

表 2-2-21 热模锻压力机锻模材料及硬度

锻模或零件	锻模材料		硬度 (HB)
	主要材料	代用材料	
模锻型槽镶块	5CrNiMo	5CrMnMo、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、5Cr2NiMoVSi	388～444
制坯模镶块	5CrMnMo	45	363～415

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

锻模或零件	锻模材料		硬度（HB）
	主要材料	代用材料	
上下顶料杆	3Cr2W8V	4Cr2W8V	48～52HRC
上下镶块支承板	40Cr	40MnB、45	388～444
型槽镶块紧固件	45	45	285～321
上、下模座	5CrNiMo	40Cr、45	285～321

注：近年来锻压机热模锻材料更多地使用 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi 和 5Cr2NiMoVSi、3Cr3Mo3VNb 等新模具钢，其淬透性能、回火稳定性能都比较高，模具寿命比 5CrNiMo 高。

表 2-2-22 切边模用材料及硬度

模具或零件名称	材料钢号		硬度（HB）
	主要材料	代用材料	
热切边凹模	8Cr	37Cr3、5CrNiSi、T8	368～415
冷切边凹模	3Cr2W8V	T9A、T10A	444～514
热切凸模	8Cr	37Cr3、5CrNiMo	368～415
冷切凸模	9CrV	8CrV	444～514
热冲孔凹模	8Cr3	7Cr3、5CrNiSi	321～368
冷冲孔凹模	T10A	T9A	56～58HRC
热冲孔凸模	8Cr3	3Cr2W8V	363～415
冷冲孔凸模	Cr12MoV	T9A、T10A	56～60HRC

表 2-2-23 平锻机用锻模材料及硬度

模具及零件名称	锻模材料		硬度（HBS）
	主要材料	代用材料	
5MN 以下平锻机整体凹模	8Cr3	5CrNiMo	444～384
8MN 以上整体凹模	8Cr3	5CrNiMo	415～363
带镶块的凹模体	8Cr3	5CrNiMo	363～321
夹紧凹模镶块	3Cr2W8V	8Cr3	444～388
成形凹模镶块	3Cr2W8V	8Cr3	444～388
集聚、成形、冲孔、切边凸模	8Cr3	5CrNiMo	415～363
凸模模座	8Cr3	5CrNiMo	415～363

表 2-2-24 下料剪刀片材料及硬度

下料剪床	主要刀片材料	代用料	硬度（HBd）
1MN 剪床	6Cr3VSi①	8Cr3、5CrNiMo	2.6～2.8
5MN 剪床	6Cr3VSi①	8Cr3、5CrNiMo	2.6～2.8
10MN 剪床	6Cr3VSi①	8Cr3、5CrNiMo	2.7～2.8

注：①6Cr3VSi 经多年使用比 8Cr3 寿命提高 3～4 倍。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.2.6.4 锻模使用

1）锻模的正确使用

锻模的正确使用是提高模具寿命和锻件质量的重要因素之一。严格控制坯料的加热温度，尤其是机械压力机属一次行程成形（预成形或终成形），宜将坯料加热到始锻温度进行终锻，以避免锻件充不满和锻模早期磨损以及设备超负荷运转。汽车锻件用钢加热温度一般在1 150～1 250℃范围，如图2-2-19所示为加热温度对钢45变形力的影响系数。

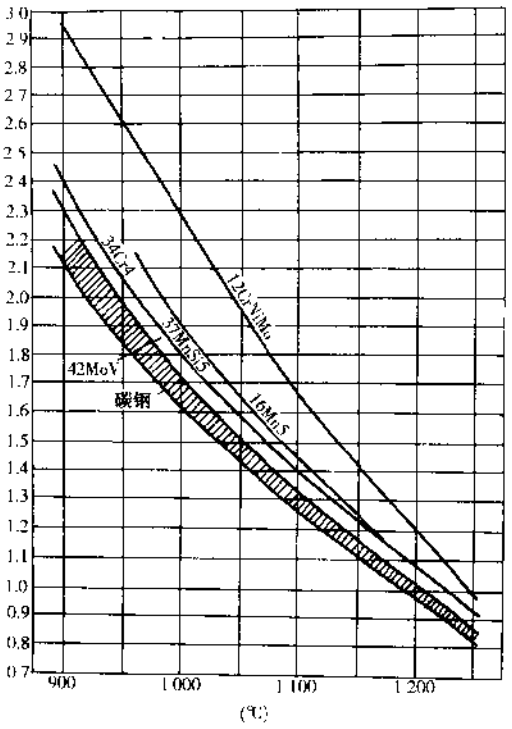


图2-2-19 加热温度对钢变形力的影响

2）锻模的预热、润滑及冷却

①机械锻压机热锻模具预热是十分必要的，因为其与1 200℃左右的钢坯陆续不止地接触，为避免模膛表面因冷热交替变化而龟裂，应预先将模具预热到150～250℃。

②润滑在金属产生塑性变形过程中很重要，变形金属与锻模模膛表面接触产生高压下的摩擦（高达1 000～2 000MPa），为减小锻模模膛的磨损以及使锻件易于起模，采用润滑。

常用的润滑剂有：润滑油（如皂化油）、润滑脂、玻璃润滑剂、水基石墨润滑剂。在各种热锻润滑剂中使用最多的目前仍是水基石墨润滑剂，据国内多年使用统计结果，它比使用盐水、机油、油剂石墨润滑剂能使模具寿命提高50%左右。但是水基石墨润滑剂对设备清洁度和劳动环境有较大影响，尤其是对封闭高度的调整（升降工作台）影响更大。近年来开发的新型锻压机采用上调式（通过滑块的上下调整）基本上得到解决。目前国外（以德国为主）正在开发、使用一种无色无味的高效润滑剂F318。

③冷却：热锻模因连续使用温度可高达300～500℃，若不适当冷却，将导致锻模回火软化，型腔压塌。水基石墨润滑剂中配以适当自来水可达到冷却目的（一般配比为：石墨润滑剂比水为1∶10～1∶20）。热锻用水冷却的有平锻机用锻模、快速热成形机模、横轧模、辗环模、摆辗模等。

2.2.7 锻件的精度及质量

2.2.7.1 锻件的精度

钢制模锻件公差及机械加工余量按GB12362—90标准执行。该标准适应于模锻锤、热模锻压力机、螺旋压力机和平锻机等锻压设备生产的钢质锻件。其它钢种的锻件亦可参照使用。本标准适应于锻件质量小于或等于250kg、长度（最大尺寸）小于或等于2 500mm的锻件。

该标准中公差分为普通和精密级两级，平锻件一般只采用普通级。

在该标准中规定有长度、宽度和高度公差、孔径尺寸、壁厚差公差、落差、错差、压痕及模向残留飞边及切入深度公差、中心距公差、直线度、平面度公差、表面缺陷深度公差、内外圆角半径公差、模锻斜度公差、角度公差、冲孔偏差以及剪切料端面变形公差等。

在该标准中规定有机械加工余量查定表及锻件公差应用示范例图、表。

在冷锻方面，尚没有统一的公差规定，根据日本汽车工程手册所列，冷、温、热锻的精度比较如表

2-2-25,以供参考

表 2-2-25 冷、温、热锻件的精度比较

		冷锻	温锻		热锻
锻造温度		常温	200～500℃	600～750℃	1100～1250℃
表面粗糙度		<6μ	<7μ	<10μ	<20μ
脱碳层		无	无	0.10～0.25	0.30～0.40
尺寸精度	金属模不同面调整	±（0.025～0.05）～±0.10	±0.05～±0.15	±0.10～±0.20	±0.50～±1.0
	厚度不等	±0.10～±0.25	±0.10～±0.25	±0.20～±0.40	±1.0～±2.0
	厚度不等	±0.05～±0.20	±0.10～±0.30	±0.10～±0.40	±0.70～±1.0

2.2.7.2 锻件的质量保证

为保证锻件的尺寸精度、表面精度和力学性能要求，须对锻件的质量进行控制。即必须对从原材料的选择，检验起直到锻后热处理的整个生产过程进行全过程控制，以保证生产质量的稳定性。

质量保证应根据 GB/T19000—94（即 ISO9000－94）质量保证模式及中华人民共和国质量法严格执行。锻件质量控制的责任由订货单位和供货单位分担。订货单位（用户）负责产品设计、选材和提出制造过程中的控制要求（技术条件）、负责审批锻件供应单位（供应商）的生产设备、生产流程、检验手段、生产人员素质等质量保证能力；锻件供应单位（供应商）负责实施工艺控制和质量检验，负责承担退换或返工、返修不符合图纸及技术条件要求的锻件和相关损失

1）原材料和锻坯的质量控制

①原材料的质量控制：原材料投产前应检查和记录到厂原材料的质检报告及熔炼炉号、时间、规格、质量（吨）、标识等符合性并进行抽样复检其化学成分、力学性能、淬透性能、低倍组织等。

②锻坯的质量控制：在锻坯剪断方面除端面质量（端面压偏度、斜度、毛刺及心部拉裂等状况）外，还应注重表面质量（划伤、发裂、折叠、不圆度等）的检验，锻坯长度尺寸公差、剪断前加热温度的控制等。此外，更要防止进料和储存、转运过程中的混料。

2）锻造过程的质量控制

①对首件的全面检查和评价：对新制锻模在正常条件试制出来的第一个原型件（即首件），应按技术条件和图样尺寸进行全面检查，特种成形件（如辗环件、横轧件、辊锻件、摆辗件、径锻件等）还需取样检验内部组织是否存在疏松等缺陷、当检验或实验结果与设计要求吻合，并认定采用该工艺过程生产的锻件合格之后，才能正式进行生产。

②对每个生产班次进行班前、班中、班末的三检制，班前进行首五件自检检查以认定生产状态符合（特别是模具状态）稳定生产要求，经生产工人（自检）后，检查人员（专检）、车间工长或当班质量管理负责者三方会签后才能进行正常生产。在班中、班末还要进行定时抽检并及时作好记录，以便质量跟踪。

3）锻件热处理的质量控制

锻件热处理应保证加热温度均匀和稳定。低合金钢的淬火温度精度应控制在±15℃范围内、调质钢件应严格控制淬火油的油质和油温，杜绝油中混入超标准（≤0.03%）的水分及易于导致皂化的杂质和保持淬火油油温（70～90℃）等。

为此，车间应按炉次批号定时抽查炉温、油（水）温、校核仪表、检查锻件硬度等，并逐项作好记录。

4）锻件的最终质量控制

汽车论坛 http://www.qclt.com

锻件制造全过程的质量控制，包括清理（酸洗或喷丸）、校正、压印、防锈、包装、储运等工序的质量控制。为了保证锻件发交合格率达到和满足用户要求，在锻件防锈前还应进行全数的最终检验，其检验的重点是进行荧光磁粉探伤、涡流（或磁力）硬度检验和分选。

2.2.8 锻造新技术

2.2.8.1 精密锻造技术

汽车锻件的轻量化和高度精密化要求进展很快，作为高精度锻造方案具有代表性的是：①闭式锻造、②闭塞锻造、③温挤精锻、④冷挤精锻、⑤复合锻造、⑥多工位快速热锻等。其中方案①、②是无飞边锻造新工艺，方案③、④是少无切削锻造工艺，方案⑥实现了高精度、高效率生产。在复合锻造方面，大多是温、热锻与冷锻的组合，可以生产形状复杂锻件。国内一大型汽车厂应用闭塞式锻造技术，在一道工序中就能从圆柱毛坯生产出四方尾部、杯形体部和球面法兰形头部的载货汽车轮毂用螺母零件，设备投资比多工位冷镦机减少约80%，工艺成本降低40%。

2.2.8.2 计算机的应用

在国内外，锻造加工工序与模具设计、制作领域计算机的利用范围不断发展，如热锻卧式多工位成形机就是采用中频加热装置加热、等重量切断、多工步成形及最后到热处理，全部工序实现自动化。又如汽车前轴和发动机曲轴热锻（120MN）生产线是采用坯料的自动排序、自动提升、有序地进出入中频加热炉加热、辊锻制坯、三工位成形、切边、曲拐角度的扭转成形（生产曲轴时）、热挤压校正等工序，全自动运转。类似这种条件下的自动设定、控制所使用的计算机已在各汽车锻造行业不断扩大使用。另外，金属模状况异常或成形载荷的监视系统相结合的无人化功能也成为今后发展的目标。关于CAD/CAM连续系统的构筑成为今后研究的课题。如图2-2-20所示，CAE是根据刚塑性FEM、UBET（上界限法）的塑性变形理论对、模具应力、模具寿命材料流动规律、质量缺陷等进行预测，已到了能指导产品开发、生产

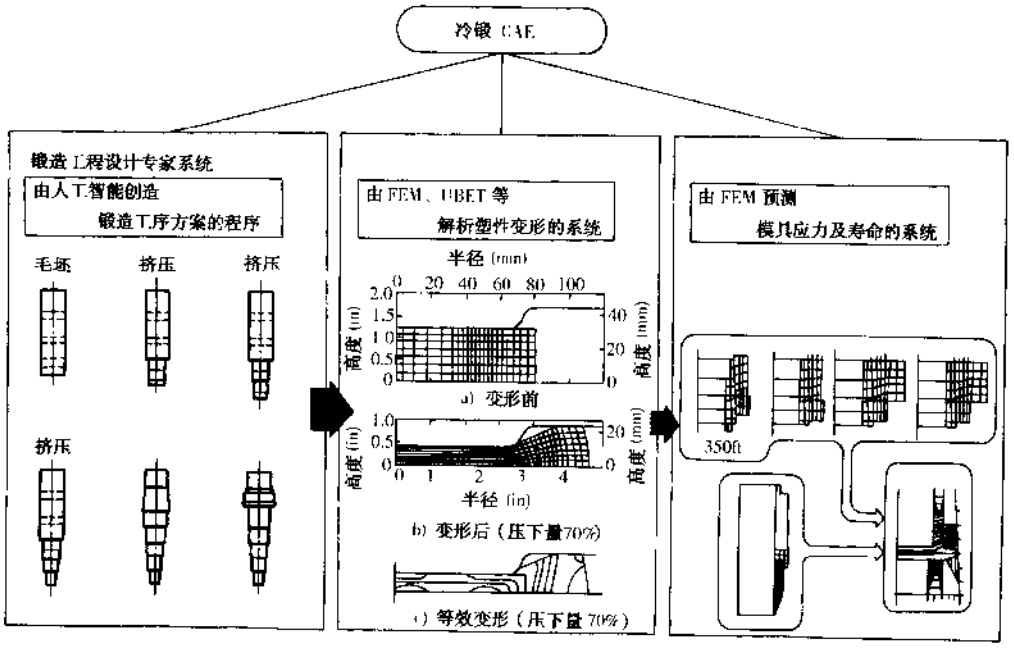


图 2-2-20 冷锻 CAE 系统的概要

的实用化阶段。

2.2.8.3 锻模制造与翻新技术

鉴于热锻模具的工作环境和生产节拍——冷热交替状态和高压、高速成形等，模具寿命都较短，如锤锻模一般寿命在2 000～3 000件/套，机锻模在5 000～7 000件/套，平锻模和机锻模差不多。机锻模常采用从锻模分模面上下落并翻新型槽（根据型槽大小和复杂程度一般一次翻新下落量为20～35mm）的方法，因需翻新的模具切削加工较困难，且原型槽多有侧壁或底部开裂，加上每翻新一次要加一层垫板以补偿在翻新时切削去的高度，垫板的逐加增加了产品制造的累积误差，经大生产考验并不经济和方便。近年国外推出了经济可行的如下两种方法：

①精密铸造锻模（含型腔工艺）：如俄罗斯一大型汽车厂采用精密铸造工艺制造机锻模、平锻机用凸凹模等中小型模具，缩短了模具制造周期、加快了新产品的试制，提高了产品质量和经济效益。

②型腔堆焊翻新模具工艺：如美国某重型汽车制造公司的所谓锻模模块“终身使用”工艺，即将需翻新模具的型腔将其四壁和底部电刨去一适当的厚度，清理干净后再堆焊一层（或填满型腔），控温冷却后再加工成原样型腔使用，此工艺最适合于大、中型模具的翻新。

2.2.8.4 锻件防锈技术

平时除对冷精锻件、温精锻件等精密锻件，比较注意锻件的防锈和包装外，一般热模锻件很少防锈，导致锻件储运中生锈，影响质量复验和机加工。近年来随着轿车锻件内外精度要求的提高，开始比较注重防锈和包装，以免发生退货索赔。下面推荐精密铸、锻件（也适应轿车件要求）的较有效防锈剂：

NOX-RUST307防锈油技术特性：

本品具有优良的水置换性、非乳化型、低粘度、无粘着性、勿须脱脂、膜厚1.0μm左右，防锈期一年（在有很好的外包装条件下）。

密度（g/cm^3）：	4～15℃时为0.805±0.01；
运动粘度（mm^2/s）：	40℃时为1.0～2.0；
引火点（℃）：	>35.0（严禁烟火和日晒）；
水分（%）：	≤0.10（严禁水和杂质混入油或油桶）；
全酸价（mg）：	KOH/g≤2.0

2.2.8.5 亚热锻工艺

采用比通常热锻温度较低的温度区域进行锻造，然后进行喷丸硬化处理，减少脱碳层、保留残余压应力，以提高疲劳强度。其锻造温度区域，脱碳深度与抗拉强度关系如图2-2-21所示。通过这种亚热锻工艺与喷丸硬化结合，生产出来的锻件与现有热锻方法相比，其疲劳强度可以提高50%。

2.2.9 各锻造工序的关键设备应用一览表

表2-2-26、有2-2-27、表2-2-28、表2-2-29为各锻造工序的关键设备应用一览表

表2-2-26 Q42系列棒料剪断机主要技术参数

参数名称	型号						
	Q42-250A	Q42-500	QA42-500	QA42-500	Q42-1000	Q42-1250	KS-1600
最大剪切力（MN）	2.5	5.0	5.0	5.0	10.0	12.5	16.0
剪切最大直径(mm)	100	132	105	115	190	210	180
行程次数（次/min）	30	18	38	38	16	16	17
行程高度（mm）	80	100	90	90	140	160	170

汽车论坛 http://www.qclt.com

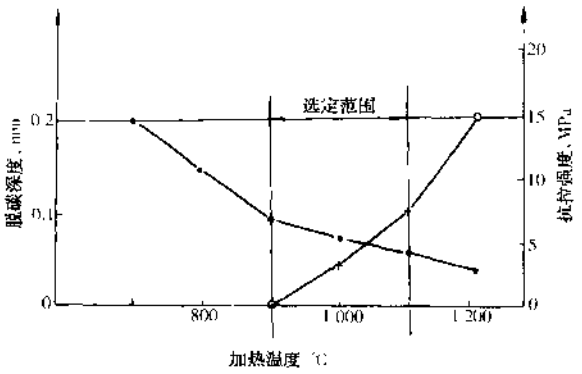


图 2-2-21 脱碳深度与抗拉强度关系

表 2-2-27 MP 及 SP 系列热横锻压力机主要技术参数

(MP) 公称压力 (MN)		20	25	31.5	40	50	63	80	120
滑块行程 (mm)		300	320	340	360	400	450	450	450
行程次数 (次/min)		70	65	60	55	45	42	40	32
最大装模高度 (mm)		950	1 000	1 050	1 110	1 180	1 250	1 350	1 600
装模高度调节量 (mm)		20	22.5	25	28	32	35	38	25
工作台尺寸 (mm)	左右	1 210	1 300	1 400	1 500	1 600	1 840	1 840	2 440
	前后	1 530	1 700	1 860	2 050	2 250	2 300	2 400	2 900
(SP) 公称压力 (MN)		20	25	31.5	40			80	
滑块行程 (mm)		300	320	350	420			460	
行程次数 (次/min)		80	70	55	50	–	–	39	
最大装模高度 (mm)		765	1 000	950	1 000	–	–	1 200	
装模高度调节量 (mm)		21	22.5	23	25	–	–	25	
工作台尺寸 (mm)	左右	1 035	1 140	1 240	1 450			1 700	
	前后	1 100	1 250	1 300	1 500	–	–	1 830	

注：MP 系特点，工作机构采用楔块传动，而 SP 为连杆式。

表 2-2-28 SM 系列水平分模平锻机主要技术参数

主滑块公称压力(MN)	3.15	4.5	6.3	9.0	12.5	16	20
束紧力 (MN)	4.2	6.0	8.5	11.8	17	21.2	26.5
主滑块有效行程(mm)	150	170	190	215	245	280	310
行程次数 (次/min)	55	45	35	32	28	25	23
夹紧凹模开口度(mm)	120	135	155	180	205	230	255
标准凹模宽度 (mm)	380	450	530	600	680	760	850
最大模宽度 (mm)	650	760	860	960	1 100	1 220	1 360

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-2-29 闭式单点（切边）压力机主要技术参数

公称压力（MN）	1.6	2.5	3.15	4.0	5.0	8.0	12.5
滑块行程（mm）	250	250	315	400	400	500	500
行程次数（次/min）	20	20	16	16	12	10	8
最大装模高度（mm）	450	500	500	550	550	700	850
装模高度调节量（mm）	200	250	250	250	250	315	400
滑块底面前后尺寸（mm）	700	900	1 020	1 150	1 300	1 500	1 700
工作台板尺寸（mm）	800×800	1 000×1 000	1 120×1 120	1 250×1 250	1 400×1 460	1 600×1 600	1 800×1 800

（撰稿人：谢千和）

2.3 粉末冶金

2.3.1 概述

粉末冶金是用金属粉末成形并烧结成金属及制品的技术。其制品通称为粉末冶金零件或烧结零件。它是机械制造工业中的一大类通用性基础零件，一般包括结构零件、减摩零件、摩擦零件等。

烧结零件可分为两大类，一类是只能用粉末冶金法制造的，如含油轴承、摩擦零件、多孔性金属制品、硬质合金及难熔金属制品等；另一类是烧结零件，虽可用铸、锻、冲压、机械加工等工艺制造，但用粉末冶金法制造较经济。

据统计：汽车工业使用的各类粉末冶金零件，已占粉末冶金总产量 70%～80%，每辆轿车及轻型车平均使用 5～8kg，每辆载货汽车上平均使用 8～15kg。由于零部件的高强度化、高精度化及低成本化，粉末冶金结构零件在每辆汽车上的使用量越来越多。如发动机的双顶置凸轮轴和多气门化，使粉末冶金链轮、皮带轮、气门座以及自动变速器的粉末冶金结构零件日趋增多。

国产汽车上使用的粉末冶金零件数量，见表 2-3-1。

表 2-3-1 国产汽车中使用粉末冶金铁基零件的状况

制造厂家与车型	每辆车中使用的粉末冶金铁基零件			备注
	品种	件数	质量（kg）	
第一汽车集团公司				
解放 CA10	11	30	3	老解放货车（4t）
解放 CA10C	10	26	2.63	老解放货车（4t）
解放 CA30	13	25	7.96	
解放 CA1090	17	56	3.47	中型货车（5t）
红旗 CA720	16	37	3.18	老红旗轿车
东风汽车公司				
东风 EQ1090E	19	66	4.5	中型货车（5t）
东风 EQ2080E	25	82	7.9	越野汽车（2.5t）
东风 EQ2100E	20	42	8	越野汽车（3.5t）
东风 EQ1141E	18	39	5.2	重型货车（8t）
上海—大众公司	17	33	3	桑塔纳轿车
天津汽车工业公司	35		4.7	大发微型车
	42		4.2	夏利轿车
第一汽车集团公司	31	67	6.7	红旗轿车
东风汽车公司	18	27	3	富康轿车
南京汽车公司	4	5	2	依维柯轻型车

汽车论坛 http://www.qclt.com

此外，在东风系列中型货车上使用了较多的三层复合材料轴承（即改性塑料-烧结铜锡合金粉-钢背）已达19种、176件，技术经济效果显著。

东风EQ1141G重型货车（载质8吨、平头驾驶室、柴油发动机）采用了许多粉末冶金零件（如含油轴承及结构零件）与粉末冶金减摩复合材料制品（如烧结铅青铜-钢背及烧结锡青铜-钢背双金属等）。它是目前国产各类汽车中使用粉末冶金零件的品种及数量最多的车型，对提高汽车的综合使用性能和降低制造成本效果明显。

现在，国内已能批量生产汽车上某些高密度、高强度、高精度及形状复杂的结构件，例如铁基结构零件，密度已由过去低于6.8g/cm^{3}提高到7.0～7.6g/cm^3；通过改进材质成分和热处理工艺，其抗拉强度由300～500MPa提高到600～800MPa或以上；通过提高压型—烧结—精整的工艺水平，其精度由IT8～IT7提高到IT6～IT5。采用粉末冶金法生产的齿轮，可达到滚齿法生产的精度。烧结锻造结构零件的尺寸精度可达到±0.2mm，质量波动仅为±0.5%，远优于普通锻件的±1.5mm和3.5%。粉末冶金零件的表面粗糙度Ra可达1.0～6.3μm，它仅次于磨削加工Ra0.1～250μm，而优于机械加工Ra1.0～250μm精锻Ra10～40μm及冲压件Ra4.0～400μm。由于粉末冶金采用模具成型，可高效地大批量生产同一种尺寸稳定性好的零件，如大批量生产的粉末冶金机油泵内、外转子的精度可达0.02mm，保证了零件的互换性。

2.3.2 粉末冶金汽车零件制造

粉末冶金机械结构零件的基本制造过程，如图2-3-1所示。其最主要的工序是粉末混合、成型、烧结及后续处理。

2.3.2.1 原料粉末的检测、调整及混合

1）金属粉末的主要制造及性能检测方法

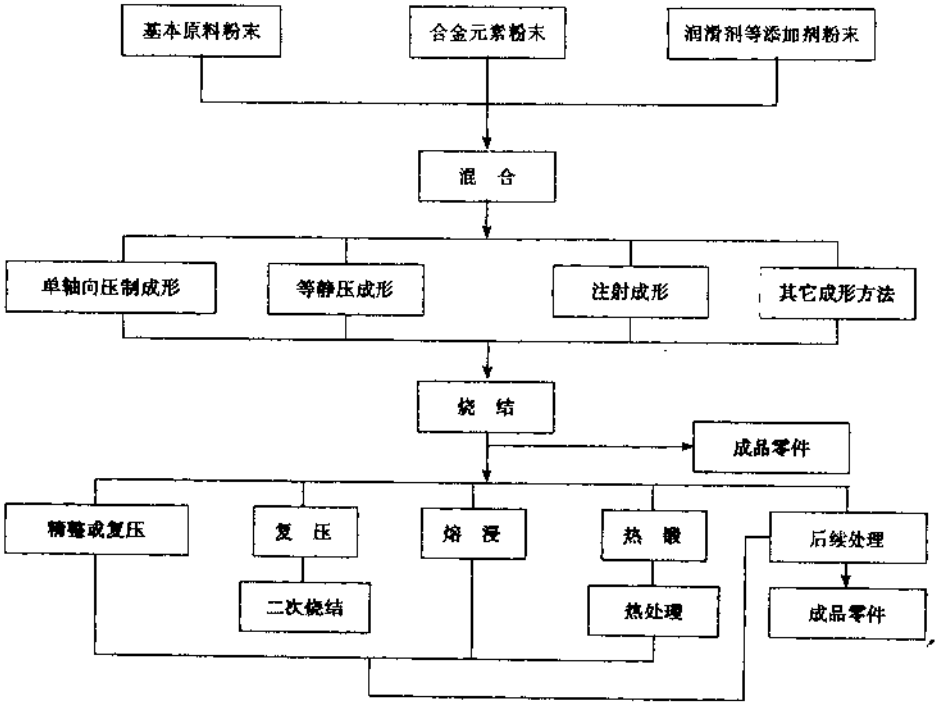


图2-3-1 粉末冶金结构零件的基本制造过程

金属粉末冶金零件的制造和检测见表 2-3-2 和表 2-3-3。

表 2-3-2 金属粉末的主要生产方法

生产方法			简要说明	应用范围
机械法	固体	球磨	用滚动或振动筒的运动使球对物料进行撞击、粉碎成粉末	脆性金属及合金
		研磨	用气流或液流带动物料颗粒互相碰撞摩擦成粉末	脆性、韧性金属丝或小块边角余料
	液体粉碎	雾化法	用高压水、高压气体等，通过喷雾装置，将熔融金属液流打散成雾状液滴、冷却后成粉末	较低熔点的金属，钢铁粉末大多用高压水雾化法生产
物理化学法	还原法		用还原剂还原金属氧化物或盐类，使其成为粉末	金属氧化物或卤族化合物，如铁粉多用还原法生产
	电解法		在溶液或熔盐中，通入直流电，使金属离子重新获得外层电子，变成金属粉末	金属盐类
	热离解法		金属与 CO、H_2 等作用生成化合物，加热后分解出 CO、H_2，制得金属粉末	能与 CO、H_2 等生成化合物的金属
	化学置换法		用活性（负电性）大的金属置换活性小的金属离子而制得粉末	较贵重的金属

表 2-3-3 常用的金属粉末主要性能检测方法

性能类别	主要性能		测试方法	备注
化学成分	主要金属含量		按化学分析法测定	铁粉中总铁含量的测定，按国家标准（GB22307—81）
	杂质含量		按化学分析法测定	分别按有关国家标准
	氧含量		氢还原非水滴定法或氢中失重法	非水滴定法较氢中失重法操作简便，分析迅速，数据准确及重复性好
物理性能	颗粒形状		利用光学显微镜、电子显微镜、扫描电镜观察照相	
	粒度组成		测试方法较多，最常用的是干筛分法	按国家标准（GB1480—84），此法适用于干的、无润滑剂的金属粉末
工艺性能	松装密度		测定方法有三种，最常用的是漏斗法，用 g/cm^3 表示	按国家标准（GB1478—84）
	流动性（流速）		使用流速漏斗及秒表计时，用 s/50g 表示	按国家标准（GB1482—84），此法亦可测定粉末混合物和含非金属添加剂的混合物的流动性
	压制性	压缩性	按规定的单位压力压制后，测定压坯密度，用 g/cm^3 表示	压缩性表征的是压坯密度与压制压力的关系，亦可用压缩性曲线来表征粉末的压缩性
		成形性	测定压坯抗弯强度或转鼓试验，即在规定时间内，压坯在转鼓中自磨，测定压坯边角失重	粉末在压制后能保持原来形状的能力，用压坯的抗弯强度或边角失重表示。压坯强度的测定按国家标准（GB5160—85）

汽车论坛 http://www.qclt.com

2）粉末粒度调整

粉末的粒度大小和粒度组成分布，对烧结材料和零件的性能影响很大。如生产自润滑含油轴承时，粉末配比或粒度组成不同，制品性能也就不同；因而在生产上要将粉末在运输或储存中产生的锈块、凝结块和其中的微细粉末，使用前用筛网将其筛出。有时还需对粉末进行退火、还原及合批等。当使用的粉末粒度范围窄时，先需将粉末进行分级后，再按要求的粒度分布进行混合均匀；筛子一般多用振动筛，筛网多为100目、200目、250目及325目。

3）配料混合

为制取要求成分的制品，先经配料计算后，在主要成分中再加入所需的合金成分（如石墨、Cu、Mo、Ni等粉末）和硬脂酸锌等粉末润滑剂，然后于混料机中进行大约20～60min的混合。

生产机械零件所用的混合粉料大多是两种以上的粉末，要求充分混合均匀、不产生比重偏析。而影响机械混粉的均匀度的因素很多，诸如混料机的类型、几何形状及尺寸、容积及其对粉末容积之比、回转速度、粉末特性、混合时间及在空气中混合时的大气湿度等。

对混合粉料的质量，可通过试验优选出最佳的工艺参数外，并根据混合料的工艺性能（松装密度、流动性、压缩性、烧结性等），烧结件的物理—力学性能，烧结材料的组织或粉末试样的化学分析来进行控制。可用粉末混合物化学组成的无偏离标准偏差对其平均值之比作为混合粉料均匀性的定量标准：

$$\Delta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i-\bar{a})^2}{n-1}}\cdot\frac{100}{\bar{a}}$$

式中：a_i——第i个测定值；

$\bar{a}$——所有测定值的算术平均值；

n——试样数。

通常，在生产中大多只检测有代表性的元素（如石墨），一般要求其最大和最小质量差值<0.05%。

在烧结机械零件生产中，大多采用机械混合法，混料机的类型较多，通常多用双锥型和V型混料机。

随着世界制粉和混粉技术的发展，现可以使用由制粉企业直接供应高品质的部分合金化、完全合金化的低合金钢粉和经扩散粘结后各组元无偏析的、“开包可用”的预混合钢铁粉末。由于调整了添加的润滑剂和粉末粒度分布的标准偏差，能够进行混粉处理。用这些合金粉末制得烧结材料的物理—力学性能见表2-3-4。

表2-3-4 用几种合金粉制得烧结材料的性能

合金粉末种类	组成	密度（g/cm³）	硬度（HRC）	抗拉强度（MPa）	屈服强度（MPa）	伸长率（%）	夏氏冲击值（J/cm²）
部分合金粉	Fe-4Ni-1.5Cu-0.5Mo-0.5C	7.02	41.0	985	788	1.2	14.2
完全合金粉	Fe-4Ni-0.5Cu-0.3Mo-0.5C	7.00	40.0	980	785	0.5	4.2
扩散粘接合金粉	Fe-2Ni-1.5Mo-0.5C	7.00	42.1	1045	801	0.5	8.8

2.3.2.2 压制成形

1）金属粉末的主要成形方法

粉末成形的方法很多（见表2-3-5），通常在烧结机械零件生产中，最为常用的是封闭钢模（刚性模）冷压成形法和特殊成形法（如粉末冶金锻造等）两大类。

表 2-3-5 金属粉末的主要成形方法

成形方法及特点		简要说明	应用范围
Ⅰ、室温加压成形	封闭钢性模冷压	将粉末放入钢性模型腔中，通过模冲对粉末加压，使其成形	压制时，压坯密度较易均匀的零件，如长径比或长壁厚比不太大和垂直与压制方向上横截面变化不多的零件
	封闭弹性模冷压	将粉末放入弹性模（用塑料或橡胶）型腔中，整个弹性模放入刚性模中，通过模冲对弹性模加压，弹性模将压力均匀施加于粉末，使其成形	成形单位压力不大、形状较难成形的制品，如硬质合金的锥体、整球、多台阶件
	挤压	将拌以润滑剂的粉末放入筒内，通过压杜对粉末加压，粉末被迫通过筒下部的挤压嘴，压紧成形	各种截面的长条（棒）成麻花钻类的扭曲条棒
	冷等静压（CIP）	将粉末放入弹性模（用塑料或橡胶）套内，套放入等静压机的高压容器中，通过高压液体对套壁加压，使套内粉末加压成形	各种棒材、管材及其他大型制品
	粉末轧制	将粉末送入两个相对转动的轧辊之间，由于摩擦力的作用，粉末被咬入辊缝压实成带（片）	各种带材，如多孔、硬质合金、摩擦、双金属、三金属以及致密金属带材
Ⅱ、加温加压成形	热压	将粉末放入模型中，直接通电或感应加热模具和粉末，用较小压力将粉末压实成形；温度高时，用石墨模具，温度较低时，用耐热钢模具；此法成形与烧结工序合并	硬质合金、半金属摩擦片等压制性较差、但要求致密的材料
	热锻	将粉末预压成坯料，加热送入锻模中，锻成所需形状的致密零件	高强度致密的结构零件，如连杆等
	温压（WCP）	采用热粉末和热模具，添加一种新润滑剂，通过一次压制和烧结，可使铁基材料高密度化，密度高达7.3－7.5g/cm^3，并密度分布均匀。能显著提高材料的物理力学性能，又可明显降低生产成本。其关键技术：一是预混合粉末，二是温压系统	适用于各种机械和汽车等高强度结构零部件的生产，如发动机及变速器等的传动齿轮、链轮及烧结连杆等
	热挤压	将粉末装在抽真空的包壳内，包壳与粉末一起加热后，放进挤压模中挤压成材；此法成形与烧结工序合并	钢结硬质合金和粉末高速钢的型材
	热等静压（HIP）	将粉末装入塑性好并耐高温的金属壳中，壳放入热等静压机的高压容器中，用高温高压气体压实包壳中的粉末；此法成形与烧结工序合并	粉末高速钢和耐熔金属的大型棒材
	粉末热轧	将高温的喷雾粉末，直接喷落在轧辊上，或将粉末重新加热，在保护气氛中，热粉末被连续轧成致密带材	较低熔点的金属致密带材
	粉浆浇注	将金属粉末制成粉浆，注入石膏模内，干燥后使粉末成形	高孔隙度零件及尺寸精度要求不高、形状复杂、难以压制的零件；后一类制品提高密度主要靠烧结收缩
	粉末注射成形（PIM）	先将金属粉末与粘接剂均匀混合成注射料，然后在注射成形机上成形，经过脱脂和烧结，可制得全致密的、接近零件最终形状及尺寸精度的制品，生产成本低。是21世纪的新成形法	形状复杂零件的整体成形，如三维曲面、反向锥度、齿轮、薄壁件、球形等粉冶制品与难以采用精密铸造法生产的零件

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

成形方法及特点		简 要 说 明	应 用 范 围
Ⅲ、无压成形	松装烧结	将粉末放入模腔中，连同模具一起放入炉内烧结，使其成形；或将粉末直接铺撒在钢背表面上，连同钢背一起入炉烧结而成为双金属板（带）材。此法成形与烧结工序合并	多孔过滤器元件、多孔浸渍材料及双金属板（带）材
	无压浸渍	将基体粉末装入石墨模中，注入可浸润或可形成化合物、固溶体的熔融金属，利用毛细现象浸入孔隙，使粉末成形	金属陶瓷材料

2）最常用的封闭钢模冷压成形

即在常温下，于封闭钢模中用规定的比压将粉末成形为压坯。其成形过程一般由称粉、装粉、压制、保压及脱模组成。

（1）几种基本的压制方法

封闭钢模冷压成形最基本的压制方法有单向压制、双向压制、浮动模压制、引下法四种，其它压制方式则是基本方式的组合，或是用不同结构来实现的。

此外，还有摩擦芯棒压制法，以及为成形多台阶形状复杂的压坯，发展了多动作压制与多动作浮动阴模引下压制法等。

封闭钢模冷压成形用于成形形状更为复杂的零件，如齿轮—斜齿轮双联齿轮、有横向孔的零件、细长零件等，发展了多种新的成形方法，诸如 Olivetti 成形法、粉末移动成形法、横向孔成形法等，使许多用传统的模压成形法无法成形的零件，现可用这些新方法成形，从而扩大了粉末冶金的应用范围。

（2）粉末冶金成形压机

粉末冶金成形压机可分为机械式与液压式压机两大类（见表 2-3-6）。为适应粉末冶金零件生产的多品种、小批量发展趋势，如最近制造的粉末冶金用成形压机中，即使是机械式压机，亦都装备气压缸、油压缸等，大多正在变成数控的复杂的机械设备。液压机为了改进成形性，采用了计算机数字控制（CNC）。

表 2-3-6 粉末冶金常用的成形压机

压机类别		简 要 说 明	主要特点	压机压制能力（kN）	压 制 速 度	备 注
机械式压机	曲轴式压机 偏心式压机 肘节式压机 凸轮式压机 转盘式压机	用曲轴机构驱动压头 用偏心机构驱动压头 用单、肘节结点驱动一个压头 用凸轮机构驱动压头 可将几个至几十个阴模和模冲装于圆盘上，圆盘一边旋转一边压制成形	机械式压机由于压头等的动作是由机械规定的，故具有制品高度方向的尺寸易于决定的特点	5～7 500 需要时，可制造 12 000kN 的压机	转盘式压机的生产能力为一般机械式压机的几倍到百倍	压机型号规格有的已系列化，但多为非标设备，应根据生产批量大小和制品性能及尺寸精度等要求来选定
液压式压机	油压机 水压机	用油压、水压等液压驱动的压机	具有机构简单、压制能力大的特点	40～20 000kN	比机械式压机慢	

3）特殊成形法

（1）粉末冶金锻造

粉末锻造是以原料粉末用刚性模具或冷等静压成形为预成形坯，经过或不经过低温预烧结或最终烧结，采用热锻或冷锻改变其形状的同时，实现高密度化。以烧结体作为预成形坯的称为烧结锻造。粉末锻造工艺技术经长期研制至 80 年代，美、日、英、德等国达到工业生产规模，如粉锻汽车发动机连杆等，相继在许多大汽车公司装车应用。常用的粉末冶金锻造方法有粉末热锻和粉末冷锻，而粉末冶金热锻的三种成形工艺方法见图 2-3-2。

汽车论坛 http://www.qclt.com

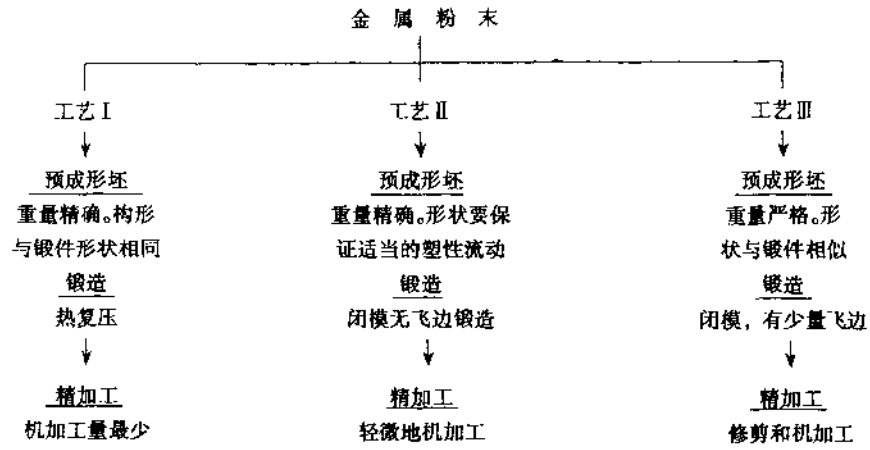


图 3-3-2 粉末冶金锻造的三种工艺方法

工艺Ⅰ——预成形坯的形状与热锻件基本相同，实质上是预成形坯在热态下进行粉压；

工艺Ⅱ——预成形坯形状很简单，但要保证锻造时产生适当的塑性流动和不产生飞边；

工艺Ⅲ——预成形坯形状和锻模相似，锻造时产生少量飞边。

在上述三种工艺中，工艺Ⅱ属于兼有粉末冶金与热锻优点的新工艺，其优越性是：

①生产工序少、流程短、生产率高。

②材料利用率高。粉末冶金热锻无飞边，从而消除或减少了后续切削加工，材料利用率可达 80%～90%，而模锻者为 60%～70%；

③锻件尺寸精度高和表面粗糙度低，力学性能佳。粉末锻造零件的尺寸精度可与粉末冶金零件相比拟，而表面粗糙度更低，其材料的力学性能可与锻轧材料相比拟，且无方向性；

④粉末锻造的温度（870～1 090℃）比常规的钢坯料锻造（1 090～1 200℃）低，因而锻模寿命长和能耗低；

⑤制造的零件质量精确一致。这对需要质量平衡工序的零件（如发动机连杆等），尤为重要；

⑥粉末锻造在材质成分选择上的灵活性大，无偏析，其晶粒度细小，且化学成分和非金属夹杂物及碳化物分布均匀，这是熔铸材料锻造无法获得的材料特性；

⑦粉末锻造时，金属的流动相当小，故与普通热锻相比，各向异性较小；

⑧粉末锻造工艺易于自动化；

（2）等静压制

它是同时从各方向对粉末材料施加压力的成形方法。其优点是，压坯密度分布均匀，设备简单，用较低压制压力即可获得较高密度的制品；但压坯尺寸精度较低，需后续机加工。根据等静压制时粉末材料的受热状态，分为冷等静压制（CIP）与热等静压制（HIP）。

①冷等静压制用橡皮或塑料囊，又叫软模成形。软模成形不是以液体作介质，而是将弹性体（橡胶、塑料等）既作为模腔，又作为传递压力的介质。即将弹性模放在普通钢压模内，于压机上加压成形，能成形球体、圆锥体等难于用钢模压制成形的压坯，压坯的密度较高。

②热等静压制是用气体作流体，在高温和高压下等静压法成形。气体压力 100～200MPa，处理温度为数百度至 2 000℃，从而实现致密化。其工艺过程是，用等静压压制预成形坯，将它装入低碳钢壳体内，用气体作介质，在高温下进行等静压压制。其优点是，可在较低温度下进行致密化，晶粒细、偏析小；对各种粉末均能获得接近理论值的均一密度；即使是粗大的球形粉末，亦能达到高密度；可制造金属陶瓷和其他难以成形及烧结的制品。

（3）三轴向压制成形

它是综合单轴向压制（包括单向和双向压制）与等静压制两者特点的一种成形工艺。三轴向压制成形

汽车论坛 http://www.qclt.com

与干式等静压制的主要差别是，借助于一个轴向活塞将比侧压力更大的压力施加于干式等静压制装置的上、下端盖上，分别控制轴向压力与侧压力，这一综合应力状态是被压制的压坯内部产生剪切应力，结果成形压坯的密度和强度均高于用其它方法成形者。

从成形压坯的几何形状来看，为保证压力和密度均匀，此法仅适用于成形形状规则的零件，如圆柱体、正方体、长方体、套筒等。

除上述方法外，还有振动成形法、挤压法、粉末轧制、松装烧结等。

2.3.2.3 烧结

粉末冶金学科中的烧结，是将粉末或压坯在低于其主要组分熔点的温度下（即 $T_{烧}=(2/3\sim3/4)T_{熔}$）进行加热，从而使粉末颗粒产生冶金结合，提高其强度和各种物理—力学性能的一种过程。烧结对最终产品的性能起着决定性作用。

整个烧结过程通常都是在固态下进行，即不产生液相或熔化，称为固相烧结。当压坯中有两种以上组分，并在烧结中有某种组分出现熔化时，称为液相烧结，大多是用于获得高密度；在烧结时进行液相熔渗亦属此范畴。按照组分可分为单元系烧结和多元系烧结。前者指压坯中只有一种组分，并都是固相烧结，如纯铁制品及钨、钼条的烧结；后者指压坯中含有两种以上组分，它有固相烧结（如铁—石墨、铜—石墨等）和液相烧结（如铁—铜及钨钴类硬质合金等）。

1）烧结方式

粉末冶金中常用的烧结方式见表 2-3-7。

表 2-3-7 常用的烧结方式

烧结方式		简要说明	应用范围
按防氧化条件分	填料保护烧结	用碳（石墨、木炭、焦炭）、氧化铝、石英等作填料，工件埋入其中进行烧结	在无保护气氛时，烧结铁基、铜基制品
	气体保护烧结	用还原性的氢、煤气、分解氨及中性的氮等惰性气体保护工件	烧结铁基、铜基、铝基制品及硬质合金
	真空烧结	用真空条件，防止氧化	烧结硬质合金、铝、钛等易氧化的制品
按烧结炉结构分	连续烧结	工件依序连续通过炉子的预热带、保温带及冷却带，完成烧结全过程，热利用率等	用于大批量的生产，通常需气体保护
	间歇烧结	工件随炉升温、保温和降温，炉子只能成批、间歇地进行烧结	用于升、降温要缓慢的情况下，采用气体或填料保护
特殊烧结方式	加压烧结	烧结时，对工件施加一定压力，以提高制品的密度，并防止变形，且使工件与钢背粘接牢固	制动器摩擦片（块）、离合器摩擦片
	熔渗烧结	工件的端部（上或下）放置低熔点的金属或合金，烧结时，低熔点金属熔化后渗入多孔骨架中	铜钨、铁铜等致密合金
	电阻烧结	工件本身作为电热体，利用其电阻自身加热使粉末烧结	难熔金属制品、如钨、钼等制品
	活化烧结	用物理方法（如附加振动、循环温度）或化学方法（如加卤族化合物、预氧化、加低熔点化合物、用氢化钛作填料）加快烧结过程，改善烧结质量	软磁材料和高密度材料
	电火花烧结	粉末体通入直流电及脉冲电，使粉末间产生电弧进行烧结，同时逐渐施加压力。此法成形与烧结工序合并	双金属（带钢背）摩擦片、金刚石金属工具，以及钛合金等
	激光烧结	激光辐射烧结，具有烧结周期短、变形小、细化组织特点。可能成为21世纪前期推广应用的新烧结技术	用于齿轮、气门座等结构零件

汽车论坛 http://www.qclt.com

2）烧结机理

烧结机理主要研究两个问题：一是烧结的原动力和烧结时发生变化的原因；二是烧结时使烧结体中发生变化的物质迁移机理。

（1）烧结的一些基本问题

①粉末颗粒烧结原因：松装粉末或压坯在高温下是一种不稳定的材料，它们的内部结构倾向于发生显著变化。这是由于粉末高度分散，且粉末颗粒外表面凸凹不平，具有很大的比表面，因而烧结的原动力主要是表面能。从热力学观点看，若一系统发生化学反应，则其自由能必定减少。如一单元系材料的烧结过程是一多孔性压坯减少内表面面积的过程，从而多孔压坯的内表面面积越大，烧结的原动力就越大。烧结时，发生粉末颗粒的粘接、粘接颈长大、烧结体中孔隙的球化和细化等现象，均可用此来说明。它是烧结的主要原动力。

②烧结过程：烧结通常是在恒温下进行，但烧结时间则因要求而异。烧结进程包括以下六个不同的阶段（见表2-3-8）。

表2-3-8 烧结过程几种不同的阶段

烧结的不同阶段	说明
①颗粒间开始联结	在烧结初期，在相邻颗粒接触处由于原子扩散而发生联结和产生晶界的过程。在此阶段不发生收缩，压坯尺寸无变化，但材料中发生了极重要的变化，即使在高温下加热较短时间，其强度和硬度均有较大增高。在高孔隙烧结材料中，烧结过程可能只进行到这一阶段
②颗粒间粘结颈长大	将在第一阶段粉末颗粒间新形成的联结区称为颈，它的尺寸在第二阶段长大，其联结增强了。当颈长大时，烧结体中的物质发生迁移，但其孔隙量并未因此减少，即烧结体还未发生收缩，不会影响孔隙的连续性。在烧结中，一般颈长大发生于早期，并较迅速。颈长大可能持续相当长时间，并与以后的某些阶段相重叠
③连通孔隙的封闭	此阶段表征着烧结体中孔隙性质发生了重大变化。弯曲的和连通的孔隙通道的封闭，则导致形成孤立的和连通的孔隙。孔隙通道封闭的原因之一是颈长大。此阶段可能要进行相当长的时间，并与以后的第四和第五阶段相重叠
④孔隙球化	这是颈长大的自然结果。当物质从孔隙表面迁移到颈区时，孔隙即较为球化了。球化过程与孤立的和连通的孔隙有关。烧结温度高时，有利于孔隙的球化。对烧结材料和零件力学性能的影响而言，烧结的这一阶段特别重要
⑤致密化或孔隙收缩	孔隙的收缩和最终的消除是烧结的最重要阶段。对于单元系材料，致密化可能就等于孔隙收缩；但在多元系材料中，其它过程也可能导致收缩和胀大，可能遮盖了因孔隙收缩发生的致密化。导致烧结体体积减小的孔隙收缩过程，必须包括固体向孔隙中的迁移运动与孔隙中所包含的气体向外表面的迁移运动。随着压坯密度的增高，孔隙收缩阶段的作用减小
⑥孔隙细化	烧结体孔隙度低于10%后，多数孔隙被完全分离，封闭孔隙数量大增，孔隙形状趋于球形并不断缩小，小孔隙逐渐消失，而某些大孔隙因吞并还可能变大，总孔隙数量继续减少，烧结体仍在缓慢收缩。在此阶段，烧结进行得很缓慢或基本已经停止

上述六阶段是就大部分孔隙呈连通状的压坯或松装粉末的烧结过程而言。对只有孤立孔隙，亦即密度很高的压坯来说，烧结的第二和第三阶段作用很小或不存在。

（2）烧结时的物质迁移机理

在烧结过程中物质迁移的机理主要有蒸发与凝聚、体积（点阵）扩散、表面扩散、晶界扩散、粘性流动、塑性流动等。烧结是一个扩散、流动及物理化学反应（蒸发凝聚、溶解沉积、吸附解吸、化学反应）等综合作用的过程。

3）烧结生产

（1）常用的烧结炉

整个烧结过程是在通有保护气氛的烧结炉中进行。烧结炉应依据生产批量大小、零件性能及尺寸精度

汽车论坛 http://www.qclt.com

等要求来选定。粉末冶金零件烧结炉通常都有两个加热带，一为脱除压坯中润滑剂的预热带，一为高温烧结带；在烧结带之后依序为缓冷带和最终冷却带。大批生产最常用的烧结炉有：网带式传送烧结炉、推杆式烧结炉及步移梁式烧结炉。这三种烧结炉的外形构造分别见图 2-3-3、图 2-3-4、图 2-3-5。这三种烧结炉在技术上的比较见表 2-3-9。

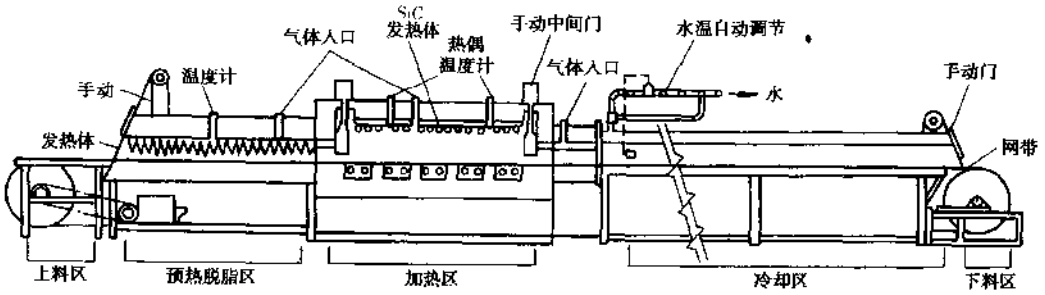


图 2-3-3 网带式传送烧结炉的构造

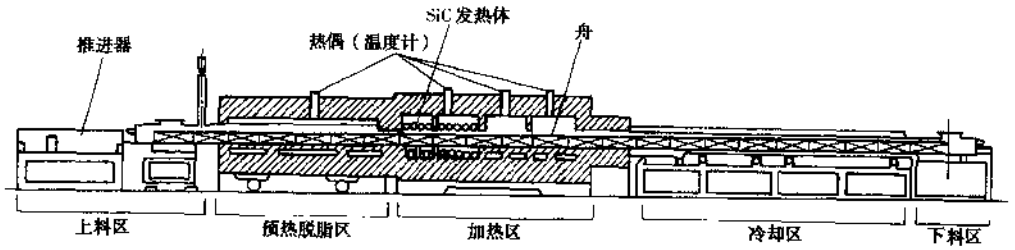


图 2-3-4 推杆式烧结炉的构造

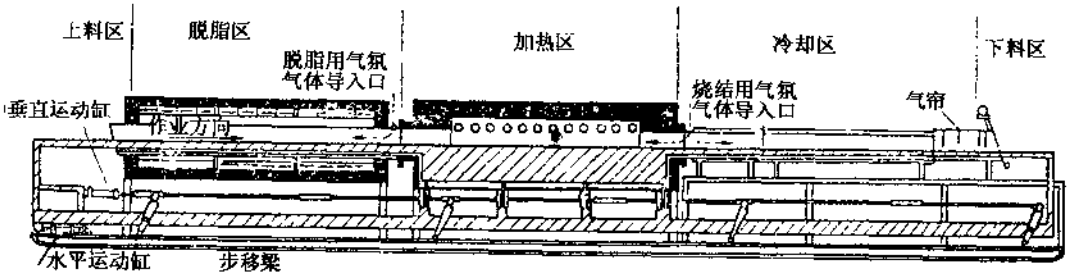


图 2-3-5 步移梁式烧结炉的构造

表 2-3-9 常用三种烧结炉技术上的比较

	网带传送式炉	步移梁式炉	推杆式炉
最高烧结温度（℃）	1 120	1 250	1 400
通过炉子的标准时间（调整范围）（h）	3（2～4）	4（3～6）	5（4～10）
生产能力（kg/h）①	530	440	320
耗电量（kW/h）	于 1 060℃ 120	于 1 230℃ 106	于 1 350℃ 110

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

	网带传送式炉	步移梁式炉	推杆式炉
保护气体消耗量 N_2/H_2（m^3/h）	30（包括炉子进出口的气体）	14（包括炉子进出口的气体）	6（包括炉子进出口的气体）
被烧结产品温度的均一性（K）	±6	±8	±3
耐用性（年）	炉子马弗 1～2，网带 1	3～4	4～6
气氛气体	较大的气流	较大的气体流动	较小的气体流动
维修	少	监控机械驱动装置	监控液压推进装置

①指长 20m、宽 400mm 的烧结炉。

目前，主要使用网带式或推杆式烧结炉。今后，将增加使用连续式高温烧结炉、正在开发冷却速度可达 3K/s 的新型连续烧结炉（烧结—热处理连续炉），则可控制从烧结温度开始到冷却过程，不需用别的热处理炉就能进行热处理。这种“烧结硬化”技术用以生产高强度烧结零件。

（2）烧结保护气氛气体

由于大多数金属需要防止氧化，粉末颗粒表面的氧化物妨碍扩散连接和形成所要求的性能，特别是还原性气体，不仅可防止氧化，并可化学还原存在的氧化物。因此，在烧结生产中需使用不同种类的保护气氛气体，最常用的烧结保护气氛气体，见表 2-3-10。

表 2-3-10 常用的烧结炉保护气氛气体

种类	简要说明	应用范围
分解氨气体（AM）	用无水的液氨在触媒参与下加热时，使其分解为 3∶1 的 H_2 和 N_2 的混合气体。它较纯净，均匀一致。露点 -般低于 -51℃。残氨往往低于 250ppm。通常 1kg 液氨约可生成 $2.8m^3$ 氨分解气体（H_2：N_2=3：1）。价格低廉，危险性小	青铜、黄铜、铜、铁、铁—铜、钼、镍、钢、不锈钢、钨等
放热性煤气（EX）	是使天然气、丙烷、丁烷、甲烷等碳氢化合物气体和空气于转化炉内进行放热反应而制成的一类煤气。经将其中的 CO_2 除去后，可将露点减低到 -40℃以下。它们一般含有 $N_2$67%～87%，其余为 CO、H_2、CO_2 和 H_2O。因其含 H_2 量小，故还原能力较差。它通常用于烧结青铜或其它铜基零件	青铜、黄铜、铜、铁、铁—铜、镍、银、钢、等
吸热性煤气（EN）	用的原料气体与放热性煤气相同，但空气/原料气体之比值较小，生成的煤气中 H_2、CO 的含量较高。其组成为 N_2：40%、H_2：40%及 CO：20%，及少量的 H_2O、CO_2 及 CH_4。此种煤气的组成与露点因空气/原料气体之比值而异。大部分铁基零件都是在此种气氛气体中烧结的，其露点范围为 -5～15℃	青铜、黄铜、铜、铁基零件等
氢气（H_2）	粉末冶金零件亦可用 H_2 作保护气氛气体，但它的价格较高，并易发生爆炸。在大批量生产所需用的 H_2，多用电解水的方法制得，储存于大立罐中，经干燥后直接通入炉内；小批量生产时，多用瓶装氢气，因含有水分，需进行干燥精制。此外，也可将 H_2 与 N_2 混合后使用。H_2 是最有效的还原性气体，它们与分解氨气体一样，只要露点不高于 -40℃，对碳钢零件几乎不脱碳	青铜、黄铜、铜、铁、铁—铜、钼、镍、银、铝、不锈钢、钨等

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

种　类	简　要　说　明	应　用　范　围
真空（无气体）	主要用于烧结不锈钢、工具钢、磁性合金、硬质合金及一些难熔金属　真空度为0.133Pa	铝、铜、不锈钢、钛、钨、钒、锆等
氮基气氛气体	它通常主要由惰性气体——氮气和一种或多种少量的活性气体组分组成。不需要传统的发生器，气体原料（N_2和活性气体）是通过一流量控制盘输送到烧结炉内。通过改变活性气体组分的比率与类型，就可使其适应对烧结气氛气体提出的各种要求。氮基气氛气体系统含有三种基本类型的活性组分：氧化物还原剂、碳控制剂及氧化剂	氮基气氛按组成分为两类：N_2-H_2系统与N_2-H_2-CO系统。前者用H_2富化（H_2为2%－15%），广泛用于烧结铁基和有色金属零件；后者用H_2和CO富化（如CO为4%－10%），用于烧结高碳或低碳铁基零件、有色金属零件

（3）烧结作业

如铁基制品的烧结通常属于多元系烧结，烧结过程很复杂。在日常的实际生产中，铁基制品的烧结一般分为预热、烧结和冷却三个阶段：

①预热：是指压坯从进炉到进入高温区之前的烧结准备阶段，温度约为100～950℃之间。在此阶段主要发生的变化是，压坯中气体的脱附和添加剂的挥发，压坯中残余应力的消除及压坯中某些氧化物的还原。炉子预热带的长度要足以使压坯在进入高温带之前除去全部润滑剂，且在预热带的保护气氛流量要足够大，以便将润滑剂蒸气带出，避免它进入高温带而沉积在炉子的加热元件上，使其过早失效。对加热速度不能过快，否则压坯易产生较大的热应力而造成裂纹、鼓泡和变形。

②烧结：压坯在1 000～1 200℃的高温区进行烧结和保温，一般烧结时间为0.5～1h。炉子高温带要有足够的长度，以使压坯能在规定温度下保温足够长的时间，从而获得所需的物理—力学性能的烧结材料和零件。

③冷却：对于减摩零件的冷却宜慢，使其有一定数量的石墨析出；对结构零件的冷却则宜快，因为石墨析出是有害病的。一般先在炉子的隔离带预冷却至800～900℃，并停留10～15min，然后快速推到炉子水套区冷却至40℃左右即可出炉。

4）烧结制品的检测

烧结制品一般是粉末冶金最终的产品，必须检测它的各种性能。其中除几何尺寸、精度及粗糙度外，主要是物理性能、力学性能和金相组织。其检测项目、测试方法及标准见表2-3-11。

表2-3-11　烧结制品主要性能的检测

项　目		检测方法简要说明	测试标准
物理性能	制品密度	水中浮重法。首先将干试样在空气中称重（m_1），再将此样件浸渗一层石蜡（封孔），取出后将它擦净并干燥，然后再次在空气中称重（m_2）。最后在水中称重（m_3）。根据三次称重结果，可按下式计算出密度：$\rho=m_1\cdot\rho_w/(m_2-m_3)$（g/cm³），式中$\rho_w$——水的密度，取0.997g/cm³	按国际标准（ISO2738）或国家标准（GB5763—85）
	开口孔隙度	按上述测试密度的方法进行。根据上述方法测得的三次称重数据，可按下式计算出开孔率$p=(m_1-m_2)\cdot\rho_w/(m_2-m_3)\rho_t\times100$，式中$\rho_t$——浸渗石蜡的密度	按GB5164—85
	含油率	可用质量百分数或体积百分数表示	按GB5165—85

汽车论坛　http://www.qclt.com

续上表

项目		检测方法简要说明	测试标准
力学性能	抗拉强度及伸长率	拉伸试样按标准规定要求，在专用压模中成形后，经烧结而成。对一定尺寸的试样在材料实验机上施加拉伸负荷时，发生断裂时的最大负荷值对试样拉伸前的原始截面积之比，即为抗拉强度（σ_b），计算式为：$\sigma_b=P/F_0$（MPa）。其伸长率亦可同时计算出：$\delta=L_1-L_2/L_0\times100\%$	拉伸试样制备按ISO2740或GB3963—87，拉伸试验方法按GB7964—87
	冲击韧性（冲击值 a_k）	在夏比试验机上进行，试验时冲击方向应与压制方向垂直。冲断试验消耗的冲击功（A_k），可由试验机的刻度上读出。试样单位面积上所消耗的冲击功即为冲击韧性：$a_k=A_k/F$（$N\cdot m/cm^2$）	试验方法按GB9096—88，试样按GB5318-85
	K 值	对含油轴承类圆筒形零件（当零件有凸缘时，要将凸缘锯切下来），经常用径向压溃强度作为烧结零件材料的强度指标。将筒形零件置于试验机工作台上，在垂直套筒轴线的方向施加负荷，直到出现裂纹，压力不再上升为止，此时得出的最大负荷即压溃负荷。再根据套筒的尺寸算出径向压溃强度 K 值。其计算式：$K=F(D-t)/Lt^2$（MPa），式中：F——发生破裂时的最大负荷（H）；L——套筒长度（mm）；D——套筒的外径（mm）；t——套筒的壁厚（mm）。只有当 $t/D<\frac{1}{3}$ 时，上式方有效。在此条件下，σ_b 值近似等于 $0.5K$	按ISO2739或GB6804
金相组织		对密度≥5.8g/cm³的铁基滑动轴承和结构零件的金相组织，珠光体数量按百分比分为9级（珠10、珠20、……珠90）；根据产品出现珠光体粗细程度，又划分为A组（细）和B组（粗）。渗碳体的数量按规定分为6级（即渗1、渗3、渗5、渗7、渗10、渗13）。利用金相显微镜检测，在放大到一定倍数（50～2000倍）下观测烧结金属材料的显微组织和缺陷。可测定其晶粒大小、组织特征、孔隙状况、各种非金属夹杂的数量、形态和分布，以及烧结缺陷。对于热处理的结构零件试样，还可以观测其组织结构。金相检验主要包括：试样制备、组织显露和金相观察等	按机械部标准JB2798—81

2.3.2.4 后处理

粉末冶金零件中形状复杂、尺寸精度、耐磨性、耐蚀性、气密性等要求很高的零件，还需进行各种后续加工（见表2-3-12）。

表2-3-12 烧结制品的后续处理加工

后处理方法		简要说明	应用范围
压力加工	整形	将工件放入整形模中加压，以校正烧结时的微小变形，并提高工件的尺寸精度和降低粗糙度	径向尺寸精度IT4（4级）以上的轴套和结构零件
	复压	将工件放入复压模中再次加压，以提高工件的密度及物理性能	软磁零件及中强度结构零件
	精压（精整）	将工件放入精压模中再次加压，以较小的变形程度与锻造比，改变工件的尺寸精度与形位公差	制品所要求的形位公差及精度，在切压时不易达到的结构零件
	冷挤	用滚轮或标准齿轮与工件对滚挤压，以提高工件的密度和尺寸精度，并降低粗糙度	齿轮、球面轴承等

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

后处理方法		简 要 说 明	应 用 范 围	
浸渗（浸渍）	浸 油	将工件放于油箱内，抽真空或加热，使润滑油浸入毛细孔中，以改善工件的自润滑性能，并利于防锈	铁基，铜基等含油轴承及部分结构零件	
	浸 硫	工件放于120～130℃熔融硫中，硫浸入孔隙，改善材料的减摩性能，并将孔隙封闭	铁基硫化减摩材料及部分结构零件	
	渗金属	如渗铬（多用固体渗铬），渗铬剂为铬粉以及为活化渗铬过程添加的 NH_4Cl。如渗锌，渗锌剂是锌粉与 Al_2O_3 或 NH_4Cl	要求提高表面硬度、耐磨性及耐腐蚀稳定性的铁基零件	
表面处理	蒸汽处理	在低于570℃下蒸汽处理时，于烧结铁基零件的表面上生成致密的 Fe_3O_4 层，能稍许提高零件的硬度可改善其耐磨性，还可改进提高耐蚀性或防锈能力，以及气密性和渗透性。是一种既简单又便宜的方法。蒸汽处理的缺点是抗拉强度、冲击韧性及延展性有所降低	适用于要求提高硬度、耐磨性及耐腐蚀稳定性，而对韧性及塑性要求不高的零件，如齿轮、凸轮、转子、法兰等	
	电 镀	对孔隙度高于10%的烧结零件，先应封孔处理（如浸渍树脂，用蜡、硬脂酸锌等填充孔隙，抛光等）。开始电镀时，采用的电流密度应比工作电流密度大0.5～3倍。一般是镀镍、锌、铬、镉等	要求外表美观、耐腐蚀及防锈的零件	
	化学处理	对形状复杂的烧结零件或需要硬度较高的零件，可用化学镀镍后，于360～400℃在还原性气氛中退火2h		
热处理	退火及正火	将烧结零件加热温度高于AC1或AC3，并保温之后缓慢空冷。退火可降低零件的硬度，增高塑性及韧性，改善其切削性能。烧结Fe-（0.8～1.0）C材料由于组织不均匀，物理力学性能和切削性差，故须进行等温退火（加热到780℃、保温20min后，于680℃下保温2h），以获得颗粒状珠光体，可使其塑性提高，又不明显减低强度和硬度。以及均匀退火（加热到高于AC3并长时间保温，以给定的冷却速度）。对烧结钢正火时，应在惰性气体（N_2、Ar）中进行，或直接在原加热炉内进行	要求软化或细化晶粒的烧结铁基制品	
	淬火及回火	烧结零件存在孔隙度，会减低其导热性、奥氏体的过冷程度及淬透性，故须增高奥氏体化温度或采用较强的冷却介质。淬火介质可用水、盐水、油、快淬油。同致密钢材的热处理	要求硬度高的烧结钢制品	
	高频淬火	高频表面硬化	表面要求耐磨，又要兼顾韧性及塑性的烧结钢零件	
	激光淬火	激光表面硬化		
化学热处理	表面渗碳淬火	孔隙度小于10%的烧结制品最佳渗碳温度为920～940℃。烧结碳钢的淬火温度取决于冷却介质，一般为780～880℃、淬火介质为水和油，回火温度为200～600℃，具体温度取决其使用条件	要求高密度或孔隙经封闭后的低碳铁基零件	
	碳氮共渗	其工艺同致密钢材。它是经过改良的气体渗碳，即将氮引入其中，使生成渗碳层的同时，氮也渗入其中。添加于渗碳气氛气体中的氮分解时，在烧结零件表面生成初生态氮，氮和碳同时扩散到零件中。它比气体渗碳的温度低和时间短	应用于烧结铁基制品的表面硬化	
切削加工	车削或镗削、刨削和修削、钻削、铰削、攻丝、磨削、铣削、抛光、珩磨及精研	同致密材料的切削加工。作烧结铁基合金的切削加工的特点，就加工表面的精度与刀具磨损状况言，切削性能比熔铸金属差。由于其内有孔隙，导致断续切削和导热性差。由于它含有分布不均匀的软质相和硬质相，并多含有质硬的氧化物系杂质，也是使其切削性能恶化的主要原因之一。应有克服刀瘤与崩刀的对策	刀瘤的对策	崩刀的对策
			采取高速切削，采用高级刀具材料，加大刀具前角，刀具切削刃锋利	慢速切削，使用高韧性刀具材料，减少刀具前角，用珩磨强化切削刃

汽车论坛 http://www.qclt.com

在具有较高尺寸精度的前提下，烧结后不进行任何处理即可作为产品使用。为了矫正尺寸，可再采用金属模进行精整加工；常用的精整方法有：单整内径或外径、外箍内缩、内胀外扩、全整形及精压等。通过精整加工后的尺寸矫正效果如表2-3-13所示。

表2-3-13 具有同样断面烧结零件的尺寸精度（mm）

名称	铁基零件				非铁基零件（铜基等）	
	烧结态		精整态		精整态	
	普通	精密	普通	精密	普通	精密
长度	±0.125	±0.075	±0.075	±0.050	±0.075	±0.050
内径	±0.050	±0.025	±0.025	±0.0125	±0.038	±0.010
外径	±0.050	±0.025	±0.025	±0.0125	±0.038	±0.010
偏心	0.075	0.050	0.050	0.038	0.025	0.050
端面平面度	±0.050	±0.025	±0.025	±0.025	±0.025	±0.025
端面平行度	±0.038	±0.025	±0.025	±0.025	±0.025	±0.025

2.3.3 烧结材料及其标准

2.3.3.1 烧结材料和制品的分类、特性及应用范围

烧结材料包括钢铁、有色金属等各类金属及合金，还包括只能用粉末冶金工艺才能制成的金属陶瓷、金属塑料及金属纤维复合材料等。材料的性能有硬质与软质、减摩与摩擦、多孔与致密、软磁与硬磁、易熔与难熔、低密度与高密度、一般用途与具有特殊性能用途等多种多样，现按其用途分类如表2-3-14。

表2-3-14 主要烧结材料和制品的分类、特性及应用范围

类别	材料和制品名称		主要性能要求	应用范围
	材料	制品		
机械零件材料	减摩材料	①多孔含油轴承，如铁基、铜基、铝基等含油轴承 ②改性塑料-烧结锡青铜粉—钢背三层复合材料轴承 ③烧结铅青铜粉—钢背双金属轴承（瓦）	自润滑性好，承载能力（PV值）高，摩擦系数低，耐磨且不伤对偶	适用于汽车、摩托车、家用电器、纺机等各种机械上的减摩零件
	结构材料	①铁基机械零件 ②有色金属基机械零件	硬度、强度及韧性等力学性能，有时还要兼顾耐磨性、耐腐蚀性	铁、钢、铜合金等受力件（齿轮、链轮、凸轮及异形复杂结构零件）
	摩擦材料	①铁基摩擦材料 ②铜基摩擦材料 ③无石棉半金属基摩擦材料 ④无石棉混杂纤维摩擦材料	摩擦系数高且稳定，能承受短时高温，良好的导热性、耐磨性，并不伤对偶件	用于汽车等的制动片、离合器片。尤其是轿车及轻型车等更广泛应用半金属摩擦材料
	多孔材料	①过滤器械 ②吸音材料 ③流体分布元件	透过性、过滤精度，有时要兼顾耐磨、耐蚀性等	铁、青铜、黄铜、蒙乃尔合金、不锈钢等多孔过滤元件及材料

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

类别	材料和制品名称		主要性能要求	应用范围
	材料	制品		
工具材料	硬质合金	①含钨硬质合金，如WC-Co、WC-TiC-Co硬质合金 ②无钨硬质合金，如碳化钛基、碳化铬基硬质合金 ③钢结硬质合金(模具材料)	硬度、红硬性、强度、韧性及耐磨性	各种切削工具，模具、凿岩及耐磨材料等
	超硬材料	①立方氮化硼刀具 ②金刚石工具材料	硬度、强度及金刚石粘接强度	立方BAC切削刀具，金刚石地质钻头，切割大理石锯片、研磨工具、修正砂轮工具等
	粉末高速钢	粉末高速钢刀具	硬度、红硬性、强韧性、耐磨性	高硬材料切削加工刀具广用
	陶瓷工具材料	①陶瓷工具 ②耐磨、耐高温、耐腐蚀零件		高硬材料切削刀具及零件
磁性材料	磁性材料	①软磁材料元器件	磁导率高、磁感应强度大、矫顽力小	烧结铁及合金、软磁铁氧体等用于弱电技术中
		②硬磁材料元器件	磁感应强度大及矫顽力大、磁能积高	永磁铁氧体、NdFeB、Sm-Co等使用很广泛，现代汽车电子控制技术中广用
		③高温磁性材料		
电工材料	电接触材料	①电工触头材料	导电性、耐电弧性	难熔材料(W、Mo等)与导电材料(Cu、Ag)形成假合金的开关触头
		②集电材料	导电性、减摩性、耐电弧性	电机中银石墨、铜石墨电刷、电车用Cu、Fe基集电滑板(块)
	电热材料		耐高温性及电阻率	用于发热元件、电子管板极及其它电真空材料
耐热材料	粉末超合金	①粉末镍基超合金 ②粉末钴基超合金		高温零部件
	难熔金属及合金		热强性、抗冲击韧性、硬度	高温零件
	金属陶瓷	①高温金属陶瓷，如氧化物基、碳化钛基金属陶瓷		耐高温、耐磨损、耐腐蚀的零件材料
		②金属陶瓷高温涂层		
		③弥散强化材料，如氧化物、碳化物、硼化物、氮化物等弥散材料	热强性、抗蠕变能力	用作高温下阻碍晶粒长大的材料和零件

2.3.3.2 烧结材料和制品的力学性能的影响因素

烧结材料和制品的力学性能及其尺寸偏差，受许多因素的影响（见图2-3-6），其中最重要是密度、合金元素、烧结温度、热处理等因素。

近来对高密度（7.3～7.5g/cm³）的铁基材料，多用二次压制和二次烧结工艺制造，第一次烧结的温

汽车论坛 http://www.qclt.com

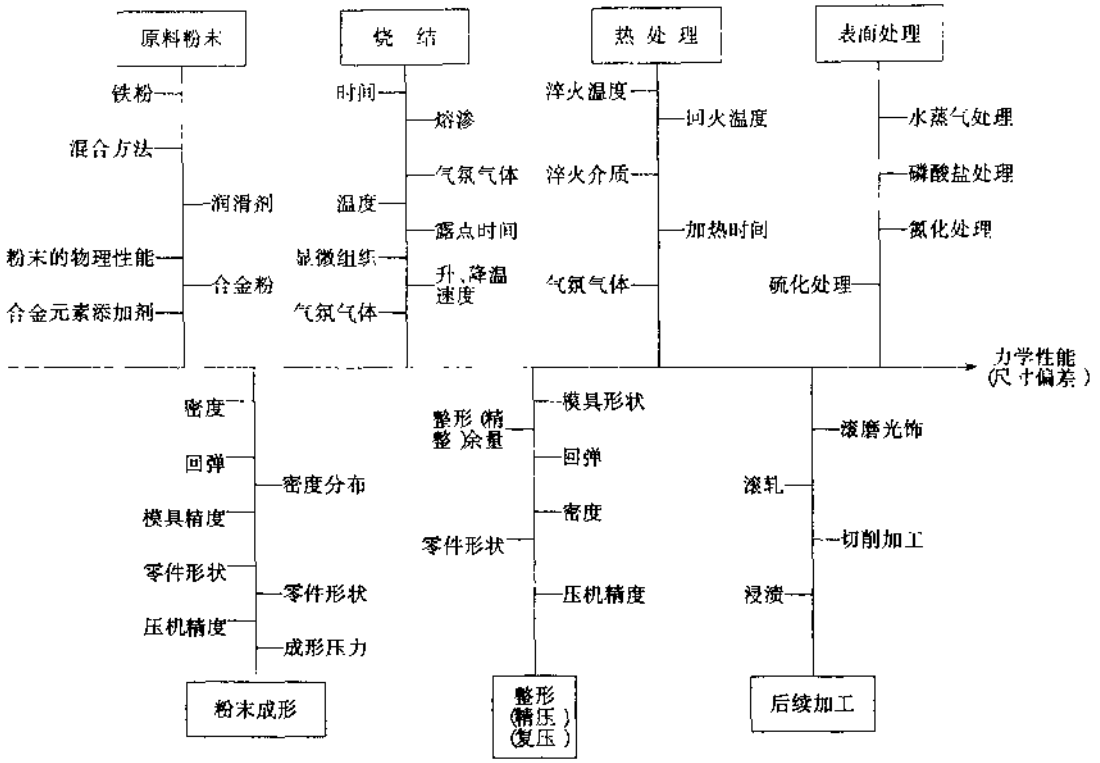


图 2-3-6 关于铁基烧结材料力学性能（及尺寸偏差）的特性要素图

度为 760℃，目的是消除粉末颗粒的加工硬化，以及烧除润滑剂；第二次烧结是在 1 250～1 320℃的温度下进行，此时烧结材料中的孔隙球化，材料密度增高，从而抗拉强度和冲击韧性增高，并改进其疲劳强度。今后，对此类高密度零件材料采用温压工艺更为经济和合理。

2.3.3.3 烧结铁基结构零件材料标准

烧结铁基结构零件材料在汽车等各种机械上广泛应用。其主要的要求是，有足够的力学性能或耐磨性、较好的工艺性能，有时还要求材料具有耐热、耐腐蚀等特殊性能。在中、美、日、德等国和 ISO 国际技术标准中都有相关铁基结构材料的标准。

我国“烧结态铁基结构材料”技术标准有国家标准（GB/T14667—93）；“热处理态铁基结构材料”技术标准是原第一机械工业部于 1984 年颁布的标准（JB3593—84）。常用烧结铁基结构材料的分类、成分、力学性能、特点及应用，分别见表 2-3-15 和表 2-3-16。

表 2-3-15 铁基结构材料的成分、特点和应用举例

材料	牌号	化学成分（%）					主要特点	应用举例
		$C_{化合}$	Cu	Mo	Fe	其它		
烧结铁	F001J F002J F003J	≤ 0.1	—	—	余量	≤ 1.5	韧性及韧性好，磁导率高，焊接性好，可渗碳淬火，强度低	要求外表硬、心部软的零件，适用于小件高精度零件，可作为磁化铁心使用

续上表

材料	牌号	化学成分(%) $C_{化合}$	Cu	Mo	Fe	其它	主要特点	应用举例
烧结碳钢	F0101J F0102J F0103J	0.1~0.4	—		余量	≤1.5	塑性及韧性较好，强度较低	受力小的零件，渗碳淬火零件
	F0111J F0112J F0113J	≤0.4~0.7	—	—	余量	≤1.5	强度、硬度较高，可热处理	受力不大的一般结构零件，如转子、传动齿轮等
	F0121J F0122J F0123J	≤0.7~1.0	—	—	余量	≤1.5	热处理后硬度高，强度较高，质脆	要求耐磨的零件
烧结铜钢	F0201J F0202J F0203J	≤0.5~0.8	2~4	—	余量	≤1.5	强度比碳钢高，热处理后硬度高且耐磨，烧结时收缩小，抗大气腐蚀性比碳钢高	受力较大的结构零件，如油泵齿轮、摆线转子、链轮、正时齿轮等
烧结铜钼钢	F0211J F0212J	≤0.4~0.7	4	0.5~1.0	余量	≤1.5	强度高，淬透性好，硬度高，耐磨，热稳定性好	受力大，要求耐磨，或要求有一定热稳定性的重要结构零件，如内燃机活塞环等

表 2-3-16 常用铁基结构材料的物理力学性能

材料	牌号	密度 ≥ (g/cm³)	烧结态① 抗拉强度 ≥ (MPa)	伸长率 ≥ (%)	冲击韧性③ ≥ (J/cm²)	表观硬度 ≥ (HB)	热处理态② 处理方法	抗拉强度 ≥ (MPa)	冲击韧性③ ≥ (J/cm²)	表观硬度 ≥ (HRA)
烧结铁	F001J	6.4	100	3.0	5.0	40				
	F002J	6.8	150	5.0	10.0	50	渗碳淬火	300	750	50
	F003J	7.2	200	7.0	20.0	60		400	1000	55
烧结碳钢	F0101J	6.2	100	1.5	5.0	50				
	F0102J	6.4	150	2.0	10.0	60	渗碳淬火	400	3.0	50
	F0103J	6.8	200	3.0	15.0	70		450	3.0	55
	F0111J	6.4	150	1.0	5.0	60				
	F0112J	6.8	200	1.5	5.0	70	淬火	450	3.0	45
	F0113J	7.2	250	2.0	10.0	80		500	5.0	50
	F0121J	6.4	200	0.5	3.0	70				
	F0122J	6.8	250	0.5	5.0	80	淬火	500	3.0	50
	F0123J	7.2	300	1.0	5.0	90		550	5.0	55
烧结铜钢	F0201J	6.4	250	0.5	3.0	90				
	F0202J	6.8	350	0.5	5.0	100	淬火	550	3.0	55
	F0203J	7.2	500	0.5	5.0	110		650	5.0	60
烧结铜钼钢	F0211J	6.4	400	0.5	5.0	120				
	F0212J	6.8	550	0.5	5.0	130	淬火	550	3.0	55
								700	5.0	65

注：①根据 GB/T14667—1—93。

②根据 JB3593—84，化合碳低于0.4%采用渗碳淬火，渗碳淬火处理：900~930℃气体渗碳，1.5~2h，800~850℃油淬，160~200℃回火。

③无缺口试样。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.3.4 新粉末冶金工艺、技术和材料

为适应汽车的轻量化、低成本化、高输出化、以及安全、节能、环保、舒适等方面的需要，近来出现许多高密度、高强度、高精度及复杂形状的烧结零部件用于汽车工业等，从而促进了新粉末冶金工艺、技术和材料的发展。

2.3.4.1 高强度化

粉末冶金零件材料高强度化的主要途径是：

1）高密度化

为提高烧结材料的密度，常采取的工艺措施有：

①适当提高压制压力，使用压缩性能很好的高纯铁粉，在600MPa压力下一次压制，可制得密度超过7.0g/cm³的材料；

②复压复烧，即采用二次压制和二次烧结，可将残留孔隙减少到10%左右；

③熔渗较低熔点的金属或合金，可使烧结材料的孔隙度降低2%～5%；

④粉末锻造，可将密度提高到7.8g/cm³以上（相对密度达99.6%），当今是高密度、高强度、高韧性粉末冶金材料中最具代表性的致密化方法。

⑤温压新工艺，能使铁基材料高密度化（可达7.3～7.5g/cm³，若经二次压制和烧结后可达7.6g/cm³），密度分布均匀，材料的综合力学性能高。它一次压制的生坯强度高（可达24～27MPa），可直接进行机加工而后烧结，能降低生产成本。它比通常的复压复烧和熔渗铜等工艺的成本低，比粉末锻造的成本更低。用温压生产强度高、形状复杂的汽车零件，如正齿轮、斜齿轮等，以及常规的烧结连杆等。

图2-3-7示粉末锻造件的密度对力学性能的影响。

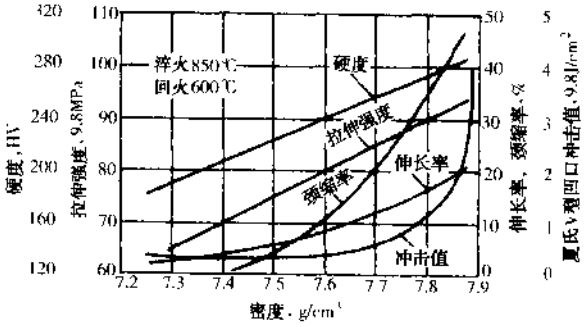


图2-3-7 粉末锻造密度对力学性能的影响

日本丰田汽车公司经过10余年的研究，用烧结锻造制成了连杆，于1981年批量生产，用于当时新设计的1.5L型发动机。

图2-3-8示粉末锻造连杆与传统热锻钢连杆的疲劳特性[3]。图2-3-9示模锻钢连杆与粉末锻造连杆的疲劳强度比较。

2）合金强化

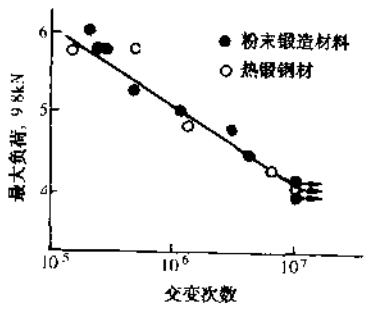


图2-3-8 粉末锻造与传统热锻钢的疲劳特性

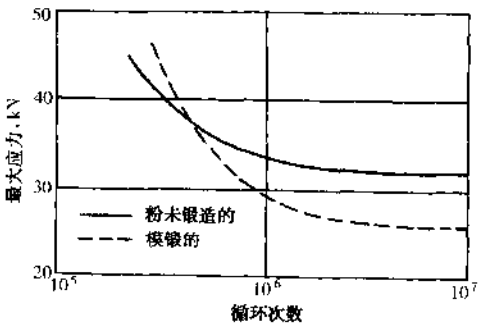


图2-3-9 模锻钢连杆与粉末锻造连杆的疲劳强度比较

汽车论坛 http://www.qclt.com

在密度高于6.5g/cm³以上的烧结铁基结构零件材料中添加适量的合金元素，能显著地提高其力学性能。如粉末冶金动力转向阀体回转部件（Fe-4Ni-0.5Mo-1.5Cu-0.6C，渗碳淬火回火），通过添加Ni、Mo、Cr等合金元素，以1 200~1 300℃的高温烧结，使基体与粉末粒子间的结合得到进一步强化，可获得高达1 000MPa以上的抗拉强度。

合金元素改善提高铁基结构零件材料的力学性能，主要是固溶强化，影响Fe-C平衡图，生成不同的合金相，活化烧结，改善材料的热处理效果等。

3）热处理强化

铁基粉末冶金结构零件通过热处理，能有效地提高强度、耐磨性及韧性等力学性能。

2.3.4.2 多个零件的组合-接合一体化

有的零件或组合件所要求的特性各不相同，有的要求性能高或形状独特，却要在同一零件或组合件上都能得到满足，若按单一的传统工艺技术来解决则非常困难。为使粉末冶金零件适应形状复杂化、材料高级化、功能复合化和轻量小型化的要求，可采用组合-接合一体化技术，将不同种类的材料及不同形状与功能的多个零件复合成一组合件或总成，可大大缩短制造工序。

如发动机凸轮轴，以往都是铸件一体化的凸轮轴。近十几年来，可利用钢管与粉末成形的凸轮、轴颈等分别作为零件来组装，在烧结过程中同时钎焊成为一体化的凸轮轴。与传统的铸造凸轮轴比较，显著提高耐磨性能（凸轮磨损仅为铸件的1/7），并实现了轻量化（约减重25%），降低了生产成本。

丰田汽车公司于1981年率先利用烧结零件与普通零件相结合，制造了形状复杂的新型的烧结接合中空凸轮轴，共由18个零件组成（表2-3-17）。

表2-3-17 凸轮轴的组合零件及其制造过程

零件名称	数量	材料	制造过程	与钢管轴的组合	
				组合法	接合法
钢管轴	1	KM15C	拉拔加工→机械加工	—	—
凸轮片	8	烧结合金 Fe-2.5Cr-0.5P-1Mo-2Cu-5Cr-其它（<2%）	混料→成形→预烧结→机械加工	铆接	烧结扩散接合
燃料泵凸轮片	2				
前轴颈	1	SCM440	锻造→机械加工	压入	铜钎焊
轴颈	5	SCM440	锻造→冷压	压入	铜钎焊
齿轮	1	S48C	锻造→冷压	压入	铜钎焊

关于若干零件的组合-接合一体化的方法见表2-3-18。

表2-3-18 多个零件的组合-接合一体化方法

方法名称	简要说明
①机械接合	可用铆接、打入销子、压配等工艺方法连接成为一体。此法工艺简单、成本低、拆卸方便，对组合零件的材质无限制等。但其接合强度不很高，不能进行渗碳-淬火
②焊接	对密度≥7.0g/cm³的烧结零件材料，可用电弧焊、电子束焊、激光焊等方法；对密度≤6.9g/cm³者可用电阻凸焊、摩擦焊等方法。关键在于合理选择材料、焊法
③组合烧结接合	①可用过盈烧结法，将二个含铜量高低不同的压坯在烧结过程中产生的膨胀和收缩，使之接合为一体；②用熔渗烧结法，利用溢出的铜将二个压坯烧结成为一体；③钎焊烧结法，如用一种Ni-Cu-Mn钢焊合金粉焊料，将粉冶铁基材料接为一体
④镶嵌模制法	如发动机气门摇臂的主体材料为压铸铝合金件，在其摩擦部位用高耐磨性的烧结高速铜或合金工具钢镶块，置于压铸模内，将此镶块镶嵌于气门摇臂一端的工作面上（图2-3-10）
⑤粘结法	利用高结合强度的粘结剂（如环氧树脂、厌氧胶或聚丙烯胶等）将粉末冶金零件粘结在一起，构成一形状复杂的组合件。粘结前，粉末冶金零件的表面必须干净和孔隙中无任何污染物质。若在粘结前，对粉末冶金件进行蒸汽处理，可增高粉冶件的密度和接合面的剪切强度

汽车论坛 http://www.qclt.com

通过将烧结材料与异种材料镶嵌，而达到功能复合化的例子如图 2-3-10 所示。在压铸铝合金气门摇臂一端摩擦部位上，镶嵌一烧结高速钢或烧结合金工具钢耐磨块，从而制成了烧结钢-铝合金复合摇臂，达到提高耐磨性与轻量化的要求。

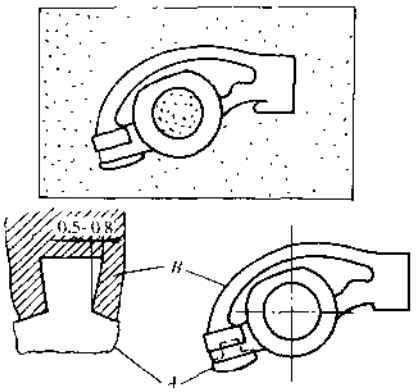


图 2-3-10 铝合金气门摇臂镶嵌烧结合金耐磨块
A-烧结合金钢（Fe-16Cr-4Mo-2.2C），密度 7.6g/cm³；B-摇臂主体为压铸的铝合金（ADC12）。

2.3.4.3 高密度、复杂形状零件成形和快速烧结的新工艺技术

1）温压工艺（Warm-Compaction Process，WCP）

WCP 是 1994 年出现在美国的新工艺技术。温压工艺采用热粉末和热模具，将添加有聚合物的新型润滑剂的铁基粉末加热至 150℃左右，通过一次压制和烧结，能使零件材料密度高达 7.4g/cm³，并密度分布均匀。由于温压的压坯强度高，此压坯可直接进行切削加工。经二次压制和烧结后，则材料密度可高达 7.6g/cm³。因此，它既能显著地提高粉末冶金结构零件的物理-力学性能，又能经济的制造形状复杂的烧结零件。如过去有些用粉末锻造生产的齿轮，改用温压工艺生产后的成本约降低 25%。温压工艺的关键技术是：①预混合粉末；②温压系统。温压工艺所具特点和应用前景见表 2-3-19。

表 2-3-19 温压工艺的特点和应用前景

主要特点	应用前景
①仅需一次压制和烧结，比复压复烧及渗铜等工艺的生产成本低，比粉末锻造更低； ②压制出的生坯强度高，可直接进行机加工而后烧结，能降低成本； ③压制压力和脱模压力比常规粉末冶金法低，利于成形复杂形状零件和延长模具使用寿命，从而降低了生产成本； ④可生产零件质量为 0.1～1kg 以上，生产率为 10 件/min，形状复杂性由一个台阶的正齿轮到多台阶的内、外齿形和斜齿轮； ⑤力学性能高，其极限抗拉强度比常规的一次压制和烧结零件材料平均提高 13.5%，若再经复压复烧，其极限强度比常规的复压复烧提高约 8.5%。在相同压制压力下，它可增高烧结材料的伸长率及宏观硬度，对同种合金材料，它的冲击韧性亦增高	由于它生产的零件材料密度高、强度高，可与传统铸、锻、轧件相竞争，适用于制造高强度的汽车结构零件，诸如发动机和变速器等传动齿轮、链轮及连杆等。预计发动机连杆也正由用粉末锻造法制造趋向用温压工艺技术制造，一次压制和烧结，更为经济合理 1996 年，美国已有 30 多种零部件采用温压工艺生产，其中有福特汽车公司的汽车传动系采用 1.2kg 液压变速涡轮毂。预计在 21 世纪初叶，将在全球推广应用

2）粉末注射成形（Powder Injection Moulding，PIM）

粉末注射成形具有塑料注射成形与粉末冶金的特点，适合于大批量生产形状复杂的三维零件和高密度、高性能的粉末冶金零件，生坯密度均匀，烧结收缩各向同性。与精密铸造相似，但它的精度高和表面粗糙度低，可不需后续加工。PIM 进入 90 年代后，新开发的粘结剂使脱脂和烧结的连续生产得以实现，从而走向产业化生产。

PIM 工艺技术的关键是，选择合适的金属粉末和粘结剂，以及模具的设计制造。

PIM 的基本工艺过程：首先将金属粉末与粘结剂均匀混合形成注射料，然后将注射料在注射成形机上注射成形，最后经过脱脂和烧结，以获得全致密或接近全致密的、最终形状及尺寸精度的零件。PIM 的主要特点和应用范围见表 2-3-20。

3）激光烧结技术

激光是一种具有高能量密度、高方向性和良好单色性的高能粒子束。激光早已用于材料加工，如热处理、切削、焊接及表面改性等。以激光束为热源，可将粉末压坯直接烧结成粉末冶金制品。在烧结速度方

汽车论坛 http://www.qclt.com

面，与已有的电火花烧结类似，均属快速烧结技术。激光烧结的主要特点和应用前景见表2-3-21。

表2-3-20 粉末注射成形工艺的主要特点和应用范围

主要特点	应用范围
①可对形状复杂的零件进行整体成形，从而提高了设计的灵活性，如对三维曲面、锋利的刃口、反向锥度、齿轮、薄壁件（厚度可达0.5mm）等粉末冶金零件与难以用精铸法生产的零件，采用PIM工艺均易成形； ②烧结密度高（相对密度达95%以上），力学性能和耐腐蚀性能优良。因为它使用的金属粉末（粒度<20μm）比常规粉末冶金者细小，故烧结性好，能制得高密度的烧结零件，其显微组织细小均匀及孔隙小； ③尺寸精度高，适于制作精密零件。虽其收缩率可达15%，但由于烧结时脱除粘结剂结果导致收缩各向同性，故烧结零件的尺寸精度却很高，约为±0.5%（制件为±0.3%），相当IT12级的尺寸公差； ④选材的灵活性大，能达到材质选择的多样化要求； ⑤比其它加工方法的成本低，且工序简单	可用于许多种金属和合金，诸如低合金钢、不锈钢、硬质合金、金属陶瓷、氧化铝、镍基合金、钴基合金、高密度合金、磁性材料元器件（如生产磁性能更佳的粘结磁体等），尤其适于金属陶瓷、难熔金属及硬质合金等的形状复杂件的成形。 现以美、日及西欧为中心，已开始在全球推广应用这项新工艺技术，使它作为21世纪粉末冶金的成形加工方法

表2-3-21 激光烧结技术的主要特点和应用前景

主要特点	应用前景
①烧结周期短，变形小，细化组织。例如发动机气门座及齿轮等，用CO_2横流激光； ②进行烧结，与常规烧结工艺相比，它能使粉末冶金零件的密度和收缩比显著提高。由于普通烧结零件一般含有10%～20%的孔隙度，相对致密金属，它能有效地吸收激光能量，使烧结体快速升温。并其中有很大部分孔隙与其表面相通，使压坏的烧结从表面开始逐步向深处发展； ③激光辐射烧结的温度，比常规烧结的高，有利于烧结体实现液相烧结，可加速其致密化，使烧结体获得高密度，故其力学性能优于常规烧结制品	激光烧结技术将是21世纪前期推广应用的快速烧结方法，并将使传统烧结工艺变革为台式制造工艺。可将计算机辅助设计直接变成“未精加工”的零件或模具，从而大幅度降低生产成本，并能经济地生产短周期零件

2.3.4.4 汽车用轻量化、无公害、高性能粉末冶金新材料

1）粉末冶金铝基零件材料

采用密度轻的粉末冶金轻金属（如铝、镁、钛、铍及合金等）材料制造零件，能使汽车显著轻量化。目前应用最广泛的是铝基粉末冶金材料零件，因其比强度高、质量轻、耐腐蚀、优良的表面处理性能和价格相对比其它轻金属的低，故在航空航天、办公器械、日用器具、传统的家用电器和汽车等领域中获得广泛应用。氮基气氛中烧结的粉冶铝合金的物理—力学性能见表2-3-22。

热处理对粉末冶金铝合金的性能有很大影响，具体见表2-3-23。

将熔融的铝合金进行雾化，使之快速冷凝为粉末，经粉末挤压法、粉末锻造法制造的高硅铝合金材料的显微组织比铸造高硅铝合金件的组织致密、均匀，力学性能优良（如低热膨胀、高耐磨性、高强度等）。现已用于汽车零部件，如气门弹簧座、压缩机叶片泵叶片等。

在铝合金中添加适量的过渡元素及稀土元素，现可制得非晶形或10nm左右的微晶结构的纳米材料，其抗拉强度高达1400MPa。

2）无石棉半金属摩擦材料

表 2-3-22 氮气烧结的粉末冶金铝合金的典型性能

合金	压制压力(MPa)	生坯密度 (%)	生坯密度 (g/cm³)	生坯强度 (MPa)	烧结密度 (%)	烧结密度 (g/cm³)	同火	抗拉强度[1] (MPa)	屈服强度[1] (MPa)	伸长率 (%)	硬度
601AB (Al-0.25Cu-1.0Mg-0.6Si)	96	85	2.29	3.1	91.1	2.45	T1	110	48	6	55～56HRH
							T4	141	96	5	80～85 HRH
							T6	183	176	1	70～75 HRE
	165	90	2.42	6.55	93.7	2.52	T1	139	88	5	60～65 HRH
							T4	172	114	5	80～85 HRH
							T6	232	224	2	75～80 HRE
	345	95	2.55	10.4	96.0	2.58	T1	145	94	6	65～70HRH
							T4	176	117	6	85～90HRH
							T6	238	230	2	80～85HRE
602AB (Al-0.6Mg-0.4Si)	165	90	2.42	6.55	93.0	2.55	T1	121	59	9	55～60HRH
							T4	121	62	7	65～70HRH
							T6	179	169	2	55～60HRE
	345	95	2.55	10.4	96.0	2.58	T1	131	62	9	55～60HRH
							T4	134	65	10	70～75HRH
							T6	186	172	3	65～70HRE
201AB (Al-4.4Cu-0.5Mg-0.8Si)	110	85	2.36	4.2	91.0	2.53	T1	169	145	2	60～65HRE
							T4	210	179	3	70～75HRE
							T6	248	248	0	80～85HRE
	180	90	2.50	8.3	92.9	2.58	T1	201	170	3	70～75HRE
							T4	245	205	3.5	75～80HRE
							T6	323	322	0.5	85～90HRE
	413	95	2.64	13.8	97.0	2.70	T1	209	181	3	70～75HRE
							T4	262	214	5	80～85HRE
							T6	332	327	2	90～95HRE
202AB：压坯 (Al-4.0Cu)	180	90	2.49	5.4	92.4	2.56	T1	160	75	10	55～60HRH
							T4	194	119	8	70～75HRH
							T6	227	147	7.3	45～50HRE
202AB：冷成形零件（19%应变）(Al-4.0Cu)	180	90	2.49	5.4	92.4	2.56	T2	238	216	2.3	80HRE
							T4	236	148	8	70HRE
							T6	274	173	8.7	85HRE
							T8	280	250	3	87HRE

①拉伸性能是用在氮气中于620℃下烧结15min的、扁平的粉末冶金拉伸试棒（MPIF标准10-63）测定的。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-3-23 热 处 理 工 艺

回 火	说 明
O	于 413℃ 下退火 1h，以 30℃/h 左右的最高速率炉冷到 260℃或以下
T1	在氮气中，从烧结温度冷却到 425℃（601AB 与 602AB）或 260℃（201AB），空气冷却到室温
T4	在空气中，于 520℃（601AB 与 602AB）或 505℃（210AB）下热处理 30min，冷水淬火，和在室温下至少时效 4 天
T6	在空气中，于 520℃（601AB 与 602AB）或 505℃（210AB）下热处理 30min，冷水淬火，和于 160℃下时效 18h

由于石棉的热衰退性大，并足强致癌物质之一，故从 20 世纪 70 年代中期以来，人们强烈要求限制和禁止使用。半金属摩擦材料的主要性能见表 2-3-24。

表 2-3-24 半金属摩擦材料的主要性能

材料	国 家	摩擦系数（μ）					磨损率（$\times10^{-7}cm^3/N\cdot m$）					冲击强度 a_k（J/cm^2）	硬度（HB）
		100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃		
半金属	德国 Audi100	0.41	0.41	0.35	0.38	0.43	0.238	0.114	0.183	0.201	0.314		
半金属	德国桑塔纳	0.38	0.43	0.44	0.44	0.36	0.054	0.073	0.411	0.693	0.644		
半金属	我国新研制	0.40	0.43	0.44	0.43	0.39	0.150	0.277	0.342	0.365	0.163	6.1	244

3）高性能磁性材料

以微型计算机和传感器为基础的汽车电子控制技术，促进了整车综合性能的显著提高与汽车技术的发展。它可满足当今世界对汽车安全、能耗及环保方面日益严格的要求，从而在全球汽车上获得广泛应用。

电子技术需大量应用高性能磁性材料制造敏感元器件，现国外汽车中已有许多部位上采用，其中主要用于汽车电机、执行器和传感器。由于磁性材料是一般较难加工的材料，是发挥粉末冶金法无切削、少切削工艺等特点的领域，并具有独特和优良的磁性能，且工艺简化和成本低。

至 1995 年，有美国和中国等少数国家已采用快淬-粘接法批量生产高性能 Nd-Fe-B 磁体，我国生产的永磁稀土粘接磁体的特性，见表 2-3-25。

表 2-3-25 我国生产的永磁稀土粘接磁体的特性

种 类	剩磁 Br（T）	磁感矫顽力 $_{M}H_c$（kA/m）	最大磁能积 BHmax（kJ/m^3）	可逆温度系数（%/℃）	使用温度（℃）
粘接 $SmCo_5$	≥0.6	≥358	48～64	-0.04	120
粘接 Ce（$CoCuFe)_5$	≥0.4	≥238	28～32	0.09	120
粘接 Sm_2（$CoCuFeZr)_{17}$	≥0.7	≥398	64～80	0.04	150
粘接 NdFeB（HDDR 法）	≥0.5	≥318	40～48	-0.13	100
粘接 NdFeB（快淬法）	≥0.7	≥398	64～80	0.13	120

4）其它新材料、新技术

随着对汽车性能的不断提高，需相应开发耐热、耐磨、耐蚀的新粉末冶金材料，如金属间化合物材料（TiAl、Al_3Ti、Ni_3Al、Nb_3Al 等），作为 21 世纪轻量化超高温材料。因其晶体结构复杂，既硬又脆，于较高熔点下的组成范围狭窄，故很难进行熔炼、铸造和塑性加工，其制造工艺需用新的粉末冶金技术，诸如快速冷凝、自蔓燃高温合成、机械化合金、热等静压、热压、注射成形、温压工艺、电火花及激光烧结、粉末挤压、粉末锻造等。（撰稿人：李绍忠）

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.4 热 处 理

2.4.1 概述

整备质量4t载货汽车上需热处理的零件有0.84t、约占22%，越野汽车热处理件所占比例更大，约为汽车整备质量的25%，轿车则相对低一些。上述比例并未计入：钢厂对原材料的退火处理；部分零部件厂生产的零件，如齿轮毂、活塞、活塞环的热处理以及由市场供应的普通标准件、轴承的热处理。图2-4-1是汽车零件热处理工艺内容。

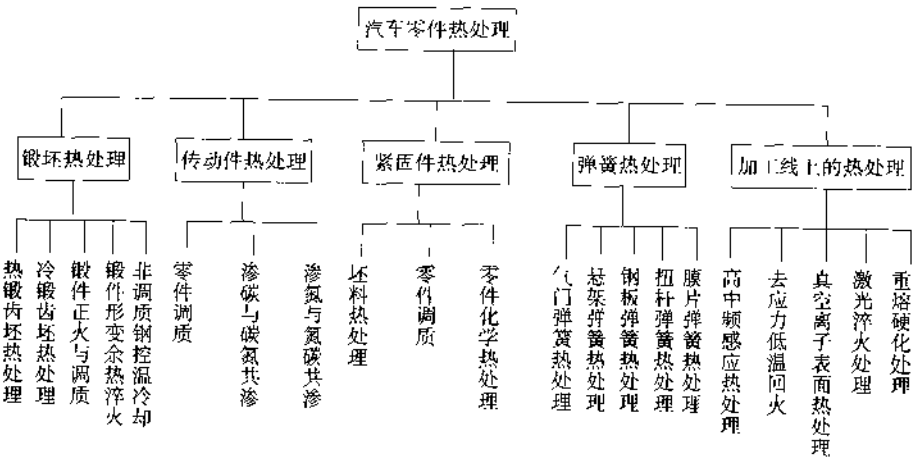


图2-4-1 汽车零件热处理工艺内容

图2-4-1将汽车热处理分成五大类，其中生产规模最大的是锻坯热处理，工艺最复杂、质量控制最严的是传动件热处理。铸坯和粉末冶金件热处理分别由铸造和粉末冶金叙述。由于篇幅所限，略去了弹簧热处理，加工线上的热处理只讨论高中频感应热处理。

2.4.2 锻坯热处理

汽车锻件是用来制造承受或传递较大载荷的零件，往往需经过机械加工。所以，除变速操纵杆、转向纵拉杆等少数零件外，锻坯均需经过毛坯热处理。一辆整备质量4t载货汽车中，需经毛坯热处理的锻件约有510kg。这些锻件按其材料和热处理工艺分为三类：第一类低合金渗碳钢（也含少量低合金中碳钢），用于汽车齿轮、齿轴和十字轴等渗碳件，其锻坯需经正火或等温退火等热处理，见表2-4-1。第二类碳钢和低合金中碳钢锻坯，如曲轴、凸轮轴、半轴、拖曳钩等，采用正火或正火加高温回火处理，见表2-4-2。第三类中碳及低合金中碳钢锻坯，如前轴、各种臂类、转向节等，采用调质处理，见表2-4-3。这三类毛坯热处理工艺中，第一、二类约占锻件热处理总数（按质量计）的2/3；第三类（调质）约占总数的1/3。

2.4.2.1 热锻齿坯的热处理

齿轮毛坯是通过热锻、热镦、温锻或冷锻成形的，这些齿坯均需经过预处理，其目的是：

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-4-1 齿轮锻坯热处理工艺

钢号	零件	零件质量 (kg)	热处理温度 (℃) 加热	等温	回火	硬度要求 (HB)
20CrMnTi	载货车齿轮，齿轴	1～25	960±10			156～207
18XГТ*	十字轴、齿轮	0.2～2.4	940±10	640±20		156～207
20MnVBH	载货车后桥齿轮	1～25	920±10			156～207
16MnCr5*	输入轴、差速器齿轮	0.2～3	950±10	620±10		160～195
	齿套、从动齿圈		930±10			152～201
20MnCr5*	输入轴、输出轴、齿轮	0.3～3	950±10	～650		175～204
20MnCr5*	输入轴、输出轴	2～3	盐炉 900	盐炉 500		176～208
23Cr4*	换档轴	0.4	锻热	520		160～195
25Cr4*	换档齿轮	0.2～1	锻热	550		175～210
28Cr4*	换档齿轮及齿套	0.2～1	锻热	600		178～214
SCr420H*	后桥及变速器齿轮	0.3～3	950±10			156～207
SCM420H*	载货车齿轮	0.5～8	950	650		162～181
SCM420*	冷锻齿坯二段正火	1.4～3	930	缓冷到 250		163～187
20CrNi3	主、被动锥齿轮	7～9	930±10		670	170～241
		17.1	870±15	680±15		192～241
SCM822H*	重型车后桥齿轮	2～25	950	650		149～197
			950		690±10	149～197
8620*	中、重型载货车齿轮	5～6	930±10			160～197
19CN5*	中间轴、1～4 档盘齿	2～5	960	590±10		152～187
14CN5*	盘齿	1～3	960	580		152～165
12CrNi3	齿轮、越野车半轴	1～15	880±10		670±15	156～229
4320*	伞齿轮	0.5	950	600		137～187
35CrMo	轿车齿轮	0.3～2	930	650		163～217
SCM420*	齿坯冷锻前球化退火	1.4～3	750	700		75～85HRB
40Cr	吉普车变速器齿轮	0.3～3	850±10			187～241

*国外钢号，其对应的国内钢号参见表 2-4-16。

（1）保证良好的切削性能，通过预处理获得均匀的、等轴状晶粒的铁素体-珠光体混合组织，不允许有粒状贝氏体组织，硬度应控制在 156～207HB 范围内。同一批轿车齿坯的硬度散差应控制在 25HB 范围以内，如有的厂规定：需内孔拉花键的齿坯为 160～180HB，而一般齿轮为 170～190HB。

（2）通过预处理获得均匀一致的组织，为齿轮加工后最终热处理作好组织准备。避免渗碳淬火时发生不规则变形，降低使用中运动噪声，提高齿轮的疲劳寿命。

齿坯预处理通常采用正火和等温退火（等温退火又称等温正火）。目前国内齿坯所用材料约 70% 是

20CrMnTi钢，普遍采用正火处理。

正火是将锻坯加热到高温 Ac3+（60～150）℃奥氏体化后在空气中连续冷却过程中完成相变的，由于成堆冷却时各个齿坯冷却速度不同而出现组织差异、冷却过快会出现粒状贝氏体、这种组织不利于切削加工和使最终热处理变形难以控制。冷却过慢会使齿坯铁素体过多，硬度低，在切削过程中产生粘刀并使表面粗糙度上升。

表 2-4-2 碳钢及合金钢锻坯的正火或正火＋回火处理的实例

钢号	零件	零件质量(kg)	热处理规范			硬度要求(HB)
			加热温度(℃)	冷却	回火温度(℃)	
20	法兰、衬套	1.0～1.1	910±10	风冷		126～156
30	控制臂、制动臂	3.25	890±10	风冷		137～179
35	左/右前拖钩、后吊环、拉臂	0.3～1.7	890±10	风冷		149～179
40	踏板臂、套管叉、拉杆臂	0.6～6.6	870±10	风冷		156～217
45	曲轴、起动爪、凸轮轴、凸缘、焊接叉、凸缘叉、拖曳钩、前吊环、左/右接头、制动蹄片轴、制动凸轮、后制动蹄片臂-驻车制动器、拉杆臂、小曲轴、连动杆、后制动蹄片-驻车制动器变速杆、油封圈	0.5～53.4	880～900	风冷		163～197
20Cr	十字轴、扇形齿轮、转向螺母	0.9～6.7	890±10	风冷		146～207
40Cr	凸缘、花键轴、后半轴	1.6～10.8	880～900	风冷		187～241
40MnB	齿座、驱动轴、啮合套	1～9.1	860±10	风冷		179～229
40MnB	半轴	20.1	880～900	风冷		187～241
45Cr	花键轴	4.1	880～900	风冷		187～241
12Cr2Ni4	左/右前半轴、外半轴	8～15	875±10	风冷	670±20	156～229

表 2-4-3 中碳钢及低合金中碳钢锻坯调质处理

钢号	零件	零件质量(kg)	热处理规范				硬度要求(HB)
			淬火		回火		
			加热温度(℃)	冷却介质	温度(℃)	冷却介质	
35	球头座	0.2	820～840	水	570～610	风冷	207～241
40	小连杆	0.42	820～840	水	625±15	风冷	207～241
45	正时齿轮、万向节、花键盘、从动臂	1.5～1.2	800～830	水	605±15	风冷	241～285
45	前轴、轴	3～59	840～850	水	590±15	风冷	241～285
45	凸缘叉、凸缘、正时齿轮、焊接叉	1.1～2	800～840	热水	630±20	风冷	207～241
45	万向节叉	0.83	810～850	水	620±20	风冷	217～279

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	零件	零件质量(kg)	热处理规范				硬度要求(HB)
			淬火		回火		
			加热温度(℃)	冷却介质	温度(℃)	冷却介质	
55	连杆及盖	2.3	余热淬火	油	620～720	水冷	229～269
40CrH	滑动叉	3.15	800～840	热水	630±20	水冷	207～241
40CrH	花键轴、左/右转向节	2～5.3	860～870	热水或油	610±20	水冷	241～285
40MnBH	盘毂、花键轴	0.9～4.7	860～880	油	585±15	水冷	255～285
40MnBH	左/右转向节臂、转向中间臂	1.1	860～870	油	590±20	水	241～285
40MnBH	转向节、左/右转向节臂、转向摇臂	1～5.1	810～840	热水	590±20	水	241～285
42CrMnS	后轮毂轴	1.42	820～840	油	655±15	水	255～302
42CrMo	转向节、前轴	36.8～90	830±15	油	640±20	水	
45Mn2	U形螺栓	0.9～2.4	860～870	油	655±15	水	207～285
40MnS	连杆		余热淬火	油	635～710	风冷	229～269
40MnBH	转向垂臂等9种零件		余热淬火	油	630±10		241～293
S38C	连杆		余热淬火	油	650		197～241
45Mn	轮毂		余热淬火	油	650		224～255

等温退火是将锻坯加热到Ac3+（60～150)℃奥氏体化后迅速冷却到珠光体转变区内等温，直到相变完成后再自由空冷。等温退火要保证奥氏体化温度外还要特别注意：a. 在规定时间内，从奥氏体冷却到等温温度（珠光体转变温度)；b. 选择合适的等温温度、等温足够的时间、保证相变在等温中完成。

齿坯正火加热温度为Ac3+(60～150)℃，比一般资料介绍Ac3+(30～50)℃高的多。齿坯加工后还要经过渗碳或碳氮共渗处理，这类齿坯的正火，应取正火上限温度加热。一般高于渗碳温度进行，使奥氏体晶粒略微粗化，在随后的冷却完毕后取得尺寸较大的块状铁素体加层片状珠光体组织，以便于切削加工。此外，加热温度高有利于加快奥氏体均匀化，从而节省加热时间，提高生产效率。

国内汽车上常用的渗碳齿轮钢、结构钢的临界点参见表2-4-16。

大量生产的齿轮毛坯处理普遍采用连续式推杆炉，它有空料盘的返回引起热效率低和劳动强度大的缺点。铸链炉和链板炉也开始采用，它适用于单件质量小于8kg的锻坯，这种炉子易于实现自动装料，可大大减轻劳动强度，有的厂还用辊底式和震底式炉，可明显节能。

图2-4-2是某厂生产的等温正火线的平面布置图。该线生产能力为400kg/h，加热功率为360kW，加热温度可达980～1000℃，料盘尺寸为650mm×440mm。

该线由推杆式加热炉、速冷室和推杆式等温炉组成，全线的控制系统使用计算机。可根据钢的化学成分提供有关工艺参数和解答处理生产中可能出现的工艺、质量问题。

该线的最关键部分是速冷室及其冷却控制系统，它能保证该工艺所要求的冷却速度前提下，最大限度地改善工件的冷却均匀性，从而保证工件的最终组织和硬度的均匀性。通过调整冷却速度的快慢，在一定范围内调整工件的最终硬度。冷却控制系统和速冷室的工作原理见图2-4-3。

汽车论坛 http://www.qclt.com

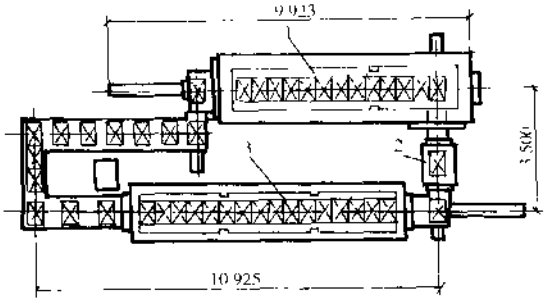


图 2-4-2 等温正火线平面布置图
1-加热炉；2-速冷室；3-等温炉

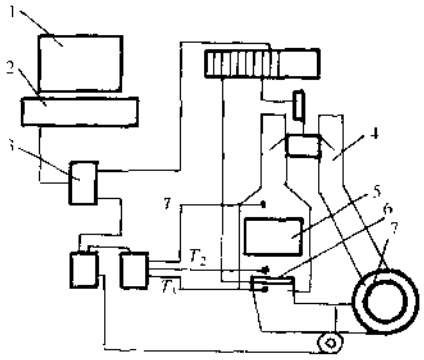


图 2-4-3 等温正火线的冷却控制系统和冷却室工作原理
1-显示器；2-计算机；3-通信板；4-自动排风筒；5-速冷室；6-加热器；7-鼓风机

多工位热锻线生产的齿坯终锻温度稳定，适合于形变余热热处理。某厂已自制了一条等温退火自动线，可实现余热等温退火，其生产能力为 4 000kg/h，也可进行重新加热的等温退火处理。该线采用链板式加热炉和辊底式等温炉。经余热等温退火的锻坯晶粒较大，常常是 3 级。理论研究和生产实践都已证明：粗晶粒锻坯易加工，而且在随后的渗碳淬火时仍可细化，对齿轮使用寿命并无不良影响。

2.4.2.2 冷锻齿坯热处理

冷锻是在常温下对金属进行挤压，靠塑性变形形成齿坯。冷锻成形要求坯料塑性良好，所以需球化退火处理。以微型车三联齿为例说明齿坯冷锻成形的生产工艺过程：棒料切断→前处理（减摩磷化和涂油）→冷锻 1→冷锻 2→退火→前处理（减摩磷化和涂油）→冷锻 3→冷锻 4→正火→抛丸处理。

SCr420 钢坯料经球化退火后硬度为 65～85HRB。锻坯正火后的硬度要求为 149～201HB。球化退火工艺是在 Ac1＋(20～30)℃加热后以 20～50℃/h 缓冷或在 Ac1－(20～30)℃较长时间保温后缓冷。有的工厂采用等温球化退火，如 SCM420H 钢的轿车变速器主轴、输入轴及双联齿轮，采用真空罩式炉进行球化退火，用 99.9%纯度的氮气和吸热式保护气作保护，退火后硬度要求为 75～85HRB。硬度高低决定于钢中碳和合金的含量。

齿坯形状复杂，有时需多次冷锻，为了改善冷锻性能，需在冷锻工序间进行工序退火，或称再结晶退火，以消除加工硬化现象。因为此时的钢坯已经球化，不用再球化退火。再结晶退火的加热温度较低，可选择在再结晶温度以上 100～200℃，低碳或低合金渗碳钢齿坯一般可选在 650～700℃，保温时间 1～3h，空冷或炉冷到 550℃后出炉空冷。

齿坯冷锻成形后必须进行一次正火，因为球化退火后过分软而“粘刀”、高速切削时形成很长的切屑、散热条件差，从而降低了切削速度和工具寿命，工件表面质量也差。冷锻齿坯正火加热温度为 Ac3＋(60～120)℃。有的厂采用二段正火，它是在正火缓冷到 250℃后改为快冷的工艺。这种工艺所用设备比等温退火设备简单、节能、可比普通正火取得较均匀的冷却。SCM420 钢锻坯二段正火后硬度要求为 163～187HB。

2.4.2.3 汽车锻件的正火和调质处理

绝大多数锻坯均需正火或调质处理，当最终产品的硬度要求低于 285HB（30HRC）时可在锻造车间进行锻坯的调质热处理，而硬度要求大于 285HB 的锻坯应在锻造车间进行正火，然后在机加工后再进行调

汽车论坛 http://www.qclt.com

质处理，如半轴、拖钩、二轴、起动爪等。

对于力学性能要求较低的低、中碳钢零件，正火可以作为最终热处理。如左/右前拖钩、拉杆臂、后制动蹄片臂—驻车制动器、前后吊环、左/右接头等零件的使用硬度低于197HB，均采用中碳钢制造，它们所受工作负荷或承受载荷不高，加工后就不再进行热处理了。

中碳钢锻坯在正火后的硬度低于197HB，中碳合金钢锻坯的正火硬度是低于241HB。根据锻坯的材料和硬度要求，就能确定锻坯是应正火还是调质处理，从而制定锻坯的预先热处理工艺。如果锻坯正火是作为最终处理时应采用较低温度来正火，以使取得较细的组织，从而提高使用性能。对于正火后尚需感应淬火的零件，一般正火加热温度也应取下限，其目的是取得较细的组织以便于高频加热时合金元素或碳化物迅速溶解，可也减轻感应加热时的热应力，从而减轻淬火变形。表2-4-2中所列的加热温度是几个工厂各种车型的实例，它所用的炉型、生产习惯均不相同，不能用表中实例解释上述观点。

正火的加热速度可以较快，所以连续炉的Ⅰ、Ⅱ区温度（指加热温度）高于Ⅲ区温度（保温温度），正火保温时间一般按零件厚度25mm/h计算，实际生产中多数保温1～1.5h。冷却速度将显著影响珠光体量和珠光体片层的大小和间距，应据工件本身形状、尺寸、数量和正火硬度要求来确定风量风速以达到产品的技术要求。

有些合金钢，正火也能使钢件产生部分淬火组织。因此必须将正火后锻坯再进行高温回火，以得到156～229HB之间的硬度，从而保证能正常切削加工，见表2-4-2。

正火还有些特例：40MnB钢棒制造的载货汽车半轴，只在棒的一端加热并镦粗成凸缘。凸缘部分经热镦而成细晶粒组织，而邻近凸缘部分也经过高温加热但未经形变，所以是粗晶粒组织，再在靠近冷端是700℃区域、呈球状组织，其余部分是钢的原始组织，所以半轴锻坯呈4种组织。随后的校正时粗晶粒区就会因校正量过大而断裂，而球状碳化物在感应加热时不易溶解，此外4种组织的切削性能是不同的，给机加工也带来困难。所以，这类半轴应锻后正火，取得均匀的片状珠光体组织后才能正常进行上述几道后续工序。

调质是由淬火和高温回火两道工序组成的热处理工序。调质后得到索氏体组织，它的抗拉强度（σ_b）要比正火后珠光体组织的抗拉强度高30%以上，索氏体组织不但强度高，而且屈服强度、冲击韧性也很好。因此中碳钢和中碳合金钢调质处理后可以获得优良的综合性能。

和正火、球化退火、等温退火不同，锻件调质处理常常是最终热处理。如连杆、滑动叉、U形螺栓、前轴、转向节臂、转向臂、小连杆等零件。这些零件机加工后不再热处理。其它一些零件如：后拖钩、凸缘、左/右转向节、花键轴-中间轴等在机加工后要进行感应淬火，而且索氏体组织比珠光体组织更易加热奥氏体化，因而有利于减少感应淬火变形。

淬火，亚共析钢锻坯的淬火加热温度应是Ac3 +（30～50）℃。钢的过热倾向愈少，零件的截面尺寸愈大则可取较高加热温度。钢件加热时间决定于锻坯的截面有效厚度：每毫米有效厚度的加热保温时间：在辐射炉中碳钢为1min，合金钢为1.5min。在盐浴炉加热时分别为0.5min和1min。汽车锻件通常在连续式炉内加热，其保温时间约为0.6～1h（表2-4-3中的汽车零件）。中碳钢锻坯的淬火介质通常用水，而中碳合金钢锻坯通常在40～80℃的油或40～55℃的热水中淬火。淬火后锻坯得到针状马氏体组织。

回火的温度应据零件的硬度要求而定：通常是600～650℃。连续炉内回火保温时间一般为1～1.5h，煤气加热炉内回火总时间约为2～3h。中碳钢锻坯在回火后风冷，而合金钢锻坯则应水冷。因为Cr-Ni、Cr-Mn钢等合金钢锻坯在高温回火后缓冷将出现回火脆性，使零件冲击韧性大大下降。合金钢零件应避免在260～315℃回火，以防冲击韧性猛烈降低。

2.4.2.4 锻件的形变余热淬火

利用锻造余热淬火，不仅可以简化工艺、节能，而且还可提高锻件的力学性能。因此，在汽车行业中不少用中碳或低合金中碳钢制造的调质处理件已改用锻造余热淬火，应用最多的是曲轴、连杆、驱动轴、万向节叉、悬架弹簧、钢板弹簧、转向节臂、转向垂臂、套筒联轴节及前梁等汽车零件。常用材料是：

汽车论坛 http://www.qclt.com

40MnB3H、40MnS、40Cr、55钢等。图2-4-4是90年代建成的连杆锻压生产线的平面布置图

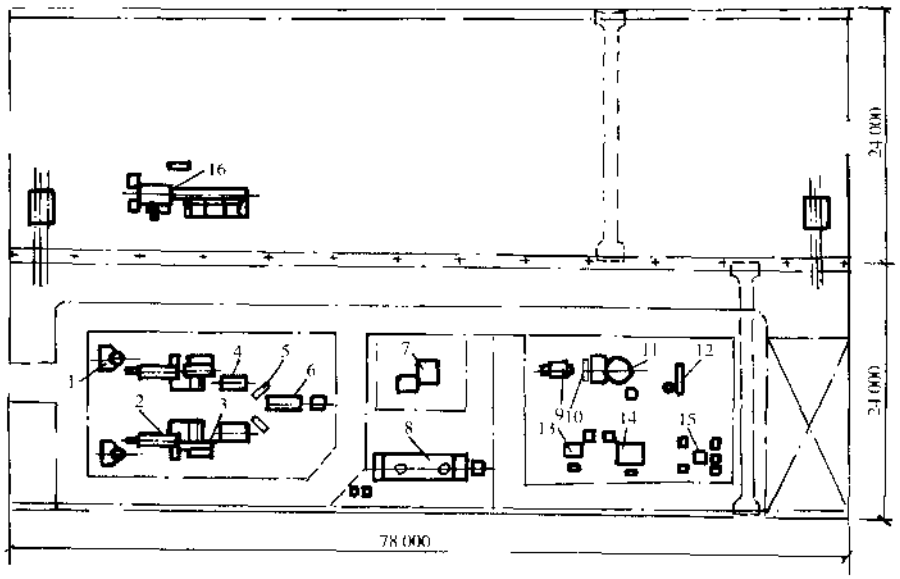


图2-4-4 连杆锻压生产线

1-上料机；2-中频加热装置；3-辊锻机；4-液压模锻锤；5-偏心压力机；6-淬火油槽；7-强力抛丸机；8-连续式回火炉；9-硬度分选机；10-校正工作台；11-探伤机；12-抛光机；13-螺杆压床；14-螺料压床；15-检验台；16-精密剪切机

该线生产轿车、轻型车用发动机连杆和连杆盖。材料为40MnS钢，锻造精度高，连杆的大、小头质量偏差控制极为严格。工艺过程如下：

下料（棒料精密剪切机）→加热（中频感应加热装置）→制坯（辊锻机）→模锻（液压锤）→热切边（开式偏心压力机）→余热淬火（淬火机）→回火（链板输送带式回火炉）→强力抛丸→检测（硬度）→校正→探伤→终检。

表2-4-3中还列入了载货汽车上的左/右转向节臂、转向垂臂、轿车上的连杆和轮毂的锻造余热淬火的工艺。有的载货汽车连杆原采用55钢或40Cr钢锻后余热淬火，其回火后硬度为229～269HB，现已改用35MnVS非调质钢锻后控温冷却处理。

2.4.2.5 非调质钢控温冷却

经微合金化（常用V、Nb等）的中碳锰钢或高碳钢可在停锻后保持较小的奥氏体晶粒再经控温冷却，使碳化物弥散析出或数量增多而达到沉淀强化作用，使之达到中碳钢调质处理后所具备的力学性能，这种钢称非调质钢，其锻后应控制冷却速度称控温冷却。目前汽车上的非调质钢多属于珠光体型非调质钢，已应用于曲轴、连杆、前轮毂、万向节叉、滑动叉、花键轴、前梁、转向节、凸缘和凸缘叉等零件。由于它大量节能，简化生产工艺（取消调质、探伤、减少硬度检测量等），避免由于淬火引起的裂纹、变形和环境污染，因而技术经济效益是明显的。国内已采用的非调质钢件，技术要求和材料成分见表2-4-4。

国内非调质钢品种很多，但每种钢只适用于一种或少数几种零件，用量少而价格高。这是由于这些汽车零件的截面大小不同，要使零件达到规定的力学性能，只好各自选用合适的材料，今后应当统一安排，减少品种并做到：a. 提高冶金水平，保证钢材的淬透性要求；b. 采用合适的冷却装置，保证冷却合理、稳定一致。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-4-4 非调质钢锻件所用材料及锻坯的技术要求

钢材	零件名称	锻坯硬度(HB)	化学成分(%) C	Mn	Si	S	P	V
48MnV	曲轴	207~286	0.45~0.51	0.90~1.20	0.17~0.37	0.01~0.035	≤0.035	0.05~0.1
35MnVS	连杆、轮毂	229~269	0.33~0.40	1.00~1.40	0.30~0.60	0.035~0.07	≤0.039	0.06~0.12
35MnV	连杆、万向节叉、滑动叉		0.31~0.37	1.20~1.50	0.20~0.40	0.02~0.06	≤0.04	0.07~0.12
50MnVS	前轮毂	267~285	0.44~0.54	0.15~0.60	0.08~0.13	0.045~0.065	0.60~1.00	0.08~0.13
49MnVS3	曲轴	238~281	0.45~0.53	0.60~1.0	≤0.8	0.020~0.060	≤0.035	0.08~0.2
42VS	滑动叉	207~241	0.38~0.45	0.70~1.0	0.2~0.4	0.35~0.75	≤0.04	0.06~0.12
43MnS	连杆		0.40~0.46	0.95~1.30	0.10~0.40	0.06~0.90	≤0.025	Cr≤0.25 Ni≤0.25
43MnVS	连杆	220~250	0.45	0.92	0.25	0.042	0.023	0.080
C70S6	连杆	229~250	0.67~0.73	0.45~0.55	0.15~0.25	0.06		
40MnZDG	花键轴 连杆	≤275	0.36~0.42	1.1~1.4 0.9~1.2 1.3~1.6	0.20~0.50	≤0.04	≤0.035	0.07~0.12

连杆、前轮毂和滑动叉类小件一般都是锻后直接放在一条 5~10m 长的链板输送带上，在空气中（采用静止或鼓风）冷却 3~8min 后（达 600~650℃）落入料筐，冷却后送去抛丸清理。曲轴类大件用悬挂输送链将零件逐个吊挂起来分几段冷却：a. 从终锻温度快冷 700℃以下（约 5~10min）；b. 冷到 700℃以下后送入一个保温通道经 1h 缓冷到 450℃；c. 自然空冷到 300℃以下再送走，其目标是相变前快冷、相变过程中缓冷，缓冷可降低毛坯的残余应力，均匀冷却可减轻变形，各点硬度也较均匀稳定，通过这种方法冷却下来的非调质钢曲轴锻件的金相组织是珠光体组织较细，有较少量的铁素体呈细网状分布。这不但有利于切削加工，减少了加工变形，而且在随后的中频感应加热淬火时，易于奥氏体化溶解，可以取得良好的淬火组织，减少淬火变形，具有较高的疲劳强度。

2.4.3 传动件热处理

传动系统将发动机的动力传递到车轮以驱动汽车行驶。传动件在工作过程中分别承受交变、脉动的扭转、弯曲、拉压和冲击载荷，应有较高的强度、韧性、耐磨和抗疲劳性能，所以传动件都要经过热处理。主要有：a. 高中频感应热处理；b. 化学热处理；c. 调质处理。

2.4.3.1 零件的调质处理

加工后的半轴、二轴等零件常在箱式炉或推杆式炉中加热，无气体保护会产生 0.1~0.2mm 的脱碳层并降低硬度和疲劳寿命。合格的 NJ220 汽车半轴（37~41HRC）扭转疲劳寿命为 19 万次，而脱碳严重者（30~33HRC）仅 3.3 万次。常用的保护气是吸热式保护气、甲醇、酒精和氮基气氛。向推杆炉内喷氯化锌溶液也能使半轴脱碳层减少到≤0.05mm。与锻坯相比，加工件调质硬度较高，回火温度稍低。工艺见表 2-4-5。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-4-5 汽车传动件的调质工艺

零件名称	材料	质量(kg/件)	炉型	淬火 温度(℃)	淬火 时间(min)	淬火 冷却	回火 温度(℃)	回火 时间(min)	回火 冷却	硬度要求(HB)
拖曳钩	45	9.04	推杆炉	860	102	水	380	200	水	341～415
半轴	40Cr	6.5	推杆炉	860	85	油、水	420	160	水	341～415
占普半轴	40MnB	4.6～5.6	多用炉	840	90	油	380	90	水	41～47HRC
二轴	40MnB	7.26	推杆炉	860	85	油	560	200	水	269～302
曲轴起动爪	45	0.63	箱式炉	810	70	水	500	70	水	285～321
花键轴	45Cr	3.5	推杆炉	860	85	油	380	200	水	43～55HRC
后轮毂轴	42CrMnS	1.42	推杆炉	830	90	油	655	160	水	255～302

2.4.3.2 化学热处理的可控气氛、炉气测量和调节方式

汽车零件化学热处理已大量使用连续式渗碳自动线和箱式多用炉。表 2-4-6 和表 2-4-7 列出了国内主要厂家的化学热处理工艺。气体渗碳和碳氮共渗中大量使用的是吸热式气氛，其次是氮-甲醇气氛、滴注式气氛和直生式气氛。直生式气氛的优点较多：

1）渗碳速度快，表 2-4-6 中直生式气氛（序 2）要比滴注式气氛（序 5）、氮基气氛（序 3）、吸热式气氛（序 6）都快；

2）直生式气氛碳势调节快，从图 2-4-5 中看出，碳势从 1.0%降到 0.7%仅需 3min，而滴注式气氛通常要 0.5h 以上；

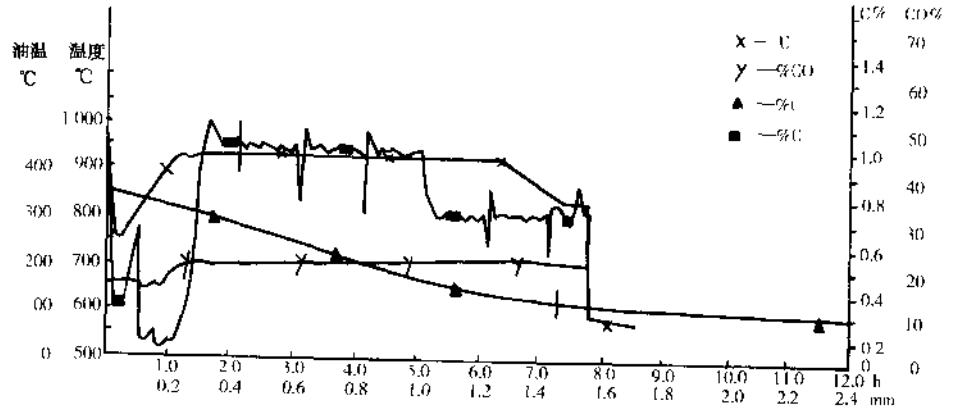


图 2-4-5 直生式气氛碳势调节

3）表 2-4-6 中的气体耗量看出直生式气氛费用是其它气氛费用的 1/2～1/4；

4）不需气体发生器，节省设备投资、人员和面积。

前 3 种气氛的气体成分稳定，残余甲烷量少，在渗碳炉内气体反应也较易平衡，所以它易控制碳势。直生式气氛是在工作炉内反应形成的气氛，随反应的过程先后在炉内各点的气体成分会有不同。因而炉内应带马弗罩使气体在接近工件前完成裂解等化学反应。直生式气氛在渗碳过程中 CO%变动范围高达 +2.5%，甲烷含量较高。所以直生式气氛较难控制，必须同时测量炉气中两种成分（如 O_2 和 CO）含量。此外，氧探头本身应特殊处理并周期性地定时清洗（烧碳黑），才能保证精确测定和有效控制炉气碳势。目前，直生式气氛已用于齿轮的渗碳和碳氮共渗处理。与其它炉气一样，其碳势控制精度也可以达到 ±0.05%的

水平。

表 2-4-6 传动零件的化学热处理（箱式多用炉）

序号	零件、钢号	炉子型号 气氛	工艺规范 参数	加热	强渗	扩散	降温	保温	淬火	合计	备注
1	吉普 换档齿轮 40Cr	RFQ-10-EM 氨 0.1＋甲烷 1.1	℃ min %C	65 0.70	850 81 0.90	850 25 0.90			80 油	171	E=0.35mm E=0.25～0.5mm
2	吉普 一轴 20CrMnTi	RFQ-10-EM 甲烷 1.2	℃ min %C	66 0.70	930 235 1.00	930 82 0.70	61 0.70	840 20 0.70	80 油	465	E=1.45mm E=1.2～1.6mm 工艺见图 2-4-5
3	轻客 齿轴 19CN5	I/O-3036-ES 氨 7.5＋甲醇 6.5 丙酮 0～0.5	℃ min %C	119 0.19	920 79 1.20	920 104 0.85	840 81 0.85	840 31 0.85	−155 油	413	E=0.80mm 测 C 0.35%C
4	轿车齿轴 20MnCr5	VKES-4/1 Rx15 氨 0.2－甲烷 1	℃ min %C	90	900 90 0.6	900 0.9	800 30		65 油	210	EhV550=0.4～0.7mm 表面≥680HV30 心部 320～480HV30
5	主动齿 20CrMnTi	UBE-600 丙烷 0.2＋甲醇 2.5	℃ min %C	90	930 130 1.0	930 130 0.95	90 0.95	840 30 0.86	60 油	470	E=1.2～1.6mm 实测 E=1.25（0.72）mm
6	微型车齿轮 20CrMnTi	VKE-3 丙烷 0.5＋Rx15	℃ min %C	45	900 205 0.98	900 10 0.74	650 27	850 61 0.74	60 油	348	EHV550－0.6～1.0mm
7	保险带卡板 CK15	BBH-600-2R 甲醇 2＋氮 2 丙酮 0.5	℃ min	45	810 120				80 真空油	215	E=0.15～0.25mm 表面硬度 600～750HV0.3 检内孔、宽度、不平度
8	轿车齿套	VKES-4/2 Rx18 丙烷 0.3＋氨 0.4	℃ min %C	80 0.6	850 41 0.90		40 0.60	820 10 0.60	130 355 油	171	EhV630=0.25～0.35mm 心部 350～520HV30 表面 81.5～83.5HRA
9	轿车齿轴 20MnCr5	VKES-4/2 氨 4.8＋甲醇 4.2 丙烷 0～0.2	℃ min %C	100	900 90 1.05	900 60 0.9	90 0.8	850 30 0.8	120 355 油	370	EhV550=0.4～0.65mm 心部 350～480HV30 表面 680～780HV30
10	吉普球关节 20CrMnTi 转向螺杆	I/O-3036-ESR 氨 7.7＋甲醇 6.5 丙烷 0～0.2	℃ min %C	110	950 270 1.15	950 140 0.8	105 0.8	830 30 0.8	80	655	球关节 E=1.5～1.8mm 心部 30～40HRC 表面 58～64HRC 螺杆 E=1.4～1.7mm

注：①表中 E 指金相法或化学法测定的层深。

②EhV550 和 EhV630 分别指以 550HV 和 630HV 为界限值测定的有效硬化层深，EhV 专用于引进产品的层深表示。

③"气氛"栏中、渗碳介质后的数字为用量：气体单位为 m^3/h，液体单位为 L/h。

汽车论坛 http://www.qclt.com

为了便于炉气调节，可向炉中送入低碳势的载体气，再据炉气碳势调节富化气用量。滴注式气氛的载体气甲醇是常量，富化气丙酮是变量，这种方法碳势调节缓慢。如改为按比例定量送入甲醇、丙酮，用空气调节碳势则调节速度快、效果好。它已在连续炉上使用，如表 2-4-7 中的序 1 和序 2。

表 2-4-7 传动零件的化学热处理工艺（连续式渗碳自动线）

序号	零件、钢号	炉子、气氛工艺	工艺规范 参数	加热	加热	渗碳	扩散	保温	淬火	备注
1	轻型车齿轴、齿轮 20CrMnTi	单排炉 滴注式气氛 渗碳直淬 空气调节碳势 周期 24min	盘数盘	脱脂	7	4	4	3	110℃ 355 油	E=0.8~1.3mm 表面 58~63HRC 心部 33~48HRC
			温度℃	560	870	920	900	830		
			碳势%C			1.10	1.00	0.85		
			甲醇 l/h		0.6	1.2	1.2	0.6		
			丙酮 l/h		0	0.42	0.56	0		
2	轻型车齿轴、齿轮 20CrMnTi	单排炉 滴注式气氛 渗碳直淬 空气调节碳势 周期 22min	盘数盘	4	2.5	5	2.5	3	110℃ 355 油	E=0.7~1.1mm 表面 58~63HRC 心部 33~48HRC 脱脂 350℃
			温度℃	820	900	920	900	830		
			碳势%C		0.7	1.15	0.8	0.8		
			甲醇 l/h		2.4	1.5	2.1			
			乙脂 l/h		1.2	1.5				
3	轿车齿轴 20MnCr5 16MnCr5	单排炉 吸热式气氛 碳氮共渗直淬 周期 25min	盘数盘		4.0	3.5	2.5		≤80℃ 油	EhV510 0.4~0.7mm 表面≥680HV10 心部 320~480HV10
			温度℃		880	900	900			
			碳势%C			0.90				
			Rxm³/h		6	13				
			丙烷 m³/h			0.55				
			NH_3m³/h			0.44				
4	轿车四档齿轮 SCr25	双排炉 氮基气氛 渗碳、直淬 周期 14min	盘数盘		4×2	7×2	3×2		油	E=0.4~0.7mm 表面 58~63HRC 心部 33~48HRC
			温度℃		900	900	850			
			碳势%C			1.0	1.0			
			N_2 m³/h		3	4	3			
			甲醇 l/h		3	4.5	3			
			丙烷 m³/h			0.5	0.3			
5	从动锥齿轮 22CrMo	双排炉 Rx+甲烷 渗碳压淬 周期 80min	盘数盘	4×2	3×2	5×2	4×2	4	保温室 860 17	热前 热后 不平度：≤0.04 ≤0.10 圆度：≤0.025≤0.05 EhV550 1.5~1.9mm 检硬度
			温度℃	900	930	940	900	860		
			碳势%C		1.0	1.20	1.05	0.9		
			Rx m³/h	6	8	12	12	17		
6	同步器零件 锥盘、齿套 齿座 20CrMnTi	单排炉 Rx+甲烷 渗碳直淬 周期 30min	盘数盘	4	4	4	3	4	130℃油	EhV550 0.4~1.0mm 表面 58~63HRC 或 650~680HV 心部 300~478HV
			温度℃	900	920	920	830	800		
			碳势%C		1.0	1.10	1.0	0.9		
			Rx m³/h	6	6	9	9	13		
7	主动锥齿轮 20MnVB	双排炉（大） Rx+丙烷 渗碳中冷直淬 周期 45min	区段	加热	加热	渗碳	扩散	均温	中冷	加热 经 550℃预氧化 径向跳动≤0.05mm EhV550 1.3~1.7mm 表面 58~63HRC 心部 28~40HRC
			盘数盘	3×2	3×2	5×2	5×2	3×2	5×2	5×2
			温度℃	900	930	930	930	910	550	860
			碳势%C		0.95	1.30	1.25	1.15		0.85
			Rx m³/h	12.7	9.9	9.9	9.9	9.9	N_2	17
8	轻型车、轿车齿轮 20CrMnTi 20MnCr5	双排炉 丙烷+空气 渗碳直淬 周期 12min	盘数盘	8	5×2	6×2	5×2	8	130℃ 355 油	E=0.7~1.1mm 表面 58~63HRC 心部 33~48HRC
			温度℃	450	880	910	920	850		
			碳势%C			1.15	1.15	0.85		
			丙烷 m³/h			0.6	0.6	0.4		

汽车论坛 http://www.qclt.com

较普遍的炉气测定装置是氧探头，红外(CO_2)分析仪和露点仪。氧探头测定快速，应答时间在1～2s内完成，而且是直接插入炉内，可随时反映炉内测定点的实际情况。红外仪、露点仪均需从炉内抽出气体进行间接测量，管路太长不但影响测定速度，还影响测定结果，如管路中有漏气、积水或有积碳则更影响测量精度，维护管理也麻烦。但氧探头使用寿命仅一年左右，生产费用高。红外仪也很贵，而露点仪费用很低。

露点仪适用于测定吸热式气体发生炉产出的气体，该气体成分稳定、变动小、当原料气不作时，用露点仪比用红外仪控制更好。红外分析仪适用地方较多，特别是有震动的炉子（如震底炉）、氧探头不便安装的炉子（如井式炉）更宜采用红外仪测量控制。氧探头可在650～1200℃的温度范围内测定炉气（温度过低、氧离子导电能力大幅度下降，温度过高则探头寿命太低）。现在气体渗碳、碳氮共渗的炉子上采用氧探头控制炉气是最普遍的。

2.4.3.3 汽车零件的渗碳与碳氮共渗工艺改进

(1) 脱脂处理：要实现有效的气氛控制，零件入炉前必需清洗掉切削加工带来的切削液、油污，防止它扰乱炉中气氛。用加热到400～550℃气化脱脂来替代清洗的优点是：a. 脱脂炉是将附在工件上的切削油加热汽化后用来预热工件，有利于环保和节能；b. 起预热作用，有利于工件均热，使渗层层深均匀；c. 有预氧化功能，可提高渗层均匀性并加快渗碳速度。实践证明：对渗层要求较浅的零件，采用该工艺是非常有益的。

(2) 浅层渗碳：表2-4-6中序7卡板并非汽车传动件，此处仅作为浅层渗碳的代表件，渗层层深要求为0.15～0.25mm，采用810℃的低温渗碳。为了缩短装炉后的换气时间，该工艺是在预抽真空的箱式多用炉上实现的。渗层愈浅，工艺温度应相应降低，这是保证层深控制精度、表面碳浓度和保证表面硬度的需要。

(3) 深层渗碳：表2-4-6序10和表2-4-7序5所列零件是汽车渗碳件渗层较深的例子，表中的渗碳温度均高于一般的渗碳温度，渗碳温度高可以大大提高生产效率，但它受材料、炉子加热元件和耐火材料所限制。

(4) 碳势为台阶式控制的气体渗碳：这是普遍采用的工艺。在渗碳前期（强渗期）采用高碳势气氛(1.0%～1.2%C)，完成强渗周期后转入扩散期，扩散期的炉气碳势较低，通常为0.75%～0.85%C，使零件表面达到所需含碳量。台阶式碳势控制可提高渗碳速度，对保证共析层深≥50%总层深有利。对于渗层层深较薄的渗碳件则应采用较高的碳势强渗至终。

(5) 渗碳中冷淬火工艺：将工件渗碳后快冷到550～650℃再重新加热淬火可以细化钢件的组织，从而提高零件的强度和韧性，改善使用性能，也可在高温渗碳时减轻对钢材本质晶粒度要求。表2-4-6中序6工艺是渗碳中冷淬火工艺。有些工厂当钢材（如锰硼钢）晶粒度较差时就采用这种工艺，见表2-4-7中的序7工艺，此时在中冷区需要通氮气保护。

(6) 渗碳或碳氮共渗后的分级淬火：将渗碳（或碳氮共渗）后的零件淬入低于马氏体转变点（Ms）以下的（如120～180℃）高闪点的油中淬火，待工件各部分温度均匀后再取出空冷，采用分级淬火主要是为了减少热处理变形。通常采用国产令禹35A等温分级淬火油或好夫顿355油。

(7) 有的工厂在工件渗碳（或共渗）后采用更高的等温温度（如220～280℃）淬火。国外某汽车厂16MnCr5的行星轮、半轴齿轮、27MnCr5的轴件和32Mn5的齿套采用880℃碳氮共渗2h，降温到860℃保温15min后在230℃的硝盐中淬火。国内某厂是采用SPH250淬火抽在230℃等温淬火，采用上述工艺的零件淬火后不再进行回火。

(8) 某厂齿轮在碳氮共渗后直接在900℃淬火油中（表2-4-7序3），并通过改进淬火油搅拌方式以减轻变形，这种工艺方法可改善渗层表面的淬火组织。更多的工厂是采用渗碳后降温到更低温度（800～840℃）后淬火冷却，降温后淬火更能减轻淬火变形。淬火温度也不能太低，以保证齿轮心部的硬度和金相组织要求。工艺见表2-4-7序6。

(9) 压淬：连续式气体渗碳炉末端加保温室，对从动螺旋锥齿轮实施逐个加压淬火，保证从动锥齿轮

汽车论坛 http://www.qclt.com

的不平度和圆度符合要求，见表 2-4-7 的序 5 月手工或采用机械手夹持零件进行压淬。也可在渗碳后室冷到 450℃后再空冷转至转底炉加热压淬。压淬是一种限形淬火。

（10）芯轴淬火：也是一种限形淬火，对于内孔带花键的齿轮、形状复杂、淬火易变形的齿轮及高淬透性材料制成的齿轮均可采用芯轴来限形淬火。

（11）限形回火：有的齿套形状很复杂，采用压淬也只能保证 80%合格，改为渗碳、直淬、清洗后加热到 180℃，热压到塞棒上再 180℃回火 3h 后挤出来。这是利用淬火件的奥氏体良好塑性进行热定形回火的工艺方法，采用这种方法后使该齿套的合格率提高到 98%。

2.4.3.4 渗碳件的质量检验

渗碳淬火件检验内容：金相组织、表面和心部硬度、渗碳层层深和变形。

（1）金相组织应按金相标准 ZBT04001—88 检查表面渗层组织和心部组织。汽车渗碳齿轮的碳化物是 1～5 级为合格，有些工厂规定换挡齿轮为 1～4 级合格。残余奥氏体及马氏体级别也是 1～5 级合格，残余奥氏体量 30%以内合格。有的工厂规定轿车齿轮的残余奥氏体量在 15%以内合格。齿面的非马氏体应控制在 0.02mm 以内，轿车齿轮是控制在 0.015mm 之内。齿轮心部要求不出现铁素体，但有少量铁素体出现时应以硬度检验为准，心部硬度也不合格者为不合格。

（2）表面硬度及心部硬度：过去齿面硬度一律打洛氏硬度（HRC），现在有 HV30、HV10、HRC 和 HRA 等等。加载过重的压头可能会部分压透渗层，此时测得结果就会低于实际值。德国渗碳标准 DIN6773 规定：表面硬度＞60HRC、渗层的有效硬化层深≥0.8mm 时可以用 HRC 测量；而层深是 0.4～0.8mm 者用 HRA 测量，0.4～0.5mm 者还可用 HV30 测量，层深为 0.25～0.3mm 者应用 HV10 测量。

由于炉气氛或淬火条件不佳，可能造成渗碳不均，非马氏体层超差等缺陷，此时用锉刀检验是非常有效的，锉检数量为 15%左右，如发现有不合格时应 100%锉检。

心部硬度是在金相试样上测定的，常用维氏硬度检测。当齿的模数较大或材料淬透性不足时，应用洛氏硬度计测定 HRC 值。心部硬度主要靠材料淬透性来保证，当然它也受淬火温度和冷却条件影响。

（3）渗层层深：过去渗层层深常用金相法测定，采用退火试样，相当费时。合金渗碳钢是由表面测至心部组织的边缘。而碳素钢是测至过渡区的 1/2 处为止。载货车齿轮还要测定过共析＋共析层深，要求该层深是总层深的 50%～75%。井式气体渗碳炉的炉前检测采用宏观测定法。而在渗碳工艺试验中常采用剥层化学分析法。

近年来，很多汽车厂家已采用有效硬化层深测定法。据 GB9450—88“钢件渗碳淬火有效硬化层深度测定和校核”中规定：对渗碳淬火后的试样采用 9.81N（1kgf）维氏硬度计从齿的节圆或齿根处表面测至硬度为 550HV 处距离为有效硬化层深，测定结果采用 DCX.XXmm 表示，如果采用 49.03N 载荷，界限硬度应为 515HV 则应用 DC49.03/515X.XXmm 表示。

（4）变形、测量内容有不平度、内孔尺寸和圆度，轴类零件的摆差、位置度、垂直度等。通常对热前、热后的要求均有明确规定，热前对加工质量作抽检，热后要 100%检查。

2.4.3.5 渗碳工艺的计算机控制

汽车零件的渗碳、碳氮共渗处理已普遍采用计算机控制，其目的有：a. 取得高的生产率（高的渗碳速度）；b. 理想的碳浓度分布及规定的有效硬化层深；c. 合理的表面碳含量及规定的表面硬度；d. 对设备的故障、安全提出报警、提示或自动执行相应的措施。

渗碳设备的控制系统主要有：a. 温度控制系统（炉温、油温等）；b. 碳势控制系统；c. 动作（炉门、淬火台、推料等）程序控制系统；d. 安全报警、调节控制系统。其中最关键的是碳势控制系统，过去碳势控制只追求表面含碳量，现在已发展到保证整个渗层的碳浓度分布。它有两种控制方法：

（1）二点控制法：先在设定的碳浓度分布曲线上设三个点：见图 2-4-6，a. 表面含碳量 C_s（约 0.80%C）；b.0.35%的位置 C_h（相当于有效硬化层深位置）；c. 保证共析区层深要求的 C_k 点，它可按 $C_s-0.1$

汽车论坛 http://www.qclt.com

$=C_k$ 确定，C_k 横坐标确定：当层深为 0.6mm 时，C_k 约在层深的 40%位置，具体控制方法是在强渗期实现渗层分布曲线通过 C_k 点后转入扩散期，通过扩散使渗层碳浓度达到设定要求。生产中，屏幕上适时显示渗层碳浓度分布情况，该计算机还带有自适应调节控制系统，当该曲线某个点（如 C_k）尚未达到设定要求时能进一步调节直到完善为止，也能在设备故障或外界干扰（停电、停气等）后自行调整工艺参数，最后达到设定的碳浓度分布要求。

(2) 以整个碳浓度分布曲线作为目标进行模拟，如图 2-4-7 所示，生产过程中，屏幕上适时画出碳浓度分布曲线，不断和设定的碳浓度分布曲线比较，对图中 S_1 和 S_2 面积积分，当 $S_1-1.1S_2$ 时，计算机指示降低碳势转入扩散期，直到与设定曲线完全重合为止，它也有自适应调节控制系统，具有自动补偿和修正的功能。

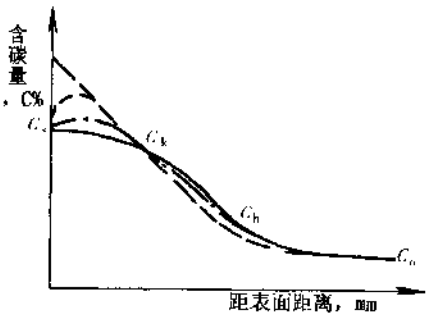


图 2-4-6 在扩散期间碳浓度分布的变化
——给定碳浓度分布 - - 强渗期末碳浓度分布
—·—·扩散期碳浓度分布

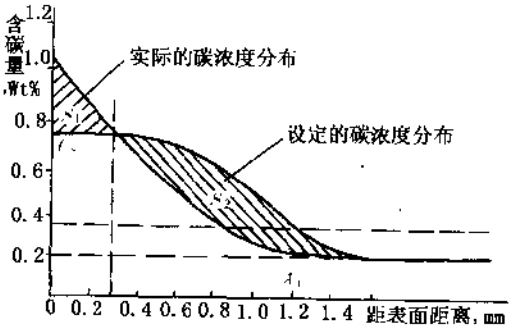


图 2-4-7 两个碳浓度分布曲线覆盖面积的差异

2.4.3.6 渗碳设备

改革开放以来，国内引进了大量渗碳设备，这些设备代表了 90 年代世界先进水平。它们具有各自不同的特点，可适应不同的产品品质要求，在节能、安全、环保及自动化方面均达到相当高水平。通过多年来消化吸收，国内炉子行业也已能生产出高水平的渗碳自动线，表 2-4-7 中所列设备多数都是国内自制的，在生产中发挥了骨干作用，而且已具有 90 年代初世界先进水平。

1997 年引进的预抽真空多用炉的优点是：a. 前炉门无火帘、节省燃料、洁净环境；b. 渗碳均匀、内氧化少（非马氏体层仅 5μm 以下）；c. 较安全、易实现全自动和无人操作；d. 用气量少、少于滴注炉用量；e. 炉气恢复快，适用于浅层碳氮共渗（见表 2-4-6 序 7）。

过去的连续式气体渗碳炉是直通式的，炉内分加热区、渗碳区、扩散区、冷却区、保温区，炉区及炉内温度分布如图 2-4-8 所示。图 2-4-8a）中看出各区之间靠双拱来分开。有的厂采用侧风扇或侧风道来分区，它们均不能完全隔开炉气的窜动和温度干扰，为了确保炉温与炉气的有效控制，应在各区间用炉门分隔开来。图 2-4-8b）中新型连续炉将扩散区以后部分用炉门分隔出来，侧置一个淬火保温室，和其它炉子不同的是该室只有 1～2 个料盘，通过快冷（由原来的 90～120min 变为 20～30min）到淬火温度并采用到温就淬火（称零保温淬火），其优点是：a. 减少零件变形；b. 节省工艺时间，当要求有效硬化层深为 1.0mm 时，可节省时间 2h（未包括新炉因有脱脂炉而节省的 2h），见图 2-4-8c）；c. 取消邻近料盘的温度影响，使温度更均匀（由原来同盘温差±7.5℃降至±3℃）。

某公司把脱脂预热炉的预热温度提高到 800℃以上。该预热炉也只有一个料盘，通过炉底辊道的正反向转动使工件往复运动，从而提高工件温度均匀性，靠燃气加热加快升温，炉气碳势易控制，减少了炉内碳黑，见图 2-4-9。炉温分布见图 2-4-10。

该公司的连续式渗碳炉优点还有：a. 采用辊底式炉底，适合于多品种、不同层深要求的工件，更换工艺

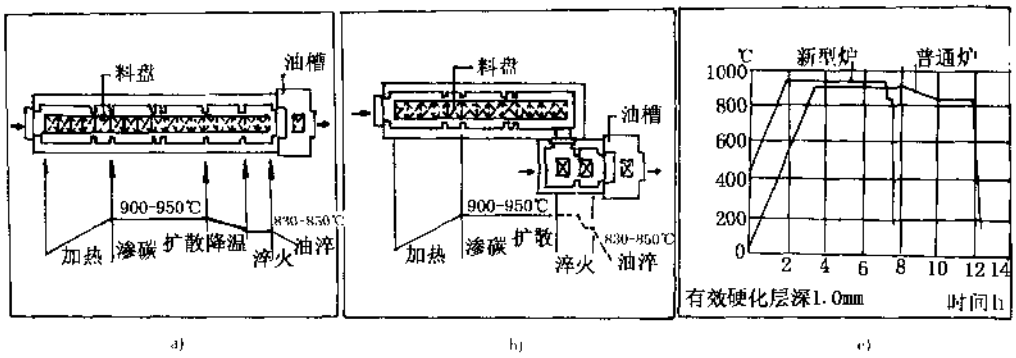


图 2-4-8 新旧炉型的组成及它们的渗碳工艺曲线

a) 普通连续渗碳炉和炉温分布；b) 新的连续渗碳炉组成和炉温分布；c) 两种连续渗碳炉的炉内温度分布曲线比较

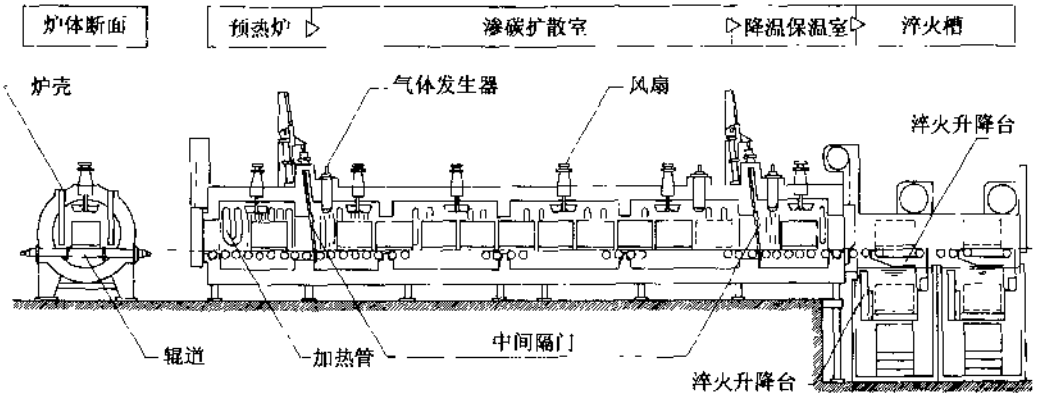


图 2-4-9 连续式渗碳炉结构简图

或停炉均无需推空盘，生产灵活性好、节能。b. 设置降温保温室，驱动辊道保证淬火位置定位精确，降温速度快，工件温度均匀。c. 采用内插吸热式气体发生器见图 2-4-9 和图 2-4-11。可在 850～950℃产气，节电 20%，还节约用水、人员、面积和设备投资。d. 用陶瓷纤维圆筒型炉内衬，见图 2-4-9。可改善气氛循环和温度分布均匀性，节能而且加快升降温速度、升温从 105min 缩至 60min，降温从 100min 缩至 30min，从而提高生产能力 50%，热处理成本节约 40%。e. 渗碳排出废气作为加热室的燃料节约热能。

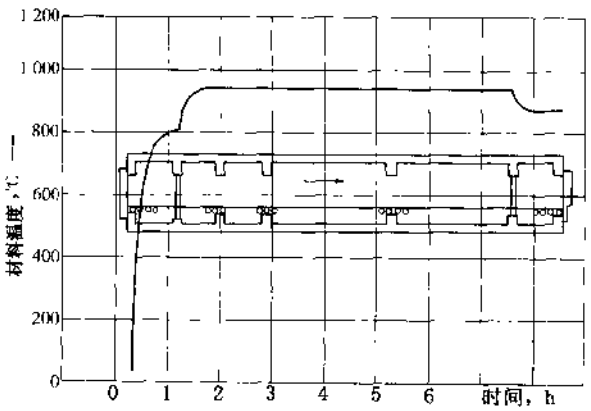


图 2-4-10 渗碳炉的炉温分布图

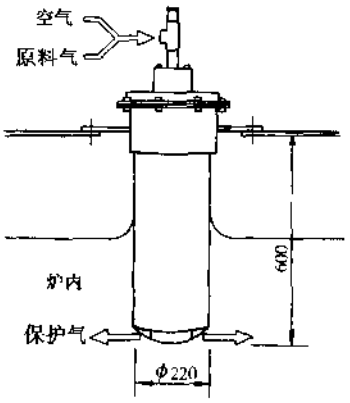


图 2-4-11 插入式保护气体发生器

汽车论坛 http://www.qclt.com

渗碳炉的质量还反映在炉用配套件，如：计算机、控温仪表、多路碳控仪、调功器等；还有阀门、压力计、流量计、辐射管、加热元件等各种电器件和碳化硅导轨、耐火砖、陶瓷纤维等耐热材料的质量的提高，使渗碳设备的可靠性、稳定性和使用寿命均有较大提高。

90年代以来，ICBP系列低压渗碳炉已推广到汽车行业，该炉是由1个或多个加热渗碳室、一个气淬室、一个装卸料室及带升降机的通道传动系统、气体循环系统及计算机监管系统等组成。

该设备的优点是：a. 处理过程中是无氧条件下进行，工件无内氧化层；b. 采用气淬、工件变形少，齿套、齿圈淬火不用校正；c. 淬火后工件是光亮的；d. 渗层控制精度±0.05mm，不同层深的零件可同时进行处理；e. 炉子启动快速，15min即可投入第一炉生产；f. 无污染，可安装在生产线上；g. 生产费用低、耗气量少；h. 可提高生产效率。

转底炉和上述低压渗碳炉均可通过“跳步”而改变渗碳周期，因而可通过不同组合模式实现柔性化。转底炉柔性线有3种形式：a. 推杆式炉转底式炉组合；b. 双转底式炉组合；c. 多台转底炉组合。

采用这种柔性线的优点是：a. 不同工件可在该线上同时进行处理；b. 渗层均匀、变形少；c. 减少无效运行，提高生产效率。但也有设备结构复杂，维修率较高的缺点。

2.4.3.7 渗氮与氮碳共渗

渗氮与氮碳共渗都属于低温化学热处理，它们能提高零件疲劳强度、耐磨性、抗腐蚀和红硬性。由于工艺温度低，零件变形少，所以它特别适合于形状复杂，精度高的汽车零件。如扇形齿板、刮水器、摇臂、减振盘、分离叉及齿圈均可采用气体渗氮或离子渗氮方法。由于渗氮工艺时间太长，影响了它在汽车行业中推广。氮碳共渗时间很短，使用性能又与渗氮相当，因而像曲轴、凸轮轴、刮水器、推杆、齿座、定时齿轮、内齿圈、衬套、斜盘、摇杆等汽车零件均可采用氮碳共渗处理。某厂采用前期通氨和放热式气体，后期通氨和吸热式气体的两段法气体氮碳共渗工艺。该工艺处理的曲轴达到了液体软氮化曲轴的质量水平。此外，某厂采用连续式炉进行曲轴的气体氮碳共渗处理也具有很高水平。

2.4.4 汽车零件的感应热处理

感应热处理优点有：a. 加热速度快、氧化脱碳少、产品品质优良、稳定；b. 生产效率高、适合于大批生产；c. 占地少、无污染、可布置在生产线上；d. 节能、节约生产费用。在汽车行业得以广泛应用，它可用来部分替代渗碳、碳氮共渗、调质及局部淬火工艺。过去的CA10汽车感应热处理件有27种、71件、152kg，占全部热处理总质量的18%。现在EQ1090E汽车为91种、158件、486kg，占整车热处理件总质量的50%以上（含板簧热处理）。

汽车上需感应热处理强化的零件有以下几类：

①载荷不大以承受磨损为主的零件，如摇臂轴、摇臂、变速叉等零件，可采用浅层表面感应淬火（0.25～2mm），一般选用30～250kHz的高频电源。

②承受高的接触载荷，除了表面要耐磨外，次层应有足够支撑强度，如等速万向节的钟形壳、球头销、制动凸轮及凸轮轴等零件，它们的硬化层深较厚，约1.5～5mm，应采用2.5～10kHz中频电源。

③承受很大的扭转、弯曲载荷的杆轴类零件。如：半轴、花键轴、曲轴及转向节等，其外加载荷引起的应力在表面层最大，在横截面中心则趋于零，因此，零件横截面上各点的屈服强度$\sigma_{0.2}$均应高于外载荷引起的应力σ_{ν}。硬化层深一般为3～8mm。它与轴的粗细、外载荷大小有关，直径为30～50mm的半轴，其杆部淬硬层应为杆径的10%～15%，较细杆轴的淬硬层深应取杆径的15%～20%。合理的硬化层深可以在杆轴表面保留较高的残余压应力，提高承受脉动变化的弯曲、扭转载荷零件的疲劳强度。汽车零件感应热处理规范见表2-4-8。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-4-8 汽车零件感应热处理实例

零件名称	材料		技术要求			变频装置		回火
	牌号	尺寸	硬度(HB)	层深(mm)	硬度(HRC)	频率(kHz)	功率(kW)	
活塞杆	CK45	φ8		0.4～0.7	≥77HRA	100～150	100	5～15KHz 50kW
活塞杆	35	φ15		0.4～0.9	≥520HV30	100～150	100	5～15KHz 50kW
摇臂轴	45	φ22.5管	冷拔	1～1.5	55～63	200～250	100	150℃ 1.5h
摇臂	QT600-2	12×10	229～302	1.2～2.5	≥58	30～40	100	150℃ 1.5h
叉形拨杆	45GB	φ20孔	217～255	0.5～2.5	55～62	120	80	150℃ 1.5h
操纵杆	45	φ20球	217～255	0.5～2	55～62	200～250	30	150℃ 1.5h
变速叉	ZG45	20×10	220～260	0.5～2.5	≥600HV	200～250	60	170℃ 1.5h
凸缘	45	Φ60×18	220～260	1～3	≥600HV	200～250	100	150℃ 1.5h
飞轮齿圈	45	φ429×22	退火	≥0.5	55～63	250	100	自回火
钟形壳	cf53	球道 外壳	220～260 正火	1.3～2.6 1.5～4.5	58～62 58～62	10 10	260 260	165℃ 1.5h
凸轮轴	45	凸轮	163～197	2～5	55～63	8	200	自回火
凸轮轴	合金铸铁	凸轮		2.5～5.3	48～58	8	160	180℃ 1.5h
制动凸轮	45	凸轮 φ40	163～197 163～197	1.5～5 1.7～3.7	55～63 55～63	8 8	200 200	自回火 自回火
曲轴	45	φ63×38	207～241	2.5～4.5	55～63	8	160	自回火
曲轴	QT600-3	φ62×38	220～260	2.5～4.5	46～58	8	160	自回火
曲轴	48MnV	圆角 轴颈	207～295 207～295	≥2.03 2.8～5.5		10 10	300 300	180℃ 1.5h
曲轴	球铁	主轴颈 杆颈 轴头	250～280	1.75～2.75 2～3 1.05～2.75	45～60 48～60	10	120	220℃ 1.5h
球头销	45	φ34球		2.5～4.5	55～63	8	160	自回火
拖曳钩	45		163～197	3～5	45～58	8	160	自回火
转向节	40MnB	φ55～φ85	241～285	3～6	53～58	8	160	自回火
花键轴	40MnB	φ40	207～241	4～6	48～58	8	160	180℃ 2h
半轴	40MnB	φ54键 φ48杆	187～241 187～241	4～6 5～7	52～58 52～58	8 8	320	自回火

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.4.4.1 毛坯热处理工艺

感应热处理汽车零件常用中碳钢（35、40、45钢）、中碳合金钢（40MnB、40Cr）、非调质钢（48MnV、49MnVS3）、球墨铸铁等材料。坯件常采用费用低廉的正火处理。球化退火处理的坯件不易感应淬火。要求较好表面组织、浅硬化层及较高强韧性的零件最好先经调质处理，调质的组织可使心部有较好的强韧性，同时表面又易感应加热奥氏体均匀化，表面组织细致均匀。各种感应淬火件的坯料硬度要求见表2-4-8。

2.4.4.2 频率、功率密度、加热时间和加热温度的选择

当工件的尺寸和硬化层深确定以后首先选择好电流频率，以保证高加热效率和良好的表面质量，推荐的频率见表2-4-9。

表2-4-9 按工件直径及硬化层深选择频率

硬化层深 (mm)	零件直径 (mm)	中频电源（1Hz）			高频电源（kHz）	
		1 000	3 000	10 000	20～60	>200
0.4～1.3	6～25				好	好
	11～16			可	好	好
1.3～2.5	16～25			好	好	好
	25～30		可	好	可	可
	>50	可	好	好	差	差
	20～50		好	好	差	差
2.5～6	50～100	好	好	可		
	>100	好	可	差		

注：好——加热效率最高；可——加热效率不高，有过热倾向；差——频率过高，表面易过热。

表2-4-9列出的按工件尺寸及淬硬层深选用的频率。可以看出：工件尺寸及层深增加时，应选用较低频率，另外功率密度（感应线圈所包围工件面积的每平方厘米的千瓦数）对工件的加热深度也有明显影响，较大的功率密度能补充较低频率不能淬浅层的不足，因此在一种变频设备用于多种不同层深的零件时往往可适当偏离表2-4-9的要求。

变频装置的功率是据工件尺寸、技术要求、加热方法、功率密度及生产要求来确定的。对于表面淬火，同时加热的面积乘以功率密度就是所需的功率。表2-4-10是表面淬火所需功率密度，也可根据图2-4-12来选用。

表2-4-10 表面硬化所需的功率密度

频率 (kHz)	淬火深度 (mm)	输入比功率 (kW/cm^2)		
		下限	最佳值	上限
50	0.38～1.14	1.1	1.6	1.9
	1.14～2.29	0.5	0.8	1.2
10	1.52～2.29	1.2	1.6	2.5
	2.29～3.05	0.8	1.6	2.3
3	3.05～4.06	0.8	1.6	2.2
	2.29～3.05	1.6	2.3	2.6
	3.05～4.06	0.8	2.2	2.5
1	4.06～5.08	0.8	1.6	2.2
	5.08～7.11	0.8	1.6	1.9
	7.11～9.14	0.8	1.6	1.9

汽车论坛 http://www.qclt.com

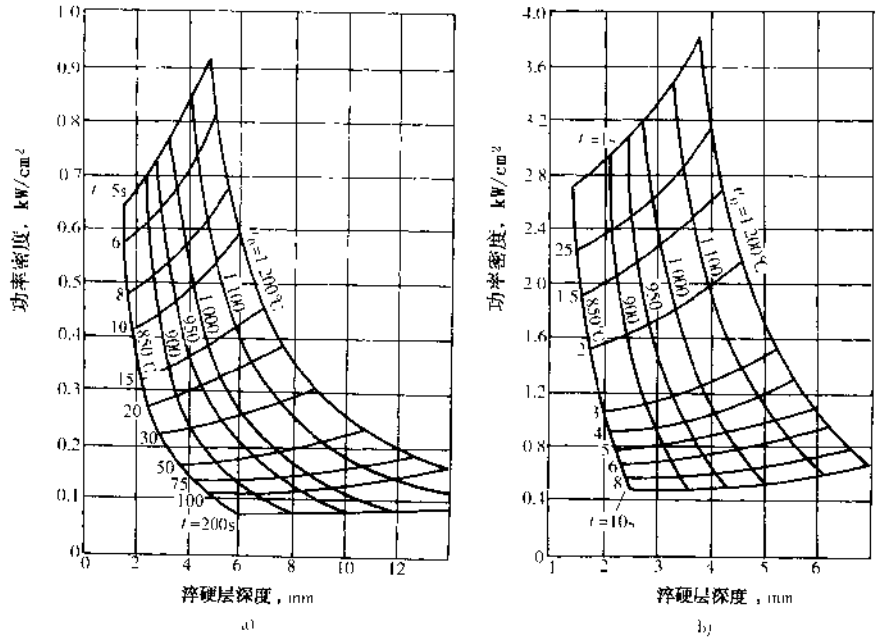


图 2-4-12 根据硬化层深度与允许最高表面加热温度求功率密度与加热时间

a）电源频率 $f=10kHz$；b）电源频率 $f=4kHz$

频率和功率密度确定以后，就可根据工件淬火面积。加热方法来初步确定变频装置，加热时间可参考图 2-4 12 的数值，图中的加热温度由钢种、原始组织及相变区间的加热速度确定．推荐的加热速度见表 2-4-11。加热时间还受感应器与工件之间的间隙影响，通常间隙应为 1.5～2mm。间隙大，效率低，加热时间就要长。加热时间还需经调试确定，以保证产品技术要求为准，加热速度愈快，加热温度的范围就愈宽。加热温度由光纤红外传感器检测，检测精度为 ±（1～3）℃，反应速度 0.1s。ZBJ36005—88 标准规定：在 1～60s 内加热，时间控制精度在 0.1～0.15s 内。

表 2-4-11 不同钢材表面淬火时推荐的加热温度

钢号	预先热处理	下列的情况下的加热温度（℃） Ac1 以上的加热速度（℃/s） Ac1 以上的加热持续时间（s）			
		炉中加热	30～60 2～4	100～200 1.0～1.5	400～500 0.5～0.8
35	正火	840～860	880～920	910～950	970～1 050
	退火或未处理	840～860	910～950	930～970	980～1 070
	调质	840～860	860～900	890～930	930～1 020
40	正火	820～850	860～910	890～940	950～1 020
	退火或未处理	820～850	890～940	910～960	960～1 040
	调质	820～850	840～890	870～920	920～1 000
45，50	正火	810～830	850～890	880～920	930～1 000
	退火或未处理	810～830	880～920	900～940	950～1 020
	调质	810～830	830～870	860～900	920～980

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号	预先热处理	下列的情况下的加热温度（℃） Ac1 以上的加热速度（℃/s） Ac1 以上的加热持续时间（s）			
		炉中加热	30～60 2～4	100～200 1.0～1.5	400～500 0.5～0.8
65Mn	正火	760～780	810～850	840～880	900～960
	退火或未处理	760～790	840～880	860～900	920～980
	调质	770～790	790～830	820～860	860～920
40Cr、45Cr	调质	830～850	860～900	880～920	940～1000
40CrNiMo	退火	830～850	920～960	940～980	980～1050

2.4.4.3 淬火冷却介质、淬火方法

大多数感应加热淬火是用水作淬火介质，它价廉、易取、安全、无污染、可循环使用，因而普遍选用。通常要求水温是15～35℃。对形状较复杂的合金钢件，如40MnB汽车半轴，由于冷水淬易使花键淬裂，应采用25～40℃热水淬火。对于淬透性较高的合金钢件、铸钢件如拨叉应采用有机聚合物水溶液淬火，这些聚合物主要有聚醚（PAG）、聚乙烯醇（PVA）等，其冷却能力可通过溶液浓度及温度（10～40℃）来调节。合金铸铁件如CrNiMo合金铸铁凸轮轴应采用温度为40～80℃的淬火油来淬火。一些淬火层深很浅的大工件，如发动机气缸盖上的阀座可采用450kHz高频电流感应加热10s后自冷淬火，有的还用压缩空气吹冷淬火。对于深层感应加热工件如十字轴可采用流水来强烈冷却，以便提高表面硬度（>60HRC）和获得良好的表面残余压应力层。

采用喷水淬火是最广泛的。可通过调喷水压力和流速来调节冷却速度，喷水的水压一般是0.2～0.6MPa范围内，压力高则冷速愈大，喷射冷却还可随时带走冷却水汽化形成的气泡及其它粘结物，从而改善淬火的均匀性。喷射淬火的水流量是据工件大小、同时加热面积及淬火层深确定的，小工件的水流量只有3～5m³/h，而整体淬火的半轴需50～80m³/h的水流量。连续淬火时喷射水流量应保证工件表面湿透，使喷射区离开工件时，表面淬火介质不致于蒸干，从而出现不完全淬火。这与要求自热回火的整体感应加热喷射淬火的工件不同。

2.4.4.4 回火方法

感应加热后的工件必需进行低温回火，以减少淬火应力和脆性。通常有自热回火、感应加热回火和电炉回火。半轴、转向节、拖曳钩均采用中频淬火后自热回火。采用自热回火应具备以下条件：a. 是整体或分段整体加热淬火而不是连续淬火；b. 有足够的热量来自热回火，即淬火层较厚，通常是中频加热淬火才行；c. 形状简单的碳钢或低合金钢工件，即不易开裂工件。自热回火是利用感应加热淬火工件内部的余热对工件表面从新加热来实现的，此时温度可达250℃左右。它是靠控制喷水时间、水量、水压来达到的，其变动因素较多，因此应注意检查和精心操作，对于易开裂的工件应在炉中回火，回火温度为150℃左右。表面淬火件比炉内加热淬火的工件回火温度低，时间也略短些。

感应回火比炉内回火时间短得多，仅几秒钟，因而它的回火温度要比炉内回火高，以便补偿加热时间不足。活塞杆的感应回火机床与淬火机床布置在一起，或在一台机床上完成，与感应淬火的生产节拍相同。为了保证回火时间，感应器长度（或圈数）应增加，频率应比淬火电流频率低的多。活塞杆采用感应回火的优点是可与加工线的生产组成一体，避免过多零件堆积，节省面积，减少装卸操作，从而节省生产费用。汽车半轴连续淬火后也可采用感应回火。感应回火的另一用途是局部回火，变速器的二轴、中间轴、后桥主动齿轮等渗碳件的螺纹部分都广泛采用8kHz中频局部加热（8～12s）回火（亦称退尾）。直径较细（M14）的吉普车球头销螺纹采用高频（250kHz）局部加热回火，齿轴的螺纹部分回火后相同于齿的

心部硬度 33～48HRC，而球头销的螺纹回火硬度是 28～40HRC。采用这种回火来代替过去的铅浴回火除了明显的经济效益外，更重要的优点是安全、无污染。

2.4.4.5 感应加热变频装置

感应加热所用的变频装置包括高频（200～500kHz）、超音频（30～60kHz）和中频（1～10kHz）。过去的高频、超音频全是电子管式变频装置，近年来这些装置采用了高压硅整流器、微机调压和负载匹配宽的振荡回路，使设备稳压精度提高，抗干扰能力强，输出匹配广，操作更方便。

国内已有几十个可控硅中频装置生产厂家，在汽车工业中已广泛应用。最新的微机控制可控硅中频电源优点是：a. 电效率高达 90%～95%，自动调节方便；b. 电源频率自动跟踪负载频率的变化；c. 可实施恒功率输出，保证工件加热温度稳定；d. 节水、省面积、无噪声，可在生产线上布置。

近年来，全固态高频装置已开始生产。这种全晶体管高频装置优点是：a. 电效率高达 85%（原电子管高频设备电效率为 60%）；b. 不用预热，可随时启动运行；c. 可以进行恒功率、恒电压、恒电流的输出控制；d. 频率自动跟随，使电源频率与负载的自激频率自动匹配，设备调节很方便；e. 使用寿命高，维护费用低；f. 体积小，仅为电子管高频的 1/3、占地面积少等等。目前高频、中频及超音频的全固态变频装置都已能生产供应。国内生产的变频装置见表 2-4-12。

表 2-4-12 国内生产的变频装置

类 型	频 率 (kHz)	输出功率 (kW)	备 注
全固态高频装置	350	10	
	30、60、100、200	20、30、40、60、70、100、130、200、270、320	
全固态超音频装置	20、30	100、150、200、250	
全固态中频装置	4、10	100、150、200、250	
电子管高频装置	500～1000	10	一机单频或多频
	200～300	30、30、100	
	50、150	200	
电子管超音频装置	30～40	50、85	机单频或多频
可控硅中频装置	1、2.5、4、8	100、160、250	一机单频或多频

近年来变频装置的发展还表现在以下方面：

①一个变频装置可输出二档频率、四档频率即一机多频；

②设备的阳极电压输出功率稳定性高，如电源电压波动±10%，阳极电压可稳定在±1%范围内，当装有能量控制器时，输出功率波动不超过±1%；

③一般高频可供双工位或更多工位交替使用，提高了负载持续率；

④高频淬火变压器可离开电源柜一段距离，用多根铜线输出，从而使淬火变压器连同电容可以升降和前后移动；

⑤和淬火机床一起采用计算机数控；

⑥电源本身有良好的自屏蔽，安装在金属屋架厂房内时不用再加屏蔽（周围有特殊要求的除外）；

⑦可控硅中频也有二档频率 10/30kHz、3/9.6kHz 便于选用，频率能在一定范围内跟踪负载变化并自动调节，因而能保持较高的功率因素；

⑧可控硅中频保护装置齐全，有保护信号显示，故障率低，输出电压稳定±1%以内。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.4.4.6 感应加热淬火机床

大量生产的汽车工厂及专业化汽车零部件厂已普遍采用专用淬火机床和全自动淬火机床。国产的全自动凸缘轴淬火机床、半轴全自动整体感应加热淬火机床、拨叉轴专用卧式双滚轮导向自动淬火机床等均具有很高水平，汽车零件淬火机床的发展表现在以下方面：

①多工位淬火机床，多工位包括：a. 一台淬火机床交替生产两种零件；b. 一种零件的加热、淬火、回火、校直等多道工序；c. 对一个零件的不同部位（如曲轴的主轴颈、轴头和法兰、连杆轴颈等）分别实施多工位感应加热淬火；d. 一台淬火机床同时生产多个零件，轴类淬火机床可带自动校正功能。

②采用计算机和数控，可缩短转换的辅助时间和提高重现精度，对淬火过程的每个动作、参数进行自动控制和屏幕显示，自动记忆每个零件的工艺参数，并对不同零件编程，出现故障并自动报警和打印。

③机床的传动精度提高，移动速度稳定、定位精度达0.1mm或0.01°角，特殊要求的零件，如排气阀座孔感应器的重复定位误差<0.05mm。

④齿轮双频加热淬火机床可实现汽车齿轮的仿齿廓表面淬火，与单一频率加热淬火相比，减少了淬火变形，齿轮从渗碳淬火改为感应淬火取得了非常好的效益。

⑤板簧、悬架弹簧、扭杆弹簧、平衡杆和膜片弹簧均可采用感应加热成形淬火，具有启动快、停机方便、无氧化、节能、占地面积少、无污染等优点。

⑥轿车的转向齿条采用接触式高频感应电阻加热淬火，它依靠零件感应和自身电阻发热到淬火温度后淬火冷却。

⑦凸轮轴、曲轴感应淬火机床装有能量监控器（kW·s）可控制能量输出稳定在±1%以内；有的曲轴淬火机床已装有脉动加热功率分配器，可使连杆轴颈下止点位置施加功率比上止点位置施加功率高30%～50%，从而防止下止点过热，使淬硬层深均匀。有的曲轴淬火机床还可进行曲轴圆角淬火。

⑧淬火机床也正在向柔性化方向发展。对同一类型不同规格的工件或尺寸相同而材料和技术要求不同的工件可在同一台全自动淬火机床上完成感应淬火。例如：凸轮轴淬火机床已能贮存多种淬火工艺程序，实现柔性生产。某公司生产的轴类淬火机床已装有磁尺，可根据工件长度不同识别出多达15种轴类零件，对它们分别实施不同的生产控制。

2.4.5 汽车紧固件热处理

汽车紧固件是汽车上起着连接、定位和紧固作用的基础零件，包括螺栓、螺母、铆钉、销、螺钉、键和垫圈等，又称为标准件，它们质轻而量多。每辆整备质量5t的载货汽车有7000多个紧固件，约占汽车零件总数的1/2，但质量总和还不到100kg。

轿车紧固件的结构与载货汽车紧固件相比，有很大变化，品质要求有较大提高，主要是高强度、高精度、组合化、异型化以及很高的可靠性。载货汽车紧固件的高强度一般是8.8级，极个别用10.9级。某轿车的紧固件上10.9级有36种124件，12.9级的有4种34件。力学性能在8.8～12.9级的螺钉、螺栓和力学性能8～12级的螺母约占紧固件总数的45%，这些紧固件都需经热处理强化。据某汽车标准件厂统计：该厂生产的紧固件中有75%以上加工后要进行热处理，包括调质、渗碳、碳氮共渗。此外为了使用要求，有的紧固件加工后需再结晶退火和去应力回火处理。

螺纹连接件有3种生产工艺：a. 用低碳钢（如ML15）经冷镦成形，强度要求$\sigma_b \leqslant 700MPa$，螺纹加工后不再进行热处理，此类约占总数的25%；b. 用35、45钢制的8.8～9.8级、15MnVB和20MnVB钢制的9.8～10.9级、用40Cr钢制10.9级和35CrMo钢制12.9级的高强度螺栓，通过冷镦、滚丝及其它加工成形后再进行最终热处理强化，此类约占总数的60%以上；c. 先经调质处理后再经机加工、磨削及滚丝来进一步强化的零件，此类零件包括螺纹精度高（6H、6g级）、细牙螺纹、尺寸长、怕变形以及不允许丝毫脱碳的关键零件（如缸盖螺栓、连杆螺栓）。有的工厂在零件图纸上明确规定了冷作硬化要求，这类零件约占10%，标准件厂一些典型零件的热处理工艺及技术要求见表2.4.13。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-4-13 紧固件材料及热处理工艺

零件名称	材料	淬火		回火	硬度 HB		金相和强度要求
		温度（℃）	冷却	温度（℃）	回火后	淬火后	
螺栓	15	碳氮 860	水	210±10	≥561HRC		层深 0.05～0.20mm
六角头凸缘螺栓	ML35	870±10	碱水	500±20	265～320	≥444	E≥0.384，G≤0.015，8.8 级
定位环～离合器	35	870±10	油	340±20	399～478HV	≥444	
定位销	35	870±10	碱水	500±20	30～35HRC	≥46HRC	
车轮螺栓 M13	ML35	850±10	碱水	540±20	232～298	≥444	
内六花螺栓 M12	ML35	870±10	碱水	540±20	232～298	≥444	E≥0.460，G≤0.015
组合螺栓 M9	ML35	870±10	碱水	540±20	232～298	≥444	E≥0.480，G≤0.015
进排气门弹簧座	ML15	碳氮 860	碱水	320±20	82～85HR15N	≥89.5HR15N	层深 0.25～0.50mm
锁块	15	渗碳 930	碱水	160±10	81.5～83HRA	≥81.5HRA	层深 0.45～0.70mm
进气歧管螺栓	ML15MnVB	870±10	碱水	440±20	263～332	≥341	E≥0.344，G≤0.015，9.8 级
缸盖双头螺栓	ML20MnVB	870±10	油	460±20	28～36HRC	≥39HRC	F≤3，E≤0.07mm
正时齿轮螺栓	ML20MnVB	870±10	油	420±20	306～360		F≤3，10.9 级
螺栓（M15）	ML20MnVB	870±10	油	400±20	295～363	≥352	F≤3，100%探伤并退磁
高强度螺母	40Cr	860±10	油	520±20	28～35HRC	≥47HRC	10 级
飞轮螺栓	35CrMo	860±10	油	460±20	350～391	≥488	E≥0.46，G≤0.015，12.9 级
缸盖螺栓	ML20MnVB	870±10	油	400±20	34～38HRC		F≤3，10.9 级

注：F 指铁素体级别。脱碳值 E、G 的测定参看图 2-4-13，E、G 的单位为 mm。

2.4.5.1 紧固件调质处理

表 2-4-13 中调质处理是采用生产能力为 350kg/h 的输送带式炉（K-130）、400kg/h 的网带式炉（Rc-200-9）和 500kg/h 的铸链式炉（RW-130-9）进行的，它们分别采用：a. 吸热式保护气（60m³/h）；b. 甲醇滴注式（50L/h）气体；c. 氮气（4～8m³/h）+甲醇（3L/h）作保护气体。炉气耗量差异反映了炉子密封的好坏。

表 2-4-13 中列出了各种钢材、零件的热处理工艺；淬火加热温度可按 Ac3+(30～50)℃确定。在连续式炉内（表中所示零件）加热均在 30～50min 内完成，其中加热时间为 20～25min，保温时间为 10～25min，如在盐浴炉内淬火加热，则按有效厚度的 0.3～0.4min/mm 计算，如在箱式炉内则应按 1～1.5min/mm 计算。需要复碳的紧固件，其加热时间应按炉气氛、炉型、原材料及脱碳情况来确定，一般应略长于正常淬火加热时间。

表中淬火介质为快速淬火用油和浓度为 1.5%～3%的碱水溶液。合金钢淬油，但 15MnVB 钢件在必要时也可淬碱水。含碳低的碳钢件应淬水，但形状复杂直径较小的中碳钢（40 或 45 钢）紧固件为防止淬裂也应淬油。

回火温度按力学性能要求选择；在 300～400℃回火能引起第一类回火脆。合金钢、特别是 Cr 钢和 CrNi 钢在 600～700℃还会引起第二类回火脆，但在 500～650℃回火时回火脆性形成较迟缓，所以可在 550～650℃回火，回火后应在水中急冷，以防回火脆性。表 2-4-13 中零件回火后用防锈液冷却，以防在生产过程中零件就锈蚀，有的连续式调质线回火后的冷却液配成了氧化液成分，在氧化“冷却”液中氧化（发黑或发蓝）处理，简化一道工序。

汽车论坛 http://www.qclt.com

必须保证紧固件整个断面完全淬透，特别是15MnVB和20MnVB钢等低碳合金钢制成的紧固件，不能通过降低回火温度来勉强达到产品的硬度要求。为防止汽车装配或使用过程中残余伸长波动过大，不能确保使用要求，甚至发生掉头事故。因此淬火后应检查表面硬度，并抽检心部硬度和铁素体级别。此外，还规定了高强度螺栓的最低回火温度（表2-4-14），以上措施都是为了保证良好的淬火效果。

表2-4-14 不同材料的各级螺栓的最低回火温度

性能等级	材料和热处理	最低回火温度（℃）
8.8	低碳合金钢（含B、Mn或Cr）、淬火、回火、中碳钢淬火、回火	425 450
9.8	低碳合金钢（含B、Mn或Cr）、淬火、回火、中碳钢、淬火、回火	410 410
10.9	低碳合金钢（含B、Mn或Cr）、淬火、回火	340
10.9	中碳钢、淬火、回火 中碳合金钢（含B、Mn或Cr）、淬火、回火	425
12.9	合金钢	380

关键的螺纹紧固件如缸盖螺栓、飞轮螺栓还要作下列试验：a. 保证载荷试验，将螺栓加载至62.6kN，保载15s，测量螺栓永久变形量小于规定值（飞轮螺栓为12.5μm）。b. 楔负载试验，如飞轮螺栓规定：偏斜拉伸的最小拉力载荷为78.7kN，拉伸应力≥1 220MPa，偏斜角度6°，断裂时，不得断在头部。c. 与空气接触的高强度螺栓应进行延迟断裂试验。

原材料脱碳，淬火炉密封差和炉气氛控制不住都会使螺纹脱碳而强度不足，在装配或使用中脱扣而失效。表2-4-13中对紧固件规定了脱碳的限定范围，关于表中E、G值的测量参看图2-4-13：金相法脱碳层测量的示意图。除引进新汽车产品中对脱碳有特殊要求外，国内紧固件的脱碳控制是执行GB3098.1—82标准，它是根据产品的力学性能等级的要求来限定的，要求力学性能级别愈高，对脱碳控制也愈严。

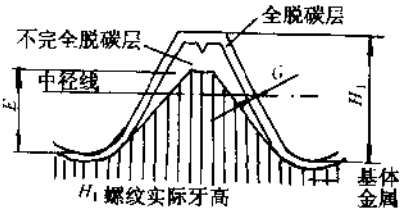


图2-4-13 脱碳层测定

2.4.5.2 紧固件的化学热处理

有许多紧固件需要进行化学热处理，如锁块、平头销、车轮螺母、杯形螺母、自攻螺钉、气门帽、卡扣等要经渗碳或碳氮共渗；还有一些管接件、卡套等要求氮化。紧固件的化学热处理多数是浅层渗碳和碳氮共渗。炉子密封要好，炉气恢复要快。

2.4.5.3 紧固件热处理用的连续式炉

汽车紧固件的调质、渗碳和碳氮共渗普遍使用输送带炉（包括网带式、链板式等）、清洗机（包括淬火前、淬火后）及淬火槽、冷却槽、上料机等组成完整的自动线。近年来，国内外输送带炉的制造水平均有较大提高。图2-4-14是某公司生产的T型可控气氛网带炉，该炉可用于气体渗碳、碳氮共渗并随后水淬、油淬或盐浴淬火，该炉主要优点是：①通过气密马弗罐、火焰帘幕、网带通道水封、淬火介质帘幕等实现炉气氛与空气、淬火液的水蒸汽及炉砖衬内的潮气隔绝，保证气氛控制稳定可靠；②炉内分区控制温度、气氛并可满足不同产品对工艺（温度、碳势）曲线的要求；③安在马弗内的大风扇强力扰动炉气，以增进炉内温度和气氛的均匀性，也加快了升温和渗碳速度；④由于采用活动底板驱动的网带输送机构，使设备运行稳定、工件传送可靠。图2-4-15是某公司生产的炉气可再利用的网带炉示意图；在网带炉进料口收集炉内排出的废气，经冷却后鼓入再生装置，以便除去污染杂质，使气体还原后再使用，并驱使气体流动，保证炉内温度和气氛均匀。该公司产品没有马弗罐，但也有分区装置和隔断空气防止污染炉气氛的

汽车论坛 http://www.qclt.com

装置，可保证气氛良好循环、可靠调节。

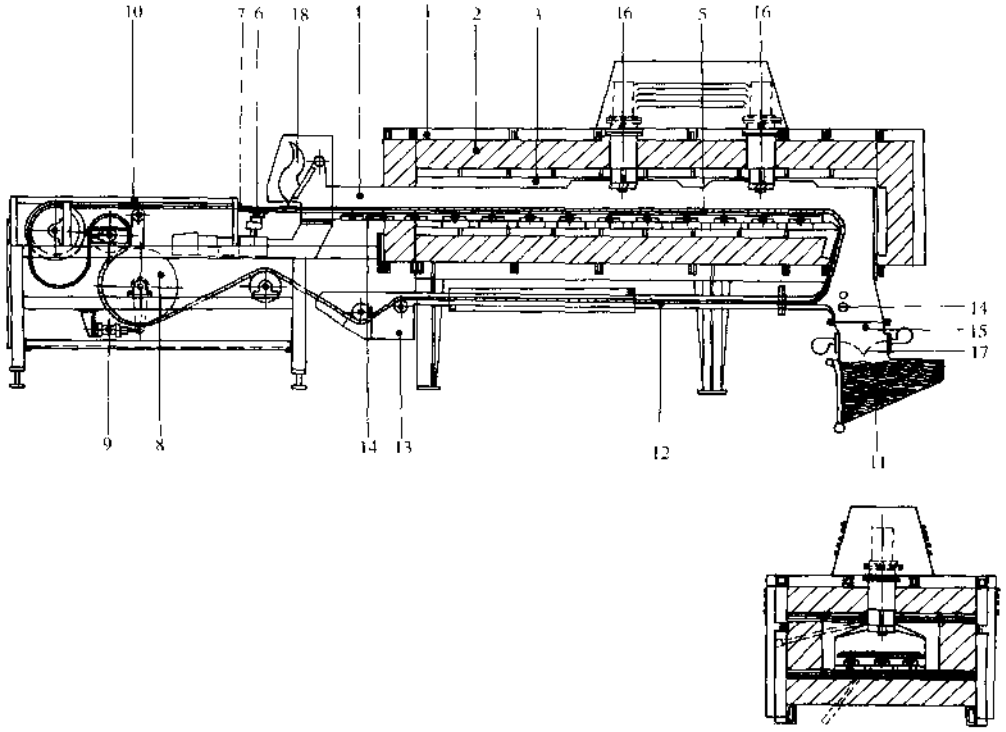


图 2-4-14 T型可控气氛网带炉

1-金属架；2-隔热层；3-加热室；4-气体密封马弗；5-活动炉底板；6-炉底板驱动机构；7-传送网带；8-驱动鼓轮；9-驱动鼓轮机构；10-装料台；11-淬火槽；12-返回导管；13-水封；14-气体进口；15-滑道；16-风扇；17-淬火剂帘幕；18-火焰帘幕

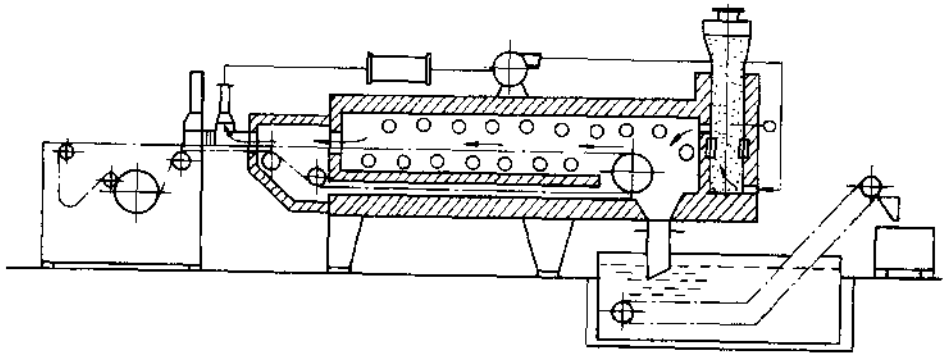


图 2-4-15 炉气可再利用的网带炉

2.4.5.4 紧固件坯料热处理

国内大型标准件厂都有很大的酸洗、拔丝车间，对不合格或规格过大的来料进行酸洗、扒皮、冷拔和预备热处理，有的来料要经 2－3 次拔丝退火或正火后才能使用。例如：ϕ10mm 的 ML15MnVB 钢盘料要拔细到 ϕ6.98mm，使用时，就应采用以下工艺路线：退火→酸洗→冷拔（ϕ8.25mm）→退火→酸洗→磷

汽车论坛 http://www.qclt.com

化→冷拔（φ6.98mm）。如果是需经切削成形的35钢螺栓，为保证随后的切削要求，应在冷拔到φ6.98mm后再正火一次。如在钢厂进行拔丝就可大大简化工序、节约能耗、节约原材料，但要增加防锈和包装工序。

坯料预备热处理的目的是为以后的加工成形作好显微组织和力学性能准备。成形方法不同，要求的硬度和组织也不同，热处理工艺也不同。大致有以下3类：

①球化退火：要求的组织是在铁素体基体上均匀分布的球状碳化物组织，它们的硬度低、塑性好，冷成形时不易产生表面裂纹、模具寿命也相对延长。具体工艺见表2-4-15。

②正火与完全退火：亚共析钢是片状珠光体加铁素体组织最适合于切削加工，它易断屑、不粘刀、加工后表面光洁。因此，对于低、中碳钢及低、中碳合金钢均应采用正火处理，45Cr、35CrMo钢因正火后硬度较高者，可采用完全退火处理。有关工艺见表2-4-15。

③再结晶退火：在冷拔过程中，由于加工硬化，需进行中间退火即再结晶退火，以恢复材料冷拔前的性能。具体工艺见表2-4-15。

表2-4-15 紧固件坯料的预备热处理工艺

目的	钢号	工艺 加热温度	热处理规范	技术要求
为了冷镦和冲压成形	（ML）10、15、20、25、15Cr、20Cr、15MnB、15MnVB、20MnVB	普通球化退火 Ac1±（20～40）℃	ML12线材：（720±10℃）保温3～5h后炉冷到550℃后空冷 ML20MnVB：（800±10）℃保温5～7h后炉冷到550℃后空冷	ML12 硬度≤143HB； 20MnVB 硬度≤170HB φ7mm 脱碳≤0.20mm
	（ML）35、40、45、40Cr、35CrMo		ML35线材： （720±10℃）保温3～5h后炉冷到550℃后空冷	ML35φ9mm 硬度≤156HB； 脱碳≤0.20mm 35CrMo149～179HB
	（ML）35、40、45	等温球化退火 Ac1±（20～40）℃	（750±10）℃保温3～5h后炉冷到（670±10）℃保温2～3h后炉冷到500℃空冷	
	（ML）40Cr、35CrMo		40Cr线材：（770±10）℃保温4～5h后炉冷到（670±10）℃保温3～5h后炉冷到500℃空冷	φ12～φ16mm 40Cr轧材 ≤160HB
为了便于切削加工	Y12、15、20、25、30、35、40、45、15Cr、20Cr	正火 Ac3±（40～60）℃	Y12材：920℃保温3h后空冷，45钢830℃保温3h后空冷	10钢硬度126～156HB；20钢硬度137～170HB
	45、40Cr、45Cr、35CrMo	完全退火 Ac3±（30～50）℃	（820±10）℃保温2～3h后炉冷到500℃后空冷	45钢硬度156～217HB
恢复延性和塑性便于再冷镦	（ML）10、15、20	再结晶退火，再结晶以上温度	（700±20）℃保温2～3h后炉冷到500℃后出炉	ML15 硬度≤140HB
成形后为了使用恢复塑性消除应力	ML10、15、20	再结晶退火 温度同上	ML15铆钉和铆接螺母：720℃加热1～2h后炉冷到550℃后空冷	ML15 硬度≤78HRB
	ML15、20、25	去应力退火 Ac1 （100～200）℃	ML15半头销：（500±20）℃保温0.5h后空冷 ML35滚花销：（500±20）℃保温0.5h后空冷	ML15 硬度109～209HB ML35 硬度167～225HB

紧固件还有些退火工艺：它们不是为加工成形所需的预处理，而是使用前的最终热处理。例如：铆钉、铆接螺母采用铆螺钢成形后进行类似再结晶的去应力退火。此外，一些强度要求不高的紧固件由于加工中引起严重的内应力集中，头杆结合处隐藏着断裂的危险，应当进行去应力退火来恢复紧固件的正常性能。其工艺温度为Ac1（100～200)℃保温后空冷或炉冷到200～300℃后空冷。

2.4.5.5 坯料热处理设备

表2-4-15中的球化退火、正火、完全退火的实例是在大型罩式炉内进行的，炉子工作尺寸为6m×2.3m×1.4m（$L\times B\times H$)、功率300kW、装炉量30t、用作退火。较小的规格罩式炉工作尺寸为6m×1.42m×1.4m，装炉量为20t。罩式炉装炉方便，可处理盘料，也可处理棒料。但该设备靠沙封隔断空气，密封效果很差，被处理后的坯料的氧化严重，所以每次退火或正火后均要酸洗一次，给生产带来麻烦和浪费。该炉也无炉气循环和搅拌系统，因而工件加热缓慢，炉温也不均匀，热处理质量差，硬度欠均匀，给冷拔和冷镦带来麻烦。

生产批量大的工厂最宜采用辊底式退火炉，根据产量和工艺要求不同，这种炉子通常有40～60m长，加热区两端有真空锁气室。盘料装入锁气室后，抽真空，送入氮气，换气后，再按周期将盘料推入加热室进行退火加热。加热过程中也需通入氮气保护，氮气纯度应99.9%以上。加热后的盘料送入快冷区，快冷区的炉壁上有冷却水套控制冷却速度，然后盘料再经保温区和冷却区出炉。这种炉子多数采用废气预热空气的煤气辐射管加热，热效率高。这类炉子和其它连续炉的共同缺点是：不宜经常更改工艺，不能作长棒料退火处理。国内某重型机器厂已能制造这种大型的辊底式连续退火炉。

盘料的光亮退火常采用强对流保护气氛罩式炉。一套炉子由一个加热罩、两个炉台、两个保护内罩、一个冷却罩以及电控、抽真空和保护气氛发生装置组成。盘料放在炉台上，炉台是由耐热合金钢构件底座和陶瓷纤维毡等隔热材料制成。钟罩和底座间采用二而水冷的气密胶环密封。底座上安有直径为960mm的叶轮风扇，转速高达1500r/min，转速可调。在升温和降温时采用大风量，加速传热，保温时用小风量，从而提高了升、降温速度，炉温均匀。外罩上安有电热元件或烧嘴，所以外罩也是加热罩。内罩是用1Cr25Ni20Si2耐热钢制成。为了提高换热面积、传热效果和炉温均匀性，也为了延长内罩寿命，内罩被压制成波纹面的形式。这种炉子的优点是：a. 炉温均匀（≤5℃），炉料退火后晶粒均匀，硬度差少，表面光亮；b. 缩短生产周期，强制对流加快了加热和冷却速度，每炉时间从58h缩短到28.5h；c. 采用真空清打，节约了氮气，也更为安全。

表2-4-16为汽车常用结构钢、弹簧钢牌号及临界点。

表2-4-16 汽车常用结构钢、弹簧钢牌号及其临界点

钢号		零件	钢的临界点		
国内牌号	国外牌号		Ac1	Ac3	Ms
20CrMnTi	18ХГТ	载货车齿轮	740	825	360
20MnVB		5t车后桥齿轮	730	845	380
15CrMn	16MnCr5	从动齿圈、输入轴	750	845	400
20CrMn	20MnCr5	内轴、换档齿轮	725	810	360
23Cr	23Cr4	换档轴	735	832	380

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

钢号		零件	钢的临界点		
国内牌号	国外牌号		Ac1	Ac3	Ms
25Cr	25Cr4	换档齿轮	738	827	370
28Cr	28Cr4	换档齿轮及齿套	740	823	360
20Cr	SCr420H	微型车变速器齿轮	766	838	385
20CrMo	SCM420H	载货车齿轮	750	830	385
22CrNiMo	SCM822H	载货车齿轮	728	837	380
20CrNiMo	8620	载货车后桥齿轮	706	45	420
20CrNi2	4320	主被动锥齿轮	715	775	340
12CrNi3		齿轮、越野车半轴	715	782	380
20CrNi	19CN5	中间轴、换档齿轮	720	800	410
14CrNi	14CN5	齿轮	720	810	425
40Cr	40X	吉普车换档齿轮、轴	743	782	330
20		摇杆，速度表齿轮	735	855	420
35		拉臂	724	802	360
45		套筒扳手、制动凸轮	724	780	350
45Mn2		轴	715	770	245
40MnB		轴、转向臂	730	780	355
65Mn		弹簧	726	765	270
60Si2Mn		弹簧	755	810	275
50CrV		弹簧	752	788	300
55SiMnVB	50CrV4	板簧	745	790	

注：部分临界点是由刘云旭教授计算得来，仅供参考。

（撰稿人：林　锋）

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.5 加工部分

2.5.1 机械加工基础

2.5.1.1 金属切削原理

1）切削运动与切削用量

（1）加工中的工件表面

切削过程中同时存在3个不同的变化着的表面（图2-5-1）：①已加工表面；②待加工表面；③过渡表面——工件上由切削刃形成的那部分表面。

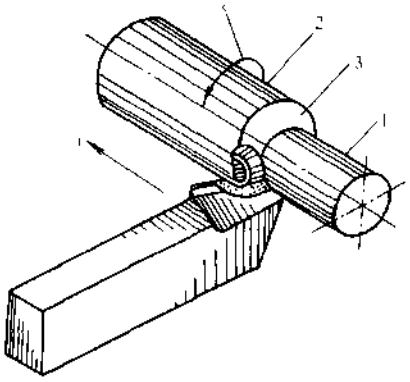


图2-5-1 车削时的运动和工件上的3个表面
1-已加工表面；2-待加工表面；3-过渡表面

（2）切削运动

要将工件上多余的金属层切除，刀具和工件之间必须有一定的相对运动，即主运动和进给运动。

①主运动——使刀具和工件之间产生相对运动，从而使刀具前面接近工件。它可以是旋转运动，也可以是直线运动。此外，它也是速度最高、消耗功率最多的运动。

②进给运动——使刀具与工件之间产生附加的相对运动，加上主运动，即可不断地或连续地切除切屑，并得出所需几何特性的已加工表面。

主运动可以由工件完成（如车削、龙门刨削等）；也可由刀具完成（如钻削、铣削等）。进给运动也同样可以由工件完成（铣削、磨削等）或刀具完成（车削、钻削等）。

在各种类型的切削加工中，主运动只有一个，而进给运动可以有一个（如车削）、两个（如外圆磨削）或两个以上。有的切削加工，如拉削，就只有主运动，而没有进给运动。

（3）切削用量

切削用量包括以下3个要素（图2-5-2）：

a. 切削速度（v_c）：切削刃选定点相对于工件的主运动的瞬时速度称为切削速度，其计算公式如下：

$$v_c = \frac{\pi d n}{1\,000} \ (\mathrm{m/min}) \tag{2-5-1}$$

式中：d——切削刃选定点的回转直径，mm；

n——工件或刀具的转速，r/min。

b. 进给量（f）：刀具在进给运动方向上相对于工件位移量称为进给量，单位为mm/r，或mm/st，进给速度（v_f）是指切削刃上选定点相对于工件的进给运动的瞬时速度，它与进给量（f）之间的关系为：

$$v_f = fn \ (\mathrm{mm/min}) \tag{2-5-2}$$

对于铰刀、铣刀等多齿刀具，常要规定出每齿进给量 f_z，即

$$f_z = \frac{f}{z} \ (\mathrm{mm/z}) \tag{2-5-3}$$

式中：z—刀齿数。

c. 吃刀量（a或a_p）：吃刀量又分为背吃刀量（a_p或a_{sp}）、侧吃刀量（a_e或a_{se}）和进给吃刀量（a_f或a_{sf}）。

汽车论坛 http://www.qclt.com

车削中一般只使用背吃刀量和进给吃刀量两个参量，现介绍其定义如下：

背吃刀量（a_p 或 $a_{\gamma p}$）——在通过切削刃基点并垂直于工作平面的方向上测量的吃刀量。

外圆车削时，背吃刀量 a_p 的计算如下（图 2-5-3）：

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \text{ (mm)} \qquad (2\text{-}5\text{-}4)$$

式中：d_w ——工件待加工表面直径，mm；

d_m——工件已加工表面直径，mm。

如为镗孔，则式（2-5-4）中的 d_w 与 d_m 互换一下位置。

进给吃刀量（a_f 或 $a_{\gamma f}$）——在切削刃基点的进给运动方向上测量的吃刀量。

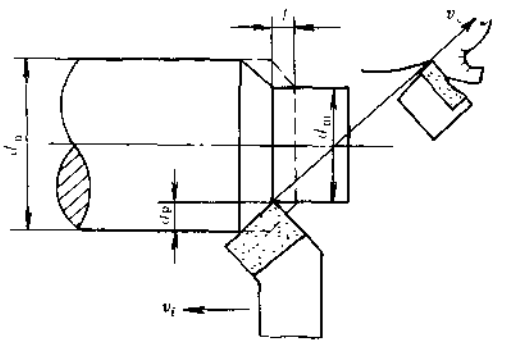


图 2-5-2 切削用量三要素

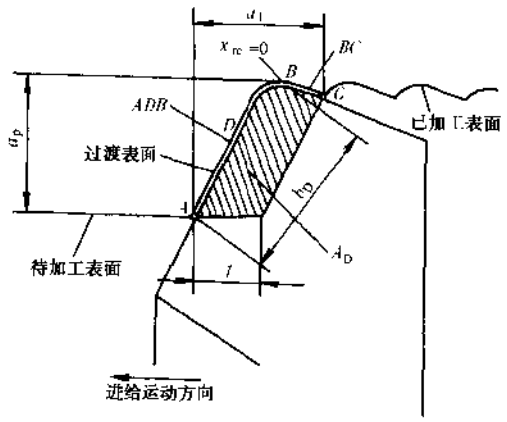


图 2-5-3 车削时的吃刀量、进给量及切削层尺寸

2）刀具角度的参考系

刀具切削部分的几何形状，刀具表面在空间的相对位置，可用几何角度表示。确定刀具几何角度的参考系有两类：一类称为刀具静止参考系，又称标注参考系。刀具设计图上所标注的刀具角度，就是以它为基准的。刀具在制造、测量和刃磨时，也均以它为基准。另一类称为刀具工作参考系，又称动态参考系，它是确定刀具在切削运动中有效工作角度的基准。它同前一类参考系的区别在于，在确定参考平面时考虑了进给运动的影响。通常情况下由于进给速度远小于主运动速度，所以刀具的工作角度近似地等于标注角度。在此，主要介绍刀具静止参考系。

组成刀具静止参考系（图 2-5-4）的参考平面有：

（1）基面（p_r）

过切削刃选定点的平面，它平行或垂直于刀具在制造、刃磨及测量时适合于安装或定位的一个平面或轴线，一般说来其定位要垂直于假定的主运动方向。

（2）切削平面

通过切削刃选定点与切削刃相切并垂直于基面的平面。它分为主切削平面（p_s）和副切削平面（p_s'）。

（3）正交平面（p_o）

它是通过切削刃上的选定点并同时垂直于基面和切削平面的平面。因此，它必然垂直于切削刃在基面上的投影。

（4）法平面（p_n）

它是通过切削刃选定点并垂直于切削刃的平面。

（5）假定工作平面（p_f）

该平面通过切削刃选定点并垂直于基面，而且平行或垂直于刀具在制造、刃磨及测量时适合于安装或定位的一个平面或轴线，一般说来其方位要平行于假定的进给运动方向。

（6）背平面（p_p）

通过切削刃选定点并垂直于基面和假定工作平面的平面。

3）刀具在静止参考系内的切削角度

（1）刀具切削部分（图 2-5-5）的组成

汽车论坛 http://www.qclt.com

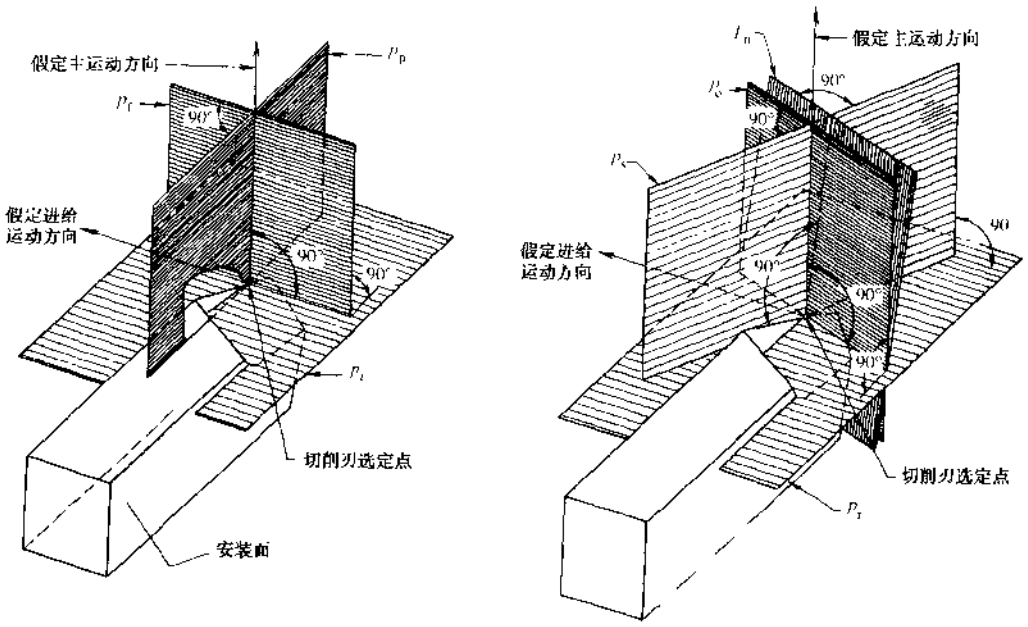


图 2-5-4 刀具静止参考系的平面

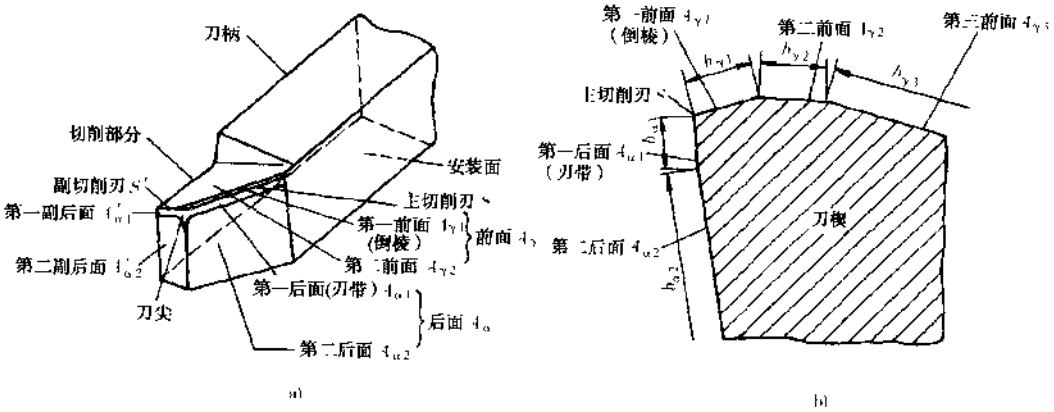


图 2-5-5 车刀切削部分的要素

切削刀具具有以下主要要素：

前刀面——切下的切屑沿其流出的表面；

主后刀面——和工件加工表面相对的表面；

副后刀面——和工件已加工表面相对的表面；

主切削刃——前刀面和主后刀面的交线，它担任主要切削工作；

副切削刃——前刀面和副后刀面的交线，它完成一小部分切削工作；

刀尖——主切削刃与副切削刃的交点。

(2) 刀具几何角度的定义

刀具角度是指刀具在静止参考系中的角度。刀具的角度名称、符号和定义如表 2-5-1 所示。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-5-1 刀具角度、符号和定义

角度名称		符号	定义
在正交平面中测量的角度	前角	γ_o	前面与基面间的夹角
	后角	α_o	后面与切削平面间的夹角
	楔角	β_o	前面与后面间的夹角 $\gamma_o+\alpha_o+\beta_o=90°$
在基面中测量的角度	主偏角	κ_r	主切削平面与假定工作平面间的夹角
	副偏角	κ_r'	副切削平面与假定工作平面间的夹角
	余偏角	ψ_r	主切削平面与背平面间的夹角
	刀尖角	ε_r	主切削平面与副切削平面间的夹角
在主切削平面中测量的角度	刀倾角	λ_s	主切削刃与基面间的夹角
在法平面中测量的角度	法前角	γ_n	前面与基面间的夹角
	法后角	α_n	后面与主切削平面间的夹角
	法楔角	β_n	前面与后面间的夹角
在假定工作平面中测量的角度	侧前角	γ_f	前面与基面间的夹角
	侧后角	α_f	后面与主切削平面间的夹角
	侧楔角	β_f	前面与后面间的夹角
在背平面中测量的角度	背前角	γ_p	前面与基面间的夹角
	背后角	α_p	后面与切削平面间的夹角
	背楔角	β_p	前面与后面间的夹角

(3) 刀具角度的选择

合理的刀具角度，是在保证加工质量和经济耐用度的前提下，能达到提高生产效率或降低成本的刀具几何参数。刀具的合理选择可参照表 2-5-2。

表2-5-2 刀具角度选择表

角度名称	作用	选择时应考虑的因素
前角	增大前角刃口锋利、减小切削层塑性变形和摩擦阻力，降低切削分力和切削热以及功率消耗 前角过大将导致切削刃和刀头强度降低，减少散热体积，使刀具寿命降低，甚至造成崩刃	1. 工件材料的强度、硬度低、塑性较好时，应取较大前角；加工硬脆材料应取小前角，甚至取负值； 2. 刀具材料抗弯强度和冲击韧度较高时，可取较大前角； 3. 成形刀具和齿轮刀具为减小齿形误差，常取较小前角，甚至取零度前角； 4. 粗加工、断续加工或有硬皮的铸锻件粗切时，应取较小前角； 5. 工艺系统刚性差或机床功率不足时应取较大前角

续上表

角度名称	作　　用	选择时应考虑的因素
后角	后角的重要作用是减小刀具后面与工件过渡表面之间的接触摩擦。后角过大会降低刀具的强度，并使散热条件变坏，从而降低刀具寿命或造成崩刃	1. 工件材料强度、硬度较高时，为保证刀具强度，应取较小后角。对软韧的工件材料，后刀面摩擦严重，应取较大后角。加工脆性材料时，切削力集中在刃口处，为提高刀具强度，宜取较小后角； 2. 粗加工、强力切削、承受冲击载荷刀具，要求刀具强固，应取较小后角，精加工及切削层公称厚度较小的刀具，磨损主要发生在后面上，为降低刀具磨损、提高已加工表面质量，应取较大后角； 3. 定尺寸刀具，如拉刀、铰刀等，为不使重磨后刀具尺寸变化较大，应取较小后角； 4. 工艺系统刚性较差时，宜适当减小后角，以增大后面与工件的接触面积，减小振动
主偏角	主偏角增大使进给力 F_f 增加、背向力 F_p 减小，可降低工艺系统的变形和振动 减小主偏角，刀尖处强度增大且作用切削刃长度增加（进给量 f 和背吃刀量 a_p 不变时）有利于散热和减轻单位刀刃长度上的负荷，提高刀具寿命。主偏角减小也会使表面粗糙度减小	1. 加工很硬的材料时，为加强刀尖强度，应取较小的主偏角； 2. 在工艺系统刚性允许时，应尽可能取小的主偏角，以提高刀尖寿命； 3. 粗加工和半精加工时，硬质合金车刀应取较大的主偏角以利减少振动； 4. 应考虑工件的形状和具体加工条件，如加工细长轴及需要中间切入工件或台阶轴时，都应取大的主偏角
副偏角	较小的副偏角可减小工件表面粗糙度、提高刀尖强度、增大散热体积，但过小的副偏角会增大背向力 F_p，在工艺系统刚性不足时会引起振动，恶化与已加工表面的摩擦	1. 在加工高强度和高硬度材料或断续切削时，应取小的副偏角，以提高刀尖强度； 2. 精加工时副偏角应取更小值，必要时可磨出一段副偏角为零度的修光刃； 3. 在不引起振动的情况下，可选取较小的副偏角； 4. 对切断刀、切槽刀、锯片铣刀、钻头等只能取较小的副偏角，以免重磨后尺寸变化大
刃倾角	1. 刃倾角影响切屑流出方向，负的刃倾角使切屑流向已加工表面，正的刃倾角使切屑流向待加工表面； 2. 影响切削刃锋利程度，增大刃倾角可增大实际工作前角和刀刃钝圆半径，使切削轻快并可切下很薄切屑； 3. 影响切削过程平稳性及刀刃受冲击位置，如采用的螺旋角（即刃倾角）的回转刀具，可使切入切出过程平稳。如取较大的负刃倾角的车刃刀具，可使刀尖迟接触工件，避免刀尖受冲击； 4. 影响切削分力的大小，当负的刃倾角增大时背向力 F_p 显著增大	1. 当加工材料硬度高或有大的冲击载荷以及强力切削时，应取负的较大的刃倾角，以保护刀尖； 2. 精加工时刃倾角取正值，使切屑流向待加工表面，切削刃锋利，因而已加工表面质量好； 3. 加工通孔的刀具取负刃倾角，可使切屑向前排出，加工盲孔的刀具则取正的刃倾角； 4. 在工艺系统刚性不足时，应尽量不用负刃倾角

汽车论坛 http://www.qclt.com

4）切削液

（1）切削液的作用

切削液的主要作用是在切削时对切削区域进行冷却和润滑。粗加工和半精加工时切削热量大，切削液的作用应以散热冷却为主。精加工和超精加工是为了获得良好的已加工表面质量，切削液以润滑为主。此外，切削液还应有防锈和清洗能力。

（2）切削液的组成与种类

为使切削液能满足各项性能的要求，切削液除含有基本成分（油基、水基）外，还含有用于调整各种作用而加入的添加剂。添加剂是一些化学物质，可分为油性添加剂、极压添加剂、表面活性添加剂和其它添加剂。

①油性添加剂含有极性分子，能与金属表面形成牢固的吸附薄膜，主要起润滑作用。

②极压添加剂是含硫、磷、氯等有机化合物的物质，在高温下它与金属表面起化学反应，形成润滑膜，可在边界润滑状态下，防止金属界面直接接触，减少机械摩擦。

③表面活性剂具有乳化作用和油性添加剂的润滑作用。前者使矿物油和水混合乳化，组成乳化液；后者吸附在金属表面上形成润滑膜。此外还有防锈添加剂、抗泡沫添加剂、防雾添加剂。添加剂选用恰当，可得到良好的切削液。

液体切削液分油基和水基两大类（前者润滑能力强，后者冷却能力强）：

①油基切削液可以是各种矿物油、动物油、植物油或由其它组成的复合油。视使用需要配入添加剂，如含极压添加剂的极压切削油。

②水基切削液可以是水、化学合成水溶液和乳化液。水基切削液中都含有防锈剂，也有再加入极压添加剂的。这种切削液有良好的冷却性能和清洗能力。

（3）切削液的选择

一个效果良好的切削过程与切削液关系密切，选择恰当的切削液能降低切削加工的成本，能保证获得优良的产品质量。

切削液的选择必须与车间的切削液供应系统相适应，同时考虑其经济性和安全性。

2.5.1.2 刀具材料

1）刀具材料的种类

汽车行业常用刀具材料有高速钢、硬质合金、陶瓷、金刚石、立方氮化硼等。

（1）高速钢

高速钢有较好的强度、韧性和切削红硬性，抗弯强度为一般硬质合金的2～3倍，韧性比硬质合金高几十倍，其可加工性也很好。目前，高速钢是制造各种复杂刀具的主要材料。高速钢按其切削性能通常分为通用高速钢和高性能高速钢两类，按化学成分分为钨系和钼系高速钢。

通用高速钢是指广泛用于制造各种普通结构钢、合金钢、铸铁、非铁合金等材料用刀具的钢种。常用的有W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2及W9Mo3Cr4V等。

高性能高速钢是在高速钢中增加了Co、V等合金元素的含量的高速钢。高速钢中加入Co，可提高钢的高温硬度和抗氧化能力；钢中增加V的含量，提高了高速钢的耐磨性。W2Mo9Cr4VCo8、W12Cr4V5Co5、W7Mo4Cr4V2Co5、W6Mo5Cr4V2Al、W12Cr4V4Mo等都是较常用的高性能高速钢。

粉末冶金高速钢是用粉末冶金工艺制成，一般多是含钴、钒的高性能高速钢。由于材料颗粒细小均匀，可磨性能优于通用高速钢，淬火变形小，刀具寿命要比熔炼高速钢高一倍左右。

（2）硬质合金

硬质合金是用高硬度难熔的金属碳化物（WC、TiC、TaC、NbC等）粉末，用钴或钼、镍为粘结剂，用粉末冶金方法制成。与高速钢相比，硬度高，耐磨性、红硬性好，刀具耐用度可提高几倍到几十倍。在相同耐用度下，切削速度可提高几倍。

汽车论坛 http://www.qclt.com

我国汽车行业常用的硬质合金分为3类：

钨钴类硬质合金：由碳化钨（WC）和粘结剂钴（Co）组成。常用的牌号有YG8、YG6、YG3、YG8C、YG6X、YG3X等。

钨钛钴（WC-TiC-Co）类硬质合金：这类硬质合金的碳化物除WC外，还含有5%～30%的TiC。常用的牌号有YT5、YT14、YT15及YT30等。

钨钛钽钴类硬质合金：在前两类硬质合金中加入少量的TaC。常用牌号有YG6A、YG8N、YW1、YW2等。

硬质合金刀具的发展极为迅速，常用的主要有以下几种：

涂层硬质合金：涂层硬质合金刀片是通过化学气相沉积（CVD），在硬质合金表面沉积一层约5μm的高硬度耐磨层，它把基体的高韧性和表面的高强度结合在一起，可显著提高硬质合金刀片的切削性能。通常切削速度可提高30%，或在同等切削条件下提高刀具寿命2～3倍。主要涂层材料有TiC、TiN、TiC+TiN、TiC+Al_2O_3、TiC+TiCN+TiN、TiC+Al_2O_3+TiN等多种。

超细晶粒硬质合金：它是一种高硬度、高强度刃口锋利的硬质合金，其晶粒尺寸小于1μm，且大部分小于0.5μm。它适于加工各种难切削材料，如不锈钢、耐热钢、冷硬铸铁、钛合金及铝合金等。

碳、氮化钛基硬质合金：它是以TiC、TiN为主要成分，再加入其它碳化物或氮化物，以镍、钼为粘结剂烧结而成。其主要优点为硬度高、抗氧化性好、摩擦系数小、切屑不粘结，国外称之为“Cermet”（金属陶瓷）。

（3）陶瓷

陶瓷材料比硬质合金具有更高的硬度（91～95HRA）和耐热性，在1 200℃的温度下仍能切削，耐磨性和氧化惰性好，摩擦系数小、抗粘结和扩散磨损能力强，因而能具有更高的切削速度，并可切削难加工的高硬度材料。主要缺点是性脆、抗冲击韧性差，抗弯强度低，主要有氧化铝基陶瓷和氮化硅基陶瓷。

（4）超硬刀具材料

超硬刀具材料包括天然金刚石、聚晶金刚石和聚晶立方氮化硼。

天然金刚石硬度范围为8 000～12 000HK，相对密度为3.48～3.56。天然金刚石是一种各向异性的单晶体，晶体的取向不同，耐磨性及硬度也有差异。天然金刚石的耐磨性极好，刃口锋利，切削刃的钝圆半径可达0.01μm左右，刀具寿命可长达数百小时。

聚晶金刚石是由金刚石微粉在高温高压下聚合而成，不存在各向异性，硬度比天然金刚石低，为6 500～8 000HK，价格便宜，焊接方便，可磨性好，是当前金刚石刀具的主要材料。

聚晶立方氮化硼是由单晶立方氮化硼在高温高压下聚合而成。由于成分及粒度的不同，聚晶立方氮化硼刀片的硬度在3 000～4 500HV间变动。其耐热性达1 200℃左右，化学惰性好，在1 000℃的温度下不与铁、镍和钴等金属发生化学反应。主要用于加工淬硬工具钢、冷硬铸铁、耐热合金及喷焊材料等，用于高精度铣削时可以代替磨削加工。

2）常用刀具材料的物理性能及适用范围

表2-5-3为常用刀具材料的硬度及抗弯强度。

表2-5-3 常用刀具材料的硬度及抗弯强度

刀具材料		碳素工具钢	合金工具钢	高速钢	硬质合金	陶瓷	聚晶立方氮化硼	聚晶金刚石	天然金刚石
室温硬度	HRC	63～65	63～66	64～70	–	–	–	–	–
	HRA	–	–	–	89～93.5	92～94	–	–	–
	HV	–		–	1 500～1 950	1 800～2 000	3 000～4 500	HK 6 500～8 000	HK 8 000～12 000
抗弯强度(MPa)		~2 200	~2 400	2 500～4000	900～2 200	450～1 200	800～1 200	1 100～2 200	210～490

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-5-4 为各种刀具材料车削不同材料时适用的切削速度。

表 2-5-4 不同刀具材料的适用范围及车削速度

刀具材料	中、高碳钢和中碳合金钢 (200～325HB)	淬硬工具钢	灰铸铁 (175～320HB)	镍基合金 (200～450HB)	钛合金 (250～350HB)	铝合金 (50～150HB)
高速钢	14～23		11～26	5～8	14～20	150～305
硬质合金	60～230	6～25	90～185	25～70	40～75	200～670
涂层硬质合金	120～275	–	120～365	25～85	40～100	215～915
陶瓷	230～400	65～145	200～1 220	150～395	–	–
立方氮化硼	–	55～170	400～800	120～185		–
金刚石	–		–			305～3 050

2.5.1.3 加工精度

机械加工后，零件的几何参数的实际值与设计理想值的符合程度称为加工精度。零件的加工精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度。

每种机床在正常生产条件下能经济地达到的加工精度，是这种加工方法的经济精度。所谓正常生产条件是指：设备完好，工夹量具适应，工人技术水平相当，工时定额合理。

1）各种加工方法能达到的尺寸经济精度（表 2-5-5～表 2-5-11）

表 2-5-5 孔加工的经济精度

加工方法		公差等级（IT）	加工方法		公差等级（IT）
钻孔及用钻头扩孔		11～12	镗孔	精密镗	6～7
扩孔	粗扩	12		金刚镗	6～7
	铸孔或冲孔后一次扩孔	11～12	拉孔	粗拉铸孔或冲孔	7～9
	钻或粗扩后的精扩	9～10		粗拉或钻孔后精拉孔	7
铰孔	粗铰	9	磨孔	粗磨	7～8
	精铰	6～8		精磨	6～7
	精密铰	6～7		精密磨	6
镗孔	粗镗	10～12	研磨、珩磨		6
	精镗	7～9	滚压、金刚石挤压		6～9
	高速镗	7～8			

表 2-5-6 花键孔加工的尺寸经济精度

加工方法	公差等级（IT）	加工方法	公差等级（IT）	加工方法	公差等级（IT）
插	9	拉	7～9	磨	7～9

表 2-5-7 外圆柱表面加工的尺寸经济精度

加工方法		公差等级（IT）	加工方法		公差等级（IT）
车削	粗车	11～12	磨削	粗磨	8
	半精车	8～10		精磨	6～7
	精车	7～8		精密磨	5～6

表 2-5-8 端面加工的经济精度（mm）

加工方法		直径			
		≤50	>50～120	>120～260	>260～500
车削	粗	0.15	0.20	0.25	0.40
	精	0.07	0.10	0.13	0.20
磨削	普通	0.03	0.04	0.05	0.07
	精密	0.02	0.025	0.03	0.035

注：指端面至基准的尺寸精度

表 2-5-9 公制螺纹加工的经济精度

加工方法		精度等级	公差带	加工方法	精度等级	公差带
车削	外螺纹	1～2	4h～6h	用圆板牙加工外螺纹	2～3	6h～8h
	内螺纹	2～3	5H、6H、7H	梳形螺纹铣刀	2～3	6h～8h
用梳形刀车螺纹	外螺纹	1～2	4h～6h	旋风切削	2～3	6h～8h
	内螺纹	2～3	5H、6H、7H	搓丝板搓螺纹	2	6h
用丝锥攻内螺纹		1～3	4H、5H～7H	滚丝模滚螺纹	1～3	4h～6h

表 2-5-10 花键加工的尺寸经济精度（mm）

花键的最大直径	轴				孔			
	用磨制的滚铣刀		成形磨		拉削		推削	
	精度				热处理前精度			
	花键宽	底圆直径	花键宽	底圆直径	花键宽	底圆直径	花键宽	底圆直径
18～30	0.025	0.05	0.013	0.027	0.013	0.018	0.008	0.012
>30～50	0.040	0.075	0.015	0.032	0.016	0.026	0.009	0.015
>50～80	0.050	0.01	0.017	0.042	0.016	0.030	0.012	0.019
>80～120	0.075	0.125	0.019	0.045	0.019	0.035	0.012	0.023

表 2-5-11 齿轮加工的经济精度

加工方法	精度等级	加工方法	精度等级
多头滚刀滚齿（$m=1$～20mm）	8～10	直齿圆锥齿轮刨齿	8
单头滚刀滚齿（$m=1$～20mm）	6～8	螺旋圆锥齿轮刀盘铣齿	8
圆盘形插齿刀插齿（$m=1$～20mm）	6～8	蜗轮模数滚刀滚蜗轮	8
圆盘形剃齿刀剃齿（$m=1$～20mm）	5～7	热轧齿轮（$m=2$～8mm）	8～9
珩齿	6～7	热轧后冷校齿形（$m=2$～8mm）	7～8
磨齿	5～6	冷轧齿轮（$m\leq1.5$mm）	7

（2）各种加工方法能达到的形状经济精度（表 2-5-12、表 2-5-13）

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-5-12 平面度和直线度的经济精度（mm）

加工方法	精度范围
磨、精车	0.01～0.03
粗磨、精铣、精车	0.03～0.05
铣、车	0.05～0.1

表 2-5-13 圆度、圆柱度的经济精度（mm）

加工方法	精度范围
磨、珩、精车及精镗、精铰	0.003～0.005
精车及镗、铰、拉	0.005～0.01
车、镗、钻	0.01～0.05

3）各种加工方法能达到的位置经济精度（表 2-5-14～表 2-5-17）

表 2-5-14 平行度的经济精度

加工方法	公差等级
磨、精密铣	5～6
磨、铣、镗、车	7～8
铣、镗、车，按导套钻、铰	9～10
各种粗加工	11～12

表 2-5-15 端面跳动和垂直度的经济精度

加工方法	公差等级
磨、珩、精铣、精镗	5～6
磨、铣、镗	7～8
车、半精铣、刨、镗	9～10
各种粗加工	11～12

表 2-5-16 同轴度的经济精度

加工方法	公差等级	加工方法	公差等级
磨、精车，一次装夹下的内圆磨及镗	5～6	车、镗、钻	9～10
粗磨、车、镗、拉、铰	7～8	各种粗加工	11～12

表 2-5-17 轴心线相互平行的孔的位置经济精度

加工方法		精度范围（mm）	加工方法		精度范围（mm）
立钻或摇臂钻上钻孔	用钻模	0.1～0.2	多轴组合机床上扩孔	用钻模	0.06～0.1
立钻或摇臂钻上镗孔	用镗模	0.05～0.1	多轴组合机床上铰孔	用钻模	0.04～0.06
金刚镗床上镗孔	—	0.008～0.02	多轴组合机床上镗孔	用镗模	0.04～0.1
多轴组合机床上钻孔	用钻模	0.1～0.3			

2.5.2 机械加工方法与设备

2.5.2.1 车削

1）车削的工艺方法

车削是工件旋转作主运动，车刀作进给运动的切削加工方法。

典型的车削加工方法有：车外圆、车端面、镗内孔、车外螺纹、切断等。

汽车发动机、变速器、转向机等总成的零部件，如曲轴、凸轮轴、输入轴、输出轴等都是用车削工艺方法进行加工。

2）车床的种类

汽车行业常用的车床有：①卧式车床；②自动车床；③转塔（回轮）车床；④多刀车床；⑤数控车床。

汽车论坛 http://www.qclt.com

汽车行业轴类及盘类零件已广泛采用CNC数控车床进行加工，近年来为了提高生产效率，双轴立式数控车床、双轴卧式数控车床、双刀架数控车床得到广泛应用。

3）车削刀具结构

车刀的结构分为整体式、焊接式、机夹不重磨式和成形车刀等（图2-5-6）。

随着自动车床、数控车床的发展，机夹不重磨车刀越来越显示出其优越性，成为当前车刀的发展方向。

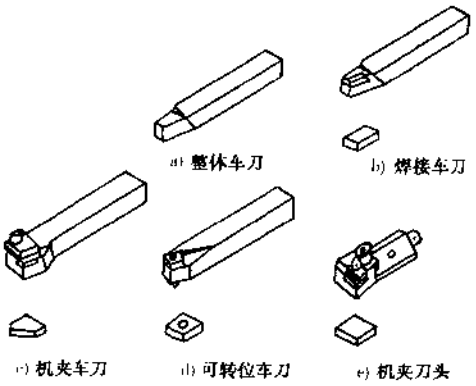


图2-5-6 车刀的结构

4）车削用量

车削用量的选择，应首先满足车削成本和车削效率两方面的要求，同时还要考虑加工精度、表面质量、装夹与调整的难易、工件大小、机床功率等因素。

提高切削速度、增大进给量和切削深度，都能提高金属切除率。但是，这3个因素中，影响刀具耐用度最大的是切削速度，其次是进给量，影响最小的则是切削深度。所以，在选择粗加工切削用量时，应优先考虑采用大的切削深度，其次考虑采用大的进给量，最后才根据刀具耐用度的要求选定合理的切削速度。

切削深度应根据工件的加工余量和机床——夹具——工件系统的刚性来确定。在保留半精加工、精加工必要余量的前提下，应当尽量将粗加工余量一次切掉。

粗加工时限制进给量提高的因素是切削力，在工艺系统的刚度和强度好的下，可选用大进给量；在刚性和强度较差的情况下，则应适当减小进给量。

在切削深度和进给量确定之后，可保证合理刀具耐用度前提下，确定合理的切削速度。

2.5.2.2 铣削

1）铣削的工艺方法

铣削有逆铣和顺铣之分。采用圆柱铣刀等具有圆周刀刃的铣刀进行铣削时，工件送进方向与铣刀回转方向相反时，称为逆铣；工件送进方向与铣刀回转方向相同时称为顺铣。

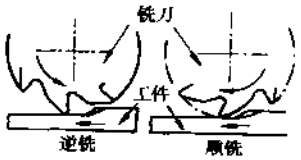


图2-5-7 逆铣与顺铣

逆铣初始，切削深度为零，而后切削厚度逐渐变大，切削力朝上，即切削力使工件抬起，工件需要可靠地紧固，难以进行大进给量铣削。

顺铣时，切削力向下作用在工件上，工件只需要简单固紧，能够进行大进给量铣削。

铣刀耐用度顺铣比逆铣时高。

用端铣刀加工时，当工件中心与端铣刀中心重合时，铣削不分逆铣和顺铣，而在非对称铣削时，仍有逆铣与顺铣的区别，见图2-5-7。

铣削工艺可以进行平面、槽沟、外圆、切断和立体型面的加工。

2）铣床的种类

汽车工业常用的铣床有：

a. 万能升降台铣床；b. 立式铣床；c. 仿形铣床；d. 曲轴铣床。

曲轴铣床主要有曲轴内铣床和曲轴外铣床两种，曲轴内铣机床是目前国际上较普遍采用的一种曲轴加工机床，效率高，适用于大批量生产。其加工方式有工件不动刀盘旋转并进给及工件旋转实行圆周进给而刀盘旋转只作切削运动两种，后者工件支撑刚性略差。刀具采用硬质合金不重磨刀片，机外对刀，每个刀片可有8个刃使用，利用率高。

对于数控曲轴铣床来说，一般切削速度可达140m/min，每齿进给量0.2～0.3mm。

曲轴外铣机床，由于其铣刀盘直径比支撑刀盘的主轴颈大得多，因此，内外铣比较，外铣切削振动比

汽车论坛 http://www.qclt.com

内铣大，内铣铁屑要更短、更均匀，见图 2-5-8、图 2-5-9。

90 年代中期又开发出了高速外铣工艺，该工艺采用工件慢速旋转实现圆周进给，圆盘外铣刀进行高速切削和径向进给。由于工件慢速转动，减少了工件不平衡重量的动态干扰影响，刀盘进行高速切削，切削力小，可获得较好的精度和表面质量。由于采用 CNC 控制系统，机床具有较大的柔性，可在一台机床上同时加工主轴颈和连杆轴颈，其生产效率比 CNC 车削、内铣、车拉工艺高，故而高速外铣将可能成为曲轴粗加工的发展方向。

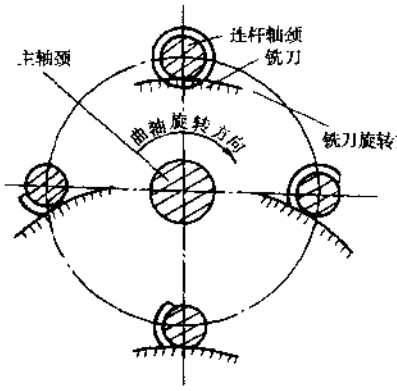


图 2-5-8 曲轴外铣连杆轴颈加工示意图

凸轮轴铣床，铣削凸轮形面时，多采用液压仿形凸轮铣床。铣床上装有两个刀架，每一刀架上可装一把或两把直径较大的密齿刀片铣刀。加工时铣刀旋转并作径向进给，当径向进给至凸轮的规定尺寸后便停止进给。凸轮轴开始以低速按液压仿形旋转 1.02 转，铣刀退出，凸轮形面全部加工完毕。

铣削后凸轮的尺寸精度和形状精度很高，表面粗糙度数值很小，完全可以代替粗车和半精磨加工，在热处理后只需精磨一次使可。

3）铣削刀具与夹具

（1）铣刀

铣刀种类很多，有立铣刀、T 形槽铣刀、燕尾槽铣刀、键槽铣刀、锯片铣刀、三面刃铣刀、圆柱形铣刀、角度铣刀、镶齿端铣刀、模具铣刀和硬质合金可转位铣刀等。

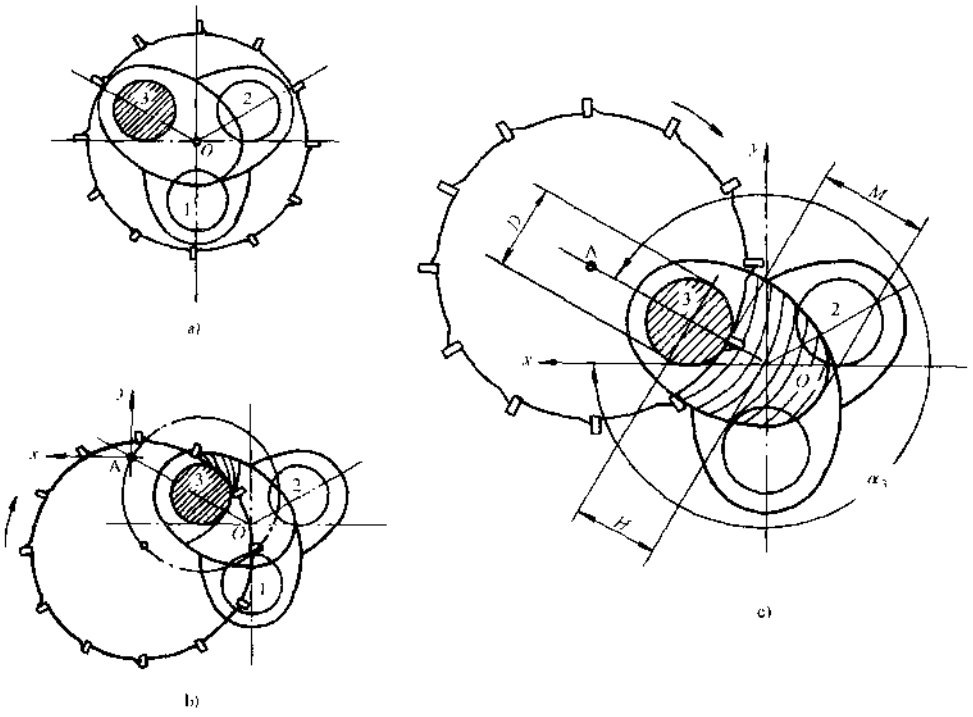


图 2-5-9 曲轴内铣连杆轴颈加工示意图
a）待加工位置；b）加工位置；c）加工位置

硬质合金可转位铣刀包括立铣刀、二面刃铣刀和端铣刀等这种铣刀得到广泛的应用。

硬质合金可转位密齿铣刀刀片定位精度高，结构简单、紧凑，调整和更换刀片约需5～10s。刀片的尺寸和形位精度高，其邻边间的垂直度和相对的平行度在0.01mm以内。刀体制造精度要求高，其轴向和径向的跳动量在0.01mm以内，见图2-5-10。

可转位螺旋立铣刀适用于龙门铣床与铣镗床上对铸钢、锻钢、合金钢以及铸铁工件的平面、阶梯面、内侧面及沟槽进行粗铣。刀片材料可用YS30、YS25等，见图2-5-11。切削用量推荐值为：$v=60\sim100$m/min，$f_z=0.1\sim0.3$mm/r

凸轮轮廓铣削用外圆铣刀，直径ϕ350mm，采用密齿精密型，可以高质量地铣削凸轮型面。

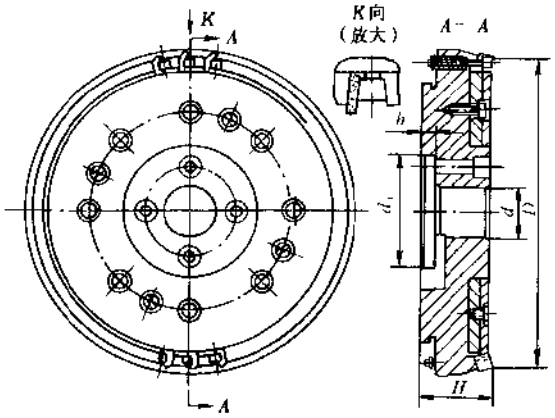


图2-5-10 硬质合金可转位密齿铣刀

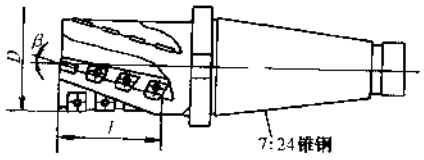


图2-5-11 可转位螺旋立铣刀

（2）铣床夹具

分为通用可调铣床夹具和专用铣床夹具。前者主要用于普通铣床小批量件生产，后者则主要用于普通铣床或专用铣床的大批量生产。

在汽车制造加工生产上，大量使用的是专用铣床夹具。

铣削加工属于断续切削，切削力大，机床易发生振动。因此，铣床夹具必须具有足够的夹紧力和足够的刚度和强度。要留用足够的排屑空间。为了保持夹具相对机床的准确位置，铣床夹具底面应设置定位键。

2.5.2.3 钻削、铰削

1）钻削、铰削的工艺方法

在实体材料上一次钻孔，其孔精度低，表面粗糙度较差。扩孔可提高其精度和降低表面粗糙度，孔口倒棱、加工小平面或沉孔可采用锪孔。

铰削的特点是加工余量小，切削厚度薄（精铰时$a_c=0.01\sim0.03$mm）。由于铰刀有切削刃钝圆半径的存在，又具有修光刃，因此铰削过程实际上是切削与挤刮两种作用的结果。铰削必须采用较合适的切削液来消除积屑瘤，以提高铰孔粗糙度。

为了提高铰孔精度，铰孔时最好是工件旋转，铰刀只作进给运动。在机床上铰孔时，铰刀最好采用浮动装夹，并使铰刀在有精密导向的情况下进行工作。

2）钻床的种类

a. 立式钻床；b. 摇臂钻床；c. 多头及多轴钻床；d. 转塔钻床；e. 钻削加工中心。

3）钻削、扩削、铰削的刀具

根据不同的结构形式和用途，钻头可以分为麻花钻、扁钻、深孔钻及中心钻等，普遍采用的是麻花

汽车论坛 http://www.qclt.com

钻。

(1) 群钻

群钻是用标准麻花钻修磨而成的，与麻花钻比较，群钻有下列优点：

①钻削轻快省力。因前角增大，横刃经修磨后窄而尖。

②轴向力下降约 35%～50%，扭矩下降约 10%～30%。

③可加大进给量，使生产率提高 3～5 倍。

④耐用度高，较一般钻头耐用度可提高 3～5 倍。

⑤定心作用好，孔的精度高。

(2) 扁钻

其结构形式可分为整体式和装配式两种。整体式扁钻适合于加工有色金属，目前已逐步采用机夹可转位刀片的扁钻钻削各种金属材料。

(3) 抛物线钻头

抛物线钻头其螺旋槽断面为抛物线形状，使得钻心加厚，刚性加强，可提高切削参数，钻削深孔。

(4) 深孔钻

深孔钻主要有枪钻、喷吸钻、内排屑深孔钻（BTA）、DF 系统深孔钻等。

①枪钻：枪钻是一种单刃深孔钻，它主要用来加工直径约为 3～20mm 的小深孔。加工精度可达 IT8～IT10 级，粗糙度可达 $Ra3.2\sim0.8\mu m$，孔的直线性也比较好。

枪钻工作时切削液用高压（一般约为 3.5～10MPa）从钻杆和切削部分的进油孔送入切削区，以冷却和润滑刀具，并把切屑经切削部分和钻杆上的 V 形槽冲出。

切削部分可以用整体高速钢或硬质合金制成，当直径超过 8mm 时，也可以做成镶焊硬质合金刀片。

②喷吸钻：喷吸钻是一种内排屑硬质合金深孔钻，适于加工直径为 20～65mm 的深孔。用喷吸钻钻深孔加工，精度可达 IT7～IT10 级，粗糙度可达 $Ra3.2\sim0.8\mu m$，孔的直线度可达 0.1/1000，加工效率比普通麻花钻高 5～10 倍。

③内排屑深孔钻（BTA）：对于 $\phi6\sim\phi12mm$ 的深孔钻，刀片直接焊在钻杆上；$\phi12mm$ 以上的深孔钻一般采用装配式，用多线大螺距螺纹连接于钻杆上。钻头头部有 1～2 个排屑孔，刀头的切削刃由单刃或多刃组成。它们都具有焊在刀体上的与外刃成 85°～90°或 180°～185°两个硬质合金导向块。对于 $\phi50mm$ 以上的深孔钻一般采用机械夹固式。

④DF 系统深孔钻：DF 系统深孔钻亦称单管喷吸钻或双加油器深孔钻，是将喷吸钻和 BTA 系统深孔钻吸、推出切屑的优点相结合的加工系统。DF 系统可稳定、高效地进行孔加工。

采用 DF 系统时，只是在工件端面位置上放置一个以推压方式提供切削液的油压密封装置，而后面放置一个产生喷吸效应的装置。由于发挥推、吸双重排屑作用，使得切削液流速加快，相应地切屑排出量增大，故在深孔加工中效果好。它特别适用于钻削 $\phi6\sim\phi20mm$ 的深孔与钻削可加工性差的、不易断屑的材料。

DF 系统深孔钻的特点是：有一个由切削液支托的钻杆，振动较小，排屑空间较大，加工效率高，精度好。它可取代部分枪钻加工小直径的孔。在加工精度方面可代替中等直径的喷吸钻。加工大于 $\phi65mm$ 的深孔时，其优越性更加明显。

DF 系统包括钻头、钻杆、钻杆座、引导装置、密封套、喷嘴等。

(5) 扩孔钻

扩孔钻用作铰或磨孔前的预加工扩孔，如钻孔、铸孔、锻孔和冲孔的扩大，也可以用来加工精度 IT10～IT11 级、粗糙度 $Ra6.3\sim3.2\mu m$ 的孔。

(6) 锪钻

锪钻用于加工圆柱沉头孔、锥孔、端面等。

(7) 铰刀

铰刀用于孔的精加工及半精加工，也可以用于磨孔或研孔前的预加工。一般可达精度 IT7～IT8 级和

汽车论坛 http://www.qclt.com

粗糙度 $Ra1.6\sim0.4\mu m$。

①硬质合金锥柄铰刀：为组合机床上广泛使用的加工灰铸铁的硬质合金锥柄铰刀，刀片用 G 类硬质合金，刀体材料用 40Cr，并淬硬至 35～40HRC，当铰刀制有导向部分时，常用 9SiCr 作为刀体并淬硬至 59～62HRC。

②硬质合金无刃铰刀：在多边形刀体的棱角处镶有硬质合金刀片，前角（$\gamma_0=-60°$，$\alpha_0=4°\sim6°$，刃带 $b_{\alpha}=0.25\sim0.5mm$ 由于它是以冷挤压的方式来加工，粗糙度一般可以稳定达到 $Ra0.8\mu m$，尺寸精度可达 IT7 级，铰出的孔有 0.003～0.005mm 的收缩量，铰完后需反转退出铰刀，这种铰刀适用于加工铸铁。一般用煤油作切削液，供应要充足 铰前孔的粗糙度应在 $Ra3.2\mu m$ 以上，精度要接近 IT7 级，切削用量：$v=0.07\sim0.1m/s$，进给量 $f=0.5\sim0.7mm/r$，$a_p=0.03\sim0.05mm$。由于切削力较大，刀杆刚性要好。

③刚性镗铰刀：在加工各种精密孔时，可采用刚性镗铰刀。这种铰刀的特点是镗削、铰削和挤压结合在一起，刀具最前端有余偏角 $\Psi_r=40°$的切削刃切除大部分余量，3°斜角及圆柱校准部分担负精铰任务，硬质合金导向块起导向、支撑和挤压作用。圆柱校准部分的半径比导向块半径小（视工件材料不同而异，分别为 0.025mm、0.032mm、0.035mm），以使留有挤压余量，通过导向块对孔挤压可降低孔的表面粗糙度，见图 2-5-12。

刚性镗铰刀特别适用 ϕ76mm 以下的铸铁件孔加工，使用寿命长。

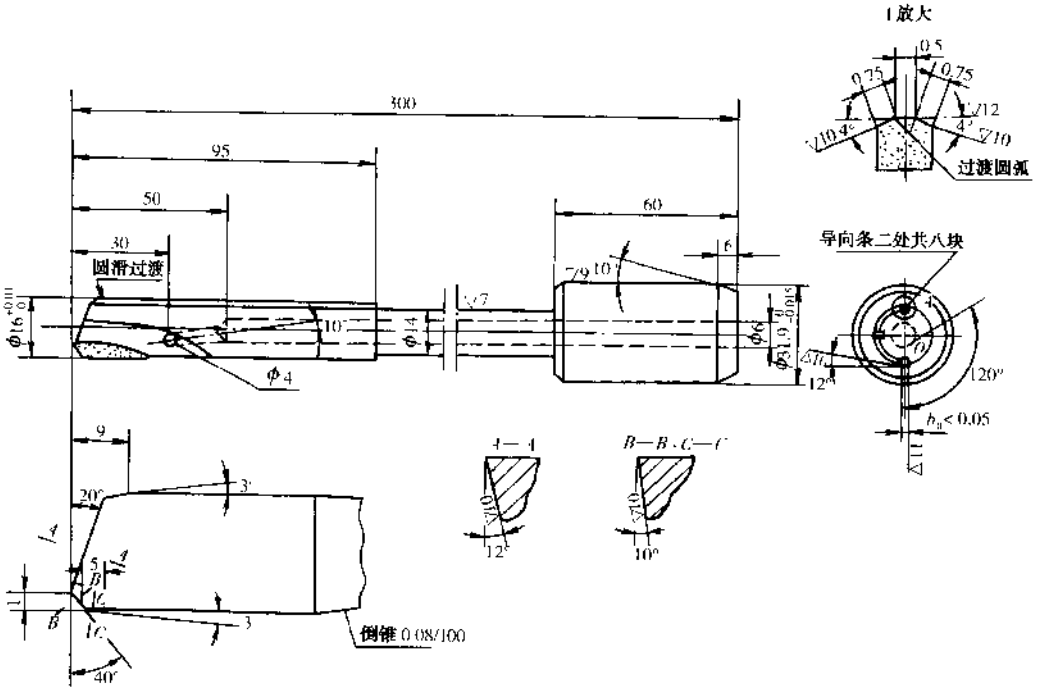


图 2-5-12 刚性镗铰刀

(8) 孔加工复合刀具

它是指由两把或两把以上单个孔加工刀具组合使用的刀具。这种刀具在组合机自动线上获得广泛使用。

孔加工复合刀具种类繁多，按工艺类型可分为：

①同类工艺复合刀具：如复合钻、复合扩孔钻、复合铰刀、复合丝锥及复合镗刀等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

②不同类工艺复合刀具：如钻—扩复合刀具、钻—扩—铰复合刀具、钻—攻复合刀具、钻—镗复合刀具、镗—扩复合刀具、镗—锪复合刀具及钻—扩—锪复合刀具等。

例如，在汽车发动机缸盖气门座和导管孔的加工中，就采用了枪铰刀与轴向进给的镗刀的复合刀具，以及枪铰刀与斜向进给对车刀的复合刀具的加工方法。

采用复合刀具工艺加工后的气门座圈锥面和导管孔的同心度可稳定保证其摆差在0.05mm以下。

2.5.2.4 镗削

1）镗削的工艺方法

镗削是镗刀旋转作主运动，工件或镗刀作进给运动的切削加工方法。

镗削加工可以镗削单孔和孔系、锪铣平面、镗止口及镗车端面等。当配备各种附件后，还可以切槽、车螺纹、镗锥孔及球面等。

镗削加工可以精确地保证孔径尺寸精度为IT6～IT8级，孔距精度在0.015mm以内，表面粗糙度达$Ra1.6\sim0.8\mu m$，镗削加工是精密加工的一种重要方法。

2）镗床的种类

①卧式镗床万能性广，效率低，主要用于汽车生产的辅助部门。

②坐标镗床：专门用于有很高位置精度要求的钻模一类多孔零件的精加工，大多为立式机床。最近设计的坐标镗床还能用于精铣，机床的结构针对精密零件的加工。

③精密镗床：这种镗床采用专门的金刚石刀具或经研磨的硬质合金刀具，并用高速切削和微量进给，能加工出高粗糙度零件表面。适合于加工气缸、轴承衬套和套筒等零件，其次还可用较大的进给时进行珩磨加工。

④发动机缸孔镗床：发动机缸体粗镗缸孔工序，普遍采用对称安排的四片或六片甚至更多不重磨刀片的镗刀，刀片呈螺旋布置。要求机床刚性足、功率大。镗刀设计为直径不可调整的结构，有利于提高刀具的强度和刚性，为克服振动，平衡切削力，多轴组合镗床已采用相反旋向的刚性主轴，用以改善切削条件。

半精镗缸孔或镶缸套孔，镗刀的刀片数量不宜太多，一般以2～3片为宜，否则会因受力过大而导致缸孔变形或缸套的移动，严重时甚至会导致薄壁缸套开裂。

精镗缸孔则通常采用单刀，在进口机床中已普遍采用自动测量与刀具磨损自动补偿装置，使测量与补偿有机联系，由机床内部自动完成。

往复镗削工艺可提高生产效率，广为缸孔半精镗、精镗时采用，刀杆往复一次即可完成精镗和半精镗工作。

目前，用陶瓷材料制成的刀片，加工铸铁材料时最高切削速度可达400m/min，而新开发CBN（立方氮化硼）刀片，最高切削速度可达800m/min，显然，采用新的刀具材料将大大缩短加工时间。

2.5.2.5 拉削

1）拉削的工艺方法

拉削加工与其它金属切削加工方法相比较，具有以下主要特点：

①生产效率高。拉刀同时工作的刀齿多，切削刃长，一次行程能够完成粗、半精及精加工，生产率很高。

②拉后工件表面粗糙度低。由于切削速度较低，切削厚度很小，因此可获得较低的工件表面粗糙度。一般拉削加工后的工件表面粗糙度可达$Ra1.6\sim0.4\mu m$，若在拉刀尾部装上浮动挤压环，则粗糙度可达$Ra0.2\mu m$。

③拉刀耐用度高。

④拉床结构简单。

拉削工艺，特别是连续式拉削、大平面往复式拉削和组合拉削工艺，在汽车成批和大量生产中广泛使

用。近年来，在小批生产中，当加工零件要求具有一定精度，如花键孔、键槽等也都采用拉削加工。在现代化的自动线上，拉削工艺也得到了应用。

拉削正在由强力切削向高速化发展，切削速度可达 18～20m/min。

2）拉刀的种类

拉刀一般按下列方法分类：

①按加工工件表面的不同，可分为内拉刀和外拉刀，前者用于加工工件内表面，后者用于加工件外表面。

②按加工时受力方向不同，可分为拉刀和推刀，前者工作时受牵引力，后者工作时受推压力。

③按拉刀构造的不同，又可分为整体式和组合装配式两种。采用组合装配式拉刀，不仅可以节省刀具材料，而且可以简化拉刀的制造，并且当拉刀刀齿磨损或损坏后，能够方便地进行调节及更换。

3）CNC 曲轴车拉、车一车拉加工工艺

CNC 曲轴车拉工艺（图 2-5-13）是 80 年代发展起来的，利用圆盘型车拉刀的齿升量实现对曲轴轴径的车拉加工。80 年代末，在车拉技术的基础上，又开发出车一车拉加工工艺（图 2-5-14）。

曲轴轴颈的车拉、车一车拉加工在轿车发动机曲轴生产中得到大量采用，现在已成为在曲轴粗加工阶段中比 CNC 车削、CNC 内铣更有前途的先进加工工艺。

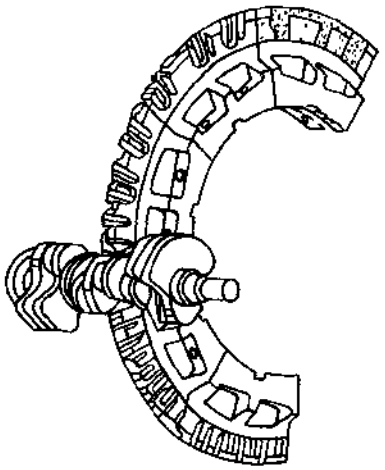


图 2-5-13 车拉工艺

这是因为车拉和车一车拉加工具有以下特点：

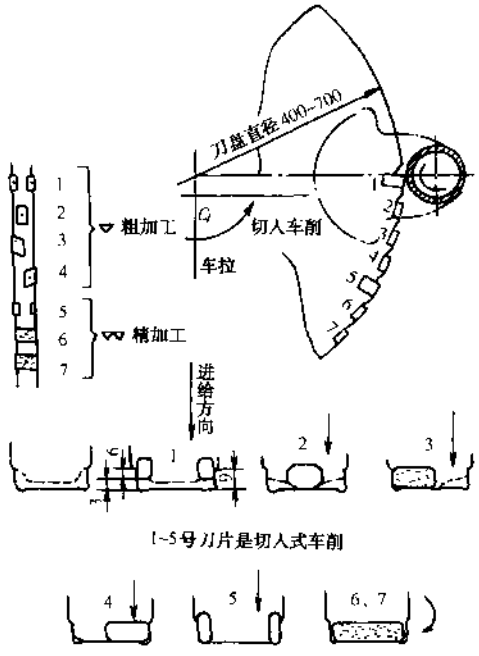


图 2-5-14 车一车拉工艺

①每把刀片在工件高速旋转下切削的金属厚度很薄，约为 0.4～0.6mm，因而刀刃承受的冲击力就很小，既延长了刀刃寿命，又减少了工件切削后的应力。

②车拉和车一车拉刀具由数组刀刃组成，每个刀齿仅参加短暂的切削，切削热负荷小，而且分散，保证了精加工刀齿加工出最佳的表面。粗加工刀齿精度不需太高，只要求精加工刀齿有较高精度即可。这就是铣削加工精度不如拉削加工精度的关键。

车拉、车一车拉加工的曲轴轴颈尺寸精度高，表面质量好，弯曲、扭曲误差小，甚至比内铣加工的质量还要好。

③工艺总投资少。采用车拉工艺可省去粗磨轴径工序。如果曲轴轴颈还要求加工沉割槽，在车拉加工时可设置专用刀片将轴颈、轴肩及沉割槽同时加工出来，而不必再另外增加加工沉割槽的车床。

④生产效率高，柔性好。对夹具、刀具略作调整，就可很快适应曲轴品种的变换和不同批量的生产。

2.5.2.6 磨削

1）磨削的工艺方法

一般意义上的磨削，是指用砂轮磨削。磨削方式可以有多种划分方法。

按照加工对象可分为外圆、内圆、平面及成形磨

汽车论坛 http://www.qclt.com

削；

按照夹紧和驱动工件的方法，又可分为定心磨削与无心磨削。

按照进给方向，可分为纵向进给与横向进给磨削。

按照砂轮的工作表面类型，又分为周边磨削、端面磨削和周边—端面磨削。

磨削加工本质上属切削加工。但与通常的切削加工相比又有以下显著特点：

①切削刃的形状和分布均处于不规则的随机状态，其形状、大小各异。

②切削厚度一般只有几微米，因此，磨削加工表面可获得较好的精度与表面粗糙度。

③砂轮的磨削速度可达60m/s（3600m/min），约为普通刀具切削的10倍以上。而采用CBN砂轮目前磨削速度已发展到120～180m/s。

④磨削过程中磨粒切削刃与切削接触点的瞬时温度可达1 000℃以上。砂轮与工件接触区的平均温度一般也有500～800℃，它使磨削表面产生残余应力、容易造成烧伤及裂纹等现象。

2）磨床的种类

汽车制造业常用的万能磨床和专用磨床，简介如下：

（1）外圆磨床

是利用砂轮的旋转运动和工件的圆周运动来磨削圆柱形工件外圆的机床。根据进给形式的不同可实现切入磨削和轴向进给磨削，前者生产效率高，但精度比后者略低。

（2）内圆磨床

用于内孔磨削，所用砂轮必须小于要磨削的孔径，为了得到所需的磨削速度，砂轮轴的转速必须很高。另外，由于加工过程中内径测量比较麻烦，因此大多采用各种自动控制尺寸装置进行自动循环加工。

（3）无心磨床

无心磨削方式有两种：用导轮使工件沿轴向送进的贯穿进给式和工件在轴向不进给而由砂轮径向切入的切入磨削式。

大量生产中磨削各种柱销、空心圆柱体、旋转体的阶梯部位及其它旋转体零件或用夹具难以夹持的圆柱部位时，多采用无心磨削。

（4）平面磨床

磨削平面有使用砂轮外圆周面和使用砂轮端面两种。前者大部分采用卧轴式结构的磨床。后者大部分采用立轴式结构的磨床。这两种磨床均有矩形工作台式和圆工作台式，根据工件的形状选用。

（5）凸轮轴磨床

用于磨削凸轮轴凸轮型面：

①机械仿形式凸轮轴磨床：机械仿形式凸轮轴磨床已沿用了70～80年。机械仿形式凸轮轴磨床首先要预先精心制作一套标准的母凸轮，进气和排气母凸轮各需一个，然后以标准母凸轮为样板，用机床的反靠装置来仔细地反靠出一套靠模凸轮。凸轮轴上有几个凸轮，就要磨出几个靠模凸轮，然后再仿靠这套靠模凸轮来磨削凸轮轴上的各个凸轮。为提高凸轮曲线磨削线度，采用双靠模磨削，即机床上有由于粗磨和精磨的两套凸轮，当由粗磨转为精磨时，机床自动由粗磨靠模转为精磨靠模。

②CNC凸轮轴磨床：采用一套数控装置，既控制工件主轴的无级变速旋转和分度，又控制砂轮按凸轮型面的升程数值和降程数值的往复运动以及横向进给。

工件主轴由CNC装置控制的伺服电机驱动，实现无级变速传动，不仅可以实现粗磨和精磨所需要的不同转速，而且在工件主轴每转内按凸轮不同曲线段进行自动变速磨削。这一措施可以使凸轮型面上每一磨削点的磨削速度、金属切削率和磨削力基本一致，这是凸轮磨削时保证凸轮升程精度的基础，这也是CNC凸轮轴磨床与机械仿形式凸轮轴磨床的区别所在。

CNC凸轮轴磨床的砂轮可实现高速、恒线速磨削；装有工件头架、尾架和中心架的工作台按NC编程控制伺服电机做纵向跳档。

CNC凸轮轴磨床具有较大的柔性。满足了凸轮轴多品种变化的柔性生产需要。由于CNC装置精密地跟随凸轮轮廓外形和砂轮直径的改变，凸轮轮廓数据可立即得到自动修正，始终保证正确的凸轮型面，消

除了在磨削过程中因砂轮直径逐渐减少对凸轮型面精度的影响。

由于以上原因，CNC凸轮轴的凸轮型面的升程精度可达到±0.012mm 和0.0015mm/1°。CNC型凸轮轴磨床系统带有用于凸轮轮廓磨削的特殊模式，允许高工件圆周速度下进行磨削而不会出现裂纹和烧伤，也可磨削凸轮轴圆柱部分，工件头架转速为500r/min，在新型凸轮轴磨床上不仅可选用普通砂轮，也可用陶瓷结合剂CBN（立方氮化硼）砂轮，线速度为120m/s，当工件加工表面的表面粗糙度要求很高、凸轮材料对磨削热敏感和磨削表面易产生磨削裂纹、硬度下降时，应选CBN砂轮。

（6）CNC曲轴磨床

机床主要特点：

①机床砂轮架进给、工作台分度、砂轮修磨进给与纵向运动（为二坐标控制）、头架回转、中心架上、下支撑块进给（上下二坐标控制）、工件的相位分度等均采用坐标控制，头架纵向运动（曲轴长短）以及左右卡盘偏心量（曲柄颈量变化）自动调整也均采用NC控制。

②由于砂轮架进给、工作台分度、中心架支撑块进给的NC化，使磨削条件最佳化、设定容易，磨削精度提高，加工时间缩短，工件更换迅速方便，克服了非数控曲轴磨床的互换、灵活性差的缺点。

③两端工件头架驱动采用伺服电机实现同步回转提高了同步回转，避免了轴的扭曲，从而提高磨削精度。

④砂轮修整采用NC修整装置。

⑤工件的相位分度采用伺服电机，分度高速化，对2相位、3相位、4相位、6相位等分度用程序选择、转换迅速、正确。

⑥当工件长度变化时，左右工件头架间隔距离可调整，右工件头架可选用NC控制（选择定货）。

⑦曲轴工件曲柄半径发生变化时，左右卡盘的偏心量用NC控制。

⑧砂轮架进给机构与中心架刚性高，可选用CBN砂轮。

⑨曲轴加工精度（圆度、平直度、尺寸分散度等）可以提高50%。

CNC曲轴磨床，采用CNC相位分度方式，相位分度的相位角度是用程序指令进行，并且，相位分度角始终由绝对值编码器作位置信息确认，而无须用无触点开关来作相位角度确认办法。CNC曲轴磨床能作多坐标控制，称之任意多坐标，这样使设备柔性大为提高。

（7）凸轮轴和曲轴主轴颈无心磨床

采用无心磨床磨削凸轮轴和曲轴主轴颈的方法与特点：

①凸轮轴或曲轴的每一个主轴颈是分别支撑在与多片组合砂轮相对应的导轮和支板之间，凸轮轴或曲轴通过导轮带动旋转，为了能带动自身重量较重的工件旋转（曲轴约20～30kg），无心磨床上专门设有一弹簧加载的滚轮装置，压在工件上，以增加工件与导轮之间的摩擦力，克服工件本身的转动惯量以及工件—支板之间的摩擦力；在磨削过程中，工件在全长上被砂轮、导轮和支板所包容，这是克服刚性较差的凸轮轴和曲轴在磨削过程中弯曲变形和振动的较理想的磨削状态，也是无心磨削凸轮轴和曲轴主轴颈比传统的顶尖定位式多砂轮磨削能获得较高效率、较高尺寸精度和几何精度的关键所在，见图2-5-15、图2-5-16。

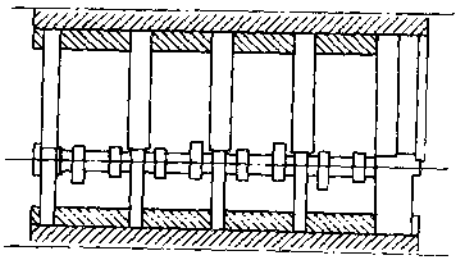


图2-5-15 无心磨削凸轮轴主轴颈

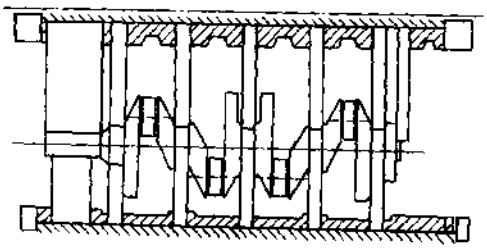


图2-5-16 无心磨削曲轴主轴颈

②传统的顶尖定位式多砂轮磨削时，砂轮架径向进给移动1μm，在工件直径上反映的变化量是2μm；而无心磨床时，砂轮架径向进给移动1μm，在工件直径上反映的变化量也仅是1μm，从砂轮架径向进给对

汽车论坛 http://www.qclt.com

工件磨削精度的影响来看，无心磨削要优于传统的顶尖定位式磨削。

③无心磨削加工凸轮轴或曲轴主轴颈，不论是粗磨或精磨，在磨削所有主轴颈时，可同时完成与主轴颈同心的前后两端的各个轴颈和部位的外圆磨削，提高生产效率，缩短工艺流程，节省设备投资。

④具备一定毛坯精度的球墨铸铁凸轮轴主轴颈可从毛坯直接进行粗磨，在粗磨时，切除余量直径方向可达3～5mm，磨削节拍仅为30s左右，亦即生产效率为120件/h。

（8）快速点磨法

磨削工件外圆时，砂轮与工件是点接触的磨削方法称为点磨削法。

点磨削工件端面时，砂轮可倾+0.5°（根据磨削工件的端面的方向，如磨右端面则为-0.5°），使砂轮与工件的接触面只有传统磨削端面方法的1/2，见图2-5-17。

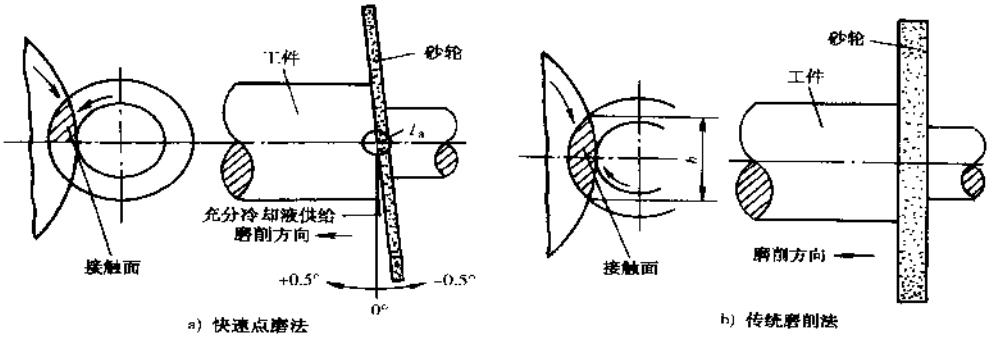


图2-5-17 快速点磨法

点磨法时，用立方氮化硼（CBN）或金刚石砂轮进行高速磨削，其点磨速度可达150m/s。

快速点磨法与传统磨削方法相比，砂轮与工件的接触面最小，磨削速度高，使磨削过程所产生的磨削力大大减小。采用快速点磨法可具有如下优点：

①磨削精度高，避免烧伤。

②磨削工效高，用快速点磨法可提高工效600%。砂轮耐用度高，快速点磨法由于采用CBN砂轮可连续生产200～250h无需修正。由于砂轮耐用度高，因此使快速点磨机床的开动率可达97%。

快速点磨法既是一种先进的高效外圆磨削新工艺，亦是符合精益生产原则的新工艺。该工艺已引起汽车工业界的很大兴趣，发动机的曲轴、凸轮轴、变速器上的齿轮轴以及传动轴等均可采用该工艺。

2.5.2.7 无屑光整加工

无屑光整加工是精加工后，通过表面的塑性变形，降低工件表面粗糙度或强化其表面的加工过程。包括滚压加工、金刚石压光、钢球强化和挤压等，常用的有滚压加工和金刚石压光。加工后，一般可使表面粗糙度从$Ra3.2$～1.6降低到$Ra0.4$～0.025。滚压后表面层还会产生残余压应力，使零件的耐疲劳性能也得以提高。此外，无屑光整加工无需特殊的高精度设备，成本较低。

1）滚压加工

滚压加工时，用自由旋转的滚子对加工表面施加压力，使其产生塑性变形，使表层金属晶格产生位错，晶格扭曲，使金属表面得以强化。滚压加工可加工外圆、内孔和平面等不同的表面，常在精车后或粗磨后进行。滚压的效果与工件材料、滚压前表面状态、滚压工具和滚子表面性能及采用的工艺参数有关。

2）深孔滚压

常用来精加工滚压油缸等尺寸精度和粗糙度要求很高的深孔。深孔滚压有用钢球滚压、滚珠滚压、圆柱和圆锥滚压以及滚轮滚压等几种。滚压时滚柱与工件有一个0°30′或1°的斜角，使孔壁逐渐地弹性变形，

这对降低工件孔壁的粗糙度有利

深孔滚压速度 $v=60\sim80$m/min；走刀量 $s=0.15\sim0.25$mm/r。一般钢件滚压过盈量 0.12mm，滚压后孔径扩大 0.02～0.03mm。滚压时要采用 50%硫化切削液加 50%柴油、机油或煤油的混合冷却润滑液。

3）曲轴的圆角滚压

曲轴的圆角滚压工艺是一种在曲轴的曲柄和轴颈过渡圆角等应力集中部位，用机械的方法，对圆角表面进行滚压，表面产生冷加工硬化，形成残余压应力表面层，并消除亚微观裂纹，提高曲轴疲劳强度的一种工艺方法

圆角滚压工艺有以下一些特点：

a. 工艺简单，生产周期短，生产成本低。

b. 适用范围广，可以滚压所有材料的曲轴。

c. 能显著地提高曲轴的疲劳强度。

d. 表面粗糙度降低 1 级，可达 $Ra0.8\sim0.1\mu$m，硬度由 30HRC 提高到 55HRC。

e. 采用沉割圆角滚压可减少磨削时间，提高砂轮的寿命。

f. 可消除表面显微裂纹和针孔、气孔等铸造缺陷。珠光体球墨铸铁曲轴的圆角滚压效果最明显。

g. 滚压硬化层的深度和最大残余应力值，取决于滚压力、滚轮形状、尺寸和曲轴材料。

2.5.2.8 齿轮加工的工艺方法

汽车齿轮主要包括圆柱齿轮、锥齿轮和准双曲面齿轮。锥齿轮用于相交轴线间的传动，而准双曲面齿轮用于相错轴线间的传动。锥齿轮按齿长曲线形式可分为直齿锥齿轮和螺旋锥齿轮。螺旋锥齿轮又可分为弧齿锥齿轮和摆线锥齿轮（还有一种渐开线锥齿轮目前基本不用）。准双曲面齿轮亦分为弧齿准双曲面齿轮和摆线等高齿准双曲面齿轮两种。螺旋锥齿轮和准双曲面齿轮虽然属于两类齿轮，但其传动理论和加工原理是一致的，可用一类的螺旋锥齿轮加工设备加工。

1）圆柱齿轮加工

圆柱齿轮的加工主要有滚齿、插齿、剃齿、珩齿、磨齿等工艺方法，根据不同的产品结构、齿轮材料、精度要求和特点，选用不同的工艺方法进行加工。

汽车行业常用滚齿方法有：a. 普通滚齿；b. 对角滚齿。

常用剃齿方法有：a. 普通剃齿；b. 对角剃齿；c. 切向剃齿；d. 径向剃齿。

常用的珩齿方法有：a. 盘形珩轮珩齿；b. 蜗杆珩轮珩齿；c. 内珩轮珩齿。

圆柱齿轮加工机床主要有以下几种：

（1）滚齿机

滚齿机按布局形式和结构特点，可分为下列几种。

a. 立式滚齿机：工件轴处于垂直位置。分为两种：工作台移动，立柱固定，这种形式常用于中小型滚齿机；工作台固定，立柱移动，这种形式常用于大滚齿机。

b. 卧式滚齿机：工件轴处于水平位置。加工仪表齿轮的小型滚齿机和加工长轴齿轮的大型滚齿机常用此种形式。

c. 无差动斜切式滚齿机。

d. 双轴或多轴滚齿机，属于立式滚齿机的一种，有几个工位。

（2）插齿机

插齿机类型按工件轴线分布情况分为两类：

a. 立式插齿机：机床的刀具轴线与工件轴线都是垂直分布。这类插齿机按刀齿形式又可分为圆盘刀插齿机和齿条刀插齿机。

b. 卧式插齿机：机床的刀具轴线与工件轴线水平安装，它多用于加工无空刀槽人字齿轮、内人字齿轮以及各种轴齿轮。

（3）剃齿机

汽车论坛 http://www.qclt.com

目前中等尺寸的剃齿机按布局形式分为3种：

a. 卧式剃齿机工件轴和剃齿刀刀轴水平分布，而工件位于刀具的前面。

b. 卧式立面布局的剃齿机工件轴和剃齿刀刀轴水平分布，而工件位于刀具之下方。

c. 立式剃齿机剃齿刀刀轴和工件轴垂直布局，这种形式多为加工较大尺寸的工件和与其它配套工序，如与滚、插等机床的布局相协调而采用。

(4) 珩齿机

a. 内齿珩磨轮珩齿机：有两种结构类型：顶尖式及悬臂式

顶尖式珩齿机是将被珩齿轮通过心轴安装在两顶尖之间，由电动机驱动旋转作主运动，带动内齿珩磨轮作从动运动；同时，内齿珩磨轮作轴向往复运动，被珩齿轮作径向进给运动。

悬臂式珩齿机是将内齿珩磨轮和被珩齿轮分别安装在床头箱的主轴端和尾架端，由电动机驱动被珩齿轮作主运动，带动内齿珩磨轮作从动运动；同时，内齿珩磨轮作轴向往复运动，被珩齿轮作径向进给运动。

b. 蜗杆珩磨轮珩齿机：蜗杆珩磨轮珩齿机的珩磨轮由电动机驱动旋转作主运动，被珩齿轮由珩磨轮带动作从动运动。为了珩出全齿宽，被珩齿轮须作轴向往复运动。

(5) 磨齿机

a. 蜗杆砂轮磨齿机：这种磨齿机生产率很高，它的展成运动和分度运动是同时连续进行的，没有空程和回程时间，调整时间也很短，特别适用于成批生产和大量生产。这类磨齿机的磨齿精度取决于机床传动链的精度和蜗杆砂轮修形的精度。瑞士RZ301S型磨齿机不用齿轮传动和分度盘而用计算机控制杆砂轮和工件之间的传动，从而提高磨齿精度和降低齿面粗糙度。使用这种机床所磨齿轮的齿距精度可以达到3级。

b. 渐开线包络环面蜗杆磨齿机：这种磨齿机的生产率比蜗杆磨齿机还要高很多倍。这种方法磨削齿轮是线接触，连续磨削，磨削齿轮一般无需轴向进给。其平均生产率为1s/齿。修整一次砂轮可以磨15～30个齿轮，重新修整一次砂轮只要1min。一个砂轮大约可以磨3 000～6 000个齿轮，一个修整工具可以双面多次使用，所修整的砂轮总共可以磨削80 000个齿轮，这种加工方法特别适合于大量生产。目前瑞士莱斯豪尔（REISHAUER）公司生产的RZP型渐开线环面蜗杆磨齿机还只加工模数1～3mm，直径小于120mm的斜齿轮。

c. 成形砂轮磨齿机：这种磨齿机效率也很高。采用成形磨削法无需进行展成运动，而是使用成形砂轮磨出整个齿形。德国卡博（KAPP）公司生产的VAS385CNC齿轮磨床采用了CBN成形砂轮，砂轮截形精度很高，使用寿命很长，可多件同时磨削，自动上下料。生产率是一般蜗杆砂轮磨齿机的2～3倍。但由于每一种规格的齿轮都需要配备专门设计的CBN成形砂轮，因而这种磨齿机只适合于大量生产齿轮用。

d. 锥面砂轮磨齿机：这种磨齿机的生产率低于前面几种磨齿机，但比碟形双砂轮磨齿机和大平面砂轮磨齿机的生产率要高。它可以同时磨削齿轮的两面，砂轮的刚性好，可采用较大的磨削用量。同时，这类机床中有的分度和展成机构是采用改变交换齿轮比的办法，生产准备和调整都比较简单，适合于单件和小批量生产使用。

e. 碟形双砂轮磨齿机：它装有砂轮磨损补偿机构，在工作过程中，砂轮磨损不会影响齿形和齿厚精度，这对磨削大直径及宽度大的齿轮特别重要。此外，它的砂轮是用很窄的棱边进行磨削，接触面小，磨削力和发热都小，容易保持磨齿精度，但生产效率低。

f. 大平面砂轮磨齿机：用这种机床磨齿，一次安装只能磨削轮齿的一侧面，磨完整个齿轮的一侧面后，必须把齿轮取下，反转安装再磨削齿轮的另一侧面。同时，这种机床又只能干磨，不能采用较大的磨削深度，所以它的生产效率低。

2) 锥齿轮加工

汽车行业常用的锥齿轮主要有直齿锥齿轮、弧齿锥齿轮，延伸摆线齿锥齿轮。后两者又称为螺旋锥齿轮。

在锥齿轮加工中，为了便于理解，常采用“产形齿轮”这一概念。即机床摇台和刀具系统代表一个假

想产形齿轮，刀具运动时，切削刃口轨迹表面代表产形齿轮一个轮齿表面——产形齿面。当产形齿轮与被加工齿轮相啮合运动时，产形齿面在被加工齿轮坐标系中所形成的共轭曲面即为被加工齿轮的轮齿表面，见图 2-5-18。

（1）直齿锥齿轮

直齿锥齿轮加工方法较多，其中常用的主要有 4 种方法，即成形齿轮铣刀铣齿法；刨齿法；双刀盘滚切法和圆拉法。

a. 成形齿轮铣刀铣齿法：成形齿轮铣刀加工直齿锥齿轮是近似成形法加工。直齿锥齿轮的齿形，理论上应为球面渐开线。由于球面不能展开成平面，所以是近似的用背锥展开面上的当量渐开线齿形来设计成形铣刀的齿形。由于直齿锥齿轮的齿廓是向锥顶收缩，沿节锥母线上各背锥展开面上的当量渐开线齿形曲率不同，直齿锥齿轮铣刀的齿形只能按照节锥母线上某一背锥展开面上的当量渐开线齿形来设计，加工出来的齿轮齿形也只能在某一剖面中比较准确，其它剖面则有一定误差。因此直齿锥齿轮成形铣刀只适于粗加工和加工低精度的直齿锥齿轮。

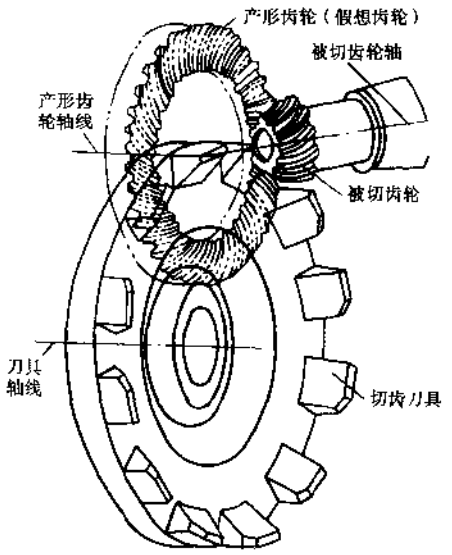


图 2-5-18 产形齿轮

b. 刨齿法：直齿锥齿轮刨齿机分别按照平顶产形齿轮原理和平面产形齿轮原理对直齿锥齿轮进行加工。齿形精度与机床传动链的精度有直接关系，加工精度高但生产率较低。

c. 双刀盘滚切法：是按平面产形轮原理，双刀盘铣刀切削刃所形成的切削表面代表平面产形轮轮齿表面，所以它可加工出齿形精度较高的直齿锥齿轮。双刀盘滚切法铣齿的优点：

①双刀盘铣齿法加工的直齿锥齿轮可以同刨齿法加工的齿轮相啮合。

②双刀盘铣齿法的切齿生产率比刨齿法高 2～4 倍。

③对于模数 6mm 以下的齿轮，采用双刀盘铣齿法可以不经粗切从毛坯一次可加工出所要求的齿面。其加工精度可达“GB11365—89 锥齿轮和准双曲面齿轮精度”标准中 7～8 级，齿面粗糙度可达 $Ra6.3\mu m$。对于模数大于 6mm 的齿轮必须先经粗切而后才能用双刀盘铣齿法精加工。

④双刀盘铣齿法便于进行齿长方向中凸的鼓形修正，以实现沿齿长方向局部接触。

⑤用两个工位的双工位双刀盘铣齿法，不仅可以在两个工位上分别加工两个相同或共轭的直齿锥齿轮，并使工序时间重合，以提高生产率，而且在两个工位上采用不同的滚切方向，刀具主切削刃交替进行切削，以使两个刀盘主切削刃磨损均匀，从而提高刀具寿命。

d. 圆拉法：圆拉法加工直齿锥齿轮时，圆拉刀盘与被切齿轮之间没有类似齿轮啮合过程的展成运动，只有刀齿形成被加工齿面的包络运动。因此，按被加工齿面形成特点，圆拉法属于无固定瞬心包络法。

为制造方便，圆拉刀盘各刀齿的侧刃齿形均采用同一曲率的圆弧。为保证加工出来的齿轮轮齿向锥顶收缩，各刀齿侧刃圆弧的曲率中心，应位于等变距的锥面螺旋线上。用这种圆拉刀切制出的齿轮，其齿形是近似圆弧形，但曲率不同于圆拉刀齿形曲率。用这种方法加工出来的一对齿轮可以满足共轭关系。

汽车行业中，大多使用双刀盘铣齿机和圆拉机床进行直齿锥齿轮的加工。由于直齿锥齿轮主要被广泛使用于差速器的行星半轴齿轮，行星齿轮只是在汽车转向才进行传动，且传动速度较低，要求精度不高，故近来汽车界普遍采用精锻工艺进行行星齿轮的齿形加工。精锻加工生产效率高，生产成本低，材料利用率高，具有较大的优势。

（2）弧齿锥齿轮及准双曲面齿轮的加工

弧齿锥齿轮及准双曲面齿轮的加工根据不同的产形齿轮节锥面和齿顶面形状而形成不同的加工方法，

汽车论坛 http://www.qclt.com

并由不同结构形式的机床来实现。目前在我国主要采用两种不同形式的产形齿轮：即平顶产形齿轮和平面产形齿轮，而锥面产形齿轮的加工方法在我国基本不用。

弧齿锥齿轮及其准双曲面齿轮采用平顶产形齿轮加工原理进行加工。

我国汽车行业主要采用美国“格里森”（GLEASON）制机床加工弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮，其齿制为收缩齿弧齿锥齿轮。

“格里森”制机床加工弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮的弧形齿线是用旋转刀盘上刀齿的直线刃在转动时所形成的圆弧形轨迹来模拟。铣刀盘的自转是切削运动，刀盘装在摇台上摆动，即公转。铣刀盘的公转形成了假想平顶齿轮的转动。被切齿坯装在分齿装置的主轴上，由主轴带动转动。摇台与齿坯的转动，当于假想平顶齿轮与锥齿轮的啮合，形成展成运动。

对于弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮当传动比大于2.5时，大齿轮的齿形接近直线，因此可用半展成法切齿，实质是大齿轮切齿采用仿形法，机床的摇台不摆动（即没有展成运动），所以切出的齿形与刀齿的齿形相同，在法向截面内都是直线齿形。半展成法的小齿轮切齿时仍用展成法并加以修正，小齿轮在节圆内外的齿厚应加以修正使之减薄。由于半展成法加工的生产效率高、质量也高而加工成本低，适用于大批量生产，故在汽车制造业中广泛采用。

圆弧齿锥齿轮的切齿方法很多，详见表2-5-18：

表2-5-18 圆弧齿锥齿轮的切齿方法

切齿方法		加工特点	需要机床	需要刀盘	优缺点	适用范围
单刀号单面切削法		大齿轮和小齿轮轮齿两侧表面粗切一起切出，精切单独进行，小齿轮按大齿轮配切	至少需要1台万能切齿机	一个双面刀盘	接触区不太好，效率低但可以解决机床和刀具数量不够的困难	适于产品质量要求不太高的单件和小批生产
双面切削法	单台双面切削法	大齿轮的粗切和精切使用单独的粗切刀盘和精切刀盘同时切出齿间的两侧表面，小齿轮粗切使用一把粗切双面刀盘；小齿轮精切分别用一把外精切刀盘和内精切刀盘切出齿间的两个侧面	至少需要1台万能切齿机	大齿轮粗切一个 精切一个 小齿轮粗切一个外精切一个内精切一个	接触区和齿面粗糙度较好，生产效率较前者高	适用于质量要求较高的小批和中批生产
	固定安装法	加工特点与单台双面切削法相同，但每道工序都在固定的机床上进行	大齿轮粗切一台、精切一台 小齿轮粗切一台、外精切一台、内精切一台	大齿轮粗切一个 精切一个 小齿轮粗切一个外精切一个内精切一个	接触区和齿面粗糙度较好，生产效率也比较高，但需要的切齿机床和刀盘数量都比较多	适用于大批量生产

续上表

切齿方法		加工特点	需要机床	需要工盘	优缺点	适用范围
双面切削法	成形法(半展成法)	加工特点与固定安装法相同，但大齿轮采用成形法切出，小齿轮轮齿两侧表面分别用展成法切出	和固定安装法相同	和固定安装法相同	优缺点和固定安装法相同，但大齿轮精切比用展成法的效率可以成倍地提高	适用于传动比大于2.5的大批量流水生产
	螺旋成形法(半展成法)	加工特点与成形法相同，但在大齿轮精切时，刀盘还具有轴向的往复运动，即每当一个刀片通过一个齿间时，刀盘就沿其自身轴线前后往复一次，刀盘每转一圈就切出一个齿间	和固定安装法相同	和固定安装法相同	接触区最理想，齿面粗糙度好，生产效率高，是目前比较先进的新工艺	适用于传动比大于2.5的大批量流水生产
双重双面法		大、小齿轮均用双面刀盘同时切出齿间的两个侧表面	大、小齿轮粗精切各1台，共用4台	大、小齿轮粗精切各1个，共用4个	生产率比固定安装法高，但接触区不易控制，质量较差	适用于模数小于2.5及传动比等于1的大批量生产

在大批量生产中多采用固定安装法，但近年来由于机床技术的发展，一次切削法开始逐渐被人们所采用。

弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮副的研齿是为了降低热处理后的表面粗糙度参数值和改善齿面接触质量。经过良好研齿的齿轮将显著降低齿轮副啮合噪声，使运转更加平稳。

研齿不能改变因热处理变形而造成的不良接触区，所以不能把研齿当磨齿使用。

研齿时，大小齿轮是成对研磨的，研齿后成对使用，不能相互更换。

齿轮热处理变形使齿轮精度和表面质量都有所降低，为了提高齿轮精度，除了采用传统的磨齿加工方法外，还可以采用CBN砂轮磨齿，以及采用CBN刀具和硬质合金刀具刮削硬齿面。

(3) 摆线锥齿轮及其准双曲面齿轮的加工

摆线锥齿轮也称长幅外摆线锥齿轮，指该种齿轮的齿线在平面上的展开线是长幅外摆线。它是由端面螺旋铣刀的刀齿和被加工齿轮在连续相对转动过程中完成分度运动时所形成的长幅外摆线齿线(图2-5-19)。

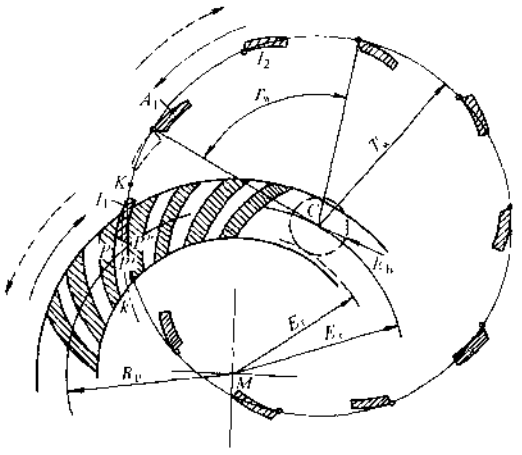


图2-5-19 摆线生成原理

摆线锥齿轮及其准双曲面齿轮的加工采用的是平面产形齿轮加工原理进行加工。

我国汽车行业主要采用瑞士“奥林康”(OERLIKON)制机床加工摆线锥齿轮和准双曲面齿轮，其齿制为等高齿摆线齿锥齿轮。

奥林康制机床切齿时有3个连续旋转的运动：

汽车论坛 http://www.qclt.com

即摇台、刀盘和工件3个运动同时进行，加工一个工件摇台往复一次，铣刀盘和工件的连续旋转使工件获得一定齿数的连续分度，并形成齿长曲线，摇台的旋转和工件的附加运动结合起来，产生展成运动，使工件得到渐开线齿形，这3个旋转运动结合起来，相当于两个锥齿轮的啮合运动，其中一个为假想平面齿轮，另一个是被切齿轮，平面齿轮的轮齿为铣刀盘的刀片切削刃的运动轨迹所代替。奥林康制锥齿轮机床的最基本的特点就在于采用连续分度加工机理。

和弧齿锥齿轮相比，延伸摆线齿锥齿轮在切齿方面的主要优点是：

a. 切齿时分齿运动是连续的，不需要间断的分齿及相应的空行程反向运动，切齿效率高，齿距精度也较易保证。

b. 采用等高齿，刀具的参数计算和机床的调整比较简单，调整齿面接触区比较容易。

c. 大、小轮都能在一道工序上一次调整同时完成齿槽两侧面的粗精加工。

d. 切齿刀具适应的范围大，一种刀盘可以装1～3种模数范围的刀片，适应多种参数的齿轮加工

其缺点是齿高方向的接触区宽度不能灵活控制，磨齿比较困难。

延伸外摆线等高齿锥齿轮的切齿方法见表2-5-19。

表2-5-19 延伸外摆线等高锥齿轮的切齿方法

切齿方法	加工特点	机床数量	刀盘数量	优缺点	适用范围
展成法	大、小齿轮各安装一次，同时切出两侧齿面	1台或2台	左、右旋刀盘各1个	接触区理想、粗糙度较好、机床调整、计算都比较简单	适用于单件或小批量生产
组合切削法	大、小齿轮各安装一次，同时切出两侧齿面，但是切大齿轮时，摇台先不摆动，而把齿切到一定深度后再摆动展成齿形	1台或2台	左右旋刀盘各1个	同上，但生产效率较展成法高	适用于大批量生产

摆线齿锥齿轮和准双曲面齿轮副的研齿的作用也是为了降低热处理后的表面粗糙度参数值和改善齿面接触质量，增加齿轮运转平稳性，降低噪声，增加齿面的承载能力。

齿轮热处理变形使齿轮精度和表面质量都有所降低，为了提高齿轮精度，摆线齿锥齿轮和准双曲面齿轮也采用CBN砂轮磨齿。磨齿后，可以取消珩齿和配对工序。另外还可以采用CBN刀具和硬质合金刀具刮削硬齿面，刮削工件硬度达58～62HRC，刮削后的齿面粗糙度可达 $Ra0.32\sim1.25\mu m$。

(4) 锥齿轮加工的发展

目前，在锥齿轮加工上主要形成了两种加工体制，即瑞士奥林康（OERLIKON）制和美国格里森（GLEASON）制，虽然两者加工基本原理相同，但由于各自的机床、刀具差别很大，各自形成一个完整体制。用户只能在这两种加工体制中选择，对锥齿轮的设计应用有一定的限制。在我国汽车行业奥林康制和格里森制锥齿轮机床都有采用（另外还有克林根（KLINGELNBERG）制的锥齿轮加工体制，但在我国汽车产业基本不用）。

随着CNC技术的发展，不论是奥林康制还是格里森制锥齿轮加工机床，技术互相渗透，最新生产的奥林康制锥齿轮加工设备和格里森制锥齿轮加工设备，实现了两种体制锥齿轮在加工机床上互换，给用户带来了极大的方便。如格里森“凤凰”（PHOENIX）系列锥齿轮加工机床和奥林康制S25/35切齿机即是两种齿制都能加工的设备。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.5.2.9 螺纹加工

加工螺纹时最基本的技术要求是保证螺纹的三要素：螺距、牙型和中径。除有一定的精度要求和表面质量要求外，还因其用途不同而有其它要求，如一般螺纹有中径和顶径（外螺纹的大径，内螺纹的小径）的精度要求；传动螺纹有螺距和牙型角的精度要求。此外，精密螺纹为保证传动精度和耐磨性，还有硬度、粗糙度、尺寸稳定性等要求。

螺纹面的加工方法很多，有攻丝、套扣、车削、铣削、滚压及磨削等。要根据具体要求和条件合理选择各种加工方法和加工顺序。

表 2-5-20 列出了常用的螺纹加工方法，加工精度及应用特点。

表 2-5-20 常用螺纹加工方法

序号	加工方案		精度等级（IT）	表面粗糙度 Ra（μm）	特点及应用
1	手动 机动	攻丝	7～8	1.6～6.3	加工小尺寸、单件小批量的非淬硬内三角螺纹，机动攻丝用于批量生产，粗糙度高
2	手动 机动	套扣	7～8	1.6～6.3	加工外螺纹，其它同上
3	单刀车螺纹		4～8	0.4～1.6	加工范围变化大，一般多用于低产量的非淬硬内外螺纹。刀具简单，加工费低，粗糙度较高
4	螺纹梳刀车削		6～8	0.8～1.6	适合批量生产，不能用于精加工，可加工螺纹附近无台阶的内外螺纹，粗糙度较高
5	盘铣刀 梳铣刀	铣螺纹	6～8	3.2～6.3	盘形铣刀加工尺寸较大的螺纹，精度低，但粗糙度低，梳形铣刀加工短而距离小的内外三角螺纹，附近可有台阶
6	旋风铣螺纹		7～8	1.6～3.2	可加工内外螺纹，精度不高，但粗糙度低
7	单线砂轮 多线砂轮	磨螺纹	4～6	0.1～0.4	加工淬硬或非淬硬的精密螺纹。单线砂轮修整方便，加工精度较多线的高，并可加工工件长和尺寸大（$D>30$mm）的内螺纹，多线砂轮，粗糙度低
8	研磨螺纹		4	0.1	加工精密螺纹，研具可用铸铁制成的与被研螺纹配对的螺纹副，加工时添加研磨及润滑剂
9	搓丝板 滚丝轮	滚压螺纹	4～6	0.2～1.6	滚压螺纹精度高、质量好，可提高硬度和疲劳强度，并可省材料，成本低，用于大量生产。搓丝加工直径 $d<25$mm，滚丝加工直径 $d=0.3$～120mm，需专用设备

汽车行业常用的螺纹加工方法主要机动攻丝及套扣、车螺纹、搓丝及滚压螺纹。

2.5.2.10 特种加工

1）电火花加工

电火花加工是利用工具电极和工件电极之间脉冲性火花放电时所产生的电腐蚀现象来蚀除多余的金属，而使零件达到预定的尺寸、形状及表面质量。

电火花加工的工艺特点：

①电火花加工是利用极间火花放电时所产生的电腐蚀现象，靠高温熔化和气化金属进行蚀除加工的。

汽车论坛 http://www.qclt.com

因此，可以使用较软的紫铜等工具电极，对任何导电的难加工材料进行加工。如：硬质合金、耐热合金、淬火钢、不锈钢、金属陶瓷、磁钢等用普通加工方法难于加工或无法加工的材料，达到以柔克“钢”的效果。

②电火花加工是一种非接触式加工，加工时不产生切削力，不受工具和工件刚度的限制，有利于实现微细加工，如薄壁、深小孔、盲孔、窄缝及弹性零件等的加工。

③加工中不需要复杂的切削运动，有利于异形曲面零件的表面加工。由于工具电极的材料可以较软，工具电极极易制造。

④尽管放电温度较高，但因放电时间极短，所以对加工表面不会产生厚的热影响层，适于加工热敏感性很强的材料。

⑤加工时脉冲电源的电脉冲参数调节及工具电极的自动进给可通过一定措施实现自动化，从而使电火花加工与微电子、计算机等高新技术的互相渗透与交叉。目前，自适应控制、模糊逻辑控制的电火花加工已经开始出现和应用。

⑥加工时，工具电极会产生损耗，这会影响加工精度。

电火花加工方法按其加工方式和用途分为电火花成形加工、电火花线切割加工、电火花磨削和镜磨加工、电火花同步回转加工、电火花表面强化与刻字等五大类。其中以电火花穿孔成形加工和电火花线切割加工的应用最为广泛。

2）电解加工

电解加工是利用金属在电解液中的电化学阳极溶解原理将工件加工成形的。

电解加工的工艺特点：

①加工范围广，凡是能导电的材料均可进行电解加工；

②生产率较高，对各种型腔及型面可以一次成形，能取代多道机械加工工序；

③加工过程中不存在机械切削力和电火花加工时的热效应，加工表面不产生残余应力和应变层，没有飞边毛刺，加工表面的粗糙度可达 $Ra<1\mu m$；

④加工过程中工具阴极在理论上不会损耗，可长期使用；

⑤电解加工的加工精度不够理想，一般为±0.1mm；

⑥设备初始投资较大，且耗能较多（加工时的电流有时可达上万安培）。

电解加工技术在加工难加工材料、异形表面及对表面质量要求较高的零件上显示出较大的优越性，因此被广泛地应用于汽车模具制造等领域。

3）超声加工

超声加工是利用工具端面作超声频（16～25kHz）振动，通过工作液中的悬浮磨料对工件表面冲击抛磨来实现加工的。

超声加工的工艺特点：

①加工范围广，可用于对任何材料加工，尤其对非金属硬脆材料加工，具有相当大的优越性；

②加工精度高，表面质量好；

③加工设备简单，不需使工具与工件之间作比较复杂的相对运动即可完成诸如异形孔、雕刻花纹及图形的超声加工；

④超声加工的效率不高，其加工效率远不如电火花与电解加工，对软质材料及弹性大的材料的加工较为困难；

⑤由于超声加工可用较简单的设备加工出高质量的表面，很适合于与其它工艺进行复合加工，如超声—电火花加工，超声—电解加工，超声—研磨加工等。

4）激光加工

利用一系列光学系统，把激光光束聚焦成极小的光斑，获得 10^8～$10^{10}W/cm^2$ 的能量密度及10 000℃以上的高温，在千分之几秒甚至更短的时间内，使任何材料熔化和气化而被蚀除下来，实现加工。

激光加工的工艺特点：

汽车论坛 http://www.qclt.com

(1)适用范围广，几乎可以对所有材料进行加工；

②不需要加工工具，很适用于自动化连续作业；

③是一种非接触式加工，加工中的热变形、热影响区都小，很适用于精密微细加工；

④加工速度快、效率高；

⑤可通过透明材料（如玻璃等）对工件进行加工，这对某些特殊情况（如工件必须在真空环境中加工）下的加工是非常有利的；

⑥激光加工的设备复杂，一次性投资较大。

5）电子束加工

电子束加工是在真空状态下，利用高速电子的冲击动能转化成局部热能而对材料进行加工。

电子束加工的工艺特点：

①电子束可聚集极高的能量密度，其加工范围相当广泛，几乎可对任何材料进行加工；

②电子束流可聚成几微米甚至几分之一微米的小斑点，加工面积可以很小，能加工微孔、窄缝等；

③是一种非接触式加工，加工过程中工件不受机械力作用，不产生宏观应力和变形；

④加工过程容易实现自动化，且电子束流可以分割成多条细束，可以实现多束同时加工，一秒钟可以加工出数千个小孔，从而大大提高了生产率；

⑤产生污染少，加工表面在高温时也不易氧化；

⑥需要一套专用设备和真空系统，价格较贵。

2.5.2.11 机械加工自动化

汽车行业机械加工自动化的发展，经历了自动化单机、切削加工自动线、数控机床、加工中心、柔性制造系统和智能制造系统等的发展阶段。

1）自动化单机和切削加工自动线

机械加工自动化是从自动化单机开始的。在通用金属切削机床中，有多轴自动车床、自动液压仿型车床、自动转塔车床、全自动外圆磨床、全自动多工位组合机床等，这些机床具备半自动和自动加工工件的功能，适用简单工件简单工序的批量生产加工。

切削加工自动线是由工艺设备、工件输送系统、控制和监视系统、检测系统和辅助系统等组成的自动加工生产线。

切削加工自动线按设备类型可分为通用机床自动线、组合机床自动线、专用机床自动线、转子自动线等。汽车零部件的生产中应用最多的是组合机床自动线。

组合机床自动线由组合机床、输送带、排屑冷却系统、辅助装置及中央控制装置等组成。根据输送方式不同可分为直接输送和间接输送两大类。

直接输送自动线的被加工工件具有良好的运送基面，工件可直接从一台机床向另一台机床移动（如发动机的缸体、缸盖、变速器的壳体等箱体类零件）。这类自动线按照工件在机床间移动方式的不同，又可分为通过式和非通过（外移式）两种类型，其输送带型式有棘爪式、摆杆式、抬起步伐式和吊起式。

间接输送自动线用于加工没有稳定定位和运送基面的工件（如发动机的进气管、排气管等）。工件在加工前，先要在上料工位上安装并固定在随行夹具上，并随夹具一起从一台机床移到另一台机床，加工完毕后返回原位。

组合机床自动线用于孔加工和平面加工效果最为显著，特别像汽车行业的发动机缸体、缸盖、变速器壳体的加工。

近年来组合机床自动线有了较大的发展，广泛采用了机械伺服驱动系统、刀具快换系统（HSK）、大流量冷却液的供排系统、快速工件传输系统等技术，使得自动线的精度及生产效率都有较大的提高。适应纲领范围较大，年生产纲领可达10～100万台（件）。目前，汽车行业较大的制造厂家的发动机缸体、缸盖、变速器壳体等零部件的生产基本都是采用组合机自动线。如果利用一种可更换主轴箱的组合机床组成的自动线，则可以扩大生产品种

汽车论坛 http://www.qclt.com

2）柔性加工

从60年代开始，计算机技术得到了突飞猛进的发展，在加工自动化方面数控机床逐步取代了传统的自动机床，为了适应市场对产品多品种的要求，人们越来越欢迎可以迅速改变加工产品品种的柔性加工。

柔性加工的发展经历了柔性制造单元（FMC）、柔性制造系统（FMS）、柔性生产线（FTL）、敏捷柔性生产线（AFTL）、计算机集成制造系统（CIMS）等过程，而加工中心及数控机床是构成柔性加工的基本单元。

（1）加工中心

加工中心是备有刀库并能自动更换刀具对工件进行多工序集中加工的数控机床。依其功能可分为镗铣加工中心、车削加工中心、磨削加工中心、冲压加工中心、齿轮加工中心及能自动更换多轴箱的多轴加工中心等。一般把主要功能为完成铣镗类工艺的加工中心称为加工中心。在加工中心上工件经一次装夹后，数控系统能控制机床按不同工序（或工步）自动选择和更换刀具，自动改变切削参数，完成工件多种工序的加工。

加工中心具有适用范围广、加工精度高、生产效率高等优点，是构成柔性加工单元及柔性加工系统的基础。

近年来加工中心技术的发展非常快，尤其在高速化方面突飞猛进。其主轴转速由以前的4 000～6 000 r/min提高到现在的10 000～15 000 r/min，有的甚至达到20 000 r/min，机床的进给速度由以前的20～30m/min提高到现在的60～75m/min，进给加减速度也已提高到1.0～1.5g。加工中心的换刀时间，目前立式加工中心的刀—刀换刀时间已达1.0～1.5s，个别可达0.8s，卧式加工中心的换刀时间亦可达1.5～3s，屑—屑的换刀时间可达4.5～8s。工作台交换时间可达3～6s。由于加工中心的高速化发展使得其生产效率进一步提高，越来越得到广泛的应用。

（2）柔性制造单元

柔性制造单元是具有独立加工性能、工件储存和交换功能以及监测功能的加工单元。通常由一台刀库容量大的加工中心和带有储存、传递功能的自动交换托盘（APC）组成，CNC系统全面控制和管理机床及外围设备。近年来有逐渐向模块化发展的趋势，柔性单元概念扩大，出现了自动更换多轴箱（AGC）和同类型可以互代的加工中心加工输送装置（如机器人）组成的柔性单元，整个单元仍由一个CNC系统全面控制与管理。这种新型的柔性单元采用多轴箱加工提高生产率并具有易扩充和裁剪特点，可成为柔性制造系统的组成单元。柔性单元工序集中，在一个单元内可完成零件的全部或大部分工序，适合于多品种小批量的场合。

（3）柔性制造系统（FMS）

通常所说的FMS是指以数控机床、加工中心及辅助设备为基础，用柔性的自动化运输、存储系统有机地结合起来，由计算机对系统的软、硬件资源实施集中管理和控制而形成的一个物料流和信息流密切结合的、没有固定的加工工序和工作节拍、主要适用于多品种中小批量生产的高效自动化制造系统。

FMS应具备如下功能：

a. 自动加工功能。包括在不停机的情况下，自动地变更工作程序，自动换刀，自动装卸工件，自动调整冷却切削液的供给及自动处理切屑等。

b. 自动搬运和储料功能。

c. 自动监控和诊断功能。

d. 信息处理功能。

FMS的基本组成：

一般FMS由以下4个具体功能系统组成，即自动加工系统、自动物流系统、自动监控系统和综合软件系统（图2-5-20）。

a. 自动加工系统

自动加工系统一般由加工设备、检验设备和清洗设备等组成，是完成零件加工的硬件系统。FMS中所使用的加工设备一般为数控机床和加工中心，以加工中心更为常用。

自动加工系统的检验设备主要包括各种测量机和传感器，以检测加工情况、切削异常状态、刀具破损情况

等。

b. 自动物流系统

自动物流系统由仓储、搬运等子系统组成，包括运送工件、刀具、切屑及冷却液等加工过程中所需要的“物料”的搬运装置，装卸工作站及自动化仓库等。

c. 自动监控系统

为了能对FMS的生产过程实施适时控制，系统中安装了大量的传感器，这些传感器一般安装在机床或搬运装置上。为了监视整个生产过程，传感器也可以单独配置，如工业电视、红外线温度检测器和烟雾感知器等。

d. 综合软件系统

FMS需要处理的信息量相当大，而且性质复杂。综合软件系统是对系统中复杂的信息流进行合理处理，对物流进行有效控制，从而使系统达到高度柔性和自动化的重要保证。

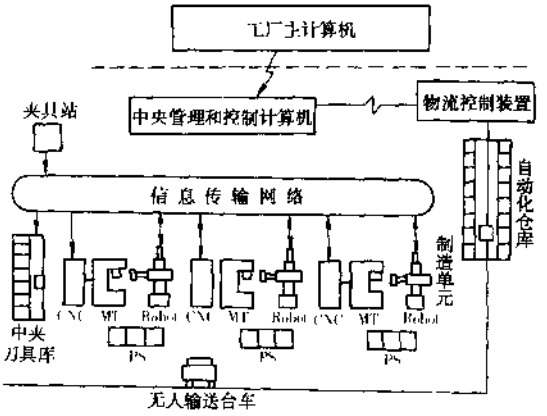


图 2-5-20 FMS结构图

柔性加工系统可以快速变更产品品种，减少操作人员和提高设备利用率，但作为该系统的切削加工主体为单轴加工的一般加工中心，且工序集中度较大，生产效率低、投资费用大，在汽车行业多用于多品种、小批量场合。

(4) 柔性自动线（FTL）

柔性自动线是一种介于传统自动线和柔性制造系统之间的自动线形式，是在传统自动线基础上发展起来的，由三坐标数控加工模块和数控组合机等组成，按工序流程排列设备，并由自动输送装置连接，能适应大批量生产的高效率又具有适当柔性，可进行多品种混流生产。一般采用直线布置形式，全线机床、输送系统、零件识别均统一在一个控制系统中，线上的数控组合机和数控模块多采用转塔式主轴箱、快换主轴箱等多轴加工形式。其自动线生产效率较高，节拍时间短，但柔性不如柔性制造系统和柔性单元，不能加工不可预见的任意品种的零件，只能加工或混流生产一定品种范围的零件，但在预定品种范围内，更换品种的费用和调整时间又比传统的组合机传动自动线要少。

(5) 敏捷柔性自动线

敏捷柔性自动线属柔性自动线范畴，是后者的发展，它具有柔性自动线的一系列特点，在柔性化方面又比柔性自动线有进一步的扩大。如前所述，柔性自动线采用了可换带多轴箱、转塔多轴箱的数控模块进行多轴加工，生产效率比柔性系统高，适合于15~25万件/年的纲领，但柔性相对比柔性系统要低，只在一定产品范围内具有柔性。随着高速加工技术的发展，高速加工中心的出现，使加工中心的效率大为提高，因而出现了兼有柔性制造系统的柔性和柔性自动线效率的一种新型柔性自动线，由于具有较强的市场反应能力，因而称为敏捷柔性自动线。这种生产线和柔性自动线一样，设备按工序流程排列，每台机床承担相对固定的加工内容，机床间采用各种自动输送系统连接，根据产量的需要，同一工序内容可由单台或多台相同的机床完成，其突出的不同点是线上设备是由单轴加工的高速加工中心为主，即每道工序均为单轴加工，具有快速适应产品变化能力。因此，敏捷生产线是伴随着高速加工中心的发展而出现的一种具有较高生产效率的新型生产线，它代表着21世纪汽车生产线的发展方向。

(6) 计算机集成制造系统（CIMS）

① CIMS基本概念

80年代中期以来，以CIMS为标志的综合生产自动化日渐成为制造工业的热点。主要是因为CIMS具有提高生产率、缩短生产周期、减少废品、适应市场竞争的需要等一系列的优点；一些大公司由于采用CIMS已取得了显著的经济效益；CIMS是一种管理企业及生产的新的哲理，也是在新的生产组织原理和概念指导下形成的一种新型生产模式。CIMS将成为21世纪占主导地位的新型生产方式。

汽车论坛 http://www.qclt.com

② CIMS的构成

CIMS的构成可以从功能、结构及科学等不同角度来了解。

从功能角度看，CIMS包含了一个制造工厂的设计、制造及经营管理3方面的功能，要使这三者集成起来，还需要有一个支撑环境，即分布式数据库和计算机网络，以及指导集成运行的系统技术。图2-5-21示出了CIMS工厂各个功能模块及其外部信息输入、输出关系。

③ CIMS的功能模块

a.CAD 在CIMS中，进行工程设计时需要调用各种不同的数据库中的数据，如工厂管理中的某些数据；加工后、坐标测量机对零件检测的数据。而且各种CAD工作站中图形或数据应该构成一个联合设计环境，因此，这里的CAD不是孤立的，而是内部与外部密切相关并带有反馈的CAD。CAD进一步发展还可能包括产品设计的专家系统及设计中的仿真技术。

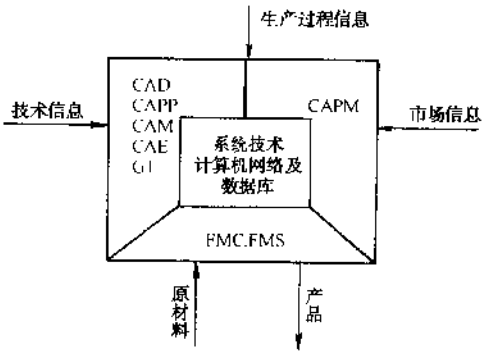


图2-5-21 CIMS功能示意图

b.CAE 包括对零件的机械应力、热应力进行有限元分析及考虑到产品本身成本等因素的优化设计等功能。

c.CAPP 对机械产品及加工零件需要合理地选择工艺参数，将产品设计信息转换成加工指令，以便制造零件或产品。这意味着工艺过程设计直接与工件图纸和材料清单相联系。利用集成系统中的计算机和公用数据库，实现这种联系。根据工艺过程设计提供的信息使工件通过各个制造阶段，包括从选择原材料开始，到制成成品为止。

d.CAM 按照零件的形状和CAPP生成的NC代码，并考虑刀具补偿等因素进行后处理。金属切削作业主要由机床完成，还应控制工件与工具间准确的相对。这样就需要能够产生并跟踪各种轨迹和完成逻辑控制功能的控制器。控制器的任务是利用几何图形和制造工艺数据，产生并运行有效的控制程序。其它基本功能是轴（坐标）控制、加工过程自适应控制和优化等。

e.FMS 柔性制造系统是CIMS的加工制造子系统，在这里将毛胚加工成合格的零件并装配成部件以至产品。这牵涉到加工制造中的许多环节。在这里物料流与信息流交汇、完成设计及管理中的指定任务，并将制造现场的不同信息，包括实时的或经过初步处理（如统计分析）的信息反馈到相应部门。

f.CAPM 计算机辅助生产管理包括年、月或周生产计划制定，物料需求计划（MRP）制定，制造资源计划MRP-Ⅱ，生产能力（资源）的平衡以及财务、仓库等各种管理功能结合起来构成CAPM。此外，还包括经营方面的市场预测，制定长期发展战略计划等功能。

④ 集成方法及技术

要使上述主要功能块集成起来运行，就需要有一套分析设计和指导成运行的方法，如成组技术（GT—Group Technology）以及实现集成所必须的手段——集成技术（即采用分布式数据库管理系统及工厂局域网的支撑环境才能达到集成信息的要求）等。

CIMS通常采用的是金字塔式传统分层管理模式，可由结构化的数据库概念和多级计算机系统结构来支持。每一级计算机体系都辅助一个相应的管理层。计算机系统可能是两级或多级的。

最高层的计算机用于支持管理信息活动，即处理管理数据和决策。预测、销售、生产调度以及操作管理均属于最高控制层。由最高控制层到其它工厂和车间的通信以及到局部生产控制层的纵向通信均应协调一致。中间控制层用于车间管理、协调、生产过程、装配和质量保证以及对较低控制层的管理。这一级使用生产数据和资源状态信息辅助生产决策。通过网络系统完成对相邻控制区域的横向通信和对该分层结构中的较低和较高控制层的纵向通信。最低层由制造技术、图形操作和现场控制模块组成。

多级结构制造控制系统的有效性和柔性取决于连接各分部单元的通信网络的有效性。在控制系统中通信系统的标准方面已做了许多研究工作，发展了不同的通信协议和大量总线系统。

（撰稿人：仲继明 刘玉堂 康来明）

2.6 冲　　压

2.6.1 冲压工艺

2.6.1.1 车身冲压件的工艺特点

对冲压件工艺性影响最大的是形状尺寸和精度要求。良好的冲压工艺性应能满足产品质量稳定、材料节省、工序较少、模具加工方便、使用寿命较长、生产操作方便等要求。

制定冲压工艺时，首先要分析冲压件的工艺性，即根据有效状态的产品数据或产品图纸分析冲压件结构的合理性，设计出适合具体生产条件的最经济合理的方案，包括工序性质、工序数、工序顺序和工序合并等；确定毛坯的形状、理论尺寸和落料方式。然后根据工艺方案和冲压件的形状特点、精度要求、生产批量、模具加工条件、生产操作习惯与安全性等确定冲压设备。

1）车身冲压件的一般工艺特点

①冲裁（落料、切边、冲孔）：合理排样，减少废料；毛坯尤尖角（无废料冲裁除外）；避免过长的悬臂或狭槽；冲孔直径、孔距及孔与边缘之间的距离不宜过小。

②拉延，成形：拉延半径尽量放大；尽量避免异常复杂非对称形状的拉延件；压边圈宽度和高度尽量保持一致；合理布置拉延筋。

③翻边：翻边圆角半径不宜小于最小弯曲半径，也不宜过大；长度不宜过小；已有孔分布在变形区域之外；考虑翻边工序定位孔。

④其它：在没有主模型或拉延示意模型时，工艺方案应能反映最基本的工作情况，包括各道工序冲压件的工作位置和冲压方向，基准位置尺寸，工序分配，废料刃的布置，检测基准系统 RPS 及车身焊接部位尺寸的控制，冲压件在各道工序的定位必须一致，检验测量基准和车身焊接定位相互一致等。

2）骨架件的工艺特点

骨架件的作用在于提高车身的刚性，并连接或固定内饰件及其它零件。骨架件的特点是形状复杂、冲孔多、零件易回弹及扭曲。因此，确定骨架件的工艺方案时，应根据它的特点设计，如合理安排冲孔的顺序和考虑整形工序等。

3）外覆盖件的工艺特点

外覆盖件即车身外表面零件，外表面质量要求严格。确定外覆盖件工艺方案时，除了考虑车身冲压件的一般工艺特点外，尤应注意采取有效措施，以避免隆起、起皱、划伤、压痕等外表面缺陷，确定合适的冲压方向和合理布置拉延筋，尽量避免侧切工序。

4）车身冲压件发展趋势

由于 CAD 技术的应用以及冲压设备性能的提高，轿车冲压件逐渐向一体化和大型化发展。目前很多轿车都采用了整体侧围，将原来由近十个零件组成的侧围设计成一个整体零件，一次冲压而成，明显减少车身冲压件数量，减少装配时间和成本。

2.6.1.2 大型车身冲压件的工艺分析

大型车身冲压件一般都是复杂的空间曲面，结构尺寸大，拉延工序复杂，容易产生回弹、起皱、拉裂和表面缺陷（如滑移线）等质量问题，一般采用类比法制定冲压工艺。

1）板料形状、尺寸

车身冲压件由不规则的空间曲面构成，其板料尺寸很难用计算方法求出，一般可按图纸拉线估量，加上必需的压边面、修边、工艺补充面等工艺余量，经过试模修正，确定合理的板料尺寸。

2）拉伸方向的确定

选定拉伸方向，就是确定工件在模具中的空间位置。拉伸方向的合理性是冲压工艺合理的前提，合理

汽车论坛 http://www.qclt.com

的拉伸方向需遵循以下原则：

①保证拉伸工序最少，最好一次拉伸成形，至多两次；

②尽可能减小拉伸深度，且深度均匀；

③保证凸模能够进入凹模，不产生负角；拉伸开始时，凸模两侧的包容角尽可能一致；

④凸模接触板料的面积尽可能大，接触点尽可能分散且分布均匀，以消除接触点窜动和应力集中造成局部破裂；要避免凸模表面与板料大平面接触状态，否则由于平面上的拉应力不足，影响工件的刚性应力容易起皱。

3）压边面

压边面是指板料在凹模圆角以外的法兰部分，压边面以一定的压力将该面压紧在凹模上，在拉伸过程中使板料产生张力而无起皱。压边面由工件本体部分或工艺补充部分组成，应是平面或曲率较小的曲面，不允许有大的起伏或拐点。压边面与凸模形状应保持一定的几何关系，保证在拉伸过程中板料处于张紧状态，并能平稳地包拢凸模，防止起皱

4）工艺补充面

为弥补冲压工件的缺陷，在工件本体之外，另增添的必要材料称为工艺补充面。压边圈的形状和位置、拉伸时材料流动的方向和修边工序的要求对工艺补充面的影响较大。

5）拉深筋

冲压件在拉深时，因为工件的形状不规则，变形程度差异很大，所以需要采用拉深筋来控制板料各段流入凹模的阻力。在拉深开始前，板料周边的材料被拉深筋压弯。拉深筋加大了板料流入凹模的阻力，使板料的径向拉应力增大。通过改变拉深筋的位置、高度、圆角半径和数量，便可调整径向拉应力。

6）工艺切口

覆盖件的局部变形程度太大时，可在该处先冲工艺孔或工艺切口（图 2-6-1），以改变成形时的应力状态，减小变形量。工艺切口应该安排在容易破裂的区域附近，必须在冲压件的切边线以外，最后在切边工序中切除，不影响冲压件质量。

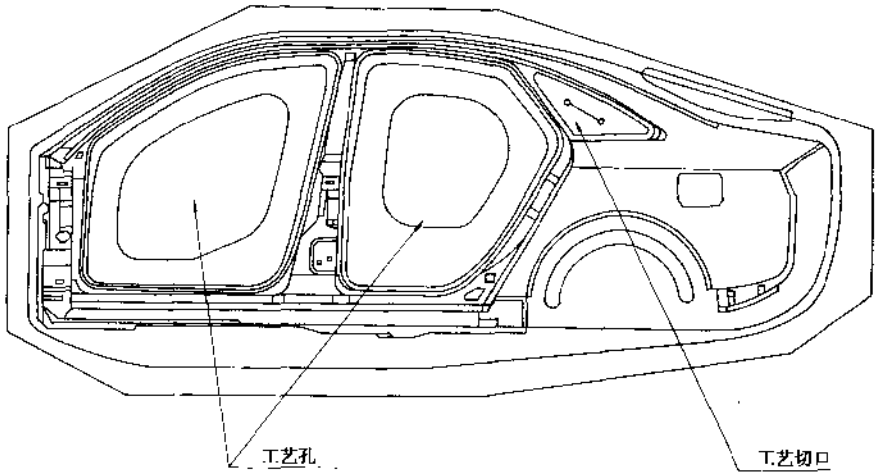


图 2-6-1 工艺孔以及工艺切口

7）拉延轮廓

拉延轮廓的确定很重要，拉延轮廓如果定义得不准确，会发生“拉延滑移”（图 2-6-2）。通过板料的拉延，凹模的拉延圆角会在零件的表面上产生可看得见的印记，外覆盖件上的印记必须通过打磨零件表面或加大凹模圆角给予消除。内板件的印记可以接受，不必要通过进一步的打磨。在较深的零件（轮罩）有

汽车论坛 http://www.qclt.com

这样的工艺槽，板料通过工艺槽的棱边产生的滑移线实际上是不可避免的。

8）定位形式

冲压件在模具中定位的合理性对冲压件精度的影响很大，在制订冲压工序时必须设计可靠的定位方式。定位方式主要有以下几种：

①用冲压件的外表面定位，即利用凹模定位装置定位；

②用冲压件的内表面定位，即利用凸模定位装置定位；

③用冲压件本身的孔或开工艺孔定位。工艺孔应开在切边线以外的工艺补充面上，在后面的切边工序中切掉。

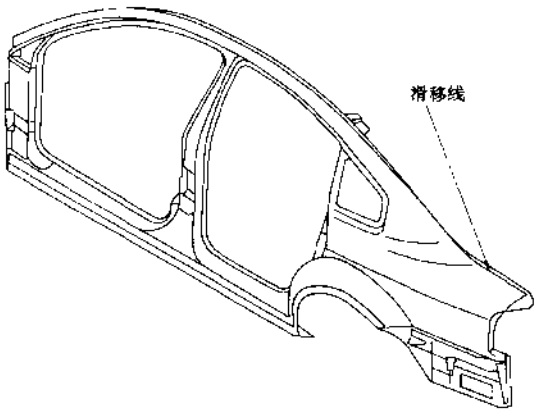


图 2-6-2 滑移线

9）拉延间隙

拉延间隙把压边圈和凸模分割开，通过拉延间隙板料流入凹模中。拉延间隙越小，局部的延伸率越大，零件的表面将受到损坏，会产生裂痕。如果拉延间隙太宽，零件的准确性不能保证，会产生起皱和质量缺陷。拉延间隙取决于拉延深度，拉延件壁在压边圈和拉延凸模之间倾斜度至少为 7°，这样在以后的切边工序中，有足够的剪切斜度（图 2-6-3）。

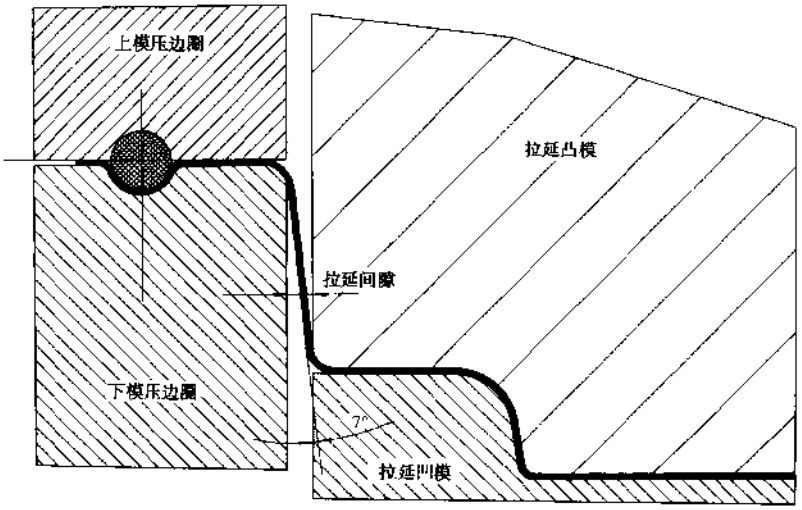


图 2 6 3 拉延间隙

10）工艺弧形

工艺弧形是对零件预先给予增加一定的拱形，就是说对零件的原始形状进行改变。以门外板为例：剖面的基本外形是从车顶到门槛，在看样模时确定整个筋槽，所定义的窗框槽是在整个外板上来划分门框和门筋（腰线），在门框部位的槽通过整形产生窗框槽，局部地方呈现出直面，在拉延后会出现凹陷，如在该区域带有鼓起，可克服凹陷，见图 2-6-4。

11）回弹

板材的回弹特征对拉延结果有较大的影响。很多尺寸变形的零件，局部的拉延率不同产生的回弹值也各不相同。这些回弹值在目前只能通过经验来估计。

汽车论坛 http://www.qclt.com

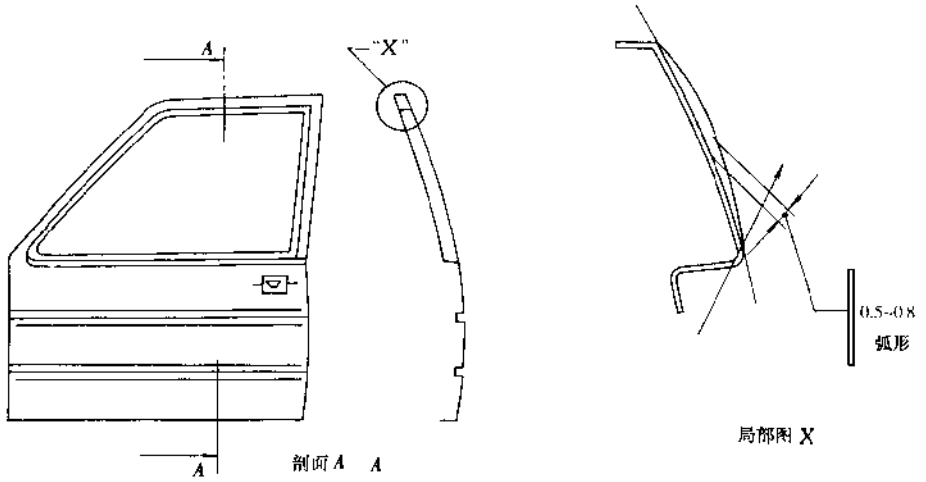


图 2-6-4 工艺弧形

为了能得到预订的形状，必须在模具上对预计的回弹量通过覆盖零件型面进行补偿。

在板料形状和模具形状之间的偏差称为弹性尺寸，见图 2-6-5。

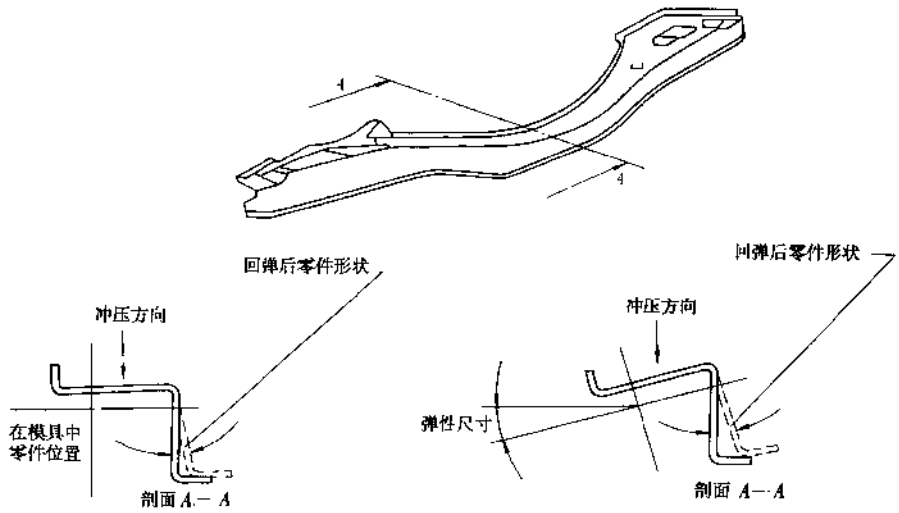


图 2-6-5 弹性尺寸

2.6.1.3 车身冲压件的工艺方案

冲压工艺方案是指在经过工艺分析后，进行必要的工艺计算，设计出合理的工序组合，以达到最佳的产品质量、生产效率和模具寿命。

冲压件的工艺方案制作方法一般有两种，一是手工制图；二是计算机绘图。手工制图适用于小型和简单平板零件的工艺图制作，如汽车零件中的车顶、前后盖等。计算机绘图是大型汽车车身零件工艺图制作的发展方向。大型复杂曲面的车身零件是很难进行空间想像的，比如在选取合适的冲压方向时，必须使面法线方向与所选取的冲压方向之间的夹角不小于 5°，利用具有较大内存的计算机，就可以通过对零件的 CAD 数据进行渲染处理，将零件直观地反映在屏幕中，因而利用计算机辅助设计工艺方案具有直观化和

汽车论坛 http://www.qclt.com

处理方便等特点。

冲压件工艺方案是模具设计的主要依据，在图纸中必须反映出零件的每一道工序的工作内容和工序之间的相对关系等，还必须表达出零件与模具的相对位置关系，以确定模具中心与零件基准点的相对位置。工艺方案包含下述内容：

①标题栏：注明该零件名称、零件号、材料及料厚、图纸日期和图纸名。

②工艺内容简图：用三维视图和主剖视图简明表达各个工序的冲压内容、模具号和压力机吨位等参数。

③零件流程图：由各工序的零件俯视图组成。在手工生产状态下，应表达生产工人的工作位置和工作方式等；机械化线生产的，应表达零件传递过程中夹爪方式和翻转等参数。

④零件工序总图：由零件的主视图和零件的纵向、横向剖视图组成。在图中将多个工序叠放在一起，并用不同的颜色区分，要表达出零件的冲压方向、定位，零件的进料方向和压力机中心等各工序的共同参数和要素。不同的工序还有不同的特点：

a. 剪切工序：料片尺寸、料片形状以及定位位置。

b. 拉伸工序：拉伸工艺补充面、拉伸圆角、拉伸筋、拉伸凹模范围和压足标记。

c. 切边工序：废料刀排列图、废料流向和废料刀刀面标记。

d. 冲孔工序：孔径、斜冲孔孔径和各孔公差

e. 整形工序：整形线和区域以及整形局部模具剖面图和整形零件剖面图。

f. 翻边工序：翻边线、翻边区域以及翻边局部模具剖面图和零件剖面图。

g. 零件局部剖视图：是对零件工序总图的必要补充，使零件工序表达得更详细。

在工艺基本方案确定以后，还需进行拉伸模型的制作以及拉伸模型的模拟等，以确保得到正确的拉伸工艺，另外还需考虑具体的模具结构，使得翻边、整形等工序得到合理的工序安排和合理的模具结构。

2.6.1.4 冲压仿真

1）理论仿真介绍

计算机仿真就是在计算机内建立实际系统的计算模型，通过运行仿真软件代替实际系统运行工作，以便进行观察和考核试验。随着计算机仿真技术、有限元分析技术和塑性成形理论的发展，薄板塑性成形过程的数值分析和动态仿真技术已成功地应用于覆盖件及其模具设计制造过程。

覆盖件成形过程涉及几何非线性、材料非线性和复杂的接触与摩擦等问题，零件形状多为复杂空间曲面，必须建立冲压过程的三维仿真模型。以三维仿真模型为基础开发了仿真分析软件，在分析覆盖件成形过程中的应力应变分布、板料厚度变化、零件表面质量、回弹等方面获得很大成功。

冲压成形仿真是以覆盖件生产的工艺过程为对象进行的，首先结合工艺因素把产品设计信息转换为工艺过程的有关信息，其次确定合理的凸模、凹模、压边圈和限流槽几何造型，尤其是这些造型中多为三维曲面的光滑过渡。薄板冲压成形是一个复杂的多体接触的力学分析问题，为准确对冲压成形进行仿真分析，涉及到材料参数、多体间摩擦润滑模型中的静、动态摩擦系数和粘度系数，以及工作时压力机的力—运动曲线、限流槽的分布等。

2）仿真建模

①材料模型：冲压过程涉及的材料有两类，即模具材料和板料材料。为了分析在冲压过程中的有关力学特性，必须建立材料的力学模型，简称材料模型。与板料相比冲压模具材料具有很高的硬度和刚性，可以认为在冲压过程中模具是不可变形的，所以在冲压仿真分析中一般都采用刚体材料模型来模拟模具材料。

经典的塑性流动理论认为板料塑性行为是各向异性的，其力学行为的数学描述，即材料模型，是车身覆盖件冲压成形仿真中要考虑的一个重要内容，恰当的屈服函数对成形过程的仿真计算的精度是非常关键的。企业及用户选择适合本行业的有限元计算软件则是关键。

②几何模型：覆盖件冲压成形过程涉及高度的几何非线性主要是关于模具和板料的三维几何模型。几

汽车论坛 http://www.qclt.com

何模型包括凸模、凹模、压边圈、限流槽和板料的几何造型及装配模型。

覆盖件冲压成形的模具本身可以用其表面来代表，只需建立模具表面型面的几何模型。在薄板成形的三维有限元仿真中模具型面可由4种描述方法进行几何建模：解析描述、参数曲面描述、点列描述、网络格式描述。上述4种模具几何建模方法中，解析描述最精确方便，但只能描述简单规则的型面，不适合于描述覆盖件模具型面；另外3种描述方法在覆盖件冲压成形的有限元仿真计算中被交互地使用。

复杂型面的模具几何模型一般都是利用CAD系统或CG（computer graphics）系统建立的，例如CATIA、UGII、CADDS5。利用这些CAD系统建立的几何模型一般都是用参数曲面描述的，然后通过标准交换格式文件，如IGES文件，传给有限元计算分析系统；也可以在参数曲面的基础上生成网格描述模型，再通过IGES文件等传给FEM软件。

2.6.1.5 冲压件质量保证

随着用户对汽车质量要求的日益苛刻，一些先进的检测技术和管理方法更多地应用于冲压件质量控制。目前，对冲压件质量主要的控制内容是表面质量和尺寸精度。

1）表面质量控制

根据冲压件的不同功能，采用不同的表面检测方法，对外覆盖件（如四门二盖、车顶、翼子板等），首先用纱布擦干净表面，目测检查冲压件是否有划伤、凸包、起皱、花斑等缺陷；然后用手触摸和油石打磨的方法检查那些用肉眼难以分辨出的凸点、瘪坑、毛刺、变形、镀层划伤等缺陷。

2）尺寸检查

冲压件的尺寸检查有用检具测量和三坐标测量机测量两种方法。

用检具检查冲压件尺寸是一种简便快速的方法，作为常规检测手段已经大量应用于冲压生产现场。能快速方便地检测冲压件的型面轮廓尺寸、边缘平整度、缝隙尺寸和孔位置尺寸等，快速反映出冲压件的质量趋势。

由于车身制造精度要求越来越高，对冲压件精度控制也越来越严格，因此许多厂家将三坐标测量机直接应用于生产现场对冲压件进行在线测量。三坐标测量机一般对首件冲压件进行全尺寸测量，循环检查时则主要对冲压件功能尺寸进行测量（功能尺寸主要指配合尺寸、安装尺寸、定位孔、定位点或者定位面尺寸）。由于三坐标测量机测量的结果能直接与CAD数据进行比较，而且又能对大量的测量数据进行统计和分析，因此对冲压件质量分析来说是不可缺少的工具。

由于顾客对整车的外观质量和缝隙匹配要求越来越高，目前许多汽车厂家采用了一些新的冲压件质量控制手段。如对镀锌冲压件用厚度仪测量镀层厚度；对外观质量要求很高的外覆盖件，采用摄像处理技术对冲压件表面质量进行评判；采用激光扫描测量技术和移动式三维测量装置在生产现场直接对冲压件进行实时质量监控等。另外，在冲压件质量控制方面，越来越多地采用带数据处理功能的量值化检测手段，如采用带测量传感器的检具测量冲压件；广泛应用三坐标测量机测量冲压件几何参数，并应用计算机网络技术，做到不同区域的多台测量机之间CAD数据、测量数据和测量程序共享，还可以利用网络对冲压件测量进行脱机编程；许多厂家在生产线旁还采用包含冲压零件测量功能的自动化装卸系统，使测量机的使用效率得到提高。

2.6.1.6 冲压生产的物流及工艺流程

冲压生产经过以下工序：备料→检验1→冲压→检验2→入库。分述如下：

备料：是将从钢厂购进的材料加工成冲压所需规格的毛坯，从钢厂购进的材料一般有卷料和平板料两种形式。卷料需用开卷设备开卷，有的开卷设备带落料压力机，有的不带落料压力机仅有剪切功能。卷料经过开卷设备之后，就可以得到具有一定规格形状的毛坯，可以直接作为拉延坯料或者再通过落料成拉延坯料。大多数平板料需要用剪床和落料模（通过落料压力机）冲剪成一定规格形状的拉延坯料。

检验1：根据工序需要，尤其是高精度的零件和深拉深零件，必须对拉延坯料的表面质量和必要的材质性能进行检查。

汽车论坛 http://www.qclt.com

冲压：在冲压设备（如机械压力机、液压机、多工位压力机、联线的机械化冲压线等）上用模具冲压，冲压工序一般为拉深、冲压切边、成形、弯曲、翻边、整形等。

检验2：根据零件产品设计和装配的要求，制定零件成品检验要求，必要时配合检验或3D测量设备内检验支架，在生产过程中随时对成品进行跟踪、检测。

入库：根据零件的质量要求和形状，将零件从压力机上取下后直接放入合适的器具中，必要时要加以定位、分隔等，然后将装满成品件的器具送入仓库存放。

2.6.2 冲压模具

2.6.2.1 冲压模具的等级及使用寿命

1）冲压模具的等级

冲压模具等级的定义直接决定了模具使用寿命以及模具制造成本，它不仅凝聚了模具设计准则，而且在规划和置备模具时对确定所需何种模具结构起指导性作用。

冲压模具等级的定义基础是冲压件产量及冲压生产方式等。

常用车身冲压模具等级有：

等级Ⅰ：50件＜日产量≤315件，手工生产；简单的模具结构类型；通用模具，考虑钢板和垫块；允许选装件。

等级Ⅱ：315件＜日产量≤1 250件，部分机械化生产；中等至高等装备及结构类型；标准设计及标准导柱模架；仅当确实能够节省费用时允许选装件（加工成可更换的组合件）；注意整个设备的电器电子保险装置的费用在模具费用中所占合理的比例。

等级Ⅲ：日产量＞1 250件，全部机械化生产；最高等装备；无选装件，仅是独立的工装；必须能够在压机内更换易损件；用润滑槽和中央润滑；全部电器电子保险装置。

日产量＜50件模具结构视具体情况由规划和设计另行确定。

2）冲压模具的使用寿命

模具的使用寿命是一套模具（在一定的冲压生产条件下）生产冲压件的总产量，是影响冲压件成本的主要因素之一。影响模具使用寿命的因素很多，如合理的冲压工艺及模具结构，模具材料及其热处理方式，良好的使用环境及维修保养等等。

随着模具材料工业的发展，模具中更多地使用了高强韧模具钢，综合性能好的通用模具钢和微变形精密模具钢种，以及硬质合金和钢结硬质合金，从而大大提高模具的寿命。

2.6.2.2 冲压模具设计

1）汽车冲压模具的分类

（1）按工序性质分

冲裁模，包括切口、落料、冲孔、切断、修边；

弯曲模，包括压弯、拉弯；

拉深模，包括拉深、变薄拉深；

成形模，包括翻边、成形、整形、压印。

（2）按工序的复合性质分

单工序模、复合模和级进模。

（3）从管理分

大型冲模，底板的长度加宽度超过3 500mm。

中型冲模，底板的长度加宽度为1 200～3 500mm。

小型冲模，底板的长度加宽度小于1 200mm。

（4）从送料方式分

汽车论坛 http://www.qclt.com

人工送料模和自动送料模

还可据导向装置、卸料装置分为导柱模、导板模、带固定卸料板模、带弹性卸料板模等。

2）汽车冲压模具的设计

对冲模设计的基本要求：应保证冲出的制件符合图纸的形状与尺寸要求；模具结构简单，安装牢固，维修方便，坚固耐用；操作方便，工作安全可靠；便于制造，价格低廉

冲模设计首先要了解产品图或产品样件；了解压力机的情况和有关技术规格；制造模具的技术力量设备条件和加工经验。根据这些资料使产品设计、冲压工艺编制、模具设计与模具制造之间更好地结合，取得更完善的效果

确定制件在技术上和经济上都较为合理的冲压工艺方案，根据制件的形状、尺寸精度、表面质量要求进行工艺分析，确定基本工序的性质，根据工艺计算确定工序数目和工序排列的顺序，同时确定各工序的模具结构形式。

工艺计算包括：计算毛坯尺寸，最经济的排样；计算冲压力（冲裁力、弯曲力、拉伸力、卸料力、推件力、压边力等），以确定压力机；计算模具压力中心，以免模具受偏心负荷而影响模具质量；计算或估算模具主要零件（凹模、凸模、凸模固定板、垫板等）的外形尺寸，及卸料橡皮或弹簧的自由高度等；确定凸凹模的间隙，计算凸凹模工作部分尺寸；确定拉伸模是否采用压边圈、拉伸次数及各中间工序模具的尺寸分配和半成品尺寸的计算等。

压力机选择：根据计算选用压力机，然后按所选压力机参数确定模具的闭合高度，概略地定出模具的外形尺寸，可对各部件的结构进行方案设计。部件结构设计主要有以下内容：

①工作零件，如凸模、凹模及凸凹模等结构是整体、组合还是镶拼的，及确定固定形式；

②定位零件，如采用定位板、挡料销（固定的还是活动的）等，形式很多，可根据具体情况选用或设计；对于级进模，还要考虑是否用使用挡料销、导正和侧刃等；

③卸料和推件装置，卸料常采用刚性和柔性两种形式；刚性卸料通常采用固定卸料板结构形式，柔性卸料板通常采用弹簧作为弹性元件（弹簧需经设计和计算）；

④导向零件，确定采用何种导向零件，若采用导柱导向，则要确定导柱的直径和长度；

⑤根据所选压力机的参数确定模架的形式及其固定方式。

2.6.2.3 模具制造

模具制造正向着高效、精密、大型自动化方向发展，模具加工设备在不断发展和更新。

1）大型汽车模具传统的制造方法

大型汽车模具传统的制造方法是以模型为加工依据，采用仿形机床来加工模具中的立体曲面，而其模型基本上是在主模型上拷贝下来的。

2）现代汽车模具的加工方法

随着计算机技术的发展，模具加工已从依靠个人经验和技术的手工操作及普通机械加工、仿形加工、精密加工阶段，到目前以模具计算机辅助设计和制造（CAD/CAM）的阶段。

在模具CAD/CAM系统中，产品的几何模型是关于产品的最基本的核心数据，并作为整个设计和计算分析中最原始的依据，通过模具CAD/CAM系统的计算、分析和设计得到大量信息，运用数据库和网络技术将数据存储和直接送到生产环节的各个方面，从而实现设计制造一体化。与传统的制造方法相比，采用CAD/CAM模具生产，可以缩短模具制造周期以满足产品更新频繁的要求，大大提高模具精度。

3）模具质量控制

模具是开发新产品、提高产品质量和降低成本的重要手段，影响模具质量的因素是多方面的，在整个模具制造过程中必须贯彻全面质量管理，控制人、机、料等因素，才能提高模具的质量。

a. 模具加工设备：现代模具比传统模具要求的精度等级高，模具加工设备在以数控及计算机控制的加工设备所占有的比重越来越大，其它数控车、铣、镗、磨等加工设备和机电结合的电火花加工、数控线切割加工及各类特种加工设备都已成为模具加工的基本手段。因此，从模具粗加工、热处理、表面处理到

精加工，特别是对于型腔几何形状复杂的模具，必须更多地依靠模具CAD/CAM技术，已成为保证模具质量的惟一途径。同时在模具制造中加强质量检测，才能达到现代模具高精度、长寿命的要求。

b. 模具零部件标准化：模具零部件标准化是提高模具设计质量、缩短制造周期、降低模具成本的关键，可以显著提高模具制造精度和使用性能。通常采用标准件比自制零部件的配合精度和位置精度将至少提高一个等级，并保证互换性。

c. 模具材料及热处理：模具零件的原材料质量和热处理对模具加工和使用有着很大的影响，原材料的某些缺陷，不仅给模具制造带来一定的困难，而且还会影响产品质量，降低模具使用寿命。

①铸件：铸件是模具制造中使用最多的毛坯，大型拉深模铸件的质量更是至关重要的，因此铸件表面必须经清砂处理，其内部特别是重要的加工面和受力大的工作部分，不允许有气孔砂眼、裂纹及缩孔等缺陷存在。铸件在热处理时加热要均匀，尽量减小零件变形。

②锻件：对于一些热处理硬度高、使用寿命长的模具零件，大都采用锻制。锻件必须内部组织细密，碳化物分布合理，不应出现裂纹、折叠、锻伤等缺陷，从而达到改善原材料的组织性能。热处理必须保证达到所需硬度，并使零件不开裂和减小变形。

2.6.2.4 冲压模具的使用材料及热处理

1）冲模使用材料

①冲模材料选用原则：汽车制造中的冲模所用材料主要有碳钢、合金钢、铸铁、铸钢和硬质合金等。选择冲模零件材料时必须根据使用条件、生产要求、结构特点、材料特性等合理选用。选用冲模主要工作零件的材料首先要满足其性能要求，并同时依据以下原则：

根据冲压件生产批量来选材。大批量生产冲压件时，模具材料应采用较高质量材料，确保耐用度。反之，可以采用耐用度较差材料。

根据冲压材料性质、工序种类及冲模零件的工作条件来选材。

根据模具材料的生产、供应情况和模具的制造方式来选材，以保证经济性。

②铸造成形冲模材料及选用：覆盖件拉延模及部分修边、整形、翻边模的工作零件，由于模具结构尺寸大，型面均为空间立体曲面，为降低成本、适应其仿形及型面加工工艺需要，凡与金属制件接触的凸模、凹模、压料圈、顶出器均采用铸造成形方式生产。国内铸造成形冲模材料的牌号及其用途见表2-6-1，国内铸造成形冲模材料性能特点比较见表2-6-2。

表2-6-1 国内铸造成形冲模材料及其用途表

材料牌号	应用范围
HT25～47	用于冲模一般部件，模架、底座、冲头、上下模本体及其他部件；厚于板厚1.5mm以下，小批、试制形状简单的中小型模具的拉延防皱面部件
HT30～54	用于冲模一般部件，模架、底座、冲头、上下模本体及其他部件；厚于板厚1.5mm以下，中、小批量生产的大中型模具
QT60-2 QT60-3	用于冲模的拉延、弯曲工序中需要强度、刚度及耐磨损的部位；用于板厚1.5～2.5mm，中、小批量或拉延深度较深的中、小型模具
Mo-Cr铸铁 Ni-Cr铸铁 Mo-V铸铁	用于板厚2mm以下，大批量生产的大中型复杂模具，特别是大型拉延模的凹模

表 2-6-2 国内铸造成形冲模材料性能比较表

材料牌号	强度	硬度	耐磨性	加工性	热处理工艺性	生产批量
HT25～47	差	差	差	优	差	1万件以下
HT30～54	中	中	中	良	中	30万件以下
QT60－2	优	优	良	中	优	50万件以下
Mo－Cr铸铁	良	良	优	差	良	50万件以上

③冷作模具钢及选用：除上述铸造成形模具外，大多数汽车冲压模具采用冷作模具钢作为工作零件材料。冷作模具钢包括碳素工具钢、合金工具钢、高速钢及其它特殊钢种。按模具钢特性分类，我国常用冷作模具钢如表 2-6-3 所示。冲模工作零件材料选用及硬度要求见表 2-6-4。

表 2-6-3 我国常用冷作模具钢分类及牌号

类型	牌号
低淬透性冷作模具钢	(T7A、T8A)T10A、(T12A、MnSi)Cr2、9Cr2、(CrW5)
低变形冷作模具钢	9Mn2V、9Mn2、CrWMn、MnCrWV、9CrWMn、SiMnMo
变形冷作模具钢	Cr6WV、Cr12MoV、Cr12、Cr4W2MoV(Cr2Mn2SiwMnV)
高强度冷作模具钢	W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V
高强韧性冷作模具钢	(6W6Mo5Cr4V)CG－2、65Nb
抗冲击冷作模具钢	4CrW2Si、5CrW2Si、6CrW2Si、60Si2、9SiCr

表 2-6-4 冲模工作零件材料选用及硬度要求

模具类别	凸、凹模使用条件	材料牌号	热处理后硬度(HRC)
冲裁模	形状简单，冲压件厚度 $t\leqslant3$mm	(T8A) T10A 9Mn2V	凸模 56～60 凹模 60～62
	冲压件厚度 $t\leqslant3$mm，且形状复杂，或 $t\geqslant3$mm	9CrSi、CrWMn 9Mn2V、Cr12	凸模 58～60 凹模 60～62
	长寿命和特长寿命	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 GT35、YG15、YG20	凸模 60～62，凹模 61～63 66～68
	加热冲裁	3Cr2W8、5CrNiMo CG－2	78～52 51～53
弯曲模	一般弯曲	(T8A) T10A 9Mn2V	56～60
	形状复杂，高耐磨性	CrWMn、Cr12 Cr12MoV、Cr6WV	58～62
	寿命长	GT35、YG15、YG20	64～66
	加热弯曲	5CrNiMo、5CrNiTi	52～56
拉深模	一般拉深	T10A、9Mn2V	56～60
	形状复杂，高耐磨性	Cr12、Cr12MoV	58～62
	寿命特长	YG10、YG15	64～66
	加热拉深	5CrNiMo、5CrNiTi	52～56

汽车论坛 http://www.qclt.com

2）冲压模具热处理

①热处理与冲压模具：热处理可以发挥模具材料潜力，满足材料使用性能要求，对模具寿命有重要影响。国内外有关统计数据表明，汽车冲压模具失效原因的50%以上涉及模具的热处理。制定和实施冲压模具的热处理工艺必须全面考虑模具材料、模具形状和尺寸、模具性能要求、热处理设备和热处理规律等因素，确保热处理质量。

汽车冲压模具零件的热处理包括零件整体的退火、正火、淬火和回火、零件表面处理和化学热处理等多种不同热处理方法。

②铸造成形模具的热处理：汽车覆盖件拉延模等铸造成形模具常用热处理工艺如表2-6-5所示。

表2-6-5 拉延模具热处理及硬度要求

材料牌号	铸件毛坯热处理	型面最后热处理	硬度要求(HRC)
HT25～47	560℃退火	表面火焰淬火	30～40
HT30～54	560℃退火	表面火焰淬火	35～45
QT60－2	毛坯退火 粗加工后正火	整体淬火·回火 表面火焰淬火	50～55
Mo-Cr铸铁	560℃退火	表面火焰淬火	45～55

③常用冷作模具钢热处理：常用冷作模具钢的热处理工艺和硬度要求见表2-6-6。

表2-6-6 常用冷作模具钢的热处理工艺和硬度要求

类别	材料牌号	热处理工艺	硬度(HRC)
碳素工具钢	T10A	780～800℃淬火，200℃回火	58～62
合金工具钢	9Mn2V	780～800℃淬油，200℃回火	58～62
	CrWMn	830～850℃淬火，200℃回火	58～62
	MnCrWV	840～860℃淬火，200℃回火	58～62
高合金工具钢	Cr12MoV	950～1 000℃淬火，200℃回火	58～64
	Cr4W2MoV	1 050～1 080℃淬火，520℃回火	58～62
	Cr6WV	950～980℃淬火，200℃回火	58～62
高速钢	W18Cr4V	1 240～1 280℃淬火，560℃回火	58～63
	W6Mo5Cr4V2	1 140℃～1 180℃淬火，560℃回火	58～62
火焰淬火钢	CH－1	880～920℃火焰淬火	58～62
	CH－2	860～900℃淬火，200℃回火	
硬质合金	GT35，GT33	960～1 000℃淬火，200℃回火	66～70
	GW50，TLMW50	1 000～1 050℃淬火，200℃回火	67～70

3）冲模一般零件材料选用及热处理

冲模一般零件的材料和热处理见表2-6-7。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-6-7 冲模其它零件材料及热处理

零件名称	材料牌号	热处理要求	硬度要求(HRC)
上下模座	HT20～40、HT25～47 ZG35、ZG45 A3、A5、厚钢板刨制	- — -	
模柄	A5	-	
导柱	20、T10A	20钢渗碳淬火	60～62
导套	20、T10A	20钢渗碳淬火	57～60
凸、凹模固定板	A3、A5	—	
托料板	A3	-	
卸料板	A5	-	
导尺	A5、45	淬火	43～48
挡料销	45、T7A	淬火	43～48(45钢)、52～56(T7A)
导正销、定位销	T7、T8	淬火	52～56
垫板	45、T8A	淬火	43～48(45钢)、54～58(T8A)
螺钉	45	头部淬火	43～48
销钉	45、T7	淬火	43～48(45钢)、52～54(T7)
推杆、顶杆	45	淬火	43～48
顶板	45、A5	-	
拉延模压边圈	T8A	淬火	54～58
螺母、垫圈、螺塞	A3	—	
定距侧刃、废料切刀	T8A	淬火	58～62
侧刃挡板	T8A	淬火	54～58
定位块	45、T8	淬火	43～48(45钢)、52～56(T8)
模块与滑块	T8A、T10A	淬火	60～62
弹簧	65Mn、60SiMnA	淬火	40～45

4）汽车冲压模具的表面处理

随着模具生产的发展，表面处理已经成为提高模具的表面硬度和耐磨性、延长模具寿命的主要手段之一。诸如板料的强硬度较高、板料较厚（>1.5～2.0mm）、冲压变形较深（例如汽车纵梁）和生产批量较大（如1 500件/天）等情况下，对模具工作部位一般要采用表面处理。

可以用于冲压模具的表面处理主要有扩散处理（氮化、软氮化、渗碳、碳氮共渗、渗硫、渗金属等）、气相沉积（化学气相沉积(CVD)和物理气相沉积(PVD)）、表面淬火（感应淬火、火焰淬火、激光淬火、电

子束和电弧加热淬火等）、表面镀层（喷镀、电镀等）等。要充分结合模具特点和模具性能要求，经济高效地选用合适的表面处理方法。表 2-6-8 给出主要表面处理方法的模具材料特性比较。

表 2-6-8 主要表面处理方法的模具材料特性比较

材料 / 特性	电镀 Cr	电镀 Ni-P	氮碳共渗	离子氮化	渗硫	渗硼	CVD TiC	PVD TiC	表面淬火
硬度	良	良	良	优	—	优	优	优	良
耐磨性	良	良	良	优	可	优	标准	标准	标准
耐冲击性	可	可	可	可	标准	可	标准	标准	标准
耐剥离性	可	可	良	良	优	可	良	良	良
耐变形裂纹性	可	可	优	良	优	良	良	良	可
表面质量	优	优	良	优	优	良	优	优	可
硬化层厚	可	可	可	优	—	可	良	良	可

5）一些引进模具的使用材料

①拉延模工作部分使用的材料：

拉延凸模：GGG70L；如果冲压零件料厚≥1.5 时，通常模具材料选用 1.2320。

拉延凹模：GGG70L；如果冲压零件料厚≥1.5 时，通常凹模基体材料选用 GGG50，工作面采用拼块，材料为 1.2379。

②切边冲孔模工作部分使用的材料：

切边刃口材料：1.2363；刃口镶块材料和标准冲头及镶套为 1.2080 或 1.2601。

③整形模、翻边模工作部分使用的材料有：1.2379、1.2769S、1.2320 和 1.2363 等；

④压料板、卸料板使用的材料有：GS45、1.2769S 和 GGG50 等；

⑤材料性能如表 2-6-9 所示。

表 2-6-9 一些新型模具材料的性能

材料	焊接性	供货状态	特征	热处理后硬度(HRC)
GGG50	有条件焊接	170～220HB Rm 500MPa	中等耐磨，中等韧性，机加工和打磨良好	52～54
GGG70L	有条件焊接	220～270HB Rm 700MPa	高耐磨、高韧性，机加工性不是很好	约 56
1.2379	焊接性好	回火≤285HB Rm 950MPa	较高耐磨性，用于表面涂层	≈62
1.2320	焊接性好	回火≤250HB Rm 950MPa	有很高的硬度，较高的韧性	≈62
1.2769S	焊接性好	调质 900～1200 MPa	中等耐磨，较高韧性	≈56
1.2363	焊接前预热	回火≤275HB Rm 950MPa	高的韧性，较高耐磨性	≈62
1.2080	焊接性好	217～269HB	高的韧性，较高耐磨性	≤65
GS45	有条件焊接	Rm 450MPa	好的韧性和耐磨性	

汽车论坛 http://www.qclt.com

6）材料化学成分（表 2-6-10）

表 2-6-10 一些新型模具材料的化学成分（%）

材料		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	Cu	Ni	S
GGG50		3.5～3.8	2.2～2.6	≤0.5				0.05			≤0.01
GGG70L		3.2～3.4	1.8～2.4	0.3～0.8		0.5		0.05	1.0	1.0	≤0.01
1.2379	X155CrVMo12	1.5～1.6	0.10～0.40	0.1～0.45	11.5～12.5	0.6～0.8	0.9～1.1	0.03			≤0.03
1.2320	CrMo10－7	0.6	0.5	1.2	2.5	0.7	0.1				
1.2769S	CrMo4－2	0.4～0.5	0.25～0.5	0.8～1.0	0.9～1.1	0.2～0.3	0.07～0.12				
1.2363	X100CrMoV51	1.00	0.30	0.50	5.20	1.00	0.20				
1.2080	X210Cr12	1.9～2.2	0.1～0.4	0.15～0.45	11～12			0.03			≤0.03
GS45		0.2～0.28	0.3～0.5	0.5～0.8				0.04			≤0.04

2.6.3 冲压材料

2.6.3.1 汽车冲压用钢板

钢板是汽车上用量最大的一个钢材品种。在载货汽车上钢板的用量占整个钢材用量的一半，而在轿车上几乎占四分之三。汽车用钢板的质量要求很高，要求有良好的冲压性能以冲制出形状复杂的汽车零件；一定的强度以满足零件的使用要求；严格的厚度公差以满足零件的尺寸精度；良好的表面质量以满足零件的外观要求。

根据钢板的生产方法，汽车用钢板有热轧钢板和冷轧钢板两大类。热轧钢板的厚度大多在 3.0mm 以上，而冷轧钢板都在 3.0mm 以下。

1）热轧钢板

热轧钢板主要用于制造载货汽车的车架、纵梁、横梁、制动盘和车轮等受力零件。

（1）车架用热轧钢板

汽车车架用热轧钢板国家有专用标准，在钢号后边加一个“L”字，表示梁用，如 16MnL。钢板按强度区分有屈服强度为 250、300 和 350MPa 级别；按化学成分区分有 Mn 钢、Si-V 钢、Ti 钢、Nb 钢和 Mn-V 钢系列。车架（梁）用钢板除了有强度性能要求外，还要有良好的冷弯性能，因为冲压纵梁和横梁的开裂率与钢板的冷变性能有密切关系。各种系列的梁用钢板在汽车厂不再进行热加工，化学成分对汽车厂的使用影响不大，各个钢厂可以根据汽车厂提出的强度和冷弯性能要求，根据自己的生产工艺情况，确定钢材的化学成分。

（2）汽车滚型车轮用钢板

中型载货汽车的车轮轮辋使用热轧异形断面型钢制造，轮辐使用热轧钢板冲制的轮辋也有用钢板滚压

成形的趋势。轿车和轻型客车的车轮轮辋和轮辐都用钢板滚压和冲压成形。

滚型车轮用钢板有一些特殊要求，钢板的厚度公差要求严，如桑塔纳轿车的轮辋钢板要求厚度公差为 $4.9^{+0.15}_{0}$mm；对钢板的强度和冷弯性能也有很高的要求；对热轧钢板的表面质量也有严格的要求。经过试制，宝钢先后鉴定转产了 B330CL、B380CL 等车轮用钢板，并制定了企业标准；武钢也鉴定转产了 RS50、RCL330 和 RCL370 等车轮用钢板。

车轮的疲劳损坏是其主要的损坏形式，而钢板的强度、厚度公差和表面质量都对车轮的疲劳寿命有影响。随着钢板强度的增加，车轮的疲劳寿命也增加，但受成形的影响，钢板的强度增加也受到一定的限制，要保证车轮的疲劳寿命符合要求，钢板的抗拉强度要高于一定的指标。为了保证车轮的平衡和疲劳寿命的稳定，对钢板的厚度公差有较严的要求。热轧钢板的表面缺陷，将成为车轮疲劳破坏的起始点，表面有划痕缺陷的车轮，其疲劳寿命将下降 35% 以上。

除轮辐板外，轿车上还有些零部件如副车架、前端框架、左/右控制臂等，也需要钢厂供应热轧、酸洗、涂油厚度为 2.7～3.5mm 的热轧板或热轧纵剪钢带。

综上所述，国内钢厂应能正式生产供应热轧酸洗涂油的钢板，才能满足轿车生产的需要，按年产 100 万辆轿车估算，这类钢板的年需要量约为 10 万 t。

2）冷轧钢板

冷轧钢板是汽车生产中用量最多的品种。中型载货汽车、轻型载货汽车的冷轧钢板的用量分别占钢材总消耗量的 25%、40% 和 75%，我国载货汽车用冷轧钢板除宽度超过 1 850mm 的宽板之外，其余的国内均可以生产供应。

轿车用冷轧钢板品种多，质量要求严，有的钢种国内尚不能完全供应。轿车要求外形美观，外部零件要用表面质量要求特别高的“05”钢板；外形要求流线型以减少风阻，要用冲压性能好的无间隙原子钢板（IF 钢板）；要减轻汽车自重和降低钢材消耗减薄钢板的厚度，要用含磷冷轧高强度钢板；要延长使用寿命，特别是要提高抗腐蚀性能，要用抗腐蚀性良好的镀层钢板；要提高车身外表件的抗凹陷性能，要用烘烤硬化钢板（BH 钢板）；要求减少汽车的噪声，要用抗震钢板；要满足同一零件不同部位的不同性能要求，或几个零件合并成一个大零件以提高生产效率，要采用激光拼焊毛坯（Tailored Blanks）。下面简要介绍这些钢板。

①表面质量要求特别高的“05”钢板：轿车的表面零件，如前后翼子板、车门外板、发动机和行李箱盖板和顶盖等零件所用的冷轧钢板，表面质量要求特别高，不允许有任何表面缺陷，在德国这种钢板称作“05”表面钢板。此外，还要求钢板表面非常清洁，要控制冷轧时冷却润滑液退火时碳化在钢板表面形成的残碳，控制退火钢板平整时轧辊磨损时留在钢板表面的铁粉，控制生产环境的灰尘。

国产的这类钢板在表面质量和表面清洁度方面同国外比较还有一定的差距。

②冲压性能好的“无间隙原子钢”（IF）钢板：近来汽车设计为减少风阻，外形更趋于流线型，使得车身零件的形状趋于复杂，冲压时钢板的变形程度增大，对钢板的冲压性能要求更高。传统应用的用铝脱氧的深冲钢板（如中国的 08AL ZF 级、日本的 SPCEN 和德国的 St14）已经不能满足要求，要求钢厂提供冲压性能更高的钢板。近年来炼钢和钢材加工技术不断改进，可生产出超低碳、超深冲的“无间隙原子钢钢板”（IF 钢板），满足汽车工业的需要。IF 钢的产量和品种不断增加，目前，以 IF 钢板为基板生产出超深冲镀锌板和电镀锌板；在 IF 钢基础上调整化学成分和生产工艺生产出 IF 高强度钢板和 IF 烘烤硬化钢板。

③含磷高强度冷轧钢板：钢中加入磷以后，磷原子进入铁原子晶格内与铁原子形成置换固溶体。由于磷与铁的原子半径不同，在磷原子周围产生弹性变形而使钢的强度增高。磷的强化能力很强，低碳钢中每增加 0.01% 的磷，可以使钢的屈服强度提高 4.1～5.5MPa；每增加 0.1% 的锰，屈服强度才提高 4.1MPa；每增加 0.1% 的硅，屈服强度才提高 4.9～8.0MPa。要获得与含磷钢强度相当的冷轧钢板，必须加入大量的锰或硅，不仅增加了钢材的成本，还降低了钢板的塑性。

含磷冷轧钢板比 08AL 冷轧钢板的强度约高 15%～25%，因此用含磷冷轧钢板代替 08AL 冷轧钢板可以把钢板的厚度减薄 10% 左右，从而减轻汽车自重，降低材料消耗。

汽车论坛 http://www.qclt.com

含磷冷轧钢板强度虽然提高，但是伸长率与 n 值下降甚微，以抗拉强度为 340MPa 的含磷钢板为例，其平均屈服强度约为 235MPa，而平均伸长率仅约为 40%，n 值可保持在 0.22 的较高水平。

含磷钢板的生产工艺与 08AL 钢板的生产工艺近似，现在宝钢、武钢和鞍钢都有成熟的含磷钢强度冷轧钢板生产供应。

④镀层钢板：国外生产的轿车要求能防腐蚀 5～7 年，甚至于 10 年，为此，国外多采用镀层钢板制造轿车车身零件，由于生产工艺和使用习惯的不同，各厂家所用的镀层钢板的种类也不一样，欧洲和美国多采用镀纯锌而镀层较厚的钢板，日本多采用镀 Zn-Ni 合金或 Zn-Fe 合金而镀层较薄的钢板。

镀锌钢板的抗腐蚀性能随着镀锌厚度的增加而增加，但是成形性能与可焊接性能则随着镀锌层厚度的增加而恶化，日本采用镀层较薄的镀层钢板，其成形性能和可焊接性得到改善，抗腐蚀性能良好。

电镀锌板由于表面质量好、涂漆后美观，多用于表面件，如奥迪轿车的翼子板、外门板、发动机和行李箱盖板和顶盖都采用电镀锌板制造。

热镀锌板由于镀层较厚，抗腐蚀性能良好，但表面质量比电镀锌板差，用于轿车底板等底部零件。轿车上用的热镀锌钢板要求镀锌表面为平整轧制的零锌花即无锌花，要得到这种锌花的钢板，在熔化的锌锅中含铝量要很低或在控制热度锌层厚的“气刀”后向钢板表面喷锌粉尘以形成新的结晶核心而形成极小的锌花，经平整成零锌花。

冲压性能要求特别高的电镀锌板和热镀锌板的基板均采用 IF 钢板。

⑤烘烤硬化钢板（BH 钢板）：汽车在行驶中，车身外部件经常受沙石的碰击，在零件表面产生凹坑，为避免这种情况，希望钢板有较高的抗凹陷性能（Dent Resistance）。钢板的屈服强度越高，抗凹陷能力越强，但屈服强度越高，钢板的冲压性能越差。因此，希望钢板在冲压成形前具有较低的屈服强度，钢板冲压产生塑性变形后，在油漆烘干高温产生时效，使屈服强度得到一定程度的提高，这种钢板成为烘烤硬化钢板。

烘烤硬化钢板的 BH 值，主要决定于钢中的固溶碳量，当固溶碳量为 10ppm 时，BH 值在 40MPa 以上；固溶碳为 30ppm 时，BH 值达到最大值（约 100MPa），再增加固溶碳，BH 值就不再增加了。

常温时效性（AI）与烘烤硬化性（BH）同属于应变时效，AI 值与 BH 值存在着线性关系。BH 值越大，AI 值越高。钢板的常温时效会引起屈服伸长（屈服平台）的恢复，AI 值越高，屈服伸长增加越多，而屈服伸长的增加会使冲压时在零件表面出现滑移线，因此 BH 值要适当，BH 值过小，烘烤硬化现象不显著，而 BH 值过大，使得屈服伸长过多的恢复而引起冲压零件时滑移线的出现。

烘烤硬化钢板在国外汽车工业已经得到了广泛的应用，国内引进的轿车如天津生产的夏利轿车的门外板、翼子板及发动机盖板等 10 个零件都用烘烤硬化钢板冲制。

⑥树脂复合钢板：树脂复合钢板是在两块钢板中间夹一层树脂，按其功能分有减振钢板与减重钢板两种。

减振钢板：人们对汽车减少振动，降低噪声特别是轿车内部的噪声的要求越来越高，为了降低噪声，除了在汽车设计上采取措施外，树脂复合钢板（减振钢板）的应用也是一项重要措施。减振钢板是在两块钢板中间夹一层 0.5mm 厚的树脂而成的树脂复合钢板，由于树脂具有的特性，它能吸收机械振动使之转变成热能并释放，达到减少振动，降低噪声的效果。

减振钢板的电焊性能不如冷轧钢板，为改善电焊性能，在树脂中加入导电粒子（如镍粉），但这样增加了成本。

我国对减振钢板进行了很多研究，取得了可喜的成果。目前，国内已建成年产 2 万 t 减振钢板的生产线，生产出的减振钢板即将用于汽车的油底壳零件。

减重钢板：减重钢板的中间塑料层较厚，一般等于两层表皮钢板的厚度，可减轻重量约 50%。

采用减重复合钢板，是在厚度不变的情况下，大幅度降低重量。但是塑料与钢板，因其变形速度不一致，特别是表皮钢板较薄，承受拉延的能力以及钢板与塑料之间的粘接强度，均对减重复合钢板的成形产生影响，而点焊性能也因塑料层较厚而恶化，这些问题都有待解决。

以上 6 种钢板的详细性能数据，请见本手册的材料章。

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑦剪裁拼焊汽车冲压件毛坯：不同厚度、不同强度级别和不同表面处理的钢板裁减后拼焊在一起，满足一个零件不同部位的不同要求，如将厚度为1.5mm的热镀锌钢板、1.0mm厚的冷轧底合金高强度钢板和0.8mm厚的高强度热镀锌板剪裁后拼焊在一起冲压一个零件。这种方法可以减轻零件的重量、减少零件的件数、从而减少冲模的数量，提高生产效率，并改善零件的使用性能，降低零件的生产成本。表2-6-11列出一般生产方法与裁剪拼焊毛坯生产方法的成本和重量的比较。

表2-6-11 一般方法与剪裁拼焊毛坯生产车门时的重量与成本比较

成本与重量	一般方法		剪裁拼焊毛坯		相差	
	成本 马克/件	重量 kg/件	成本 马克/件	重量 kg/件	成本 马克/件	重量 kg/件
车门内板	9.50	9.0	2.67	13.9	-17.20	4.9
加强铰链	8.20	3.8		-	8.20	+3.8
门锁板	6.45	2.8	-		6.45	+2.8
工具费用	3.00				3.00	
质量保证费用	0.75		-		0.75	
后勤费用	0.55			-	0.55	
装配费用	0.58		-		5.80	
合计	34.25				7.55	1.7
	成本下降7.55马克/车门 重量下降1.7kg/车门					

由于这种生产方法有巨大的优越性，所以在欧洲增长得很快

2.6.3.2 冲压用其它材料

用于制造汽车车身的材料还有玻璃纤维增强的复合材料和铝材。

在玻璃纤维增强热固性树脂复合材料所用的树脂中，以不饱和聚酯树脂用量最大。目前由于机械化程度的提高，已经形成大规模生产的热固性树脂复合材料的种类很多，单适于制造汽车零件的主要方法是树脂注入法（RTM）和片状模塑料（SMC）。RTM法是在装入玻璃纤维的封闭模具里压入树脂，常温或者加热固化，这种方法设备简单，投资少，适于中小批量规模生产。SMC法是一种玻璃纤维增强的片状模压成形的复合材料，它是将不饱和聚酯树脂、填充剂、增粘剂、固化剂、内脱模剂和引发剂等组分混合成糊状物，通过SMC预制成形机组与玻璃纤维毡浸渍后作成片状预制材料，然后用热后成形工艺制成所需产品。

RTM和SMC方法生产的汽车零件有翼子板、门外板、顶盖、发动机罩等零件，这些零件重量轻，耐腐蚀，耐疲劳，零件的使用寿命长。但是大批量生产还不如钢板冲压方便，所以应用的还不如钢板普遍。

目前世界各国都推动车身铝合金化，有的型号的奥迪轿车已经采用全铝车身，用铝合金代替钢板可以减轻车身重量40%左右，但是价格却高80%。铝合金的特点是：耐腐蚀性好，外表美观，重量轻，但焊接困难。由于价格高和制造工艺上的困难，铝合金应用还不普遍。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.6.4 冲压设备

2.6.4.1 多工位压力机

随着世界汽车工业迅速发展，冲压设备的自动化程度不断提高，冲压生产也由简单的手工生产发展到自动化连线，再发展到全自动化的多工位压力机。

多工位压力机是全自动地完成自坯料至零件的加工和运输的设备。完成零件多道工序的连续生产。采用多工位压力机在提高生产效率、改善零件表面质量、减少员工以及现代化管理等诸方面成效显著，因此在先进的轿车制造厂得到了广泛的应用。

压力机的组成：拆垛系统→清洗喷油→坯料对中→多工位压力机各工位→零件输送系统。

1）多工位压力机的分类

按零件的输送形式分为三轴式多工位（包括简单二轴式小型多工位）和横杆式多工位。

三轴式多工位是坯料通过夹爪的上升、下降、送进、后退和张开、夹紧动作完成在工序间的输送，见图 2-6-6。目前可加工的工件的最大尺寸约为 2 500mm×1 500mm，目前最大吨位可以达到 5 000t，滑块数量为 1－3 个，工位分布为 5、3+3、1+3+2、1+3+3，见图 2-6-7。

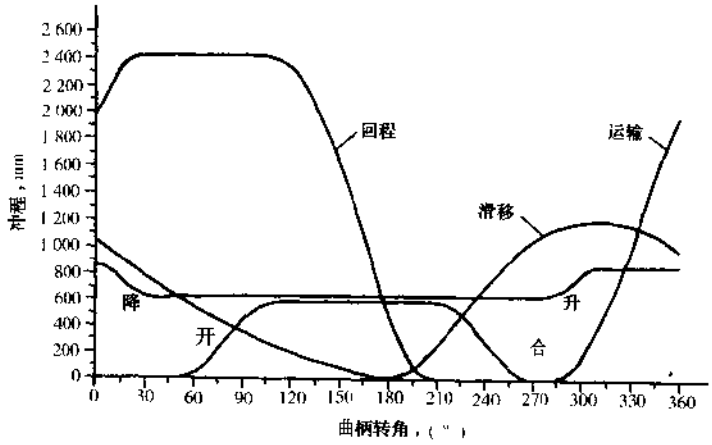


图 2-6-6 坯料输送

横杆式多工位采用真空吸盘拾取工件，吸盘仅有送进、后退、提升、下降的组合运动，见图 2-6-8。目前可加工的工件的最大尺寸可以达到 4 000mm×1 750mm，最大吨位可以达到 9 500t。

按驱动形式可以分为电子式驱动和机械式驱动。机械式驱动是指工件在压力机工位之间输送的动力来源于压力机的主传动系统；电子式驱动则是指工件在压力机工位之间输送的动力来源于伺服电机。

2）三轴式和横杆式多工位压力机的技术描述

（1）三轴式多工位压力机

①保持连续生产的拆垛装置：当坯料剩余至一定高度的时候，由托架完成剩余的拆垛工作，同时堆垛小车将新的垛料开进工作区域，保证了不间断生产。

②对中装置：坯料经输送皮带落至对中台，随对中台下行至下止点，随后对中台托架与夹爪同步上升至坯料夹持位置，托架停顿等待夹爪将坯料取走，托架继续上升，再次接料。

③输送导轨：其上升、下降、张开、夹紧和前进、后退的送进动作是由主机驱动的凸轮和连杆传动，运动精度高，见图 2-6-9。

除了由主机驱动外还可以单独驱动，由于换模时输送导轨的位置不是处于可以移出的区域，此时需要

汽车论坛 http://www.qclt.com

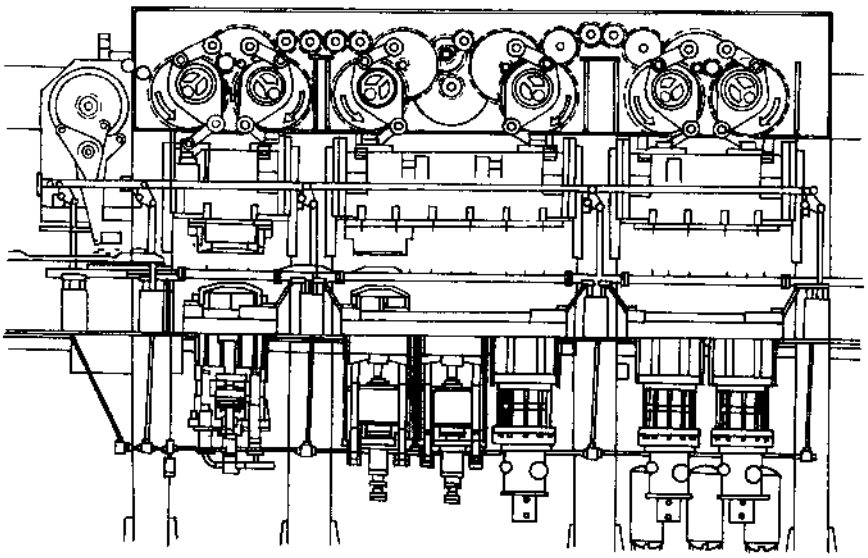


图 2-6-7 工位分布

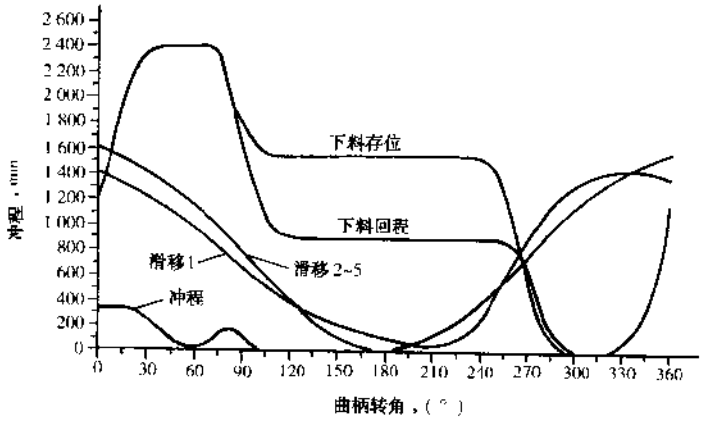


图 2-6-8 吸盘

单独驱动输送机械，使之匹配。

④移动工作台：输送导轨及夹爪放置于工作台的前后侧(移动工作台移动方向)一起移出。

⑤拉深垫：见图 2-6-10，多工位压力机的第一工位可以进行反拉延，工件不必翻转 180°，直接送入下一个工位。压边力较小时采用纯气式气垫，压边力增大时采用液压拉深垫，由液压控制四点的压边力，可以做到随拉延行程作编程调整。

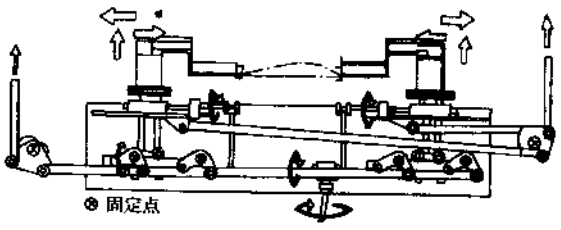


图 2-6-9 输送导轨

汽车论坛 http://www.qclt.com

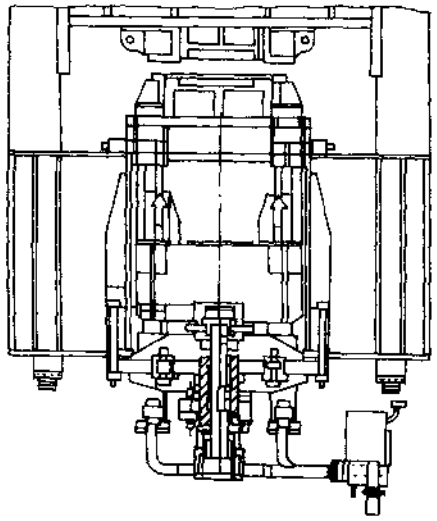


图 2-6-10 拉深垫

⑥控制面板的操作：所有的参数可以从一个屏幕中编程输入，方便了操作和维修。在主操作台上集中了可供生产管理、统计数据、维修揭示和机床操作的全部信息。

⑦对模具的要求：由夹爪输送工件要求下模高度一致，同一个滑块所有工序的模具装模高度应该一致，这对模具设计和加工提出了新的要求。

（2）横杆式多工位压力机

除了与三轴式多工位叙述的拆垛装置、拉深垫和控制面板特征相同外，还具备以下特点。

①第一工位的喂料装置：第一工位的进料是采用真空吸盘的机械手，简化了对中台的结构以及运动，机械手的端拾器在换模时自动更换。

输送装置：横杆上装有真空吸盘，横杆的上升、下降和送进、退运动由主机的机械驱动，见图 2-6-11。每道工序有一个单独的滑块，立柱数目与滑块数目相对应。

②中间立柱结构：立柱内可以作为横杆在闭模时停放的位置。位于中间立柱内的万能工位可以完成工件的提升、下降、倾斜、双工件中心距的变化等 5 个轴的运动。

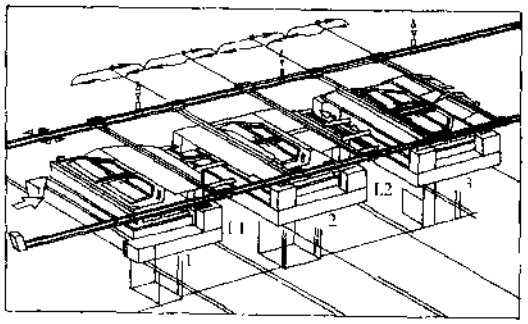


图 2-6-11 输送装置

③移动工作台：横杆吸盘及托架放置于移动工作台两侧一起移出，移动工作台的宽度比台面尺寸大，废料也从两侧排出。除第一工位外，移动工作台的中间也可布置排废料的孔。

3）多工位压力机的比较

机械式驱动的多工位，其输送机械和压力机的运动绝对同步，运动轨迹精度高。但机械部分的结构相当复杂，维修难度大，造价高。此种结构在欧洲广泛流行。

电子式驱动比机械式结构大为简化，零件数目减少，与单滑块的三轴多工位相比，价格便宜大约 20%～30%。对于单滑块，当模具不采用上下气垫时，工艺不受工位间距的限制，应用范围因而得以扩大。但是由于送料机构稳定性的限制，仅在中小型多工位上得以应用。

二轴式多工位压力机有以下特点：

多工位压力机是连续加工过程，生产率从平均每分钟 5.5 次提高至 8 次。液压拉深垫的压边力可以随拉延行程作编程调整，有利于零件的成形。

横杆式多工位除了三轴式多工位的优越性外，还具有以下特点：

①提高了生产的适应能力。由于采用了真空吸盘，保证了零件表面质量和避免零件变形，既满足大型冲压件的生产，又适合中小型零件成对或者四件同时生产。

②提高生产效率。工件由前一工位输送至下一工位由接料横杆和送料横杆的组合动作来完成，缩短了输送间距，加上双料坯以及多料坯的生产方式，大大提高了生产率。

③模具设计更趋灵活方便。由于每道工序都有自身滑块的调整，每个滑块都有单独的超负荷保险系统，加之 4 个承载受力点和运动导向，使模具设计中工艺力的分配以及模具调试较为简单；万能工位允许工件在相邻工序之间有位置的变化，因而使模具设计更加灵活。

4）发展趋势

未来的冲压车间将是以全自动多工位压力机为中心的工厂，包括成品件的装卸自动化，自动检查为中

汽车论坛 http://www.qclt.com

心的质量保证体系，模具自动存储和更换系统等辅助设备的自动化，及信息系统的自动化。因此全自动横杆式多工位压力机将会得到广泛的应用。

压力机生产厂商在压力机制造过程中广泛采用新技术，新型压力机可以自动记录压力机的运行情况，并配合相应软件给出汇总分析，这样可以及时发现生产中的不合理之处以便改进。同时新型压力机还可以自动调整，只需操作人员将零件号或者模具号输入压力机，压力机就能够自动调整到最佳状态，明显减少换模时间，减少误操作的可能。以后计算机技术必然会在冲压生产中得到更广泛的应用。

2.6.4.2 大型压力机生产线

1）普通机械压力机的分类

按滑块个数可分为单动压力机和双动压力机；

按压力机操作空间可分为开式压力机和闭式压力机；

按压力机压力点可分为单点压力机、双点压力机和多点压力机。

2）压力机生产线的组成

一般压力机生产线由一台双动压力机和若干单动压力机（大多数为4～6台）组成。随着液压拉深垫技术的发展，压力机生产线更多地采用由一台带有液压拉深垫的单动压力机和若干单动压力机组成。

3）压力机的技术描述

公称压力：公称压力的大小根据冲压工艺而定，一般公称行程为13mm，为增加压力机足够的刚性储备和足够的能量，从常规13mm提高到25mm，以保证压力机在最低行程次数下能可靠地连续冲压。

压力机操作采用“寸动”、“单次”、“连续”行程，便于模具调整、手动和自动化生产。

主传动有曲柄连杆机构、偏心齿轮结构和多连杆机构。采用多连杆机构，滑块运动在工作行程时速度较慢，并且变化平滑，而回程迅速，见图2-6-12。对零件的拉深变形十分有利，提高了生产效率。

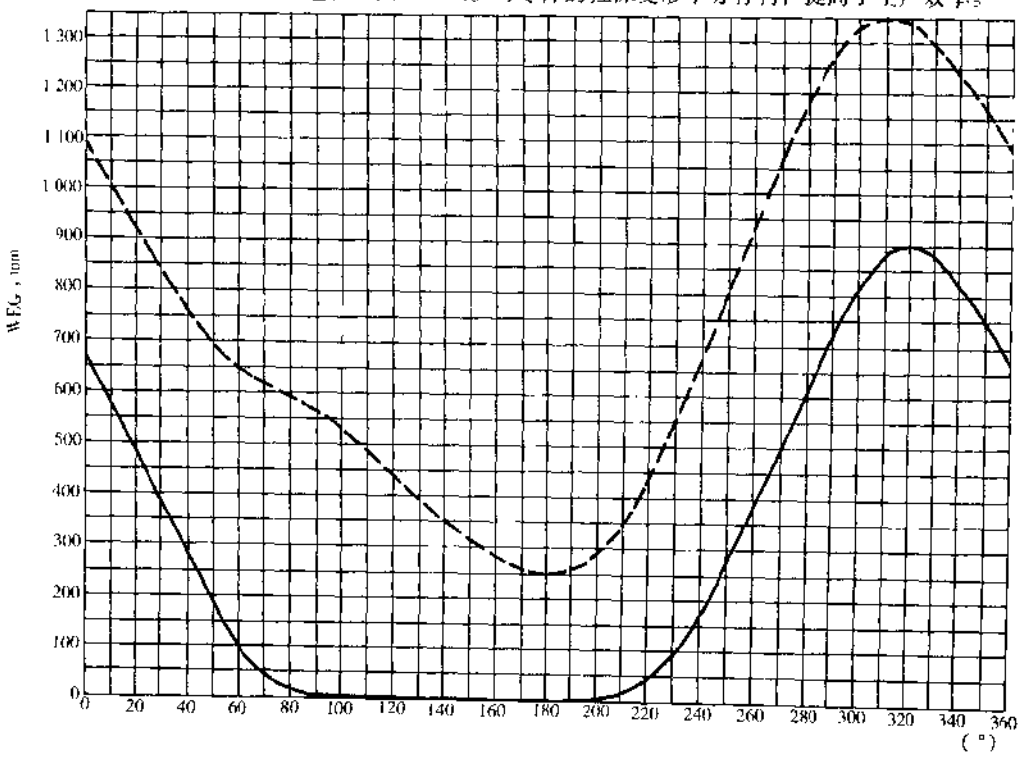


图2-6-12 滑块行程曲线

汽车论坛 http://www.qclt.com

单动压力机设有上气垫和下气垫装置，如图 2-6-13 和图 2-6-14。下气垫压力和行程均可调节，并可具有闭锁功能；上气垫压力也可调节。

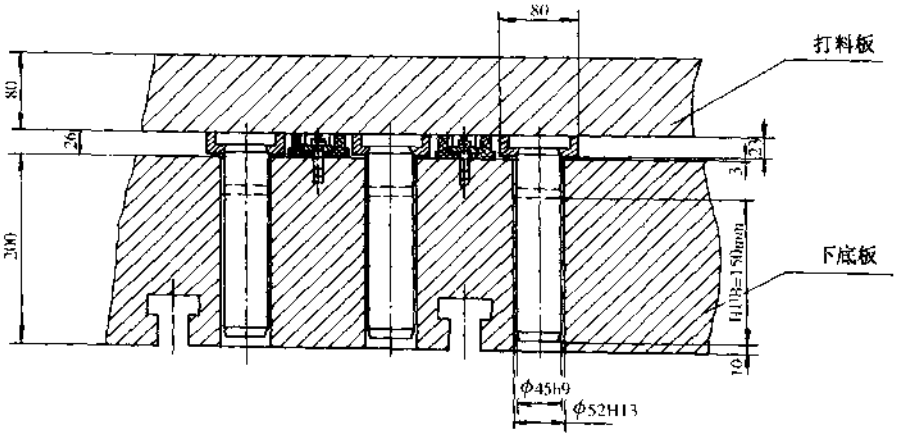


图 2-6-13 上气垫

双动压力机的四点压边力可调节，满足不同零件拉延工艺的要求。

压力机设有液压过载保护系统，以防止在超负荷冲压时损坏压力机和模具。

压力机有可靠的电气、液压及气动连锁装置。如滑块平衡气压、气垫压力、离合器和制动器的气压、安全栅、模具夹紧器、移动工作台等均与主传动连锁，确保压力机安全开启。

压力机滑块上安装模快速夹紧器，移动工作台有液压夹紧器，大大缩短了换模时间。

滑块上有锁紧装置，在修理模具时滑块被刚性块锁住，保证了维修工作的安全进行。压力机的操作采用双手按钮。

闭合高度和气垫行程能自动调节，并在屏幕上显示变化量。

在压力机主传动系统中，采用可靠耐久的离合器、制动器及安全连锁装置，耐磨损，发热低。目前，在大型压力机和多工位压力机中广泛采用湿式离合器和制动器。

每台压力机配有两台移动工作台，其导轨可安装在压力机的两侧，平行分布，也可以安装在压力机的一侧，呈 T 形分布。

润滑系统采用可监控的定量润滑系统，保证各运动副的可靠润滑。

压力机具有比较完整的 PLC 程序控制系统，并带有彩色显示屏，显示正确的操作程序、故障发生的部位及压力点的瞬时吨位。换模时可根据工艺要求自动调节平衡器气压、装模高度、气垫行程和气垫压力。

压力机的精度直接影响模具寿命和冲压件表面质量，一般要求滑块、工作台及气垫的精度如表 2-6-12。

表 2-6-12 压力机的精度要求

要求部位	平行度 mm/m	垂直度 mm/m	要求部位	平行度 mm/m	垂直度 mm/m
滑块运动方向与工作台上平面		0.35	气垫平面与工作台台面(前后)	0.4	
滑块下平面与工作台上平面	0.1		气垫平面与工作台台面(左右)	0.1	

压力机的安装时可将其底座置于弹性垫上，从而减少压力机工作惯性力对基础、厂房及其它设备的振动，减少冲击和噪声。

4）压力机自动化生产线

为了使压力机冲压线更有效地工作，提高产品质量、减轻工人劳动强度，在压力机冲压线每台压力机

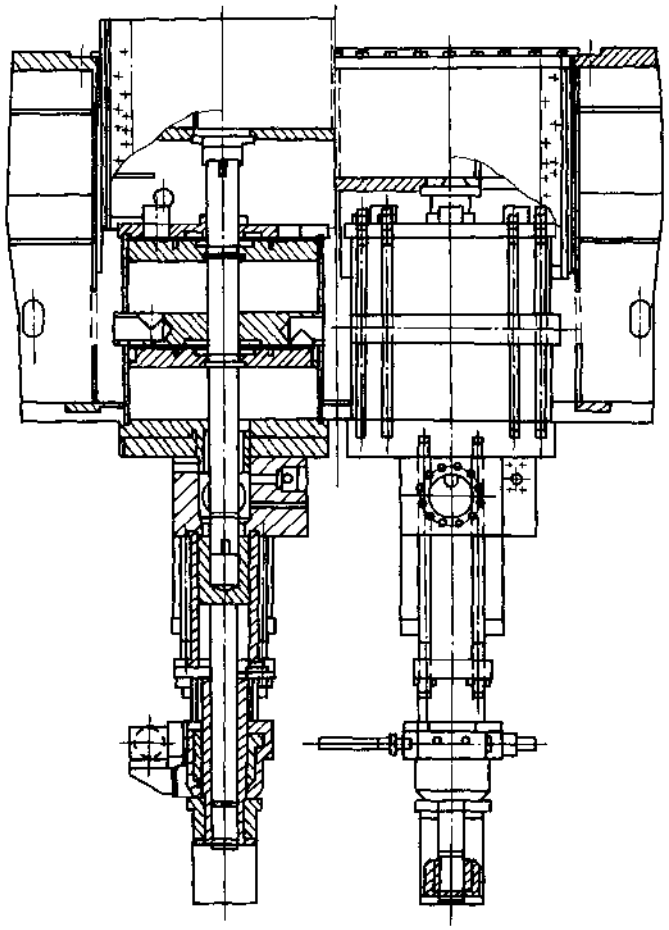


图 2-6-14 下气垫

上配置上下料机械手或机器人（图 2-6-15、图 2-6-16）。

自动化压力机生产线的技术描述（以上下料机械手为例）：

①组成：自动化压力机生产线由拆垛系统、清洗喷油装置、料坯对中、各台压力机上下料机械手、双动压力机与单动压力机之间的翻转装置、单动压力机之间的运输装置和产品运输机组成。

②拆垛系统：拆垛系统由两台拆垛小车、磁性分离器和料片端拾器组成，并装有双料片检测器。当一台拆垛小车料坯剩余一定量时，另一台装有料坯的小车开进工作区域，保证不间断生产。

③清洗喷油装置：料片经拆垛分离，通过磁性皮带进入清洗喷油装置。清洗机由导入辊、洗刷辊和刹干辊组成，根据工艺要求对料片进行上下面喷油，喷油区域可控制。

④对中装置：毛坯经清洗、喷油后通过磁性皮带进入对中装置。对中装置周边均设有定位块，定位块位置可根据料片尺寸大小可调节，在对中装置设有料片检测开关，对中重复定位精度为 1.0mm。

⑤压力机上下料机械手：压力机上下料机械手均安装有带真空吸盘的抓手，上料机械手是将对中装置的料片吸起或将地面输送机、翻转装置上的工件吸起，送入各工序模具内。下料机械手是将工件从各工序模机内取出，送入翻转装置上或地面输送机上。压力机上下料机械手有两个独立的运动单元组成，送料方向行程、上下方向行程 PLC 可控制编程，重复定位精度为 1.0mm。

⑥翻转输送装置：由 2 个独立运动的单元组成，具有翻转和输送两个功能，翻转角度 180°，高度方向

汽车论坛 http://www.qclt.com

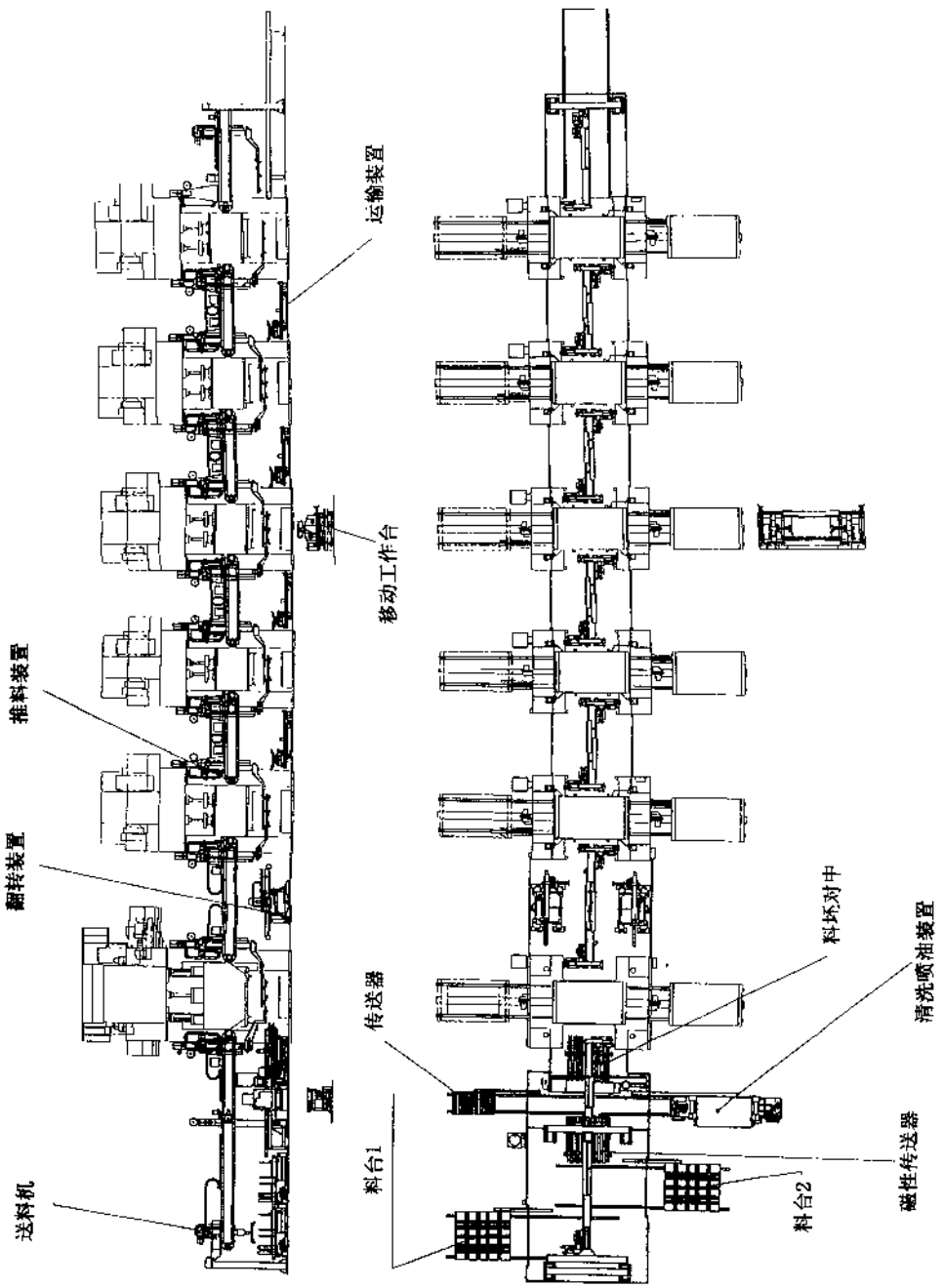


图 2-6-15 上下料机械手自动化压力机生产线

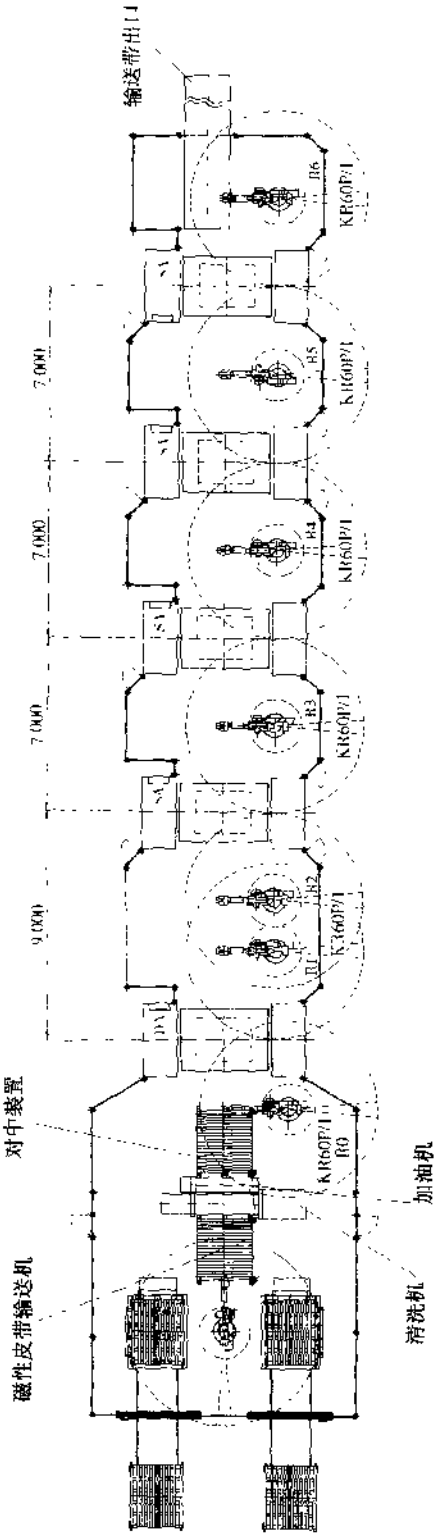


图 2-6-16 机器人自动化压力机生产线

汽车论坛 http://www.qclt.com

可调节，侧向可根据工件尺寸调节，翻转和输送同时进行，并通过 PLC 可编程控制，重复定位精度为 1.0mm。

⑦地面输送装置：具有绕输送方向和侧向方向倾转运动功能，倾转运动、输送方向运动和侧向方向运动均由 PLC 可编程控制。重复定位精度为 1.0mm。

⑧控制面板的操作：所有的参数可从屏幕中编程输入，在屏幕上可以观察到各运动单元的状态，方便工人操作和维修。

⑨自动化对模具的要求：模具在设计过程中应考虑机械手运动轨迹，如模具的导板、导柱尽可能设置在模具的两侧。模具内设置传感器，并与自动化控制相联接，废料必须从模具内自动排出，与手工生产的模具相比提出了更高的要求。

2.6.4.3 开卷生产线

开卷设备进行薄钢板的剪切具有效率高、质量好和成本低的优点，汽车生产厂家愈来愈多地采用开卷剪切线生产取代单台剪床进行的手工剪切生产。

开卷设备可以实现从送料→板料清洗→板料校平→送料控制→落料或剪切→板料堆垛过程的全自动化。消除了手工操作对板材表面质量的影响，保证了冲压件及汽车车身质量的提高。采用钢板卷料比直接采用定尺板材生产可降低约 10% 的材料费用，采用开卷线还可以节省大量的劳动力成本。

我国因受汽车生产厂家生产规模和生产能力的限制，采用开卷落料线和剪切线生产的效益还不明显，但随着汽车工业的不断发展，开卷设备在我国汽车工业中的使用越来越广泛，产生的作用和效益也会越来越巨大。

1）开卷落料线

①开卷落料设备的组成（图 2-6-17）：

开卷送料部分：包括开卷机、切头剪床、清洗机、校平机等；落料压机和板材堆垛部分：包括横向和纵向堆垛。

②开卷落料线的基本技术参数：

适用板材的厚度：0.4～2.8mm

板材的宽度：400～2 000mm

板材的长度：100～4 000mm

校平机的速度：0～85m/min（无级可调）

落料生产频次：10～60 次/min

适用的板材种类：冷轧钢板、单面或双面镀锌板、铝合金板

2）开卷剪切线

开卷剪切线的基本组成详见图 2-6-17。

开卷送料部分：包括开卷机、切头剪床、清洗机、校平机等；落料压机和板材堆垛部分：包括料输送方向的 2 个堆垛站。

开卷落料线的基本技术参数：

适用板材的厚度：0.4～4.0mm

板材的宽度：400～2 000mm

板材的长度：100～4 000mm

校平机的速度：0～85m/min

剪板机行程次数：0～100 次/min（冲次/分钟）

板材种类：冷轧钢板、单面或双面镀锌板、铝合金板

2.6.4.4 冲压生产辅助设备

为提高生产设备的利用率，减少设备故障，汽车厂家冲压生产车间都根据使用目的的不同，备有如下

汽车论坛 http://www.qclt.com

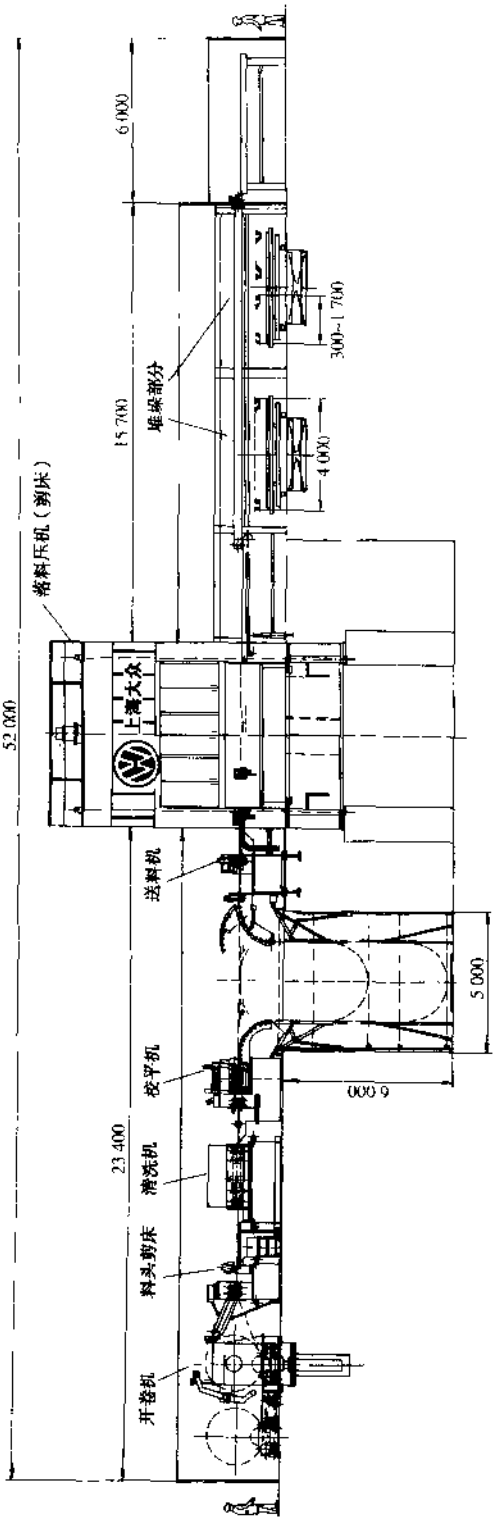


图 2-6-17 开卷落料（剪切）设备

汽车论坛 http://www.qclt.com

的辅助设备：

①试模压机：由于生产压机价格高，生产节拍要求高，生产能力的限制，以及试模时间的不可固定性等因素，一般的冲压车间都备有专用的试模压机。试模压机有机械式，也有液压试模压机。近年来，越来越多的汽车或模具制造厂家采用液压机进行试模。针对模具的不同结构，相应有单动、双动液压试模压机。随着多工位压机应用的普及，多工位液压试模压机也随之产生。

②模具清洗系统：清洁模具型腔，减少冲压铁屑、脏物等对冲模及冲压件质量的影响。

③废料输送线：布置在设备基础地坑内，脏废物集中输送到废料打包处理后，使废料处理与冲压生产分离开，尤其是对自动化冲压生产线，在不能人工取废料的情况下，废料输送线已成为必不可少的辅助设备。

④铲车、电瓶车：及时灵活地处理产品原料，理顺物流，对提高冲压设备利用率，提高生产效率起到必不可缺的作用。

2.6.5 冲压车间的平面布置

2.6.5.1 区域划分

冲压车间一般由：开卷落料区域、毛坯周转区域、生产区域、机模修区域、质量测试区域、冲压件仓库、辅助部门等部分组成。

①开卷落料区域由开卷线、卷料周转区域组成，多布置于冲压线上料端一侧，为冲压车间提供特定要求的毛坯。开卷落料区域也可与冲压车间分开布置，组建开卷落料中心，为多个冲压车间供料。

②毛坯周转区域用于暂时存放毛坯，多布置于开卷落料区域与冲压线之间，便于毛坯的输送。落料后的毛坯置于专用的料架内，多层叠放，以减少占地面积。

③生产区域是冲压车间的核心区域，主要生产设备均集中在此，是规划的重点。

④机模修区域为生产设备和模具提供维护，应配备焊接、钳工工具和少量的机加工设备。也可配备适当的试模压机、研磨压机及模具清洗系统，避免模修工作占用生产设备的工时。

⑤质量检测区域多布置于冲压线的末端。检测方式有样架检测、3D 测量和表面质量目测等。检测室对环境的温度、湿度和振动均有一定的要求。

⑥冲压件仓库用于存放一个生产周期及用于生产储备的冲压件，多布置于生产线末端与车身车间之间，对温度和湿度、特别是湿度具有较高的要求。仓库内冲压件料架可多层叠放，以增大其存储能力。

⑦辅助部门包括办公室、生活楼、电站、动力计量入口和空调系统等。

2.6.5.2 设备选型与布置

1）设备选型

车间内设备的选用要根据所生产的车型、批量、冲压件的类型及投资的规模而定。目前汽车制造普遍采用机械式压机，有双动拉伸压机（有些已被具有较强下气垫功能的单动压机取代）、单动压机和多工位压机。双动压机一般与单动压机配合使用，组成生产线。如：一台 2 000t 双动压机和多台机（多为 5 台）1 000t单动压机组成 1 000t 线，可用于前地板、整体侧围及双件的生产；一台 1 400t 双动压机和多台（多为 5 台）600t 单动压机组成 600t 线，可用于四门、两盖等的生产；3 台或 4 台单动压机可以组成短线，用于生产前梁、中柱及小件生产。前两种压机线比较适于自动化生产。

多工位压机是功能更强的压力机，其生产效率是传统冲压生产线的 2～3 倍，是未来的发展方向，目前国内已有使用。

2）压机线的布置

根据压机的不同形式和物流情况，压机线可以采用以下几种方式布置：

在一跨内并排布置两条压机线。这种布置方式适应于移动工作台单侧开出、T 字形轨道的压机，模具不能存放于压机线旁，需集中存放于另外的模具库。其特点是压机布置紧凑，占地面积小，便于废料输

汽车论坛 http://www.qclt.com

送；弱点是换模空间小，地坑内排布比较紧张，辅助设备不便布置。

在一跨内布置一条压机线，压机线偏于一侧。这种布置既适于移动工作台单侧开出的压机，也适于移动工作台两侧开出的压机。对于前一种压机，移动工作台向外侧开出，内侧留作操作人员通道，外侧靠柱头区域可以存放模具，这种布置方式特点是生产区域开阔，模具吊运距离短。后一类压机，换模工作必须在两侧进行，模具不能存放于压机线旁，这种布置方式特点是压机换模速度快，压机间距可以缩短，移动工作台少一套驱动系统。

在一跨内布置一条压机线，压机线位于正中。这种布置方式适于移动工作台两侧开出的压机，与第二种布置相类似。它克服了其靠近柱头一侧换模空间较小的不足，但面积利用率较低。

2.6.5.3 地坑

压机的很多部件需要布置在生产平面以下的地坑内，地坑有通式地坑和条形地坑两种。条形地坑采用较多，其内部用于布置压缩空气罐，液压、润滑油箱，水、气管道及废料输送线等。对于多条地坑，最好将其在首端和尾端相贯通，以便于设备的维修保养工作和管道的排布。通式地坑地下空间较大，在某些情况下，也可将通风管道等布置在下面，使生产区域更开阔，但费用较高。

2.6.5.4 车间内物料及模具的调运

车间内的毛坯输送多采用叉车、起重机和平板拖车。运送距离较短的可直接利用叉车、起重机适于同一跨内的料片吊运；平板拖车适于距离较远、数量偏大的毛坯。

冲压件的输送多采用叉车或拖车。叉车具有灵活、机动等优点，对冲压件仓库较近、生产节奏低于8次的手工生产和自动化生产比较适合，拖车的输送能力较强，对于生产节奏较高的大型多工位压机比较适合，而且易于实现拖车的自动化输送。

废料的输送多为自动化输送。废料通过模具及压机的废料滑槽自动滑落到地坑下的废料输送分线，再经废料总线汇集到统一的废料出口集中处理。

车间内的模具调运多采用起重机和平板车。在同一跨内利用起重机吊运，不同跨间的模具用平板车驳运。平板车分有轨和无轨两种，有轨平板车运输路线固定，输送区域受到限制，对起重机依赖性较大、但造价低、对地坪无特殊要求；无轨平板车具有机动性强，可运抵区域广等优点，但其造价高、对地坪的承载要求较高。

2.6.5.5 动力管道布置

①控制电柜和电缆的布置：压机的控制柜多布置于柱间搭建的电柜平台上。电缆沿着电柜平台下的电缆槽、柱头和地面的电缆沟布线。2.6.5.2所述的第一种压机的布置方式，电缆也可沿压机与电柜平台间的桥架布置。对于大型多工位压机，部分电柜可以布置在压机上，减少电缆的长度。

②水、气管道布置：水管和压缩空气管多布置于地坑内，与废料输送线对应的一侧。管道应尽量靠近墙壁布置，保留必要的设备维修通道。各条地坑内的相应管道在首端和末端相连通形成网络，以保证管道内压力的平衡。

条形地坑的通风管多布置于柱头间的电柜平台下，通式地坑的通风管道可布置于地坑内。

2.6.5.6 车间环境

为提高冲压件的表面质量，车间应具有一定的密封性，防止灰尘的进入。车间内配备通风及温度调节设施，保证车间的温度和湿度。

车间的地坪应具有防尘、防滑、耐磨等特性，可采用钢地坪或混入钢丝的混凝土地坪。钢地坪的一次性投资较大，但便于维护；混凝土地坪为了防尘和美观，往往在表面涂涂料，这种地坪一次性投资较小，但维护费用较高。（撰稿人：黄鸿生）

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.7 塑料成形

2.7.1 概述

塑料的密度是钢铁的1/8－1/6，它几乎不受水及普通介质的浸蚀，不仅成形工艺简单、方法繁多，而且外观也特别好，在汽车上的应用日趋广泛。

虽然塑料的机械强度不如金属高，但它可通过玻璃纤维或碳纤维的增强，其比强度（强度/密度）并不比金属逊色。从图2-7-1示出金属与塑料的比抗拉强度对比情况看出：热塑性塑料的比抗拉强度与结构钢及黄铜相当，而增强塑料则可与合金钢相匹敌。

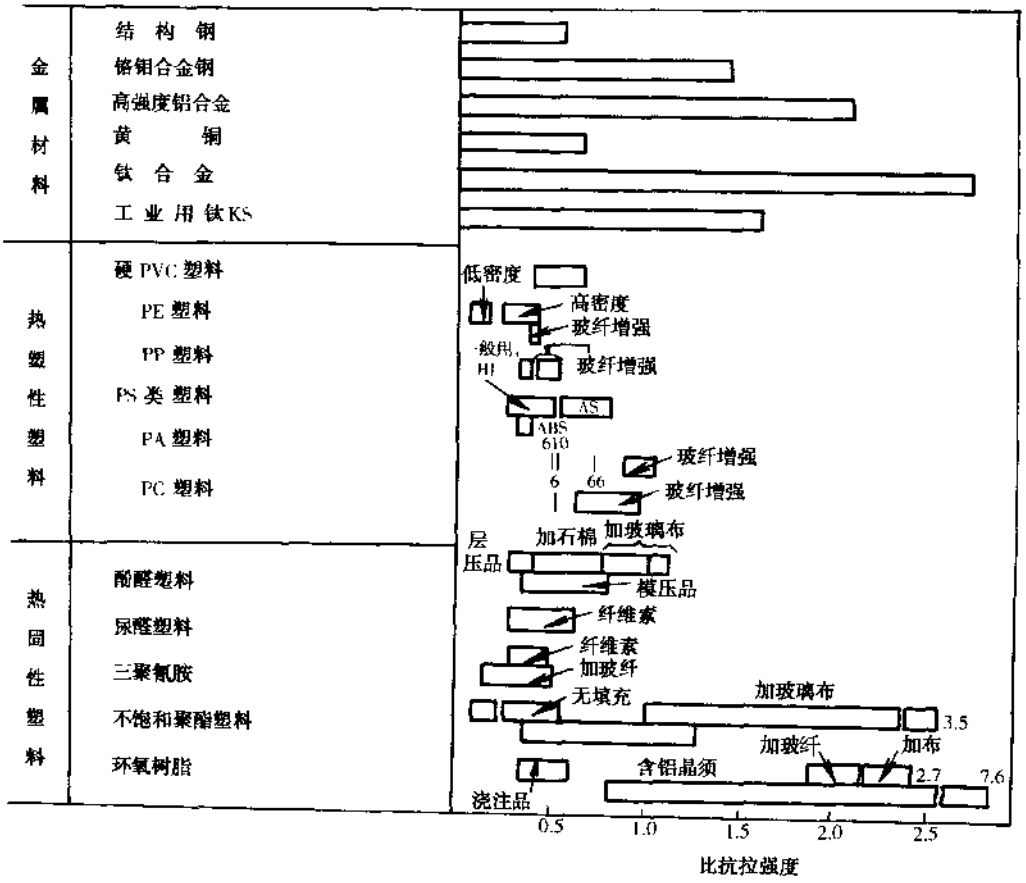


图2-7-1 塑料与金属的比抗拉强度

虽然塑料存在耐热性差、尺寸精度差等缺点，但只要设计合理、加强工艺管理，仍可满足汽车使用要求。图2-7-2、表2-7-1、表2-7-2示出轿车的原材料应用比例变化和车身塑料件选材及加工方法情况。图2-7-3示出车身塑料件应用举例。

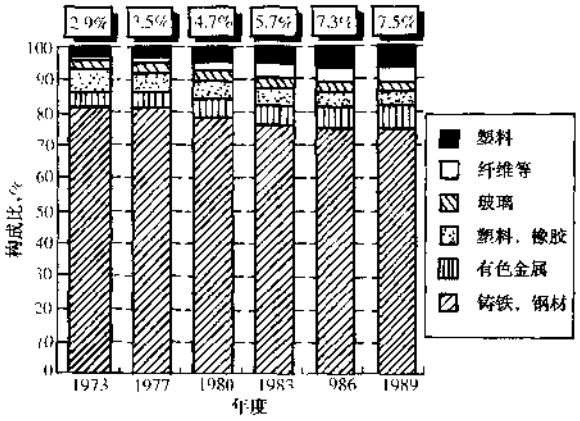


图 2-7-2 轿车原材料构成比例

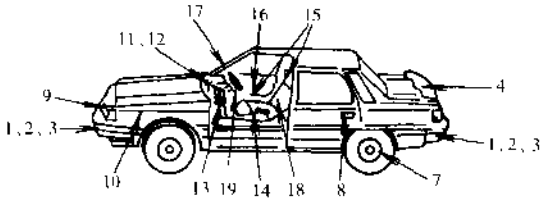


图 2-7-3 车身塑料件应用示例(图中标号为表 2-7-1 的序号)

表 2-7-1 车身塑料零件的加工方法及材料

外装饰件				内饰件			
序号	零件名称	材料	加工方法	序号	零件名称	材料	加工方法
1	保险杠表层	PUR 改性 PP、TPO TPS、PC	RIM、R-RIM 注射成形	11	仪表板	PP-F、PP-G、ABS、AS-G 改性 PPE	注射成形 真空吸塑、搪塑等
2	保险杠内层	PUR PP、PE	RIM 珠粒发泡	12	仪表板芯衬	PVC-PUR PVC + ABS-PUR	搪塑 + RIM 真空吸塑 + RIM
3	保险杠骨架	PP-GMT	冲压成形	13	杂物箱	PVC-PUR ABS、PP-F、PP、TRS	搪塑 + RIM 注射成形
4	空气滤清器 扰流板 气流稳定器 侧气流稳定器	PUR 改性 PP、PC PP、改性 PPE、PU	RIM、R-RIM 注射成形 吹塑成形 SMC 模压成形	14	副仪表板	PVC · PUR ABS、PP-F、PP	搪塑 + RIM 注射成形
5	散热器格栅	ABS、PC、PMMA	注射成形	15	扶手、头枕	PVC - PUR、PP	搪塑 + RIM 注塑、吹塑成形
6	装饰件	ABS、PC、PMMA、AES、PA、PBT、UP	注射成形 SMC 模压成形	16	车门内衬	PP PP	注射成形 冲压成形
7	轮罩	改性 PPE、PA	注射成形	17	立柱护板	ABS、PP-F、PP、ABS、PP PP + 纤维	注射成形 真空吸塑 冲压成形
8	门把手	POM、PA、PC、PBT	注射成形	18	座椅垫	PVC	挤出成形
9	灯具类	ABS、PC、PMMA、UP	注射成形 SMC 模压成形	19	转向盘	PVC + PUR PVC、PP	搪塑 + RIM 注射成形
10	外板	PP/PA、PPE/PA、UP、PUR	注射成形 BMC 模压成形 RRIM				

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-7-2 材料代号说明

代号	材料名称	代号	材料名称
PUR	聚氨酯	UP	不饱和聚酯
改性 PP	改性聚丙烯	ABS	丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚物
TPO	热塑性聚烯烃弹性体	PMMA	聚甲基丙烯酸甲酯
TPS	热塑性苯乙烯弹性体	POM	聚甲醛
PC	聚碳酸酯	PBT	聚对苯二酸丁二醇酯
PP	聚丙烯	PP-F	填料改性聚丙烯
PE	聚乙烯	PP-G	玻璃纤维增强聚丙烯
PP-GMT	玻纤毡增强聚丙烯	ASG	玻璃纤维增强 AS 塑料
改性 PPE	改性聚苯醚	PVC	聚氯乙烯

2.7.2 加工方法

金属的结晶结构是在规整的原子间由运动的自由电子而结合起来的。塑料，则是原子的共有结合，分子成为高分子化合物。其分子量可大可小，性能也千差万别。

塑料有热固和热塑之分，前者在加工过程中受热熔融、流动并固化，固化后即使加热也不再熔，后者则可反复加热熔化并冷却变硬。

除了浇铸、轧制、辊锻、压延、切削、研磨、焊接、粉末烧结、冲压等以外，塑料还可以吹塑、搪塑、注射、挤出、吸塑、发泡、化学反应及糊制来进行加工。塑料的主要成形加工方法分类见表 2-7-3。

表 2-7-3 根据材料特性确定的加工方法

材料特性	加工特性	加工方法		包含材料	制品形状	备注
热固性	熔融—固化成形	浇注成形		PMMA、St、EP	任意	包括离心浇注
		压制成形		PF、UF、MF、UP	任意	BMC、TMC、SMC
		压铸成形		PF、UP 等	任意	包括传递成形
		注射成形		UP、PF 等	任意	BMC、SMC 含充填材料
		层压成形		UP、PF、MF	板、棒、片	
		反应成形		PU（RIM、RRIM）	片状	
热塑性	熔融—冷固成形	辊压成形		PVC、PMMA	片材类	掺混、混入填料等
		模塑		几乎全部	任意	需冷却(试验成形用)
		注射成型	普通	全部	任意	普通成形
			吹塑	PP、PE、PET	瓶、罐	吹塑
			特殊	MMA	透镜等厚壁	夹芯模发泡成形等
				ABS	件壳罩等发泡体	
				PE 等		
		挤压成型	普通	全部		长形型材
			挤吹	PP、PE、PET	板、管、棒	挤吹薄膜
			吹塑	PP、PE、PET	容器	
			特殊	PVC、PE 等		异型挤出
		烧结成形		PTFE、UHMWPE	任意	粉料搪塑
		粉末成形		PE 等	大型容器	

续上表

材料特性	加工特性	加工方法		包含材料	制品形状	备注
材料特性	固相加工	真空吸塑		ABS、PVC、PP	箱、容器、型板	
		空气压力加工		ABS、AS、PVC	厚壁容器	
		塑料加工	压延	PVC、PP等	片、膜	
			锻造	POM、PP、PC等	任意	
			滚压	PVC、PC等	容器类	齿轮、轴杜
			挤出	PF、POM等	任意（棒状）	
			弯曲	PVC等	板、圆棒	

汽车塑料零件常用的一次性加工成形工艺列于表2-7-4

表2-7-4 汽车塑料零件的常用一次加工方法

材料 \ 形态	间歇成型		连续成型	
	单面	双面	截面	无
热塑性塑料				
干料（粉）	搪塑成形	注射成形	挤出成形	压延成形
液状	搪塑、浇注			
粒料	吸塑成形	注射成形	挤出成形	
填料增强片材	真空吸塑	冲压成形		
热固性塑料				
干料（粉）				
液状		RIM成形		
加纤维增强		R-RIM成形		
加毡状增强材料		S-RIM成形		
粒料		注射成形		
有填料片材				

2.7.2.1 压延成形

汽车上的各种塑料片材、顶棚内衬、车门内板用板片、仪表板表皮片材等都是用压延法制造。图2-7-4示出典型的压延工艺方法，是将材料混合并混炼熔融后在四辊机上进行加热压延，制品的厚度可通过辊距来调整。由于材质的不同及生产厂家工装设备的差异，整个压延工艺也可有所差别，如采取挤出后再碾压的工艺、混炼后再碾压的工艺等。

2.7.2.2 挤出成形

挤出成形是将热塑性塑料通过挤出机的料筒，在加热的情况下，由筒内旋转的螺杆把料从机头模口挤出的工艺过程，因能连续不断的供料与成形，所以能制造棒材、管材及异型等长尺寸制品。

挤出工艺可为连续或间接两种形式：前者指用挤出工艺直接生产所需形状制品，而间接用途则指塑料在填加、增强、共混改性或合金化处理时所采用的挤出、切粒工艺过程。图2-7-5示出挤出型材料的工艺方法。

挤出机是由料筒、料斗、传动装置、螺杆、加热器、机头、机座、冷却系统组成，它兼有供料、容料、混合、混炼、计量及成形功能。旋转挤出机又可按螺杆数目分为单螺杆和双螺杆两种类型，而双螺杆又分为同向回转和异向回转两种。

图2-7-6示出挤出机的基本构造。挤出机的生产能力、适合的塑料品种以及其功能主要取决螺杆的形状、结构和工艺参数。最常用的等螺距而不等槽深的螺杆构造见图2-7-7。

汽车论坛 http://www.qclt.com

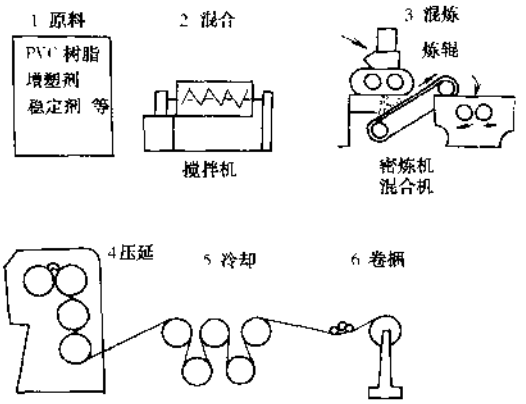


图 2-7-4 压延成形工艺示意图

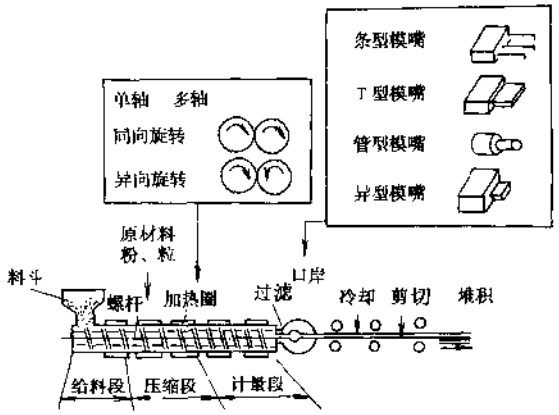


图 2-7-5 挤出成形工艺方法概况

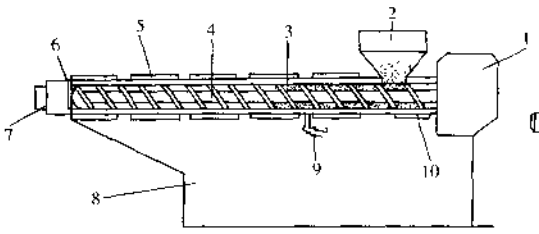


图 2-7-6 挤出机的基本构造
1-传动装置;2-料斗;3-机筒;4-螺杆;5-加热器;
6-过滤板;7-机头;8-机座;9-测温器;10-冷却夹套

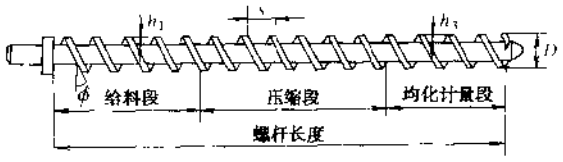


图 2-7-7 等螺距不等槽深螺杆构造
h_1-加料段螺槽深度；h_3-均化段螺槽深度；
D-螺杆直径；ϕ-螺旋角；s-螺距

随着塑料工业的发展，高科技挤出机已投入市场的有：搓动式双螺杆挤出机、可组装式螺杆挤出机、料筒可打开式挤出机及科研用透明料筒挤出机等。应根据具体用途去选择专用性较强的塑料挤出机。

2.7.2.3 真空（吸塑）成形

真空成形是指将塑料片材经加热软化后置于模上，通过型模上的排气小孔把塑料片材与型模之间的空气向真空罐内排出，使软化的片材吸附到模型上，经冷却定型而制成制品的一种加工方法。真空成形的工艺过程示于图 2-7-8。汽车的仪表板表皮、车门内板、挡泥板屏蔽件及座椅表皮等均采用真空成形法而制成。为提高生产效率，从材料投入直到修剪废料全过程连续化、自动化的生产设备已经问世。

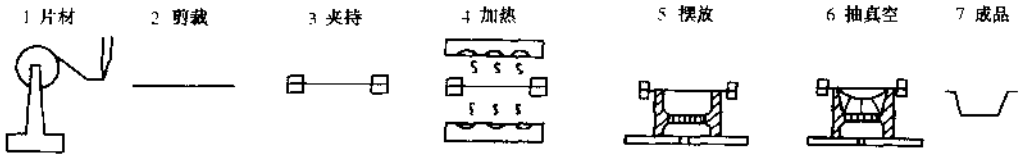


图 2-7-8 真空成形工艺过程示意图

真空成形的模型有凸型和凹型两种，为了防止制品的厚薄不均及形状失真性，可通过空压辅助模塞进行改进。

2.7.2.4 注射成形

注射成形也称注塑成形，是热塑性塑料的一种重要成形方法。它是将粉状或粒状塑料从料斗送入机筒内加热熔融后，在柱塞或螺杆的运动压力下，物料被压缩并通过喷嘴快速注入闭合的模具内，经过冷却定型而制成制品全过程。注射成形的工序及过程见图 2-7-9。

汽车论坛 http://www.qclt.com

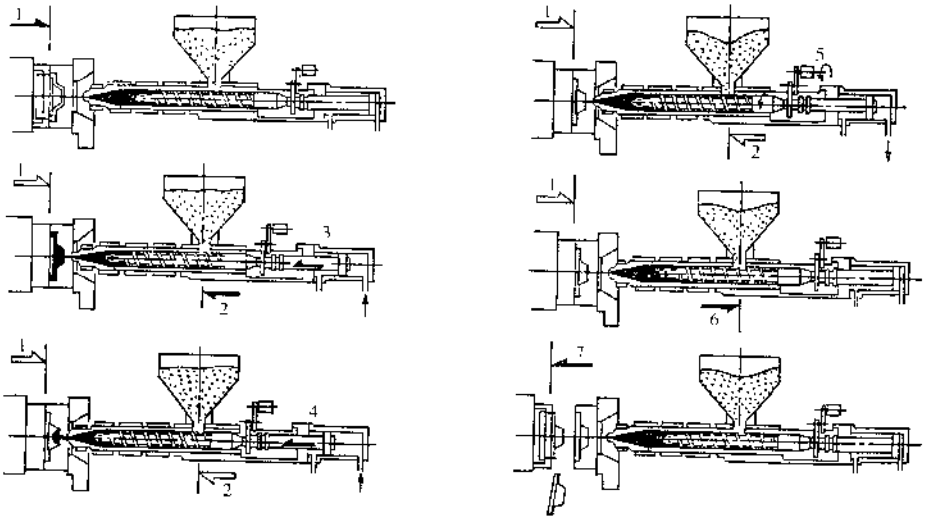


图 2-7-9 注射成形的工序及过程

1-合模；2-喷嘴前进与模具吻合；3-注射；4 保压冷却；
5-旋转螺杆补充供料；6 喷嘴后退；7-开模取件

注射过程的实施是由注射机来完成，注射机的基本结构是注射部分和锁模部分组成，整个动作是靠液压、控制和电气系统来完成，注射成形机的外形及结构示于图 2-7-10。

工业用塑料制品大多是单一颜色，为满足日用品多花色的需要，开发了多色(多材质)成形方法和设备，见图 2-7-11。

注射成形的过程比较复杂，要有诸多保证条件，如合理而精确的模具、性能良好的注射成形机械和辅助设备、科学的成形条件、齐全而先进的设计及测试手段、综合性能优越的高分子材料等。图 2-7-12 列出注射成形所必要的管理因素。

注射成形在汽车塑料制品生产中所占比例很大，如保险杠、通风格栅、仪表板、座椅靠背、护风圈、

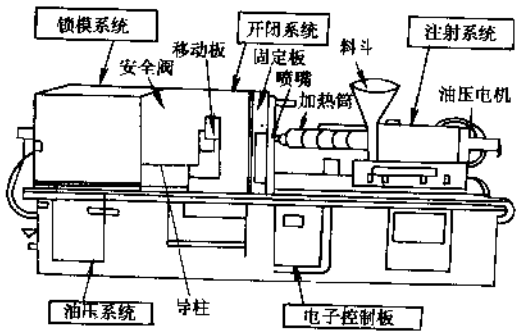


图 2-7-10 注射成形机

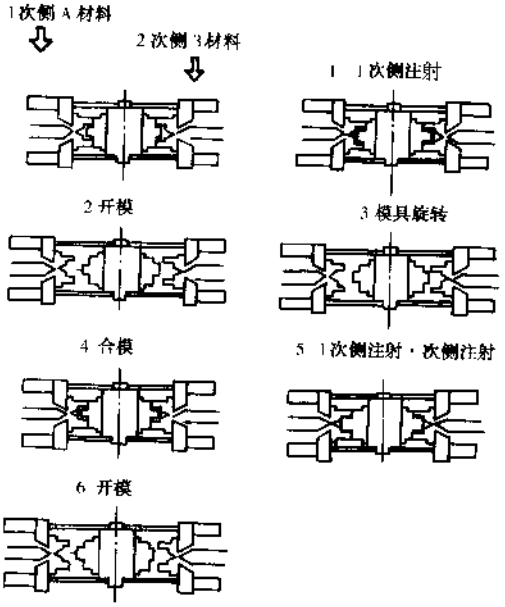


图 2-7-11 多色（多材质）注射成形

汽车论坛 http://www.qclt.com

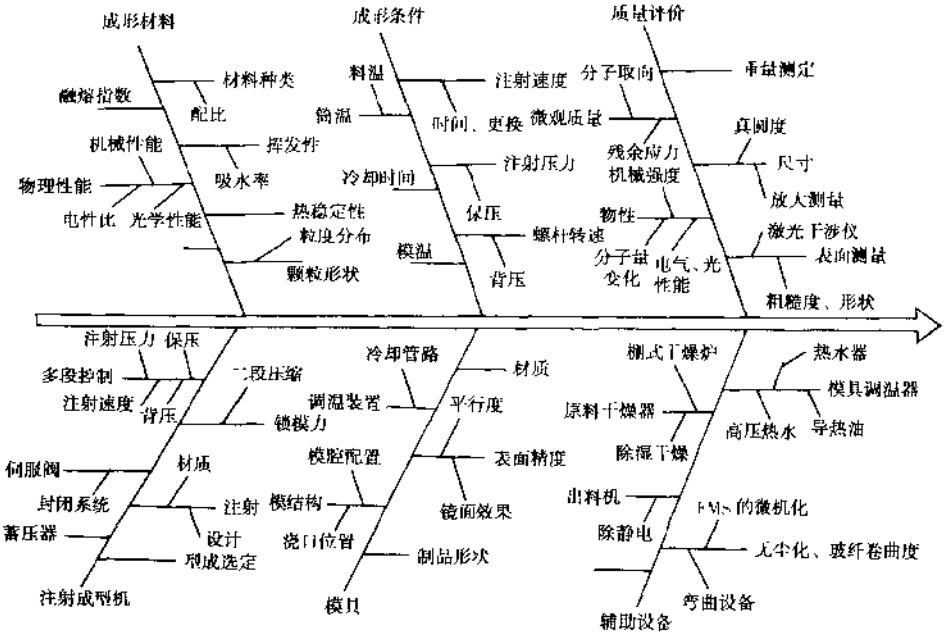


图 2-7-12 注射成形所必要的管理因素

空调机壳等大型零件及各种开关、把手、结构件、装饰件、减摩耐磨件、轮罩、护条等小型零件。

2.7.2.5 压缩空气助力注射成形法

该法与注射成形法不同处是在注射成形同时，向模具内注入定压、定量的压缩空气，帮助塑料流动成形，此外，趁塑料在未凝固之前，使空气充填到制品壁层内，使之中空，进而起到减重增强作用，见图 2-7-13。该方法适合大投影面积薄壁件的制造，在先进国家已投入使用。比外，双色注塑成形技术已在我国汽车产品中实际应用。

2.7.2.6 吹塑成形

将塑料坯料夹持在双开模具内，通过吹入压缩空气而制得所需形状塑料中空制品的制造方法称之谓中空或吹塑成形。随着塑料工业的发展，塑料吹塑方法也随之增多，具体发展过程见表 2-7-5。吹塑成形过程概况见图 2-7-14。

表 2-7-5 吹塑成形的发展

分类内容	名称	要求特点
吹塑时的工艺 制品的结构 吹塑前的预成形品	直接吹塑→拉延吹塑 单层吹塑→多层吹塑 挤出吹塑→注射吹塑	强度、透明性 隔断性、多功能性 制品壁厚均匀性及尺寸精度

普通塑料容器大多采用低压成形法，吹塑用压缩空气压强为 0.5MPa 左右，尽管存在着生产效率低、尺寸精度差、制品外观不好等缺点，但由于模具造价低，如汽车上的清洗剂罐、制动液贮罐等仍采用这种方法制造。但如汽车燃料箱、换挡杆套等要求有特殊功能，则需用不同材质多层吹塑成形。特别是燃料箱，不仅要轻量化，而且要有表面耐磨、不准油料渗漏等特殊要求，是由几层塑料复合而成。

注射吹塑成形虽然生产效率低，但由于是在有底的坯料上高压吹塑，所以制品尺寸精度高。注射吹塑成形情况见图 2-7-15。

汽车论坛 http://www.qclt.com

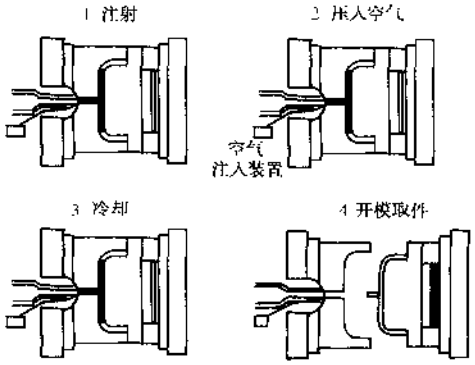


图 2-7-13 压缩空气助力注射成形

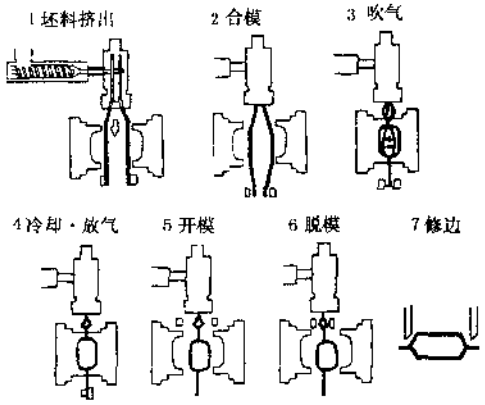


图 2-7-14 吹塑成形概况

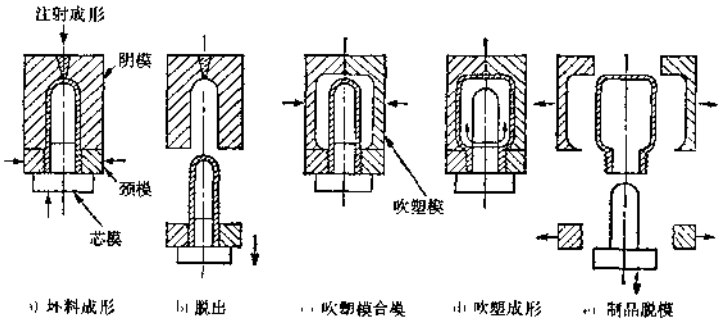


图 2-7-15 注射吹塑成形概况

2.7.2.7 单体反应注射模塑成形，即 RIM (Reaction Injection Molding) 成形

汽车的前后保险杠、扰流板、稳流器裙缘等外装件及仪表板、车门内板、转向盘等内装饰件等都可用这种方法制造。它是将具有反应性的几种材料，通过计量再在 10～18MPa 的高压下经混合注射到模腔内，经反应固化而制出制品，具体概况见图 2-7-16。

为提高 RIM 制品的刚性、尺寸稳定性及热稳定性，可采用玻璃纤维等填料进行增强，称谓 R-RIM。此时的玻纤通常采用 1.6mm 长的短纤维，用前先混到单体中。还有一种用玻璃毡或无纺布事先放入模腔内，再注入树脂单体的高刚性结构材料，称谓 S-RIM，用来制造保险杠加强梁、各种覆盖件及底板等。

目前，RIM 材料所用树脂大多为聚氨酯，最近出现了尿醛树脂、不饱和聚酯树脂及尼龙环氧树脂等。

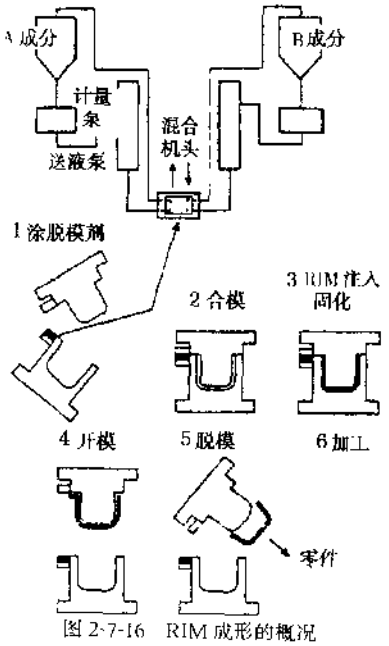


图 2-7-16 RIM 成形的概况

2.7.2.8 搪塑成形

搪塑成形加工多用于软化仪表板、转向盘、工具箱等装饰件以及车门内板等有皮革柔软感的内饰件的制造。图 2-7-17 示出以糊状或粉状材料生产搪塑制品的工艺过程。

搪塑成形加工虽能获得良好手感的表皮制品，但成形条件比较苛刻，而耗能量也较大。

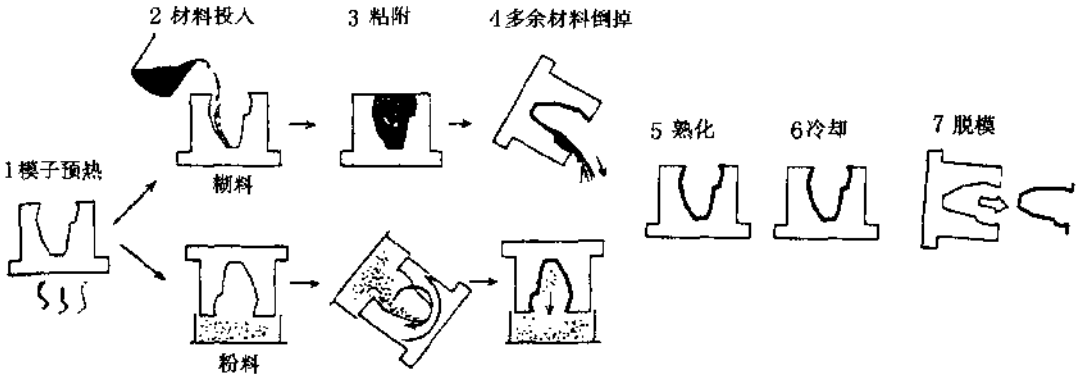


图 2-7-17 搪塑成形工艺过程

2.7.2.9 压制及 SMC 成形

将粉状、团状、片状或絮状热固树脂放入模腔内，再在图 2-7-18所示的压机上加压、加热即可制成制品的加工方法为压制法。可以压制的塑料有酚醛、尿醛、三聚氰胺等。传统的压制方法只适合压制小型零件制品，存在生产效率低、耗能量大等缺点。

SMC 即片状模压材料，它具有强度高、成形周期短、耗能低等优点，适合大型汽车零件的生产，如导流板、车门、门梁柱、顶盖等。SMC 制品的压制过程见图 2-7-19。首先将玻璃纤维含浸了不饱和聚酯糊而制成的预制片材按需要裁剪并称重，层叠放在模腔内合模并按 5.0～15MPa 的压强加压，经 130～160℃模温加热一定时间后，即可开模取件。为了提高制品质量，在压制时附加真空吸气及在型腔内施加预涂层及压制中间喷涂面漆等新型工艺。

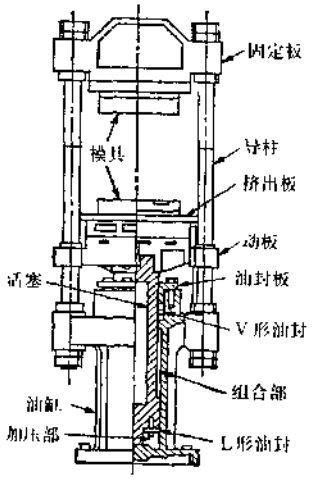


图 2-7-18 上压式压机

2.7.2.10 冲压（锻压）成形

塑料冲压成形是近年开发的新技术，如汽车保险杠骨架、蓄电池托盘等均可用该方法制造。基本成形过程与 SMC 相似，所使用的片材则是夹杂着玻璃毡的热塑性材料。具体加工工艺见图 2-7-20。片材需要按规定温度进行预热后，放入模腔施加 10～20MPa 压强的压力，待材料冷却后定型。

2.7.2.11 发泡成形

发泡成形是将气泡分散于塑料内部的一种成形技术。发泡体与塑料的性能、气泡混入率、气泡中气体

汽车论坛 http://www.qclt.com

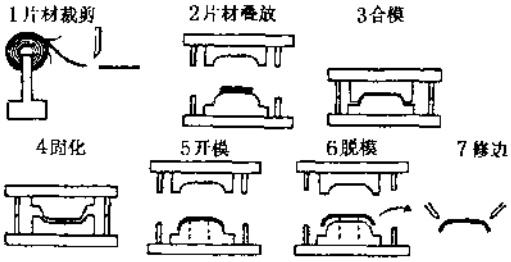


图 2-7-19 SMC的压制过程

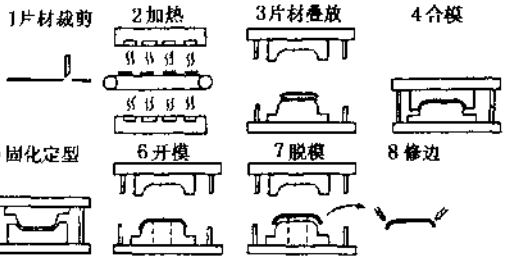


图 2-7-20 冲压（锻压）成形工艺

的性状、气泡分布状态等诸多因素有关，根据发泡体的形状，发泡成方法有①本体成形；②板状成形；③模状成形。按制造方法可分为连续法和间歇法两种。图 2-7-21 示出发泡成形的方法。发泡时气体的分散过程见图 2-7-22。

发泡所用气体大都由发泡剂来产生，个别也有用将气体压缩或含浸到塑料中去，在加热或释压情况下使气体膨胀进而使塑料发泡的方法。几乎所有的塑料都可以发泡加工，但最常用的发泡塑料有 PU、PVC、PS、PE、PP 等。

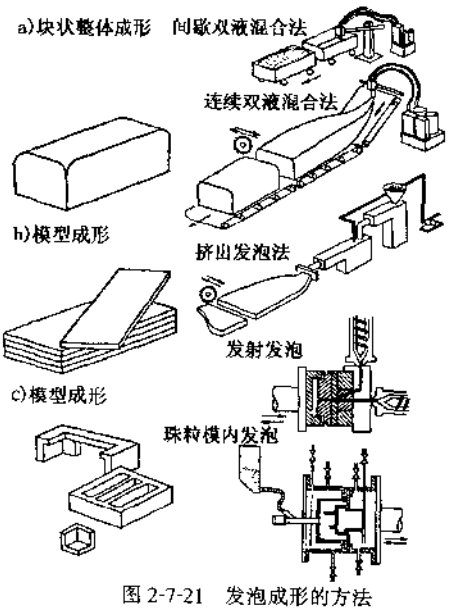


图 2-7-21 发泡成形的方法

2.7.2.12 粉末成形

利用粉状塑料来制造制品都可称之谓粉末成形，具有代表性的如粉末直接加热加压成形、粉料喷涂再加热、直接浸渍与填充以及离心法等。粉末成形法发展很快，是因为这种方法的模具费用很低、制品残留应力小、制品壁厚容易调整、制品增强容易等原因。典型的粉末成形方法见图 2-7-23、图 2-7-24。

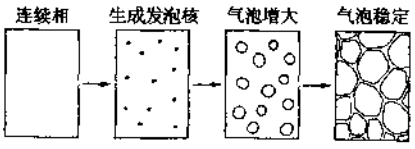


图 2-7-22 发泡时气体分散过程

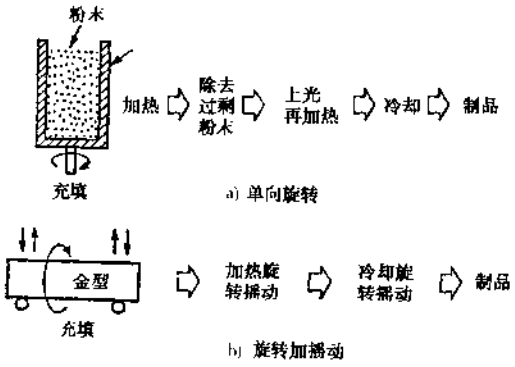


图 2-7-23 典型的粉末成形方法之一

2.7.2.13 低熔点合金模芯注射成形

因为塑料制品成形时无法将型芯做成像铸造砂芯那样，所以很难成形形状复杂制品。

随着塑料工业的发展，一些高熔点树脂相继问世，采用低熔点合金做型芯的注射成形工艺也应运而生。它是采用低熔点锡—铋合金做模芯，注射成形后，将带芯塑料制品放入热油中同时对型芯进行高频感

汽车论坛 http://www.qclt.com

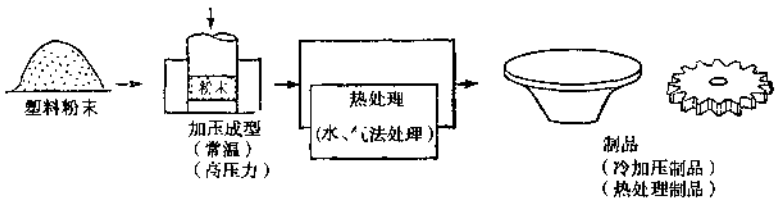


图 2-7-24 典型的粉末成形方法之二

应加热，使型芯熔化流出并回收再利用的一种新型注射加工工艺。如汽车发动机的进气歧管就可以采用这种工艺，提高加工精度并减轻汽车自重。图 2-7-25 示出该工艺的全部过程。

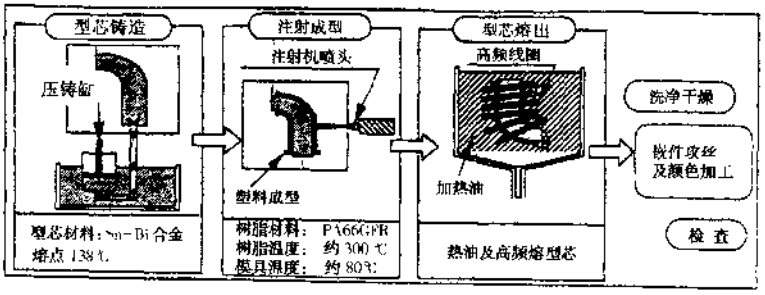


图 2-7-25 低熔点合金型芯注射成形法

2.7.2.14 注射压制成形（低压成形）

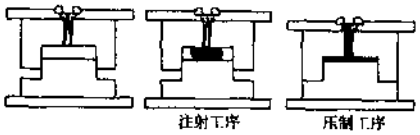


图 2-7-26 注射压制成形（低压成形）

是将注射与压制相结合的一种成形方法，所用注射机与普通机型没有太大差别，只是模具装在压机上，先将塑化好的塑料定量的注射到半开启的模具型腔里，再开动压机进行合模加压，在低压下，塑料均匀的充满型腔，冷却后开模取件，详见图 2-7-26。

这种方法适合薄壁大型零件的制造，如轿车车底护板、行李箱底板等。在此法基础上，还可以引伸一种复合织物、造革类面料的成形方法，详见图 2-7-27。它是将面料放在开启的模具中间靠阳模一边，注射后合模加压，使塑料与面料良好的复合成一体，适合于车门内装饰板类板件的制造，预计今后用量会逐渐扩大。

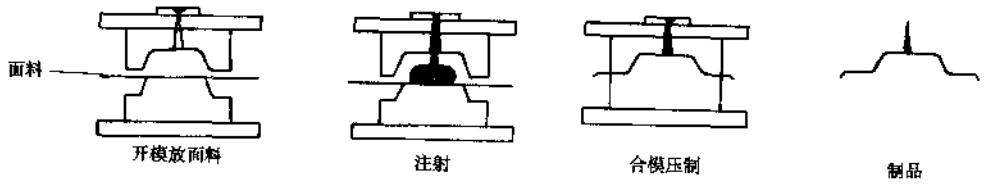


图 2-7-27 可复合面料的低压成形法

2.7.3 模具制造

塑料制品的生产，要有良好的原料、合理的工艺、必要的加工设备和上乘的模具。模具要具备以下条件：①合理的设计尺寸和形状；②良好的可靠性及较长的使用寿命；③科学的进料部位及模温保证装置；④开启方便、制品脱模容易；⑤容易制造，价格低。

模具的制造过程见图 2-7-28。

模具的设计和制造已实现 CAD/CAM 化，模具结构标准化，总装配图、零件图正朝着系列化设计方

汽车论坛 http://www.qclt.com

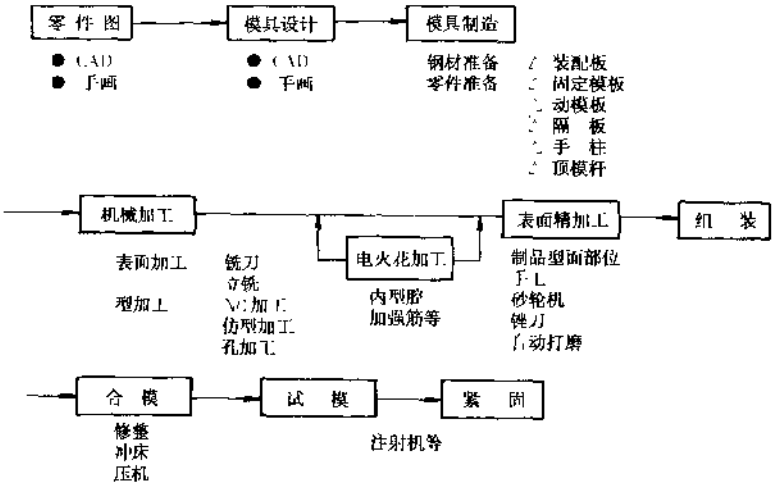


图 2-7-28 模具的制造过程

向发展。零件表面加工、孔穴加工、型腔及型芯的仿型加工也在 NC（数控）化。此外，如何减少机械精加工工序、快拍节、模腔的电火花加工等方面；用 CAE 技术对塑料制品失败原因的分析、提高制品外观质量、缩短模具的制造周期等方面也都取得了进展，具体举例见图 2-7-29。图中示出利用 CAE 技术来确定浇口位置、点数和大小以及加强筋的位置和形状等。

2.7.4 二次加工

一种成形方法所制得的制品，往往还要在一次成形基础上进行，如①除去浇口、浇道部分；②修去飞边毛刺；③孔穴加工或切断切除；④零件粘接组合；⑤退火及调湿处理；⑥涂装或电镀处理等，这些统称为二次加工。二次加工可以通过人工来完成，也可在模具设计时加以考虑，如图 2-7-30 所示的是自动去除浇口浇道的方法之一。

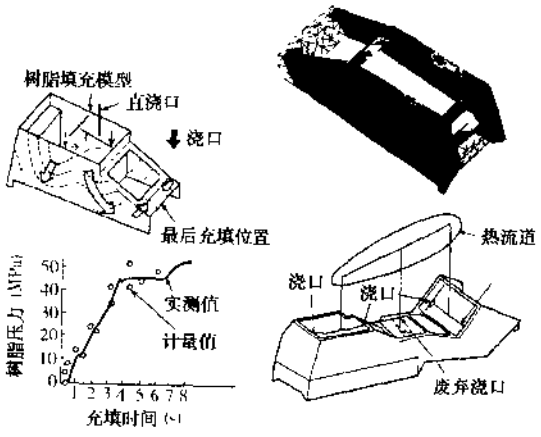


图 2-7-29 CAE 技术应用实例

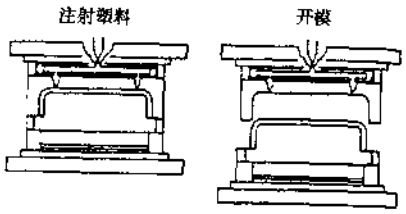


图 2-7-30 自动去除浇注系统方法

上述②、③项二次加工则是在制品从模中取出后，再用刀剪类工具在加热或常温下切剪完成，也可采用 NC 加工机床和夹具的刀具走刀方式、砂轮或高压水轮喷射切断方式及火焰烧切方式等以满足质量与产量的要求。

④、⑤、⑥项是指根据制品材料特性来对成形后处理、涂装涂料成分、涂膜干燥温度及涂装工具等所进行的选择。图 2-7-31 示出塑料制品涂装工艺流程，图 2-7-32 示出塑料制品的电镀工艺流程。

汽车论坛 http://www.qclt.com

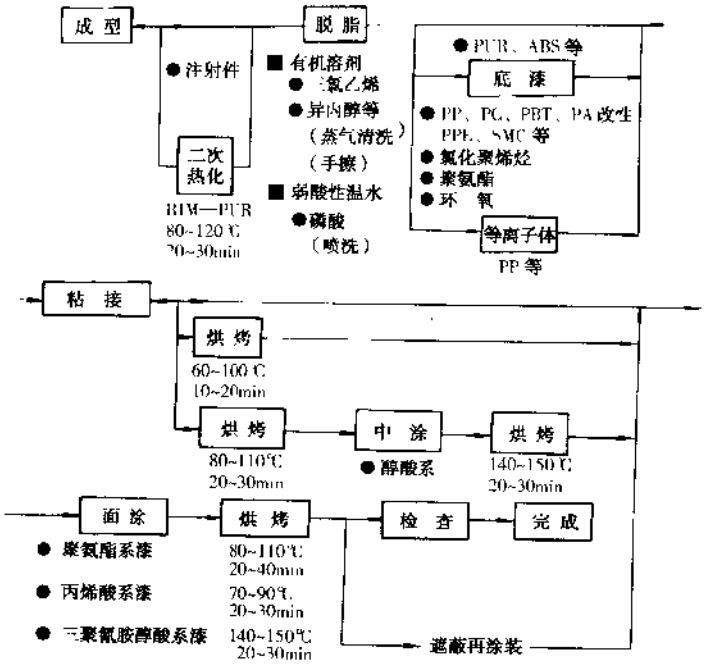


图 2-7-31 塑料制品涂装工艺流程

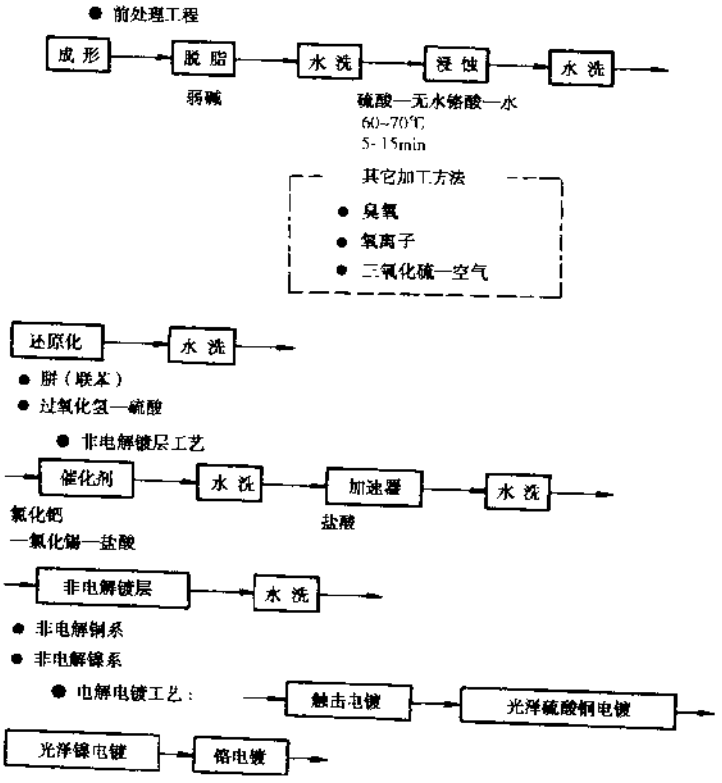


图 2-7-32 塑料制品电镀工艺流程

值得注意的是，不是所有的塑料都可以进行电镀处理，迄今为止，已知可以电镀的塑料有 ABS、POM、PS、AS、PC 及 PVC 等，最常用的是 ABS。

2.7.5 塑料零部件精度和质量保证

因为塑料的导热性、膨胀系数、成形收缩率、制品内部残余应力等不同于金属，所以制品的精度及长期质量保证也有其特殊性。塑料制品容易受零件尺寸、形状、成形条件及使用环境影响。因此要根据成形条件、使用场合、用途来确定精度、材料品种及组装方法。

①成形精度：以注射成形为例，塑料有结晶性和非结晶性之分、受树脂温度、成形压力变化影响，二者的成形收缩率也不同，产生的原因是成形时塑料密度与冷却至室温后时不同所造成的。

另外，注射成形时，树脂经过浇口流入制品内部时树脂流动方向和截面方向的变形作用不同而产生制品精度方向性的不同。

②塑料材料特性精度：塑料的线膨胀系数为$(5\sim15)\times10^{-5}$mm/mm·℃，是金属的 10 倍，所以要特别注意当与其它材料制品组合时长度方向上的尺寸配合。为了克服塑料的线膨胀问题，往往通过添加无机填料等方法加以解决。作为材料本身，还要注意吸水、吸油或其它介质而使制品变形、翘曲及尺寸的变化。

③塑料制品的时效精度：塑料制品成形加工时，由于树脂是在剪切速率和压力下流动的，产品内部产生了应力，消除这种应力需要时间很长，所以塑料制品往往在常温下还要缓慢的变形并引起尺寸变化。若要迅速消除这些应力，可通过加热并缓慢冷却的办法达到目的。

④质量保证：在塑料制品的设计图纸上要明确标注其功能、尺寸精度、外观等以保证其在高低温、潮湿、干燥、光照、溶剂、振动等各种使用环境下的耐久性。而且事先要对结构、材料进行探讨和认可试验。（撰稿人：李树生）

2.8 陶　　瓷

2.8.1 概述

作为无机非金属材料的重要组成部分的陶瓷材料在历史发展的不同阶段及不同国家有不同的含义，如美国将经过高温处理的多晶无机非金属材料统称为陶瓷材料。本节涉及的陶瓷材料实际上在国际上通常称为“先进陶瓷（Advanced Ceramics）”。先进陶瓷材料与传统的陶瓷不同，对原料的纯度和物理形态有更严格要求。一般采用化学合成的方法或采用激光、CVD、等离子、高分子前躯体转化等新技术，通过严格的制备工艺才能获得。每一种先进陶瓷材料都具有特定的精细显微结构和性能。这类材料在现代工程、现代技术的应用中起着关键作用，对许多装置及系统来说，先进陶瓷材料或部件是必不可少的。

先进陶瓷可分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类。功能陶瓷是以其绝缘性、介电性以及电性与其它性能（机、声、光、热等）之间的耦合和转换功能而获得应用的，已发展成为一大类陶瓷产业。如陶瓷电容器、电阻元件、PZT 压电陶瓷、ZrO_2 氧敏传感器、微波介质材料及火花塞上使用的氧化铝绝缘陶瓷等。结构陶瓷具有高强度、耐磨损、耐腐蚀等优良特性，在机械、化工、汽车、金属加工、冶金矿业等领域的应用已有很快发展。目前较为突出的是氮化硅、碳化硅、氧化铝、氧化锆等材料。

2.8.2 主要陶瓷的种类及性质

陶瓷的种类繁多，在工业中应用的陶瓷材料多属于先进陶瓷范畴，其主要种类、性质及主要用途见表 2-8-1。

陶瓷材料具有悠久的发展历史，但先进陶瓷在近二三十年中得到了迅速的发展。先进陶瓷中新材料体系、新制备工艺不断出现，材料性能大幅度提高，尤其是陶瓷材料强韧性机制的发展及陶瓷基复合材料的出现，使得陶瓷材料在工业各领域中得到广泛应用。70 年代世界能源危机引发的世界陶瓷发动机热虽然没有达到预期的目标，但对先进陶瓷材料的发展及陶瓷部件在汽车工业的应用起到了重要的推动作用。世

汽车论坛 http://www.qclt.com

界许多大汽车公司非常重视陶瓷部件或器件在汽车上的应用。

根据材质先进陶瓷主要可分为氧化物及非氧化物两大类。氧化物以氧化铝及氧化锆为代表，具有可在高温氧化气氛中长期使用、制备工艺较为简单及价格较为便宜的特点，目前在工业中应用的陶瓷材料仍以氧化物为主。非氧化物陶瓷根据材料体系的不同可具有各种优异的性能，但制备工艺复杂，价格相对较高及除氮化硅和碳化硅外不能在高温氧化气氛中长期使用，在工业中的使用尚不如氧化物广泛。

现以氧化铝及氮化硅为氧化物及非氧化物的代表分别介绍它们的主要性质：

(1) 氧化铝陶瓷：氧化铝是一种强离子键化合物。氧化铝陶瓷具有硬度及机械强度高，耐热性、化学稳定性及绝缘性好等特点，应用最为广泛。典型的用途为汽车工业用的火花塞、电子工业用的陶瓷基片和IC集成电路接头、机械工业用的切削工具和各种机械零件及化学工业用的各种耐磨耐腐蚀部件。

氧化铝陶瓷根据用途不同其氧化铝含量可在75%～99%范围内变化，一般来说，其硬度、强度、耐温、化学稳定性及绝缘性随氧化铝含量的提高而提高，其烧结温度也随之而提高。

氧化铝陶瓷根据氧化铝含量不同，其烧结温度在1 500～1 800℃范围内变化，弯曲强度为300～700MPa，根据使用条件不同最高使用温度可在800～1 200℃范围内变化，绝缘电阻为$10^8\Omega\cdot cm$～$10^4\Omega\cdot cm$。氧化铝陶瓷的抗热冲击性能较差。

(2) 氮化硅陶瓷：氮化硅是一种人工合成的典型的共价键化合物，氮化硅陶瓷具有优异的综合性能：①常温强度高（700～1 200MPa），且高温下强度衰减不大（1 300℃下仍可达到常温强度的80%～90%），可在氧化气氛、1 300℃以下的高温环境中长期使用；②断裂韧性较高（7～10MPam$^{1/2}$）；③硬度高（可达94～95HRA），具有自润滑性，耐摩擦、磨损性能好；④导热系数高、热膨胀系数低，抗热冲击性好；⑤耐化学腐蚀及耐熔融金属侵蚀性好；⑥密度较小。

表2-8-1 工业中应用的陶瓷材料性能及主要用途

分类		特性	材料	主要用途
氧化物材料	绝缘性	耐磨性	Al_2O_3（氧化铝）	各种机械零件、切削工具、喷嘴、轴承、机械密封、研磨介质
			ZrO_2（氧化锆）	
		耐热性	TA（钛酸铝）	排气歧管、增压器蜗壳
			MAS（堇青石）	汽车排气净化器
			LAS（锂辉石）	排气换热器、锅炉用耐热板
			莫来石	汽车发动机缸盖底板、活塞顶
		绝缘性	Al_2O_3（氧化铝）	多层垫板、火花塞绝缘体、IC基板
			ZrO_2（氧化锆）	光纤连接器
			MgO（氧化镁）	温度传感器
		耐腐蚀性	Al_2O_3（氧化铝）	耐酸泵部件
		绝热性 润滑性 机械加工性	$KMg_3AlSi_3O_{10}F_2$ （合成云母）	润滑部件、绝缘体夹具、绝热体、微波管用衬垫
	固体电解质	离子传导性	β-Al_2O_3（氧化铝）	Na传感器、钠硫电池
			ZrO_2（氧化锆）	氧传感器、不完全燃烧传感器、温度传感器（热变管式）
	半导体	电子传导性	TiO_2（氧化钛）	
			金属氧化物	温度传感器、液面传感器
	压电体	压电性	PZT（锆钛酸铅）	均化器、水平传感器、密封传感器、电动传感器、过滤器、蜂鸣器、雾化用振动元件
			PT（钛酸铅）	流量表、超声波诊断装置
			水晶（单晶）	压力传感器、振动元件
			压电橡胶等复合材料	血压表

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

分类		特性	材料	主要用途
非氧化物材料	硫化物	发光性	ZnS（硫化锌）	液晶表、显示器、EL开关
	氮化物 碳化物	导电性	SiC（碳化硅）	气体点火器，发热体
		绝缘性 可加工性	BN（氮化硼）	热绝缘元件
		耐热性	Si_3N_4（氮化硅） SiC（碳化硅）	增压器转子、气缸套、活塞顶、进排气阀、蜂窝型热交换器
		耐腐蚀性	Si_3N_4（氮化硅） SiC（碳化硅）	机械密封，摇臂镶块、挺杆、冲模、轴承
		耐磨性	TiN（氮化钛） TiC（碳化钛）	切削工具

由于氮化硅的强共价键特性及很低的自扩散系数，它的烧结必须在添加金属氧化物形成液相的条件下才能实现，因而一般烧结温度较高（1 700～1 850℃）。

由于氮化硅陶瓷的优异性能，使其具有在多种场合获得实际应用的潜力，近年来用氮化硅及氮化硅基陶瓷（如Sialon）成功地制备了高温、高应力状态下应用的发动机陶瓷涡轮增压器转子及陶瓷进、排气阀。

2.8.3 陶瓷制备工艺

陶瓷制备工艺可分为原料制备及混合、成形、烧结及加工等价的。图2-8-1给出先进陶瓷的典型工艺流程。

2.8.3.1 原料制备及混合

根据陶瓷制品的材质、形状、性能要求，确定所用的原料及其后的制备工艺。先进陶瓷对原料有很高的要求，如高纯、超细、具有所要求的结晶形态及粒径分布等，因而先进陶瓷用原料多为人工合成或精制而成多采用粒径为亚微米级的粉体为原料，以获得具有高性能的高密度、细晶粒的材料。粉体的制备工艺方法可以分为机械粉碎及化学法，对于亚微米粉体越来越多的使用化学法制备。化学法通过不同条件下的化学反应控制粉料生成的条件以制得化学组成准确均匀、纯高度、不经粉碎或略经粉碎其粒径极易达到亚微米级或纳米级、形状为等轴或球形、粒径分布范围窄的粉体。化学制备超细粉体的方法又可分为固相法、液相法、气相法及有机前驱体热分解法几种。对于多种粉体形成的材料体系，几种粉体混合是一个必不可少的工艺阶段。随着粉体粒径的减小，均匀的混合越来越困难。根据所采用的成形方法不同，制备混合粉体的方法、所用工艺装备及介质也各不相同。加压成形所用粉体，一般要进行造粒，使其具有良好的流动性。为使粉体能均匀地混合及在成形阶段得到高的生坯密度，往往加入几种数量很小的有机添加剂，对粉体的表面改性。

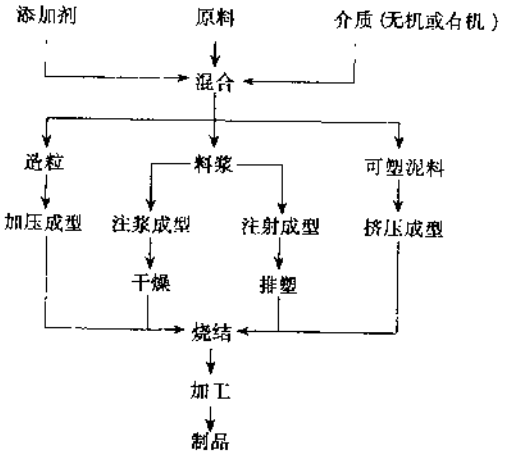


图2-8-1 陶瓷制备工艺流程图

2.8.3.2 成形工艺

成形是将粉体制成具有要求形状及密度的坯体以进行烧结的工艺阶段。由于先进陶瓷材料性能的要求，所使用的原料几乎都是不具有塑性的脆性料，而且对制品的形状及尺寸精度要求越来越高，发展了多

汽车论坛 http://www.qclt.com

种成形工艺方法。表 2-8-2 给出了先进陶瓷的主要成形方法，现分别叙述如下。

表 2-8-2 陶瓷的成形方法

成型方法	原料状态	制品形状	应用实例
压力成形	造粒粉体	比较复杂的形状精度良好	IC 基片、电容器、机械密封环
湿袋等静压成形	造粒粉体	比较简单的形状精度差，需加工	研磨介质、轴承球、进排气阀
干袋等静压成形	造粒粉体	比较复杂的形状精度良好	火花塞、进排气阀
注浆成形	泥浆	复杂形状	坩埚、涡轮转子
压滤成形	泥浆	复杂形状	坩埚、涡轮转子
凝胶浇注成形	胶体浆料	复杂形状	坩埚、涡轮转了
直接凝固成形	胶体浆料	复杂形状	坩埚、涡轮转子
流延成形	有机或无机料浆	薄膜、片状	陶瓷基片、压电元件、电容器
挤出成形	可塑泥料	棒状、管状异型断面形状	保护管、陶瓷蜂窝载体
热压铸及注射成形	有机料浆	复杂形状	火花塞、涡轮转子

a. 压力成形：压力成形是在机械或介质压力作用下将造粒后的粉体压制成具有一定形状、密度的坯体。将粉料置于模具中，在一面或双面施加机械压力的方法称为干压法，这种方法的优点是效率高及可成形形状较为复杂的制品，缺点是成形密度较低且不均匀。

b. 等静压成形法：将粉体置于橡皮膜制成的模具中，抽真空后在液体介质中加压实现致密化的方法称为冷等静压法。这种方法由于液体介质从各个方向对粉体施加压力，获得的坯体密度均匀，可在较高的压力下得到高密度的生坯，但成形体的形状及尺寸不够精确，往往需要对成形后的坯体进行加工。在上述冷等静压法（也称湿袋等静压法）的基础上，发展了干袋等静压法，这种方法采用硬度较大、厚度较厚、具有精确形状的橡胶模具，在液体压力下成形，可获得形状、尺寸精确的坯体。

c. 注浆成形法是一种最古老的方法，经过发展用这种方法可获得均匀、高密度的坯体及可以用来成形各种复杂形状的制品，至今仍有很强的生命力。制备性能稳定的料浆、成形模具材料及成形工艺参数控制是极为重要的。在注浆成形法基础上发展起来的压滤成形法，也具有广阔的应用前景。近年来在胶体化学的基础上发展起来的凝胶浇注法（Gel－casting）及直接凝固成形法在成形及干燥过程中坯体体积几乎不发生变化。

d. 流延成形法：为制备电子行业大量应用的陶瓷基片及其他电子元件，现多采用流延法。这种成形方法是将粉料与有机或无机介质混合制成具有较好流动性的料浆，流延成形成厚度均匀的片状坯体。

e. 挤出成形法：将具有一定可塑性的泥料在机械压力下挤压通过一定形状的挤出口，制成管、棒或薄板等长尺寸的坯体，这种方法泥料中必须含有一定量的可塑性物质（有机物或无机物）。

f. 热压铸法及注射成形法：将有机物与粉体混合在热态下制成料浆，在压力作用下注入模具中成形的方法，其优点是可制备形状复杂的制品，尺寸精度高及生产效率高，但在烧结前必须将约 20% 的有机物排出，这是一个费时又较难以控制的过程，所需的注射成形设备价格昂贵。热压铸法与注射成形法所使用工作压力及有机介质不同，热压铸法使用蜡为介质，工作压力一般为 1MPa 左右；注射成形采用热塑性塑料为介质，注射压力为 60～100MPa，注射温度为 160～200℃。

2.8.3.3 烧结工艺

由粉体成形的陶瓷坯体在一定温度条件上通过物质传递实现致密化形成具有一定强度的陶瓷的过程称

为烧结。随材料体系的不同，烧结过程可分为固相烧结与液相烧结。烧结过程中物质迁移的驱动力，除了人为施加的机械或气体压力外，主要表现为材料内部表面能的降低。这种降低的表面能可以通过流动、扩散和液相或气相传质等方式推动动物质迁移，从而导致材料晶粒长大及致密化。在气相传质中，由于颗粒表面曲率半径不同，相应的蒸汽压不同，固体凹凸表面压强差的存在将导致物质从凸表面向凹表面传递。在扩散传质中，颗粒表面的化学势之差，提供了烧结的驱动力，使质点（或空穴）借助化学势梯度推动物质的扩散传递。不同曲率半径的颗粒表面将产生空穴浓度梯度，颗粒半径越小，产生的孔穴浓度梯度越大。因此为改善陶瓷材料的烧结性能，越来越多地采用超细粉体。

按工艺分类，烧结工艺可分为无压烧结、反应烧结、重烧结、热压烧结、气氛压力烧结、高温等静压烧结等方法。一般难以达到高的材料密度（理论密度的70%～95%）。为了进一步提高材料的密度，往往采用高温下延长烧结时间的办法，这将导致材料晶粒的长大，反过来使得材料的机械力学性能下降。反应烧结在烧结过程中陶瓷坯体的尺寸几乎不发生变化，有利于制备复杂形状的制品，但由于没有伴随的收缩过程，制品的密度不高（气孔率约为20%左右）。为进一步提高材料的密度及其机械力学性能，发展了施加机械压力和气氛压力烧结法（GPS）。由于外加的机械或气氛压力，陶瓷坯体处于更好的致密化条件，可以获得高密度、细晶粒的材料（可达到理论密度的99%）。热压烧结需要使用石墨作为模具以承受及传递机械压力，由于石墨材料的强度的限制，这种方法所采用的机械压力一般以30～40MPa为限，且所制备的陶瓷制品的形状受到很大限制。气氛压力烧结是由气体压力抑制反应产物的热分解趋势而获得高密度的，在烧结后期气体压力也可提供一定的致密化动力。热等静压烧结（HIP）是使材料在加热过程中经受各向均衡的气体压力，在高热高压同时作用下使材料致密体的工艺。采用高温难熔金属作为包套材料以封闭多孔的陶瓷坯体，以达到热等静压的目的。但由于陶瓷材料的烧结温度一般都很高，可被选用的包套材料很少且昂贵，限制了这种方法的使用。为克服这一缺点，发展了无包套的热等静压烧结技术，即将陶瓷坯体进行预烧结使其达到基本无开口气孔的程度，再进行热等静压烧结。对于陶瓷材料的热等静压烧结，一般最高温度为2 000℃左右，最高气氛压力为200MPa，所烧结材料的密度及性能是所有烧结方法中最优的。近年来又发展了多种烧结新工艺，如微波烧结法、自蔓燃合成及烧结法、爆炸烧结法等。

陶瓷材料的烧结受多种因素的影响，在材料体系及烧结方法确定之后，烧结制度（温度、气氛、压力制度）必须进行优化，以适应所烧结的坯体的尺寸、形状及满足其性能要求。（撰稿人：樊启晟）

2.9 电　　镀

2.9.1 概　述

电镀是用电化学过程获得金属保护层的有效方法。

汽车零件电镀目的是防止腐蚀、提高装饰性、提高表面硬度和耐磨性、改变表面的电磁性能、改变表面的光学性能、防止局部渗碳、渗氮、修复零件尺寸等。

电镀的质量要求是根据零件的基体材料和使用环境而定的，主要项目有外观、镀层厚度、耐蚀性、附着强度、硬度、孔隙率等。

在工业化的进程中，许多新材料如工程塑料、工业陶瓷等被广泛应用，促使新材料的特殊电镀法的发展。为提高汽车发动机滑动部件的耐磨性，又开发了在电镀液中添加固体微粒的复合电镀法。

2.9.2 电镀设备与工艺

2.9.2.1 电镀设备

电镀设备一般由电镀槽、搬运设备、电源、电镀夹具、辅助及设备环保设备构成。

电镀设备按生产方式分为固定槽手工生产线和微处理机控制的自动生产线。表2-9-1列出不同类型的电镀设备的特点。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-9-1 电镀设备的类型及特点

生产方式	设备类型	特点
手工	固定槽	手工或单轨电葫芦操作，适合于小批量、形状复杂的零件的生产，如散热器膨胀箱等
自动	直线型	单轨或双轨行车操作，微处理机控制，变频调速，工艺可灵活更改，适合于大批量滚镀和挂镀零件的生产，如汽车标准件、汽车底盘零件等
	环型	步进式、液压传动、微处理机控制、产量比直线型大、工艺难以更改；适合于大批量滚镀和挂镀零件的生产，如汽车标准件、汽车底盘零件等

在汽车工业生产中，大多采用直线型生产线和环型生产线。图 2-9-1 和图 2-9-2 为典型的电镀生产线的平面布置。

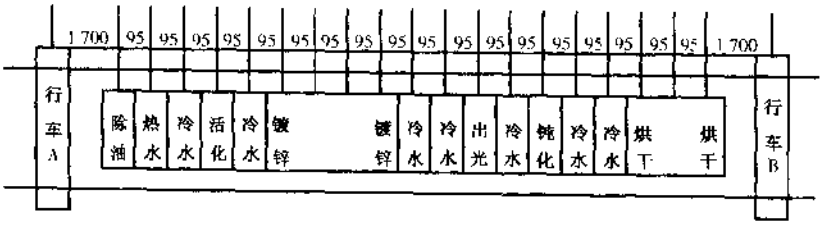


图 2-9-1 直线型镀锌生产线平面布置

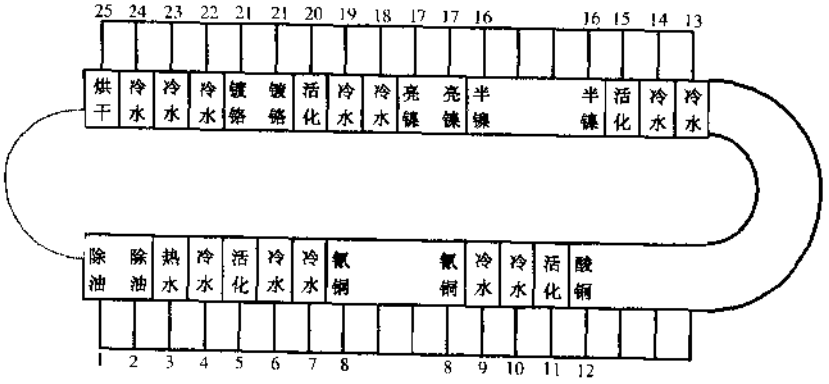


图 2-9-2 环型生产线平面布置

2.9.2.2 电镀的一般工序

电镀的一般工序分为镀前处理→电镀→镀后处理。根据产品的要求不同采用不同的电镀工序：

(1) 铁基材料装饰性镀铬工序：表面磨光→电解脱脂→水洗→活化→预镀→水洗→光亮镀铜→水洗→活化→半光亮镀镍→光亮镀镍→镍封闭→水洗→活化→镀铬→水洗→干燥；

(2) 铁基材料镀锌工序：化学除油→水洗→酸洗→电解脱脂→水洗→活化→镀锌→水洗→出光→铬酸盐处理→水洗→干燥；

(3) 铁基材料工业用镀铬工序：化学除油→水洗→酸洗除锈→水洗→电解脱脂→水洗→活化→工业用镀铬→水洗→干燥→去氢热处理→抛光；

(4) ABS 塑料的电镀工序：化学脱脂→水洗→干燥→表面粗化→水洗→中和→水洗→敏化→水洗→活化→水洗→化学镀→水洗→浸酸→光亮镀铜→水洗→浸酸→半光亮镀镍→光亮镀镍→水洗→浸酸→镀铬→

汽车论坛 http://www.qclt.com

水洗→干燥。

2.9.2.3 电镀工艺

1）镀前（后）处理

镀前（后）处理工艺包括表面整理、除油、浸蚀。表面整理一般分为的磨光、抛光、滚光、刷光、喷砂处理等。

磨光是为了提高零件的表面平整度，除去零件的表面宏观缺陷、腐蚀痕、划痕、毛刺、焊缝、砂眼、气泡等，用以提高电镀质量。磨光适用于一切金属材料的镀前处理，磨光的效果取决于磨料、磨光轮的刚性和轮子的旋转速度。磨光前的零件、尤其是机械加工的零件应符合工艺规程要求，必要时可按标准样板检查，磨光前的酸浸蚀不允许有残留氧化皮、过腐蚀、变形、螺纹损伤等。

抛光一般用于镀后处理，也可用于表面粗糙度要求较高的零件的镀前处理，使制品获得装饰性外观，提高制品的耐蚀性。抛光一般在抛光机上进行。

滚光适用于大批量小零件的处理，可全部或部分替代镀前磨光、抛光、刷光工序。滚光效果与滚筒的形状、尺寸、转速、滚筒中磨料及溶液性质、零件种类及形状有关。

刷光是用金属丝轮或金属丝刷在刷光机上或用手工进行刷光的一种表面整理过程，它可全部或部分替代滚光处理。

喷砂是为除去零件表面的毛刺、氧化皮、铸件表面上的熔渣等杂质、焊渣等。喷砂的效果取决于砂粒的粒度和压缩空气的压力的大小。

除油工艺包括机械除油、溶剂除油、化学除油、电解除油。是为了除去零件表面的油污，以保证镀层与基体的附着强度。

机械除油一般采用滚筒除油和擦拭除油。滚筒除油适用于小件大批量除油，擦拭除油适用于大型复杂件的除油。

溶剂除油是将零件浸于有机溶剂（或蒸汽）中，使油污溶于溶剂中。常用的有机溶剂有煤油、汽油、苯类、酮类及某些氯化烷烃、烯烃等。溶剂除油适用于所有金属零件的除油，特别适用于粉末冶金零件如轴瓦等。

化学除油是利用碱液的皂化作用和表面活性剂的乳化作用除去零件表面油污的过程，适用于所有零件。化学除油的效果取决于除油液的碱度和表面活性剂的乳化性能。

电化学除油是将零件挂在碱性电解液的阴极或阳极上，利用电化学极化作用及电极表面析出气体对油膜的撕裂作用和气泡的机械搅拌作用除去零件表面油污的过程。电化学除油的效果超过化学除油，是电镀前的最后除油工序，电化学除油适用于所有零件的除油。

浸蚀工艺包括弱浸蚀和强浸蚀，其目的是为了提高零件的表面活性。强浸蚀是为了除去零件表面的氧化皮，一般采用高浓度的强酸溶液处理，处理时间较长。弱浸蚀是为了活化零件表面，保证镀层与基体的结合强度，一般采用低浓度的酸溶液，处理时间较短。

2）镀锌工艺

镀锌是最典型的防护性电镀工艺。由于金属锌的化学活性，对铁基材料具有牺牲性阳极保护作用，故大量应用在汽车标准件及防护性电镀中，如螺纹紧固件、底盘耐蚀件等。

镀锌溶液有无氰和有氰两大类。根据采用络合剂的不同，无氰镀锌溶液有下列类型：碱性锌酸盐型、酸性氯化钾型、硫酸盐型、氨三乙酸—氯化铵型、氯化铵型、柠檬酸盐型、焦磷酸盐型等。在汽车生产中，使用广泛的是碱性锌酸盐型和酸性氯化钾型。由于氰化镀锌溶液的性能优良，因此，特殊领域仍然使用氰化镀锌。常见的镀锌工艺规范见表2-9-2。

碱性锌酸盐型镀液特点是：溶液成分简单，工艺范围较宽；均镀能力和深镀能力尚好；镀层细致光亮，钝化膜不易变色；溶液不腐蚀设备，没毒性，适合自动生产。缺点是槽压较高，耗电量大；镀层较厚时有脆性；有刺激性气体，须通风。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-9-2 常见的镀锌工艺规范

工艺规范		镀液类型			工艺规范		镀液类型		
名称	单位	锌酸盐型	氯化钾型	氰化型	名称	单位	锌酸盐型	氯化钾型	氰化型
氧化锌	g/L	12~20		35~45	DE 添加剂	g/L	4~6		
氢氧化钠	g/L	100~160		80~85	香草醛	g/L	0.4~0.6		
氰化钠	g/L			80~90	101 添加剂	g/L		15~20	
氯化锌	g/L		70~90		温度	℃	10~40	10~45	10~35
氯化钾	g/L		250~280		PH			5~6	
硼酸	g/L		15~20		阴极电流密度	A/dm²	2~4	1~4	1~3

酸性氯化钾型镀液特点是：光亮度好于碱性锌酸盐镀液；深镀能力和均镀能力略逊于碱性锌酸盐镀液；无毒性、沉积速度快、耗电量小，适合自动生产；特别适合于铸件的电镀。其缺点是钝化膜容易变色；镀层较厚时有脆性；对设备略有腐蚀。

氰化型镀液成分特点是：成分简单，镀液深镀能力和分散能力好；镀层耐蚀性好，钝化膜不变色；镀层脆性小，可以获得较厚的镀层；最近又发展了添加剂，使其光亮度可以和氯化钾型镀液相当。其缺点是镀液有剧毒，必须有良好的通风，废水必须经过严格处理。

为提高镀锌层的耐蚀性，钢铁零件电镀锌后，一般都要进行铬酸盐处理，铬酸盐转化膜分为光亮、漂白、彩色、深色（黑色、橄榄色）铬酸盐转化膜，根据产品的要求选择不同的工艺。由于镀锌过程中，氢原子渗透到金属的晶格中，使材料的强度降低，影响使用寿命。因此，高强度零件和承受疲劳应力的零件电镀锌后，要进行消除氢脆的热处理。

3）镀铜工艺

镀铜层柔软、延展性好，一般作为装饰性电镀中间层。预镀层、印刷电路镀层、电铸、防渗碳镀层。镀铜工艺的种类较多，在汽车工艺工业生产中，应用最为广泛的镀铜工艺有：硫酸盐型、氰化型、焦磷酸盐型。

硫酸盐型镀液由硫酸铜、硫酸和少量有机添加剂配制而成。其特点是：镀液成分简单，溶液稳定，工作时无刺激性气体逸出，可不设通风装置；电流效率高，沉积速度快；加入添加剂后可获得全光亮、高整平镀层。其缺点是钢铁件需要预镀处理。硫酸盐镀铜用于汽车灯圈、车头锁等零件的电镀。

焦磷酸盐镀液由焦磷酸铜、焦磷酸钾和一些辅助络合剂及光亮剂配制而成。其特点是镀液成分简单，溶液稳定，电流效率高；均镀能力和深镀能力好；镀层结晶细致，可获得厚镀层。其缺点是钢铁件需要预镀，镀液成本较高。焦磷酸盐型镀铜几于防渗碳镀层。

氰化型镀液由氰化亚铜、氰化钠和氢氧化钠配制而成。其特点是：镀层结晶细致，镀液均镀能力较好；钢铁件可以直接镀铜，特别适合锌合金压铸件镀铜。在加入适当的光亮剂后，可获得全光亮镀层。其缺点是镀液有剧毒，电流效率低，沉积速度慢，需要污水处理设备。氰化型镀铜用于预镀和防渗碳镀层。常见镀铜工艺规范见表 2-9-3。

表 2-9-3 常见镀铜工艺的工艺规范

工艺规范		镀液类型			工艺规范		镀液类型		
名称	单位	硫酸盐型	焦磷酸盐型	氰化型	名称	单位	硫酸盐型	焦磷酸盐型	氰化型
硫酸铜	g/L	170~250			氢氧化钠	g/L			2~10
硫酸	g/L	40~70			混合光亮剂	g/L	0.5~1		
焦磷酸铜	g/L		60~70		温度	℃	20~50	30~50	20~50
焦磷酸钾	g/L		280~320		PH			8.2~8.8	
辅助络合剂	g/L		20~25		阴极电流密度	A/dm²	1~8	1.0~1.5	0.5~2
氰化亚铜	g/L			8~35	阴极移动		需要（或空气搅拌）	需要	需要
氰化钠	g/L			12~54					

镀铜后若不镀覆其它镀层或只是在铜镀层表面进行有机覆盖层涂覆的零件，为防止铜电镀层变色，可进行钝化处理。

4）镀镍工艺

a. 镍镀层的种类：镍镀层的种类见表 2-9-4。

表 2-9-4 镍镀层的种类及特点

镍镀层的种类	特 点
普通镀镍（暗镍）	预镀
半光亮镍	装饰性电镀中间层，一般不含硫
光亮镍	装饰性电镀中间层，含硫
镍封闭	镀层含非金属颗粒，可微孔镀铬，用于多层镀镍
高硫镍	装饰性电镀中间层，用于多层镀镍
高应力镍	可产生微裂纹铬，用于多层镀镍
镀缎面镍	装饰性电镀中间层
镀黑镍	防止反光、装饰
电铸镍	镀层厚（≥100μm），应力低

b. 常见的镀镍工艺及工艺规范： 在汽车工业生产中，应用最为广泛的镀镍工艺类型有硫酸盐型、氨基磺酸盐型和氯化物型。其配方及工艺规范见表 2-9-5。

表 2-9-5 常见镀镍工艺规范

工艺规范		镀液类型			工艺规范		镀液类型		
名 称	单 位	硫酸盐型	氨基磺酸盐型	氯化物型	名 称	单 位	硫酸盐型	氨基磺酸盐型	氯化物型
硫酸镍	g/L	280～300			温度	℃	55～60	55～60	35～60
氯化镍	g/L	30～40	12～18	500～600	PH		3.5～4.5	3.5～4.5	1～5
氨基磺酸镍	g/L		400～600		电流密度	A/dm²	2～4	1～10	3～5
硼 酸	g/L	35～45	35～45	35～40	搅拌方式		阴极移动或空气搅拌	阴极移动	阴极移动
添加剂	g/L	适量							

硫酸盐型镀液采用不同的添加剂可获得暗镍、半光亮镍、光亮镍、高硫镍等镀层。其特点是溶液成分简单、工艺范围宽；镀层结晶细致，适合多层镀镍。其缺点是镀层应力较大。硫酸盐型镀镍用于汽车装饰性镀层，如汽车灯圈、车头锁的电镀。

氨基磺酸盐型镀液由氨基磺酸镍、氯化镍、硼酸、润湿剂配制而成。其特点是：镀液成分简单，容易控制；镀层应力小，可获得厚镀层，特别适合电铸。其缺点是氨基磺酸镍有水解趋向，需严格控制镀液温度。氨基磺酸盐型镀镍用于汽车仪表板搪塑模具的电镀。

氯化物型镀液由氯化镍和硼酸配制而成。其特点是沉积速度快，镀层应力大。一般用于闪镀镍，也可获得高应力镍。

上述镀镍溶液以硫酸盐型溶液应用最为普遍。在装饰性电镀中，为提高镀层的耐蚀性，一般采用多层镀镍技术，如两层（半光亮和光亮）或三层（半光亮、高硫镍、光亮、或半光亮、光亮、镍封闭或高应力）镀镍。由于每层镍含硫量不同，使得每层镍之间的电位差不同，提高了镀层的电化学保护作用；同时，由于产生微孔或微裂纹铬，使腐蚀过程均匀发展，提高了镀层的耐蚀性。

5）镀铬工艺

a. 铬镀层的种类：铬镀层可分为防护-装饰性铬镀层和工程铬镀层，典型的铬镀层及其特点见表 2-9-6。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-9-6 典型的铬镀层及其特点

铬镀层种类		镀层特点
防护—装饰性镀铬	普通镀铬	镀层薄，一般0.5μm左右
	微孔镀铬	采用镍封闭或阴极电解处理的方法可获得微孔镀铬层，镀层厚度与普通镀铬相同，采用镍封闭法可获得1～3万孔/cm²的微孔铬层，采用阴极电解处理法可获得100～200万孔/cm²的铬层
	微裂纹镀铬	采用高应力镍层或直接利用镀铬层的应力可获得微裂纹镀铬层，但后者需要较厚的镀层，一般大于1μm
	镀黑铬	用于降低反光性能的镀层，如汽车仪器、仪表零件
	镀乳白铬	用于耐磨和装饰性镀层，如气缸套
工程镀铬		铬层较厚，一般大于5μm，用于耐磨性镀层，如活塞环、活塞杆等

b. 镀铬工艺规范：镀铬工艺有普通型、复合型、自动调节型、快速型、四铬酸盐型和稀土型。

普通型镀液一般由铬酐和硫酸组成，按浓度分为高浓度、中浓度、低浓度三种溶液。

复合型镀液一般由铬酐、硫酸和氟硅酸组成，该溶液具有较高的电流效率，但对阳极材料要求较高。

自动调节型镀液一般由铬酐、硫酸锶和氟硅酸钾组成。其特点是能够自动调节溶液中硫酸根离子和氟硅酸根离子的浓度。

快速型镀液是在普通型镀液（中浓度）基础上添加硼酸和氧化镁组成。其特点是允许使用较高的电流密度，从而提高沉积速度。

四铬酸盐型镀液由铬酐、硫酸、氢氧化钠、氟化钠和糖等组成。其特点是电流效率高、均镀能力强、不需加温等，但镀层光亮度差，镀后需抛光才能达到装饰性电镀要求。

稀土型镀液由铬酐、硫酸和稀土盐组成。其特点是电流效率高、沉积速度快、容易控制，不腐蚀阳极。

汽车生产中应用最为广泛的镀液有普通型、高速型和稀土型。其工艺规范见表 2-9-7。

表 2-9-7 镀铬工艺规范

工艺规范		镀液类型			工艺规范		镀液类型		
名称	单位	普通型	高速型	稀土型	名称	单位	普通型	高速型	稀土型
铬酐	g/L	230～270	180～250	200～250	稀土添加剂	g/L			8～10
硫酸	g/L	2.3～2.7	1.8～2.5	1～1.8	温度	℃	48～53	55～60	55～60
三价铬	g/L	2～4	2～4	1～3	阴极电流密度	A/cm²	15～30	40～80	30～80
硼酸	g/L		8～10		阳极		Pb/Pb Sb/Pb	Pb/Pb Sn	Pb/Pb Sn
氧化镁	g/L		4～5						

6）镀锡工艺

在汽车工业生产中，镀锡层主要用于防止渗氮、散热器零件焊接及防锈。常见工艺有碱性镀锡和酸性镀锡。

碱性镀锡溶液由锡酸钠和氢氧化钠及醋酸钠配制而成。其特点是：溶液成分简单、分散能力好、镀层结晶细致、孔隙率低和钎焊性能好；但电流效率低，需要加热和通风设备。

酸性镀锡溶液由硫酸亚锡和硫酸及添加剂配制而成。其特点是：溶液成分简单、电流效率高、不需加热和通风设备、分散能力略逊于碱性镀锡工艺。常见镀锡工艺规范见表 2-9-8。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-9-8 常见碱性镀锡工艺规范

工艺规范		镀液类型		工艺规范		镀液类型	
名称	单位	碱性镀锡	酸性镀锡	名称	单位	碱性镀锡	酸性镀锡
锡酸钠	g/L	40~60		光亮剂	g/L		10~15
硫酸亚锡	g/L		45~55	稳定剂	g/L		10~20
氢氧化钠	g/L	10~16	50~70	温度	℃	70~85	15~30
硫酸	g/L			阴极电流密度	A/dm²	0.4~0.7	0.5~1.5
醋酸钠	g/L	20~30					

7）塑料电镀工艺

汽车生产中大量采用塑料零件，如汽车标牌、水箱面罩等零件。为改善塑料零件的表面性能，对大多数工程塑料如 ABS、PP、POM 等，均可进行电镀。塑料电镀的关键是表面金属化。塑料表面金属化有：干法和湿法，后者应用最广泛。

干法是利用物理方法如蒸发镀、磁控溅射、离子镀等方法使塑料表面金属化。其一般工序为：除油→干燥→电晕处理→喷底漆→金属化。

湿法是将零件置于溶液中进行化学处理使塑料表面金属化。一般工序为：除油→干燥→粗化→敏化→活化→解胶（还原）→化学镀铜（镍）。粗化一般采用化学粗化和机械粗化，是使零件表面形成微观粗糙，增加表面积和生成某些极性基团，提高表面亲水性。敏化是使零件表面吸附一层二价锡的化合物，使表面具有还原性。活化是利用零件表面的还原性使贵金属（银、钯）沉积到零件表面，形成催化中心。解胶是除去胶体钯表面多余的化学物质，使金属钯露出来。还原是将表面多余的银盐还原，以免带入化学镀铜工序。化学镀是利用还原剂将金属沉积到零件表面，使其金属化。常见塑料表面金属化工艺规范见表 2-9-9。

表 2-9-9 常见 ABS 塑料表面金属化工艺规范

工序名称	工艺参数名称	单位	工艺规范
化学除油	氢氧化钠	g/L	50~80
	磷酸钠	g/L	30
	碳酸钠	g/L	15
	表面活性剂	g/L	3~5
	温度	℃	40~55
	时间	min	10~40
粗化	铬酐	g/L	400
	硫酸	g/L	350
	温度	℃	55~60
	时间	min	25~40
中和	盐酸	g/L	200~300
	温度	℃	25~40
	时间	min	1~3

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

工序名称	工艺参数名称	单位	工艺规范
活化	氯化钯	g	1
	氯化亚锡	g	2.53
	盐酸	mL	100
	蒸馏水	mL	200
	氯化亚锡	g	75
	锡酸钠	g	7
	盐酸	mL	200
	温度	℃	15~35
	时间	mm	3~5
			稀释至1L
解胶	盐酸	g/L	100
	温度	℃	35~45
	时间	mm	3
化学镀铜	硫酸铜	g/L	14
	氯化镍	g/L	4
	甲醛	g/L	53
	碳酸钠	g/L	4.2
	酒石酸钾钠	g/L	45.5
	氢氧化钠	g/L	9
	稳定剂	g/L	0.0001
	PH		12.5
	温度	℃	15~35
	搅拌方式		压缩空气

8）电镀锌基合金工艺

为了提高汽车零件的防腐蚀能力，发展了锌基合金电镀工艺。电镀锌基合金的耐蚀性为普通电镀锌的2~5倍以上，典型的锌基合金电镀工艺有：锌镍合金、锌铁合金、锌钴合金、锌锡合金等。

电镀锌基合金的工序过程与电镀锌相当。其电镀液的组成也是在电镀锌的基础上发展起来的。一般在电镀锌溶液中加入合金所需要的金属的盐类、络合剂、适当的添加剂，即可得到所需合金镀层。

9）化学镀

化学镀是利用还原剂使金属从溶液中沉积到工件表面的一种工艺。由于镀覆过程中不需要电源，因此，化学镀又称之为无电解镀。典型的化学镀工艺及其用途见表2-9-10。

表2-9-10 典型的化学镀工艺及其用途

化学镀工艺种类	用途	化学镀工艺种类	用途
化学镀银	用于塑料表面金属化	化学复合镀	用于耐磨、放腐蚀、润滑，如活塞环等
化学镀铜	用于塑料表面金属化	化学镀锡	电器元件、减磨（铝合金活塞）等
化学镀镍	用于塑料表面金属化、高耐蚀性镀层、磁屏蔽等		

大多数化学镀过程需要一个触发条件，因此，在化学镀之前，一般要进行敏化、活化处理（除非基体材料本身具有触发、催化能力），使得表面形成一层具有催化能力的贵金属膜，这样才能保证化学镀的顺利进行。

化学镀溶液一般由金属盐类、络合剂、还原剂、稳定剂组成。为了改善镀层的化学物理性能，还可添加一些非金属固体颗粒，如Sic Mos2 BN、PTFE等。

10）钢铁的磷化与氧化处理

汽车论坛 http://www.qclt.com

a. 钢铁的氧化处理：钢铁的氧化处理一般用于对耐蚀性要求不高及不适宜电镀的汽车零件。钢铁的氧化一般采用高温碱性氧化工艺，其工艺规范见表 2-9-11。

表 2-9-11 高温碱性氧化工艺规范

名称	单位	工艺规范	名称	单位	工艺规范
氢氧化钠	g/L	550～650	温度	℃	135～145
亚硝酸钠	g/L	150～200	时间	min	40～120

由于氧化膜的耐蚀性是很弱的，氧化后必须封闭处理，如：浸肥皂水、重铬酸钾溶液或涂油处理，以提高氧化膜的耐蚀性和润滑性。

b. 钢铁的磷化处理：钢铁的磷化处理用于提高零件的耐蚀性、磨合性、润滑性。磷化工艺有高、中、低温磷化。磷化溶液一般由磷酸二氢盐、自由磷酸和催化剂组成。常见的磷化工艺规范见表 2-9-12。

表 2-9-12 常见的磷化工艺规范

工艺规范		工艺类型			工艺规范		工艺类型		
名称	单位	高温磷化	中温磷化	低温磷化	名称	单位	高温磷化	中温磷化	低温磷化
马日夫盐	g/L	30～40			氧化钠	g/L			0.2～1
磷酸二氢锌	g/L		30～40	50～70	总酸度	点	36～50	60～80	75～95
硝酸锌	g/L		80～100	80～100	游离酸	点	3.5～5	5～10	4～6
硝酸锰	g/L	15～25			温度	℃	94～98	60～70	15～35
亚硝酸钠	g/L		0.2～0.8		时间	min	15～20	10～15	20～40

为提高磷化膜的性能，磷化后，一般要进行涂油或皂化处理。

11）铝及铝合金的阳极氧化

在汽车工业生产中，铝及铝合金一般采用硫酸或硬质阳极氧化。硫酸阳极氧化用于铝装饰条的氧化，硬质阳极氧化用于铝活塞的氧化。常见的工艺规范见表 2-9-13

表 2-9-13 常见铝及铝合金阳极氧化工艺规范

工艺规范		工艺类型		工艺规范		工艺类型	
名称	单位	硫酸阳极氧化	硬质阳极氧化	名称	单位	硫酸阳极氧化	硬质阳极氧化
硫酸	g/L	180～220	200～300	电压	V	13～22	35～110
温度	℃	13～26	－10～10	时间	min	20～40	50～240
阳极电流密度	A/dm^2	0.8～1.5	2～5	阳极材料		铅板	铅板

12）热浸镀

将工件浸入到熔融金属中，然后提起工件，使金属凝固于工件表面，这种方法叫热浸镀。热浸镀只能镀比工件熔点低的金属。钢铁制品可以热浸镀锌、锡、铝、铅等。

热浸镀的一般工序为脱脂、酸洗、清洗、脱水、浸焊接剂处理、热浸镀、后处理等。

典型的热浸镀种类及用途见表 2-9-14。

表 2-9-14 典型的热浸镀种类及用途

热浸镀种类	特性	用途	热浸镀种类	特性	用途
镀锌	耐腐蚀	汽车车身钢板等	镀锡	耐有机酸、钎焊	汽车油箱、电子元件等
镀铝	耐候、耐高温	排气管、消声器部件等	镀铅（锡）	耐腐蚀	热交换器、燃料罐等

13）电镀废水处理工艺

电镀废水一般由氰化物、六价铬、简单金属离子、酸碱废水构成，此外还有油类、表面活性剂、有机物等。电镀废水一般含有毒物质，须经过严格处理达到排放标准后排放。

汽车论坛 http://www.qclt.com

含氰化物废水的处理方法是，在碱性条件下，用氧化剂使之分解为氮气和二氧化碳，变成无毒物质。

含六价铬废水的处理方法是，在酸性条件下，用还原剂将六价铬还原成三价铬，然后使之沉淀，作为泥渣除去。

简单金属离子及酸碱废水的处理方法是，利用酸碱中和的原理进行处理，使金属离子变成氢氧化物沉淀，作为泥渣除去。

随着环境保护的要求越来越高，对电镀废水的处理提出了更高的要求，如对化学耗氧量（COD）、磷、氮富营养物质进行控制，电镀工作者正在探索封闭系统的处理方法。

2.9.2.4 电镀质量管理

①电镀质量标准：根据零件要求制定不同的电镀质量标准，如镀层厚度、耐蚀性、镀层附着强度等。

②电镀质量检查项目及方法：电镀质量检查项目及方法见表 2-9-15。

表 2-9-15 电镀质量和质量检查项目方法

检查项目	方法	仪器、设备	举例
外观	目视		铜＋镍＋铬和镍＋铬、锌镀层等
镀层厚度	库仑法	库仑测厚仪	铜＋镍＋铬和镍＋铬、锌镀层
	液流法	液流测厚仪	镀锌层
	涡流法	涡流测厚仪	铝阳极氧化膜
	磁性法	磁性测厚仪	锌、铬镀层等
	金相法	显微镜	任何镀层
耐蚀性	中性盐雾试验	盐雾箱	锌镀层、磷化、氧化膜等
	铜加速醋酸盐雾试验	盐雾箱	铜＋镍＋铬和镍＋铬镀层、铝阳极氧化膜
结合强度	热震法	烘箱	锡、锌镀层等
	热循环法	烘箱、冰箱	塑料上的电镀层
	锉刀法	锉刀	铜＋镍＋铬和镍＋铬镀层

（撰稿人：魏晓川）

2.10 涂 装

2.10.1 概述

涂装目的是保护被涂物，并对被涂物起装饰作用，提高产品使用寿命和美化外观。汽车车身的涂装质量要求最高，要长期在各种气候条件下使用而不发生漆膜劣化和锈蚀，还要能维持其光泽、色彩和美观。涂装工艺、涂装材料、涂装设备及涂装管理是涂装的 4 大要素。典型的轿车车身涂装工艺如图 2-10-1 所示，主要是电泳底漆、中涂、面漆 3C3B（3Coat3Bake）体系。在电泳底漆与中涂之间有焊缝密封和底板防护涂层的喷涂，以保证车身的密封、降噪声和防锈，面漆后涂内腔防锈蜡。高级轿车车身的涂装，有时还采用多涂层体系，例如 4C4B 工艺。载货汽车驾驶室和车箱一般采用二涂层体系，即 2C2B 工艺。其它汽车零部件的涂装一般为单涂层体系。

2.10.2 涂装前的车身

涂装前的白车身的状态对涂装质量影响很大。因此对涂装前的白车身最重要的是保证表面状态（无机械损伤变形及锈蚀）。在多品种混流生产的场合，合理编排吊生顺序，设定生产指令也十分重要，以便有利于提高涂装工艺的效率。

白车身制造过程中要有妥善的防锈防变形措施，确保白车身在涂装前不产生锈蚀和影响外观的变形，

汽车论坛 http://www.qclt.com

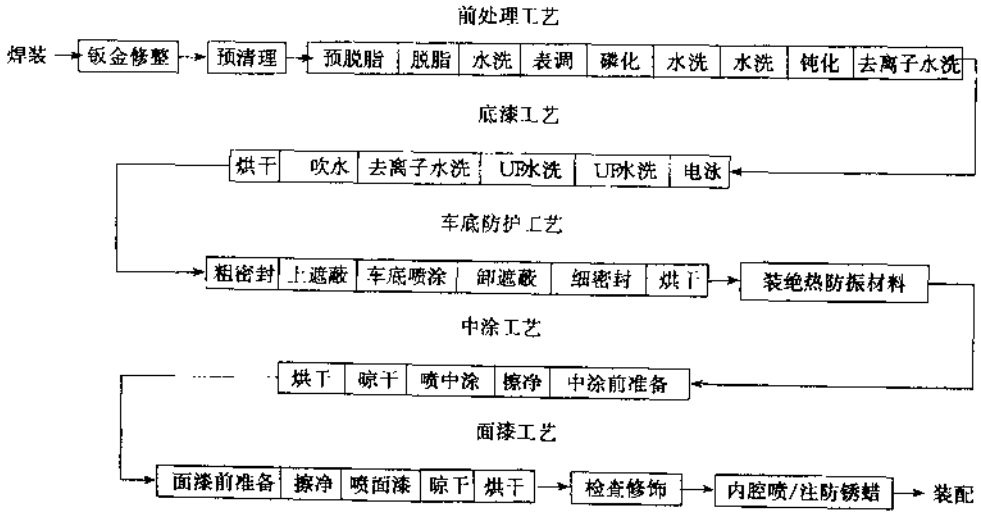


图 2-10-1 轿车车身涂装工艺

所使用的防锈产品不应对涂装生产造成危害，尤其是不能含导致漆膜缩孔的物质，对个别产生的变形应采取钣金修整等措施加以消除。

涂装生产大都采用多品种混流生产方式。包括吊挂顺序在内的生产指令，最重要的是使生产过程的损耗降到最小限度。例如按面漆颜色相同、批量相等的原则编排生产吊挂顺序，既考虑涂装的前后工艺过程，提高生产效率，又兼顾减少换色时涂料的损耗。

涂装过程中输送车身，一般采用专用吊具、滑橇或台车。分为从前处理入口到电泳以后的吊具及滑橇，从密封到面漆后的滑橇、吊具或台车。这样分主要考虑前处理液的腐蚀性，避免吊具夹带的异物给涂装作业带来污染。用于前处理和电泳的吊具要设计成没有任何构件在车身上方的结构。不然，吊具上的污染物和水很容易污染车身。过去，吊具多用抱式，现在多用整体支撑工件的“C”型吊具或与摆杆链配套的“U”型吊具（见图 2-10-2）。后两种形式吊具既便于车身外板面的清洁，又便于电泳槽设置顶部电极。为获得对车身最佳的处理效果和确保涂装过程中车身不产生磕碰变形，白车身的车门、发动机舱盖、行李箱盖等用随行夹具定位至关重要。

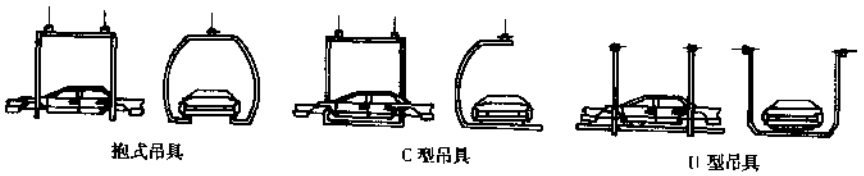


图 2-10-2 吊具示意图

2.10.3 前处理

2.10.3.1 概述

涂装前表面处理直接影响涂层使用寿命和装饰效果。其目的是去除被涂件构成物之外的所有异物，使车身内外表面清洁并形成一层均匀的磷化膜，以保证涂层具有良好的防腐蚀性能和装饰性。处理方式主要有喷射式和浸渍式，现多为以浸渍为主喷射为辅的处理方式，习惯称为全浸式。前处理的最重要工序是磷化，按组成磷化液的磷酸盐分类，有磷酸锌系、磷酸锰系、磷酸铁系。还有在磷酸锌中加钙的锌钙系，在磷酸锌系中加镍、加锰的所谓“三元体系”磷化等。磷化膜的特点是，磷比例越高，与阴极电泳配套性能越好（耐腐蚀性、抗石击性）。由于防锈和减轻重量的需要，各种镀锌钣及铝材越来越多地用于车身制造，

汽车论坛 http://www.qclt.com

这些板材经改良的锌、镍、锰三元体系磷化液处理，进一步使性能提高。为满足不断提高的环保及节省资源要求，生物可降解活性剂配制的脱脂剂，无镍、无亚硝酸盐磷化液，无铬钝化剂，低温脱脂剂，性能与常规相同的低温少渣磷化液，已开始应用。

2.10.3.2 工艺与设备

阴极电泳前采用的典型前处理工艺为：预清理→预脱脂→脱脂→水洗→水洗→表调→磷化→水洗→水洗→钝化→去离子水洗。浸渍式举例见图 2-10-3。

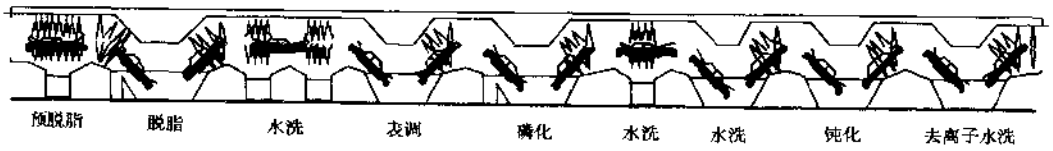


图 2-10-3 全浸式前处理流程

根据使用的前处理材料不同，前处理设备各段的设置及辅助系统的配置有些差异，一般前处理主体设备都是由一些浸渍段和喷淋段组成。浸渍槽通常为 4 或 5 个，脱脂、表调、磷化、钝化、去离子水洗等主要工序以浸为主，其它工序以喷射为主。浸渍处理槽大小形状与工件的机械化运输方式有关，一般配有液位控制、加料系统、循环搅拌系统、过滤除渣系统和加热温控系统等。喷淋段靠一些装在喷射环管上的喷嘴对通过的工件进行喷淋处理，处理介质（或清洗水）从喷洗循环槽泵出，通过喷管上的喷嘴喷到被处理工件上，然后流回循环槽。设备主体材料应充分考虑防腐，以适应前处理恶劣的腐蚀工作环境，一般为不锈钢或玻璃钢材料。为保证处理质量，要充分考虑工序间串液和防止工序间工件锈蚀问题，关键工艺参数应能自动监控、记录及调整。影响前处理质量的因素较多，除处理药品自身所要求的参数外，被处理钢材表面状态和药品间配套及工艺设备管理等因素也影响前处理质量。

钢板表面碳的含量高的部位，磷酸锌结晶不能析出，造成磷化膜缺陷；表面氧化膜的厚度和表面结晶方位的不同直接影响磷化效果；经过钝化处理的镀锌钢板磷化性差，所生成的结晶杂乱粗大。前处理药品配槽用水质过硬会导致磷化液沉渣异常增多，会导致表调剂失效。前处理各工序使用的水最好能达到表 2-10-1 中规定的指标。磷化处理方式对磷化膜特性也有影响，见表 2-10-2。

表 2-10-1 前处理水质要求

项目	指标	对策	项目	指标	对策
硫酸根离子（$\times10^{-6}$）	<20		钙离子（$\times10^{-6}$）	<20	软化
氯离子（$\times10^{-6}$）	<10		镁离子（$\times10^{-6}$）	<15	软化
PH	6.0~8.0	调整	菌群含量/（个/mL）	<5	水源控制
电导率/（μS/cm）	<200	软化			

表 2-10-2 不同处理方式对磷化膜特性的影响

方法 / 项目	喷射处理（s）	浸渍处理（d）	方法 / 项目	喷射处理（s）	浸渍处理（d）
P/P+H（%）	50~70	90~100	耐碱性	□—○	▲
磷化膜重（g/m）	1~2	2~3	（涂层）耐水二次附着力	△—□	○—▲
结晶尺寸（μm）	10~30	≤10	（涂层）耐疤形腐蚀性	△—□	○—▲
结晶形状	针状	粒状、棒状	镀锌板适应性	△—□	○—▲
重金属含有量（mg/m²）	0~15	10~50			

注：▲——优、○——良、□——一般、△——劣

汽车论坛 http://www.qclt.com

由于上述的诸多影响因素，前处理生产需经常根据情况进行调整。表 2-10-3 列出浸渍工艺中常见缺陷原因及治理对策

表 2-10-3 常见缺陷原因与对策

序号	缺陷项目名称	现象及原因	对策
1	沉积淤泥	前处理槽内产生的淤泥淤积于车身自区内外板部	①检查除淤泥的过滤器 ②检查出槽部喷嘴的堵塞状况与角度
2	污物	由吊具与车身组合部位滴落的污水与其它异物	①预防运输链或吊具在上件前处理去离子水清洗后向工件的滴落现象 ②清理吊具 ③调整车身板组合部位的水洗喷嘴
3	瓦楞状（阶梯状）	入槽时在车身外板出现瓦楞状不均匀层	在入槽部设置液表下喷嘴，调整表面流层状态、入槽方向和位置
4	黄锈	在车身外板产生带黄色的磷化膜	调整前处理液的搅拌次数加强前处理液的管理（见表 2-10-4）

表 2-10-4 磷化膜表面产生黄锈的主要原因及防止措施

项目	因素	影响程度	要求	原因说明及措施
底材	钢厂	○		采取临时性措施或调整磷化条件
	防锈油	▲	长期不干结	抛光研磨的表面活性很高，如不立即涂上防锈油就会在空气中氧化，影响磷化效果，储存期长、天气不好或存放环境不好时，更需要注意加强防锈
	抛光研磨	▲	最好没有	采用细抛光材料，如果太粗，研磨时表面温度升高，易产生表面氧化，形成磷化膜粗糙，抛光后应立即涂防锈剂
	生锈	○	应该无锈	加强库存管理及工序间管理，加强防锈
	酸洗	▲	最好没有	尽可能以机械方法除锈，不得已的情况下，要用磷酸洗后立即水洗、中和、表面调整、磷化
脱脂	浓度、温度、压力	▲		脱脂不彻底，会出现无磷化膜区域，这是黄锈的要因，另外，强碱脱脂或脱脂浓度及温度过高，对磷化不利
	喷嘴方向	▲		注意调整使溶液有效地喷到被处理物上
	喷雾量	▲		使用大口径的 V 形喷嘴
	喷嘴堵塞	▲	最好无（10%以下）	定期检查、清扫、更换备件，取下喷嘴清洗干净，每天更换 1/3
	油的积蓄（%）	△	最大 0.4	除去悬浮油，定期更新槽液
水洗	温度（℃）	○	最高 40	如温度过高，会产生黄锈，控制温度不能过高
	污染度	▲	微碱性或中性	防止下道工序的酸性液带入，增加流流，使其呈中性
表面调整	PH	▲	8.0～9.5	若磷化液带入，会使 PH 降低，表调失效
	Ti 含量	○	规定含量	过低表面调整效果差
	喷嘴堵塞	▲	无	若有堵塞，则会使表面处理不完整，影响磷化均匀性
	带磷化液	▲	最好无	调整磷化入口端喷嘴方向

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

项目	因素	影响程度	要求	原因说明及措施
	总酸度	▲		偏上限为好
	酸比	▲		
	促进剂浓度	▲		若过高，则沉淀量增加，材料消耗量增多
	温度℃	▲		
	药品补充	▲	连续定量	否则总酸度和游离酸度波动大，质量不稳定
	压力 MPa	△	0.007～0.1	大流量，低压力较好
	运输链停止	▲		刚进入磷化区的零件将可能锈蚀
	喷嘴方向	▲	不导致串液	
	喷雾量（$L \cdot min^{-1}$）	▲	最少每平方米 80	有充足的喷雾量均匀喷在被处理物上
	喷嘴堵塞	○	无	定期检查，清洗，每天更换 1/3
	污染度	△	0.3 点以下	消除磷化液串液现象，此工序喷嘴最易堵塞，要充分注意增加溢流量
	温度（℃）	△	常温	

注：▲——影响大；○——影响较小；△——影响最小

2.10.4 电泳（底漆）

2.10.4.1 概述

电泳涂装是将具有导电性的被涂物浸渍在装满水稀释的、固体分比较低的电泳槽中作为阳极（或阴极），在槽中另设置与其相对应的阴极（或阳极），在两极间通直流电，在被涂物上析出均一、水不溶的涂膜的一种涂装方法。根据被涂物的极性和电泳涂料的种类，分为阴极电泳和阳极电泳两种。由于阴极电泳的诸多优越性，已逐渐取代阳极电泳。阴极电泳涂装的优点是能定量控制涂膜厚度，对工件内表面甚至焊缝的涂装效果好，涂料利用率高达 95% 以上，基本可消除对环境的污染，广泛用于车身底漆工艺。

2.10.4.2 工艺与设备

车身通过前处理过程进入电泳工序。图 2-10-4 是电泳工艺的举例。电泳工艺过程包括电泳、后冲洗及烘干等三道主要工序。一般由悬挂输送机将车身运输通过各工序，车身进入电泳槽时有一定的倾斜动作，将工件携带的空气或气泡排出，使正反面所有部位都形成完整的电泳漆膜。然后通过后冲洗，用超滤（UF）液将浮漆洗去，再经水洗后，送入烘干室。

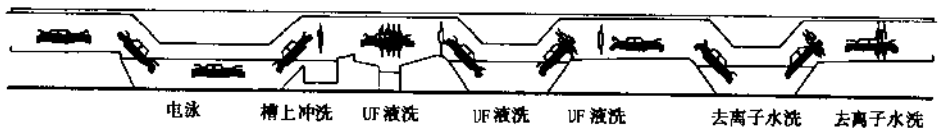


图 2-10-4 电泳工艺流程

1）电泳

是将被涂物浸入电泳槽中，按规定的泳涂条件通电一定时间，使槽液中的成膜物泳涂到被涂物上。电泳槽的特点是能够控制工件所需要的通电时间。槽内配有隔膜电极及底/顶部电极，而且还配有槽液调温、补加涂料、循环搅拌过滤及超滤（UF）等附属系统。电泳槽一般由碳钢制成，内壁及槽内所有金属支撑

汽车论坛 http://www.qclt.com

件必须涂电绝缘层，循环、过滤、调温等回路的管道、泵、阀、过滤器、换热器等均为不锈钢材料（或塑料）。隔膜电极有板式和管式，现管式开始普及。补加涂料系统根据电泳漆材料不同，有带预混罐式的单独系统，有安在管路上的混合器式的，也有直接用泵打入电泳循环管路的。UF组件有板式、管式、中空纤维式和卷式等几种。工件接电方式有带电（活态）入槽和不带电（死态）入槽两种，电泳过程中，一般控制几段电压。

2）后冲洗

采用喷浸结合的方式，将被涂物表面附着的电泳槽液清洗下来，以提高和改善涂膜表面质量，减少底漆打磨工作量，从而提高涂层的耐腐蚀性。超滤的主要作用是控制电泳槽液中的杂离子含量。由于UF液的主要成分是水、助溶剂、中和剂和小分子树脂，所以利用多段UF液闭路水洗，除能充分洗去粘附在被涂物上的电泳涂料，还能将洗下的电泳涂料回收。在提高涂料利用率的同时，大大减少了污水处理量及费用。设备结构与前处理相似，对阴极电泳而言，管路、泵、阀、过滤器等必须为不锈钢（或塑料）材料。

3）烘干

阴极电泳涂料属于热固化性涂料，必须在规定的较高温度下才能固化，其烘干过程包括：溶剂（水分）挥发、涂膜热融化、固化三个阶段。由于电泳涂膜本身的含水极少，所以其烘干过程与热固性粉末涂料相仿，可直接进入高温烘干。另外，阴极电泳涂膜在热固化过程中有热分解产物，产生较多的油烟。较高温度、较长时间的烘干，能致使涂膜变薄、膜的平整度明显提高。烘干室的种类详见2.10.6节。

2.10.4.3 电泳涂料

电泳涂料是一种在以用水性底漆的基础上开发的，仅适用于电泳涂装法的专用水溶性（或水乳化型）涂料，在水中能离解为带电荷的水溶性成膜聚合物，并在直流电场的作用下泳向对应的电极（被涂物），在其表面上沉积析出。电泳涂料可分为阳极电泳涂料和阴极电泳涂料两种。涂料组成的比较，见表2-10-5。

表2-10-5 电泳涂料的组成

项 目	阳极电泳涂料	阴极电泳涂料
树脂	含羧基的合成树脂，以聚丁二烯树脂为代表	环氧、聚氨树脂（胺基-NH_2的合成树脂）
固化剂	无（氧化聚合）	封闭异氰酸酯树脂
中和剂	KOH、有机胺	有机酸（甲酸、乙酸、乳酸等）
涂膜	酸性	碱性
槽液	碱性（PH7.5～8.5）	酸性（PH5.8～6.8）

1）阳极电泳涂料（阴离子电泳涂料）

阳极电泳涂料使用的成膜聚合物是阴离子型树脂，常用的都是多羧基的聚合物，中和剂为无机碱和有机胺，如氢氧化钾、一乙醇胺、三乙醇胺、三乙胺等。最常用的树脂为含羧基的合成树脂，如聚丁二烯树脂等。目前汽车工业仍在采用的阳极电泳涂料，按耐腐蚀性能可分为两类，其主要性能见表2-10-6。

表2-10-6 阳极电泳涂料的主要性能

项 目		技术要求	
		优质防腐级	良好防腐级
原漆	固体分（%）	≥40	≥40
	细度（μm）	≤30	≤40
	贮存稳定性	(0～35)℃半年	(0～35)℃半年

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

项目		技术要求	
		优质防腐级	良好防腐级
工作液及施工性能	固体分（%）	11±1	12.5±0.5
	PH值	7.5～8.5	8～9
	电导率/（μs·cm⁻¹）	700～2000	＜3000
	施工电压（V）	150～300	80～180
	泳透力（%）	≥50	≥50
	库仑效率（mg·C⁻¹）	≥15	≥15
	L效果	水平面与垂直面无明显差别	水平面与垂直面无明显差别
	击穿电压（V）	≥300	≥180
	干燥性能	（175～180）℃烘干（20～30）min	180℃烘干30min
涂膜性能	外观	平整光滑	平整光滑、允许存在轻微桔皮
	膜厚（μm）	20±2	≥15
	弹性（mm）	≤3	≤3
	冲击强度（N·cm）	490	≥392
	附着力（级）	≤2	≤2
	光泽（%）	40～80	40～80
	杯突（mm）	≥5	≥5
	耐盐雾性（h）	≥360	≥240

2）阴极电泳涂料（阳离子电泳涂料）

阴极电泳涂料所用的成膜聚合物是阳离子型树脂，在树脂骨架中有多数的胺基（$-NH_2$）、中和剂为有机酸，如甲酸、乙酸、乳酸等。最常用的树脂主要是环氧树脂和聚氨酯树脂，固化剂用异氰酸盐。按一次泳涂膜厚，可将阴极电泳涂料分为薄膜型（20μm）和厚膜型（30～35μm）两种。在汽车涂装中使用的阴极电泳涂料，按耐腐蚀性能分为3级，分别适用于不同标准的汽车零部件涂装。各级阴极电泳涂料的性能，列于表2-10-7中。

表2-10-7 阴极电泳涂料性能指标

项目		等级		
		优质防腐级	良好防腐级	一般防腐级
原漆	在容器中的状态	无异味，无明显分层，易搅起		
	粘度	适宜		
	固体分（%）	单组分45～75，双组份30～60		
	细度（μm）	≤15	≤25	≤30
	颜色	各色		
	组分数	单组份或双组分		
	电导率（$\mu s \cdot cm^{-1}$）	适用于双组分800～2000		
	PH值	适用于双组分，色浆5.0～6.0，乳液6.6～7.2		
	沉淀性	适用于双组分乳液，120h不分层，无絮状物析出		
	筛余分（325目）/（mg·L⁻¹）	≤15	≤20	≤25
工作液	固体分（%）	17～20		
	PH值	5.8～6.7		
	电导率（$\mu s \cdot cm^{-1}$）	800～2000		
	颜基比（P/B）	0.1～0.6		
	溶剂（%）	2～8		
	MEQ值	单组分25～35，双组分40～60		

续上表

项目		等级		
		优质防腐级	良好防腐级	一般防腐级
施工性能	库仑效率(mg·(C·h)$^{-1}$)	≥30	≥25	≥20
	泳透力（%）	≥85	≥75	≥65
	L-效果	水平面平整光滑与垂直面无明显差别		
	施工电压（V）	150～350		
	电泳时间（min）	2～3		
	干燥性能	(170～180)℃烘干（20～30）min		
	加热减量（%）	≤4	≤10	
	再溶解性（%）	≤10，外观无明显变化		
	使用稳定性	敞口搅拌4周后，各项性能无明显变化		
涂膜性能	外观	平整光滑无缩孔	平整允许轻微桔皮、无缩孔	
	膜厚（μm）	≥28	≥18	
	弹性（mm）	≤3	≤1	
	冲击强度（N·cm）	≥392	≥490	
	附着力（级）	≤2	≤1	
	光泽（%）	40～80		
	杯突（mm）	≥5		
	抗石击性（级）	≤2		
	耐碱性（h）	≥24	≥8	
	耐酸性（h）	≥24	≥8	
	耐水性（h）	>600	>400	
	耐盐雾性（h）	≥1000	≥800	≥720

3）阴极电泳涂料的发展趋势

①不含重金属、少颜料和少助溶剂含量的环保型；

②低固化温度、低有机挥发的节能环保型；

③具有电泳底漆与面漆双涂层功能（既能保证经受各种环境的耐候性而又具平滑性）的节省资源型阴极电泳涂料。

2.10.4.4 电泳常见弊病及对策

表2-10-8列出了电泳涂装常见漆膜弊病产生时的检查要点。

表2-10-8 电泳弊病发生时的检查要点

序号	现象	确认事项	检查确认内容
1	膜厚不足	·电压	·检查电压是否适当（偏低）
		·通电不良	·检查挂具上是否有涂料附着、测极罩电阻
		·槽液温度	·槽液温度是否保持在工艺规定范围内
		·固体分	·固体分是否偏低
		·溶剂含量	·溶剂含量是否偏低

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

序号	现象	确认事项	检查确认内容
2	漆膜过厚	·电压	·检查电压是否适当（偏高）
		·通电时间	·运输链速度是否变慢
		·槽液温度	·槽液温度是否保持在工艺规定范围内
		·固体分	·固体分是否偏高
		·溶剂含量	·溶剂含量是否偏高
3	缩孔、凹坑、针孔	·涂料、槽液	·检查槽液中有无异物（油）混入
		·环境	·被涂物是否被油分，曲漆雾污染
		·去离子水	·去离子水的水质是否合格
		·前处理	·脱脂是否不良
		·颜料分	·颜料分是否偏低
4	漆膜有颗粒	·涂料、槽液	·检查槽液内有无沉淀物，凝聚物或异物混入
		·水洗水	·电泳后的清洗水是否太脏
		·被涂物	·被涂物不清洁或磷化后水洗不充分
		·环境	·涂装环境是否不清洁
5	二次流痕	·涂料	·固体分是否过高
		·水洗	·电泳后水洗是否不充分
6	涂面的异常附着	·电压	·泳涂电压是否过高
		·灰分	·灰分是否过低
		·溶剂含量	·溶剂含量是否过高
		·设备、操作	·极间距是否过近
		·磷化	·磷化药品未清洗净
7	水滴迹	·挂具	·在电泳水洗后的晾干过程中挂具是否滴水
		·被涂物	·在电泳水洗后被涂物上是否有积水
8	不均匀的干漆迹	·水洗	·电泳后冲洗是否充分
		·运输链速度	·电泳和后冲洗之间的时间是否过长
		·槽液温度	·槽液温度是否过高
		·环境	·涂装环境的湿度
9	再溶解	·槽液	·槽液的 PH 值是否低
		·水洗水	·水洗水的 PH 值低或冲洗压力是否过高
		·运输链	·运输链速度是否变低或停止
10	涂面斑印	·磷化后的水洗	·水洗是否充分
		·环境	·被涂物在电泳前是否被污染
		·挂具上的污物	·挂具是否有污物滴落
11	漆膜粗糙	·磷化	·磷化膜是否均匀、水洗是否充分
		·固体分	·槽液固体分是否过低
		·去离子水	·去离子水的水质是否合格
		·前处理	·脱脂是否不良
		·颜料分	·颜料分是否偏低
12	泳透力低	·槽液的泳透力	·槽液和原漆的泳透力是否合格
		·电压	·检查电压是否适当（偏低）
		·固体分	·检查固体分是否偏低
		·搅拌	·检查槽液搅拌是否正常

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

序号	现象	确认事项	检查确认内容
13	带电入槽阶梯穿轨	·槽液面状态 ·电压 ·运输链运行状态	·入槽部位液面有无泡沫 ·入槽段电压是否过高 ·运输链运行有无脉动

2.10.5 密封及车底防护

车身的密封及车底防护工序是关系到车身的密封防漏、耐腐蚀、隔热防声性能及外表美观性的重要工序。

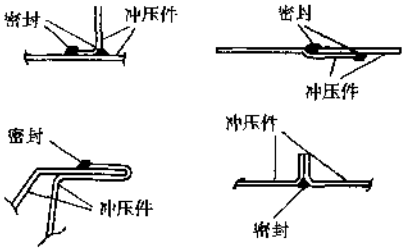


图 2-10-5 密封应用实例

2.10.5.1 密封

1）概述

密封的主要部位是汽车车身冲压件的组合焊缝部位，如车顶渗水部、支柱部及其他漏水漏气的部位。图 2-10-5 示出密封部位。

2）密封材料的用途与种类

密封材料分两类，一类是直接涂敷于钢板结合部的，一类是电泳后再涂敷。表 2-10-9 比较钢板直接涂敷与电泳后涂敷的用材区别。

表 2-10-9 密封材料类型及树脂类的用法比较

工件材质	树脂种类
钢板	环氧树脂；聚丙烯酸酯；聚氯乙烯；丁基橡胶
电泳钢板	聚氯乙烯；聚硫橡胶；氯丁橡胶；聚氨酯

3）聚氯乙烯树脂（PVC）系密封材料的成分与性能

汽车车身涂装中广泛应用聚氯乙烯树脂系密封材料，其成分是聚氯乙烯、合成树脂、增塑剂、填料及颜料等，主成分是聚氯乙烯。其特点是，在 5～12MPa 的压力下易于涂敷施工，无味、无毒、而且密封性好，耐水、耐气候性强。

4）涂敷部位与涂敷方法

a. 涂敷部位　车身驾驶舱（车顶、车门、底板）内外焊缝、货箱（皮卡车、轻型载货车）内外焊缝、发动机舱和行李箱内外焊缝、发动机罩和行李箱盖加强梁及外边缘焊缝。

b. 涂敷方法　传统的涂敷方法是接触式刷涂，用专用的挤胶设备及工具挤涂，此外还有非接触式喷涂，可按涂敷部位选择。作业方法主要是人工，在大批量生产线上用机械手涂敷的方法也在普及。

2.10.5.2 车底防护

1）概述

汽车在各种道路条件下行驶中，被带起的沙石不断地击打车身底板、轮罩内、裙围等处，长期的冲击不仅会使车身底部的涂层逐渐被破坏，致使底板锈蚀，同时产生噪声；汽车发动机在工作状态下，会产生振动并释放出大量热能，这些热能及振动通过车身前围板、车底板等传递到车内，使驾驶室内温度升高并振动，同时行车中引起钢板的振动、道路不平产生的撞击声，轮胎与地面摩擦产生的噪声及振动等都会导致乘员的不舒适感。为了抵御路面沙石的冲击，阻止噪声及振动的传递，降低车内噪声，延长车体使用寿命，需在车身底部、翼子板内涂布抗石击、隔热阻尼涂料，在驾驶室底板、前围、轮罩、行李箱内、顶盖、车门外板内侧等部位放置隔热阻尼胶板。车身底部涂布抗石击、隔热阻尼涂料（0.3～1.0mm 厚）的主要作用是防锈和隔音防振，热融型隔热阻尼胶板具有热融附性能，利用炉子的热源将其融敷于凸凹不平的表面，发挥其绝热防振性能，由于它是同凸凹不平的表面融附在一起，所以还会起防锈、防水的作用。

汽车论坛 http://www.qclt.com

图 2-10-6 示出车底防护涂料与热融型防振材料的涂敷状态。

2）工艺

车底防护涂料、车底喷涂一般在焊缝密封后进行。从使用目的和外观质量考虑，车底防护涂料只涂于车身底部，为防止喷到不需喷涂的其他部位，先要进行遮蔽、喷涂后去掉遮蔽物并进行清理。

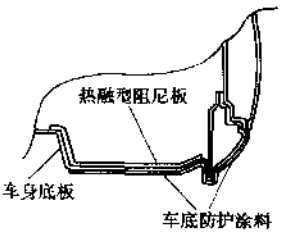


图 2-10-6 车底防护涂料与热融型防振材料涂敷状态

① 遮蔽：在车底喷涂之前，必须将车身底板上的一系列工艺孔用相应的遮蔽件（一般为专用橡胶塞）堵上，对不要求涂 PVC 的部位，进行遮蔽。过去多用纸类等遮蔽物，现在多用纸基压敏胶带及发泡苯乙烯制品，以降低工时。

② 喷涂：用混气喷枪或无气喷枪喷涂。由于作业环境差，过去的手工喷涂已转向用机械手或自动喷涂机喷涂。

③ 清除遮蔽物：遮蔽工序中所用的遮蔽材料要在烘干前清除。这道工序包括对涂敷效果的检查，必要时进行修补，一般由人工完成。

铺放隔热阻尼胶板多设在 PVC 烘干或中涂烘干后，按照规定将隔热阻尼胶板用手工轻轻铺放或贴附到车身相应的部位。

3）设备

①车底防护涂料：一般情况下用悬挂输送机把车身吊起从下面喷涂。从改善环境方面考虑也可以采用转动车身的喷涂方式。喷涂必须在专用的喷涂室中进行，大批量生产中多是机械手或自动机械完成喷涂操作的。由于涂料的粘度对喷涂的质量影响很大，故要配置多工位无间断的供料系统。图 2-10-7 示出车底防护涂料供料与喷涂系统。

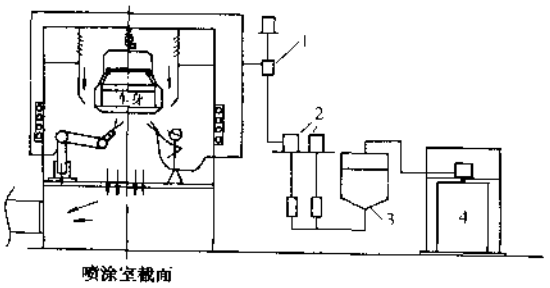


图 2-10-7 车底防护涂料供给及喷涂系统
1-增压泵；2-输胶泵；3-储罐；4-供料罐

②热融型隔热阻尼材料：在制造厂将隔热阻尼材料裁成指定的尺寸与形状，用带有能移动的运输装置的平板架送到生产线旁，由工人进行安装。今后，应考虑隔热阻尼胶板安装的自动化措施。

4）材料

①车底防护涂料：车底防护涂料可分为溶剂型、水基型和无溶剂型三类。溶剂型一般都是由改性沥青树脂、填料和溶剂组成；水基型是采用水性乳胶（如丙烯酸酯、聚醋酸乙烯等）加填料和助剂制成；聚氯乙烯系（PVC）车底涂料属无溶剂型。为减轻车身自重，低密度与低粘度薄膜型的车底防护涂料也已投入使用。目前 PVC 系车底防护涂料大量用于汽车涂装。表 2-10-10 列出了 PVC 系车底防护涂料的材料成分。

表 2-10-10 PVC 系车底防护涂料的材料成分

项 目	标 准	项 目	标 准
成分	氯乙烯、聚氯乙烯、聚醋酸乙烯、钛、聚酯树脂、含 N 树脂、氧化钙、苯二（甲）酸酯、表面处理钙、脂肪族溶剂	加热残分	95%以上
粘度	4 000～6 000mPa·s	流动性	4mm 以下
密度	1.50g/cm³ 以下		

② 热融型隔热阻尼材料 热融型隔热阻尼材料一般是在主料沥青中配一定充填剂、按一定厚度加工成板状的材料，因使用部位不同材料有所差异。热融型阻尼胶板与应用部位的使用区别列于表 2-10-11 中。一般的热融型阻尼材料的成分列于表 2-10-12 中。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-10-11 热融型阻尼材料与不同部位的使用区别

种类	特征	用途
普通热融型阻尼板	因自身融化易于贴在凸凹部	底板与挡泥板的嵌合部
压敏热融型阻尼板	属带压敏胶热融化型材料，用于垂直部位	车门外板内侧等垂直部位
磁化热融型阻尼板	属带磁性的热融化型材料，可用于背面	车身顶盖

表 2-10-12 热融型阻尼材料成分

项目	标准
成分	沥青、滑石、石棉、碳酸钙、变性沥青橡胶
密度	1.4～1.5
灰分	60%以下
蒸发量	0.5%以下
延展率	15%以上
热流动性	0
防振性	1.5t-0.08 3.0t-0.20

2.10.6 中涂

2.10.6.1 概述

中涂层介于底漆与面漆之间，主要作用是改善被涂物表面和底漆涂层的平整度，为面漆层创造良好的基底，以提高整个涂层的装饰性和抗石击性。对轿车车身涂装而言，提高涂层的抗石击性能更为重要，为提高外观质量，可进行双层中涂，可使用灰色中涂及与面漆彩色接近的中涂。

2.10.6.2 工艺

中涂工艺过程有表面准备（打磨擦净）、喷涂、晾干、烘干等四个主要工序。

①表面准备：打磨消除基底（电泳）漆膜的外观缺陷（桔皮、缩孔、颗粒等），除去表面附着的灰尘和异物。一般采用600#～800#水砂纸打磨，用粘性擦布擦去打磨灰尘。大量流水生产场合可采用鸵鸟毛擦净机自动擦净。

②喷涂：利用空气雾化器或旋杯式雾化器将涂料分散成雾状，并使之均匀附着于被涂物上。小批量生产以人工喷涂为主，大批量生产以自动喷涂为主。

③晾干：为了防止烘干时溶剂急剧蒸发导致漆膜缺陷，需要通过这道工序使湿漆膜中大部分溶剂自然蒸发，并使涂料充分溶合、流平。

④烘干：涂料烘干形成漆膜，通过加热使溶剂蒸发并使树脂进行固化反应。烘干温度和时间取决于涂料类型、材质及热容量和加热方式等因素。一般为100～150℃，30min。

工艺平面图见图2-10-8。

2.10.6.3 设备

1）喷漆室

为保证涂料喷涂作业的环境温湿度，同时将没有附着到涂漆工件表面的雾化涂料迅速排除，以防止附着到其它被涂物上和污染作业环境。喷漆室应具备下列功能：

①能将喷涂产生的飞散漆雾和溶剂蒸气迅速排除，并能最大限度地捕集漆雾，使排风机和排风管不积漆。

②有定向的风速，确保喷漆工的操作工位处在新鲜的流动空气中。风速不应小于溶剂蒸气的扩散速度

汽车论坛 http://www.qclt.com

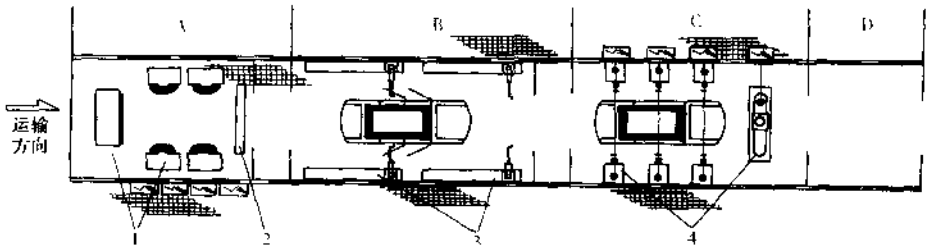


图 2-10-8 中涂涂装工艺平面图

A-车身擦净区；B-内表面喷涂区；C-外表面喷涂区；D-检查修补区

1-擦净装置；2-离子化吹净装置；3-内表面喷涂机器人；4-外表面自动喷涂机

0.2m/s，喷漆室内的风速应定向均匀、无死角。风速一般为：手工喷涂区段 0.45～0.5m/s；自动静电喷涂区段 0.25～0.3m/s；擦净间、晾干间 0.2～0.3m/s。

③应有良好照明，确保喷漆工有良好的视野。

④必须装备空调供风系统，确保喷漆室内空气的温度、湿度和清洁度。

⑤应装备有消防设施。室内的电器应防爆，室体应良好接地。

喷漆室由空调供风系统、室体、排风和漆雾捕集系统、废漆清除装置等几部分构成。

空调供风系统是向喷漆室提供经调温、调湿、除尘的洁净空气的装置，它由进风口预滤段、预加热段（或冷却段）、喷洗及加湿段、后加热段、风机、后过滤段、消音段等组成。

喷漆室室体由动压室、静压室、喷涂操作室和格栅底板组成。空调风首先进入动压室，在动压室内设有一定数量的导流板，使气流和气压分布均匀，再经动压室下部的多孔调节阀和袋式过滤器进入净压室。在静压室与喷涂操作室之间有整体镀锌的钢丝网支持框架，上面铺有无纺布过滤层，空调风经过这一过滤层均匀流向操作间，避免紊流现象的产生。室体的两侧一般用钢化玻璃和壁板封闭，上部和下部的外侧安日光灯照明灯箱，灯光通过密封的玻璃窗为室内照明。

排风和漆雾捕集系统由漆雾的捕集装置、排风风机及风管等组成。有干式和湿式两种。干式漆雾捕集装置是喷漆室抽风口布设折流板或过滤网，其结构简单，需经常清理和更换滤网，仅适用小批量生产。湿式漆雾捕集装置是用循环水来洗涤带漆雾的空气，它的工作原理是使喷漆室的废气与水充分混合，利用不同风速、挡水板和风向的多次转换，使水和漆雾与空气分离，水中加有凝聚剂，使落入水中的漆雾凝聚，再通过液固分离装置将漆渣和水分离开。典型的上送风下抽风喷漆室如图 2-10-9 所示

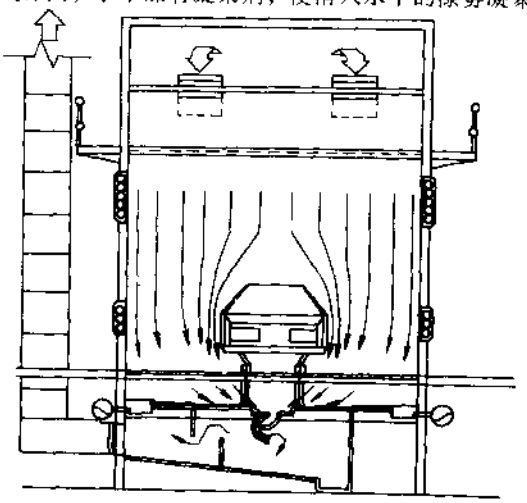


图 2-10-9 上送风下抽风式喷漆室

2）涂料供给装置

涂料供给装置就是通过压力泵将涂料从调漆室经密封管道循环压送到生产线的多个操作工位，它包括调漆、输漆、控温等部分。采用集中涂料供给系统对涂料的粘度、颜色和温度的均一性能进行较好的控制，对改善现场环境、安全生产、减少车间内运输等有益，可避免脏物污染涂料。调漆间应具有良好的通风条件，一般换气次数为 15 次/h，送风系统应确保清洁度。为避免静电导致火灾和爆炸等隐患，调漆间地面要充分考虑防静电措施，如布置导电铜条、铺导电地砖或涂导电地面涂料等。输漆循环系统有盲端式（或称支流式）、两线式和三线式等三种方式，其中三线式为最佳。

3）烘干室

按烘干室的形状和通过方式可分为箱式和通过式。通过式又有直通式、桥式和“Π”型等三种，按加热方式可分为辐射式、对流式和辐射对流结合式。箱式烘干室适用于小批量间歇式生产，大批量流水生产都采用通过式，桥式和“Π”型与直通式相比有较多优点。烘干室热源可根据资源条件选择气体燃料、燃油、电等。由于汽车外观的高装饰性要求，烘干过程中不能有导致漆膜缺陷的污染，所以烘干室应有热空气过滤器，室体内表面要设计成光滑、不积灰、易清理的结构，采用燃料作热源时要通过换热器间接加热。为防止烘干中的挥发物在进出口处凝结，从烘干室顶部滴落影响质量，可在桥式烘干室的进出口上方设置加热板。为防止电泳漆烘干的二次流挂产生，电泳烘干室可设置预热段（100℃，4min）。车身烘干室一般热效率较低，大部分热能为无效损失，最新的结构烘干室（见图 2-10-10）循环空气耗电能可节省 45%，总能源消耗可下降 25%。

4）涂装常用方法及其装备

汽车涂装常用的方法有刷涂、喷涂、浸涂等，随着工业技术的进步，各种高效的自动涂装方法已被采用，除喷涂外，还有电泳涂装、自动静电涂装、粉末静电涂装等。电泳涂装法只适用于涂底漆，前面已做介绍，这里对其它几种方法加以介绍。

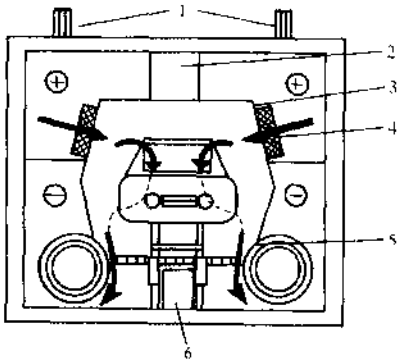


图 2-10-10 高效辐射对流烘干室结构示意图
1-循环风机；2-新鲜热空气风管；3-低温辐射板；4-循环对流空气；5-高温辐射板和热交换器；6-废气排风管

①空气喷涂：空气喷涂是靠压缩空气的气流使涂料雾化，在气流带动下，涂敷到被涂物表面。基于它几乎适用于各种涂料和各种被涂物，效率高，作业性好，且能得到均匀美观的涂膜，所以至今还是中小批量汽车涂装和汽车修补涂装的主要涂装方法之一。空气喷涂法涂料的涂着效率低（在喷涂大件如车身的场合一般为 50%～60%），漆雾飞散多，致使操作环境变差。

常用的喷枪由喷头、调节部件和枪体三部分组成。喷头由空气帽、喷嘴、针阀等组成，它是改变涂料的雾化、喷流图样等决定喷枪性能的关键部件。调节部件是调节涂料喷出量和空气流的装置。涂料从涂料喷嘴中喷出，因喷嘴易被涂料磨损，一般用合金钢制作，并经热处理，其口径随用途而异，有 0.5、0.7、1.0、1.2、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0mm 等多种规格，常用的是 1～2.5mm。0.5～0.7mm 的适用于着色剂、虫胶等易雾化的低粘度涂料；1～1.5mm 的适用于硝基漆、合成树脂漆等；2～2.5mm 的适用于雾化粒子稍粗和稍粘的底漆和中涂涂料；3～5mm 的适用于塑料溶胶、车底防护涂料等粘稠的涂料。根据用途不同还有各种改形喷枪，如供喷涂管子和窄腔内壁用的长头喷枪（如供汽车车身空腔喷防锈蜡用的各种变形的长头喷枪）；供往复机和机械手自动喷涂用的自动喷枪，它与一般喷枪的不同点是靠压缩空气驱动控制喷头上的针阀；供喷涂高粘度用的大口径喷枪等。

②空气雾化静电喷枪：空气雾化静电喷枪和空气喷枪大体相同，其不同点是前端有针状电极，接以负高压电，被涂物接地作为阳极，在两极之间形成高压静电场，阴极产生电晕放电，使雾化的涂料微粒子带电荷，在静电场力与空气力共同作用下，使涂料均匀地附着于被涂物表面上。空气静电涂装比空气喷涂涂装效率高，图 2-10-11 示其工作原理。

③旋杯式静电雾化器：旋转杯式静电雾化器（喷杯）的旋杯（Bell）的转速在空载时最高可达 60 000r/min，工作状态可达 30 000r/min 左右，一般喷杯不仅分散和雾化涂料，还使漆滴荷电。在强的离心力和静电作用下，可使涂料雾化得很细，漆滴直径可达到 50～100μm（喷涂时雾化的漆滴直径小于 375μm 时，就能形成良好的涂膜）。由于喷杯高速旋转，即使使用高固体分涂料，或施工粘度稍高都不会对质量有很大影响，一次喷涂膜厚可达 35～40μm，所以特别适用于大量流水生产的车身涂装线。其工作原理如图 2-10-12 所示。

④粉末静电涂装法：工业应用的粉末涂装法有流动床法、熔射法、粉末静电喷涂法、静电流动床法、粉末静电振荡涂装法等。在汽车涂装领域最常用的是粉末静电喷涂法。它是靠高电压使粉末带负电，借助于静电引力吸附在被涂物上，加热熔融（固化）后成膜的一种涂装方法。粉末涂料粒子带电方法有两种，一种是在静电场中由电晕放电空气离子化产生的电荷相碰而带电；另一种是粉末粒子间或与器壁等的摩擦而带电。粉末静电喷涂设备主要包括喷粉室、供粉装置、粉末回收装置、静电发生器、静电喷涂机（或喷

汽车论坛 http://www.qclt.com

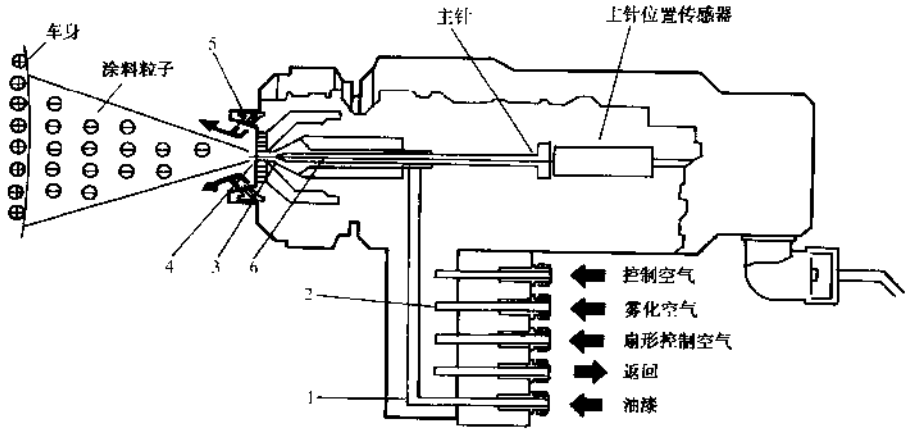


图 2-10-11 空气静电雾化器工作原理

1-供漆；2-雾化空气；3-环隙；4-漆嘴；5-气帽；6-针状电极

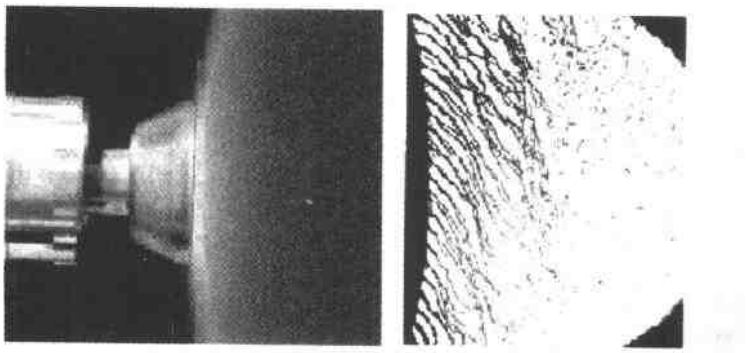


图 2-10-12 旋杯式静电雾化器工作原理

涂机械人）等组成。喷涂车身的粉末喷涂室与喷漆室相似，只是下部的结构有区别，它相对简单，以粉末回收系统替代循环水系统。粉末雾化器（喷枪）比油漆雾化器结构简单，喷涂机的功能与下述的涂装机相似。

5)自动涂装机

自动喷涂推动了车身外板涂装自动化。其方式有往复式(喷枪往复移动)和固定式(喷枪固定)。空气雾化静电喷涂机是采用往复式,旋转雾化静电喷涂机是采用往复式和固定式两种。涂装机一般由侧喷机和顶喷机构成。侧喷机主要喷涂车身的两个垂直侧面,可有 1～3 个自由度,顶喷机可喷涂车身前后端面和水平面,可有 5 个自由度。以前涂装机整体都安装在喷漆室内部,现在多为外置式,只有雾化器及支持部分在喷漆室内,为实现高度仿形的动作要求和体现经济安全性,各自由度由伺服电机驱动,高压发生器和换色阀多装在雾化器内。自动涂装机不但在喷涂方面实现自动化,包括车型识别、换色等也能自动完成。

6）自动擦净机

采用自动鸵鸟毛擦净机可显著提高喷涂前车身表面的清洁度，提高喷涂质量。它安装在喷漆室的入口处，10μm 以下的尘粒可被擦除，大大减少喷漆前的准备工作量。擦净机的构成及布置如图 2-10-13 所示。

擦净滚采用鸵鸟毛，对灰尘的吸附能力很强，对车身外表面擦净效果很好，羽毛以很小的接触力低速擦过车身表面，吸附车体上的灰尘，并传送至吸风罩处，在此离子风吹拂羽毛，将灰尘除掉。擦净原理如图 2-10-14 所示。擦净机的动作及控制同自动涂装机，可自动识别车型，完成擦净及二次离子化处理，消除车身外表面的摩擦静电。

汽车论坛 http://www.qclt.com

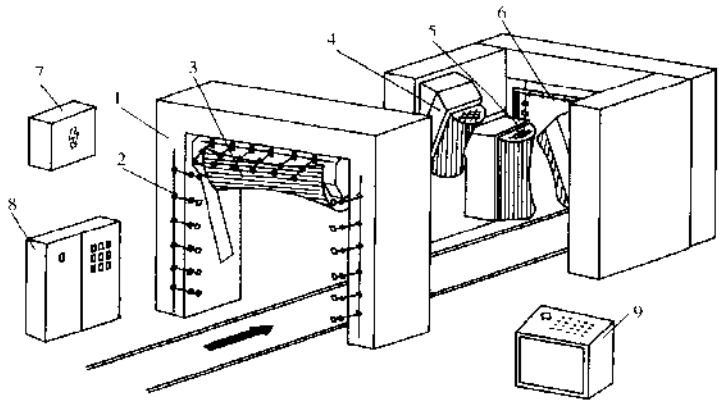


图 2-10-13 自动鸵鸟毛擦净机
1-顶滚框架；2-吹风环；3-顶擦滚；4-倾斜擦滚；
5-垂直擦滚；6-二次离子化装置；7-高压电源；8-气控柜；9-控制台

2.10.6.4 涂料

涂料构成的主要成分有树脂、颜料、填料和添加剂，辅助成分有溶剂、稀释剂等。中涂涂料应具有填充性、易打磨性、平滑性（平整光洁）、耐候性。中涂涂料以油性聚酯树脂为主，附加有环氧树脂、三聚氰胺等树脂，使氧化钛、碳黑等体质颜料及着色颜料分散混合制成。为了提高外观质量，符合有关溶剂排放规定的要求，应使用低分子混合式不挥发的涂料，为提高车身综合涂层的抗石击性能，应使用抗石击中涂。

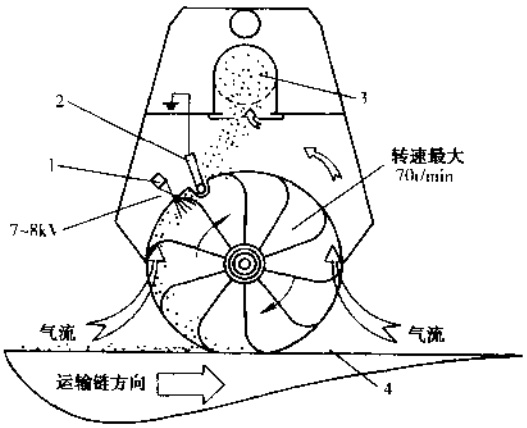


图 2-10-14 鸵鸟毛擦净机除灰尘原理
1-放电针；2-振动棒；3-吸风管；4-车身

2.10.6.5 新技术

①喷涂无人化：喷涂内表面能开关车门的机械手的研究和应用，使车身涂装几乎全部自动化，外表面追踪的仿形机构及涂装施工参数等控制技术正在朝着数字化智能化方向发展。

②旋转烘干：在涂层的光滑性方面，车身的水平面和垂直面的差别很大，水平面由于重力的产生面形成流平，垂直面则产生下垂。这就是从涂料流平凝固到烘干时都使车身旋转，目的是使在垂直面也产生流平，提高表面平滑性。

③水溶性涂料及粉末涂料：从安全性环境保护的观点有对涂料内的溶剂量作出了强制性规定的倾向。因此，水溶性涂料和粉末涂料得到应用。水溶性涂料主要是大量采用丙烯酸树脂作为亲水基(—COOH)，将亲水基用来和氨、有机胺等中和、水溶化。水和有机溶剂不同：a. 为促进水的蒸发要设置预热工序，b. 涂料供给采取防腐蚀措施及低剪切搅拌，c. 为保证在低温时涂装、贮存要设置涂料调温系统，d. 对胺臭采取措施等。

2.10.7 面漆

2.10.7.1 概述

面漆是汽车车身多层涂装中最后一道涂层，它对车体有保护和装饰双重功能。面漆的颜色及种类多种多样，有本色、金属色和珠光色几大类，图 2-10-15 是本色和金属色（或珠光色）面漆的涂层结构示意。

汽车论坛 http://www.qclt.com

为适应多种个性强的色彩需求，采用铝粉和珠光粉（云母系）混合的设计也较普遍，为适应环保要求水性底色（本色或金属色）和粉末清漆开始应用。

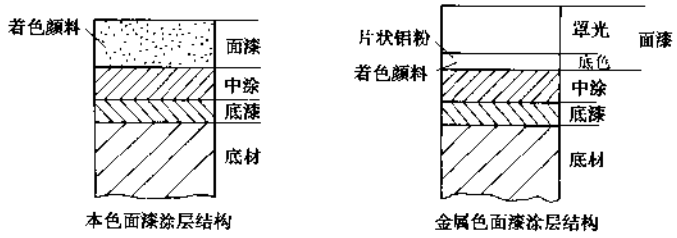


图 2-10-15 不同面漆涂层结构示意图

作为起保护性能的面漆涂层，必须具备防紫外线的性能，对底层涂膜（电泳、中涂等）起保护作用，面漆涂层本身也要具有优良的耐久性和耐腐蚀性。

面漆工艺如图 2-10-16 所示，使用的设备与中涂相同。

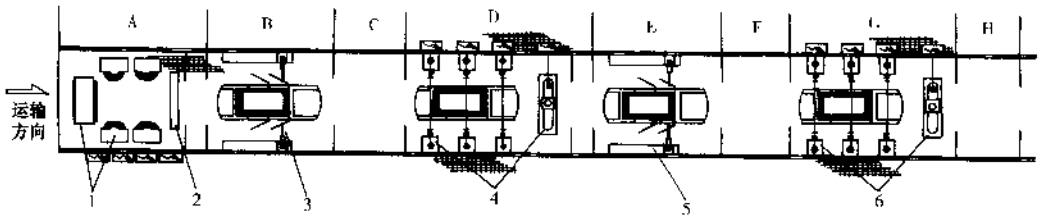


图 2-10-16 面漆涂装工艺平面图

A-车身擦净区；B-内表面色漆自动喷涂区；C-内表面色漆手工修补区；D-外表面色漆自动喷涂区；E-内表面罩光自动喷涂区；F-内表面罩光手工修补区；G-外表面罩光自动喷涂区；H-检查/修补区；1-自动擦净装置；2-离子化吹风装置；3-内表面色漆喷涂机械人；4-外表面色漆自动涂装机；5-内表面罩光喷涂机器人；6-外表面罩光自动涂装机

2.10.7.2 涂料

①聚氨酯树脂：聚氨酯树脂是由多异氰酸酯与多元醇逐步加成聚合而成的树脂，广泛应用于各种涂料。聚氨酯具有高度机械耐磨性和韧性，兼具保护和装饰性，漆膜附着力强，漆膜的弹性可根据需要从极硬调节到极柔韧，耐化学药品，耐酸、碱、盐液，耐石油产品，能在高温烘干也能在低温固化，可与聚酯、聚醚、环氧、醇酸、聚丙烯酸酯、醋酸丁酸纤维素、氯乙烯醋酸乙烯共聚树脂、沥青、干性油等配合制漆，可制成溶剂型、液态无溶剂型、粉末、水性、单组分、双组分等多种形态，满足不同需要。

②醇酸树脂：醇酸树脂是聚酯树脂的一种，价格便宜，使用不同的油脂，可获得多种性能的树脂。

③丙烯酸树脂：丙烯酸树脂是由丙烯酸、甲基丙烯酸作为单体的主要成分共聚而成。使用该树脂的涂料具有透明感，耐候性好，但有柔韧性差的缺点。

2.10.7.3 新技术

1）涂膜的鲜映性

获得精度高、外观美的涂层是创造平滑涂装表面的条件。涂层表面的凹凸表现在 $10^2 \sim 10^3\mu m$ 的波长范围，从感光特点的角度看波长在 $10^2\mu m$ 以下，对于颜色、光泽有影响；在 $10^2 \sim 10^3\mu m$ 时具有微小凹凸不平的涂层表面，如果波长在 $10^3\mu m$ 以上就能保证平滑性。涂层表面的平滑度可用仪器（桔皮仪）定量测定，长波控制在 $10^3\mu m$ 以上，短波控制在 $10^2\mu m$ 以下，即可获得高装饰性涂膜。采用鲜映性测定仪，可测定漆膜的鲜映性。

使用流动性的溶剂（以提高烘干时的流动性）、激光钢板（控制钢板的钝化均匀）、中涂水磨（底层涂

膜的平滑）等先进技术都是为了改善涂装表面的装饰性。

2）氟树脂涂料

氟树脂是一种具有良好的耐候性能的树脂，具有防湿的性质，该树脂安全稳定。

由于酸雨的危害，要求面漆要采取相应的对策，这种涂料形成的涂膜对酸雨具有优良的抵御能力，不再需要其他防护。

3）珍珠云母

云母（铝系硅酸盐）表面用二氧化钛涂敷的云母颜料的涂料，具有珍珠式的光彩，见图 2-10-17。珍珠云母涂料与金属涂料不同，涂膜的光折射方式也不同，珍珠云母具有光乱反射的特点，通过漆膜界面光的反射和一部分重复产生良好效果。

涂装方法是三涂层两烘干，彩色层、云母层、透明层。

4）涂色云母

涂色云母与珍珠云母类似，是有云母颜料的涂料，不同点是用涂色颜料调出色彩，将涂敷的二氧化钛再涂到氧化铁上。和一般的金属涂装一样，是两涂层一烘干（图 2-10-18）。

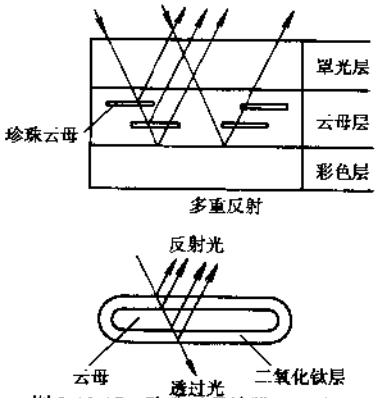


图 2-10-17 珍珠云母涂膜（面漆）

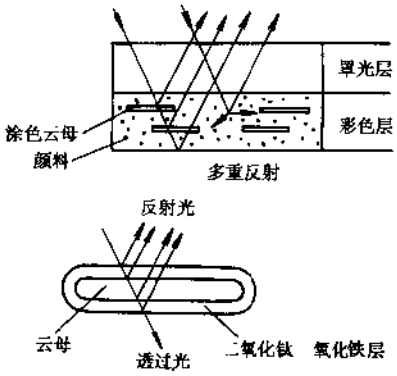


图 2-10-18 涂色云母涂膜（面漆）

5）新交联技术清漆

由于环境恶化，汽车漆膜受酸雨浸蚀而劣化的现象越来越突出。另外深色涂层产生划伤给人的视觉感受不好，需要改进抗划伤性，新交联技术清漆采用羧基、环氧基、羟基交联剂替代以往的密氨基树脂和羟基交联剂，使涂层耐酸雨和抗划伤性能提高，见图 2-10-19。

2.10.8 修补

2.10.8.1 概述

修补涂装大体分为打磨和喷涂。根据缺陷类型进行打磨和再喷涂。再喷涂多为面漆的修补，底层的修补有无必要必须在确认的基础上进行，如图 2-10-20 所示。

补漆分为局部修补（部分涂装）和车身整体修补。局部修补技术及操作技能要求高，效率低，质量难保证，但节省材料；整车修补不需要特殊的技能，与正常生产要求相同，但浪费材料，量大时影响产量。两种修补各有利弊，因此要选择适当的修补方法及涂装环境。

2.10.8.2 打磨

1）清理

用水或溶剂汽油清理不合格部位，然后用干擦布擦掉水分，见图 2-10-21。

汽车论坛 http://www.qclt.com

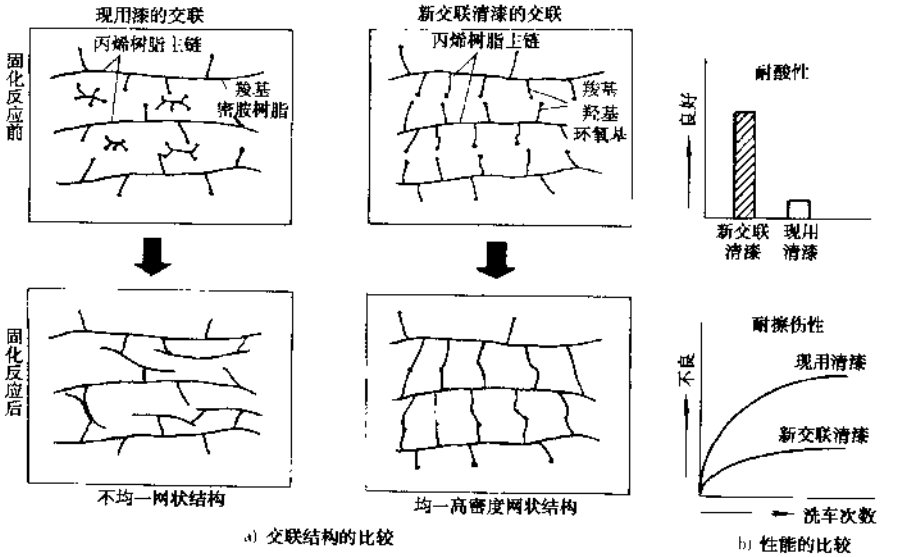


图 2-10-19 新交联技术清漆的特点

2）打磨

用 1000# ~ 1500# 的水砂纸磨平不合格部位，对脏点等凸起小缺陷处磨出底涂层。

3）清理

打磨后的污水用干净的水或溶剂汽油清理，然后用干擦布擦净。

4）抛光

对修饰性处理的打磨处不再喷涂式修补，在磨平处涂上抛光膏，用抛光机抛光后擦净。

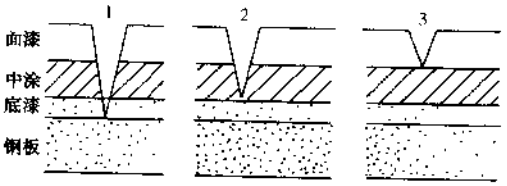


图 2-10-20 缺陷部位的涂膜断面图例
1-必须进行底漆、中涂和面漆的修补喷涂；2-必须进行中涂和面漆的修补喷涂；3-只需进行面漆的修补喷涂

2.10.8.3 再涂装

1）局部修补涂装

如果缺陷不在主要部位，并且面积小就采取局部修补涂装。

2）车身整体修补涂装

如果缺陷不是集中在一处，而是车身的 3—4 处，应进行整车返修涂装，首先打磨缺陷部位，并进行清理，再用 600# ~ 800# 的砂纸打磨整个车身表面，进行彻底清理后再用正规的表面涂装工艺进行再涂装。

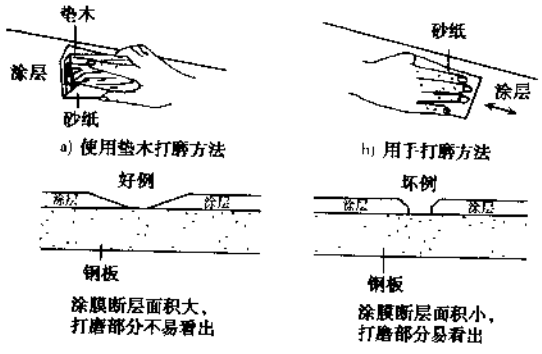


图 2-10-21 打磨的方法和水平

2.10.9 涂蜡

2.10.9.1 概述

在北美和欧洲积雪地区，为了防止道路的冻结而向路面大量撒融雪用的岩盐（有时在夏季，为防止起灰，在土路上也撒盐），于是车身底部的闭合结构部位及底盘很容易受到腐蚀，因此要采取措施进

行修补性的防锈涂敷，如表 2-10-13 所示。

表 2-10-13 涂蜡防锈的分类表

分类	涂敷部位	涂蜡质量要求	备注
内部涂蜡	车门内、车盖前部后行李箱、铰链折页	防锈力、浸油性、防止脱落、防滑	属涂装工艺
涂底板蜡	底部全部	防锈、厚涂、耐划、耐寒	属装配工艺
面漆保护蜡	外板表面涂漆、电镀面	表面耐腐蚀性、表面保护性	属装配工艺
发动机舱防锈蜡	发动机罩内金属部位（发动机部件、螺栓类）	防锈、透明、绝缘	属装配工艺

2.10.9.2 工艺、设备

涂蜡工艺一般设在面漆涂装检查后，设备由喷蜡室和材料供给装置组成，在涂蜡量大的情况下多采用湿式喷涂室。涂蜡量少时多采用干式喷涂室。材料供给装置根据使用的材料以恒温状态为宜。图 2-10-22 示出标准的加热喷蜡系统。

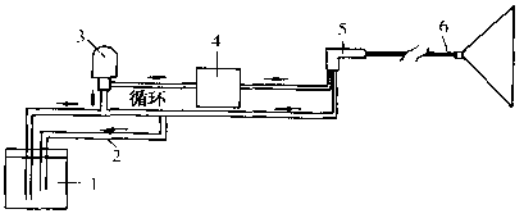


图 2-10-22 标准的加热喷蜡系统示意图

1 料罐；2-回流管；3-泵；4-加热器；5-喷枪；6-喷嘴

2.10.9.3 材料

防锈蜡的成分是由低融点和高融点微晶石蜡、矾酸金属盐及其它的防锈添加剂、调合颜料构成，也有与其它树脂进行配合的类型，为满足环保的要求，水性蜡已得到生产应用。

2.10.9.4 新技术

蜡加温后利用热蜡低粘度的浸透性好的特点进行空腔注蜡，可提高涂蜡质量，并取消注蜡后的烘干，减少有机挥发物的排放。

采用面漆保护膜替代面漆保护蜡的喷涂，不仅可以减少环境污染，而且容易去除，不会损伤漆面。

2.10.10 涂装节能、环保新技术

2.10.10.1 零缺陷

零缺陷观念是最大限度地提高涂装一次合格率，在车身焊装车间对车身进行清洗和清理，检查并消除缺陷，确保供给涂装车间的车身清洁无缺陷，将白件导致的涂装质量问题减少到零。

2.10.10.2 高质量少污染的前处理

使用无镍、无亚硝酸盐、无铬钝化（或不用钝化）、低处理温度及生物可降解脱脂剂，减少毒物排放。典型的 10 工序前处理系统流程如图 2-10-23 所示。

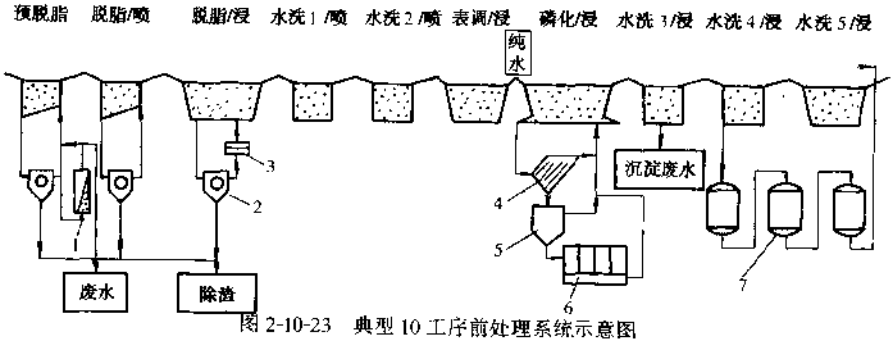


图 2-10-23 典型 10 工序前处理系统示意图

1-UF；2-离心分离器；3-磁性分离器；4-沉降槽；5-浓缩槽；6-压滤机；7-带沙滤器的离子交换循环设备

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.10.10.3 全封闭电泳后冲洗

尽管应用 UF 技术大大减少了电泳后冲洗的废水排放，但为了控制电泳槽液的杂离子含量，必须排放 UF 液，而排放的 UF 液 VOC 量往往超标，另外，还需要去离子水洗保证清洗效果。采用 RO（反渗透）技术，对 UF 液进行处理，可将排放的 UF 液体积减少 80%～90%，同时回收 80%～90%的水及溶剂混合液替代去离子水，最大限度地减少废水排放量和减少去离子水用量。应用 UF 和 RO 的电泳系统见图 2-10-24。

2.10.10.4 水性漆及粉末施工技术

水性漆及粉末的应用，大大降低了涂装施工的 VOC 排放量，最新涂装工艺可将 VOC 排放降低的到每平方米涂装面积 20g 以内。由于水性漆的导电性，不能简单采用溶剂型涂料的静电涂装设备，初期采用外部荷电方法，但涂着效率低（约 80%），最近已开发应用了新的接电方式，使效率提高到 90%以上，原理见图 2-10-25。

车身采用粉末罩光，要对喷漆室系统、供排风系统、供料系统及喷涂设备进行一系列的改造，然而，采用粉末浆对喷涂设备的要求基本与常规设备相同，差别只是需要将晾干间改成预烘干段，需要专用的供料系统，而且粉末浆可再循环使用。

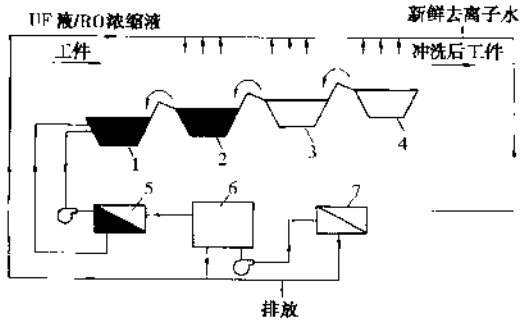


图 2-10-24 应用 UF 和 RO 的电泳系统示意图
1-电泳槽；2、3-UF 液清洗槽；4-去离子水洗槽；5-UF 装置；6-UF 液槽；7-RO 装置

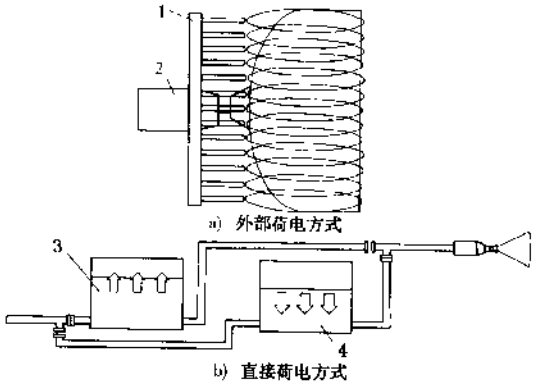


图 2-10-25 两种水性漆静电喷涂荷电方式
1-接电电极；2-杯式雾化器；3-不接电；4-接电

2.10.10.5 涂装工艺新概念

由于新材料、新技术的开发应用，引起汽车车身涂装技术的不断进步，传统的涂装工艺已经开始向多样化方向发展，以下介绍的是几种新的涂装工艺概念。

①二次电泳工艺，见图 2-10-26。

②溶剂性底色向水性底色的低成本转变：典型的水性面漆工艺要在底色和罩光之间加一道烘干，见

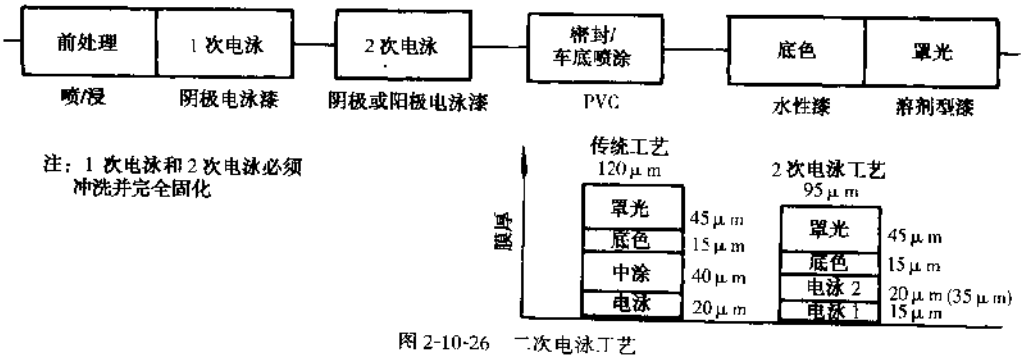


图 2-10-26 二次电泳工艺

图 2-10-27。低成本转变技术使水性漆在传统的生产线上使用成为可能，见图 2-10-28。

③一体化涂装概念：一体化涂装概念是用与面漆同色的功能层代替中涂，并与面漆湿碰湿施工，取消中涂线，见图 2-10-29 及图 2-10-30。

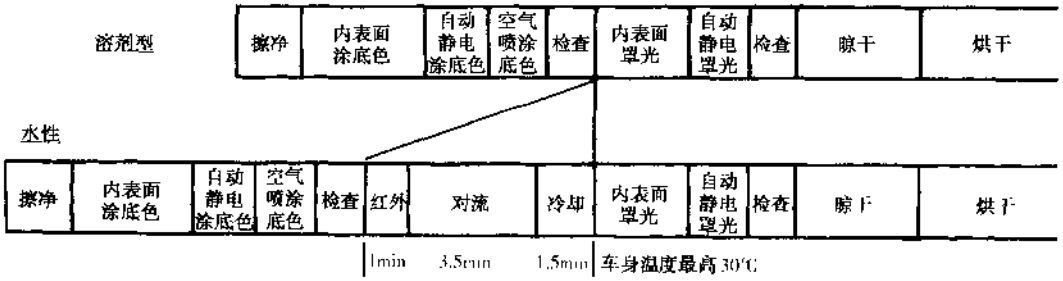


图 2-10-27 溶剂型和水性面漆工艺差别

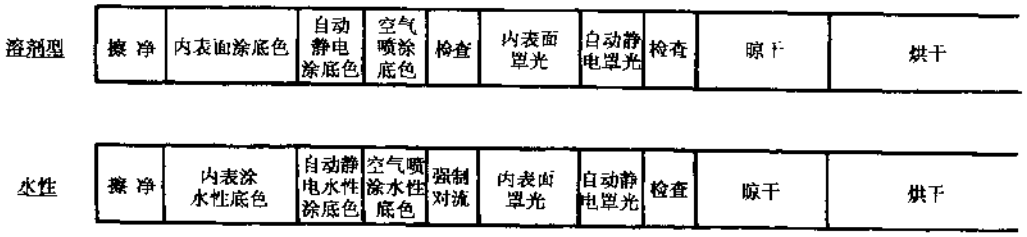


图 2-10-28 溶剂型面漆到水性面漆的低成本转变

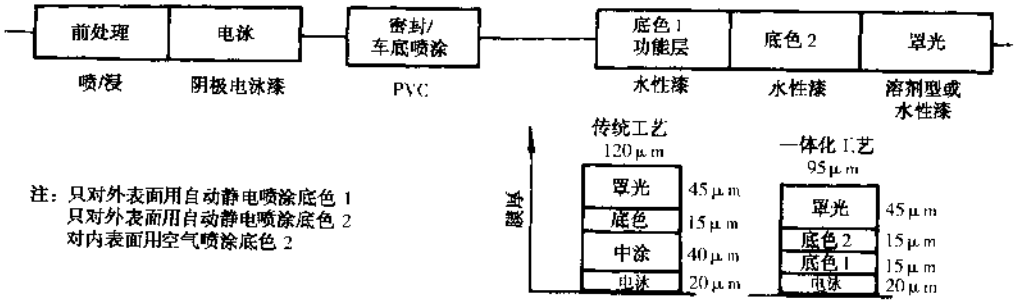


图 2-10-29 一体化涂装概念

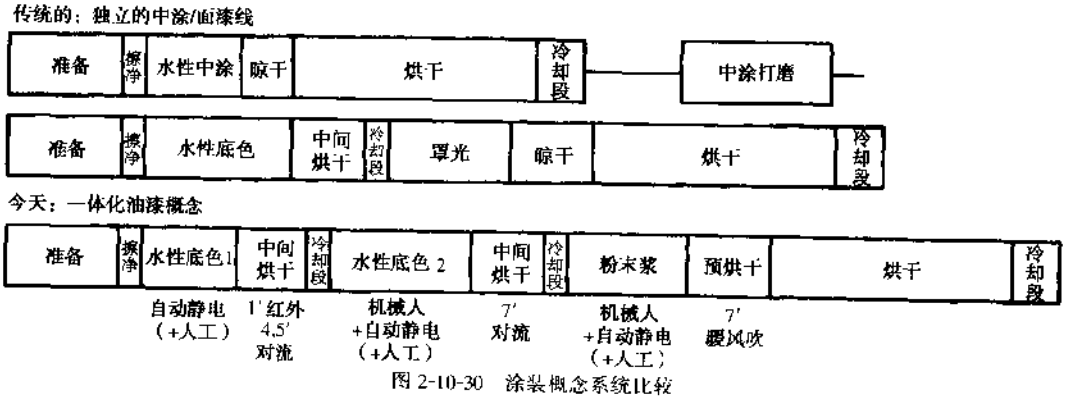


图 2-10-30 涂装概念系统比较

汽车论坛 http://www.qclt.com

④逆过程工艺：逆过程工艺是指粉末中涂在电泳之前进行，相当于车身外表面粉末喷涂，内表面电泳后喷面漆，另一种工艺是在涂装前密封车身可见焊缝，车底防护及不可见焊缝密封在面漆后进行，见图 2-10-31。

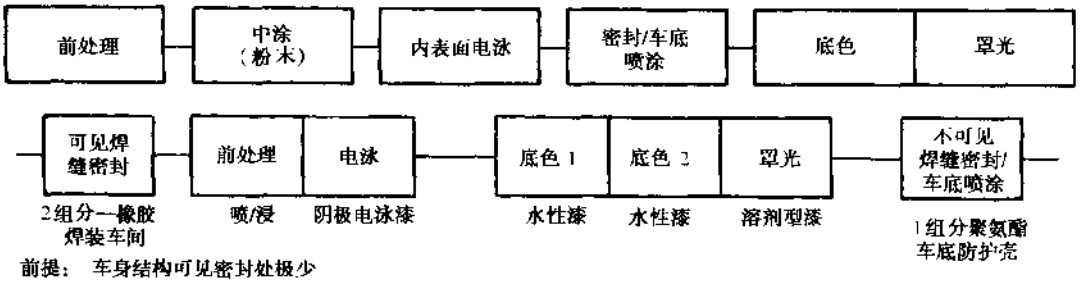


图 2-10-31 逆过程工艺

⑤废漆处理及涂料回收：涂装材料实现水性化或无溶剂化后，解决了有机挥发物排放的处理问题，但仍有喷漆室的废漆处理及粉末的回收问题，图 2-10-32、图 2-10-33、图 2-10-34 为较先进的系统原理。

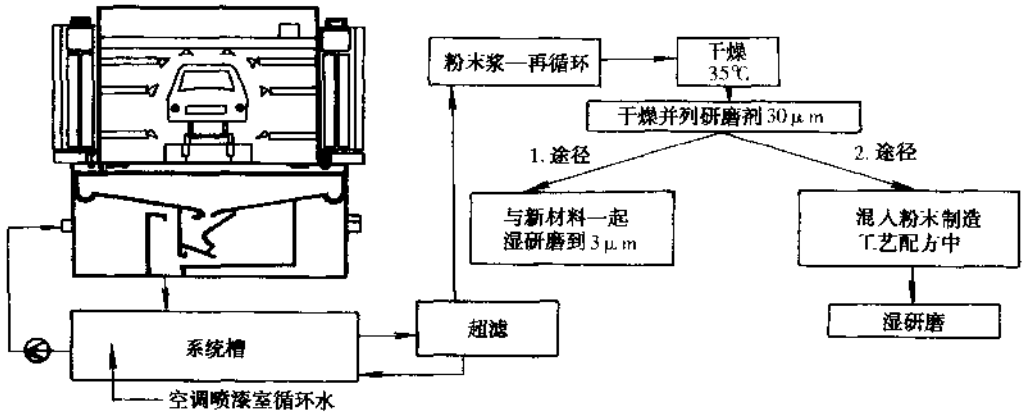


图 2-10-32 粉末浆再循环可能性

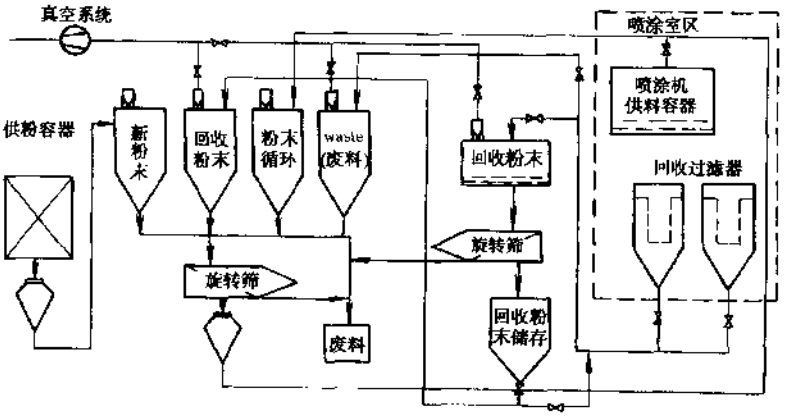


图 2-10-33 粉末清漆供料及回收系统

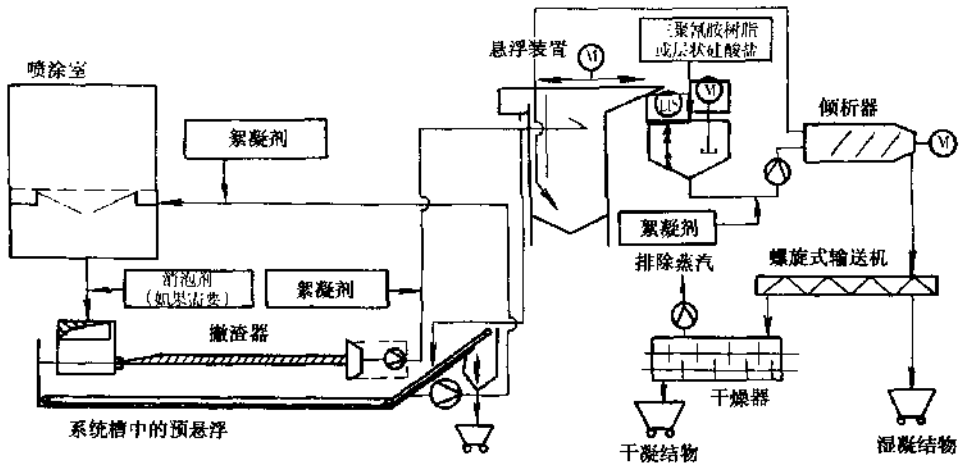


图 2-10-34 带絮凝 | 燥器的废漆处理系统

2.10.11 涂装技术的发展趋势

提高涂层耐久性、减少对地球环境的破坏、减少资源消耗是涂装技术的永久性课题。由于地球环境的恶化，国际性的环境保护已经被高度重视，发达国家纷纷推出 VOC 排放限制的法规，为满足法规要求，需采取一系列对策，但这些对策引起涂装成本的大幅度提高，所以围绕环境保护，降低涂装成本成为涂装技术的重要研究方向，见图 2-10-35。

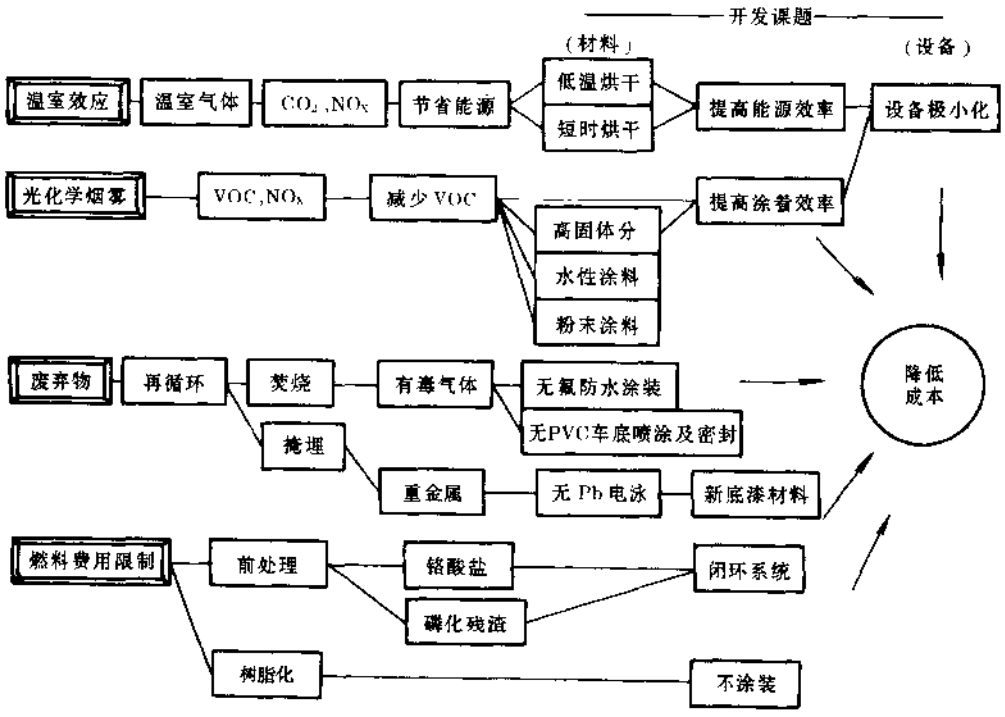


图 2-10-35 关于地球环境的涂装技术方向

（撰稿人：吴涛）

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.11 焊 接

2.11.1 概述

汽车制造中焊接生产具有批量大、生产速度快、对被焊零件装配焊接精度要求高等特点，多采用流水作业的生产方式，机械化、自动化程度较高，专用焊机、自动焊机、焊接机器人等大量采用。随着汽车生产品种的增多，逐步建立了柔性焊接生产线，并采用先进的检测设备，以保证装配焊接精度。

为实现产品换型，车身焊接的工艺装备、设备及工艺都要求能作相应的调整与改变。车身车体是一个复杂结构件，具有如下特点：①有明显的装配程序性；②装配方式与生产批量关系密切；③以电阻焊工艺为主；④采用专用夹具确定零件的相对位置及总成的尺寸。由于组成车身的钢板较薄，为提高焊接生产率，防止焊接变形，生产中以点焊、凸焊工艺为主，国外先进的汽车厂已将激光焊接技术用于车身制造中，国内的企业正逐步引进激光焊接技术。另外 CO_2 气体保护焊、螺柱焊、惰性气体保护焊、钎焊等在车身制造中也得以应用。

车轮、车桥、底盘类零件的生产，采用 CO_2 气体保护焊工艺较多，由于生产批量大，焊接质量要求高，广泛采用专用自动焊机和弧焊机器人工作站。车箱、车架的生产也以 CO_2 气体保护焊为主。在汽车零部件的生产中激光焊、电子束焊、摩擦焊、超声波焊、惰性气体保护炉中钎焊等工艺方法也越来越多地被应用。随着汽车制造水平的提高，汽车用材料的应用范围不断扩大，汽车焊接技术将向着高质量、高生产效率、低成本、自动化和对各种车型适应能力强的方向发展。

2.11.2 焊接工艺及设备

2.11.2.1 点焊

点焊是将工件装配成搭接接头，置于两电极之间压紧、通电，利用电阻热能熔化母材，形成焊核，是热—机械（力）联合作用的焊接过程。其特点：

①具有大电流、短时间、加压状态下进行焊接的特点，冶金过程简单，变形与应力小；

②不需填充金属，与其它方法相比设备运行成本低；

③操作简单，生产效率高，容易实现自动化。

点焊是汽车焊接生产中应用最广的工艺方法。它适合于制造可以采用搭接接头、接头不要求气密的薄板构件，如载货汽车驾驶室、轿车车身的焊接。汽车覆盖件是用 1mm 左右厚的冷轧钢板冲压成形。轿车白车身是将多种冲压件分别组焊成十多个大总成后再焊接成轿车的车身。载货汽车驾驶室也是由许多分总成焊接成前围、后围、地板、顶盖等四大总成后，再焊装成驾驶室。这部分焊接中有90%是用点焊方法。

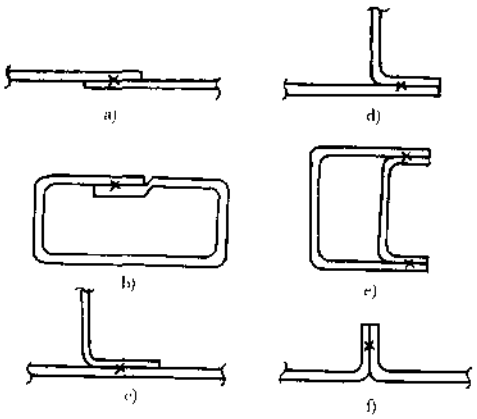


图 2-11-1 焊接搭接形式

焊接接头根据车身的结构特点可分为如图2-11-1所示几种形式。

汽车用点焊机根据用途要求分为固定式点焊机、悬挂式点焊机、多点焊机等几种。

1）固定式点焊机

白车身小总成上的焊点一般是用固定式点焊机完成的。

点焊机的供电系统包括焊接变压器及焊机的二次回路。

加压机构使电极间产生足够的压力，以满足被焊工件焊接规范中压力的要求。加压方式主要有三种形式：恒压力系统、变压力系统、气—液增压系统。

恒压力系统是最广泛采用的加压方式。图 2-11-2 是气缸有辅助行程的恒压力气动系统。气缸被两个活塞分割成上、中、下二个气室。上室为辅助行程。

2）悬挂式点焊机

一些外廓尺寸较大的工件，如几大总成的装焊，是由夹具定位夹紧后，采用悬挂式点焊机焊接，车身制造中，悬挂式点焊机得到广泛应用。

这种焊机为了移动方便，把变压器和焊钳悬挂在空中。悬挂点焊机有分离式和一体式两类。分离式悬挂点焊的焊钳与变压器之间用特殊电缆连接，电缆的构造与长度对功率的消耗和操作的方便性有很大影响。电缆有两种形式，一种是有感电缆，其每根电缆内的电流方向都是相同的，因此使用时必须两根；另一种是无感电缆，这种电缆正反两个方向导电电线都在一根电缆里，感抗很小，在电流闭合时没有电磁力。分离式悬挂点焊机的缺点是二次回路长，功率损耗大，见图 2-11-3。一体式悬挂点焊机的焊接工具部分和变压器直接相连，见图 2-11 4。由于没有二次回路中电缆损耗，功率利用充分。

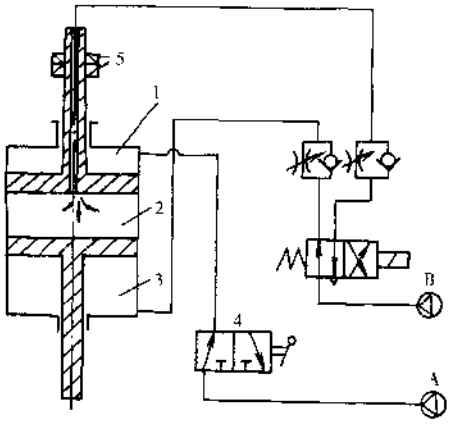


图 2-11-2 气缸有辅助行程的气动系统

1-气缸上气室；2-中气室；3-下气室；4-二位三通手助气阀；5-二只螺母

A-气源气压；B-经减压阀后气压

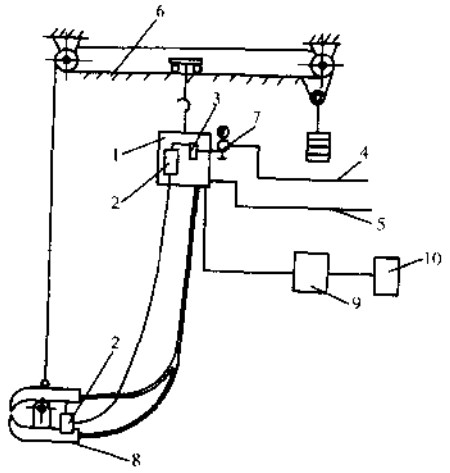


图 2-11-3 悬挂式点焊机

1-变压器；2-气缸；3-电磁气阀；4-气路；5-水路；6-导轨；7-减压阀；8-焊枪；9-控制箱；10-时间调节器

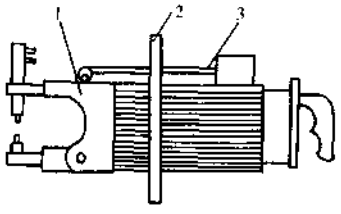


图 2-11 4

1-焊钳部分；2-变压器；3-吊具

悬挂式点焊机与固定式点焊机相比，由于焊钳的强度受到一定限制，电极间的压力不得不减小，并且导线的断面尺寸受到一定限制，不能采用很大电流，因此焊接厚度一般在 3mm 以下。

3）多点焊机

专用的多点焊机具有生产率高，工人劳动强度低，产品质量稳定，便于实现机械化和自动化等优点。多点焊机的馈电方式采用单面馈电或双面馈电两种方式，基本以单面馈电为主，焊件只在一面有压痕，为提高焊点质量，目前多点焊机推荐采用双面馈电。图 2-11-5 为多点焊机焊接回路。

多点焊机的结构形式主要取决于焊件的不同结构。工艺设计时，机身是首先考虑的对象，其结构形式主要有三种："C" 型弓背式、龙门框架式和四立柱式。

多点焊机在运行中，需要传动的对象主要有：

汽车论坛 http://www.qclt.com

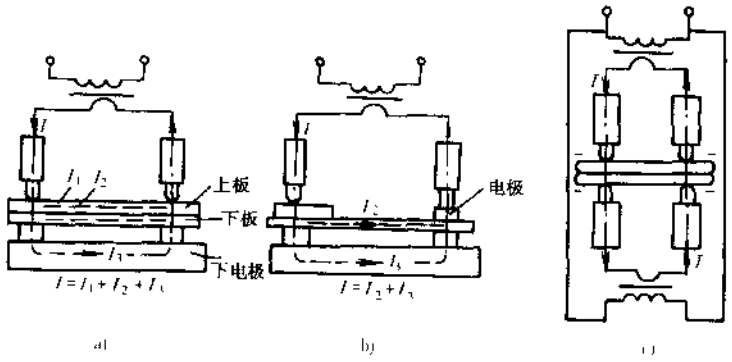


图 2-11-5 多点焊机焊接回路

a）单面双点焊；b）单面单点焊；c）双面双点焊

a. 电极动作与加压——液压或气压；

b. 工作台与夹具动作——液压或气压；

c. 焊件运输动作——电动机——齿轮杠杆等。

多点焊变压器是多点焊机的关键组件，考虑到焊点数较密集与焊点的位置、以及保证各焊接回路的电气相对平衡等因素，故要求变压器小而轻、外形窄长及较高的制造工艺。

焊接工作台用于置放下电极和辅助夹具等，工作台往往要做上升、下降、前进位移或旋转动作。

焊枪要求惯性小，动作灵活。多点焊机焊枪有液压式和气压式两种，大多为液压式，其优点是单位压力高，体积小型化，适应性较广。

多点焊机大多为多变压器供电，根据焊点分布、一次加压还是分次加压焊接等具体要求，选择焊接变压器的供电分配方案。多变压器供电的优点是，变压器和它相连接的焊枪距离近，焊接回路短，功率消耗小，可以对每个变压器单独调节规范，适应在同一焊机上焊接不同板厚，所有焊点可同时焊成或分步焊成，生产效率高，多个变压器可以使三相电路负载均衡。

电阻焊设备从电气性能上分，主要有单相、三相次级整流式；单相交流式；逆变式等。

4）次级整流焊机

①次级为直流时，回路感抗可略。当输出电流相同时，焊机功率因素大大提高，达到0.8～0.9。次级空载电压及所需功率比交流焊机低得多；

②三相负载平衡，线电流比单相交流大为减小；

③焊机不必考虑焊接回路内或回路附近磁性材料对漏抗的影响，可部分采用钢制组件，从而提高焊机刚度。

从焊接工艺性看次级整流焊机有以下特点：

①焊接电流不过零点，焊接区温度上升快，因此特别适用于导热性好的轻合金焊接；

②电流大小与电阻成正比，几乎全部为电阻负荷，焊接回路尺寸对感抗影响很小，电流精度好；

③焊接时在电极臂之间不会产生电磁、交变力，故电极压力稳定，电缆间冲击力小，可提高电缆使用寿命；

④由于增加整流元件，提高了设备的成本，且整流元件要消耗一定的电功率。

图 2-11-6 为一般次级整流焊机的单相全波、三相半波整流、三相全波整流的三种类型。

5）单相工频交流点焊机

产量最高，使用最广，制造成本低，焊机功率范围大。这种焊机是以单相形式由电网直接供电给阻焊变压器，图 2-11-7 为交流单相电阻焊机主电力电路。

①能够输出低电压、大电流；

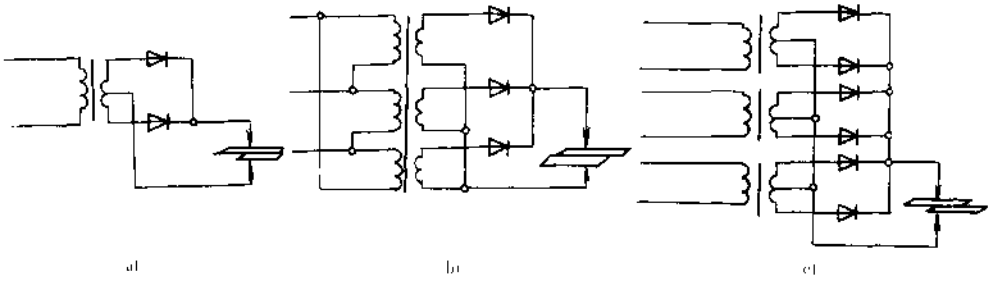


图 2-11-6 次级整流焊机基本形式
a）单相全波整流；b）三相半波整流；c）三相全波整流

②从电网所取功率由接在阻焊变压器上的负载决定，输出功率中的一部分消耗于焊机内部阻抗，另一部分用于工件的有效加热；

③有效的焊接电流和功率受次级回路阻抗的影响，通过减小机臂长度和臂间距离、增加导体截面、回路中减少铁磁材料、增加冷却水流量及减小接触电阻等方式来提高焊接电流；

④由于是单相交流，容量大而负载持续率低，工作时会引起电网的周期性变化。

6）逆变式点焊机

逆变式点焊机在采用机器人点焊时具有显著的优点，可使机器人负荷减轻，操作灵活，更换焊钳十分方便，虽然逆变焊机制造成本比工频焊机高，但运行成本低。其特点：

①焊接电流完全接近直流，热效率高、电极使用寿命提高；

②阻焊变压器重量减少；

③能实现高速控制，控制精度高，便于实现反馈控制使焊接电流恒定；

④三相负荷，供电平衡。

其电路方框图见图 2-11-8。

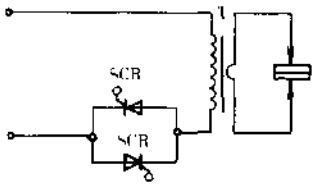


图 2-11-7 交流单相电阻焊机主电力电路

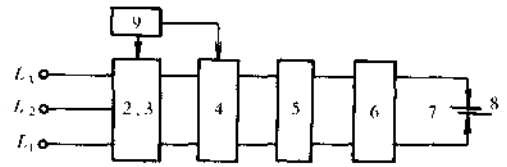


图 2-11-8 逆变式焊机电路方框图
1-电网；2-主电力整流器；3 逆变器；4-断续器；5-阻焊变压器；6-硅整流器；7-次级回路；8-工件；9-控制设备

7）电阻焊机及控制装置

电阻焊的大电流、短时间、高速度的焊接特点，要求控制装置能满足工艺要求的全部控制，具有焊接循环自动化和一般的电流调节功能。电流调整是采用可控硅开关元件，用相位控制来调整电流大小。

根据焊接工艺要求，控制装置还可以增加一些其它功能，焊接主循环共有 10 个主程序，有预热、焊接、回火等三个通电脉冲，脉冲宽度以及两个脉冲间隔和各通电脉冲的电流强度均可独立调节，焊接脉冲还具有电流递增控制，使电流从小值逐渐上升到指令值。

恒电流控制器有网压自动补偿功能及各类型的闭环控制，保证了输出热量稳定或焊接熔核质量稳定，当多台焊机同时使用时，还可进行联锁控制或群控，每台焊机程序通电焊接，避免同时焊接使网压降低过甚而影响焊接质量，并可以降低车间变压器安装容量。

汽车论坛 http://www.qclt.com

点焊工艺规范参数：包括焊接电流 I_w、焊接时间 t_w、电极力 F 与电极工作端的尺寸等。

①焊接电流 I_w：焊接电流是影响析热的主要因素，析热量 W 与电流的平方成正比，在其它参数一定时，焊接区的电流密度应有一个合理的上下限。

②焊接时间：焊接时间同时影响析热与散热，在规定焊接时间内，焊接区析出的热量除部分散失外，将逐渐积累，用以加热焊接区，使熔核逐渐扩大到所要求尺寸。

③电极力 F：电极力影响点焊接触电阻和焊机内部电阻，即影响热源的强度与分布，同时影响电极散热的效果和焊接区的塑性变形。当其它参数不变时，随着电极压力增大，接触面积增大，使焊接区加热减弱。因此在增大电极压力的同时，应相应增大焊接电流。

2.11.2.2 凸焊

凸焊是点焊的一种演变形式，其焊点形成机理与点焊基本相似，但焊点形成过程却有明显的区别。凸焊时，焊件的连接按凸点所限定的接触面积进行，焊点的形状与位置是由凸点本身的几何尺寸、分布状况和规范参数决定的。凸点的存在限制了电流流经焊件的面积，提高了焊接区的电流密度，使焊接区热量集中，有利于实现接头的连接。

凸焊接头形式很多，凸点有圆形、长圆形和环形等。环形凸焊可形成环形强固密封接头。T型和十字型也是凸焊常用的接头形式。

汽车生产中，凸焊工艺方法的应用越来越广。图 2-11-9 所示是螺母凸焊示意图。

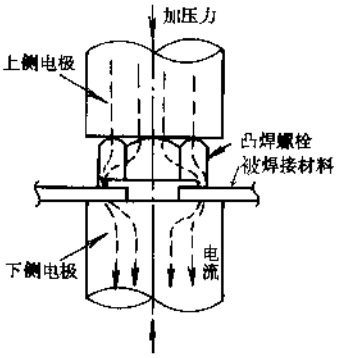


图 2-11-9 凸焊螺母

凸焊的主要优点：

①可同时焊接一个或若干个凸点，如焊接部位小、点距小时，采用凸焊方法也不会产生分流，焊接质量稳定，生产效率高；

②由于凸焊使用平面电极，电极磨损小，产品表面不产生凹陷；

③可以有效地克服焊核偏移，可焊接厚度较大的零件，并有较高的接头强度稳定性。

凸焊规范参数：有焊接电流、焊接时间、电极力等。凸焊由于电极工作面尺寸远大于焊核直径，电极尺寸对电流场分布和焊接过程无明显影响，因此电极尺寸不作为凸焊的工艺参数。

焊接电流、焊接时间对熔核尺寸与接头强度的影响规律与点焊基本相同。电极力与焊接电流、焊接时间相匹配，电极力规范范围比点焊窄，压力过小产生飞溅，过大使凸点瞬时压溃，破坏正常的焊接过程。

2.11.2.3 缝焊

缝焊是用一对滚盘电极代替点焊的圆柱形电极，与工件作相对运动，在焊轮连续或断续滚动并通以连续或断续电流脉冲时，形成了一个个熔核相互搭叠的密封焊缝的焊接方法。原理如图 2-11-10 所示。

缝焊最大特点是能焊接气密、水密、油密等密封容器的焊接部件，如汽车油箱、贮油缸等等。缝焊的接头形式，搭边宽度与点焊类似，但滚盘不象点焊电极那样可做成特殊形状，因此设计缝焊结构时，必须注意滚盘的可达性。

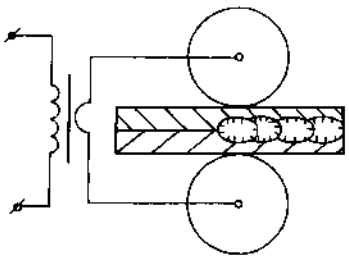


图 2-11-10 缝焊原理图

当焊接小曲率半径工件时，由于内侧滚盘半径的减小受到一定限制，必然会造成熔核向外侧偏移，甚至使外侧板件未焊到。为此应避免设计曲率半径小的工件。

缝焊规范参数包括焊接电流 I_w、焊接时间 t_w、电极力 F、焊枪宽度 b、焊接速度 V_w 及休止时间 t_{off}。

缝焊时，由于点距小、电流分流大，故 I_w 应比相同条件焊件点焊时增大 15%～40%，为减少飞溅，消除内部收缩性缺陷，电极力应相应增大。焊轮对焊接接头质量的影响与点焊电极的影响规律相似。

焊轮宽度直接影响焊接区的电流分布与散热条件，要按要求的焊缝宽度选取。

缝焊速度直接影响焊轮对焊件上各点作用时间的长短，从而影响加热时间、冷却速度及电极力对焊接区结合面上各点作用效果，根据焊件材料与厚度合理选择缝焊速度十分重要。

2.11.2.4 电阻对焊

电阻对焊是将焊件夹紧于电极中，如图 2-11-11 所示，在电极力的作用下，使焊件端面互相压紧，然后通电加热。当焊件端面均匀加热至适当温度，并在其附近温度分布合适后，切断电流，焊接区在顶锻力下变形、冷却，并形成牢固的接头。

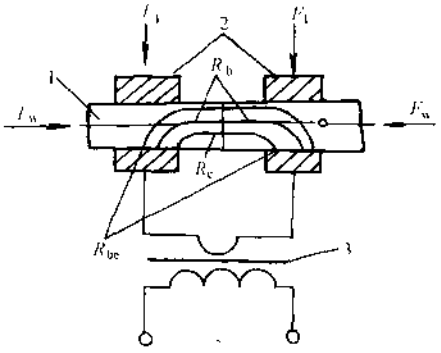


图 2-11-11 电阻对焊原理图

R_b-焊体电阻；F_j-电极夹紧力；F_w-焊接压力；R_c-焊件端面间的结接触电阻；R_{bc}-焊件与电极之间的接触电阻

1-焊件；2-夹具；3-铁芯

电阻对焊时，接头将产生一定的塑性变形，焊接有缩短量，电阻对焊过程也分为预压、通电加热和顶锻三个阶段，为改善加热和减少氧化，焊件端面必须进行严格的准备。

电阻对焊时，在加热阶段的压力称焊接压力，在顶锻阶段的压力称顶锻力。焊接压力影响接触点的析热程度，顶锻力影响塑性变形。焊接过程中有两种加压方式，一种是等压方式，即顶锻力等于焊接压力，另一种是变压力式即顶锻力大于焊接压力。等压式加压机构简单，便于实现，但焊接较大截面和合金钢焊件时效果不如变压力式。采用变压力式时，一般焊接压力较小，以充分利用接触电阻的集中析热。顶锻时采用较大压力，使接头产生较大的塑性变形。

电阻对焊虽有接头光滑、毛刺小、焊接过程简单等优点，其接头的力学性能较低，焊件准备要求高，以前主要用于断面形状比较简单、截面较小的金属形材的对接。近年来随着对焊的焊接性能、强度、材料消耗、环境保护等发展，这种方法部分取代了闪光对焊。

2.11.2.5 闪光对焊

闪光对焊有两种方法：连续闪光对焊与预热闪光对焊。连续闪光对焊由闪光阶段和顶锻阶段组成，预热闪光对焊是在连续闪光阶段加了预热阶段。

图 2-11-12 为闪光对焊原理图。焊件在夹具中夹紧，接通变压器，然后移动可动夹具，在焊件端面轻轻地接触时，即开始通电加热，并有接触点加热所形成的液态金属过梁爆破，随着可动夹具的缓慢推进，过梁也不断地产生与爆破，在蒸汽压力与电磁力的作用下，液态金属微粒不断从接口间喷出来，形成闪光。

在闪光过程中，工件逐渐缩短，端头温度逐渐升高，过梁爆破的速度将逐渐加快，可动夹具的推进速度逐渐加大，在闪光过程结束前，必须使工件整个端面形成一层液态金属层。

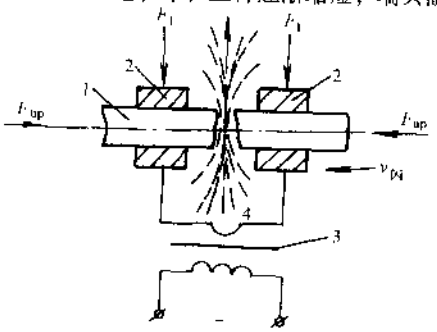


图 2-11-12 闪光对焊原理图

1-焊件；2-夹具；3-铁芯

在闪光结束时，立即对工件施加足够的压力，挤出工件端面的液态金属及氧化杂物，使洁净的塑性金属紧密接触，并使焊接区发生强烈的塑性变形，结合面处交互结晶，形成牢固的接头。

焊后加工包括切除毛刺与多余的金属、校形和热处理工艺等。通常采用机械方法（焊后趁热）切除毛刺与多余金属，焊接大截面合金钢件，多为热处理后切除。有些零件焊后需要校形，如轮辋、刀具等。校形通常在压力机、压胀机及其它专用机械上进行。焊后热处理根据材料性能及焊件要求而定。

闪光对焊工艺广泛用于汽车车轮和飞轮齿环的焊接。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.11.2.6 螺柱焊

将金属螺柱、销钉或类似其他紧固件焊于工件上的方法称为螺柱焊，主要可分为电弧螺柱焊和电容储能式螺柱焊。螺柱焊机一般由焊接电源、控制系统和焊枪三部分组成，还可以配有自动送料装置。汽车生产中主要用于焊接轿车车身上的螺柱和销钉，由于汽车生产具有批量大、流水作业、被焊零件厚度较小的特点，国外开发了具有自动上料功能的专用螺柱焊机。螺柱焊是焊接紧固件的一种快速方法，生产效率高，产品质量容易保证，并能够将螺柱焊接在曲面上（如管子）。

电弧螺柱焊是电弧焊方法的一种特殊应用，焊接时，首先在螺柱与工件间引燃电弧，使螺柱端面和相应的工件表面被加热到熔化状态，达到适宜的温度时，将螺栓挤压到熔池中去，使两者结合成一个整体。靠预加在螺柱引弧端的焊剂和陶瓷保护圈来保护熔融金属，焊后打碎并去除保护套圈。

电容贮能螺柱焊可分为尖端放电式和拉弧式两类。电容贮能螺柱焊对螺栓加工精度要求高，螺柱的焊接处要加工成一定的形状。焊接时电容放出的电能在螺栓端部与工件间产生电弧，将两零件的连接处熔化，达到一定时间后螺柱在焊枪的作用下插入熔池，电弧同时熄灭，冷却后螺柱与工件焊接成一体。由于整个电容放电时间非常短，（一般10ms以内），所以无需对电弧进行保护，不使用保护套圈，简化了焊接工序，也使生产成本低于电弧螺柱焊。

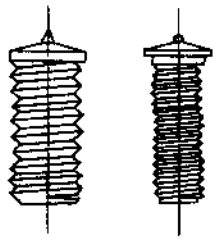


图 2-11-13

由于电弧螺柱焊的电弧加热时间较长，主要用于往厚度3mm零件的表面上焊接螺柱。汽车生产中大多为较薄的零件，为防止焊穿及零件变形，一般采用电容储能式，在有色金属及镀锌钢板上焊接螺栓时也多采用电容储能式螺栓焊。用于电容储能式螺柱焊的螺柱可以由低碳钢、不锈钢、铝和黄铜制成，螺柱的被焊端必须加工成圆形，且一般应带有凸肩。典型的螺柱形状见图2-11-13。

2.11.2.7 手工电弧焊

是用手工操纵焊条进行焊接的一种电弧焊。它具有操作灵活，对生产环境及焊接位置的适应性强、对焊接接头装配要求低、可焊的金属材料广等特点，由于手工电弧焊的熔敷速度低，焊接质量受焊工水平的影响大，焊后焊渣的清理比较烦琐，在汽车焊接生产线上已较少应用。

早期的手工电弧焊设备分三大类：弧焊变压器，直流弧焊发电机和弧焊整流器。直流弧焊发电机和弧焊整流器电弧稳定性好，电网电压波动时对焊接质量的影响小，可以配以碱性焊条焊接重要结构，但直流弧焊发电机电能损耗大、噪声大，现已逐渐被淘汰。近年来随着焊接设备制造水平的提高，晶闸管电源、可控硅电源、逆变电源已得到广泛应用。选择焊机时，应考虑所使用的药皮类型，低氢钠型焊条必须选用直流焊机，以保证电弧能稳定燃烧，酸性焊条交、直流焊机均可使用，交流焊机价格较低。

表 2-11-1 焊条分类

类别	类型名称	代号	
		字母	汉字
1	结构钢焊条	J	结
2	钼和铬钼耐热钢焊条	R	热
3	低温钢焊条	W	温
4	不锈钢焊条	G和A	铬和奥
5	堆焊焊条	D	堆
6	铸铁焊条	Z	铸
7	镍及镍合金焊条	Ni	镍
8	铜及铜合金焊条	T	铜
9	铝及铝合金焊条	L	铝
10	特殊用途焊条	TS	特

手工电弧焊焊条根据其用途分为10大类，见表2-11-1。根据焊条溶渣性质可分为酸性焊条和碱性焊条两大类。碱性焊条与相同级别的酸性焊条相比，其熔敷金属韧性好，含氢量较低，抗裂性强，因此重要结构或强度级别高的材料要用碱性焊条焊接。

手工电弧焊的接头形式有对接、搭接、T型（十字）、角接头四种，应根据产品结构、受力条件等因素来选用。当焊接较厚的结构时，应开坡口以保证熔透。所用焊条直径一般根据焊件厚度来选择（表2-11-2）。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-11-2 焊条直径与板厚的关系

焊件厚度（mm）	<4	4～8	8～12	>12
焊条直径（mm）	≤板厚	φ3～φ4	φ4～φ5	φ5～φ6

焊接电流根据所用焊条直径及焊件厚度来确定，在使用结构钢焊条水平位置焊接时，电流可按下列公式选择

$$I = kd$$

式中：I——焊接电流，A；

d——焊条直径，mm；

k——经验系数，A/mm。

经验系数与焊条直径的关系见表 2-11-3。

表 2-11-3 经验系数与焊条直径的关系

焊条直径（mm）	φ1.6	φ2～φ2.5	φ3.2	φ4～6
经验系数（A/mm）	20～25	25～30	30～40	40～50

焊接层数视焊件厚度来定，一般情况下，多层焊焊缝金属的机械性能好于单层焊。

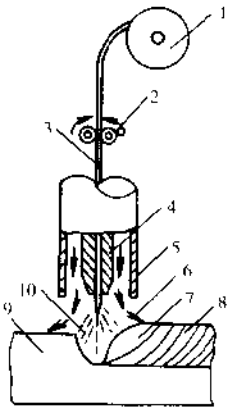


图 2-11-14 熔化极气体保护焊示意图
1-焊丝盘；2-送丝滚轮；3-焊丝；4-导电嘴；5-保护气体喷嘴；6-保护气体；7-熔池；8-焊缝金属；9-母材；10-电弧

2.11.2.8 熔化极气体保护焊

熔化极气体保护焊是应用十分广泛的焊接方法，其焊接热量来自焊丝与工件间的电弧，实芯光焊丝被连续送进焊接区，焊丝金属熔化后进入熔池成为填充金属。焊丝端头、电弧及熔池在焊接过程中由气体予以保护，以避免大气侵入。保护气体通过焊枪中的喷嘴送入焊接区，见图 2-11-14。

熔化极气体保护焊按保护气体种类分 CO_2 气体保护焊、惰性气体保护焊和混合气体保护焊。所用的焊丝有实芯焊丝和药芯焊丝。各种焊接方法的适用性见表 2-11-4。与手工电弧焊相比，熔化极气体保护焊焊接效率高、操作方便，在相同的电流下，焊缝的熔深大

表 2-11-4 熔化极焊接用保护气体及适用范围

被焊材料	保护气体	混 合 比	化学性质	附 注
铝及铝合金	Ar		惰	直流反接，有阴极破碎作用，焊缝表面光洁
	Ar + He	He 通常加到 10%	惰	电弧温度高，适于焊接厚铝板，可增加熔深，减少气孔，如 He 的比例过大，则飞溅较多
钛、锆及其合金	Ar		惰	
	Ar + He	75/25	惰	可增加热量输入
铜及铜合金	Ar		惰	产生稳定的射流电弧；但板厚大于 5～6mm 时，需预热
	Ar + He	50/50 或 30/70	惰	输入热量比纯 Ar 大，可降低预热温度
	N_2			输入热量增大，可降低或取消预热，但有飞溅及烟雾
	Ar + N_2	80/20		输入热量比纯 Ar 大，但有一定飞溅
不锈钢及高强度钢	Ar + O_2	加 O_2 1%～2%	氧化性	用于射流电弧及脉冲电弧
	Ar + O_2 + CO_2	加 O_2 2%，加 CO_2 5%	氧化性	用于射流电弧、脉冲电弧及短路电弧

汽车论坛 http://www.qclt.com

续 I.表

被焊材料	保护气体	混合比	化学性质	附注
碳钢及低合金钢	$Ar+O_2$	加入 $O_2$1%～5%或20%	氧化性	用于射流电弧及对焊缝要求较高的场合
	$Ar+CO_2$	7～80/80～20	氧化性	有良好的熔深，可用于短路过渡及射流过渡电弧
	$Ar+O_2+CO_2$	80/15/5	氧化性	有较佳的熔深，可用于射流、脉冲及短路电弧
	CO_2		氧化性	适于短路电弧，有一定飞溅
镍基合金	Ar		惰	对于射流、脉冲及短路电弧均适用，是焊接镍基合金的主要气体
	Ar+He	加 He 15%～20%	惰	热输入量比纯 Ar 大

于手弧焊，焊接薄板时焊速快、变形小。汽车生产中大部分的电弧焊焊缝是采用熔化极气体保护焊完成的。如车身、底盘类零件的焊接等。熔化极气体保护焊可连续施焊，焊后不需清理焊渣，易实现机械化、自动化生产，汽车生产中的许多专用焊机、自动焊机、弧焊机器人的焊接系统均采用熔化极气体保护焊。例如车轮自动焊机、桥壳自动焊机、传动轴自动焊机、后桥壳机器人焊接工作站、轿车底盘零件机器人焊接工作站等。在各种保护气体中，最常用的是 CO_2 气，因为 CO_2 电弧的穿透能力强，生产率可比手弧焊高1～3倍。CO_2 价格低，CO_2 焊的成本只有手工电弧焊的40%～50%。但由于 CO_2 电弧气氛的氧化性强，容易使合金元素烧损和引起 CO_2 气孔，因此该方法主要用于焊接碳钢及低合金钢，所用的焊丝中应含有一定的 Si、Mn 等脱氧元素，常用焊丝牌号为 H08Mn2SiA。生产中所用的 CO_2 气体纯度应 > 99.17%、含水量 < 1～2g/m³，焊缝质量要求越高，对 CO_2 气体的纯度要求也越高，否则焊缝的塑性将下降、气孔将增多。

普通的熔化极气体保护焊设备由焊枪、送丝机构、焊接电源、供气系统及供水系统（大电流焊接时）组成。焊枪有水冷式或气冷式两种，当所用焊接电流较大时应考虑采用水冷式焊枪。送丝方式有推丝式、拉丝式和推拉丝式三种，推丝式应用的最多，送丝软管的长度一般为3m左右。采用细焊丝（ϕ < 0.8mm）或采用铝、铜等较软的焊丝时，要考虑采用拉丝式的送丝方式。如送丝软管过长（15m左右），为克服焊丝在软管中的阻力，则应采用推拉式。熔化极气体保护焊电源一般为直流电源，有硅整流电源、可控硅电源、晶体管电源和逆变电源。可控硅电源和逆变电源的性能优越，在自动焊机和机器人焊接系统中，现在多采用逆变式电源。电源的功率根据生产中采用的焊接电流来选取，并要留有一定余量。供气系统提供保护气体，气体从焊枪喷嘴中流出的同时对焊枪有冷却作用。气体由气瓶经气体流量计调节成合适的流量后进入焊枪，当在较低温度下焊接时，还应使用气体加热器，将气体预热后再送入流量计。

熔化极气体保护焊焊接工艺参数主要有焊丝直径、电弧电压、焊接电流、焊接速度、气体流量、焊丝伸出长度等。CO_2 保护焊一般采用短路过渡和细颗粒过渡两种熔滴过渡形式，不同直径的焊丝短路过渡时的焊接电流与电弧电压见表2-11-5。焊丝直径根据被焊材料的厚度来选择，适用范围见表2-11-6。焊丝伸出长度过大，焊丝容易发生过热而成段熔断，飞溅严重，焊接过程不稳定；若伸出长度过小，焊接飞溅易堵塞喷嘴，一般取焊丝的伸出长度为：$L=(10\sim12)d$，式中 d 为焊丝直径。CO_2 气体流量取决于接头形式、焊接规范及作业条件。细丝焊

表 2-11-5 不同直径焊丝的短路过渡规范

焊丝直径（mm）	ϕ0.8	ϕ1.2	ϕ1.6
电弧电压（V）	18	19	20
焊接电流（A）	100～110	120～135	140～180

接时，CO_2 流量取 5～15L/min。粗丝大电流焊接时，CO_2 流量取 20～50L/min。焊接速度与母材厚度、焊接规范有关，速度过快会引起咬边、气孔、熔深不够等缺陷，过慢会造成烧穿或晶粒粗大。

当采用氩气或其它惰性气体作保护气体时，可以焊接铝、铜及不锈钢等金属。如轿车车门铝合金内板即是采用熔化极氩弧焊或氩气＋氦气保护焊焊接的，焊铝时氩气纯度要大于99.9%。焊接碳钢及低合金钢时可以用氩气＋氧气或氩气＋CO_2气体保护气体。采用富氩保护焊时，焊接过程稳定，飞溅较小，焊接质量优于CO_2气体保护焊。

表 2-11-6 各种直径焊丝的适用范围

焊丝直径 (mm)	熔滴过渡形式	板厚 (mm)	焊缝位置
0.5～0.8	短路	1～2.5	全位置
	颗粒	2.5～4	水平
1.0～1.4	短路	2～8	全位置
	颗粒	2～12	水平
≥1.6	短路	3～12	立、横、仰
	颗粒	>6	水平

对于板厚小于3mm的材料，采用熔化极脉冲氩弧焊方法更易于操作，采用脉冲电流使平均电流降低，对熔池金属的加热是间歇性的，所以不易造成焊穿和金属流淌。当进行全位置焊时，脉冲氩弧焊比普通氩弧焊容易控制焊缝成形。脉冲氩弧焊的主要工艺参数有基值电流、脉冲电流、脉冲频率、脉宽比等。

2.11.2.9 钨极氩弧焊

钨极氩弧焊是以氩气作为保护气体的钨极惰性气体保护焊，利用产生在钨电极与工件之间的电弧，加热和熔化母材（填充焊丝时也同时熔化焊丝），形成焊缝金属。该方法可以用于焊接碳钢、合金钢、不锈钢、铝合金、铜合金等。钨极氩弧焊可以焊接薄板，例如汽车排气系统的柔性节中的波纹管，是由0.4mm厚度的不锈钢制成，采用钨极氩弧焊生产时质量良好。当焊接厚度大于4mm的焊件时，应当采用多层焊。

钨极氩弧设备一般由焊接电源、焊枪、供气系统、水冷系统组成，自动焊时还有控制装置及运动机构。其焊接电弧的产生一般借助高频振荡器进行非接触式引弧，焊接结束时先熄灭焊接电弧，延时一定时间后再停止保护气体，以便更好地保护焊缝。选择焊接电源应考虑所焊零件的材质及厚度，焊接碳钢、不锈钢时，应采用直流电源。焊接铝、镁及铝合金、镁合金时，为更好地去除氧化膜和保护钨极，应采用交流电源。被焊零件厚度较小时（≤1mm），可采用带脉冲的电源，新型的钨极氩弧焊机可以交直流两用，并可以产生脉冲电流，使其应用范围更加广泛。逆变焊机可以使小电流下的电弧稳定性好，且电弧的刚性强，在薄板焊接时即可实现单面焊双面成形，又可以使焊接变形减小，适合作薄板自动焊的电源。钨极氩弧焊的焊枪起夹持钨极、传导焊接电流、喷射保护气体的作用，根据其焊接时的额定电流来分类，当额定电流大于200A时，要通水冷却。焊枪上使用的喷嘴主要是陶瓷喷嘴，当使用时间较长后必须更换。选择钨电极主要根据所用焊接电流的大小，常用的有纯钨、钍钨、铈钨电极，各种钨极的载流能力见表2-11-7。使用时钨极端头应修磨成圆锥形成球状，并应保持表面清洁。钨极氩弧焊的接头形式常用的有对接接头、搭接接头和角接头三种，坡口形状和尺寸取决于工件的材料和厚度。

表 2-11-7 钨极载流能力（A）

钨极直径 (mm)	直流正接			交流
	纯钨	钍钨	铈钨	纯钨
φ1.0	20～60	15～80	20～80	
φ1.6	40～100	70～150	50～160	20～100
φ2.0	60～150	100～200	100～200	20～100
φ3.0	140～180	200～300		100～160
φ4.0	240～320	300～400		140～220

汽车论坛 http://www.qclt.com

钨极氩弧焊的工艺参数主要有焊接电流、钨极直径、保护气体流量、焊接速度等。不锈钢自动钨极氩弧焊规范参数见表 2-11-8。

表 2-11-8 不锈钢自动钨极氩弧焊规范

电流种类及极性	板厚 (mm)	不填丝对接			填丝对接		
		焊接电流 (A)	氩气流量 (L/min)	焊速 (m/h)	焊接电流 (A)	氩气流量 (L/min)	焊速 (m/h)
直流正接	0.4	15～30	4～8	25～50			
	0.5	30～40	4～5	30～50			
	0.8	70～90	4～5	30～50	60～80	6～8	25～45
	1.0	70～90	4～5	30～50	80～100	6～9	25～45
	1.5	80～110	5～6	20～35	100～130	8～10	25～40
	2.0	120～130	7～8	20～35	120～130	10～12	20～35
	3.0				125～135	14～16	20～25

当被焊材料为铝及铝合金时，主要采用交流电流焊接。不同厚度的铝合金手工钨极氩弧焊规范见表 2-11-9。

表 2-11-9 铝合金手工钨极氩弧焊规范

板厚 (mm)	电流 (A)	钨极直径 (mm)	填充焊丝直径 (mm)	氩气流量 (L/min)
1	60～90	ϕ1～ϕ1.5	ϕ2	4～5
1.5	70～100	ϕ2	ϕ2	6～7
2	90～120	ϕ2～ϕ3	ϕ2	6～7
3	120～180	ϕ3～ϕ4	ϕ2	6～7
4	140～200	ϕ3～ϕ4	ϕ2.5	8～9
6	160～220	ϕ3～ϕ4	ϕ2.5～ϕ3	12～15

使用钨极氩弧焊时，现场应具有良好的通风条件，以免产生的气体伤害人体。

2.11.2.10 钎焊

钎焊是利用熔点比母材低的钎料和母材一同加热，在母材不熔化的前提下，钎料熔化并润湿及填充两母材连接处的间隙，形成钎缝。与熔化焊相比，由于钎焊加热温度较低，焊件的组织和机械性能变化较小，变形不大，接头平整光滑，外表美观，可连接不同的材料，生产率高。但钎焊焊缝的强度比较低，常用搭接接头来提高承载能力。同时钎焊时对工件的装配要求较高，要保证装配间隙。

根据钎料的熔化温度和钎焊接头强度的不同，钎焊可分为：

软钎焊——钎料的液相线温度低于 450℃。

硬钎焊——钎料的液相线温度高于 450℃。

硬钎焊的接头强度比软钎焊高，硬钎料主要有铝基、镁基、银基、铜基、耐热钎料等。软钎料主要是以锡、铅、锌、镉、铋等金属为基的合金。选择钎料时，首先要考虑钎料的熔化温度，一般应低于被钎焊金属熔点几十度以上，其次所选钎料在钎焊温度下要能很好地润湿被钎焊金属，并易于填充钎缝的间隙，钎料应与母材有适当的相互扩散和溶解能力，以获得牢固的接头。

钎焊时大多需要使用钎剂或在真空及保护气氛下进行。某种材料能否被钎焊上，与所选钎剂的性能有

直接关系。钎剂的功能通常可归结为：①清除母材及钎料表面的氧化膜；②抑制母材及钎料的再氧化；③改善钎料的润湿性。钎剂可分为软钎剂、硬钎剂、铝用钎剂和气体钎剂等，软钎剂主要指的是在450℃以下钎焊用的钎剂，它主要分为非腐蚀性钎剂和腐蚀性钎剂两大类。非腐蚀性软钎剂的化学活性比较弱，对母材几乎没有腐蚀作用，松香、胺和有机卤化物等都属于非腐蚀性软钎剂。腐蚀性软钎剂由无机酸或无机盐组成，这类钎剂化学活性强，热稳定性好，能有效地去除母材表面的氧化物，促进钎料对母材的润湿，可用于黑色金属或有色金属的钎焊，但残留钎剂对钎焊接头具有强烈的腐蚀性，焊后必须彻底清洗。氯化锌水溶液是最常用的腐蚀性软钎剂，在氯化锌中加入氯化铵可提高钎剂的活性和降低熔点。碳钢、不锈钢、耐热钢、铜及其合金等都可使用该类钎剂焊接。硬钎剂是指450℃以上进行钎焊用的钎剂，黑色金属常用的硬钎剂的主要组分是硼砂、硼酸及其混合物。该类焊剂的粘度大，活性温度相当高，必须在800℃以上使用，并且不能去除铬、硅、铝、钛等氧化物，同时钎剂残渣难于清除。目前以硼酸三甲脂为主要成分的液体助焊剂已在汽车生产中广泛应用，如汽车车身接缝处的钎焊、管子的钎焊等。该类焊剂焊接时钎料的流动性好，易于填充整个钎缝，对有密封性要求的焊缝焊接效果较好，且焊后没有难清理的残渣。当在硼化物中加入一些碱金属和碱土金属的氟化物和氯化物时，可以改善钎剂的润湿能力和提高钎剂的去除氧化物能力，适宜于在高温下钎焊不锈钢和高温合金。铝的氧化膜致密且稳定，钎焊铝和铝合金时必须采用专门的钎剂。铝用软钎剂通常分为有机钎剂和反应钎剂，有机钎剂的主要组分为三乙醇胺，为提高其活性可加入氟硼酸或氟硼酸盐，其钎焊温度一般不能超过275℃。反应钎剂含有大量的锌、锡等金属的氯化物，加热时在铝表面析出锌、锡等金属，大大提高钎料的润湿能力。铝用硬钎剂的基本组分是碱金属及碱土金属的氯化物，并加入一定的氟化物。

设计钎焊接头时，为使接头与母材等强度，钎焊接头多采用搭接接头，其搭接长度 L 可按下式计算：

$$L=\frac{\sigma_b}{\sigma_\tau}\delta$$

式中：σ_b——母材的抗拉强度；

σ_τ——钎焊接头的抗剪强度；

δ——母材板厚。

间隙的大小是决定钎缝致密性及强度的重要因素，间隙过小，钎料流入困难，在纤缝内形成夹渣或未钎透，导致接头强度下降；间隙过大，毛细作用减弱，钎料不能填满间隙，也会使接头的致密性变坏，强度下降。在钎焊时，焊前必须对母材表面仔细地清除氧化膜、油污等，否则仍不能保证钎焊接头质量。

根据钎焊加热方式及保护方式的不同，形成了多种钎焊方法。①火焰钎焊：是利用可燃气体的高温火焰进行加热的钎焊，所用设备简单，操作灵活，配以合适的焊剂可以用于铜锌、铜磷、银基、铝基钎料等钎焊碳钢、不锈钢、硬质合金、铸铁、铜及铜合金铝及铝合金。氧—乙炔火焰钎焊是最常用的方法，其火焰温度高达3 000℃以上。另外还可以用液化石油气、天然气、煤气及氢气等。②炉中钎焊：是利用加热炉加热工件的钎焊方法，该方法设备投资费用较大，但加热均匀，工件变形小，容易实现自动化生产，焊接质量比较稳定。汽车水箱、冷凝器、蒸发器以及一些密封要求较高的管子接头都可以采用炉中钎焊。焊接时以电加热炉用的最多，根据焊件的保护方式不同分为空气炉中钎焊、保护气氛炉中钎焊及真空炉中钎焊。空气炉中钎焊依靠钎剂去除氧化膜，生产成本较低，但焊件表面会氧化，可以用来钎焊铝及铝合金、铜及铜合金，如汽车散热器的焊接。保护气氛炉中钎焊分为还原性气体炉中钎焊和惰性气体炉中钎焊。还原性气体的主要组分是氢和一氧化碳，可钎焊铜、钢、镍及其合金和不锈钢等。惰性气体炉钎焊通常采用氩气，其纯度应高于99.99%。真空炉中钎焊主要应用于要求较高或钎焊易氧化的活性金属如铝、钛、锆及难熔金属钨、钼、铌及其合金。③烙铁钎焊：是最简便的软钎焊方法，依靠烙铁头的热传导来加热母材和熔化钎料，目前在汽车电器和汽车油箱生产中仍在采用，如使用锡铅钎料配以盐酸加氯化锌钎剂焊接油箱加油管。④感应钎焊：是用工件在交流电的交变磁场中产生感应电流的电阻热来加热的钎焊方法，该方法加热迅速，工件表面氧化比火焰钎焊或空气炉中钎焊少，在汽车生产中汽车散热器主片与蓄水池的焊接采用此方法。焊接时钎料及钎剂在装配时预先安置好，通以感应电流后，钎料熔化流入钎缝中。⑤波峰钎

汽车论坛 http://www.qclt.com

焊：是在熔化的钎料池底部安置一个泵，依靠泵的作用使钎料不断向上涌动，零件在与钎料的波峰接触的同时形成钎焊接头。汽车水箱管子与主片的焊接就采用了该种焊接工艺。⑥电弧钎焊：用电弧热来熔化钎料和加热钎焊处金属，焊接时用钎料作为电极和填充金属，并用氩气作保护气体，该方法加热区小，不易造成零件变形。在汽车车身生产中用来焊接顶盖与风窗立柱的接缝。

不同的金属或非金属材料在钎焊时，对焊接工艺方法或钎剂、钎料的要求不同，其可钎焊性也不同，因此应针对被焊零件特点来制订焊接工艺。①碳钢或低合金钢的钎焊：软钎焊时主要以锡、铅或锡铅基材料作钎料，氯化锌水溶液或氯化锌+氯化氨水溶液作钎剂。为了获得高强度的接头，要用硬钎焊，常用的硬钎料为铜基、银基钎料。铜基钎料以硼砂、硼酸类材料作钎剂；银基钎料以剂101，剂102为钎剂。②不锈钢钎焊：其中含有铬、镍等元素，表面氧化膜组成很复杂，必须采用活性很强的钎剂，露点很低的保护气体或真空度高的钎焊方法。钎焊时可以用锡铅软钎料或铜基、银基、镍基硬钎料，为去除稳定性很强的不锈钢的氧化膜，要采用活性极强的钎剂，如软钎焊时用氯化锌加盐酸的溶液；硬钎焊时，银铜锌镉钎料用含氟化物的剂101或剂102，铜基钎料用含氟化钙的200号钎剂。③铜及铜合金钎焊：铜及其合金的氧化膜较易去除，可以适合很多种钎焊方法。软钎焊时用锡铅、镉基、锌基钎料；硬钎焊时用铜基、铜磷银、银基钎料。

影响钎焊接头质量的因素主要有：接头间隙不合适、钎焊前表面清理不充分、操作不正确、钎料和钎剂的种类及数量选择不适宜等因素，引起的缺陷种类有：部分间隙未填满，钎缝中存在气孔、夹渣、裂纹、钎焊区域钎料表面不光滑等。

2.11.2.11 气焊与气割

气焊是借助可燃气体与助燃气体混合后燃烧产生的火焰将接头部位母材金属和焊丝熔化达到连接的目的，它是一种由化学能转变成热能的熔化焊。气割是利用气体火焰将金属加热到燃点，并在高压氧气流下剧烈氧化、燃烧，生成的熔渣被高压氧气流吹掉。当燃烧发出的热量足以把金属加热到燃点，则加热——燃烧——吹渣过程连续进行，并随着割嘴的移动而形成割缝。由于切割过程是金属在纯氧中燃烧而不是熔化过程，所以能进行切割的金属必须满足以下条件：①金属的燃点必须低于熔点；②金属在燃烧时放出较多的热量；③金属燃烧时产生的熔渣的熔点必须低于金属的熔点，且流动性要好。碳钢可以满足气割的条件，随着碳钢含碳量的增加，气割难度增大。

气焊与电弧焊相比，优点是火焰温度较低，加热温度均匀和加热缓慢，设备简单，移动方便，具有很大的通用性，但其热量不集中，造成焊件变形大，热影响区宽，晶粒粗大，生产效率低。因此在汽车生产线上应用很少，主要用于修复焊接缺陷，如电阻焊或电弧焊造成零件焊穿后的修复；在载货汽车生产中，用气焊对驾驶室顶盖、前风窗接缝处进行焊接；设备维修及工装夹具的制造中，利用气焊焊接较多，特别是薄板焊接和有色金属焊接时具有一定的优势。

表2-11-10 各种金属气焊时采用的火焰

被焊材料	应采用火焰
低碳钢	中性焰或乙炔较多的中性焰
中碳钢	中性焰或乙炔较多的中性焰
低合金钢	中性焰
铜（紫铜）	中性焰
铝及铝合金	中性焰或乙炔稍多的中性焰
铅、锡	中性焰或乙炔稍多的中性焰
不锈钢	中性焰或乙炔稍多的中性焰
黄铜	氧化焰
铸铁	碳化焰或乙炔稍多的中性焰

气割主要用于钢结构制造、工装模具制造。由于其成本低、设备简单、操作灵活方便、机动性强，在钢板下料、装配过程中的余量切割及边缘修整中应用较多。铸件冒口的切割也可用气割完成。

最常用的气焊和气割用乙炔气体作为可燃气体、用氧气作为助燃气体混合燃烧形成的火焰，称为氧—乙炔火焰。当改变混合气体中氧气和乙炔气的比例时，燃烧后形成的火焰的形状、构造和性质也随之改变，通常把火焰分为中性焰、氧化焰和碳化焰三种。各种金属气焊时应采用的火焰见表2-11-10。当气割低碳钢、低合金钢、不锈钢、铸铁等材料时，预

汽车论坛 http://www.qclt.com

热火焰通常均为中性焰。

气焊、气割用器具有乙炔钢瓶、回火防止器、氧气瓶、乙炔减压器和氧气流量计、焊炬和割炬。也有使用乙炔发生器制取乙炔的，其安全性较差，因此汽车生产中已不再使用。焊炬主要是射吸式，其型号及主要技术数据见表 2-11-11。

表 2-11-11 射吸式焊炬主要技术指标

焊炬型号	H01-2	H01-6					H01-12					H01-20				
焊嘴号码	1～5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
焊嘴孔径（mm）	0.5～0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
焊接低碳钢厚度（mm）	0.5～2	1～2	2～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	9～10	10～12	10～12	10～14	14～16	16～18	18～20
氧气耗量（m^3/h）	0.033～0.15	0.15	0.20	0.24	0.28	0.37	0.37	0.49	0.65	0.86	1.10	1.25	1.45	1.65	1.95	2.25
乙炔耗量（m^3/h）	0.040～0.07	0.17	0.24	0.28	0.33	0.43	0.43	0.58	0.78	1.05	1.210	1.5	1.7	2.0	2.3	2.6

气割时氧气的纯度对气割速度及割口的质量影响较大，一般要求氧气纯度不低于99.5%。割炬有射吸式割炬、等压式割炬和焊割两用炬，射吸式割炬应用最广泛。

2.11.2.12 等离子弧焊与切割

等离子弧是一种压缩电弧。由于弧柱表面被压缩得较小，因而能量集中（能量密度可达 $10^5 \sim 10^6 W/cm^2$），温度高（弧柱中心温度 18 000～24 000K 以上），焰流速度大（可达 300m/s 以上），但是等离子弧的电位梯度及径向温度梯度大。

1）等离子弧的形成

等离子弧是通过以下三种压缩作用形成的。

①机械压缩：利用喷嘴孔道直径来拘束电弧的截面，使弧柱能量密度和温度提高；

②热收缩：由于水冷喷嘴温度较低，从而在喷嘴内壁建立起一层冷气膜，迫使弧柱导电截面减小，电流密度提高；

③磁收缩：弧柱电流本身产生的磁场对弧柱有压缩作用（即磁收缩效应）。电流密度愈大，磁收缩作用愈强。

2）等离子弧的类型

等离子弧有非转移型，转移型和联合型三种形式，见图 2-11-15。

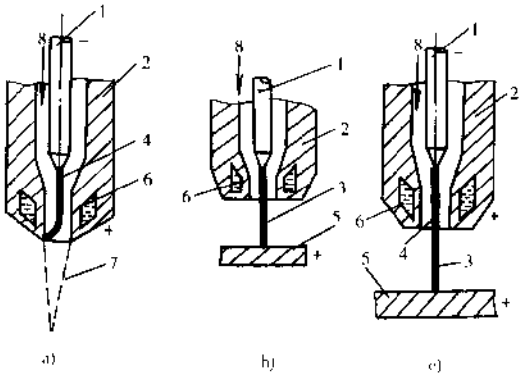


图 2-11-15 等离子弧的类型

a）非转移型；b）转移型；b）联合型

1-钨极；2-喷嘴；3-转移弧；4-非转移弧；5-工件；6-冷却水；7-弧焰；8-离子气

①非转移型等离子弧：钨极接电源负极，喷嘴接电源正极，等离子弧产生在钨极与喷嘴之间，在离子气流的压送下，弧焰从喷嘴中喷出，形成等离子焰；

②转移型等离子弧：钨极接电源负极，喷嘴和工件都接电源正极，可用一套电源，也可用两套电源。转移弧难以直接形成，必须先引燃非转移弧，待离子焰流接触工件，立即过渡形成钨极与工件之间的转移

汽车论坛 http://www.qclt.com

弧，同时切断非转移弧。由于转移弧能把更多的热量传递给工件，所以金属的焊接、切割大都采用转移弧进行；

③联合型等离子弧：工作时，非转移弧和转移弧同时存在，小电流焊接时，都采用联合型弧，有助于电弧稳定，主要用于微束等离子弧焊和粉末堆焊等方面。

3）等离子弧特点

①电弧方向性强、挺度好、散发角小，弧度变化对焊缝成形影响很小；

②能量密度大，一次熔透深度大；

③能量集中，等离子弧截面小，工件受热区域小，热影响区窄，焊接薄板时工件变形小；

④电弧稳定、电弧搅拌性好。

4）等离子弧应用限制

①电弧可达性差，由于枪体比较大，钨极置于喷嘴内，对某些部位的焊接不易实现；

②等离子电弧枪结构复杂、重量大，手工操作人员在操作时不易观察焊接区域；

③当在异常情况下，会在钨极—喷嘴—工件之间产生串接电弧。旁弧与转移弧同时存在，使转移弧电流减小，导致焊接过程不稳定。

5）等离子弧焊基本方法

①微束等离子弧焊：焊接电流为30A以下的熔透型焊接为微束等离子焊，采用联合型等离子弧喷嘴为小孔径压缩喷嘴。焊接电流小至1A以下仍有较好的稳定性。由于微束等离子弧呈很小的针状，所以又称针状等离子弧；

②小孔型等离子弧焊：利用等离子弧能量密度大和等离子流力大的特点，将工件完全熔透并产生一个贯穿工件的小孔，形成完全熔透的焊缝。但穿孔效应只有在足够的能量密度条件下才能形成，板厚增加所需能量密度也要增加，因此对于不同材料的一次焊透厚度是有限制的；

③熔透型等离子弧焊：当离子气流量较小，弧柱压缩程度较弱时，等离子弧在焊接过程中只熔化工件而不产生小孔效应。焊缝成形原理和钨极氩弧焊类似，主要用于薄板单面焊双面成形和厚板的多层焊。

6）等离子弧焊设备

按操作方式可分为手工焊和自动焊两类。按焊接电流的大小可分为大电流等离子弧焊设备和微束等离子弧焊设备。由焊接电源、焊枪、控制部分、气路及水路等部分组成。自动焊还包括焊接小车夹具等。

①焊接电源：等离子弧焊接电源应具有下降特性，大电流等离子弧焊大多采用转移型弧，转移弧和非转移弧可合用一个电源。微束等离子弧焊都是采用联合型弧，由于焊接过程需同时保持转移弧和非转移弧，故要采用两个独立的电源。

②引弧装置：使用大电流焊枪时，可在焊接回路中叠加一个高频振荡器。依靠高频火花在钨极与喷嘴之间引燃非转移弧。微束等离子弧焊枪有两种引燃非转移弧方法，一种是电极尖端与压缩喷嘴相接触引燃非转移弧；另一种引弧方法如同使用大电流焊枪，采用高频引弧。

③焊枪：等离子弧焊枪结构比较复杂。图2-11-16手工等离子弧焊枪结构示意图。

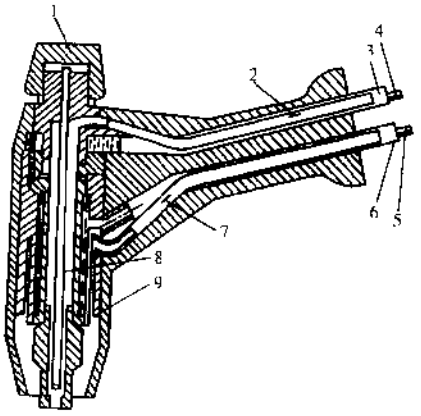


图2-11-16 手工等离子弧焊枪结构示意图

1-绝缘帽；2-离子气进口；3-冷却水出口；4-非转移弧和转移弧导线（接电源负端）；5-非转移弧导线（接电源正端）；6-冷却水进口；7-保护气体进口；8-钨电极；9-保护气罩

7）等离子弧焊工艺

a. 接头形式，通用接头形式有：I形坡口、单面V形和U形坡口以及双面V形和U形坡口的对接接头形式。也适合于焊接角焊缝和T形接头。

b. 焊接工艺参数

①离子气流量：离子气流量增加，可使等离子流力熔透能力增大。离子气流量大小根据焊接电流、焊接速度设定，三者之间要合理匹配。

②焊接电流（转移弧电流）：焊接电流增加，等离子弧穿透能力增加。焊接电流根据板厚或熔透要求选定，电流的大小受喷嘴结构的限制，限定在某一个合适的范围，并与离子气的流量有关。电流越小，电弧越不稳定。离子气流流量越大电弧亦越不稳定。电流越大越易形成小孔焊接，但电流过大易形成双弧、破坏焊接过程。

③焊接速度：在其它条件一定时，焊速增加，焊接热输入减小。随着焊速的提高，必须同时提高焊接电流。如焊接电流一定时，增加离子气流量就要增大焊速；如焊速一定时，增加离子气流量应相应减小电流。焊接速度主要影响工件的热输入量。

等离子弧切割：利用高速、高温、高能的等离子气流来加热和熔化被切割材料，并将熔化金属从割口中吹走，形成连续割口。等离子弧切割速度快，切割过程不是依靠氧化反应而是靠熔化来切割，因此工件获得热量相对较小，工件变形也小，并能切割绝大部分的金属和非金属材料。

8）等离子弧切割方法

①一般等离子弧切割：等离子弧切割可采用转移型或非转移型电弧。非转移弧适宜于切割非金属材料，切割金属材料通常都采用转移型电弧。

②水压缩等离子弧切割：高压水从枪体径向通入，由喷嘴孔道喷出，与等离子弧直接接触。一方面强烈压缩等离子弧，使能量密度提高；另一方面由于等离子弧的高温而分解氢和氧，构成切割气体的一部分。

③空气等离子切割：它采用空气经压缩后直接通入喷嘴，经电弧加热后分解出氧，未分解的空气高速冲刷割口，分解出的氧与工件产生强烈反应，特别适合切割黑色金属，喷嘴可采用气冷却或水冷却。

2.11.2.13 摩擦焊

摩擦焊是利用工件接触端面相对旋转运动中相互摩擦所产生的热使端部达到热塑性状态后迅速顶锻完成焊接的一种压焊方法。该方法焊接质量稳定，生产效率高，费用低，并能焊接异种金属。但由于该方法是靠工件相对旋转产生热量，对于非圆形断面的工件很难焊接，不易夹紧的盘状零件和薄壁管件也很难焊接，并且设备投资大，一般只适合大批量生产时应用。摩擦焊基本步骤如图 2-11-17 所示。

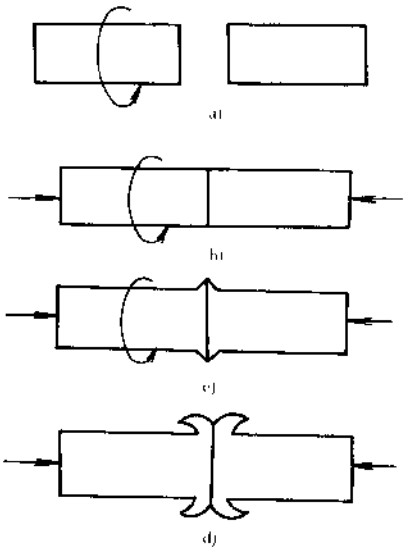


图 2-11-17 摩擦焊基本步骤
a）形成相对转动；b）施加压力两界面接触；c）进行焊接；d）焊接结束

根据工件相对摩擦运动的轨迹，摩擦焊分为旋转式和轨道式两类。轨道式摩擦焊仅用于焊接非圆形断面的工件，其运动轨迹是环形的或直线往复的。生产中大量应用的是旋转式，根据焊接过程中将焊接所需的机械能输入工件的方式，旋转式摩擦焊又分为连续驱动摩擦焊和惯性摩擦焊。连续驱动摩擦焊是最常用的焊接方法，其特点是被主轴电动机驱动的工件在整个焊接过程中都以恒定的转速旋转。惯性摩擦焊是先将飞轮加速到预定的转速，然后使飞轮脱开驱动源，并使两工件接触，在一定的轴向压力下，飞轮的动能在工件接合面处转变为热能，实现零件的焊接，惯性摩擦焊所需主轴电动机功率小，省电能，适合于焊接大断面工件和异种金属。

连续驱动摩擦焊需要控制的工艺参数有①转速：是决定工件间形成相对线速度的参数，通过适当调整加热时间和摩擦压力，转速可以在较宽的范围内变化，钢的线速度可以在 1.3～1.8m/s 变化，在相同功率下，转速偏低将产生过大的扭矩，造成夹持困难。②压力：压力决定了焊接区的温度梯度、驱动功率及缩短量，它包括摩擦压力和顶锻压力，摩擦压力须足够大，使接合面保持紧密接触以防氧化，顶锻压力影响接头冷却时的变形量，低碳钢的摩擦压力在 20～100MPa 范围内，顶锻压力在 40～280MPa 范围内。③加热

汽车论坛 http://www.qclt.com

时间；加热时间不足将引起加热不匀，温度梯度过陡，不能把结合面上的氧化夹杂物挤干净；过长则使缩短量过大，浪费材料，降低生产率。惯性摩擦焊的工艺参数有飞轮转动惯量、飞轮初速、轴向压力。

一台普通的连续驱动摩擦焊机由主轴系统、加压系统、机身、夹头、控制系统，辅助装置等几部分组成。主轴系统的转速高，要传送很大的功率和扭矩，特别是峰值功率和扭矩，同时还要承受较大的轴向压力。加压系统分为两个部分：即加压机构和受力机构。摩擦焊机的加压方式主要有液压、气压、机械加压，现在的摩擦焊机主要采用液压加压。受力机构用来平衡摩擦压力、顶锻压力和摩擦扭矩，防止焊机变形，保持主轴系统和加压系统的同心度。控制系统包括程序控制、工艺参数控制、焊接质量监控三部分。程序控制要完成上料、夹紧工件、摩擦加热、顶锻焊接的顺序动作及联锁保护。新型摩擦焊机大多采用可编程控制器对焊机进行程序控制和工艺参数控制。由于摩擦焊接头的质量目前还没有可靠的无损检测方法，一些焊机上装有质量监控装置，通过监控工艺参数，如主轴转速、摩擦压力、顶锻压力、顶锻时间、位移等来监控焊接质量，靠保证工艺参数稳定来保证焊接质量稳定。有些摩擦焊机还装有自动送料、卸料装置。对于因结构和装配要求必须去除焊接飞边的零件，在焊机上装有自动去除飞边装置，焊接完毕后立即通过车削、冲切的方式趁热去除飞边。

汽车零件中的许多带有对称轴的回转件都适合用摩擦焊生产，如传动轴、后桥壳、车头翻转机扭力管、多联齿轮、排气阀、气门挺杆、半轴等。

2.11.2.14 电子束焊

电子束焊接是利用会聚的高能量电子束轰击工件后，将动能转化为热能，从而使焊件熔化形成焊缝。

电子束作为焊接热源有两个明显特点：①功率密度高，电子束功率密度可达 $10^6 W/cm^2$ 以上。②快速精确的可控性，作为物质基本粒子的电子具有极小的质量和一定的电负荷，通过电场、磁场对电子束可作快速和精确的控制。

1）电子束焊优点

①电子束穿透能力强，焊缝深宽比大，焊接厚板时可不开坡口单道焊。

②焊接速度快，热影响区小，对精加工件可把焊接作最后工序，焊后工件仍有足够高的精度。

③真空电子束焊接，可防止有害气体对金属的污染，因而特别适合活泼金属的焊接。

④电子束在真空中可以传到较远位置上进行焊接，焊接位置的可达性较好。

2）电子束焊的缺点

①设备比较复杂，费用比较昂贵。

②焊接前对接头加工、装配要求较严，要求接头位置准确、间隙小而均匀。

③真空电子束焊接时，被焊零件尺寸和形状受到真空室的限制。

④电子束焊接时产生 X 射线需严加防护。

电子束焊根据焊件所处的真空度可分为：高真空电子束、低真空电子束和非真空电子束焊。

3）电子束焊接设备

包括电子枪、高压电源、控制系统、真空系统、工作台及传动系统等部分。图 2-11-18 是典型的真空电子束焊机的组成。

①电子枪是产生和控制电子束的系统；是发射、形

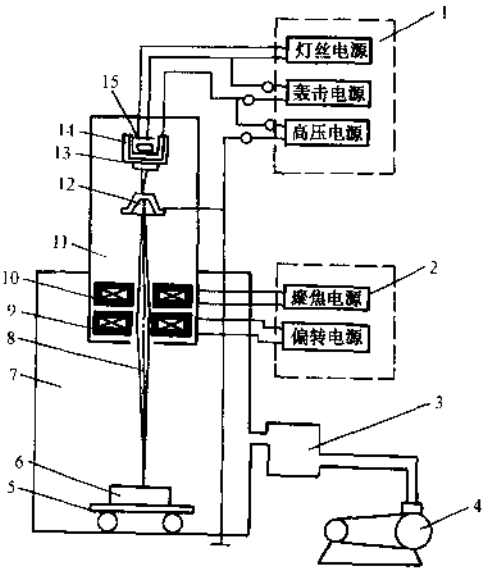


图 2-11-18 真空电子束焊机组成

1-高压电源系统；2-控制系统；3-扩散泵；4-机械泵；5-焊接台；6-焊件；7-真空室；8-电子束；9-偏转线圈；10-聚焦线圈；11-电子枪；12-阳极；13-聚束极；14-阴极；15-灯丝

成和会聚电子束的装置。

②供电电源是指电子枪所需要的供电系统，包括高压电源、阴极加热电源和偏压电源。

③真空系统是对电子枪室和真空室抽真空用的，该系统中大多使用两种类型的真空泵。一种是活塞式和叶片式机械泵，也称为低真空泵；另一种是油扩散泵，油扩散泵不能直接在大气压下起动，必须与低真空泵配合组成高真空抽气组。

④工作室（即真空室）的尺寸、形状应根据焊机的用途和被加工零件来确定。工作台、夹具、转台对于在焊接过程中保持电子束与接缝的位置准确、焊接速度稳定、焊接缝位置的重复精度都非常重要。

大多数电子束焊机采用固定电子枪，让工件作直线移动或旋转移动来实现焊接。大型真空室也可使工件不动，而驱动电子枪进行焊接。

电子束焊接常用的焊接接头是对接、搭接、T型接头，其中对接接头是最常用的形式。电子束的焦点尺寸小，能量密度高，穿透力强，一般可不加填充金属进行对接焊。工件接缝区应精确加工、装配和固定。

为防止焊接金属的污染和避免产生缺陷，减少工作室抽真空的时间，焊前要对工件作清理，去除油污、氧化膜。

电子束焊的规范参数如：加速电压、束流、焊接速度、焦点的位置都能独立调节，其中加速电压对熔深影响最大，束流次之，焊接速度影响最小。

在汽车制造领域应用电子束焊较多的是齿轮组合体的焊接。

由于电子束焊需要高真空的加工室，故其应用受很大的制约，存在以下不足：a. 加工生产节拍过长；b. 被焊工件受工作室大小的限制。因此，近年来，电子束逐渐被具有同等能量密度并可在大气中焊接的激光焊接方法所代替。

2.11.2.15 激光焊接与切割

激光是利用辐射激发光放大原理而产生的一种单色、方向性强、光亮度大的光束，经透射或反射镜聚焦后可获得直径小于0.01mm、功率密度高达$10^5 \sim 10^7 W \cdot cm^2$的光束用来作为焊接、切割和热处理的热源。

1）激光焊接主要特点

①聚焦后的激光具有很高的功率密度，焊接以深熔方式进行。

②激光能反射、透射，能在空间传播相当距离而衰减很小，焊接位置的可达性好。

③热输入低，热影响区小，焊接残余应力和变形小。

④可用于一般焊接方法难以焊接的材料，如高熔点材料、非金属材料等。

⑤激光不受电磁场影响，不产生X射线，不需要真空室，被焊零件尺寸不受限制。

⑥焊接厚度比电子束焊小，焊接一些高反射率的金属还比较困难。

⑦设备投资较大。

2）激光切割的特点

①切割质量好，切缝宽度可小到0.1～0.2mm。切割表面的粗糙度可低到R_a十几微米。

②材料经激光切割后，热影响区宽度仅为0.01～0.1mm，性能不受影响，变形量很小。

③切口几何形状好，切割零件尺寸精度可达±0.05mm。

④切割效率高、速度快。切割时不用夹具固定，并可多工位操作。

3）激光器

用于金属加工领域的激光器，按激光工作物质可分为：气体激光器和固体激光器。这两种激光器可以输出最大的功率，可以利用聚焦的激光射束使材料汽化或熔化。整套的激光焊设备如图2-11-19所示。

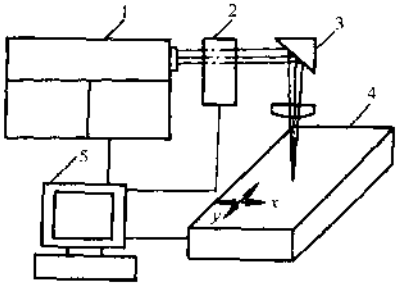


图2-11-19 激光加工设备图

1-激光器；2-光束检测仪；3-偏转聚焦系统；4-工作台；5-控制系统

汽车论坛 http://www.qclt.com

①气体激光器：气体激光器大都是 CO_2 激光器，其激发材料是由氦、氮和二氧化碳组成的混合气体，在目前的连续作业激光器中能够产生的输出功率最大。目前可供应的激光器功率为 80～12 000W，甚至达 20 000W。

500W 以下低功率等级的 CO_2 激光器，主要用于加工塑料和陶瓷。500～2 500W 的 CO_2 激光器主要用于钢板的切割。功率在 2 500W 以上的 CO_2 激光器，主要用于焊接。典型的应用范围是传动件和发动机零件的焊接，如组合齿轮的焊接；也常用于钢板的拼接，如轿车底板的不等厚板联接、汽车车身钢板拼接等。

②固体激光器：固体激光器的激发材料是固体（如红宝石、YAG 或钕玻璃棒）。可以脉动或连续作业。

脉冲作业时，固体激光器的峰值功率可达几千瓦，相当于平均功率几百瓦，因此这种激光器特别适用于精密元件、微电子元件的点焊、缝焊、钻孔和切割。

随着激光光缆的应用，使激光点焊得以广泛的推广。当平均功率为 10～20W·h，可在 1h 内焊接几千个点，并可将激光分流，同时在多点进行焊接。

固体激光器也可用于切割，利用千瓦级功率的短脉冲可以切割复杂图案，切口宽度可以控制在 0.1mm 以下，所有的金属包括反射能力很强的金属都可以进行切割，而非金属材料及厚度较大的材料则有限制。

连续作业大功率固体激光器，可提供 3 000W 以下的激光功率，用光导电缆来传递射束。可用于焊接、切割和表面处理。

③激光加工系统：因为激光器本身并不是一个可以直接使用的工具，所以将激光用于加工工业中就离不开激光系统。完整的激光焊接、切割加工系统由激光器、光束传输和聚焦系统、焊炬或割炬、工作台、电源及控制装置、气源、水源等组成。

4）激光焊接参数及其对熔深的影响

①激光功率 P：激光功率是指激光器的输出功率，没有考虑导光和聚焦系统引起的损失。激光功率对熔深的影响，不同的实验条件下有不同的实验结果，可用下面的实验公式表示（速度一定）

$$h \approx P^k$$

式中：h——熔深，mm

P——激光功率，W；

k——常数，$k \leqslant 1$，典型实验值为 0.7 和 1.0。

②焊接速度：随着焊速增加，其熔深减小。

③光斑直径 d：为了进行深熔焊（小孔焊），激光焦点上的功率密度必须大于 $10^6 W/cm^2$。提高功率密度有两个途径：一是提高激光功率，二是减小光斑直径。减小光斑直径比增加功率更为有效。

④离焦量 ΔF：离焦量是工件表面离激光焦点的距离，以 ΔF 表示。工件表面在焦点以内为负离焦，与焦点的距离为负离焦量，反之为正离焦，见图 2-11-20。离焦量不仅影响工件表面激光光斑的大小，而且影响光束的入射方向，因而对熔深和焊缝形状有较大影响。

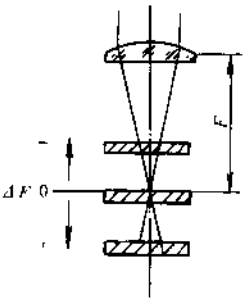


图 2-11-20 离焦量 ΔF

⑤保护气体：激光焊中使用保护气体，除了具有保护焊缝金属不受有害气体侵袭外，还有抑制激光焊过程中产生等离子云的作用，因而它对熔深也有一定影响。He 气具有优良的保护和抑制等离子云的效果，焊接时熔深较大。如果 He 气里加少量 Ar 可进一步提高熔深，Ar 作为保护气焊接熔深最小。气体流量也有一些影响，熔深随气体流量增加而增加，但过大的气流会造成焊缝表面凹陷。

5）激光切割

①激光气化切割：高功率激光使被割材料达到汽化点形成割缝，大多用于非金属材料。

②激光熔化切割：用激光加热使金属熔化，然后吹惰性气体，迫使熔化金属排出形成割缝。主要用于

汽车论坛 http://www.qclt.com

易氧化金属的切割。

③激光氧气切割：类似于氧—乙炔切割，只是激光作为预热热源。用来切割钢、铝、钛等金属材料。

6）切割参数及其影响

①激光功率和切割速度：激光功率与板厚的比值与切割速度成正比，激光氧气切割所需功率比激光熔化切割所需功率小得多。在其它条件一定的情况下，切割速度选择合理，可使切缝表面粗糙度低。

②氧气压力切割氧气压力的最佳值随板厚的增加而减少。

③切割嘴和割炬是影响切割质量和效率的重要因素，选择时可通过试验确定。

2.11.2.16 超声波焊接

超声波焊是通过换能器将电能转化为超声波能传给工件，在焊接处产生超声频率的机械振动，使工件间发生超声频率的摩擦，在接触面处产生大量热量，并在外力的作用下形成接头。超声波焊可适用于多种组合材料的焊接，如同种或异种金属、半导体、塑料及金属陶瓷等等。超声波焊接方法的工作原理如图 2-11-21 所示。

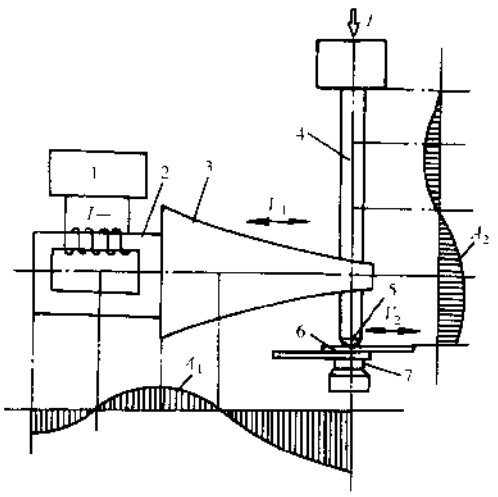


图 2-11-21 超声波焊原理

1-发生器；2-换能器；3-聚能器；4-耦合杆；5-上声极；6-工件；7-下声极；A-振幅分布；F-发生器馈电；F-静压力；V-振动方向

1）超声波焊种类

超声波焊可分为点焊、缝焊、环焊及线焊。

①点焊：点焊机的振动系统可根据上声极振动状况分为纵向振动系统（轻型结构）、弯曲振动系统（重型结构）及轻型弯曲振动系统。

②缝焊：缝焊机的振动系统按其焊盘的振动状态可分为纵向振动系统、弯曲振动系统、扭转振动系统等几类。

缝焊可以获得密封的连续焊缝。

③环焊：环焊方法可一次形成封闭焊缝，采用扭转振动系统。

④线焊：线焊是通过线状上声极获得线状焊缝。

2）接头设计

①设计焊点的点距时不受限制，可以重叠。电阻焊时为防止分流对点距有一定要求。

②对边距没有限制，根据情况可进行沿边焊接。

③接头设计要考虑工件的谐振问题。如果工件沿振动方向的自振频率与引入超声振动频率相等或接近，就可以引起工件的谐振，会造成已焊焊点脱落，甚至工件的疲劳断裂，应改变工件与振动方向的相对位置及工件的自振频率。

3）工艺参数选择

超声波焊接的主要工艺参数是：振幅、振动频率、静压力及焊接时间。焊接所需功率取决于工件的厚度和硬度。超声功率的大小用振幅来表示。

汽车生产中超声波焊主要用于汽车内饰非金属件的焊接，如前门外框总成与前门护边中部总成的超声波点焊；焊接组件与左/右前门护板的缝焊。

2.11.2.17 焊接机器人

汽车行业一直是焊接机器人的最大用户，使用机器人焊接的主要优点是：①可以稳定和提高焊接质量；②提高生产率，改善工人的劳动强度，降低对工人操作技术的要求；③机器人对被焊零件的适应性强，不会因为产品的变化而使设备报废；④机器人的采用使柔性焊接生产得以更好的实现，并为小批量、多品种的自动化生产提供了技术基础。但机器人对夹具及被焊零件的精度要求很高，对于一般没有视觉系统的机器人来说，要获得满意的焊接效果，点焊机器人的重复精度一般要达到 ±1mm，弧焊机器人的重复

精度一般要达到±0.5mm 因此冲压件的质量必须严格受控，至少每批工件的尺寸精度应一致，夹具要能保证工件装夹后的精度满足机器人的工作要求。

焊接机器人主要分为弧焊机器人和点焊机器人两大类，弧焊机器人如图 2-11-22 所示。图中 1 机器人本体，2 机器人控制器，3、4 机器人示教盒及操作台 6、7 机器人接口箱及焊接电源 9、10、11、12、13 焊丝送丝机构及焊枪。14 保护气体气瓶。点焊机器人的主要组成部分有 1 机器人本体，2 机器人控制系统，3 焊接系统，包括焊接变压器、焊钳、焊接控制器、焊接冷却水循环装置，4 机器人、焊钳供气及稳压装置，5 辅助装置，包括电极自动修磨器、焊钳自动更换装置等。

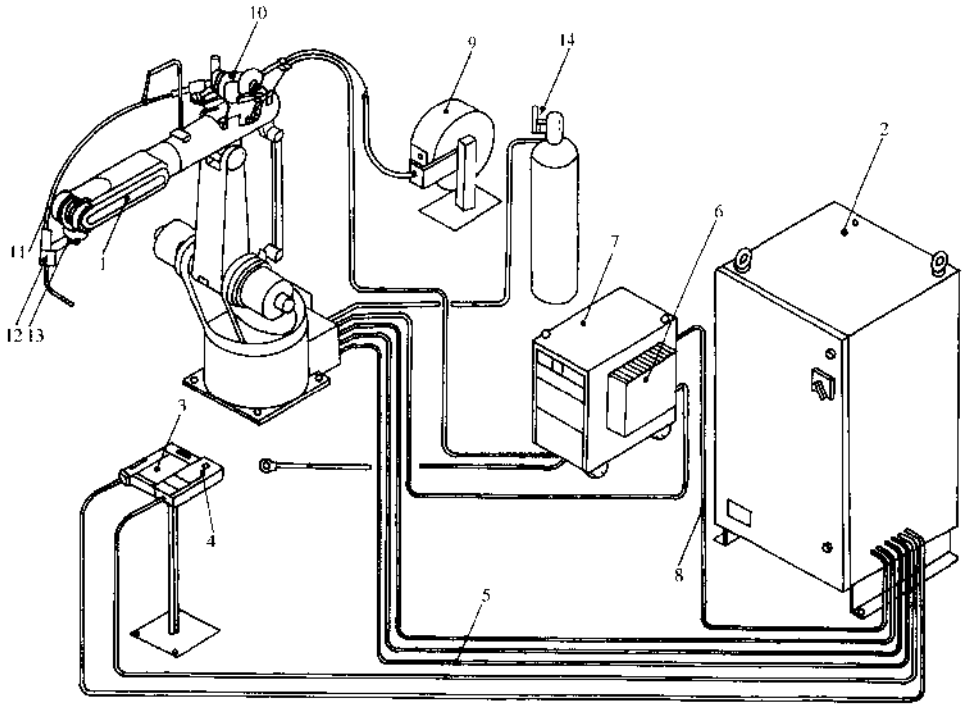


图 2-11-22 弧焊机器人示意图

1-机械人本体;2-机械控制器;3、4-机器人示数盒及操作台;5-辅助装置;6、7-机械人接口箱;8-电缆;9、10、11、12、13-焊丝送丝机构;14-气瓶

汽车行业机器人的应用方式主要有自动化生产线和机器人工作站两种。在汽车车身生产中，底板、侧围、驾驶室主焊线的焊接应用点焊机器人组成自动焊接，当与自动送料、随行夹具及定位装置、物流及存贮装置、安全保护装置等一同应用时，可以组成全自动的焊接生产线。点焊机器人焊钳与焊接变压器的配置有 a) 分离式：其特点是阻焊变压器与钳体分离，钳体安装在机器人手臂上，焊接变压器悬挂在机器人上方，并可在轨道上随机器人手腕的移动而移动，焊钳与变压器之间用二次电缆相联接，其优点是减小机器人的负载，运动速度高；缺点是需用较大容量的焊接变压器，能量损耗也大。b) 内藏式：其特点是将焊接变压器设计在机器人本体内，与焊钳相连的二次电缆可以在机器人内部移动，该方式可以减短二次电缆的长度，减少变压器容量，但使机器人本体的设计变得复杂。c) 一体式焊钳：是将焊钳与焊接变压器设计成一体，共同固定在机器人手臂末端的法兰上，其优点是省去了粗大的二次电缆，节省能量。但由于含变压器的焊钳重量显著增大，对机器人的承载能力要求较大，机器人活动时焊钳易产生较大的惯性力使机器人过载。因此设计选择机器人或焊钳时要使机器人的负载能力大于焊钳重量，并尽量使焊钳的重心与机器人手臂轴心线间的距离减小。

机器人焊钳要充分考虑机器人的工作特点，为减轻由于被焊零件位置变化及电极尺寸变化对焊接过程

造成的不利影响，焊钳应设计成具有自动补偿功能的浮动机构；为防止机器人在焊钳电极与工件粘连的状态下运动而损坏机器人及工件，焊钳应具有粘连报警功能。为保护现场人员的安全及机器人的正常运行，还应在焊钳或焊枪上装有防撞击报警装置。

对于单个工件的焊接生产，一般采用机器人工作站的方式，机器人与变位机（卡具）、安全防护装置共同组成一个系统，载货汽车后桥、轿车底盘零件中的后梁、副车架、下摇臂、前悬挂等都适合利用机器人工作站来完成焊接工作。最常用的机器人具有6个自由度，当将其安装在导轨上或与变位机配合使用时，可以得到更多的自由度，大大提高了机器人的工作范围，并可以焊接很复杂的零件，如汽车发动机的排气管。也可以两台机器人配合起来完成取件、定位、焊接等一系列工作。

弧焊机器人的承载能力小于点焊机器人，常用的有6kg、10kg、15kg型，配备相应的焊接电源可以完成CO_2、MIG、TIG焊及各种金属的切割。这类机器人对焊件的定位安装精度要求更高，必须保证小于0.5倍的焊丝直径，否则若不采用电弧自动跟踪技术或视觉系统，将难以保证焊接质量。

焊接机器人的编程与操作一般通过示教的方式，即通过示教盒的操作键确定焊钳（枪）的到达位置、运动方式、摆动方式、焊接姿态以及各种焊接参数，同时还可设定与机器人相匹配的周边设备的动作状态。示教完毕后，存入机器人控制系统，机器人将按示教的程序进行动作和焊接。使用机器人时，安全防护设施是不可缺少的，机器人应在一个被隔开的空间内工作，以防机器人对人员造成伤害。

2.11.2.18 汽车车身柔性焊装生产

①车身焊装生产线的组成：车身焊装生产线空间作业内容复杂且自动化程度较高，它由总成线和许多分总成线组成，如轿车白车身焊装线通常是由以下部分组成：a. 车身总成焊装线；b. 底板总成焊装线；c. 侧围总成焊装线；d. 门盖焊装线。根据生产节拍，自动化程度及生产方式等的不同，每条线又可分为若干个工位。各总成线或各工位之间部件的传递又可有机器人传递、输送线传递、空中吊具或地面输送小车、人工搬运等多种形式。

②车身焊装生产线的发展：车身焊装生产线发展经历以下阶段：50～60年代手工焊装线：车身焊装工作量全部集中在几套装焊夹具上；70年代半自动化、刚性焊装生产线：采用半自动大量流水生产方式组织生产，生产一个车型一般有2～3条生产线，在装卸、焊接、部件输送等方面实现部分机械化和自动化；80年代后期全自动柔性化焊装生产线：一条生产线可同时生产若干个车型品种，生产一个车型的焊装线多达8～10条，一条生产线工位最多的可达近20个，长度几十米至上百米，而且可实现装卸、焊接、部件输送、操作控制等全自动无人操作（UMS）。这种生产线车身焊接质量好，生产效率高，柔性强，工人劳动强度低。

③焊装线设计柔性化的特点：焊装线设计有许多自身特点。如车身产品左/右部分多呈对称分布，每个工位的移动、输送装置等多为通用部件，而相关工位处于同一或相近位置的夹具，由于截面形状相同或相近，只需对夹具的定位件和夹紧件作适当修改即可，因此焊装线设计趋向通用化、系列化、标准化，设计方法也出现组合化，如常用夹具中的支座、气缸及各类气动元件、手动和气动夹紧器，焊钳及直线导轨、行程开关及其安装板等均为参数化通用件或外购件，设计人员只需设计与产品相接触的定位块、压紧块以及过渡板，其余元件均可直接选用，见图2-11-23。

总成和分总成夹具应充分体现柔性化设计思想，考虑多品种系列车型混流生产等因素。各个定位夹紧单元安装到组合框架上，框架由一层平台组合，需要柔性生产时，可将中间固定台改制成滑动导轨，这样既可简化设计改造又可满足混流生产，见图2-11-24。

采用先进的通用化、模块化组合设计充分体现了焊装设计的柔性化功能。在焊装生产线的设计中，标准件、外购件及标准模块等越来越多。随着计算机CAD技术的开发应用，建立起通用件、标准件及外购件的参数化库，供设计时以模块方式直接调用标准零部件和外购件插入设计图纸，加快了设计速度。另外，大量的标准件和通用件也有利于生产制造。

④柔性焊装生产线结构：柔性车身焊装线（FBL）在国外已成为车身生产线的主要方式，结构上多采用贯通式焊装生产线。贯通式焊装生产线是指工件的定位夹紧系统与工位间输送系统呈分离状态，其功能

汽车论坛 http://www.qclt.com

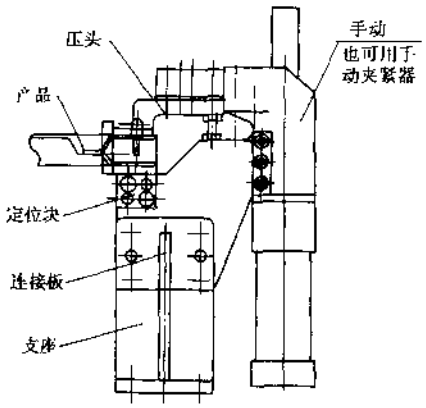


图 2-11-23 定位夹紧机构

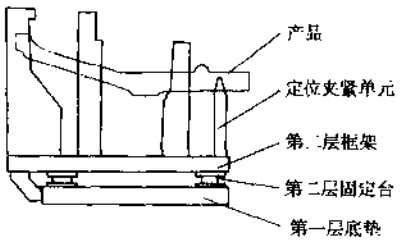


图 2-11-24 夹具柔性功能设计

是将车身移送至下一工位。柔性贯通式焊装生产线一般适用于同一车型不同品种的车身生产。因为车身结构类似，在许多位置上产品截面数据相同或相近，便于设计夹具和焊借。

贯通式生产线主要包括：定位夹紧系统、工位间的输送系统及输送机构的升降系统。

平头驾驶室柔性焊装线实例见图 2-11-25。

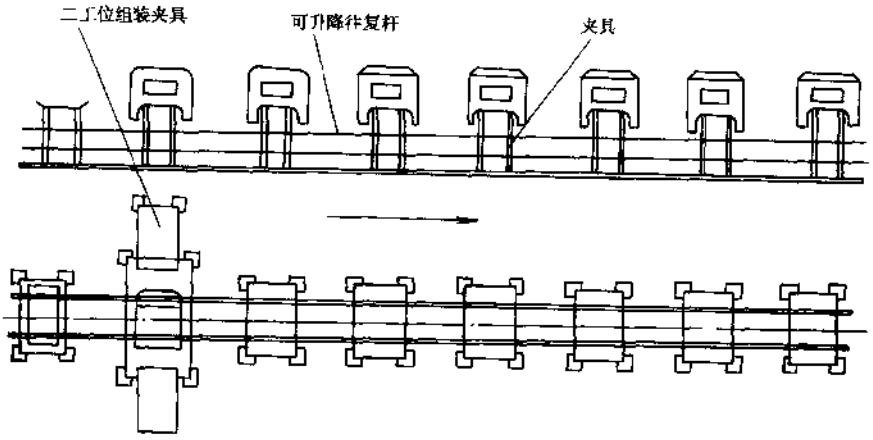


图 2-11-25 平头车驾驶室总成柔性焊装线

在一套焊装夹具上要同时满足 FK、FM、FP 三种系列宽度车型的混流生产，年产 5.5 万辆，全线有 8 个工序，工序间距 4m，节拍 4min，全长 34m，白车身的工位夹紧及柔性功能由 8 套固定焊接夹具实现，工序间输送方式采用可升降式往复杆传动机构，并为工序自动焊接配备 12 台自动焊装装置，为工序焊接夹具配一个液压系统，全线的焊夹、传动机构、自动焊接装置之间动作的匹配和互锁全用电气控制。

从产品结构可以看出，FK、FM、FP 三种车型的高度、长度、结构形式完全相同，均由地板、前围、后围及顶盖四大部分组成，所不同的是每部分宽度尺寸发生变化。以 FK 驾驶室为基本型，FM 型和 FP 型在基本型基础上加宽 200mm 和 310mm。产品的系列化为柔性混流生产奠定了基础。

焊装线柔性设计中，采用先进的通用化、模块化设计方法，将改造部分分块设计，模块越大越好。每个模块装配好后可先进行初调，待现场安装时再进行几大模块的组装精调。

针对 K、M、P 三个车型只是宽度加宽这一特点，将各定位夹紧机构分成固定模块和可移动模块设计，即中间处定位夹紧机构固定不变，将变化部分的定位夹紧机构安装在两侧移动滑台上，气缸动作，滑台位

汽车论坛 http://www.qclt.com

移，带动定位夹紧元件做位置变换，滑台是由高精度滚动直线导轨和焊接框架构成，每一位置均靠另一气缸锁紧限位，从而保证位置变换的准确率，采用双行程驱动气缸即可得到三个不同的位置，来实现K、M、P柔性生产。为此设计的滑台及限位机构见图2-11-26。

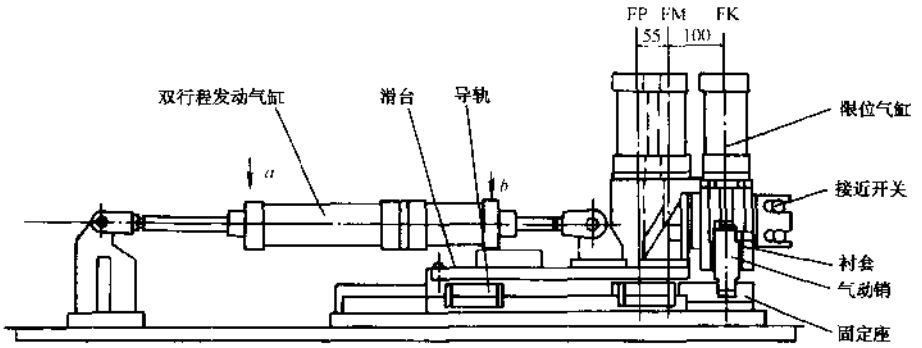


图2-11-26 滑台及限位机构

系列车型的柔性化生产方式是近年来世界各大汽车企业的发展趋势，也是国内汽车行业的努力方向。

2.11.2.19 材料焊接

为提高汽车材料的耐腐性和材料的轻量化，镀锌钢板、高强度钢板、减振钢板、铝合金板等材料的应用范围在不断扩大，相应的焊接技术也在不断变化。

减振钢板是通过在薄钢板中间夹入树脂的方法而具有在钢板内吸收振动的减振特性的钢板，已开始在汽车发动机油底壳和发动机室壁上应用。由于减振钢板夹层中的树脂不导电，阻碍了两张外皮间电流的导通。因而在进行电阻点焊时，需采用特殊工艺，如另外造成一个把两层外皮短路的回路先将树脂通电烧掉，当焊接第二点时，采用分流电流将第二点焊上。另外一种方法，通过在树脂中加入球状铁粉之类的导电粉末，可以进行与普通钢板同样的电阻点焊。在进行这一开发时，首先要确保点焊时的良好导电，并避免由于导电粉末的微小接触而引起的焊接飞溅。图2-11-27表明导电粉末的大小与添加量对焊接性的影响。

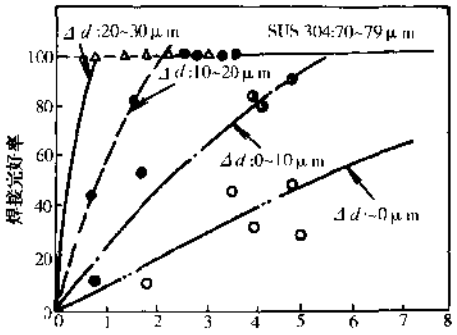


图2-11-27 导电粉末的大小与添加量对焊接性的影响

2.11.2.20 铝合金板的电阻点焊

铝合金点焊时，由于铝粘附在铜电极上，会影响电极的连续点焊数。对汽车焊接来说，采取与钢板的同样评定标准，对连续3000点焊接的接头强度、熔核直径进行分析。所焊板材1.0mm厚，电极为铬铜圆锥形电极。

试验表明与镀锌板连续点焊的情况基本相同。

铝合金点焊熔核内出现的气孔与焊接飞溅有直接关系，由于铝易产生坚硬的氧化物，焊接时形成飞溅，产生空穴即形成气孔。

铝合金点焊产生的裂纹，是由于在熔核生成时，以伴随熔融金属凝固而产生的收缩为原因的凝固裂纹。凝固温度范围宽的合金系易产生裂纹，焊接时需采取一定的工艺措施。

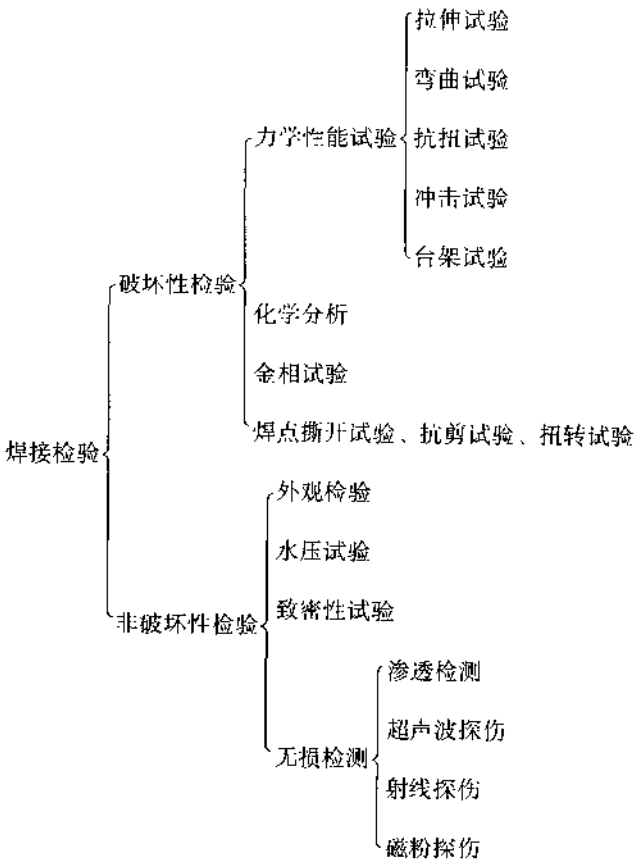
汽车论坛 http://www.qclt.com

2.11.3 焊接质量检验

汽车零件的焊接质量检验应包括：①组成零件的母材是否正确，焊接材料选择是否合理。②零件的装配尺寸是否正确，能否满足下道工序的生产要求。③焊接工艺方法是否与产品设计相一致，焊缝或焊点位置、尺寸、长度、数量是否与产品规定的相同。④焊接质量：包括外观质量和内在质量，是否有焊接缺陷。⑤焊接接头能否满足结构的特殊要求，如密封性、耐蚀性、耐磨性等。⑥强度是否合格。

汽车生产中熔化焊常见的缺陷有：裂纹、气孔、夹渣、未熔合、未焊透形状缺陷、咬边、焊穿、焊偏、漏焊等等。其中裂纹、未熔合、漏焊、焊偏，焊穿对结构的性能影响较大，一般不允许存在。电阻焊常见缺陷有：焊点尺寸及数量不符合要求、焊接工艺方法不符合设计要求、焊点间距误差过大、压痕深度过大、焊接变形过大、熔核直径小于产品规定、凸焊强度不够以及缝焊密封性不好等等。

焊接接头常用的检验方法分类如下：



力学性能试验时一般要按照有关标准规定的尺寸、结构、焊接方法等做成试板，采用试验设备得到所需的数据。通过力学性能试验可以得到一些定量的数值，便于分析比较。但往往试板在试验时的结构、受力状态等与焊接结构的实际情况差别很大，在有些情况下，不能真实反映焊接结构的性能和质量。如果在针对某一具体结构所设计制造的试验台上做台架试验，就能较好的反映该结构的设计合理性和焊接质量。金相试验是对焊接结构内在质量检查的一种方法，包括焊缝、热影响区、母材的显微组织分析及焊接接头质量分析，例如检查接头各部分组织特征、结晶特征、接头熔合情况、缺陷情况等，根据金相分析的结果来调整焊接工艺方案及规范参数。金相试件应从工艺试片或焊件上切取，取样的数量及部位应按有关规定或需要来确定，其原则是切取的试样应能反映焊接缺陷和具有代表性的接头组织。电子显微技术的发展使

汽车论坛 http://www.qclt.com

金相分析技术达到了一个新水平，可以进行接头微观组织、断口形貌、相变及形变行为等方面的研究。电阻焊由于多为薄板复杂结构，并且生产时主要靠设备及工艺参数的稳定来保证质量，人为因素相对较少，在现场和试验室中普遍采用撕破检验。检验时试件的材料、厚度、表面状态及焊接工艺参数均与实际生产时完全相同，检验时首先看外观质量是否合格，如压痕深度、表面缺陷、焊点直径、焊点数量、焊点间距等方面，外观检查完毕后撕破焊件，检查留在一侧板材上凸起的熔核，其直径或焊缝宽度应满足检验标准的要求。

汽车产品焊接质量检验的一个主要方面是装配质量的检查，如焊后零件的轮廓尺寸、曲面形状、变形情况、点焊密封胶涂胶质量、孔位是否正确、装配间隙均匀情况，是否有错装和漏装的零件、表面是否清洁、有无损坏等等，这些都对整车质量有较大影响，需要在生产管理及制造技术上引起重视。

无损检验以不损坏被检测对象的使用性能为前提，通过对焊件进行有效的检测和测试，来评价它的完整性和物理特性。对零件进行无损检验的常用方法及其应用特点见表 2-11-12。

表 2-11-12 无损检验的方法

检验方法	能探出的缺陷	可检验厚度	灵敏度	判伤方法
着色检验 荧光检验	贯穿表面的缺陷（如裂纹、气孔等）	表面	宽度小于 0.01mm、深度小于 0.03～0.04mm 的缺陷检查不出	直接根据着色溶液在吸附剂上的分布，确定缺陷位置，缺陷深度不能确定
磁粉检验	表面及近表面的缺陷，如裂纹、未焊透。被检表面最好与磁场正交	表面及近表面	比荧光法高；与磁场强度大小及磁粉质量有关	根据磁粉分布情况判定缺陷位置，缺陷深度不能确定
超声波探伤	内部缺陷	厚度上几乎不受限制，下限最小可达 2mm	能探出直径大于 1mm 的气孔、夹渣、探裂纹较灵敏 探表面或近表面缺陷灵敏度较差	根据荧光屏上讯号的指示，可判断有无缺陷及其位置
X 射线探伤 γ 射线探伤 高能射线探伤	内部缺陷	与射线能源类别有关	缺陷尺寸大于焊缝厚度的 1%～2% 一般约为焊缝厚的 3% 可检出尺寸小于焊缝厚度 1% 的缺陷	从底片上直接判断出缺陷种类、大小和分布

每种探伤方法都有一定的局限性，应根据被检零件的空间位置、表面及底面的状况来选用，有时同时采用几种方法对同一部位进行探伤。

汽车车身焊接总成尺寸的检验，国内已大量采用检验夹具，目前正逐渐将三坐标测量仪、激光在线检测装置应用到汽车生产线上，用来对车身装配焊接精度进行检查。

（撰稿人：许嘉平 刘国山 尤 莉）

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.12 联 接

2.12.1 联接的分类

根据被联接件的相互位置在工作时是否能够变化，联接可以分为动联接和静联接两大类。在汽车工程中，“联接”实际上多指静联接而言。

根据拆开时是否需要把联接件或被联接件破（毁）坏，联接分为可拆和不可拆两大类。可拆联接包括螺纹联接、键及花键联接、销联接等。不可拆联接包括铆钉联接、焊接、粘接等。过盈联接既可做成可拆的，也可做成不可拆的。

从传递载荷（力或力矩）的工作原理，联接分为摩擦的和非摩擦的两大类。有的联接既可做成摩擦的，也可做成非摩擦的，如螺纹联接。有的联接同时靠摩擦和变形来传递载荷，如斜键联接中的楔键联接。本节重点介绍在汽车工程中使用最多的螺纹联接和过盈联接，简单介绍粘接及最新联接技术——压接。

2.12.2 螺纹联接

2.12.2.1 螺纹联接的重要性

在汽车产品（整车或总成）的装配过程中，用于拧紧螺纹联接件的工作量占很大的比例。一辆普通的轿车就需要 2 000 ~ 3 000 个螺纹联接件，其中大约有 300 个与汽车的安全性能有直接的联系。一台 V8 发动机采用螺纹联接超过 100 处，其中一些关键联接处的联接质量直接影响到发动机的整机性能和质量。汽车的操作系统或制动系统不能正常工作，汽车在行驶时就有可能会出现交通事故。联接这些零部件（被联接件）的螺栓、螺母或螺钉（螺纹联接件）出现松动或不能提供正常的预紧力，或者相关联的螺纹联接组在各联接部位所提供的预紧力分布不均匀，会直接影响到汽车整车的装配质量和性能。从经济的角度来看，螺纹联接件本身的价值是有限的，但采用它们做为联接的整个产品如汽车、飞机、人造卫星甚至宇宙飞船等，却可能是非常重要和昂贵的。螺纹联接失效时，往往损坏的可能是被联接的整个产品。因此，了解螺纹联接的性质，采用正确的螺纹拧紧方法，对于提高汽车装配质量和性能具有非常重要的意义。

2.12.2.2 螺纹联接的预紧力与拧紧扭矩的关系

下面以螺栓螺母联接为例，对螺纹联接件进行拧紧时的受力分析，并找出预紧力与拧紧扭矩之间的关系式。

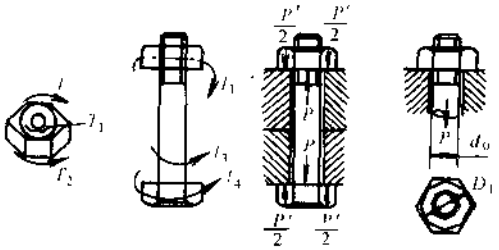


图 2-12-1

图 2-12-1 为拧紧时联接中各零件的受力状态示意图。拧紧螺母时，必须施加拧紧扭矩 T 来克服螺纹副间的摩擦扭矩 T_1 和螺母与被联接件支撑面的摩擦扭矩 T_2。螺栓受到的摩擦扭矩 T_1 与螺栓头部支撑面扭矩 T_3 和夹持扭矩 T_4 相平衡。即有 $T = T_1 + T_2$，$T_1 = T_3 + T_4$。

由于摩擦扭矩 T_1 的存在，使螺栓受到预紧拉力 P、被联接件受到预紧压力 P'（$P = P'$）的作用。根据《机械原理》教材，我们可以得出如下关系式：

$$T = T_1 + T_2 = 10^{-3}\{[\tan(\lambda+\rho)]\cdot P\cdot d_2/2 + [(D_1^3 - d_0^3)/(D_1^2 - d_0^2)]P\cdot f/3\}$$

若设 $K_T = \{d_2\cdot\tan(\lambda+\rho)]/2d + f[(D_1^3 - d_0^3)/(D_1^2 - d_0^2)]\}/3d$

则螺栓的预紧力 P 与拧紧扭矩 T 之间的关系可表示成下式：

$$P = T/(K_T\cdot d\cdot 10^{-3}) \tag{2-12-1}$$

汽车论坛 http://www.qclt.com

式中：P——螺栓的预紧力，N；

T——螺栓的拧紧扭矩，N·m；

K_T——拧紧扭矩系数；

d——螺栓的公称直径，mm；

d_2——螺纹的中径，mm；

λ——螺纹的升角；

ρ——螺纹的当量摩擦角，可由式 $\rho=\arctan(f'/\cos(\alpha/2))$ 计算；

α——螺纹的牙形角；

f'——螺纹副间的摩擦系数；

f——螺母与被联接件支撑面间的摩擦系数；

D_1——螺母内切圆直径，mm；

d_0——螺栓孔直径，mm。

从公式（2-12-1）可以看出，对同样一组螺栓螺母联接，由于摩擦系数 f 和 f' 各不相同，而会改变拧紧扭矩系数 K_T 值的大小，要达到某一规定的预紧力 P，对不同的螺栓螺母联接，所需要的拧紧扭矩 T 是不同的。反之，对不同的螺栓螺母联接，如施加相等的拧紧扭矩 T，在各联接处所产生的预紧力 P 也是不同的。由于被联接件受到的预紧压力 P' 与螺栓的预紧力 P 大小相等，方向相反，所以当被联接件所受的最大工作载荷 Q 若大于螺栓的预紧力 P 时，被联接件之间就会出现间隙，联接失效。

2.12.2.3 螺纹联接及预紧力的控制方法

螺纹联接的目的就是要使螺纹联接件被拧紧之后，能提供给被联接件一定的预紧压力，使被联接件在最大工作载荷作用下，联接整体不要发生松动，而对于压力容器则不要出现泄漏现象。在螺纹联接件的实际拧紧过程中，预紧力 P 无法或很难直接测量，为要控制预紧力，人们在生产实践中，采用间接控制拧紧力矩和拧紧转角的方法。下面介绍三种螺纹联接的拧紧方法。

1）扭矩控制法

扭矩控制法就是在采用螺纹联接件进行装配联接的过程中，直接控制螺纹联接件的最后拧紧扭矩值来控制预紧力。这种方法简单、直观，对拧紧设备（或工具）的要求低，价格便宜，是一种广为采用的拧紧方法。这种拧紧方法也存在缺陷，在重要联接部位的应用受到限制。公式 2-12-1 示出，预紧力 P 不仅与拧紧扭矩 T 有关，而且还受到拧紧扭矩系数 K_T 值大小的影响。在实际生产中，螺纹副间和端面间的摩擦系数 f' 和 f 值的大小不仅与摩擦面的光洁度有关，而且还受材料的种类和硬度、零件表面的镀层、表面的贴合程度、几何形状的偏差、有无润滑及润滑油的种类等因素的影响。

图 2-12-2 为采用扭矩控制法时，预紧力 P 与拧紧扭矩 T 以及摩擦系数 f' 和 f 的关系示意图。从图中还可看出，螺纹联接件本身的弹性系数大小对预紧力 P 也有影响，但采用扭矩控制法时，不能将这些因素考虑在内。根据计算及实验证明，当摩擦系数在 0.1～0.16 的范围内变化时，同一拧紧扭矩使螺纹联接件所产生的预紧力最大值与最小值相差 50%，而实际摩擦系数可能在 0.08～0.25 之间变化。采用扭矩控制法时，预紧力的偏差范围可在 ±35% 之间。再有，采用扭矩控制法时，由于螺栓的预紧力变化幅度较大，所以螺栓实际使用拧紧后的平均当量应力值要控制在屈服点应力值的 50%～60%，否则可能造成螺栓拧断。

2）扭矩—转角控制法

扭矩转角控制法就是在采用螺纹联接件进行装配联接的过程中，先对螺纹联接件施加一个扭矩，使螺纹联接件与被联接件贴合，然后再驱使其转过一个预定的转角 A。这种控制方法的理论依据是，一定的拧紧角位移会使螺栓产生一定量的轴向伸长及被联接件的压缩，结果使螺栓产生了一定的预紧力。

图 2-12-3 为采用扭矩—转角控制法时，预紧力 P 与拧紧扭矩及摩擦系数 f 和 f' 的关系示意图。由于摩擦系数 f 和 f' 的变化只影响开始转角测量点的位置，因此，对预紧力 P 的影响不是很大。

汽车论坛 http://www.qclt.com

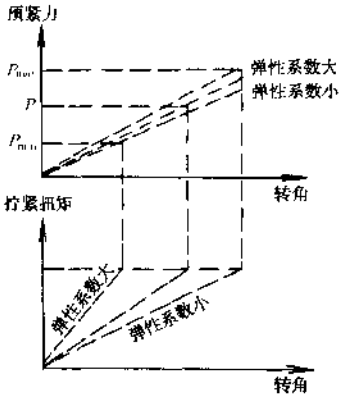


图 2-12-2 扭矩控制法

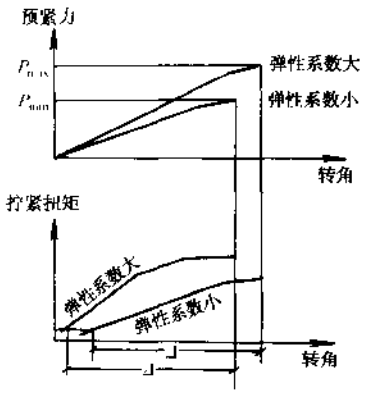


图 2-12-3 扭矩—转角控制法

采用扭矩—转角控制法与采用单纯的扭矩控制法比较，尽管拧紧后其拧紧扭矩的分散度较大，但螺栓的预紧力精度大大提高。

目前，常用的扭矩—转角控制法主要分为两种：一种是螺栓被拧紧后，其应力在材料的弹性变形区内，叫弹性域扭矩—转角控制法；另一种是螺栓被拧紧后，其应力刚好达到材料的屈服极限，螺栓发生了少量永久变形，叫塑性域扭矩—转角控制法。虽然采用弹性域扭矩—转角控制法拧紧螺栓时，预紧力的精度已经很高，但质量检查控制部门难以找出适当的方法对拧紧结果进行正确的评价。所以国外一些机械制造厂家，在拧紧螺纹联接件时，广泛采用塑性域扭矩—转角控制法。采用这种方法时，质量检查控制部门可以通过测量螺栓的永久变形量来确定螺栓是否进入塑性变形区域。对于后一种拧紧方法即塑性域扭矩—转角控制法，由于拧紧结束时，螺栓进入塑性变形区域，故螺栓预紧力的大小只取决于螺栓的屈服极限，而屈服极限又只与螺栓材料的种类和材料的均匀性有关，所以这种方法比前一种方法，其螺栓预紧力的精度更高。另外，采用塑性域扭矩—转角控制法，还可最大限度地提高螺栓材料强度的利用率，在同等条件下，可缩小螺栓的尺寸及数量，对产品设计、节约原材料和能源消耗都非常有利。这种拧紧方法的主要缺点是，在拧紧时必须同时测量扭矩和转角两个参数，监控系统比较复杂，设备造价较高，另外还要进行螺栓拧紧的分析和试验工作，找出扭矩相对转角的变化率以及螺栓的屈服极限。

3）屈服点控制法

屈服点控制法就是在采用螺纹联接件进行装配联接的过程中，拧紧设备（或工具）自动计算出扭矩—转角曲线的斜率，当曲线斜率突然下降时，就认为螺栓的预紧力已经达到了屈服点，进而结束拧紧过程。

图 2-12-4 为采用屈服点控制法时，拧紧扭矩相对转角的变化率、拧紧扭矩 T 及预紧力 P 之间关系的示意图。预紧力的精度主要取决于螺栓材料的屈服极限。屈服点控制法的优点是预紧力精度高，拧紧结果不受螺栓弹性系数的影响。对于相关联的螺栓组联接，如发动机的缸盖总成与缸体总成联接或有时在不同位置处设计中不得不采用不同尺寸的螺栓，此时采用这种拧紧方法非常有利。螺栓弹性系数的不同，只影响螺栓拧到屈服点的角度，而螺栓的预紧力都是在各自的屈服点附近工作。这种拧紧控制方法的主要缺点是，拧紧设备（或工具）需要同时监控扭矩和转角两个参数，要借助计算机进行计算和控制，设备结构比较复杂，造价比较昂贵。采用这种拧紧控制方法对于螺栓及联接件的接触面质量要求较高。在拧紧时，为避免垫圈打滑或与被联接件粘贴，使扭矩—转角曲线在弹性区域内偏离直线段，从而使监控系统误认为螺栓已达到屈服点，必须将螺栓与垫圈做成一体。

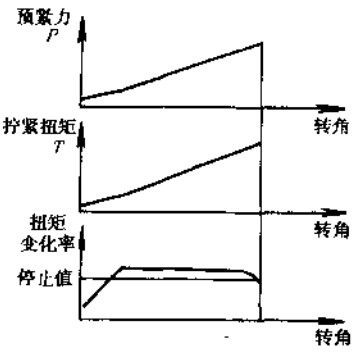


图 2-12-4 屈服点控制法

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.12.2.4 螺纹联接的拧紧设备（工具）

1）扭矩控制类型的扳手

①冲击型扳手：冲击型扳手设有减速机构，靠冲击机构提供扭矩，可达到的拧紧扭矩值较大，而反扭矩作用较小，该种扳手只能提供一定程度的拧紧扭矩一致性（扭矩偏差达到±30%甚至更大），不能直接控制螺纹联接件的预紧力，在工作时噪声及振动较大，一般只用于非关键的联接场合。

②静扭矩型扳手：静扭矩型扳手是一种失速型的反扭矩作用扳手，靠齿轮机构减速放大扭矩，可达到的最大扭矩值较小，且反扭矩的数值与提供的拧紧扭矩数值相等，这种扳手工作时噪声较小，拧紧扭矩最大误差一般为±（15%～20%），不能直接控制螺纹联接件的预紧力。

③扭矩监视型扳手：在静扭矩扳手的基础上增加电子传感器及控制装置，对拧紧扭矩进行动态测量，其拧紧扭矩误差可控制在±10%之内，但不能直接控制螺纹联接件的预紧力。

④扭矩反馈及电机关闭型扳手：这种扳手比扭矩受监视型扳手更为完善，虽不能直接控制螺纹联接件的预紧力，但拧紧扭矩误差可控制在±5%之内。

2）扭矩—转角控制型扳手

这种扳手先将螺纹联接件，如螺栓拧到与被联接件“贴紧”状态，然后再将螺纹联接件旋转一个角度，这种扳手可直接控制螺纹联接件的预紧力，其拧紧精度较高，误差只受开始转角测量点的影响。

3）控制预紧力型扳手

这种扳手采用屈服点控制法，直接控制螺纹联接件的预紧力。由于设备和控制系统复杂，造价昂贵，对联接件本身的要求较高，只在关键的联接部位应用。

2.12.3 过盈联接

2.12.3.1 过盈联接的目的及原理

1）过盈联接的目的

过盈联接不同于螺纹或螺栓联接，一般是属于机械零件间的不可拆卸的固定联接。

过盈联接是使两个或两个以上的联接件在整个产品设计寿命周期内，在工作载荷作用下，不会发生相对运（滑）动，完全像一个零件一样。如果两个联接零件的尺寸或形状超差，配合关系不正确，装配后的合件在工作载荷、特别是在交变载荷的作用下，联接就会失效、零件间就会发生相对运（滑）动。

2）过盈联接的原理

在过盈联接中，两个联接零件间是通过过盈配合来实现联接，通过摩擦（力）来传递工作载荷的。两个联接零件中，一个称作包容件，另一个称作被包容件。例如：滚子轴承外环与变速器壳体之间采用过盈联接，变速器壳体就是包容件，滚子轴承外环就是被包容件，见图 12-2-5。而滚子轴承内环与输出轴之间采用过盈联接时，滚子轴承内环就是包容件，输出轴则是被包容件，见图 2-12-6。

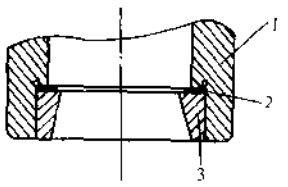


图 2-12-5 过盈连接（一）
1-变速器壳体；2-轮片；3-轴承外环

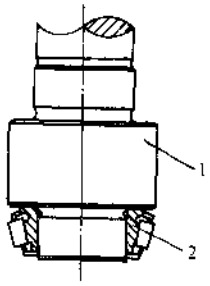


图 2-12-6 过盈连接（二）
1-输出轴；2-轴承

汽车论坛 http://www.qclt.com

包容件与被包容件之间的配合面最常见的是采用圆柱面，也有采用圆锥面及花键等其它形式的。两个联接零件间所能提供的最大摩擦力应不小于联接件所承受的最大工作载荷，才能保证在工作中联接零件之间不发生相对运（滑）动，联接才不会失效。

对于两个厚壁圆筒，零件的应变在弹性范围内，配合面间的应力(或称压强)也是均匀分布的，见图2-12-7。

联接零件间不发生相对运（滑）动的条件为：

$$\pi \cdot D \cdot L \cdot p \cdot f \leqslant Q_{max} \tag{2-12-2}$$

而联接零件间压强 p 与过盈量 δ 之间的关系为：

$$p = \frac{\delta}{d\ (C_1/E_1 + C_2/E_2)} \tag{2-12-3}$$

式中：Q_{max}——联接件所承受的最大工作载荷，N；

p——压强，MPa

δ——联接零件间过盈量，mm；

C_1 及 C_2——计算系数。

$$C_1 = \frac{D^2 + d_0^2}{d^2 - d_0^2} - \mu_1 \qquad C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2$$

式中：E_1——被包容件弹性模量，N/mm^2；

E_2——包容件弹性模量，N/mm^2；

μ_1——被包容件的泊松比；

μ_2——包容件的泊松比；

d——联接零件配合面公称直径，mm；

L——联接零件过盈配合面长度，mm；

f——联接零件过盈配合面间的摩擦系数。

在设计过盈联接时，首先确定联接零件的材料、构造和尺寸，计算联接零件所承受的最大工作载荷，而后进行：

a. 选择具有所需承载能力的过盈配合；

b. 安排合理的零件结构；

c. 确定对零件配合表面的工艺要求；

d. 确定装配技术要求及装配方法。

前三个问题《机械零件》教材中已有详细介绍。本文只对过盈联接零件的装配方法及质量控制进行介绍。

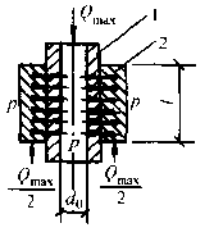
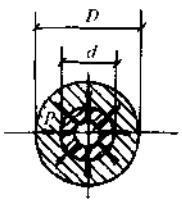


图2-12-7 圆柱面过盈联接计算简图
1-被包容件；2-包容件

2.12.3.2 过盈联接零件的装配和质量控制

1）过盈联接零件的传统装配方法

①人工锤击装配法：采用手锤或其它软金属工具，人工锤击装配销、键、楔块等装配精度要求不是很高的联接零件。这些联接零件的配合过盈量一般均较小或是采用过渡配合。



②温差装配法：温差装配法指的是热装法和冷装法。热装法就是将过盈联接的包容件加热到一定的温度使其膨胀，然后进行装配。冷装法就是将过盈联接的被包容件放到冷却剂中使其过冷收缩，然后进行装配。

加热或冷却的工艺方法可参见《机械加工工艺手册》第二卷中的有关章节。

温差装配法的温度计算公式为：

汽车论坛 http://www.qclt.com

$$t = \frac{\delta + \varphi}{\alpha d} + t_0 \tag{2-12-4}$$

式中：t——联接零件所需加热或冷却到的温度，℃；

t_0——装配环境的温度，℃；

δ——过盈联接零件间最大过盈量，mm；

φ——装配时所需最小间隙，通常取 H7/g6 间隙配合的最小间隙，或按经验公式 $\varphi = (0.001 \sim 0.002)\ d$，单位为（mm）；$d$ 为过盈配合面公称直径（mm）；α 为材料的线膨胀系数（1/℃）。

③压装法：压装法就是采用电动、气动、液压等驱动形式的压装设备，迫使过盈联接零件克服配合面间的摩擦力，实现装配的目的。

压装机应有的最小压力，可根据公式计算，最大压入深度一般是由联接零件本身的轴肩或压装模具来保证的，见图 2-12-8 和图 2-12-9。

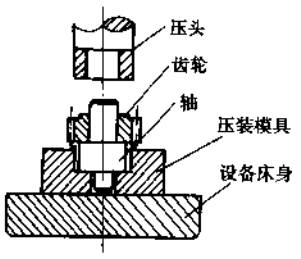


图 2-12-8 压入深度（一）

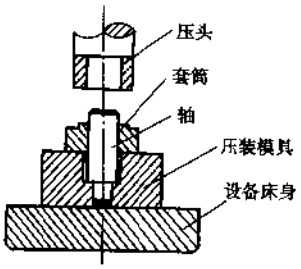


图 2-12-9 压入深度（二）

④传统装配法的缺点：上述三种传统装配方法虽能够达到装配的目的，但对装配对象（合件）的质量不能给予实际评价，不能保证全部的装配对象（合件）均为合格品，不能进行质量控制。

另外，对过盈联接零件的装配，评价其是否合格的标准就是过盈配合面间的最大摩擦力是否能达到设计的期望值。但是，装配过程完成后，在不破坏联接的前提下，最大摩擦力参数无法进行实际测量。

根据公式 2-12-1 和公式 2-12-2 得知，影响过盈联接零件配合面间摩擦力大小的因素很多。摩擦力的大小与摩擦系数、联接零件配合过盈量、零件的材料及尺寸有关。而摩擦系数的大小又是由许多因素决定的，如零件的材料、配合面的表面粗糙度、压应力、有无润滑及润滑油的性质等。另外两个零件的形状公差也会影响实际配合面的大小，也会影响摩擦力的大小。因此，两个过盈联接零件间最大摩擦力的理论计算值与实际数值之间会有一定的差别。

为了克服传统装配方法的缺点，需要一种新的装配方法，能够直接测量过盈联接零件间的摩擦力大小并能对过盈联接进行质量评价和控制。

2）过盈联接零件的现代装配方法及质量控制

①过盈联接零件的现代装配方法：这种方法是在 80 年代末期，在传统压装法的基础上，采用现代控制、测量及电子计算机等技术，在过盈联接零件装配的整个过程中，对压装机的压头压力和压头位移进行测量和控制。这种方法称为压力—位移控制压装法。根据前面的公式 2-12-2、公式 2-12-3 及牛顿第三定律得出：压头压力 F 和压头位移 S 之间的关系式：

$$F = \pi dpfS = \frac{\pi f \delta}{C_1/E_1 + C_2/E_2} S \tag{2-12-5}$$

假定零件的材料均匀、摩擦系数和配合过盈量均为常数，设 $k = \pi f\delta / (C_1/E_1 + C_2/E_2)$，则可得出如下公式：

$$F = kS \tag{2-12-6}$$

由公式 2-12-4 得知，压头压力与过盈联接零件间的摩擦力是等值的，可以规定 $S = 0$ 为两个过盈联接零件开始接触，$S_{max} = L$ 为过盈联接零件的最大压入深度。根据公式 2-12-6 可画出压力—位移关系图，见图 2-12-10.

汽车论坛 http://www.qclt.com

实际上 k 值并不是常数，压力—位移关系图也不是直线，而是有微小波动的曲线。但在定性分析时可将其看作是直线。

②过盈联接零件的质量控制：因为压装机压头的压力和位移与过盈联接零件配合面间的摩擦力和压入深度相对应，所以压力—位移 F—S 曲线也就是过盈联接零件间的摩擦力—压入深度（过盈配合面长度）曲线。通过压力—位移曲线即可研究过盈联接零件的装配质量，也可对装配对象（合件）进行质量评价。

通过实例分析如下：

首先分析实际的 F—S 曲线，见图 2-12-11。在压装起始点，即联接零件刚接触时，压力不是零值而有一峰值，这个值的大小与零件的尺寸精度特别是倒角的尺寸精度关系很大。从 a 点到 b 点可看成是一段直线，这是真正的压装进程。到了 b 点曲线的斜率有较大变化，这说明零件间或零件与模具间的轴肩开始接触。从 b 点到 c 点是压装过程的保压阶段，在这一过程中，联接零件及压头、模具等均发生微量弹性变形。c 点为压装机压装结束点，压头换向，恢复到初始位置，以便进行下一循环。

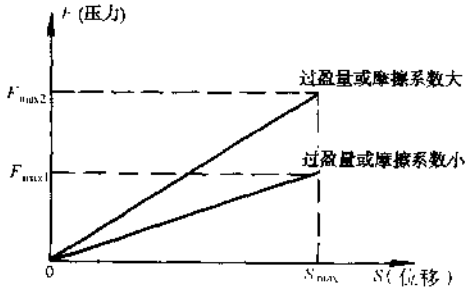


图 2-12-10 压力—位移关系图

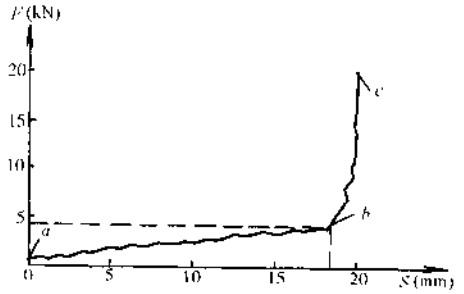


图 2-12-11 实际压力—位移曲线图

图 2-12-11 所示为滚子轴承外环压入变速器壳体装配时的实际 F—S 曲线。b 点的实际压力为 4.85kN 对应的位移为 18.04mm。变速器壳体与滚子轴承外环合件简图见图 2-12-5。

已知两个过盈联接零件的参数为：

$D=80\text{mm}$，$d=65\text{mm}$，$L=18.04\text{mm}$

最大过盈量 $\delta=0.06\text{mm}$，$d_0=54.86\text{mm}$（取中径）

$E_1=2.1\times10^5\text{MPa}$，$E_2=7\times10^4\text{MPa}$

$\mu_1=0.3$，$\mu_2=0.33$，摩擦系数取 $f=0.15$

将上述参数代入公式 2-12-4 可得 $F_{max}=5.03\text{kN}$，由于过盈量取的是最大值，摩擦系数也是经验值，所以可认为这与图中的实际值还是接近的。

传统的压装机只能设定 c 点的压力值，到达该点后，压装机压头开始换向。但是，该点的压力值并不是过盈联接零件间的最大摩擦力，而是联接零件间或零件与模具轴肩接触后所提供的反力值。这样也就无法知道过盈联接零件间的最大摩擦力值的大小，也无法对其进行质量分析和质量评价。

采用现代装配方法，不但能够测量压装机压装过程中对应不同压入深度的压力值，而且可以在不同的 S（位移）点设定不同的 F_{max} 和 F_{min}（最大压力和最小压力）值。在某一位移 S 点，如果实际的压力值 F 大于 F_{max} 或小于 F_{min}，则可判定该装配对象（合件）为不合格品，反之则为合格品。界限值的大小可以根据理论公式（4）的计算值及多次实际压装统计值比较后设定。这样，实际上从 a 点到 b 点就可以设定两条界线，这两条界线既可以是直线也可以是曲线，可以是水平的或是倾斜的，见图2-12-12。

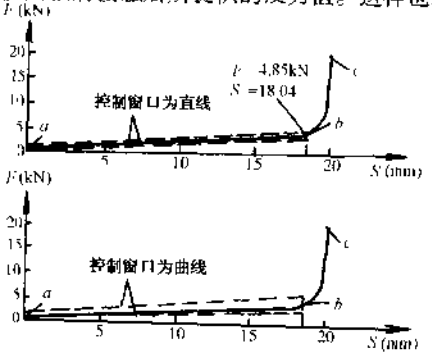


图 2-12-12 圆柱面过盈联接计算简图

上面介绍的是合格零件的实际压装曲线及质量控制。下面介绍几种典型的不合格的过盈联接零件的非正常压装曲线。

最经常发生的过盈联接缺陷就是过盈联接零件的配合过盈量过大或过小。在前一种情况下，压力在压装的开始就很大，而且随着压入深度的增加，其压力值增加也很快。在极端情况下，可能造成包容件如孔类零件产生裂纹，从而随着位移的增加压力又有所下降，见图 2-12-13。当采用现代装配方法时，压装机压到位移 S_1 点后，就立即停机报警。而传统的压装机要压到 S_2 点（以液压系统的压力为控制信号）或压到 c 点（以压头最大行程为控制信号）才能停机，但不能给予任何质量评价，也不能区分出不合格的装配对象（合件）。对于后一种情况，压装过程在到达 c 点（轴肩开始接触）之前，压头压力一直达不到最小压力界限值，见图 2-12-14。当采用现代装配方法时，压装机一开始运行，就发现压力不够，并且立即停机报警。而传统的压装机要压到 c 点（轴肩开始接触）才能停机，但不能给予任何质量评价，也不能区分出不合格的装配对象（合件）。

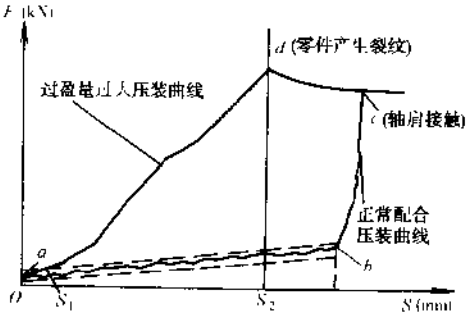


图 2-12-13 压装曲线比较

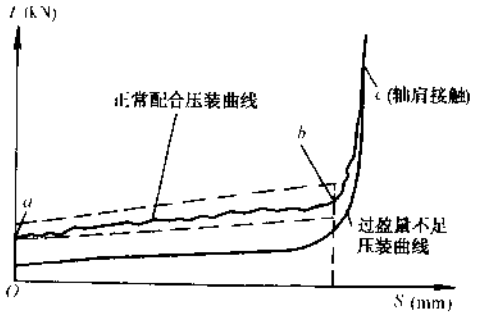


图 2-12-14 压装曲线比较

另一种容易出现的联接配合缺陷就是出现圆锥孔或圆锥面等形状公差。这种情况虽然压装结束时压力可以达到要求，但这种联接在工作载荷特别是在交变载荷作用下，联接就容易产生松动，从而出现工作故障，具体见图 2-12-15。

3）压力—位移控制压装法的优点

以上分析得知，根据过盈联接零件的压力—位移曲线，可以进行过盈联接零件装配时的质量控制及质量分析。因此，现代装配方法具有如下优点：

①保证装配对象（过盈联接的合件）100%合格，这对关键、精密联接部位特别重要。

②压装过程中可及时发现异常情况，使操作人员迅速纠正和处理。

③对严重超差的过盈联接零件可以及时发现，并避免由于继续压装造成零件损坏而带来的经济损失。

④可向上道工序及时反馈其产品质量状态，使之能及时予以纠正。

2.12.3.3 采用压力—位移控制压装法的现代压装设备简介

设备原理框图见图 2-12-16。目前，压力—位移控制压装法的压装设备，有液压驱动和电驱动两类液压驱动的压装机其压头主要由液压油缸、压力传感器、位移传感器及机械部件等组成。电驱动的压装机其压头主要由电机、行星齿轮减速器及齿轮齿条、压力及位移传感器等部件组成。对应的动力源分别为提供不同压力和流量的液压泵站和提供不同功率和频率电能的装置。压装控制装置将压头的压力及位移信号进行处理，然后与可编程序控制器中储存的设定值进行比较，并给动力源发出下一步的工作任务信号。在可编程序控制器中可以储存事先设定的各种信号值，如不同位移点的最大最小允许压力值。计算机可以将各工作循环的数据进行储存、显示、统计分析，也可打印输出。设备保护装置的作用是防止压头压力过载或位移超过允许的极限位置。

汽车论坛 http://www.qclt.com

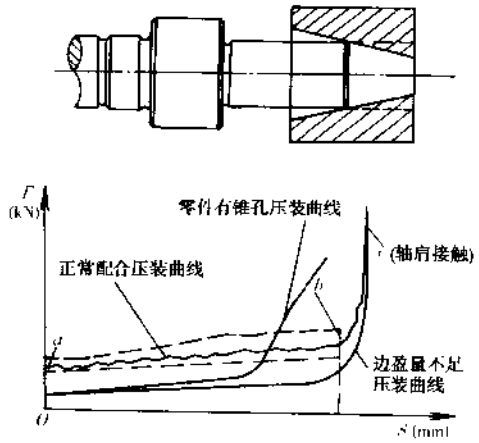


图 2-12-15 压装曲线比较

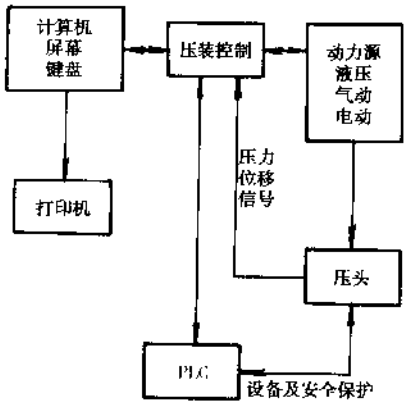


图 2-12-16 采用压力—位移控制法设备原理框图

2.12.3.4 结束语

压力—位移控制压装法应用于过盈联接零件的装配时，具有传统装配方法所无法比拟的优势，在汽车行业的装配领域将被广泛采用。

2.12.4 粘接

粘接不同于螺纹联接、过盈联接、焊接、铆接，它是被联接件依靠粘接剂（胶）形成粘接接头的联接方式。粘接接头的形式主要有对接、搭接和正交。

粘接的特点：粘接适应于金属材料、复合材料、功能材料及各种夹层材料的联接，适用于金属与金属或金属与非金属之间的联接，适用于难以用焊接、铆接和其它机械联接进行联接的零件间的联接。粘接可以简化制造工艺，而提高被联接件的动态性能。

与其他联接方法比较，粘接有如下优点：

a. 粘接接头的应力分布比焊接、铆接或螺纹联接均匀，理论应力集中系数比较低，因此，粘接接头抗疲劳性能好。

b. 粘接可取消联接零件如螺栓、铆钉等，被联接件也不需要联接孔，不会减少材料的有效横截面积，可以充分利用材料的全部强度，采用粘接可以减轻联接结构的整体质量。粘接表面平整光滑，能保证良好的流线型。

c. 粘接的密封性能好，并具有耐腐蚀性和绝缘性能。

d. 粘接工艺简便，可避免焊接或铆接所产生的零件变形，易于实现大面积的联接。

由于粘接有以上优点，应用日益广泛。但这种联接工艺技术要求很高，且结合速度不及其它联接；如果粘接面不清洁，胶层不均匀或过厚，固化的温度、压力和时间等控制不当，都会使胶层中产生从外部难以检查的内部缺陷。

粘接的缺点：

a. 粘接剂一般采用有机高分子物质，其耐高、低温性能有限。

b. 与高强度被联接件相比，粘接剂强度还不够高。

c. 在光、热、空气及其它因素作用下，粘接剂会出现老化现象。

有关粘接的设计、工艺及应用详见《机械设计手册》第三卷第二十篇第五章。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.12.5 压接工艺——一种新的联接技术

压接是利用气液增力缸式冲压设备和一套简易可靠的联接模具，通过一个压接加工过程，依据板件本身材料的冷挤压变形将被联接件压进凹模，在进一步的压力作用下，凸模这一侧的材料被挤压，使凹模内的板件之间互相镶嵌，形成一个既无棱边又无毛刺、一侧凹进一侧凸出的圆联接点，从而将不同材质、不同板厚的两层或多层板件联接起来，见图 2-12-17，也可通过第二个加工程序，将凸出部分再挤压回去，从而得到平直的联接点，见图 2-12-18。

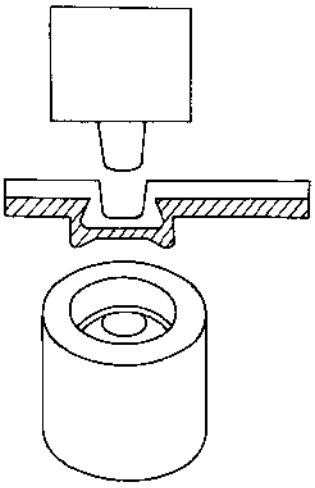


图 2-12-17 一般压接接头

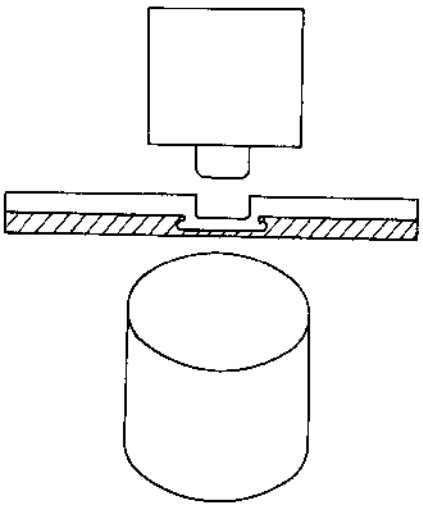


图 2-12-18 平直的压接接头

简单来说，压接的一个工作循环可以分为三个行程段：

①气动的快进行程，即利用软到位技术实现快速无冲击接触工件。

②气液增力的加压行程，即在气液缸的总行程范围内的任一位置接触工件后即自动增力冲压，即增力自适应技术。

③气动的返回行程，完成加工，快速返回。

从图 2-12-19 表明压接接头的形成过程：

压接工艺的关键技术就是其气液增力缸。气液增力缸集气压缸和液压缸优点于一身，增压比高达 70 倍，无需液压系统，使用 0.6～1.0MPa 的压缩空气驱动，产生 0.2～200t 的推压力并可在最大值以下无级可调，系统简单可靠。一是具有先进的“软到位”技术，即在快进的空行程中，压接模具由低压空气驱动，能快速无冲击地接触工件，噪声很低，极大地提高了压接加工质量及模具寿命；二是具有独到的“增力自适应”技术，即在总行程范围内的任意位置，只要模具一接触到工件，气液增力缸即自动地由快进行程转换为增力的加压行程，进行全

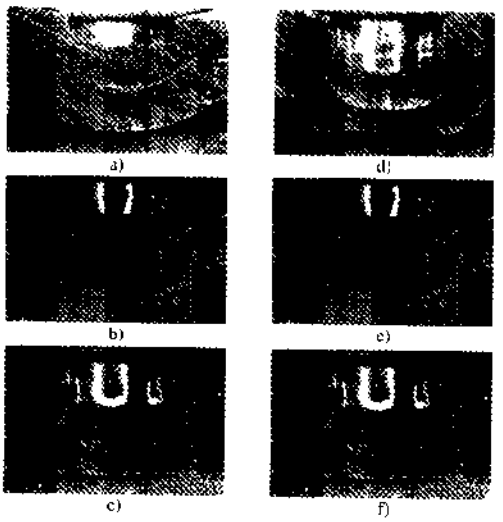


图 2-12-19 压接过程示意图

a)初压入，b)挤压，c)形成上部轮廓，d)充满环形空间，e)凸模侧材料向凹模侧材料中挤压、镶嵌，f)形成冲联接头

汽车论坛 http://www.qclt.com

功率的冲压加工，而无需任何附加的调节控制；二是在其全行程范围内，输入的压缩空气压力与输出的冲压力之间呈规律的线性分布，易于实现精密自动控制从而提高产品质量；四是气液增力缸只在其增力的加压行程才需满功率驱动，而在快进行程和返回行程只需极微小的功率驱动即可。因此它与液压缸或气缸驱动的冲压设备相比，节能最高可达90%。例如同样使用1.2MPa的压缩空气时，气缸的耗气量是气液增力缸的7倍。

传统的联接工艺都有各种缺点，例如点焊工艺，设备比较昂贵，连接费用高，能耗大，焊接铝、铜、不锈钢等材料以及有镀层的板件比较困难，而对不同材质的板件、有漆膜的板件、厚度差异过大的板件以及中间有夹层的板件则根本无法焊接。同时，点焊联接破坏了板件表面镀层，焊接质量也无法进行无损检测。采用铆接或螺栓联接，则效率低、费用高。

压接工艺则具有以下显著的优点：

①适用范围广：由于压接工艺是采用冷挤压方法形成一个联接点，所以，凡是具有一定延展性的材料均可采用这种工艺进行联接。它能适应各种不同材质板件之间的联接、板材与型材之间的联接、单面或双面镀层板材之间的联接、涂有漆膜的板材之间的联接、覆塑料薄膜的板材之间的联接、有油或干燥表面的板材之间的联接以及有中间夹层（如纺织物、塑料、金属箔、各种薄膜、纸等等），可以联接从单板厚度为0.3mm到最大组合板厚为8.0mm的板件（板件层数最多可达4层）。

在不同的使用条件和要求下，通过更换不同的冲联模具即可满足工艺要求，或是实现一机多用，完成板件的成形、矫正、冲裁、剪切铆接、冲压印字等多种工作，这是点焊所根本无法实现的。

压接设备可分为台式、落地式、手工手钳式、机器人手钳式、偏心作用式、专用式等多种结构形式，能够胜任很多场合的使用要求，在与粘接胶、密封胶等结合使用时的效果也比点焊要好得多。

②良好的联接质量压接接头的静态强度为点焊接头的70%，但由于材料在联接处受到挤压而被强化，其本身的机械性能得到提高，联接点处无材料撕裂，更重要的是不产生应力集中，所以其动态强度比点焊接头要高得多。压接接头还有一个显著的特点，就是其承载能力与受载方向无关，即无论是承受剪切载荷作用，还是承受拉力载荷作用，其承载能力都相同，见图2-12-20。

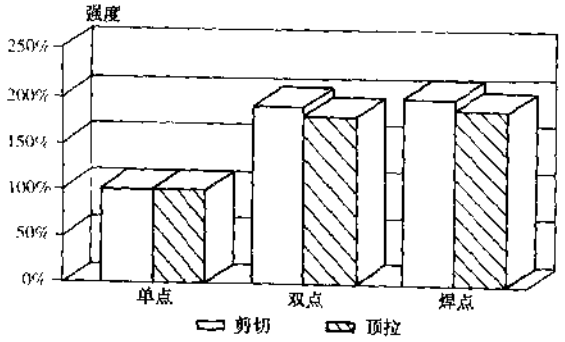


图2-12-20 单点及双点压接接头与点焊接头的强度对比

③保持原有材料表面的性能在点焊作业中必然会破坏工件表面的镀层，而且多少有一些热变形。在焊接经过前处理的工件时，需要将前处理中形成的保护膜打磨掉，焊后再手工补漆，不仅操作繁琐，质量也不理想。压接工艺对板件表面没有任何特殊要求，联接点处的原有镀层、漆膜等不会受到损坏并能保持其原有的防腐性能，这是因为镀层和漆层会随着板件一起变形“流动”。

④成本低：压接设备系统简单可靠，生产成本低。一是耗能低；二是不产生有毒物体（点焊作业中，尤其是在焊接涂有密封胶、粘接胶的焊缝时，产生的有毒气体必须治理），节省环保费用；三是极少易损件（点焊设备中的次极连接电缆、水气软管、电极等都是易损件），所以，联接成本仅为点焊的40%～70%。

⑤实现无损检测：压接接头的剪切强度和抗拉强度与联接点处的板厚“X”成正比，因此，可以通过

汽车论坛 http://www.qclt.com

简单地测量其厚度“X”，便可实现无损伤地测定其联接强度。

⑥自动监控功能：监控系统通过传感器可以连续地描绘出一组力—位移曲线，在计算机内将检测值与额定值进行比较，任何一点检测值超出其允许误差而偏离额定值，就会发出报警信号或是停机。

⑦采用先进的监控系统，对以下参数进行实时自动监测：

a. 材料的种类； b. 板材厚度； c. 模具的组合情况； d. 挤压力和挤压行程； e. 联接点处的板厚“X”； f. 模具的损坏。

⑧良好的工作环境：压接过程无冲击、噪声低，其联接是靠板件的冷挤压变形来实现的，不穿透板件，没有烟尘、飞溅、铁屑等污染，改善工作环境。（撰稿人：袁 伟 李成国）

2.13 其它加工

2.13.1 喷丸处理

喷丸是高速喷射的丸粒撞击工件表面、借助冲击能量对工件表面或表层进行处理的方法。

2.13.1.1 喷丸处理的分类

喷丸处理有下列三种方法：

①离心抛射式（叶轮式）：叶轮以 2 500～3 000r/min 超高速旋转产生离心力，使丸粒撞击工件表面，由于抛射丸粒的能量大、抛射区域大，因而处理效率高、效果明显。

②气动式喷丸机：借助压缩空气对丸粒加速来进行喷丸。按弹丸进入气流的方式不同，可分为三种：a. 引入式：结构简单，但因压缩空气能量部分要消耗在导引传送弹丸上，所以，丸的速度较低、喷丸效率低；b. 重力引入式：丸粒靠重力流入喷枪，所以，压缩空气能量全用来加速丸粒，使丸粒速度可高达 80m/s，效率高；c. 直压式：弹丸来自与喷射气压相等的压力容器，这种方法可在较大范围内移动喷嘴，适用于要求喷射强度较高而喷射区域较小的场合，如圆角处喷丸。

③液体喷砂（或喷丸）：是将砂（磨料）置于水中，用磨液泵和压缩空气（或单用磨液泵）通过喷枪将磨液高速喷射到被加工的工件上，达到清理和光饰零件表面的目的。液体喷砂工效高，磨料消耗少，能降低表面粗糙度和提高表面强度。

喷砂、抛丸、液体喷砂都可统称为喷丸，设备订货时应明确区分。

喷丸的应用范围很广，主要用途见表 2-13-1。

表 2-13-1 喷丸的应用范围

序号	范围	用途	实例
1	表面强化	表面冷作硬化 提高疲劳强度	曲轴、齿轮、连杆及弹簧等
2	预应力强化	提高疲劳强度	钢板弹簧
3	清除表面缺陷	去除脱碳层影响	半轴、二轴、拖曳钩
		表面非马氏体层影响	齿轮、十字轴
		减少灰口铸铁疏松度	缸体、缸盖、壳体

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

序号	范围	用途	实例
4	防止表面拉应力产生	镀铬、镀镍的前处理	活塞环镀铬前、后
		研磨后消除纹路	高速齿轮
		阳极氧化的前处理	铝轮毂阳极氧化前
5	表面清理	铸件清理	后桥壳、排气管等
		锻件热处理后清理	各种锻件
		钢板冲压前清理	车架、大梁
6	改善粗糙度	铸铝坯表面粗糙度	增压器叶轮
		替代抛光处理	发动机连杆
7	提高涂层结合力	喷铝前处理	齿座、拨叉、活塞环
		喷粉前处理	板簧、悬架弹簧
		喷漆前处理	轮毂等
8	增加贮油性能	磨加工前轻度喷丸	轴承
		刀具热处理后喷丸	高速钢刀具
9	清理表面便于检测	锻件调质后裂纹检验	连杆、臂、轴等
10	成形与校正	薄件的成形与校正	机翼成形、齿圈校正

注：表中第10项是航空工业中大量应用，汽车工业中尚未应用的工艺。

汽车工业中，喷丸主要用于喷丸强化和喷丸清理。对产品影响较大工艺要求严的是喷丸强化。由于设备制造厂把强化用的抛丸机称作强力抛丸机，所以强化抛丸也称强力抛丸。

2.13.1.2 喷射材料

根据加工件的材质、硬度、尺寸、用途和技术要求，选用不同的喷射材料。各种喷射材料及其特性见表2-13-2。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 2-13-2 各种喷射材料及特征

类别	名称	硬度（HV）	粒度（μm）	主要用途
黑色金属	钢丸	450～700	50～2 500	去氧化皮、落砂、喷丸强化
	钢砂	450～850	200～1 400	喷光毛面、去氧化皮、空腔处理、滚压表面拉毛处理
	白口铁丸	600～750	200～1 700	桥梁涂装前处理、铜合金件落砂
	钢丝丸	400～600	300～1 200	喷丸强化、落砂
	不锈钢丝丸	500～600	300～1 200	铝制工件落砂、毛面喷光
有色金属	铝丸	160～180	600～2 000	铝压铸件落砂
	铝丝丸	40～60	600～2 000	铝压铸件落砂
	锌丸	40～60	400～2 000	铝压铸件落砂
非金属	氧化铝丸	2 100～2 300	50～800	去氧化皮、毛面喷光、去毛刺
	玻璃球	500～550	50～500	毛面喷光、去氧化皮、去毛刺
	石英砂	900～1 000	50～800	毛面喷光
	硅砂	900～1 000	50～800	毛面喷光

表中已列出主要的喷丸材料，实际使用的还有碎石、果核及固体二氧化碳丸等。在汽车工业中使用的有激冷铸铁丸、铸钢丸、切割钢丝丸、玻璃丸和石英砂等。强化用的材料必需是圆球形弹丸，清理用的除弹丸外还有磨粒、石英砂等。

金属丸的一般要求：铸铁丸含碳量约 2.75%～3.6%、含硅约 1.5%。铸钢丸和切割钢丝丸含碳量应小于 1.2%。玻璃丸的二氧化硅量应大于 60%，密度大于 2.3g/cm³，硬度和粒度见表 2-13-2。

钢丸应经过热处理，其金相组织应为回火马氏体和贝氏体。切割钢丝丸使用前应喷打废零件，直到消除棱角为止或在滚筒内滚动 10～20h 后才使用。喷丸过程中要定期检查，完整的弹丸应在 85% 以上。国内工厂强力抛丸所使用的丸粒及部分工艺要求见 2-13-3。

表 2-13-3 汽车零件强力抛丸技术要求及丸粒要求

汽车零件		强化要求		钢丸		
名称	硬度（HRC）	弧高（mm）	覆盖率（%）	材料	直径（mm）	硬度（HRC）
轿车渗碳齿轮	≥680HV10	≥0.3A	≥100	钢丝丸	0.4	610～670HV
载货汽车后桥齿轮	58～63	0.35～0.45A	≥98	铸钢丸	0.9～1.2	48～55
载货汽车变速器齿轮	58～63	≥0.35A	≥200	铸钢丸	0.7～0.9	48～55
膜片弹簧（厚 3.5mm）	42～55	0.36～0.46	≥98	铸钢丸	0.6～0.7	45～50
钢板弹簧（厚 10～16mm）	375～440 HB	0.18C	≥98	钢丝丸	0.8～1.0	40～42
悬架弹簧（φ10～15mm）	46～51	0.3～0.5A	≥95	钢丝丸	0.6～0.8	45～50
连杆	217～289 HB	≥0.18C	≥98	铸钢丸	1.0～1.2	

汽车论坛 http://www.qclt.com

从表中实例看出：a. 钢丸的硬度应与工件表面实际硬度接近，硬度过高的丸粒易击碎，硬度过低则对硬工件的强化效果不大；b. 丸粒的直径与工件需强化位置的尺寸、形状有关；要考虑齿根圆角和曲轴拐角处圆弧的曲率半径，丸粒直径应为齿根圆角曲率半径的1/2，尺寸过大或过小则强化效果不好；c. 对于钢板及圆柱类形状简单零件的钢丸尺寸可参考表2-13-4，工件厚度愈大，抛丸强度和丸粒直径也要相应增大。

表2-13-3所示生产实例中：轿车渗碳齿轮选用直径0.4mm、含碳量0.70%～0.85%并含少量Si、Mn的钢丝切割丸，它比铸钢丸的强韧性好，硬度高达610～670HV（比表2-13-2规定高）。多年使用结果表明：采用这种丸粒来强力抛丸，可取得非常满意的强化效果，其残余压应力分布约为：表面－580±11MPa、表面下0.02mm处－800MPa。

表2-13-4 强力抛丸推荐选用的钢丸直径与抛丸强度

工件厚度 (mm)	抛丸强度（阿尔门试片）		弹丸平均直径 (mm)
	试片种类	挠高 (μm)	
1.6	N	300	0.4
3.2	A	200	0.4～0.6
6.4	A	350	0.6
9.5	A	450	0.6～0.9
12.7	A	530	0.9
16.0	C	180	0.9～1.2
19.0	C	200	1.2
>22.0	C	250	1.2～1.5

注：如果采用铸钢丸，丸粒尺寸可略大于表中的平均尺寸。

2.13.1.3 强力抛丸

强力抛丸可以大大延长承受脉动、交变弯曲、扭转负荷零件的疲劳寿命。实践表明：齿轮、螺旋弹簧、摇臂、曲轴、连杆、活塞销等很多汽车零件均可通过强力抛丸取得明显效果。

抛丸强化是通过二种途径来实现的：a. 强力抛丸使零件表层产生一个较高的残余压应力层；b. 通过抛丸使零件表面冷作硬化，提高硬度和强度；c. 抛丸使零件表面产生很多微小的凹坑，成为储油点，起到润滑、减少磨损和擦伤的作用。零件通过抛丸来提高寿命往往是二种因素的综合效果。

强力抛丸对软材料的冷作硬化作用较大，对硬材料的残余压应力作用较大，均匀微小的凹坑有利于储油润滑，能提高工件寿命。但如果抛丸工艺不合理，会使表面粗糙度过大，这对承受振动负荷的零件是不利的。所以抛丸强度中等时弹簧的疲劳寿命往往最高。

齿轮经渗碳淬火后表层很硬，通过强力抛丸在齿根表面建立较高的残余压应力层，使齿根能承受得起脉动变化的弯曲载荷，残余压应力抵消了外加的弯曲负荷引起的拉应力，提高了齿轮的弯曲疲劳强度。

对齿面来说，强力抛丸形成的残余压应力层可防止齿面在承受很高的接触负荷时产生的切应力引起的裂纹和表面麻点，因为裂纹不能在压应力状态下产生和扩展，所以只要外加载荷作用下所产生的拉应力或剪切应力低于强力抛丸所产生的残余压应力，就能防止裂纹的产生和发展，所以强力抛丸能提高齿轮的接触疲劳寿命。同样，抛丸引起的储油润滑作用也有利于降低油温、减少齿面擦伤和磨损。

2.13.1.4 强力抛丸的质量检验

在喷丸处理中，清理喷丸只要求表面无氧化皮、锈迹、污迹就可。在液体喷砂处理中通常要检查表面粗糙度，少数零件要作表面应力测试。

①强力抛丸的质量检验内容较多，以汽车齿轮为例，检验内容有：

a. 表层压应力分布：主要是液压变速器齿轮及部分承载能力不足、保险系数较低的汽车齿轮，采用X射线衍射仪测定；

b. 表面粗糙度：采用表面粗糙度测定仪测定，表面粗糙度随覆盖率和抛丸强度增加而增大，也与丸粒质量有关；

c. 覆盖率：采用10～20倍放大镜观测测定；

d. 表面硬度梯度：用小负荷维氏硬度计测定抛丸后硬化效果；

e. 金相检查：抛丸能减轻表层内氧化、脱碳的不良影响，改变残余奥氏体数量和分布情况；

汽车论坛 http://www.qclt.com

f. 疲劳试验，如单齿弯曲疲劳试验及总成的疲劳试验

前三种是产品质量日常的检验内容，其余是产品设计、制定工艺参数时的质量检验。

生产中应用更多的是采用阿尔门试片来检测抛丸结果，并根据检测结果来调整工艺参数。试片检测内容有：

a. 抛丸强度：将标准的阿尔门试片固定在夹具上抛丸后，受抛丸的一面会拱起一个圆弧，弧高值 h 与抛丸时间有关：时间增长，弧高 h 随之增高，但当抛丸达到饱和状态时（即覆盖率达98%时）弧高 h 不再增高，此弧高值 h 只与丸粒大小、硬度和丸粒速度有关，此弧高 h 值即代表抛丸强度。每种工件都要求适合本身所需的抛丸强度

b. 表面粗糙度。

c. 覆盖率：是弹丸射中试片表面出现压痕的面积与试片的受抛面面积之比。当达到抛丸饱和状态时，覆盖率为98%～100%，此后若抛丸时间延长一倍则覆盖率为200%（即2），以此类推。

d. 抛射区：强力抛丸时，抛出的弹丸会覆盖在一个椭圆形区域内，这个区域称抛射区，被抛丸的工件应放在抛射区内抛丸强度较高且较均一的区域内。

以上内容是通过阿尔门试片来检测的，试片由标准样品单位供应的，采用SAE1070冷轧弹簧钢制成，回火后，A、C型试片两表面硬度为44～50HRC，N型试片硬度为72.5～76HRA，三种试片尺寸均为76×19（mm），其厚度和使用范围见表2-13-5。

表2-13-5 阿尔门试片厚度和使用范围

试片	厚度（mm）	使用范围 h（μm）	换算值
N	0.8±0.25	<45	N=3A
A	1.3±0.25	15～105	A=1
C	2.4±0.25	>16	3.5C=A

2.13.1.5 设备

1）抛丸机

抛丸机由抛丸器、工件输送及旋转装置、弹丸输送及筛选装置、抛丸室体、电气控制及除尘装置等部分组成。

抛丸器由分丸轮、定向套和叶轮等组成，见图2-13-1。分丸轮固定在主轴上，与叶轮一同旋转；定向套固定在护罩体上，套上开有一个约30°方形窗口，窗口角度大小决定丸粒的径向散射角的大小，径向散射角约比定向套窗口大10°角（即40°角）。

离心叶轮随主轴旋转时，从中心并轴向输入的弹丸通过分丸轮转向并加速，在定向套窗口处高速进入叶轮的叶片上，叶轮在高速旋转下将丸粒高速甩出飞向工件。强力抛丸时的丸流速度应为60～100m/s（常用80m/s），叶轮转速是可调节控制的。丸流的流量（kg/min）也可调节控制，流量应有显示和报警。

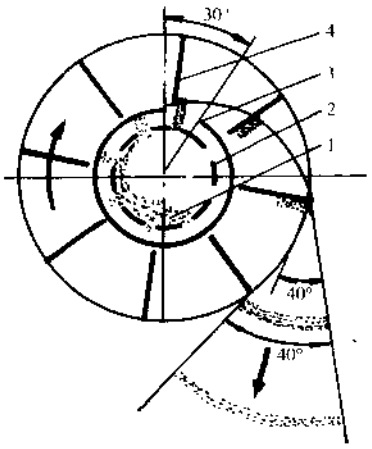


图2-13-1 离心式抛丸技术原理图
1-弹丸；2-分丸轮；3-定向套；4-叶轮

工件输送有转台式、滚筒式、履带式、鼠笼式和吊钩式等方式。强力抛丸与清理抛丸不同，要求每个零件、各个受抛部分（除螺纹等不抛部分以外）得到均匀一致的抛丸强化效果，所以不许工件相互碰撞、遮挡。对于预应力强化抛丸还应有预加载的专用夹具。为保证覆盖率要求，各个工位的行进速度、旋转速度均可调节控制。

弹丸的输送及筛选：抛射后的丸粒打击工件后下落并收集到贮丸斗内，通过提升机把弹丸粗筛后送到分离器，通过重力作用驱使钢丸流动并通过调节气流间隙和气流速度来风筛出合格弹丸。强力抛丸的筛选要求比清理抛丸严格得多。

抛丸室：室体是钢板焊接而成，外壳上装有一个或几个抛丸器，室内衬有高度耐磨的防护板保护室体，为防止弹丸飞出伤人，在进出料口挂有橡胶帘。室体有除尘风口，外接除尘器，室体侧面有维修门，室底通贮丸斗以便自动收集丸粒。抛丸室应密闭良好，保证噪声小于90dB，车间粉尘量≤8mg/m³。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2）强力抛丸机的设备调整参数

a. 弹丸速度：强力抛丸的弹丸速度为 60～100m/s；

b. 丸流冲击角：是指工件受抛面与丸流之间的夹角，最好为 90°；

c. 弹丸流量：据抛丸强度要求和电机允许负荷来调节；

d. 抛丸时间：与覆盖率要求有关；

e. 工件进给速度，与覆盖率要求有关；

f. 工件转动速度：一般为 5～40r/min；

g. 弹丸的筛选：应保证合格弹丸在 85% 以上；

h. 预置应变的大小：如钢板弹簧主片需在预置应变状态下强力抛丸。

3）强力抛丸的新进展

强力抛丸的发展是严格控制抛丸过程，实现抛丸后产品有预定均一的使用性能。新型强力抛丸机通过微机连续监控抛丸机的各项工艺参数，如果某些参数超过了预置的上下限定值，抛丸机就会紧急停车、显示故障和报警。在一批零件完成强力抛丸后，可打印出工艺参数，该机可容纳 10 个以上不同程序，上述参数在每个程序中均有适用于相应工件的设定值。

屏幕显示的设定值和控制内容如下：

a. 抛丸机叶轮转速；b. 抛丸机叶轮驱动功率；c. 抛丸料位的自转速度；d. 进料节拍；e. 每个料位抛丸时间；f. 间歇时间；g. 每个抛丸器的丸流量；h. 提升机的丸粒提升量；i. 筛选装置的功能显示；j. 分离器的功能显示；上述时间参数的控制精度应在 ±0.1s 以内。 （撰稿人：林 锋）

2.13.2 热喷涂

2.13.2.1 热喷涂概念

1）定义

热喷涂是把固体材料加热到熔融状态，以高速喷射到基体表面上，形成涂层的一种表面改性技术。喷涂材料经过加热、加速、熔化、再加速、撞击基体、冷却凝固等过程，形成喷涂层。

2）涂层的主要性能

不同的涂层具有不同的性能，一般包括：耐磨、耐热、耐氧化、耐腐蚀；作为间隙控制的可磨耗封严层；导电或电绝缘；热障；修补尺寸。

3）分类

热喷涂分类见表 2-13-6。

表 2-13-6 热喷涂方法分类表

热喷涂	液态法	熔融喷涂	
	燃气法	火焰喷涂	线材火焰喷涂
			粉末火焰喷涂
		超音速火焰喷涂	
		爆炸喷涂	
	气体放电法	电弧喷涂	
		等离子喷涂	
	电热法	电爆喷涂	
		感应加热喷涂	
		电容放电喷涂	

4）主要特点

a. 适于金属、非金属等各种基体材料。

b. 涂层材料范围广泛，不仅可以选择各种金属和陶瓷、塑料等非金属材料，并能制成具有特殊性能的复合涂层和叠加涂层。

c. 涂层厚度范围较大，容易控制。

d. 基体性能不发生变化，喷涂过程中基体温度低、变形小。

e. 基体的大小和形状不受限制，既可整体、又能局部喷涂。可以外场作业。

f. 普通基体材料经热喷涂后得到特殊的表面性能，从而降低材料成本，满足较高的技术要求。

g. 生产效率高，相同厚度的成膜时间远比电镀少。

h. 热喷涂技术正在发展中，存在膜层结合力较低、孔隙率较高、均匀性较差等问题，使其应用受到一定限制。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.13.2.2 常用的热喷涂方法

1）火焰喷涂

火焰喷涂是利用气体燃烧放出的热量熔化喷涂材料，并用压缩空气将其喷射到基体表面形成涂层的方法。该种方法历史悠久，应用广泛，操作简便，成本低，但不适于喷涂难熔材料，粒子喷射速度较低，与基体撞击时变形较小，形成的涂层孔隙率高，强度低，涂层与基体的粘结力也差。

常用乙炔，也可用丙烷、丁烷、氢气、天然气等作燃烧气体。在特殊情况下，压缩空气可采用惰性气体。空气的纯度、流速、压力、线材种类、直径、进给速度等影响涂层质量。

氧、乙炔的比例为1:1时，产生中性火焰，火焰温度约3 040℃。比例增加，温度升高，形成氧化气氛；比例减少，温度降低，形成还原气氛。喷涂距离为100～250mm。

①线材火焰喷涂：图2-13-2和2-13-3分别为氧—乙炔线材火焰喷涂的原理及装置。将线材从喷涂枪的中心孔内送入氧—燃烧气体火焰中，尖端被熔化，喷嘴周围的压缩空气将熔化的材料雾化加速，喷射到工件表面沉积为涂层。手工喷涂时，利用喷枪中的空气涡轮送进线材，送进速度因受压缩空气的影响难以实现微调与恒定，但枪体结构紧凑、重量轻。机械喷涂时，采用喷枪中的电机送丝，克服空气涡轮的缺点，但枪体笨重。

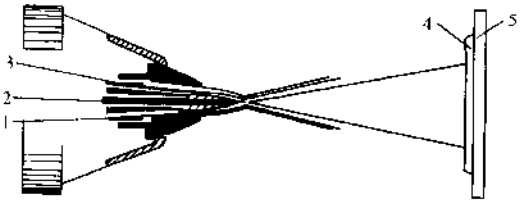


图2-13-2 线材火焰喷涂原理示意图

1-氧-乙炔；2-线材；3-压缩空气；4-涂层；5-基体

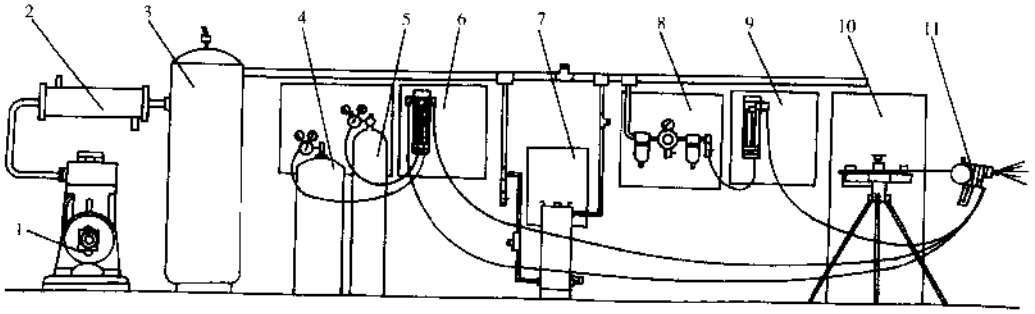


图2-13-3 线材火焰喷涂装置示意图

1-空压机；2-干燥器；3-过滤器；4-乙炔；5-氧气；6-流量表；7-净化器；8-控制器；9 空气流量表；10-丝架；11-喷枪

②粉末火焰喷涂：图2-13-4为粉末火焰喷涂的装置和原理。粉末装在料斗中，料斗可以与喷枪构成一体，也可以单独设置。粉末自然落入或由自动送粉装置送入喷枪内的气流中，随气流从喷嘴端部的火焰中喷出。有时为提高粒子的飞行速度，在火焰外围附加压缩空气，压缩空气还有冷却喷枪和基体的作用。

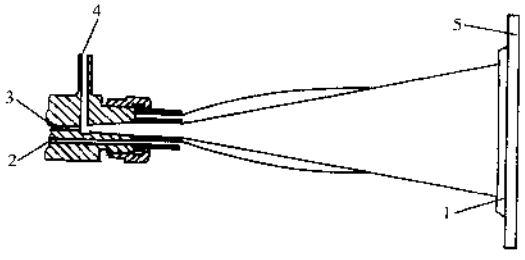


图2-13-4 粉末火焰喷涂原理示意图

1-涂层；2-氧气；3-燃气；4-粉末；5-基体

2）超音速火焰喷涂

图2-13-5表示超音速火焰喷枪的工作原理，燃料气和氧气（助燃剂）以一定的比例在枪体燃烧室混合并在高压下燃烧后，进入喷嘴并由高温高速燃气带出，直接喷到工件上。喷枪由循环水冷却。燃气的温度取决于燃料气与助燃剂的比例和流量，粒子的温度取决于粒子的种类、形状、尺寸、密度和流量。最常用的燃料气是丙烯，也可以用氢气、丙

汽车论坛 http://www.qclt.com

烷、混合气（乙炔-甲烷-丙烷）。

超音速火焰喷涂焰流速度大（喷嘴出口处约达1520m/s），粒子对基体的撞击作用大，粒子与基体、粒子与粒子间的结合强度高，涂层表面粗糙度低；焰流呈细长形，能量集中，喷涂作业距离较宽（0.1～3.0m）；焰流中空气少，喷涂材料氧化较轻；火焰温度较低，允许使用的粉末粒径较小（10～53μm），只适于金属及低熔点陶瓷粉末；噪声大（＞120dB），需隔音和防护装置。

3）电弧喷涂

图2-13-6表示电弧喷涂的原理。两根相互绝缘的喷涂线材分别与18～20V直流电源的正负极相接，在喷嘴出口处形成电弧并熔化线材端部，熔化的喷涂材料被压缩空气（压力0.5～0.7MPa，用量1.2m³/min）雾化加速并喷射到基体表面。电弧喷涂设备简单，喷涂材料利用率高，气源单一、成本低，易于实现自动化。采用不同材料的两根金属线材能够得到伪金属涂层，但只能喷涂金属和合金线材。

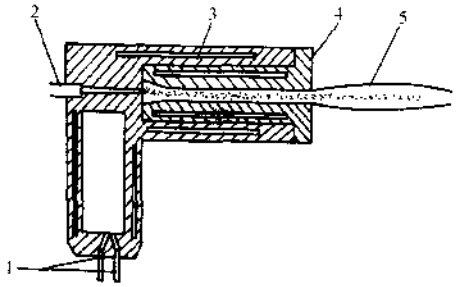


图2-13-5 超音速火焰喷枪原理示意图
1-氧、燃气；2-粉末；3-冷却水路；4-喷嘴；5-火焰

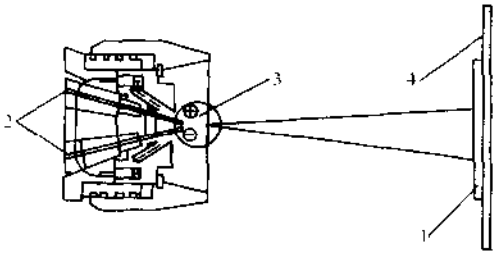


图2-13-6 电弧喷涂原理示意图
1-涂层；2-线材；3-电弧区；4-基体

如把一根线材连接阴极，喷嘴连接阳极，就是单丝电弧喷涂。单丝电弧喷涂送丝速度容易控制，涂层质量稳定，喷枪重量轻；便于实现惰性气体保护，喷涂活性金属。

如采用计算机，可以自动调节电源功率，使喷涂工作处于最佳状态。

电弧喷涂可以在真空或保护气氛中进行，实现活性金属的高效喷涂。

喷涂距离一般为150mm，根据喷涂设备和喷涂材料调整压缩空气压力和流量、电压、线材送进速度。

4）等离子喷涂

用非转移弧把工作气体电离成高温等离子体，并从喷嘴喷出形成等离子焰，将喷涂粉末熔化喷射到工件表面。喷涂设备和原理分别见图2-13-7和图2-13-8。常规的等离子喷涂采用直流非转移弧在空气中进行。设备功率约40kW，喷枪的阴极一般用高熔点、电子发射能力强的钨电极，喷嘴为铜材阳极。工作气体可用氩气、氮气，或在这些气体中加入氢气，也可采用氩气和氢气的混合气。等离子火焰的轴向温度梯度大，喷涂粉末必须送到焰心，送粉载气量为工作气的1/5～1/3。喷涂距离100～150mm，每次喷涂厚度0.02～0.03mm。

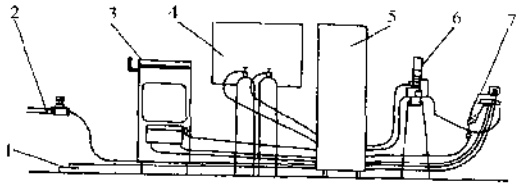


图2-13-7 等离子喷涂设备示意图
1-排水；2-供水；3-电源；4-气瓶；5-控制柜；6-送粉器；7-喷枪

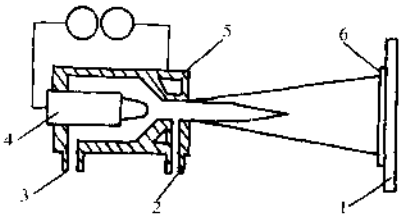


图2-13-8 等离子喷涂原理示意图
1-基体；2-粉末；3-工作气；4-阴极；5-阳极；6-涂层

等离子喷涂设备火焰温度高，几乎可以熔化所有材料、应用广泛，在喷涂高熔点陶瓷材料方面有独特的优越性。但设备昂贵，喷涂成本高，效率较低

5）常用喷涂方法比较

常用喷涂方法见表 2-13-7。

表 2-13-7 常用热喷涂方法比较表

喷涂方法	燃气法			气体放电法	
	线材	粉末	超音速	电弧	等离子
热源	氧气 乙炔			电能	电能，氢、氩、氮、氦气
喷涂材料	金属 合金	金属，合金 高分子 部分陶瓷	金属 合金 部分陶瓷	金属 合金	金属 合金 陶瓷
加热温度（℃）	2 500 ~ 3 500		2 550 ~ 2 924	4 000 ~ 6 000	12 000 ~ 16 000
粒子速度（m/s）	150 ~ 200	24 ~ 50	986	150 ~ 200	300 ~ 350
喷涂材料形式	线	粉		线	粉
基本温度（℃）	< 200				
结合强度（MPa）	15 ~ 20		80	20 ~ 30	40 ~ 50
气孔率（%）	10 ~ 15		1	10 ~ 15	1 ~ 10
涂层厚度（mm）	0.3 ~ 1.0	0.2 ~ 1.0	0.1 ~ 1.0	0.1 ~ 3.0	0.05 ~ 0.5
成本	低		较高	低	高

2.13.2.3 热喷涂材料

1）工艺性能

材料在喷涂中经历加热、冷却过程，除满足涂层使用性能外，还应具备热稳定性，与基体材料相近的热膨胀系数，良好的固态流动性和润湿性。

2）形式

有线材（棒材）、粉末。能够拉拔的金属或合金可以制成线材。粉末材料包括镍基、铁基和铜基等合金粉末；铁、镍、钴基体加入强氧化元素硼和硅形成的熔点低、自行脱氧造渣的自熔性合金粉末；由两种或两种以上不同成分的固相材料结合后制成的复合粉末；氧化铝、氧化锆等氧化物陶瓷粉末；碳化钨、碳化钛、碳化铬等碳化物陶瓷加入钴、镍等粘结剂形成的金属陶瓷粉末；聚乙烯、尼龙等热塑性塑料粉末；环氧树脂等热固性塑料粉末。陶瓷或金属陶瓷制成的棒材。

3）分类

汽车生产中，热喷涂主要用于提高零件的耐磨损、耐热、耐腐蚀性，热喷涂材料按用途分类见表 2-13-8。

表 2-13-8 热喷涂材料分类表

用途	材料
耐磨损	碳钢、低合金钢、不锈钢（马氏体）、铁基合金、镍—铬合金、自熔性合金、硬金属（钼）、陶瓷
耐热	耐热钢、耐热合金、自熔性合金、陶瓷、金属陶瓷
耐腐蚀	锌、铝、锌—铝合金、不锈钢、镍及合金、自熔性合金、铜及合金、陶瓷、塑料

汽车论坛 http://www.qclt.com

2.13.2.4 金属表面热喷涂工艺

1）表面清理

a. 清洗：用专用清理溶剂或三氯乙烯清洗，去除油污。个别部位可用溶剂擦洗，再用压缩空气吹干。

b. 清理喷砂：去除氧化皮、油污等，但除油效果较差。

c. 加热：多孔状或有狭缝的零件，加热到超过喷涂时的温度，工件内部的油污渗到表面上，采用清理喷砂、清洗等办法去除。

2）表面粗化

a. 粗化喷砂：喷砂成本低、效率高，是最常用的方法。一般采用刚玉砂（Al_2O_3）、也可采用石英砂（SiO_2）。喷砂后的零件表面必须清洁。

b. 切削加工：回转体零件表面车螺纹，无法车削的进行磨削或用其他切削方法。

c. 喷涂自粘结层：能够粘结于清洁光滑基体表面的涂层属自粘结涂层。在光滑表面上喷涂自粘结涂层后直接喷涂面层。为提高结合强度，自粘结材料也可以喷涂在粗化后的表面上。铝、铝包镍（铝镍比为95：5）复合粉末（或线材）是最常用的自粘结材料。

3）热喷涂方法的选择

a. 喷涂材料熔点低、涂层结合强度要求不高时，可采用设备简单、成本低的火焰喷涂。

b. 涂层要求较高或喷涂材料熔点很高时，可采用等离子喷涂。

c. 超音速火焰喷涂能够满足严格的结合强度和孔隙率要求，特别适于易氧化喷涂材料。

b. 大面积金属涂层宜采用电弧喷涂。

根据需要可只喷涂结合层、或只喷涂工作层、或采用双涂层或多涂层。

4）涂层改质

通过氧—乙炔焰、加热炉、感应加热设备、激光等把涂层熔融，减少孔隙率，增加结合强度，提高耐腐蚀性。

5）表面加工

用立方氮化硼刀具车削，或聚晶金刚石、立方氮化硼砂轮磨削。新的加工方法有电解磨削和超声振动车削。有时不需加工。

6）涂层检测

耐磨损、耐热、耐腐蚀涂层，在线检查涂层厚度，通过读数量仪测出零件喷涂前后的尺寸来确定；或使用涡流测厚仪测量。线外抽检结合强度（基体与涂层间）、硬度、孔隙率。

2.13.2.5 热喷涂技术在汽车上的应用

国内批量生产中，火焰和等离子喷涂工艺已成功运用于变速器拨叉、同步环、发动机活塞环的喷钼。国外应用较多，特别是发动机零件，如在铝合金气门挺杆表面电弧喷涂碳钢，铝缸体的缸孔等离子或火焰喷涂铸铁，活塞头部、气门、燃烧室等离子喷涂陶瓷。

①热喷涂在国内的应用实例：采用美国美科（METCO）公司5K型喷枪和燃气、压缩空气控制装置，配套国产清洗、粗化、机械及电控设备，喷涂轿车变速器拨叉（铝质、钢质）和同步环（铝质、铜质），耐磨损性与淬火高碳钢或工具钢相当，喷涂部位见图2-13-9，拨叉两侧共六处平面，每侧三处；同步环内锥面。

②工艺过程：零件切削加工后，清洗（三氯乙烯）、

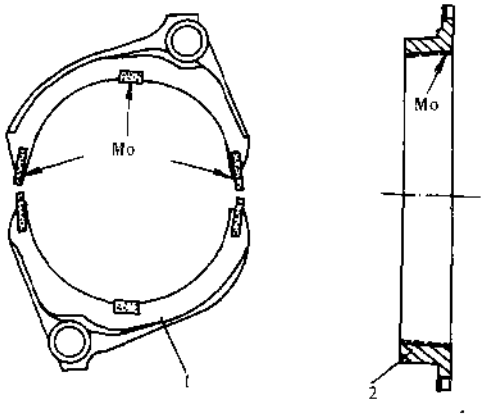


图2-13-9 喷涂部位示意图
1-拨叉；2-同步环

粗化、氧—乙炔线材火焰喷钼（喷枪不动、工件旋转）、检验，喷涂拨叉同一次装夹两件。工艺参数见表2-13-9。

表 2-13-9 氧—乙炔线材火焰喷钼工艺参数表

钼丝	直径（mm）	3.175	喷距（mm）		150～200
	纯度（%）	99.95	喷射角（°）		90
砂粒	材料	刚玉	零件转速（r/min）		100
	粒度（目）	16	每件净喷涂时间（s）	拨叉	20
气压（MPa）	氧气	0.25		同步环	15
	乙炔	0.14	不同件层厚（mm）		0.07～0.12
	压缩空气	0.6	每件层厚误差（mm）		0.02

③检测：涂层厚度——涡电流测厚仪，频率1/20；结合强度——零件施力变形后，脱落的钼层呈粒状，不应是片状，只在工艺调整时检查；硬度、孔隙率不检查。

④注意事项：燃气纯度需严格控制；压缩空气不含油和水，该例中由专用空压机供气，露点约－40℃；零件的喷涂部位必须干净，操作者的手不能接触，喷砂后不许存放；喷涂工作环境在噪声、消防方面需特殊处理。

随着汽车材料的改进，热喷涂技术应用将日益广泛。（撰稿人：杨春杰）

2.14 无损检测

2.14.1 概述

无损检测（NDT：Non－Destructive Testing）是在不损坏材料或试件等检查对象的前提下，检测材料或试件的特性及存在缺陷的技术。

无损检测包括两个方面内容，即无损探伤和材质检测。目前广泛应用的无损探伤方法有磁粉探伤、渗透探伤、涡流探伤、超声波探伤、射线探伤、声发射探伤、红外成像探伤及激光全息探伤等检测方法。

材质检测是利用材料或试件的声、电、磁、热、光等物理特性来无损检测其物理性能，如硬度、铁素体含量、球化率等级、渗碳体含量、晶粒度等级、硬化层深度、金属材料或试件的厚度及其表面的非金属覆盖膜层的厚度或其表面残余应力等。

2.14.2 无损探伤

2.14.2.1 磁粉探伤

1）磁粉探伤原理

铁磁性材料或试件磁化后，由于表面和近表面的缺陷处磁力线变形而形成可检测的漏磁场。该漏磁场可吸附磁粉粒子，从面显示出缺陷的位置、形状和大小，这就是磁粉探伤的原理，见图2-14-1。

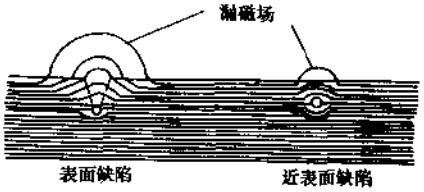


图2-14-1 缺陷处的漏磁场

2）磁粉探伤的磁化方法

GB/T15822—1995给出常用的7种磁化方法。此外，尚有冲击电流磁化法、永久磁铁磁化法及马鞍形线圈磁化法等。

由于汽车零件几何形状较复杂，多数采用磁粉探伤的专用设备，磁化方法是上述方法中两种或两种以上方法的综合使用。图2-14-2是几种典型汽车零件的磁化方

汽车论坛 http://www.qclt.com

法。

在图 2-14-2 中，图 2-14-2a 采用了线圈法和直接通电法。图 2-14-2b 是较复杂的多路磁化，其中，KI、KIV 为直接通电法的周向磁化；LI、LIII 为线圈法的纵向磁化。

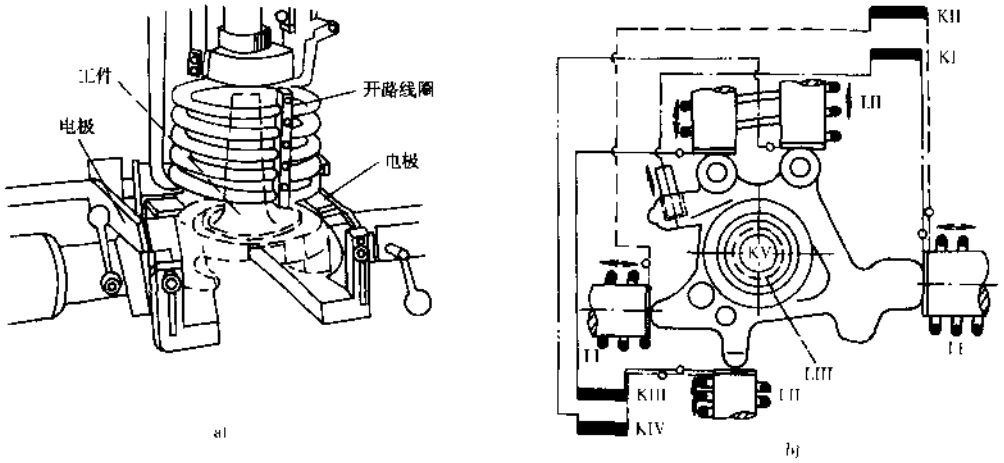


图 2-14-2 典型汽车零件探伤方法
a）线圈法和直通电法；b）多路磁化

3）探伤操作

①前处理：将工件上的油脂、涂料、锈斑、氧化皮及其它附着物清除掉，并清洗干净。

②磁化：磁化时，要根据探伤装置的特性，工件的磁特性、形状、尺寸、表面状态、缺陷性质等，确定施加磁粉或磁悬液的时间以及需要的磁场方向和磁场强度。然后选定磁化方法、磁化电流种类、电流值及有效探伤范围。

上述技术参数的选择是否适当，必须通过综合灵敏度认证。综合灵敏度测试使用 GB/T15822—1995 所规定的 A 型标准试片。在不能使用 A 型标准试片的场合，可使用 C 型标准试片。

③施加磁粉或磁悬液：直接将磁粉（干法）或磁悬液（湿法）均匀地施加在有效探伤范围的探伤表面上。选择的荧光磁粉或非荧光磁粉的磁特性、粒度、分散性、悬浮性及色彩应满足 GB/T15822 -1995 规定。按规定磁悬液的浓度为：非荧光磁粉采用 2 ~ 10g/L，荧光磁粉采用 0.2 ~ 2g/L。

④磁痕观察：磁痕观察须在磁痕形成后立即进行，按 GB/T15822—1995 规定执行。

⑤退磁：

按 GB/T15822—1998 规定，经退磁的试件中的剩余磁感应强度应低于 0.3mT。

⑥探伤记录：将缺陷磁痕按规范分类，对探伤结果评价，对超标试件作标记和处理。

2.14.2.2 渗透探伤

1）渗透探伤原理

利用渗透剂在各种材料表面缺陷中的毛细管作用检测其表面开口缺陷。按渗透剂种类可分为荧光渗透探伤法和着色渗透探伤法。此外，按渗透剂的清洗性可分为：后乳化型、水洗型和溶剂去除型等渗透探伤法。

2）探伤操作

渗透探伤主要有五个主要步骤，如图 2-14-3 所示。

①清洗（前处理）：试件在渗透前的清洗工序。可用有一定压力、温度的水或蒸气，也有用溶剂等清除试件表面的污物，如图 2-14-3a 所示。

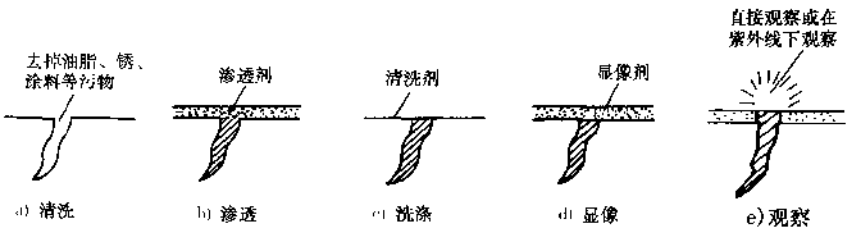


图 2-14-3 渗透探伤检测法

②渗透：试件通过浸渍、涂布、喷洒等手段使渗透剂渗入试件表面的缺陷中。渗透时间及渗透时的温度是重要的参数。有些采用后乳化渗透探伤工艺，应在渗透后进行乳化处理，此时，保证不改变试件表面渗透剂膜的厚度，如图 2-14-3b 所示。

③洗涤：即去除试件表面上的渗透剂的清洗。有时渗透检测、清洗（前处理）与洗涤采用同一清洗物质和工艺。洗涤后必须严格控制干燥的温度和时间，保证试件无缺陷处表面干燥而缺陷中的渗透剂不干燥，如图 2-14-3c 所示。

④显像：显像分干法与湿法，干法是将显像剂均匀涂布在试件表面上；湿法是将试件浸渍在显像剂的水悬浮液中或用溶剂显像剂喷洒在试件表面上，干燥后进行观察，如图 2-14-3d 所示。近年来由于渗透检测技术的发展，出现了不需显像的渗透剂，即渗透干燥后就可以观察。

⑤观察：着色渗透缺陷迹象在白光下观察，其亮度应大于 100lx，相当于 90W 日光灯 1m 处的亮度。荧光渗透缺陷迹象的观察，在紫外光源下进行，一般要求检验迹象表面在距紫外光源 400mm 处，紫外光源的辐照强度不得小于 1 000μw/cm^2。如图 2-14-3e 所示。

⑥后处理：清除试件上的残余渗透物，防止腐蚀。

2.14.2.3 涡流探伤

1）涡流探伤原理

涡流检测是以电磁感应原理为基础的，如图 2-14-4 所示。给激励线圈通以交变电流（即激励电流）就

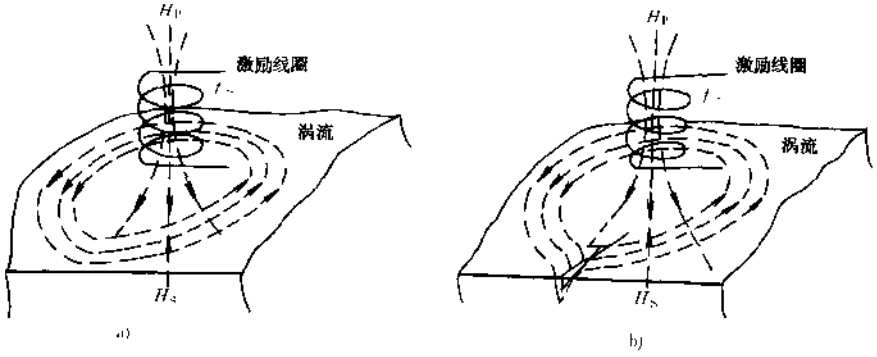


图 2-14-4 涡流探伤原理（探头式线圈）

会在其周围产生一个交变磁场 H_p（初级磁场），线圈靠近被检测导电材料或试件时，在 H_p 作用下，试件中就会感生出交变的电流涡流（图 2-14-4 中虚线环形电流）。而这个涡流在试件中及其周围产生一个附加的交变磁场 H_s（次级磁场），H_p 与 H_s 方向相反。当试件的表面或近表面存在缺陷，必然使涡流流动发生变化，亦涡流场发生畸变，从而 H_s 发生变化，通过检测这些变化来判断试件有无缺陷。

汽车零件的原材料的涡流探伤多采用通过式线圈。由于汽车零件几何形状比较复杂，对其涡流探伤多采用探头式线圈并用多通道的专用的涡流探伤设备，如图 2-14-5 所示。有内孔的材料或试件可用内通式线

汽车论坛 http://www.qclt.com

圈或探头检测其内表面缺陷。

在图 2-14-5 中，图 2-14-5a 为 5 探头检测气门的示意图，图 2-14-5b 为 3 探头检测球头销的示意图，图 2-14-5c 为 5 探头检测挺杆的示意图，其中探头 5 为内表面检测。

2）探伤操作

①线圈的选择：选择通过式（包括内通过式）线圈要考虑试件与线圈之间的填充系数。选择探头式线圈要考虑提离效应的影响，尽量保持提离的间隙不变。检测频率是影响检测灵敏度的关键参数，必须通过试验来确定最佳的检测频率。

②对比试块：按技术文件的要求刻制人工缺陷的对比试块，并用其调试探伤装置的综合灵敏度是否达到规定要求。

③探伤装置参数的调整：综合灵敏度应与其他参数一起调整，如试件的夹持装置、分选装置、检测节拍及使用探头式线圈的提离间隙等。

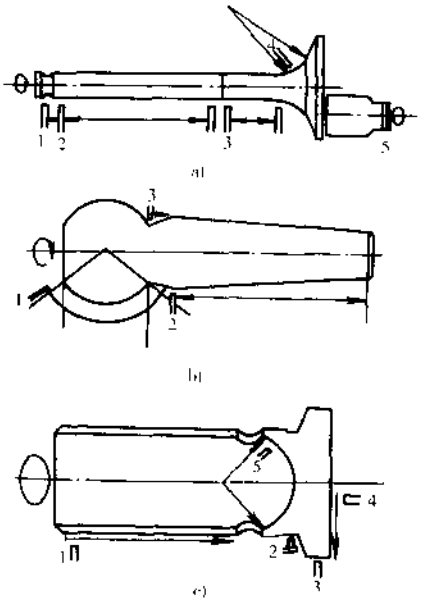


图 2-14-5 几种典型汽车零件的多通道涡流探伤
a）5 探头型；b）3 探头型；c）4 探头型
1、2、3、4、5-探头位置

2.14.2.4 超声波探伤

1）超声波探伤原理

振动频率高于 20 000Hz 的声波称为超声波。超声波波长较短，有指向性，遇到界面产生反射和折射，适于材料或试件内部缺陷检测。超声波探伤使用频率范围为 500kHz～10MHz。根据声介质振动的形式的不同，超声波有纵波、横波、表面波（瑞利波和乐甫波）和板波。表 2-14-1 给出超声探伤中常用材料的声速、波长、密度及钢中不同频率的横波波长。

超声波的产生和接收均由压电晶片通过压电效应完成。按波传播方式分有直探头、斜探头、聚焦探头。按与试件接触方式分有直接接触式和液浸式。在使用直接接触式探头时，探头与试件之间应使用耦合介质，以减少声能的衰减。

表 2-14-1 常用材料的声速和波长

材 料	密度 ρ (g/cm^3)	横波声速 ($10^3m/s$)	纵波声速 ($10^3m/s$)	纵波波长（mm）			声阻抗 PCI. ($10^6g/cm^2\cdot s$)
				1.25MHz	2.5MHz	5MHz	
钢	7.8	3.23	5.9	4.7	2.36	1.18	4.6
铝	2.7	3.08	6.32	5.0	2.53	1.26	1.7
铜	8.9	2.05	4.7	3.76	1.88	0.94	4.2
有机玻璃	1.18	1.43	2.73	2.18	1.09	0.55	0.32
甘油	1.26	–	1.92	1.54	0.77	0.38	0.24
水（20℃）	1.0	–	1.48	1.18	0.59	0.30	0.148
油	0.92	–	1.4	1.12	0.56	0.28	0.128
空气	0.001 3	–	0.34	0.27	0.14	0.07	0.000 04
钢中横波波长（mm）				2.58	1.29	0.65	

图 2-14-6 所示为脉冲反射法探伤的原理图。

由于汽车零件形状较复杂，多采用聚焦探头水浸探伤。设备多用多通道式，多个探头同时探伤，有时试件或探头旋转。

2）探伤操作

a. 选择探伤方法：根据试件的检测要求，选择探伤方法。

b. 选择探伤的设备：根据试件检测的生产节拍选择设备的自动化程度。

c. 用标准试块及对比试块：调试检测设备的各项技术参数及探伤灵敏度。

d. 调试夹持装置、自动上下料装置及喷液系统等；试件或探头旋转时，应调正旋转轴的精度，调整检测节拍及分选装置。

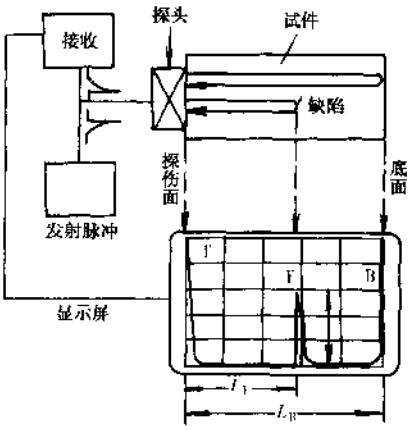


图 2-14-6 脉冲反射法探伤原理
T-发射脉件；F-缺陷反射波；B-底面反射波

2.14.2.5 射线探伤

1）射线探伤原理

工业探伤用的射线有 X 射线、高能 X 射线、γ 射线和中子射线。汽车零件探伤多用 X 射线和 γ 射线。

如图 2-14-7 为射线探伤照相原理图。试件中有厚度为 Δd 的缺陷。在试件另一侧放置装有射线胶片的暗盒。在试件无缺陷部位对应的 p 点和有缺陷部位对应的 P' 点的强度比为：

$$I_{p'}/I_p = e^{-\mu\Delta d}$$

式中：μ——试件对射线的吸收系数。

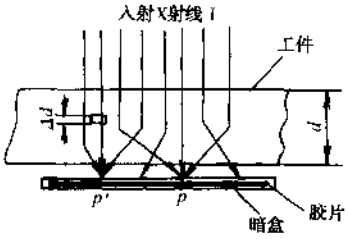


图 2-14-7 射线照相原理示意图

此式表明，缺陷沿透照方向尺寸越大，或 μ 值越大，即缺陷在底片上的黑度差也越大，这就是射线探伤照相原理。

射线探伤除传统的照相法外，还有实时成像及工业 CT。其探伤原理与照相法基本相同，现汽车零件在线射线探伤多采用实时成像法。

2）探伤操作

①射线源的选择　根据试件厚度及灵敏度要求，选择 X 射线源的焦点尺寸及曝光量．采用适当的管电压，为得到较大的黑度差，在保证照透的前提下，尽量选择较低的管电压。在用 γ 射线源时，60Co 源用于检测厚度 30～100mm 钢制件，192Ir 源用于检测厚度 20～70mm 钢制件。

②如果采用射线照相法，必须按 GB5677—1995 或 GB3323—82 标准规定选择胶片，增感屏。灵敏度、黑度范围等各项技术指标必须符合上述标准的规定。

③灵敏度采用 GB5618—85 标准规定的像质计，采用的组别及放置方法均按规定执行。有些特定场合要求使用厚度计（谐调计）应按技术文件规定执行。

④缺陷等级分类：参照 GB5677—1995 及 GB3323—82 标准，也可使用企业标准。

⑤由于射线有碍人体健康，从事放射线工作，必须执行国家标准 GBJ8—74 放射防护规定。

2.14.2.6 汽车零件无损探伤区域的划分

为保证汽车的安全性、可靠性，很多汽车零件成为保安件、关键件。为保证这些工件的制造质量及其使用性能，必须对这些零件实施无损探伤。

从经济性考虑，汽车零件的内部或表面，在各个不同的区域允许存在不同尺寸的缺陷。在制订汽车零件无损探伤规范时，就必须对零件无损探伤的区域进行划分。一般几何形状简单的工件如各种销子类可不划分区域。但多数汽车的保安件、关键件几何形状比较复杂，一般区域划分 2～3 个区域。

探伤区域可分：重点探伤区、一般探伤区。

1）重点探伤区

重点探伤区一般定为 I 区，如果重点探伤区域较多，分区为 3 个以上时，II 区也是重点探伤区。它要求以下几个方面：

汽车论坛 http://www.qclt.com

①使用的探伤设备及仪器，在这个区域探伤时必需保证其检测的灵敏度达到零件的探伤要求的技术参数。

②在设计探伤的夹具及其它辅助设备时（如上下料装置、水浸装置、探头的扫查装置等），必须保证在工件的这个区域内无探伤盲区。

③判伤时，这个区域应具有最佳的观测条件。

④制作人工缺陷对比试块，必须反映这个区域的缺陷当量与灵敏度的关系。

2）重点探伤区域划分原则

①根据工件设计技术参数、受力最大服役条件恶劣的区域为重点探伤区域。

②根据用户反馈信息，经常断裂的区域为重点探伤区。

③工件按制造工艺要求，局部热处理的区域。如转向节的轴部、转向轴的根部、拨叉的拨叉口部、挺杆的顶面等区域为重点探伤区。

④工件按制造工艺要求，局部喷丸强化区、滚压强化区、焊接件的焊缝及热影响区等为重点探伤区。

⑤同一工件在不同工序后的探伤使用不同的探伤方法，探伤的重点区域划分也不同。

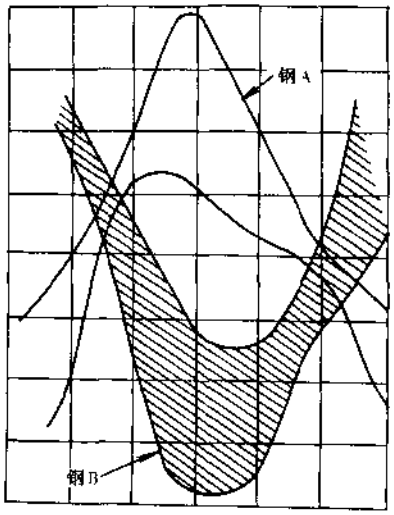
2.14.3 材质检测

2.14.3.1 电磁检测

铁磁性材料的矫顽力和磁导率对成分、组织及热加工等因素最为敏感。在钢的不同组织转变中，其电导率、密度、弹性等物理量仅仅改变 10～100 倍，而矫顽力和磁导率将能改变 10^5 倍。因此广泛地应用矫顽力（或剩磁）、磁导率来检测钢铁材料及工件的各项物理性能，如硬度、硬化层深度、含碳量、铁素体含量、球化率等级及残余应力等。

图 2-14-8 所示两种成分略有区别的弹簧钢辊轧毛坯的含碳量电磁分选曲线。含碳量仅相差 0.07%，还是明显可分的。

图 2-14-9 所示的是高强度螺栓硬度电磁分选曲线。图中 1 区为过硬区；2 区为合格区；3 区为过软区。分选精度为 ± 1HRC。



钢	化学成分 %				
	C	Si	Mn	P	S
A……	0.55	0.170	0.80	0.012	0.021
B……	0.62	0.159	0.83	0.020	0.027

图 2-14-8 弹簧钢辊轧毛坯含碳量分选曲线

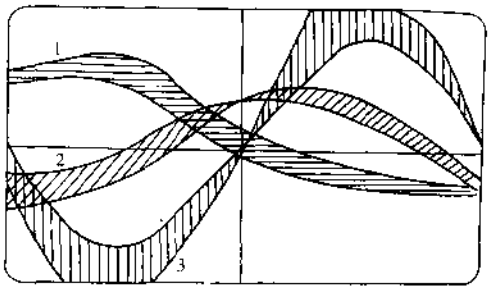


图 2-14-9 高强度螺栓硬度电磁分选曲线
1-过硬区；2-合格区；3-过软区

2.14.3.2 超声波检测

①晶粒度检测：超声波在金属介质中传播，由于晶粒度不同，超声波的衰减也不同，通过选择频率和探头，即可检测晶粒度的等级。

②球化率分选：在铸铁基体组织中，散布着大量游离石墨微粒，游离石墨呈球状、片状等形态。试验证明，铸铁材料中游离石墨形态不同，是引起声速巨大差异的主要原因。

用声速法检测球化率，可用专用的球化率分选仪，也可用超声波探伤仪加测时附件和频率计，也可用超声波测厚仪，不管采用什么设备，须制备对比试件来调试仪器的检测精度。

应注意的是，不同化学成分的球墨铸铁，不同的检测仪器和检测频率，得到的声速值不同，但检测的规律是相同的，故须用对比试件作检测曲线。对比试件越多，检测的精度越高，一般实验表明不得少于20件。

2.14.3.3 X射线应力检测

X射线应力测定是根据X射线衍射测出晶面间距的变化来计算材料应力的方法。X射线应力测定，各项技术参数选择如测定方法、X射线源、入射角、滤光片、光栏、衍射峰值的位置及计算方法、X射线弹性常数和应力常数及应力值计算方法等应按GB7704—87标准执行

2.14.4 无损检测方法的比较

汽车零件及材料常用的无损检测方法比较如表2-14-2所示。

表2-14-2 常用无损检测方法比较

		方法原理	检测项目	适用材质	主要检测对象
电磁检测	磁粉探伤	磁力作用	表面及近表面的缺陷	铁磁性材料	锻钢件、压延件、铸钢件、焊缝、管材、棒材、型材和机加工件
	涡流探伤	电磁感应	表面及近表面的缺陷	导电材料	管材、线材、棒材及金属工件
	电磁分选	电磁感应	材质分选及应力检测	铁磁性材料	铁磁性材料的零件
声波检测	超声探伤	超声波的反射与吸收	内部缺陷检测	超声介质	铸件、锻件、焊缝及机加工零件
	超声检测	超声波的传播特性	晶粒度、球化率等检测	超声介质	球铁铸件及其它铸件、热处理零件等
射线检测	射线探伤	射线与物质的作用	内部缺陷检测	金属及非金属材料	铸件、锻件、焊缝及机加工零件
	射线检测	射线的衍射分析	残余应力及板材厚度检测	金属材料	热处理及表面强化处理后的工件，失效分析工件，各种板材
渗透检测	渗透探伤	毛细作用	表面开口缺陷	任何非多孔材料	表面有开口缺陷且不适合用磁粉或涡流探伤的工件
	渗透检测	毛细作用	渗漏检测	任何非多孔材料	各种壳体、容器等

（撰稿人：安宝祥 张连玉）

2.15 快速成形

快速成形技术（RPM）是90年代发展起来的集CAD/CAM、激光加工技术、现代数控技术、新材料技术为一体的设计、制造零件原型的新制造技术。它对缩短新产品设计、开发和试制周期起到关键的作用。该技术先是利用CAD系统进行工件的三维几何造型设计，然后将三维实体模型切分成一系列二维几何信息，通过数控系统，采用粘结、熔结、聚合或化学反应等手段，将材料一层一层地快速堆聚和结合，形成该工件的实物模型。因此它是通过材料的累积而不是传统的去除材料的方法来获得工件实体，为难以用传统切削方法制作工件提供了一种全新而快速的制造方法。目前常用的快速成形技术有：立体平版印刷（SLA）、选择性激光烧结（SLS）、叠层实体制造（LOM）、直接制造壳型铸造（USPC）、融积成形制造（FDM）以及多相喷射凝固（MJS）、光屏蔽快速成形技术等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

立体平版印刷技术（SLA）是将CAD系统形成的工件三维几何模型，用CAD系统的切片软件切割成一系列薄层平面数据模型．紫外激光扫描器根据这些薄片的平面几何信息，逐层在 X、Y 坐标平面内扫描，使容器中的环氧、乙稀酸或丙稀酸树脂液体在紫外线扫描下，在工作台上逐层固化，制成三维工件实体。

选择激光烧结技术（SLS）是将CAD系统形成的三维模型切割成一系列平面几何数据后，采用 CO_2 红外激光对金属粉末逐层扫描加热，使其逐层烧结形成工件实体。

叠层实体制造技术（LOM）是根据CAD三维模型各层切面的平面几何数据，用 CO_2 激光器对箔材进行分层切割，并用热压辊将切割的箔材逐层牢固粘接，最终形成三维的层压状工件。

直接制造壳型铸造技术（DSPC）是先将CAD三维模型转换成用于浇注铸件的壳型CAD模型，并切割成一系列平面几何数据模型，然后将这些数据模型输入型壳制造装置，用喷头逐层向沉积的刚玉粉喷射经雾化并通过电场而带电的硅胶液粘结剂，使刚玉粉逐层固化形成精密铸造的壳型，并对该壳型进行烘干、烧结，然后用金属液浇注到壳型中而获得与CAD三维几何模型形状、尺寸相同的铸件。

融积成形技术（FDM），用于塑料零件原型的无注塑成形制造．是利用快速切片（Quickslice）和支撑工件（Support works）软件对CAD模型进行处理。直接用计算机控制的特殊喷头挤出热塑材料，从工件底部开始由下而上逐层沉积形成和CAD模型形状、尺寸相同的实体工件。（撰稿人：康来明）

参考文献

1.A modern casting Staff Report. 31st Census of World Casting Production—1996. Modern Casting. Dec. 1997. 40～41

2. 铸造工程师手册编写组编．铸造工程师手册．北京：机械工业出版社，1997.

3. 中国机械工程学会铸造专业学会．铸造手册．北京：机械工业出版社，1994.

4. 日本自动车协会．汽车工程手册（铸造篇）．机械工业部第九设计院译．1997.8

5. 中国机械工程学会铸造分会．'98铸造技术论坛论文集．宜昌：1998.10

6. 中国机械工程学会铸造分会．第九届中国铸造学术会议论文集．沈阳：东北大学出版社，1997.

7. 铸造车间和工厂设计手册编委会．铸造车间和工厂设计手册．北京：机械工业出版社，1995.

8. 中国机械工程学会锻压分会．锻模设计手册——模具手册之一．北京：机械工业出版社，1991.

9. 中国机械工程学会锻压分会．锻压手册．北京：机械工业出版社，1993.

10. 国家技术监督局．锻压工艺标准汇编．北京：中国标准出版社，1998.

11. 汽车工程手册（日本）——第二、三章译稿 机械工业部第九设计研究院，1997.

12. 集训编．精压和精确模锻．北京：国防工业出版社，1978

13. 世界汽车工业降成本发展趋势《降成本课题组》 东风汽车公司科技部科技信息室 1998年，第1期

14.A～赫因泽利，T～施比杰利著．金属压力加工力能参数计算手册．王尔德、宋正芳译．哈尔滨：黑龙江科学技术出版社，1987.

15. 世界汽车工业降成本发展趋势．东风汽车公司科技部科技信息室主编．1998年1月

16. 汽车制造工艺实践——第二篇，锻造专业．东风汽车公司制造工程部．1998年第1版

17. 韩凤麟．粉末冶金零件实用手册．北京：兵器工业出版社，1995

18. 日本粉末冶会工业会．烧结机械部品—その设计と制造，技本书院：1987

19. 李绍忠．粉末冶金技术，1996，14（2）：139～144

20.И·М·Федорченко и др.Порошковая Металлургия，Материалы，технология，Свойства，Области Применения，Справочник，Киев Наукова Думка：1985

21. 韩凤麟编著．粉末冶会机械零件，北京：机械工业出版社，1990

22. 黄培云主编．粉末冶金原理，北京：冶会工业出版社，1982

23. 机械工程手册编委会．机械工程手册（材料部分），北京：机械工业出版社，1978

24. 美国金属学会主编．会属手册，1984年第7卷：粉末冶金．韩凤麟主译，北京：机械工业出版社，1994

汽车论坛 http://www.qclt.com

25. U. Eilrich et al. MPR, 1992, 47 (1): 20~23
26. Ancordense offers high-density at low cost, MPR, 1994, 49 (6): 2
27. H. G. Rutj et al. Int. J. Powder Met., 1995, 31 (1): 9~17
28. 亓家钟. 粉末冶金工业, 1995 (1): 14~16; 1996 (6): 14~18
29. 曹勇家. 粉末冶金工业, 1997 年增刊: 65~68
30. 戴涛等. 粉末冶金工业, 1997 (6): 17~19
31. 关庆丰、周喜生等, 汽车工艺与材料, 1997 (8): 1~3
32. Hu J. D. et al. J. Mater. Sci., 1993, 28: 2664
33. 李绍忠、贺奉嘉等. 汽车研究与开发, 1995 (2): 28~31
34. 王志学、丁瑞芳. 汽车工艺与材料, 1995 (2): 1~2; 1996 (5): 34~36
35. 苏堤、贺安安等. 汽车工艺与材料, 1996 (1): 30~32
36. 唐与谌. 粉末冶金工业, 1997 年增刊: 88
37. 中国机械工程学会热处理专业学会热处理手册编委会. 热处理手册. 第 2 卷. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1991.
38. 机械工程手册编委会. 机械工程手册. 机械制造工艺及设备卷 (一). 第 2 卷. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1996.
39. ASM Metal Handbook Vol4 9th Ed. Metals Park Ohio: USA, 1981.
40. ю.М 拉赫金 .A.г. 拉赫斯塔德特. 机械制造中的热处理手册. 第 1 版. 上海: 上海科学技术文献出版社出版, 1986.
41. 江西省机械科学研究所主办、国外金属热处理, 双月刊第 17 卷. 第 1~2 期. 南昌 1996.4
42. 孟少农. 机械加工工艺手册. 北京: 机械工业出版社, 1991.
43. 沈鸿、何光远. 机械工程手册. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 1997.
44. 顾永生. 现代轿车先进制造工艺. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
45. 王绍俊. 机械制造工艺设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1985.
46. 刘惟信. 圆锥齿轮与双曲面齿轮传动. 北京: 人民交通出版社, 1980.
47. 小林明. 汽车工程手册, 第三分册. 北京: 机械工业出版社, 1985.
48. 东风汽车工程研究所, 许广仓编. 汽车冲模材料及热处理.
49. 东风汽车工程研究所, 许广仓编. 汽车冲模材料及热处理.
50. 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册 (第二版), 机械制进工业及设备卷 (一). 机械工业出版社, 1996.
51. 许广仓. 汽车冲模材料及热处理. 东风汽车工程研究所
52. 王孝培. 冲压设计资料. 北京: 机械工业出版社, 1983.
53. (日) 冲压加工技术手册编委会. 冲压加工技术手册. 北京: 轻工业出版社, 1986.
54. Handbuch der Umformtechnik. Schuler GmbH. 1996. P233~257
55. 日本自动车协会. 汽车工程手册. 北京: 机械工业出版社, 1988.
56. 王锡春. 最新汽车涂装技术. 北京: 机械工业出版社, 1997.
57. 虞兆年. 涂料工艺. 北京: 化学工业出版社, 1997.
58. Improving the Painting Process. 德国杜尔公司资料.
59. 中国机械工程学会焊接专业委员会. 焊接手册. 北京: 机械工业出版社, 1988.
60. 曾乐. 现代焊接技术手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
61. 赵文轸. 金属材料表面新技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1995
62. 陈学定、韩文政. 表面涂层技术. 北京: 机械工业出版社, 1994.
63. 张继世、刘江. 金属表面工艺. 北京机械工业出版社, 1995.
64. 杨耀华. 等离子喷涂和燃烧火焰喷涂技术. 机械制造实用新技术丛书. 北京: 国防工业出版社, 1984.

汽车论坛 http://www.qclt.com

3 零部件加工

3.1 发 动 机

3.1.1 气缸体、气缸盖

3.1.1.1 缸体

1）缸体概述

缸体（Cylinder block）又称气缸体或曲轴箱，为发动机中最大的零件，材料为铸铁或铝合金。一般采用耐磨性好、铸造性好、价格低廉的铸铁。随着发动机轻量化，铝合金材料在国外已被广泛采用。

缸体分为单缸、双缸和多缸，形式上分为直列、V型、星形对置等，轿车上一般采用直列和V型。

缸体是发动机其它零件或总成安装固定的基体，结构上为薄壁形式。壁厚一般为5～6mm，缸筒内壁厚为3.5～4mm。固定用的凸台为确保刚性，直径一般为17～20mm。另外设有必要的加强筋。缸体的加工，一般有铣、钻、扩铰、镗、镗铰、攻丝、珩磨，工序上还有清洗、装配及密封检验。

缸体加工方式以生产线为主，目前世界上以刚性自动线为主，FMS作为批量生产尚不多见。刚性自动线是指以若干条专机加工自动线及其它辅助设备组成，线间自动连接的完整的自动生产线。为防止缸体加工面在滚道上互相的碰伤可以采用两端面留有一些毛坯边的方法，见表3-1-1。

机加工可分为干式和湿式两种。湿式加工采用大流量冷却流，起到冷却、排屑和减少粉尘的作用。但由于机床内冲屑喷嘴的走位或堵塞，易引起冷却不充分，反而不利于切削刀具。同时大量切削液的排放，随各国环保要求的不断提高，费用也越来越高。近来，较多发动机制造厂越来越广泛采用干式加工。干式加工采用压缩空气进行排屑。

湿式加工的优点在于冷却充分，排屑好，但冷却液的处理较复杂，机床的防护要求高。干式加工则无需冷却液，有利于铸铁工件的防锈，由于刀具材料的发展，刀具冷却的要求逐步降低。

2）定位

缸体最常用的定位体系采用基准底面和二定位销孔。

对于夹具支承定位面的清洁，一般可采用压缩空气。压缩空气经缸体支承面的反射，将工件及夹具两个面吹净。

同时对于较重要的工位，如镗孔工位，还采用气密封式定位检查，其原理为当工件夹紧后，用压缩空气的压降差来判定缸体定位面与夹具定位面之间是否贴合。报警压降差应根据工件的被加工精度进行调整，压降差设得过小易造成频繁误报警，过大则不起作用，一般可采用0.25MPa工作压力，压差控制在0.01～0.03MPa。

3）加工过程

（1）缸体的加工

缸体的加工过程大致为粗铣上下平面、钻、扩、铰定位销孔、钻扩攻各孔、预清洗、装配、油道气密性检查、精加工、终清洗、装配及水腔气密封检查、终检。

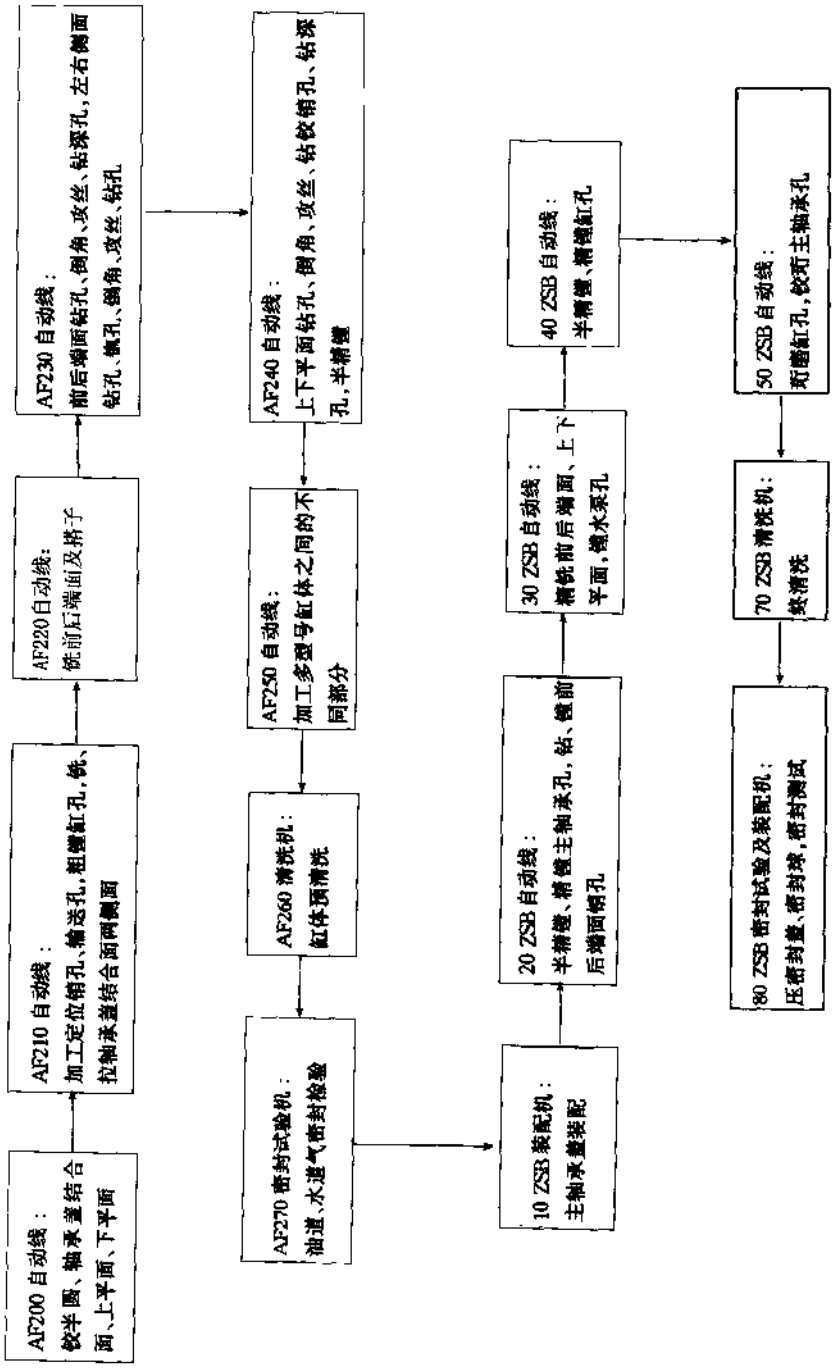
所涉及的加工方法有铣、钻、扩、铰、镗、珩磨等。

（2）定位面、定位销的加工

用缸体毛坯进行机加工时，首先必须确定粗基准。粗基准一般以缸孔（毛坯面）为测量基准，小批量生产

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 3-1-1 缸体加工工序



汽车论坛 http://www.qclt.com

时可采用划线的方法，大批量生产则采用在缸体上适当部位加工出定位槽和定位面，以此作为粗基准，尺寸公差在±0.10mm。随着铸造技术的提高，也可直接采用毛坯面作为粗基准，尺寸公差在±0.5mm。用粗基准可首先将缸体上平面、下平面、前后端面铣出（粗铣），对将作为基准面的下平面一般可进一步精铣，使之成为精基准。由于平面在整个加工中使用频繁，在夹紧及输送过程中易产生压痕及划伤，造成配合面密封不良，所以可以采用在生产线最后的精加工中对该定位面再精铣一次，这样可较彻底解决压痕。不利方面是精铣后一旦需要返工，则较难利用现成生产线进行加工，因为基准面已改变了。

定位销孔加工一般在粗铣后进行，原因是粗铣时切削量较大，对工件的负荷较大，用粗基准进行铣加工可不影响定位销的精度，以便在以后的加工中（孔、小的凸台平面及精加工）保持定位的精度。同时，粗铣加工可大量释放铸件的内应力，在此之后，再加上定位销有利于定位销的几何尺寸不受影响。

（3）一般孔的加工过程

缸体上存在大量的螺孔及油孔，分布在各个面上，并有部分孔是带有角度的斜孔，对于这些孔，在大批量生产时必须考虑刀具及异常情况的报警。一般过程为钻孔、探测、攻丝、探测。钻孔的探测可以分为二种方式，一是用探针直接伸入加工好的孔内，探针为空心管结构，通常有压缩空气或冷却液，用以冲刷孔内切屑，以利攻丝，当孔加工正常时，探针复位发出正常信号，一旦有断钻头在孔内或因钻头断裂，没有完全钻出底孔，则探针受阻并报警，应由人工干预，检查工件、刀具，排除异常情况。第二种方法是检查刀具，即在每次加工后，用探针触击钻头的头部，用以判断刀具是否受损。

攻丝的探测，除了采用如钻孔的二种方法外，还有采用电子传感的方法。在丝锥接杆内装有传感器，当丝锥加工阻力过大时，钻杆回缩，发出无线电信号，并由天线接收、告知控制系统。

（4）缸孔的加工

缸孔由于其重要性，因此有较高加工要求，直径公差为0.010mm，不仅形位公差较严（圆度0.006mm），而且对表面粗糙度以及表面网纹形式均有严格的要求。

加工过程：粗镗→半精镗→精镗→粗珩磨→精珩磨。

对多缸机，为减小切削力，改善切削发热，一般分工位加工，如四缸机可分为二个工位分别加工（1、3缸孔和2、4缸孔）。缸孔的形状公差、表面粗糙度、网纹主要依靠珩磨来最终实现。粗糙度的指标一般由特殊承压面曲线参数Rk、Rpk、Rvk、Mr1和Mr2来衡量开始磨损部分、材料接触部分、油存储的特征表示（DIN4776）。

图3-1-1是在日镜表面上的特殊粗糙度曲线，表示初始磨损的磨损高度Rpk、油存放的凹部分深度Rvk以及长期磨损下表面将被磨损的高度Rk。

图3-1-2表示水平截面下支承长度的比值Mr1、Mr2。

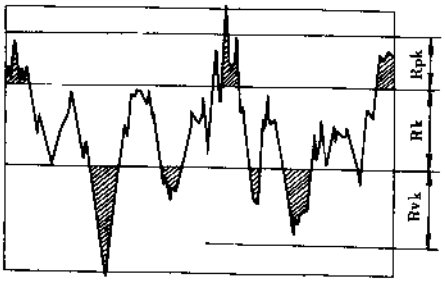


图3-1-1 日镜表面上特殊粗糙度曲线

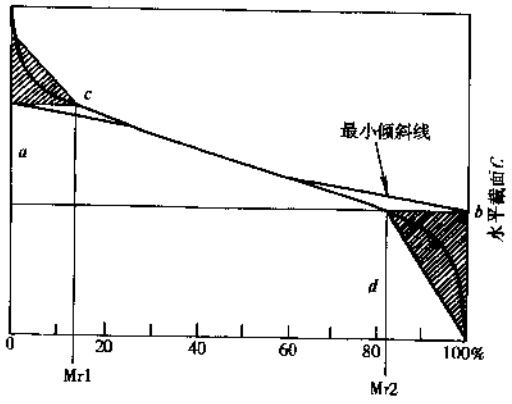


图3-1-2 水平截面下支承长度的比值

图3-1-3表示油存储凹部分深度Rvk。

(5) 主轴承孔的加工

主轴承孔的加工过程：粗镗半圆孔→装上轴承盖→半精镗→精镗→粗珩→精珩

主轴承孔的同轴度对发动机性能有直接的影响，实验表明：在一定范围内同轴度误差与发动机噪声成线性正比关系。

同轴度的实现要贯穿于整个加工过程中，各工位的夹紧点、夹紧力、定位点、定位方式、切削余量以及刀具的切削力、切削参数，均可能对同轴度产生影响。

4) 缸体机加工的质量控制

缸体的加工精度通常要求如下：

缸孔孔径允差：　0.01mm
曲轴孔孔径允差：　0.01mm
定位销孔孔径允差：　0.018mm
曲轴孔同轴度允差：　ϕ0.015mm
气缸孔圆柱度允差：　0.005mm

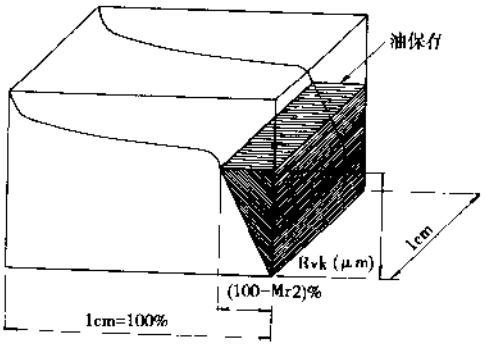


图 3-1-3　油存储凹部分深度

现代化的管理模式要求工件的质量在生产过程中加以保证，因此在缸体的加工过程中，配有必要的测量设备，对于加工要求较高的尺寸，如缸孔、曲轴孔、分油器孔、中间轴孔都有在线测量机，这种测量机是作为自动线的组成部分（一个工位），用于100%的测量，较先进的测量机还具有对加工工位进行尺寸反馈补偿的功能。珩磨工位的尺寸检验是组合在刀杆上的，它对加工过程进行动态测量，即当加工到尺寸以后反馈信息，结束加工过程。除此之外，在每个工序上均有手工抽检工作台，用于对加工处几何尺寸的控制，同时对关键尺寸进行SPC的统计。

另一方面，缸体的综合测量仍是必要的，定时对缸体的所有尺寸进行检验，作为对生产检验的确认。

3.1.1.2　缸盖

气缸盖（Cylinder head）是发动机零件中最主要零件之一。气缸盖材料目前一般采用铝合金材料，以便减轻发动机自身重量。发动机变型几乎都从缸盖变型开始，气缸盖结构的变化，不仅对发动机整机性能变化有着极其重要的影响，而且也对切削工艺和切削设备提出更高的要求。下面就气缸盖的变化发展和加工过程简述如下：

1) 气缸盖变型

气缸盖因其气门结构形式的变化，可分为二气门、三气门、四气门、五气门等，气缸盖因发动机凸轮轴设置位置不同，可分为双顶置、单顶置凸轮轴气缸盖和无凸轮轴气缸盖等等。因气缸数不同，也可分为不同气缸数的不同结构形式的气缸盖等。

气缸盖因气门结构的变化，从二气门到五气门由于显著改善燃烧室工作状况，使其发动机总功率也显著提高。

2) 气缸盖的加工

气缸盖零件加工是发动机零件机加工中颇具特点的。以轿车发动机气缸盖加工为例，因其气缸数、气门数、顶置凸轮轴结构不同，使缸盖加工可能是较为简单的箱式零件加工，也可能是非常复杂的箱式薄壁零件加工。五气门双顶置凸轮轴的气缸盖，是目前世界上最新、结构最复杂的发动机气缸盖。现将气缸盖加工生产线的工序和加工方法简要介绍，见表3-1-2。

气缸盖总体加工工序一般按如下三部分过程进行：

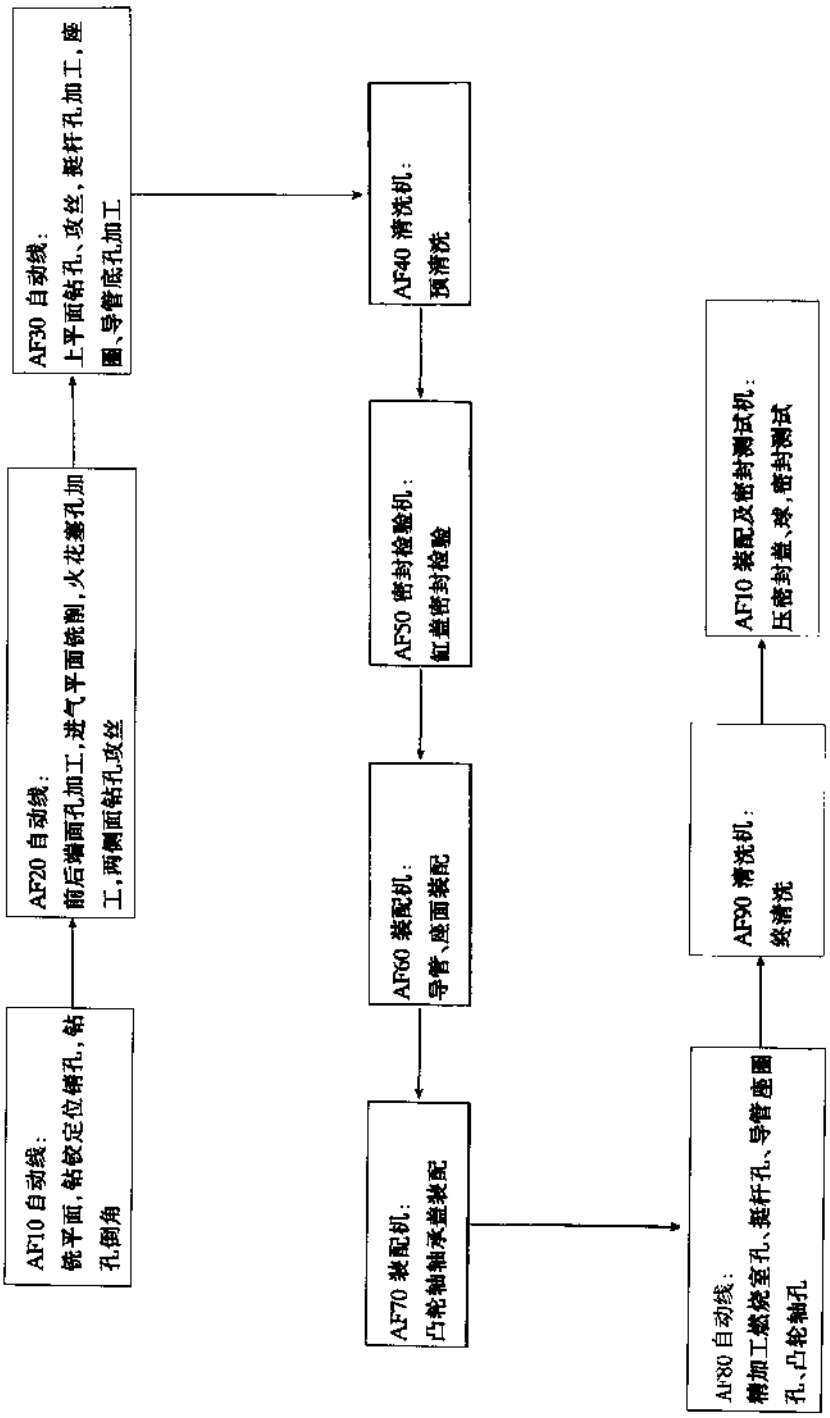
①粗加工、半精加工、部分精加工；

②清洗、密封试验、部分零件装配、部分检测工作；

③装配件粗精加工、部分重要功能尺寸精加工。

汽车论坛　http://www.qclt.com

表 3-1-2 缸体加工工序



汽车论坛 http://www.qclt.com

下面就典型的四气缸二气门气缸盖的加工过程作一简单描述：

第一道工序：完成零件主基准面的粗精加工，一般为排气面（或进排气面）的铣削及定位基准孔的钻、铰等加工内容以及部分其它内容。

第二道工序：完成零件辅助基准面的粗精加工，一般为燃烧室面的铣削（多数到半精加工状态）及定位基准孔的钻、铰等加工内容，以及部分其它内容。

第三道工序：完成零件另外四个平面的铣削加工以及相应的联接孔、螺纹加工等等。其中重要的加工内容有：凸轮轴孔、液压挺杆孔的粗、半精加工，气门导管、气门座圈底孔的粗、精加工。

第四道工序：各类辅机加工内容：清洗、检查、密封试验、装配等。

第五道工序：完成气门座圈、气门导管的粗、精加工，以及凸轮轴孔的粗、精加工。这道工序的过程和加工方式是气缸盖零件加工中最重要，也是最具特色的加工，其精度要求也是最高的。

第六道工序：各类辅机工作内容：清洗、装配和最终检验等。

以上是目前轿车发动机生产中采用较多的加工工艺过程，其中较为有特点的加工工艺有如下几方面：

①凸轮轴孔加工：目前一般有两种典型的加工方法　一种是在专机生产线上采用组合刀杆，通过导向支承装置定位进行加工，其特点是确保刀杆定位，每档孔径任意可调，但夹具结构较为复杂。另一种是在加工中心上采用一组铰刀分别进行铰削加工方式进行，这种加工方式对机床要求较高，夹具很简单普通。由于发动机的变型和发展，气缸盖的结构变化越来越大。目前探索将专机生产线上的加工技术应用在加工中心生产线上，以期加工质量的进一步提高。

②气门座圈和气门导管的加工：气门座圈、导管的加工方法经过多年的实践，已积累了相当多经验。目前在专机生产线上采用的车镗组合刀杆的加工方法取得了很好的加工效果。由于零件切削状态的改善，使其加工精度（圆度、同轴度、径向跳动）等指标，明显优于其它加工方法。另一种加工方法是以成形刀具车削为主的加工方法。这种方法靠刀具质量来保证加工质量，零件在被加工时受力很大，容易产生变形，影响质量。对于零件刚性较好，大批量生产时在柔性生产线应用效果相当好。

③气缸盖零件气门座圈、导管的装配，气缸盖总成是发动机零件中装配零件较多的一个零件，其中尤以气门座圈、导管的装配最有特点。气门导管和座圈一般在被冷却至　150～－180℃的条件下进行装配。在普通的二气门缸盖加工中也可将气缸盖加热至80～90℃时进行装配加工，但也有在常温下进行装配的，但必须说明不是所有气缸盖均可在常温下进行。

④螺纹挤压加工技术的应用，在铝制件产品中采用这种加工技术，使加工质量提高、节拍降低。

以上是气缸盖加工的主要内容。至于清洗及密封试验等方面的技术也有所发展，随着柔性加工技术广泛使用，清洗及密封试验等设备的结构逐步向模块化方向发展。

3）气缸盖的质量保证要求

缸盖的精度通常要求如下：

气门导管孔孔径允差：　0.015mm

凸轮轴孔孔径允差：　0.021mm

凸轮轴孔孔径同轴度允差：　0.03mm

气门导管孔粗糙度：　$Rz6.3\mu m$

气缸盖零件的加工精度从总体上要求7～9级精度范围。为了确保零件的使用功能，气缸盖零件的加工质量应重点控制如下内容：

①座圈密封泄漏量，其密封性的优劣，直接影响到发动机功能性能指标。德国大众集团通常采用400cm³/min的标准来考核。其它企业通常采用检测燃烧室总泄漏量来评定，衡量值一般在600～1 200cm³/min范围内。

②凸轮轴孔及孔径同轴度。凸轮轴孔是缸盖零件加工中精度要求最高的内容之一。国内目前发动机生产的气缸盖凸轮轴孔孔径公差H7及同轴度公差0.03mm。目前通常采用的测量方法为测量专机与手工检具相结合的办法。

③其它加工要求较高的内容。气缸盖中与装配零件配合要求较高的加工内容有：液压挺杆孔孔径允差

汽车论坛 http://www.qclt.com

0.02mm、轴承盖螺栓定位孔孔矩允差 0.03mm 等。

通常采用专机测量与手工测量相结合的方法进行检测。

3.1.1.3 气缸体、气缸盖新加工方法

随着数控技术的迅速发展以及高速切削技术（主轴转速大于 15 000r/min）、大进给量（大于 50mm/min）和快速换刀等技术的新发展，使加工时间大大缩短。目前已开发具有以上新技术的高速加工中心，以及由这些加工中心设备组成敏捷柔性自动线，这种敏捷柔性自动线的加工中心设备可重复使用，也可重新组合和可扩展，所以敏捷柔性自动线是缸体和缸盖零件加工的发展方向。

图 3-1-4 由高速加工设备加工多气门缸盖的柔性自动线平面布置图方案。（撰稿人：董雁鸣　于俊旭）

3.1.2 活塞

3.1.2.1 概述

发动机活塞在气缸内承受燃烧气体的爆发力，通过活塞销、连杆和曲轴等将往复运动转化为旋转运动。活塞既要能耐热负荷、耐机械上的拉伸压力，又要具有良好的热传导性，同时为了克服往复运动的惯性，要求活塞重量轻。目前，除大型低速柴油机活塞采用铸铁或钢顶铸铝体外，一般都使用铝合金材料。设计时通常运用有限元分析法，确定活塞工作状态下的温度场和应力场，同时，要充分考虑热膨胀，发动机振动、油耗及活塞与气缸盖、缸套、活塞环、活塞销、连杆等的匹配关系，进行计算机三维造型并最终确定各部位的铸造和加工形状、尺寸精度。以汽油机活塞的加工为例，活塞的基本制造工序如下：

原料→熔炼合料→变质处理、精炼除气→铸造→固溶处理→去浇冒口→粗车外圆、顶面→人工时效→精车止口→粗镗销孔、割挡圈槽、倒销孔内外角→钻油孔→精割环槽、半精车裙部外圆和精车顶面→粗、精车燃烧室（或铣气门坑）→精镗储油袋→精车中凸外圆、倒角→精镗异形销孔→去除全部毛刺→清洗、表面处理→成品检验→包装。

3.1.2.2 材料

选择活塞材料的主要条件为质量轻、热传导好、具有耐高温强度、耐磨性好、线膨胀系数小、成本低。铸造铝合金能满足上述大部分要求，以前较多采用的是含硅量为 6%～8%的亚共晶铝硅合金和含硅量为 11%～13%的共晶铝硅合金。目前使用较多的除共晶铝硅合金外，还有含硅量达 17%～26%的过共晶铝硅合金，后者多用于高速摩托车或赛车上。

现代轿车用发动机活塞常用共晶铝硅合金，添加少量的 Ni、Mg、Mn、Cu 和微量的太空元素 Ti，以进一步提高强度，适应发动机的高速运行。另外，通过采用不同的变质剂，使材料的金相组织得到改变，从而使活塞的室温和高温机械性能得到提高。该材料能保证尺寸稳定，具有良好的切削性能，一般采用固溶处理和人工时效。

铝活塞的热处理有二个主要目的：一是为了提高产品的抗拉强度，保持工作状态下体积的热稳定性；其次为了适当提高产品的表面硬度和内在韧性，有利于机械加工。

常见的共晶铝硅合金固溶处理即为水淬火，以前一般是待铸件冷却后加热，入水池淬火，再人工加热时效处理，较费时费能耗。目前国外较常用的方法是铸态淬火，即铸件出模后迅速放入流动的水中淬火，冷却后人工时效处理。当然，能否采用铸态淬火主要还取决于材料成分、铸件出模温度、铸件的壁厚差等。

主要工艺和技术参数：从模具中取出的铸件直接放入流动的室温水中，视铸件的壁厚差和温度，一般只须浸至头部以下，数分钟后取出，去完浇、冒口，粗车第一次外圆，再放入电炉内加热至（230±5)℃，保温 5h 后取出自然冷却即可。最后成品表面硬度为 105～125HB，常温抗拉强度 195～245MPa，体积稳定性（0.025～0.03）D，其中 D 代表铸件直径。

3.1.2.3 铸造

铝合金活塞以金属模重力铸造为主流。根据重力铸件壁厚薄、顺序冷却的原理，通过模具采用急冷效

汽车论坛 http://www.qclt.com

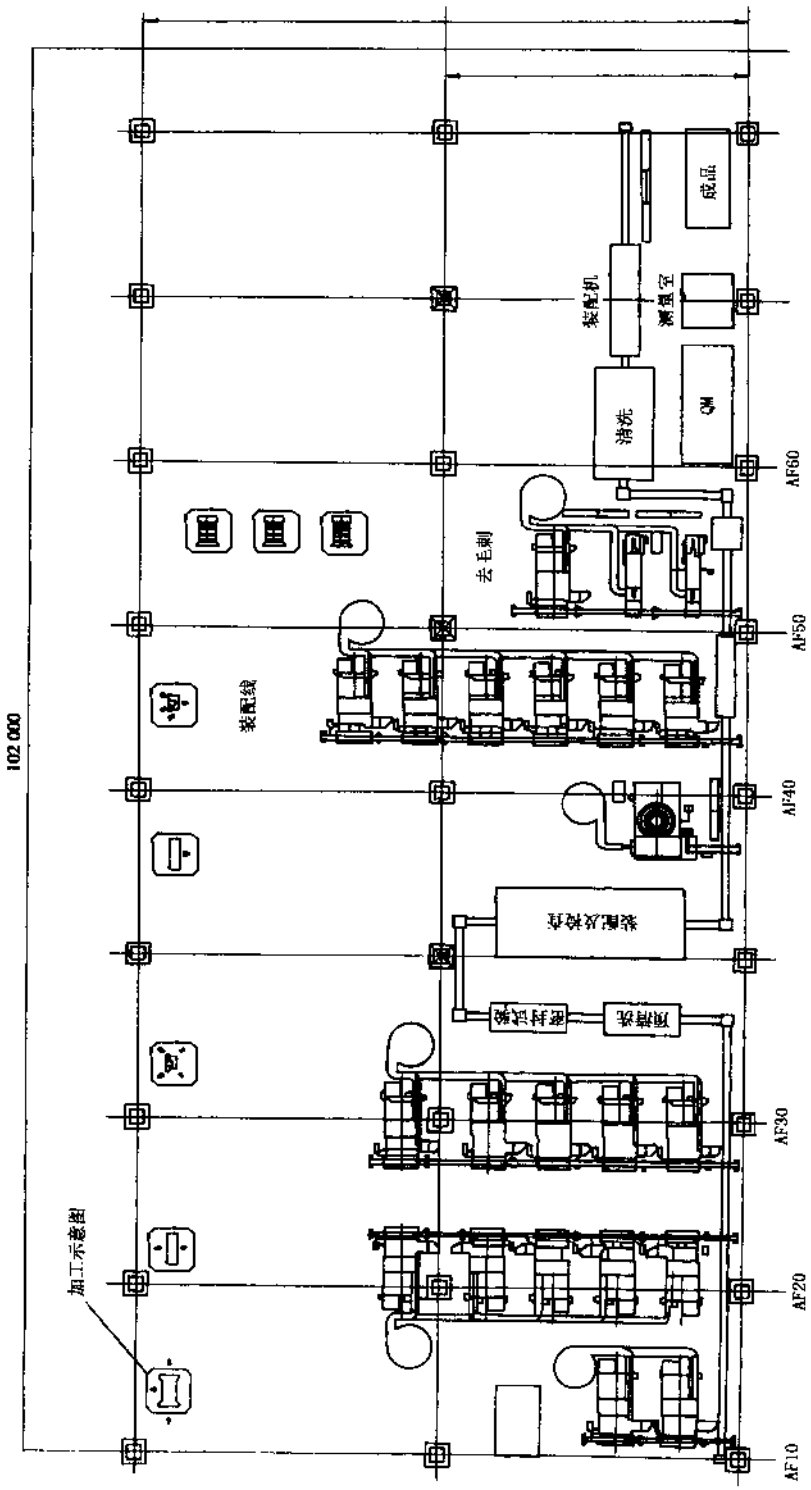


图 3-1-4 高速加工设备多气门缸盖的柔性自动生产线平面布置图

汽车论坛 http://www.qclt.com

果，可细化金相组织，使铸件机械性能变好。另外，铸造时在浇道入口处放置过滤网，可降低铸件废品率。

在铸造工序中为控制沿活塞销轴方向的热膨胀，达到工作状态下活塞和缸壁间间隙最小的目的，有在活塞销部铸有二块钢片支撑，或在销部近头部铸有整体式的钢环带。也有为加快活塞的冷却，造型时在活塞顶内设相通的内冷油腔。

对大功率柴油机活塞经常采用在环槽部镶铸奥氏体铸铁环，或采用液态金属模锻造活塞。

各铸造方案见图 3-1-5。

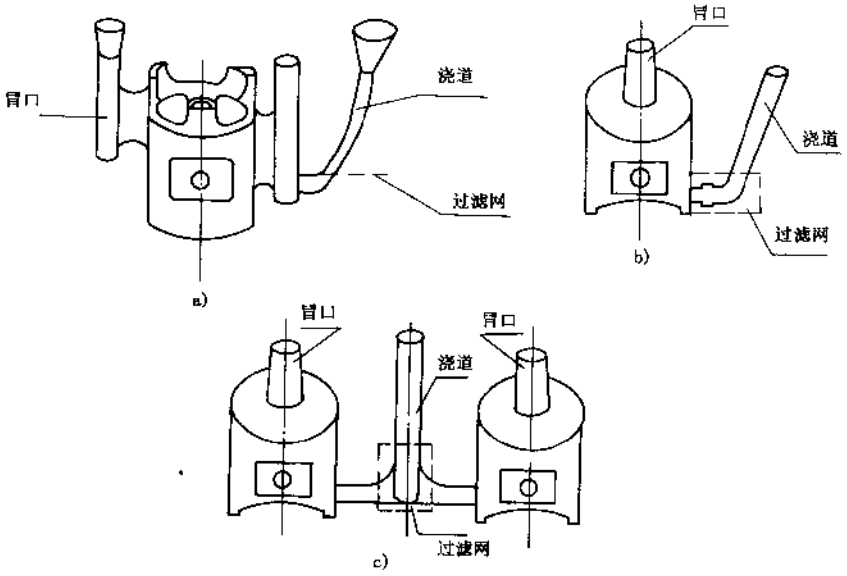


图 3-1-5 各种铸造方案

a）上抽芯浇铸方案；b）下抽芯浇铸方案；c）一模双铸下抽芯浇铸方案

3.1.2.4 机械加工

活塞加工可采用车、钻、镗和铣等方法，通常按工艺程序先粗后精加工，组成完整的半自动或全自动生产流水线。在加工中活塞较容易变斜、因壁薄易造成变形和因温度差引起尺寸变化，应注意加工顺序、夹紧力方向和夹紧力的大小，以及选用加工刀具。流水线应能适用多品种加工，易于调整，最好能配一定量的随线检测装置。主要工序和关键设备如下：

①粗车第一次外圆专机，对铸件和内撑指形夹具的精度要求很高；

②精车止口专机，一般为整体夹固活塞头部后车削，考核直径、圆度和壁厚差，以后的加工都以此作定位基准；

③双头粗镗销孔专机，它的特点是镗孔、销孔内外倒角、偏心割挡圈一次装夹完成；

④割环槽专机，通常对活塞环槽宽度尺寸、槽的平面度和波纹度的要求较高，它影响到已装环活塞与气缸的密封性、发动机的油耗和排放。活塞环槽一般有三道，一、二道气槽，第三道为油槽，汽油机活塞多用矩形槽，柴油机活塞第一道常采用梯形槽或奥氏体铸铁槽，其余为矩形槽。为了缩短加工时间，较多采用组合刀架三把刀同时加工。在加工工艺中还常加入环槽外圆倒角或去环岸毛刺等工序；

⑤精车活塞外圆加工对纵向型线、横向椭圆的要求都非常高，一只超差，极易引起发动机功率下降或拉缸。车削以仿形加工为主，适宜于生产线上的大批量生产；也可采用 CNC 加工方法，它较适用于小批量试制。现代活塞还将裙部表面设计成瓦楞形，通过改变刀尖角度和走刀量一次车削成形，有利于摩擦和贮油；

⑥活塞销孔尺寸公差、形位公差和表面粗糙度的要求都很高，轿车发动机更是将销孔加工成倒喇叭口

状或椭圆形截面等异形销孔，以减少销座内端的应力集中。加工用精镗、可取消最终的滚压抛光加工。

3.1.2.5 表面处理

对铝活塞成品进行表面处理可提高产品表面的抗腐蚀性和易于保存；可提高铝活塞表面局部区域的硬度、粘附强度和耐温度交变性；有利于铝活塞在发动机内工作时的初期磨合；外观整洁，有利于成品检验包装及发动机装配。

常用的表面处理方式有化学镀或电镀铅和锡；表面镀石墨；表面局部阳极氧化；其它还有镀铜—铁—锡的合金层；表面镀铁；磷酸盐覆层；表面单镀铬或镀铬后再镀微量的锡等。

目前使用最广泛的是中小活塞表面镀锡，柴油机活塞较多采用镀石墨。

3.1.2.6 检测

检测决定了铝活塞产品的合格与否和质量的等级。可以大致将检测分为三个阶段：

①工序人工检验和成品出厂前的100%人工检验挑选；

②工序人工检验，部分经统计数值控制，成品出厂前的100%自动检测分类；

③在强化质量管理的基础上，实现工人自检、全自动含统计分析的检测仪器进入生产线。

（撰稿人：倪铭诚）

3.1.3 连杆

3.1.3.1 连杆的毛坯及材料

连杆（Connecting rod）在工作中承受多向的交变载荷，要求具有很高的强度，因此，毛坯大都用高强度碳钢和合金钢模锻而成。近年来由于粉末冶金技术的发展，使粉末冶金件的密度和强度都大大提高，且可减少机械加工量和材料的浪费，从而降低成本，因此采用粉末冶金连杆是一个很有前途的发展趋势。

3.1.3.2 连杆的结构特点

由于发动机的结构不同，连杆的结构略有差异，但其基本上由活塞销孔（小头）、曲轴销孔（大头）及杆身三部分组成，其中大头孔为分开式结构，体和盖用螺栓连接。

大小头孔是连杆的主要加工内容，尺寸、位置精度和表面粗糙度要求高，小头孔一般镶有铜合金衬套。

3.1.3.3 连杆主要加工工艺

1）两端平面的加工

连杆加工的首道工序就是加工两端平面，而且在大小头精加工前，还需要对此两平面进行精加工。其加工方式一般都采用磨削，磨削方式有两种，立轴多砂轮圆台平面磨削和卧式双砂轮对置磨削。

2）连杆大小头孔的加工

连杆大小头孔是连杆的主要加工部位，精度和表面粗糙度要求都很高，其加工分为粗加工、半精加工和精加工三个阶段。目前世界上较为先进的加工方式由刚性自动线和用加工中心组成柔性自动线来完成大小头孔的系列加工。由于连杆的产量是其它零件的数倍，而且连杆体积较小，这样能在自动线上多件同时加工，大大提高了生产效率。

3）螺栓孔加工

连杆螺栓孔一般分为定位部分和紧固部分。定位部分用光孔，紧固部分用螺孔，因此螺栓孔的尺寸和位置精度都很高。

由于涨断工艺的出现，螺栓孔的精加工可省略。

4）连杆的盖、体加工

以往连杆的盖、体加工是将连杆盖、体用拉床拉开或切开后在连续式拉床上拉削，多件连杆依次安装

汽车论坛 http://www.qclt.com

在若干个夹具上，夹具带着被拉削的工件通过拉削区的各段，进行拉削。

但是，近几年世界上连杆的加工有了历史性的突破，其连杆的盖、体采用胀断工艺，它不是用铣、锯或拉这类传统的切削加工的方法，而是对连杆的大头孔的断裂处预先加工出二条“V”形应力集中槽，然后再对连杆大头孔的内侧面施加径向力，使其在“V”形槽处出现裂缝，最终把连杆盖从连杆体上胀断而分离开来。采用该工艺后连杆体和连杆盖的分离面是最完全的啮合，因此分离面无需再加工，省却了分离面的加工，而且由于分离面的最完全啮合，螺栓孔的精加工（铰或镗）也可省略。同时，没有分离面以及螺栓孔的加工误差的影响，虽然胀断工艺的连杆大头孔亦有变形，但是比较少。由于上述的原因，采用胀断工艺时，可节约许多设备的投资费用及减少机床占地面积。

图 3-1-6 表示连杆采用胀断工艺时的胀断原理示意图。由于动力油缸带动楔块向下推动胀块前后延伸，使带有应力槽的连杆大头孔的内侧受力最终将连杆盖胀断分开。

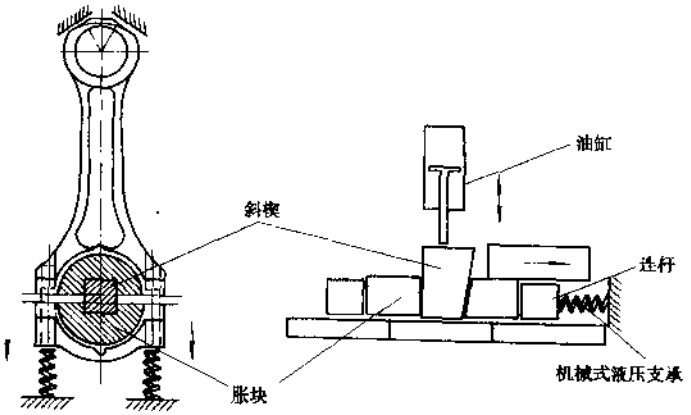


图 3-1-6 连杆胀断原理示意图

5）连杆螺栓的装配

连杆体、盖的装配，一般安排在大小头孔粗加工及体、盖分合面磨削和螺栓孔加工之后进行，体、盖装配成一体后，就进入精加工阶段。

6）去毛刺

连杆的螺栓孔、卡瓦槽和油孔等部位在加工后都要产生毛刺，必须仔细地清除掉。

3.1.3.4 质量保证

连杆的精度要求如下：

连杆大头孔孔径允差：0.012mm

连杆小头孔孔径允差：0.006mm

中心距允差：0.05mm

连杆小头孔粗糙度：$Rz6.3\mu m$

连杆零件生产质量控制由随机测量控制大、小头孔径镗孔精度，其余零件尺寸采用在线检具测量。

为了使发动机在工作过程中平稳，要求同一发动机的各缸连杆在往复运动中惯性力大致相同，对连杆的大小头质量及总质量都有了严格的要求，为此必须逐个称重、分组，表 3-1-3 为连杆加工工序。

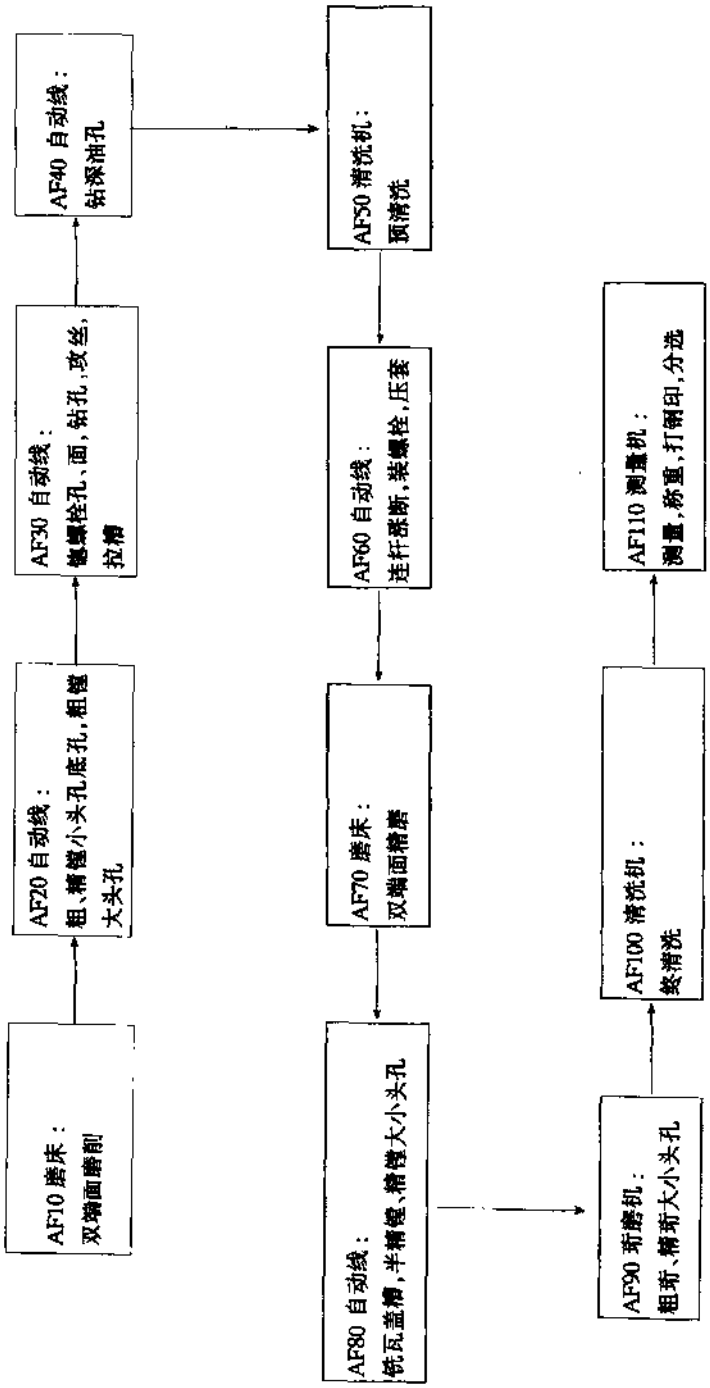
目前世界上为提高生产效率普遍采用了全自动测量、称重、分组设备，零件在通过该设备时，逐个测量同时被称重后分组。

3.1.3.5 连杆加工方法发展趋势

连杆分离面采用涨断工艺取代传统的切割工艺，经济效益如下：

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 3-1-3 连杆加工工序



汽车论坛 http://www.qclt.com

①可以减少设备投资达到25%以上；

②设备占地面积减少30%；

③可节约能耗40%以上；

④可节约刀具费用35%以上。

连杆涨断工艺是一种精益制造工艺，也是连杆工艺上的一次改革，是今后连杆制造工艺的方向，在国外和我国上海大众、一汽大众和上海通用都已采用。

连杆精镗后取消珩磨的制造工艺，也逐步广为国外汽车零件加工工厂所接受。

在国外采用高速加工中心设备加工连杆的工厂也越来越多。

3.1.4 曲轴

3.1.4.1 毛坯

曲轴的毛坯一般有铸铁件和锻钢件两种。国内汽车行业普遍选用球墨铸铁作为曲轴的材料。曲轴毛坯的精度取决于曲轴的中心孔加工方法。曲轴中心孔加工目前主要有两种方式：一种是通过寻找曲轴毛坯的质量中心而钻削两个端面的中心孔；另一种是寻找曲轴外径的几何中心而钻削两个端面的中心孔。前者对铸件的精度要求较后者高。分型错位公差要求两者相差0.3mm。

3.1.4.2 机械加工

粗加工工作段的一般工艺流程如图3-1-7所示：

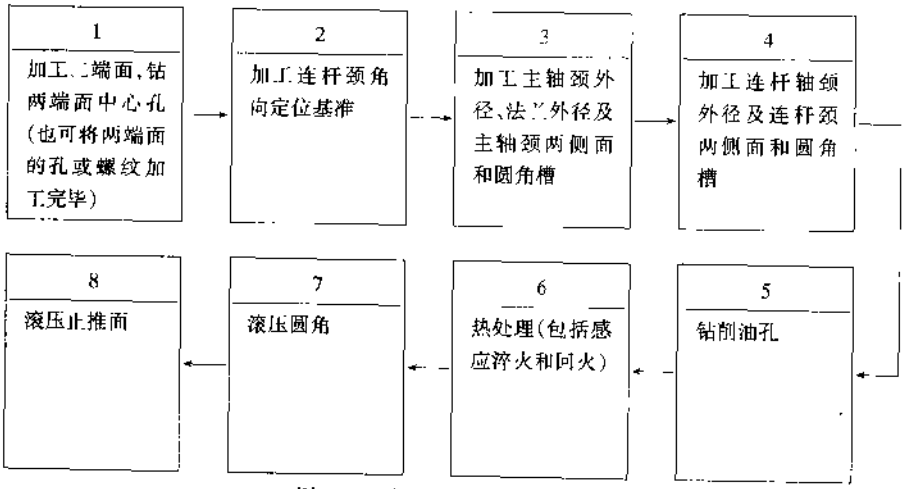


图3-1-7 粗加工工作段工艺流程

加工曲轴两端面一般有二种方法：一种方法是，先铣削两平面，再寻找质量中心打两端面的中心孔，然后再加上连杆颈角向定位基准。法兰端面的飞轮螺栓孔可在磨削轴径以后加工。另一种方法是寻找曲轴外径的几何中心再钻削两个端面中心孔，然后加工连杆颈角向定基准和法兰端面的飞轮螺栓孔。随着产品更新的速度加快对机床的柔性技术的要求也相应提高，用数控型机床或加工中心机床加工中心孔和两端面孔，以及套车两端外径的工艺发展较快。同样为提高柔性程度，加工主轴颈（包括R槽）已普遍采用数控“车—车—拉”的工艺；加工连杆颈（包括R槽）已开始采用数控的外铣工艺；加工油孔也采用了多轴的数控专机和内喷冷却液的枪钻或人螺旋麻花钻；轴颈与两侧面转角间的滚压加工，也采用了滚压装置可轴向移动的柔性设计，并且带有校直功能的机床。

3.1.4.3 精加工

精加工工作段的一般工艺流程如图3-1-8所示：

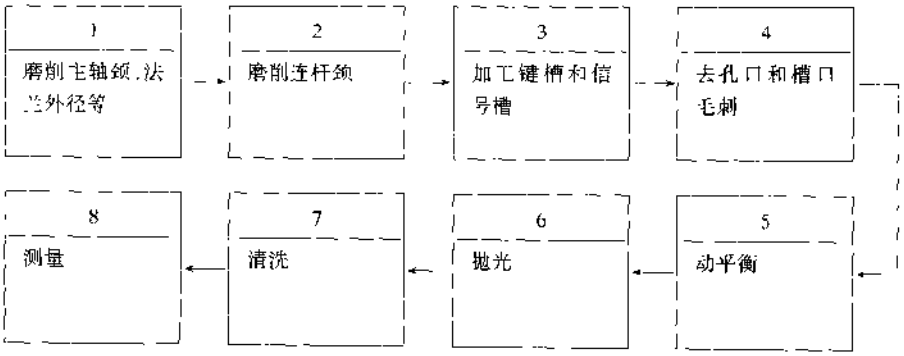


图 3-1-8 精加工工作段工艺流程

与主轴颈同轴的几个外径的磨削普遍采用同轴多砂轮径向移动的磨削工艺。

磨削连杆颈由原来仅适用直列多缸发动机曲轴的同轴多砂轮加工工艺，现在正在逐步转为柔性较高的单砂轮数控加工工艺。后者的砂轮大多用 CBN（立方氮化硼）材料，这样的工艺可用于直列和 V 型发动机的曲轴加工。

随着电子控制和直喷技术的结合，曲轴加工增加了一个显示各缸位置的发信轮。

这种发信轮通常有二种结构：一种是和曲轴浇铸一体的整体式，另一种是装配式的。整体式的发信轮加工用数控专机，自动分度铣削槽口。

曲轴的平衡修正是曲轴加工的重要工序，一般采用动平衡试验机，通过计算处理对自动进行钻孔修正平衡。采用寻找质量中心孔工艺，可使动平衡钻削量减少。

曲轴去毛刺目前已大量采用机器人，提高柔性程度。

轴颈的超精加工（有时也包括止推面）一般用砂纸进行抛光加工。最新的超精加工不仅改善表面粗糙度，还可提高轴颈的圆度。目前，曲轴生产一般由各功能不同的单台机床和高架机械手联接成生产线。

3.1.4.4 品质保证

曲轴的精度要求通常如下：

主轴颈允差：$-0.015\sim0.018$mm

连杆颈公差：$-0.013\sim0.016$mm

轴颈圆度：$-0.004\sim0.005$mm

曲轴是发动机上的主要部件，工件刚度较差，但精度要求较高，加工难度也大，不仅要选用可靠的加工设备，而且要配备足够的测量仪器。

测量仪器常用有两种：一种是随机量仪，并且是闭环控制，大多用在磨床（显示精度一般在 0.1μm）、动平衡机、纸带抛光机等精加工设备上，圆角滚压机还带有压力显示。另一种是机外量仪，比如测量圆度和跳动、尺寸精度等的综合量仪，测量精度一般在 0.1μm。还有用于工序间的比较测量仪，三坐标测量机。此类量仪的显示精度大多是 μm 级以上。

3.1.4.5 新的加工方法

随着产品更新速度的加快，机床设备柔性化日益受到重视，数控加工中心已经得到广泛应用，机床的主轴转速已经达到 15 000r/min，或更高。刀刃具采用新材料将使用寿命提到了一个新的高度。如砂轮采用 CBN（立方氮化硼），一个砂轮可磨削 2 万件左右。刀具用人造金刚石、陶瓷等。磨床和数控机床

汽车论坛 http://www.qclt.com

也将采用直线电机直接控制行程，从而消除了滚珠丝杠产生的误差。夹具的柔性也得到发展，带二个轴旋转的夹具已开始在机床上普遍使用。电机直接和主轴作为一个整体而且带自冷却的结构也已经普遍采用。（撰稿人：丁 卫）

3.1.5 轴承

3.1.5.1 滑动轴承概述

内燃机滑动轴承是内燃机主要摩擦副，起支承轴、保护轴的作用，为避免与滚动轴承名称混淆，一般将内燃机滑动轴承称为轴瓦和衬套，按其在内燃机装配位置不同一般可分为主轴瓦、连杆瓦、连杆衬套、凸轮轴衬套和止垫片。主轴瓦、连杆瓦多为半圆型，衬套均为整圆型，止推垫片是薄片状的起控制内燃机曲轴轴向间隙的作用，有一些内燃机轴瓦设计将主轴瓦和止推垫片组合成半圆翻边轴瓦，这种轴瓦可使内燃机曲轴径向和轴向均得到定位，具有装配方便的特点，但相对制造成本较高。

图 3-1-9 为轴瓦的典型结构形式。

3.1.5.2 内燃机轴瓦材料

1）内燃机轴瓦材料要求

由于内燃机轴瓦的作用是支承轴和保护轴，在保护轴的同时又必需使轴瓦本身避免很快损坏，故对内燃机轴瓦材料有许多特殊的要求。

内燃机轴瓦一般由二层金属组成，即钢背和减摩合金，而对于强度较高的减摩合金由于其强度高，使保护轴的性能就降低了，故需在合金表面精密电镀（一般为 0.02mm）铅锡二元或铅锡铜三元合金，以同时达到强度高表面性能好的效果。根据内燃机工作条件，理想的轴瓦材料应满足以下性能要求：

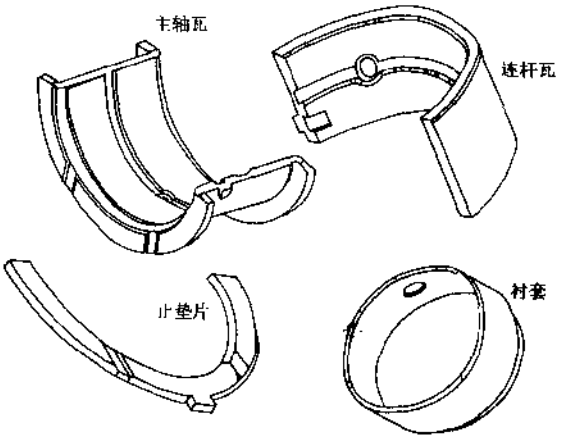


图 3-1-9 轴瓦典型结构形式

①高的疲劳强度，轴瓦在工作时受到很大的周期性变形载荷，因而要求轴瓦材料具有较高的疲劳强度，疲劳强度是轴瓦的一项十分重要的性能指标。

②良好的摩擦相容性，轴瓦材料与润滑介质相容，以防止在摩擦过程中与轴材料发生粘附。

③良好的顺应性，所谓顺应性，是指轴瓦材料通过弹性或塑性变形而自行适应轴的挠曲和轻微不对中（由于安装不良，轴和轴承孔不同心以及轴和轴承座变形或摩损所致）而保持正常运转的能力。

④良好的嵌入性，嵌入性是轴瓦材料使硬的污物微粒嵌入其中以减轻轴颈划伤和磨损的能力。

⑤良好的耐蚀性，以抵抗由于高温滑油氧化及滑油中某些添加剂形成的有机酸、无机酸和氧化物对轴瓦的腐蚀。

⑥高的熔点，以防止出高温油而引起的损坏。

⑦较低的线膨胀系数，以使轴瓦间隙在工作中不会有较大的变化，如线膨胀系数过高，则可能使轴瓦间隙减至危险的程度。此外，若轴瓦材料的线膨胀系数比轴承座的大得多，则轴瓦可能产生畸变。

⑧良好的工艺性能，与钢背能产生牢固的粘结；浇铸时有很好的流动性；具有良好的切削性等。

2）内燃机轴瓦减磨材料种类

内燃机轴瓦减摩材料基本上均采用金属的，可分为巴氏合金、铝基合金、铜基合金等三大类，巴氏合金轴瓦材料除疲劳强度较低外，轴瓦减摩材料应有的其它性能均优于铝基和铜基合金，但由于疲劳强度较低，故现代内燃机轴瓦设计较少采用巴氏合金。

运用得较多的是铝基合金和铜基合金。常用的铝基合金和铜基合金牌号及成份见表 3-1-4、表 3-1-5：

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 3-1-4 轴瓦铜基合金牌号、成份

化学元素	化学成分（%）				
	CuPb10Sn10 铸造，烧结	CuPb17Sn5 钻造	CuPb24Sn4 铸造，烧结	CuPb24Sn 铸造，烧结	CuPb30 烧结
Cu	其余	其余	其余	其余	其余
Pb	9.0～11.0	14.0～20.0	19.0～27.0	19.0～27.0	26.0～33.0
Sn	9.0～11.0	4.0～6.0	3.0～4.5	0.6～2.0	0.5
Zn	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
P	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Fe	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Ni	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sb	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
其他合计	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
相当于 SEA No	792 或 797		794 或 799	49	48
相当于我国牌号	ZQPb10-10		-	ZQPb24-2	ZQPb30

表 3-1-5 轴瓦铝基合金牌号、成份

元素	化学成分（%）				
	AlSn20Cu	AlSn6Cu	AlSi4Cd	AlCd3CuNi	AlSi11Cu
Al	其余	其余	其余	其余	其余
Cu	0.7～1.3	0.7～1.3	0.05～0.15	0.7～1.3	0.7～1.3
Sn	17.5～22.5	5.5～7.0	-	-	0.2
Ni	0.1	1.3	-	0.7～1.3	0.1
Cd		-	0.8～1.4	2.7～3.5	-
Si	0.7	0.7	3.5～4.5	0.7	10.0～12.0
Fe	0.7	0.7	0.35	0.7	0.3
Mn	0.7	0.7	0.2	0.7	0.1
Ti	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
其它合计	0.5	0.5	0.25	0.15	0.3
相当于 SAE No	783	780	781	782	-
带状合金的硬度（HB）	30～40	35～45	30～40	35～55	45～60

铝基合金轴瓦材料，由于其有一定耐疲劳强度且其它性能较好，故得到大量的应用。

特别是其中的 AlSn20Cu，轴瓦加工后不需要再进行电镀以改善轴瓦表面性能，故得到广泛的应用，

汽车论坛 http://www.qclt.com

如桑塔纳轿车主轴瓦就采用这种轴瓦材料。

而铜基合金轴瓦材料，由于其承载强度较高故负荷较高的内燃机轴瓦采用铜基合金为多，如桑塔纳轿车连杆轴瓦和连杆衬套均采用铜基合金，但由于铜基合金强度高，故轴瓦表面性能相对较差，需在合金表面再精密电镀0.02mm的铅锡二元或铅锡铜三元合金以改善轴瓦表面性能。但由于需电镀，故轴与轴瓦间隙的控制较铝基合金难，且轴瓦制造成本相应提高不少，但这种轴瓦是目前用得较多的轴瓦。

3）轴瓦材料的制造

①铝基合金轴瓦材料的制造，是采用大功率轧机将经过清洗和表面处理的钢板和铝基合金板，轧薄粘合成双金属轴瓦材料，此种轴瓦材料，国外是采用卷带连续轧制生产，而国内是条带状轧制断续生产，二种生产方式相比，生产效率和质量指标的保证卷带生产优越明显。

国外先进的卷带连续轧制工艺如图3-1-10所示。

国内的铝基合金钢双金属生产是条带断续生产，生产工艺繁复，生产效率较低，产品质量指标较低，工艺过程也是合金准备和钢板准备，然后通过轧制复合在一起再进行退火处理。

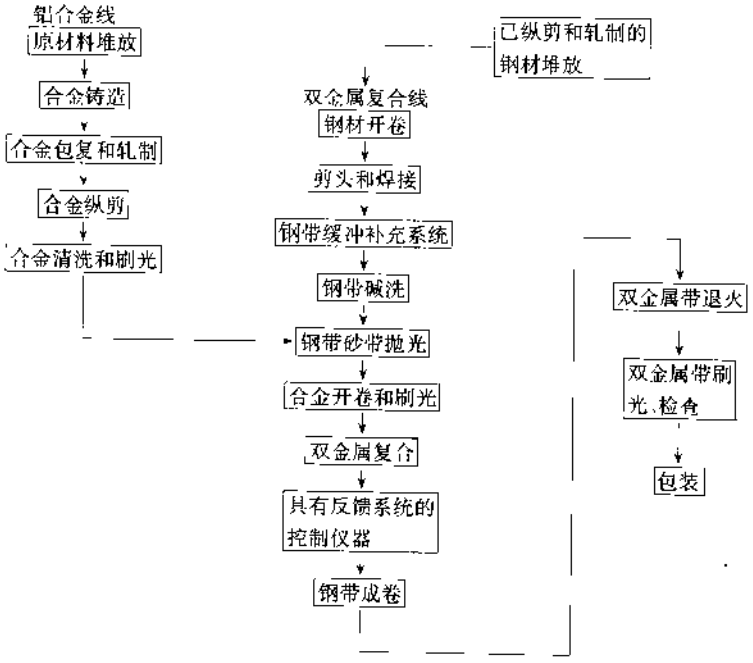


图3-1-10 卷带连续轧制工艺

②铜基合金轴瓦材料的制造。

铜基合金轴瓦材料制造有二种方法即浇铸法和烧结法，国外先进的生产方法是连续浇铸或连续烧结，我国铜基轴瓦材料的生产大多是断续烧结。仅有少量工厂引进了连续烧结生产线，国内无连续浇铸生产。铜基合金连续浇铸生产如图3-1-11所示。

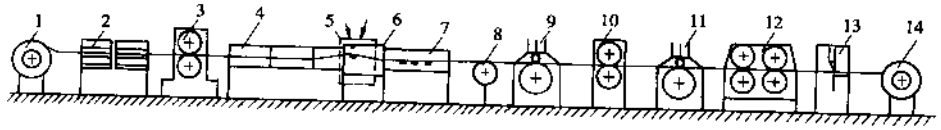


图3-1-11 铜铅合金—钢双金属带连续浇铸过程示意图

1-钢带开卷机；2-对焊机；3-凹槽成形轧机；4-钢带加热装置；5-合金熔化炉；6-浇铸室；7-冷却室；8-清洁机；9-粗铣机；10-切边装置；11-成形铣；12-牵引机；13-剪切机；14-卷取机

钢带开卷后，二个板卷的首尾经剪切后用对焊机 2 碰焊起来，以保证钢带能连续不断地被牵引运动，使浇铸过程连续进行，焊接接头应平整。焊接后钢带通过加有二氯乙烯的二块毛毡之间，以去除油污和微粒（在有些生产线上，这一工艺置于对焊前），然后，钢带通过凹槽成形轧机 3，成形出凹槽向上的槽钢。轧槽的目的一方面是用来贮存浇铸的合金液，以免从两侧流出，另一方面也是为了使钢带牵引起来方便。钢带通过加热装置 4，先被预热到 730℃左右，进一步再被加热到 1 150℃左右，当通过浇铸室 6 时，在熔化炉 5 内熔化好的铜铅合金经过导管浇到运动着的槽形钢带上，形成双金属带。加热和浇铸都是在一般由 90%的氮气和 10%的氢气组成的保护气体中进行，氢气能有效地阻止氧气通过密封不严的进出口部位进入加热装置和浇铸室，从而避免氧化。在这种保护气体下，严格控制钢带加热和合金浇铸的温度，以此来防止在合金层和钢带之间产品任何脆性组织，以保证良好的粘结，浇铸了铜铅合金的钢带通过冷却室 7 的油槽急剧冷却，再经喷水冷却。冷却后的双金属带经过清洁机 8（旋转的毛刷），擦去钢背表面的油污。经校平后，双金属带通过装有螺旋形刀具的粗铣机 9，铣削合金面从而达到所需要的合金层厚度和公差。一般，浇铸后的合金层厚 3～5mm，而成品双金属带的合金层厚度则控制在 1mm 左右。粗铣后的双金属带通过切边装置 10，用旋转的切削刀具切去双金属带的槽的翻边，再经成形铣 11，将双金属带按要求纵向切成二条或二条以下。双金属带用剪切机 13 切断，在卷取机 14 上卷成卷。

连续浇铸线的全线长度多在 55～60m 之间。送入连续浇铸线的钢带卷的最大宽度为 250～300mm，最大厚度为 6～7mm。当钢背厚度大于 6～7mm 时，国外一些公司即采用条材连续浇铸法，即不用成卷的钢带，而采用事先制成槽形的长约 10m 一根的条材进行浇铸，条锭的最大厚度一般不超过 15mm。

铜基合金轴瓦烧结生产工艺流程：

钢板准备→校平→清洗→刷光→铺铜铅粉末→进入保护气体烧结炉烧结→轧制→第二次烧结→轧制→成品检验。

烧结工艺有连续与断续生产两种，生产效率和产品质量的保证连续烧结有绝对优越。

铜基合金轴瓦材料烧结生产与连续浇铸相比，材料质量连续浇铸好，但连续浇铸生产线投资远远高于烧结生产线。

3.1.5.3 内燃机轴瓦制造

1）内燃机轴瓦制造工艺

内燃机轴瓦制造工艺同轴瓦结构和材料不同，半圆轴瓦衬套、止推片加工工艺各不同，但工艺流程可分成三大部分：即成形、机加工、精密电镀（对铜基合金轴瓦）。

半圆轴瓦的工艺流程如下：

下料打钢印→去油→压弯成形→车端面倒角→冲铣定位唇→车油槽→冲孔→孔口去毛刺→拉半径高→去毛刺→拉（镗）内径→精密电镀（对铜基轴瓦）→检验、包装。

衬套工艺流程：

下料打钢印→压弯成形→整圆→车端面倒角→精镗内径→检验、包装。

止推片工艺流程：

下料→去毛刺→粗车合金面→打钢印→倒外角→拉油槽→倒斜角→精车合金面→检验、包装。

上述的是内燃机轴瓦典型的加工工艺，轴瓦结构不同，加工工序也不同，如有的轴瓦没有油槽、油孔就不需这些工序。轴瓦加工工艺的先进程度取决于采用的加工方法，上述的加工工艺是最简单的单机加工方法，国外采用了先进的以冲代机械加工方法，这就使工艺流程很短，但工装及设备的设计制造难度就大了。如美国费特尔莫古公司，采用以冲压代机械加工的方法，在一台压机上用级进模完成下料、打钢印、压弯成形、轴瓦宽度、内外径两端倒角、半径高冲压达到图纸要求、冲定位唇、冲孔等工序，最后只需在镗瓦机上精镗，生产效率极高，年产 1 500 万片。衬套加工，国外有的厂商在原材料时就将衬套端面、倒角、内径油槽等搞好，然后在一台专用成形机完成下料、冲孔、成形，每分钟可生产 240 个，生产效率极高。国内大多数轴瓦生产厂采用单机加工，有部分工厂引进了生产线，相对来说效率较高，引进的生产线效率在 23 片/min，国外的一般在 60 片/min。

汽车论坛 http://www.qclt.com

2）轴瓦主要加工设备

轴瓦加工设备大致可分为三类：

第一类是成形设备，即是将双金属板材制成半圆轴瓦、衬套和止推片的形状，这类设备基本上是压机和专用成形设备。

第二类是机械加工设备，完成轴瓦成形后，各类尺寸精度和表面粗糙度要求的加工。

第三类是表面处理设备，如为防锈进行表面镀锡的设备和为改善轴瓦减摩性能在轴瓦内径精密电镀二元和三元合金设备。

如上所述，国外有些轴瓦公司采用以冲压代替机械加工，不但减少了设备数量，而且大大提高了生产效率，但是冲压的级进模设计制造是较复杂的，而这种生产方式，只适用于批量极大的产品。

（1）轴瓦冲压成形设备

轴瓦冲压成形设备，以压机为主，国内多为单柱冲床，吨位在60～400t，因国内无卷带提供，原材料是条块状的双金属板，故一般配以简单的模具在冲床上完成压弯和成形工位。国外以双柱压机（多为200t）配级进模为主，完成下料、打钢印、压弯、成形工序，成形后的轴瓦自动进入后道工序机加工自动生产线。

（2）轴瓦机加工设备

轴瓦机加工设备较多，有端面倒角机、冲定位唇机、车油槽机、冲孔机、半径高拉床和内径机加工机床（内径拉床和镗床）。这些机床，国内一般是单机形式，加工后轴瓦装箱再进入下道工序，国内引进的有连成整条生产线的，国外的设备一般均为自动生产线，包括冲压设备，这里我们主要介绍轴瓦端面倒角机，半径高拉床和内径精加工设备。

①轴瓦车端面倒角机

该设备加工成形后的轴瓦两端面和内外径两端倒角，轴瓦放入料道自动成对进入一个可旋转的安装轴瓦的盘（四孔、六孔、八孔）然后被夹紧，二个旋转刀盘快速进给，慢进给、停留、退刀完成切削动作。刀盘上装上二把刀具分别加工轴瓦端面和内径、外径倒角，加工后的轴瓦就自动推出进入侧面预倒角工位，进行侧面倒角，然后再进入另一工位机床或放入产品箱。刀具转速可以按工件大小进行调节，轴瓦安装盘的转动，工件夹紧，刀具完成切削动作均由一分配凸轮完成。

②轴瓦半径高拉床

轴瓦半径高尺寸是轴瓦关键尺寸指标，尺寸精度为0.04mm，要求高的为0.03mm（如桑塔纳轿车轴瓦），半径高尺寸保证轴瓦装入发动机缸体孔或连杆孔中有一定的过盈度，确保发动机正常工作。

半径高拉床有多种形式，一般采用气压夹紧，液压推动拉刀进行切削，轴瓦在一倾斜的料道上，自动进入加工工位，以外径定位在拉削模内，同时进行二边加工余量调节，使切削余量大致相同，有一个单作用油缸顶住一半圆块，此半圆块在轴瓦内径夹紧轴瓦，然后进行拉削，拉削后的轴瓦自动退出，进入出料料道上。

③轴瓦内径精加工机床

轴瓦另一个主要尺寸指标是轴瓦壁厚尺寸，此尺寸直接影响装配后曲轴的轴向间隙，壁厚公差一般在0.015mm，要求高的发动机按0.005mm分组进行装。轴瓦内径加工有二个方法，即镗削和拉削，国际上也是二种方法均在使用，有信息说将来的趋势是向镗削发展。轴瓦镗削是切削刀具旋转同时轴向进给完成切削。另有一把不是安装在同一中心线的刀具完成轴瓦上口减薄区的切削。轴瓦拉削是采用薄片状圆拉刀（5～6把）安装在同一刀轴上，刀具的轴向运动完成切削，拉刀中有一与其它刀具不在同一中心线上的刀具，完成轴瓦上口减薄切削。

二种加工方法，各有利弊，拉削用于大批量的生产，镗削既能用于大批量生产，又能适应小批量生产，镗削方法刀具准备费用较低，并且刀具能通用，而拉削方法不同尺寸的轴瓦需用不同的拉刀，不能通用，且拉刀费用昂贵。

轴瓦镗削在专用镗瓦机上进行，轴瓦成堆放入进料道自动进入模座上方，有一电磁铁将轴瓦吸住送到模座位置，在轴瓦半径高面施加规定的压力夹紧，然后进行镗削，镗内径并镗上口减薄区，松开压紧装置轴瓦自动落到出料道，并进入测量位置自动测量并按照壁厚要求分组推入相应的料道。加工节拍视设备的能力，一般1片/3s，国外先进的设备能达到1片/2s。机床采用气液压传动。镗瓦机最关键的是镗头，其

转速在10 000～20 000r/min，国外先进的镗瓦机有二片、三片一起加工的。

轴瓦拉床与镗瓦机不同，轴瓦装入料道后，靠自重进入送料位置，有一气缸将轴瓦送到模座下面，然后气动夹具在半径高面夹紧，拉刀作轴向运动完成切削（由液压传动）加工后轴瓦被自动送到出料道。

（3）轴瓦表面处理设备

轴瓦表面处理设备主要是轴瓦电镀设备，主要有二类，一类是防锈性电镀，即在轴瓦钢板面上镀一层锡，防锈和增加美观，这在国外仅用在衬套和少量轴瓦上（轴瓦一般不镀锡），而在国内轴瓦（少量的不镀）和衬套几乎都镀。此类设备，主要包括前处理（去锈、去油、漂洗）然后电镀，再进行漂洗、烘干即可。另一类是功能性电镀，即在高强度合金轴瓦内径上精密电镀一层0.02mm的铅锡二元合金或铅锡铜三元合金以改善减磨性能等，此类设备除前处理外，还需在内径镀镍后再电镀二元和三元合金，电镀要求较高。由于电镀有废水产生，对电镀废水需进行处理达到国家允许的排放标准才能排放，故还要有一整套废水处理装置。

3.1.5.4 国内外内燃机轴瓦生产的差距

我国现有百余家轴瓦生产厂家，规模都不大，年产量在1 000万片以上的工厂不到十家，加工设备落后，近几年一些工厂引进了轴瓦生产线，生产水平才有一定程度的提高，但与国际先进水平相比差距颇大。

国外轴瓦公司能自行开发设计轴瓦，有完整的RDC、有完整轴瓦试验设备，可按用户匹配要求设计生产轴瓦，而国内缺少试验设备，没有很好的开发中心，一般都是按来图加工生产轴瓦。

国外轴瓦生产公司都自己生产材料，材料品种齐全，基本都是卷带，材料质量高，机械性能稳定；国内轴瓦企业几乎都不生产材料，材料由轴瓦材料厂提供，材料是条块状的，性能不稳定，这种材料对后道工序加工带来很多困难，如不能自动化生产等。

国内轴瓦生产设备生产效率低，单机操作，国外自动化生产多，快速换模，在线测量，生产效率高，我国轴瓦年产量约为2.5～3亿片，100多家工厂上万名员工，这些产量只有国外一个1 000余个员工的轴瓦公司一年的产量，而且他们还包括原材料的生产。

对轴瓦产品质量，就质量指标来说，国内外相差不大，但国外的产品是在大批量情况下，质量稳定，而国内一到大批量就会出现各种质量问题，其中有一些是轴瓦材料质量造成的。

国外对轴瓦的研究包括轴瓦原材料、轴瓦加工新技术、轴瓦加工设备等方面，都做得很好，在这方面我们存在较大的差距，没有一家单位有这些系统的研究开发，但随着国外先进的设备的引进，或与国外轴瓦公司合资生产轴瓦，加上国内轴瓦生产厂商的努力，这些差距正逐步缩小。（撰稿人：孙智义）

3.1.6 凸轮轴

3.1.6.1 凸轮轴的结构及材料

1）结构特点

凸轮轴（Camshaft）上有主轴颈、进排气凸轮、驱动轴颈和链轮座等，凸轮轴的长径比大，是一个刚性差、形状复杂、技术要求高的零件。

凸轮轴有铸造凸轮轴、锻造凸轮轴和套装式凸轮轴等。

2）材料

凸轮轴的材料有铸铁和钢两种。

3.1.6.2 凸轮轴主要表面的加工

1）主轴颈加工

（1）车削

车削的部位主要有主轴颈等的外圆、端面（包括到角）以及凸轮的两端面。一般毛坯精度高的凸轮轴，凸轮两端面可不加工。主轴颈的车削通常采用数控机床车削。

根据凸轮轴的刚性、毛坯精度和机加工后的精度要求，可采用分段车削，一次加工，粗、精二次加工

汽车论坛 http://www.qclt.com

的车削工艺。

(2) 磨削

以前，凸轮轴主轴颈磨削一直采用多砂轮磨削或斜切入式磨削，

现在可采用新工艺——快速点磨法、快速点磨法与传统磨削方法相比较，砂轮与工件的接触面最小，磨削速度高、采用CBN砂轮的快速点磨法可提高磨削精度、磨削效率及砂轮耐用度。

传统的工艺要采用二台外圆磨床磨主轴颈及止推颈宽度，一台端面外圆磨床磨前端轴颈和端面及倒角。而用快速点磨法只需一台磨床就能完成凸轮轴的主轴颈系统的全部磨削工艺。

2) 凸轮的加工

现在大都采用CNC数控凸轮磨床对凸轮轴的凸轮进行粗磨和精磨。

采用CNC数控凸轮磨床可省去传统的机械仿形式凸轮磨削时需制作的标准母凸轮及靠模，此靠模制造的周期长、昂贵、生产准备工作复杂。CNC数控凸轮磨床具有较大的柔性，可满足多品种凸轮轴的生产需要，提高凸轮磨削精度。

3) 凸轮轴的表面处理

①激冷处理：铸造中仅对需要硬化的部分(凸形)进行激冷硬化。

②高频淬火：用高中频设备对工件表面部位进行感应加热，然后再快速冷却的方法，这种方法较容易实现自动化。

③氮化处理：通过在氨气或氰化盐浴中加热，使工件表面形成化合物层和氮扩散层，改善耐磨性和抗疲劳性。

④激光淬火：利用激光光束来加热后自行冷却使表面硬化的方法，具有热处理后不变形的特点。

⑤重熔淬火：用电加热并用氩气保护对工件表面进行局部加热熔化，然后急冷后使工件表面具有很高的耐磨性。

3.1.6.3 凸轮轴的检验

凸轮轴的精度通常要求如下：

主轴颈允差：　0.021mm

齿轮轴颈允差：　0.021mm

凸轮相位角允差：　±10′

粗糙度：　$Rz \leqslant 2.5\mu m$

要检验的成品尺寸主要有：主轴颈的尺寸和几何形状，齿轮轴颈的尺寸和几何形状，凸轮轴桃形的尺寸及几何形状，键槽位置精度以及以两端主轴颈为测量基准检查中间主轴颈、齿轮轴颈、止推面及凸轮基圆的同心度和垂直度等。

3.1.6.4 凸轮轴加工发展趋势

随着数控技术和磨具技术（CBN砂轮）高速磨削的迅速发展，高速点磨技术是凸轮轴的主轴颈系统磨削工艺的发展方向。凸轮型面磨削，从原机械仿形凸轮磨削，当砂轮进给为每转0.005mm时，磨后的精度达到±（0.02～0.025）mm，演变为CNC凸轮磨削，当砂轮进给为每转0.015mm时，磨后精度提高到±0.0125mm，并且加工柔性也大大提高，表3-1-6是凸轮轴加工工序。

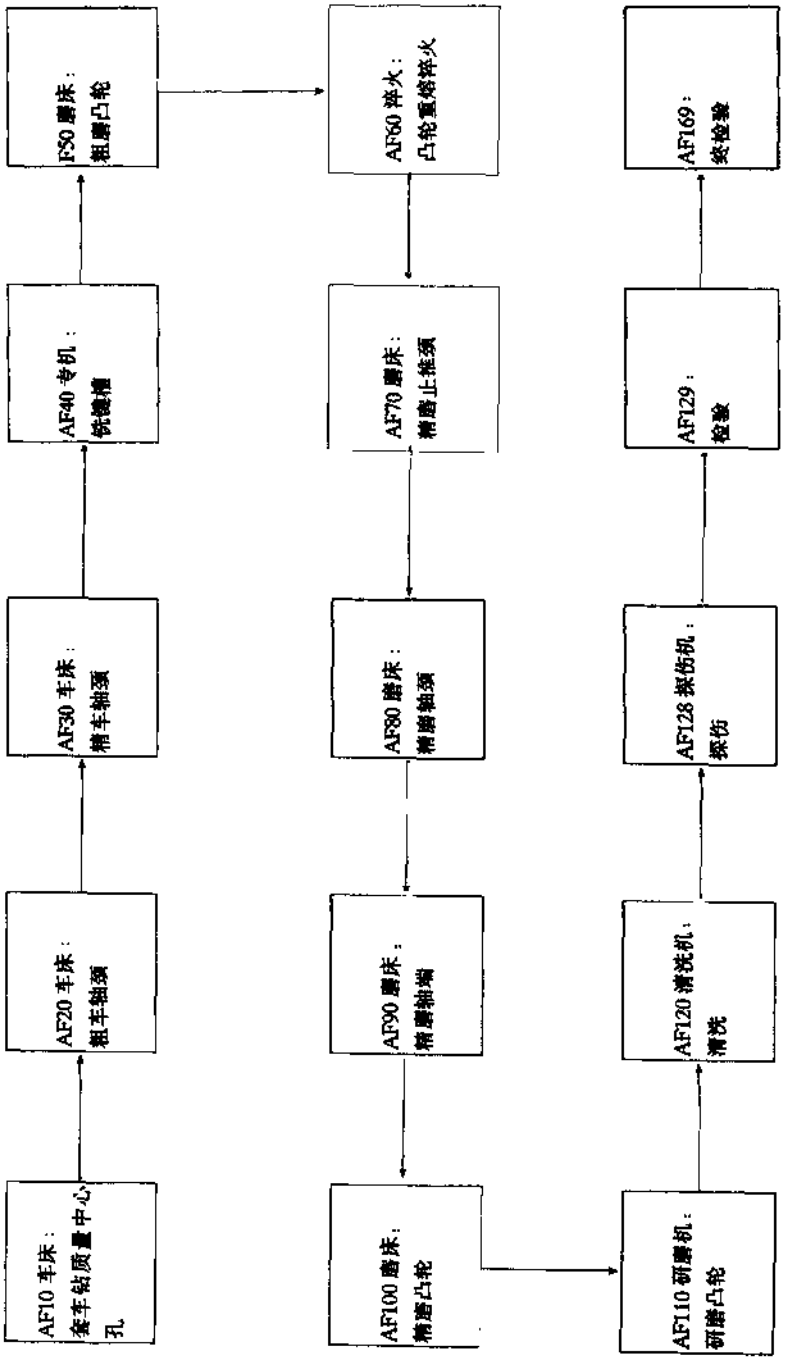
90年代中期已开发出只要用一台磨床采用CBN砂轮高速磨削新工艺，就能完成凸轮轴的轴颈和凸轮的全部磨削。例如粗磨四缸发动机凸轮轴的五个主轴颈和八个凸轮（主轴颈加工余量为5mm和凸轮加工余量在直径上为6mm）的磨削时间仅为70.4s，这种新工艺将大大冲击凸轮轴的传统制造工艺，并出现以磨代车（铣）的凸轮轴制造新工艺。

图3-1-12表示用CBN砂轮加工凸轮轴颈、凸轮、轴端的磨削加工工艺图。

套装式凸轮轴：是将凸轮加工、热处理后，套在空心的钢管轴上，经相位定位后，从钢管中扩张，使凸轮固定。特点是变整体加工为零件加工，投资少、成本低，可大批量生产。上海通用汽车公司即采用此种结构。（撰稿人：卢　岚）

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 3-1-6 凸轮轴加工工序



汽车论坛 http://www.qclt.com

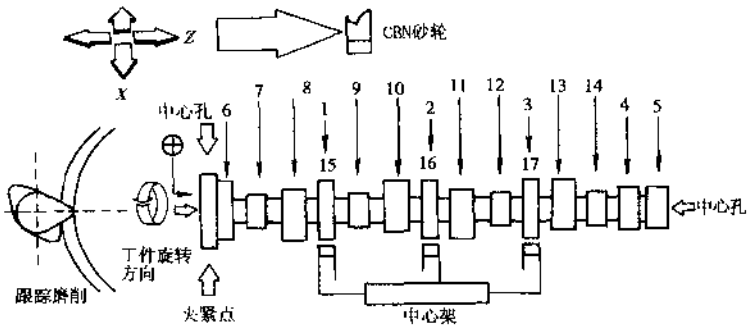


图 3-1-12 凸轮轴磨削加工工艺（1～17 为磨削顺序）

3.1.7 气门

发动机进、排气门控制着发动机燃烧室进气和排气，它们（特别是排气门）必须在很高的温度和腐蚀介质下工作，同时，还承受很大的应力，因此气门必须具有很高的高温强度、硬度以及防腐蚀性能。近年来，发动机向高转速、大功率、低燃油耗和低排放等方向发展。汽车发动机正从传统的每缸 2 气门向每缸 4 气门发展；由以 4 气缸为主，向 3 气缸、6 气缸、8 气缸等多气缸方向发展。同时汽车的大功率化也增加了气门的热负荷。在这种情况下，有必要采用新的设计和材料以及应用新的制造技术，如钾钠共晶内冷气门，加厚横截面或减小锥面角度，杆部镀铬、氮化，陶瓷涂层，气门锥面合金强化，或者调整气门焊接位置；调整气门机构零部件，如应用液压挺杆、专门设计气门座圈和气门导管可以增加气门的性能。所有这些都对气门的制造提出了更高的要求。

以下介绍普通汽车发动机气门的制造要点。

3.1.7.1 材料

发动机气门具有代表性的进排气门材料见表 3-1-7 所示。

表 3-1-7 气门用钢特点和用途

材料牌号	主要特点	用途
40Cr	中碳含铬合金钢，使用时承受交变载荷，调质后有均匀的索氏体和屈氏体组织	550℃以下进气门和排气门杆部
4Cr9Si2	马氏体钢，800℃以下抗氧化，600～700℃有较高的热强性，碳、铬成分控制在下限时，锻造等工艺性能较好	700℃以下汽车发动机、柴油机进气门和排气门的杆部
4Cr10Si2Mo	马氏体钢，850℃以下抗氧化性较好，可在750℃以下长期使用，可渗氮，被切削性较差，退火后有所改善，冷变形性及焊接性能差	750℃以下中、高负荷汽车发动机和柴油机进气门和排气门的杆部
X45CrSi93	马氏体钢，较好的抗氧化能力，可风冷淬硬，回火时有二次硬化峰值出现，易发生加工硬化	重型发动机进气门和排气门的杆部
21－4N	奥氏体型热强钢，有较好的抗氧化性、耐腐蚀性和较好的综合机械性能	850℃以下汽油机和轻中型柴油机排气门
21－2N（Ni 较低）	同上，比 21－4N 成本低，但在高速大功率重型发动机上高温疲劳性能不足	汽油发动机和中小功率柴油机排气门
23－8N（Cr，Ni 较高）	奥氏体热强钢，有较好的抗氧化性，耐腐蚀，疲劳性能比 21 12N 好，锻造性能最好，（N 低，Si 高）堆焊质量较 21－4N 好	中、重型柴油机排气门
21－12N（Ni 高）	奥氏体钢，高温强度比 21－4N 稍差，但制造工艺性能好，高温韧性好	800℃以下重型柴油发动机排气门
Eatomte 6（Cr，Si 高）	铁基合金，耐磨性好，成本较 Stellite 6/F 低，碳化物多，硬度值高	重型发动机气门锥面合金
Stellite 6/F（Cr，Si 高）	钴基合金，耐磨性较好但比 Eatomte 6 差，抗高温腐蚀性好	重型发动机气门锥面合金

常用的排气门材料为：轿车发动机一般用21－4N/21－2N材料，采用40Cr或4Cr9Si2等作为杆部材料，或21－4N整体材料在其杆端面焊接一片40Cr贴片，也可喷焊Ni基甚至Co基合金，轻型载货车发动机进排气门的材料的选择与轿车发动机气门材料相当，重型发动机的排气门主要采用23－8N，锥面堆焊铁基、镍基或钴基合金（如UNS S68000，UNS R30006等）以强化锥面的耐磨和耐腐蚀性能。

常用的进气门的材料主要为：40Cr、4Cr9Si2或4Cr10Si2Mo，如果采用“干件”燃料，进气门也应考虑锥面堆焊或减低锥面角度。摩托车进排气门都采用21－4N材料或21－12N，但进气门采用4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo也很普及。多年来，美国等西方国家，21－4N几乎都被21－2N所代替，我国也逐渐使用21－2N以节约Ni元素的使用。

3.1.7.2 锻造

气门由杆部和头部组成，头部通过电镦或热挤压后经锻造成形，电镦和热挤压各有优劣，也有部分生产方法为了提高生产率先将伞形部分热挤压成形再接上杆部，但这只限于进气门，另外也实施冷挤压方法。各种方法的对比见表3-1-8所示。

表3-1-8 各种锻造方法对比

比较内容		电镦、锻造法			热挤压法			冷挤压法		
工艺简介		落料	电镦	热锻	落料	电镦	热锻	线材	冷轧	热锻
比较事项	锻件精度	好			差			好		
	废品成本	差			中			中		
	适用材质	差			好			差		
	能源效率	中			差			差		
	自动化程度	差			中			中		
	设备费用	中			中			差		

3.1.7.3 热处理

马氏体钢淬火回火处理，其硬度范围为30～50HRC，实际范围取决于所应用的合金材料淬火性能和发动机制造厂传统选择。许多气门硬度范围在30～40HRC之间，轿车、摩托车发动机进气门稍低，如27～37HRC，重型发动机进气门可稍高，如35～45HRC之间。此时材料具有最好的机械加工性能的同时又不显著降低强度和耐磨性能。气门杆端部常常淬硬至50HRC以上以增加杆端面和锁槽的耐久性能，气门盘锥面也可以局部淬硬至HRC50以上以增加抗磨损性能。因为一般发动机的排气门盘部需要足够的高温疲劳强度，其材料一般为铁基奥氏体型耐热钢或镍基高温合金，这些奥氏体型耐热钢在室温下无磁性，可以进行固熔处理和时效强化，使其具有足够的低温疲劳强度和良好的高疲劳强度，同时具有良好的锻造性能和机械加工性能。固熔处理的温度在1 150℃以上，因此其温度和时间的有效控制很重要。因为，如果奥氏体晶粒过分粗大，甚至出现过烧将影响材料的性能。

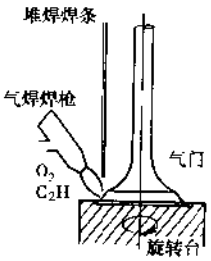
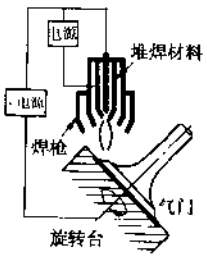
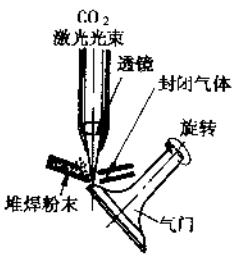
汽车论坛 http://www.qclt.com

3.1.7.4 堆焊

汽车发动机气门的堆焊法以气体堆焊法、感应烧结堆焊和等离子堆焊法为主，但生产率更高的激光堆焊法最近也正在进入实用化阶段，其优缺点比较见表 3-1-9 所示。

通常用保护气体或亚弧焊进行堆焊，厚度约 0.5mm 以上。强化合金是焊条时，应用 TIG 或氧、乙炔焊接技术，如果强化合金是粉末应用等离子焊接（PTA）技术。氧乙炔焊接的扩散较大，PTA 焊接的扩散较小，因而气体焊接时的气门锥面热影响区远大于 PTA 焊接。因此当今几乎所有高性能的发动机气门锥面强化合金用 PTA 工艺进行堆焊，而摩托车气门堆焊槽距离燃烧面太小，PTA 焊接时容易穿透，因此，大都采用 TIG。无论 PTA 或 TIG 锥面焊接后，应保持适当的冷却速度以防止开裂。另外，强化合金与基体合金的结合和元素的扩散以及气孔率也是重要的参数。

表 3-1-9 各种堆焊方法的比较

内容		气体堆焊	等离子堆焊	激光堆焊
工艺简介				
比较事项	质量	差 差 差 差 差 中	中 中 中 差 中 差	好 中 中 好 中 差

3.1.7.5 表面处理

气门杆部在气门导管内上下运动，为防止气门在导管内被卡住和减少摩擦阻力，提高耐磨性需对气门表面进行处理，如镀铬、氮化。美国、欧洲大都采用气门杆部镀铬处理，日本等国采用软氮化较多。处理条件见表 3-1-10 所示。国内则镀铬和软氮化兼而有之。如果气门导管是有色合金材料，则气门的杆部不必表面处理。

镀铬表面的硬度较高，摩擦系数较低，采用室温工艺且对气门材料无限制，但对镀铬设备及工艺要求较高。而软氮化是通过化学扩散机理与金属表面结合，有一定的耐腐蚀性，但是氮化后进行杆端淬火，杆端部淬硬区会胀大，锥面和杆端面氮化后有时需要研磨以达到其表面粗糙度的要求。但是，杆端面不研磨有增加的趋势，这样可以增加其耐磨性能。

表 3-1-10 表面处理条件

种类	处理介质	温度	时间	硬化层厚度	适用性
盐浴软氮化处理	盐浴	560～600℃	30min	20～30μm	进、排气门
气体软氮化处理	气体	560～600℃	3h	20～30μm	进气门

3.1.7.6 机械加工

气门所使用的材料是耐热钢，热处理后的硬度多在25～40HRC范围内，用合金钢刀具切削较困难，而且气门的精度要求较高，因而研磨是气门主要加工方法。汽车发动机气门生产的主要工艺为：落料→电镦→锻压→热处理→磨削杆部→车盘外圆→车锥面槽→锥面堆焊→粗磨杆部→粗磨锥面→加工颈部→杆端淬火及回火→半精磨杆部→加工锁槽→精磨杆端面→精磨杆部→精磨锥面。

除重要的热加工以外，主要机械加工过程为：加工锁槽通常采用车削或磨削加工，其精度一般底径和形状公差为±(0.05～0.15)之间。精磨杆部其公差要求一般小气门如摩托车气门杆径较小为±0.008左右，轿车发动机气门的杆径公差±0.01左右，而重型汽车发动机气门的杆径公差在±0.013左右；其圆度和直线度也与此相当：摩托车气门最小为0.005、轿车通常为0.01，而重型汽车可达0.013。精磨锥面也是重要的加工之一，气门锥面的精度将决定气门的密封性，通常为锥面对杆部的跳动和圆度，过去由于设备能力和测试手段的限制，由于锥面的跳动要求很高为0.03，甚至为0.02，从而气门制造商采用100%检查挑选，甚至手工返工气门的锥面跳动，尽管如此，密封性也常常存在问题。如今由于人们对发动机气门工作状态认识的提高以及设备和检测能力（圆度仪的普及和气门锥面密封性试验的采用）大大提高了对气门锥面设计和制造的信心。目前，摩托车发动机气门锥面的跳动通常为0.03，圆度为0.005；轿车发动机气门锥面的跳动为0.04最为常见，0.03、0.05也较多，圆度一般为0.006～0.01；而重型发动机气门锥面的跳动为0.038～0.05，圆度为0.01，或者为0.013（此时应进行锥面的密封性试验）。锁槽的加工也是重要的过程之一，在过去，国内先车削锁槽，然后滚压较为普及，滚压的作用为增加锁槽的粗糙度和对转角处增加压应力，然而滚压也很难使得锁槽的转角处产生压应力，而且有可能产生微裂纹，如今，随着刀具技术的改进和锁槽磨削加工的应用，新设计的气门已少有采用。锁槽的底径公差以0.05～0.13最为采用，而粗糙度为Ra 1.0～3.0最为常用。当然，气门的尺寸和形位公差取决于气门设计大小、实际的应用以及效率成本比等方面的考虑精磨杆端面。加工设备的精度应能满足气门的精度要求，而且，设备的过程能力及稳定性指标也应满足一定的要求。一般来说机械加工的加工速度较慢，需要较多机械，而如前面所述，汽车发动机向每缸4或5气门方向发展，每一辆汽车所使用的气门数都在汽车发动机自身气缸数的2倍、4倍甚至更多，因此气门的数量很大，在大批量生产的要求下，为了提高生产效率和稳定质量，全自动的气门机械加工生产线已非常必要。最近有采用气门表面和杆部同时研磨，或者两个气门同时加工的高效率加工方法，并已投入实际生产。

3.1.7.7 内冷式气门制造工艺特点

内冷式气门是将气门内孔充Na或NaK共晶以减低气门的使用温度和减轻气门的重量，一般为二段式排气门。热处理、钻孔、充钠、焊接等关键工序非常重要。钻孔设备需要高精度，极高的垂直性和良好的稳定性。对于焊接设备精度的要求较高，不仅要有良好的垂直度、直线度而且焊接稳定性要求也很高。由于Na或NaK对人体有害而且它们遇到水会发生爆炸，因此需要自动化的充钠设备，严格的环境要求以及妥善的安全保护措施也非常必要。块状的钠应挤压成均匀的细条后被填充进细孔中，而NaK共晶溶液需要专门的计量装置灌入气门内部。

3.1.7.8 质量检验

气门是发动机的最重要的零件之一，制造过程中的质量控制非常重要，现在多功能的在线检验设备已投入生产。它可以100%检验气门的所有重要的功能参数，如锥面的密封性，杆径、杆端面的硬度和锁槽等等。加工后的气门，用荧光探伤或磁力探伤检查气门的表面缺陷或内部缺陷，焊接的气门进行弯曲试验或者进行超声波检验焊接质量，用超声波检测二段式气门的焊接、锥面堆焊和杆端喷焊的质量。此外，还要检查形位公差、尺寸、锥面的气密性和外观以及硬度、金相、堆焊处针孔、裂纹等。其中，圆度仪和轮廓仪是最重要的计量仪器，金相显微镜等检验设备也必不可少。（撰稿人：沈文君　吴旭初）

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.1.8 燃料供应装置

汽油机燃料供给装置的任务是根据发动机各种不同工况的要求，将所需空燃比混合气供给气缸，通常采用二种燃油供给系统，一种为化油器系统，另一种为电子燃油喷射系统(Electronic Fuel Injection)，简称 EFI。

传统汽车采用化油器式汽油发动机，运用节气门来改变进气通路的截面积，调节发动机的充气量，汽油通过化油器与空气混合后进入气缸，利用化油器来调节空燃比。燃油喷射是发动机混合气形成的另一种有效方法，它通过喷油器将压力燃油喷入进气门后的进气道内，或直接喷入气缸内，与进入的空气混合形成可燃混合气，空燃比的调节是通过控制燃油喷射装置来实现的。

电子燃油喷射系统，采用各种传感器将发动机吸入空气量、冷却水温度、发动机转速与加减速等状况转换成电信号，送入控制器，控制器将这些信息与储存信息比较、精确计算后输出控制信号。先进的电子燃油喷射系统还采用闭环控制方式控制喷油量，即由安装在排气管上的氧传感器检测出废气中氧气的含量，从而间接地测出混合气的浓度，电子控制器根据测得的信号对喷油量作出修正，使混合气浓度保持在最佳范围内。电子燃油喷射系统以其低排放、低油耗、高功率等优点而获得迅速发展，日日益普及。

电子控制燃油喷射系统由三个子系统组成：燃油系统、进气系统、电子控制系统。图 3-1-13 所示 BOSCH M 型汽油喷射系统就是一种典型的电子燃油喷射系统

3.1.8.1 燃油系统的组成及作用

燃油系统由油箱、初滤器、电动燃油泵、油泵支架、燃油滤清器、燃油压力调节器、油压缓冲器、燃油分配管、喷油器以及输油管、回油管、连接油管等组成。

燃油由燃油泵从汽油箱中泵出，经燃油滤清器滤去杂质后，再送至油压缓冲器，以减少其脉动，经压力调节器将压力调整到比进气管压力高出约 300～400kPa 的压力，然后经燃油分配管送至各缸的喷油器和冷起动喷油器，根据电子控制器(ECU)的喷油指令，开启喷油器，将适量的燃油喷在进气门前的进气歧管中。

下面介绍燃油系统中的两个主要部件电动燃油泵和喷油器的生产工艺。

3.1.8.2 电动燃油泵

1）功能

电动燃油泵的主要任务是连续不断地供给燃油系统具有足够压力的和富余的燃油，以保证在所有工况下有效地喷射。

主要要求如下：

在额定电压下，保持 60～200L/h 的输油量。

燃油系统的压力保持在 300～400kPa。

在电压为额定电压的 50%～60%时，能保证燃油系统中有压力，这对冷起动很重要。

除功能要求外，对尺寸、噪声和寿命也有很高要求。

2）结构

电动燃油泵主要由泵体（容积式泵或流通式泵）、永磁直流电动机和端盖组件（带有电器连接部件、止回阀、泄压阀及输油接头）三部分组成。接通永磁直流电动机的电源，电动机即转动并带动泵体旋转，将燃油从进油口处吸入、流经电动燃油泵内部，再从出油口流出，给燃油系统输送压力燃油。

燃油泵出口处设有止回阀，用以保持燃油系统一定压力；出油侧设有泄压阀，可以避免燃油管路堵塞时油压过分升高，造成油管破裂、漏油或燃油泵损坏。

EKP13 系列电动燃油泵是德国 BOSCH 公司开发的新一代叶轮式电动燃油泵，结构如图 3-1-14 所示。其特点是体积小，重量轻，便于安装；工作电流小，效率高；运转噪声小，油压脉动小，使用寿命长；低电压工作能力强。

3）电动燃油泵生产工艺

电动燃油泵产品质量保证在产品开发和生产规划阶段就已经开始，应用了数据分析、工程模拟和 1-汽

汽车论坛 http://www.qclt.com

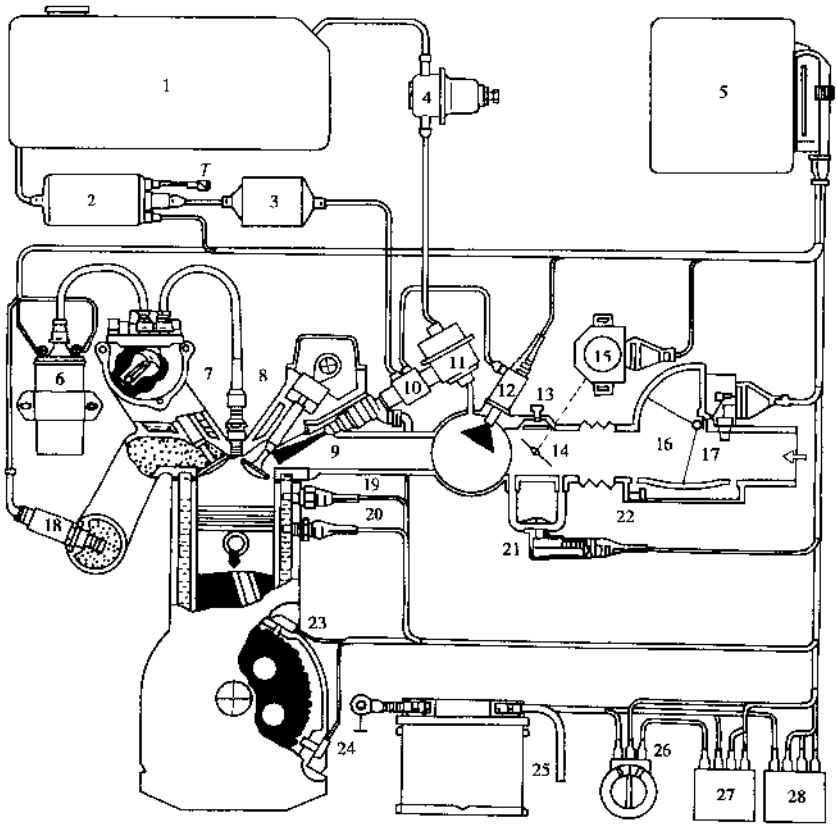


图 3-1-13 Bosch M 型汽油喷射系统

1-汽油箱；2-电动汽油泵；3 汽油滤清器；4-油压缓冲器；5-电脑；6-点火线圈；7-分电器；8 火花塞；9-喷油器；10-分配油管；11-油压调节器；12-冷起动喷油器；13-怠速调节螺钉；14-节气门；15-节气门位置传感器；16-空气流量计；17-进气温度传感器；18-氧传感器；19-冷起动温度开关；20-水温传感器；21-附加空气阀；22-怠速混合气调节螺钉；23-曲轴位置传感器；24-转速传感器；25-蓄电池；26-点火开关；27-主继电器；28-电动汽油泵继电器

FMEA（缺陷可能性和影响分析）等方法。同时在不同的阶段还进行质量评估，不仅包括对在产品上所做的各种试验的评估，还包括对所采用工艺和方法的评估。通过对可靠生产过程的选择和 SPC 统计方法的应用，来保证稳定的产品质量。

在零件生产加工中，零件外形和尺寸公差必须保证在微米范围内。对起重要作用的功能面的加工，在其不同的加工步骤中，均采用了现代检测方法－激光干涉仪来进行监控。计算机进行测量信号评估并完全显示在画面上，它将为过程优化提供重要的依据。为保证泵零件极小的轴向间隙（平均 8μm），每一零件均用自动检测台进行尺寸检验，在此所要求的测量－重复性精度小于 1μm。

在装配中较高的机械化程度和稳定的工作流程，将保证产品质量在一个较高的水平上。质量是通过生产过程生产出来的，而不是通过质量控制来保证的。通过为此开发的过程监控功能来实现一个稳定保持的质量。

按生产线的布局，电动燃油泵的装配主要步骤见图 3-1-15；

4）电动燃油泵主要检验项目（表 3-1-11）

汽车论坛 http://www.qclt.com

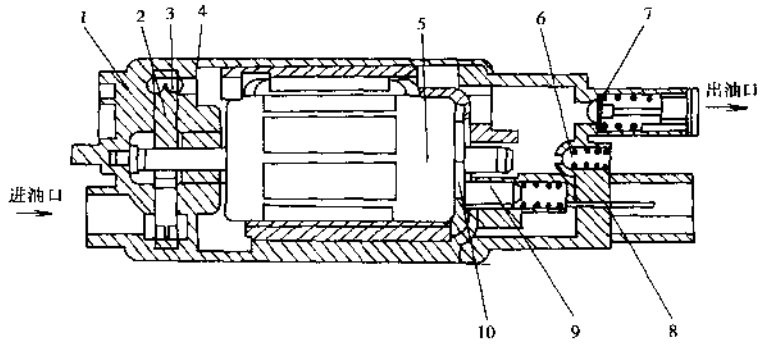


图 3-1-14 电动燃油泵

1-进油泵壳；2-叶轮；3 流道；4-出油泵壳；5-电枢；6 释压阀；7-单向阀；8-接线端片；9-电刷；10 换向器

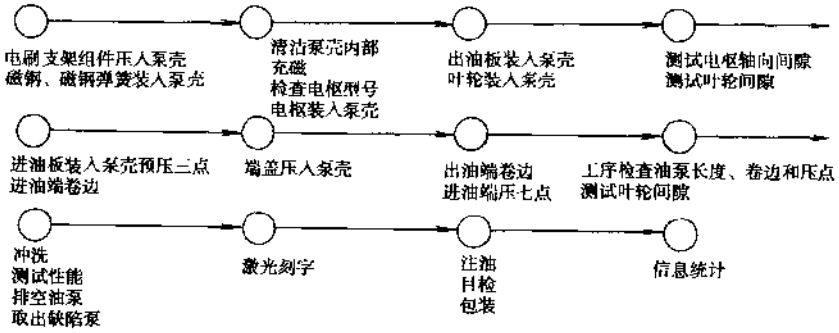


图 3-1-15 电动燃油泵的装配步骤

表 3-1-11 电动燃油泵主要检验项目

序 号	检 验 项 目	检 验 要 求
1	输油性能	根据设计性能要求
2	起动检验	试验电压（2.8±0.1）V，试验时间 3s，电流≤1.5A
3	止回阀泄漏	试验压力（300^{0}_{-10}）kPa，泄漏率不超过 1.0 mL/h
4	泄压阀功能测试	试验电压（12±0.1）V，系统压力必须在 450～650kPa 之间
5	泵壳切线加速度	电压 12V，压力 300kPa，振动水平≤10.0［m/s^2］
6	压力脉动	电压 12V，压力 300kPa，压力脉动≤2.5kPa
7	清洁度检验	
8	温度循环试验	
9	耐久性试验	

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.1.8.3 喷油器

1）功能

喷油器是燃油喷射系统中的执行元件，也是最重要的部件。它根据控制单元发出的脉冲信号将压力燃油喷入进气门后的进气道内，或直接喷入气缸内。

2）结构

喷油器结构如图 3-1-16 所示，它主要由喷油器体、电磁线圈、衔铁、复位弹簧、滤网、阀座、阀针和密封圈等组成。壳体内的回位弹簧将阀针压紧在阀座上并封住喷油口。喷油时，电子控制器给出控制信号，电磁线圈通电，产生磁场克服回位弹簧的压力、针阀重力、磨擦力等将针阀升起，燃油在油压作用下喷出。由于针阀只有升起和落下两个状态，针阀升程不可调节，只要喷油器进出口的压力差恒定不变，喷油量就仅取决于针阀开启时间即开启电脉冲的宽度。

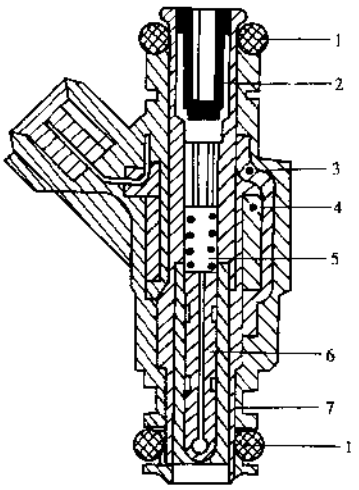


图 3-1-16 喷油器

1-密封圈；2-滤网；3-带电插头的喷油器体；4-电磁线圈；5-弹簧；6-带衔铁的阀针；7-带喷孔板的阀座

喷油器外形采用塑封工艺（PA66，35%玻璃纤维）塑封而成，具有结构紧凑、强度高、耐腐蚀等特点。内部空腔由接杆和阀体（不锈钢）经激光焊接而成，具有较强的刚性和耐腐蚀性。喷油器的向外密封由针阀组件和阀座组件通过阀球与阀座两金属圆锥面的紧密结合来实现，具有可靠的密封性。喷油器的升程由衔铁和接杆间的间隙决定，一般为 60μm，微小的升程保证了其良好的快速响应性及恒定的喷油量。

由于喷油器上述结构特点，要实现其精确性、可靠性、耐久性等要求，则对相应零件的可靠性、清洁度及装配精度具有相当高的要求，这一点在其装配工艺流程中得到充分的体现。

EV6 型喷油器是德国 BOSCH 公司开发的新一代电磁控制型喷油器，具有重量轻、体积小、性能稳定、寿命长、易于安装等特点。由于其零件的生产加工具有相当高的技术要求，目前国内尚无法生产仅进行装配（进口零件）。下面将对其装配工艺做一个简介。

3）喷油器生产工艺

喷油器的装配是在净化车间内由全密封的高自动化的生产线进行的，除生产准备阶段外，其所有装配、调试及功能检测均由自动控制设备完成。

喷油器生产工艺可分为生产准备和装配两个阶段：

（1）生产准备

喷油器各零件在一次装配及二次装配前都应保证其质量及清洁度，零件应经下列处理工序：

针阀管，阀球，衔铁，阀座，接杆，阀体，护片，弹簧——进货检验——拆包装料筐——退磁——清洗（清洗机）——清洁度检验——日检。

调整套，滤网——进货检验——拆包装料筐——清洗（清洗机）——清洁度检验——日检。

喷孔板，防积碳板，线圈——进货检验——拆包——日检。

支撑环——进货检验——拆包装料筐——调质。

O 型圈——进货检验——拆包——上油——日检。

塑料粒子——进货检验——拆包，装干燥机——干燥。

（2）装配

按生产线的布局，喷油器的装配主要分为四个步骤：

汽车论坛 http://www.qclt.com

①针阀组件的装配：针阀管，阀球，衔铁$\xrightarrow{激光焊}$针阀组件

②阀座组件的装配：阀座、喷孔板$\xrightarrow{激光焊}$阀座组件

③喷油器体的装配：接杆、阀体$\xrightarrow{激光焊}$接杆组件
线圈
护片（激光焊）
调整套（压入）
塑料粒子
} 喷油器体（注塑）

装配好的针阀组件，阀座组件仍需进行退磁、清洗、目检，清洁度检验。

④喷油器的最终装配（图 3-1-17）：

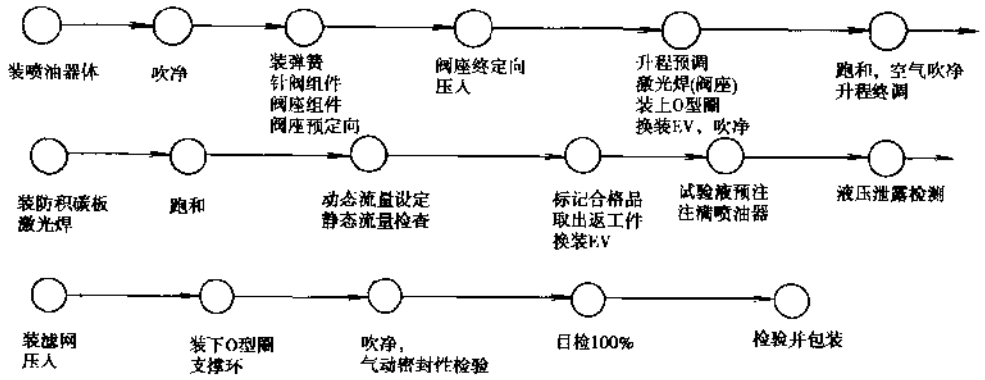


图 3-1-17 喷油器的最终装配

下面以针阀组件为例对其装配及测试做一个详细介绍：

针阀组件在喷油器中起着密封阀座、感应磁力、支撑弹簧等作用，是喷油器的主要执行元件，其质量的好坏直接关系到喷油器的功能和使用寿命。

针阀组件的装配：

设备：针阀预装机，激光焊机（HASS HL506D）功率 500W

工艺参数：

①阀球和针阀管的焊接

针阀管压入衔铁深度：>1.2mm

焊接时间：1.12s

焊接开始点：从针阀管缝逆时针约 72°开始

激光位置：从阀球顶端至焊缝中心为（3.325±0.075）mm，焊缝宽度（0.64±0.04）mm

聚焦：±0mm

②衔铁和针阀管的焊接

焊接时间：1.0s

焊接开始点：从针阀管缝顺时针约 30°开始

激光位置：衔铁沉割槽中部

聚焦：±0mm

保护气：氮气，纯度：99.999%，压力：0.30MPa，流量：200L/h

激光脉冲波形（图 3-1-18）：

4）针阀组件检验内容和设备

汽车论坛 http://www.qclt.com

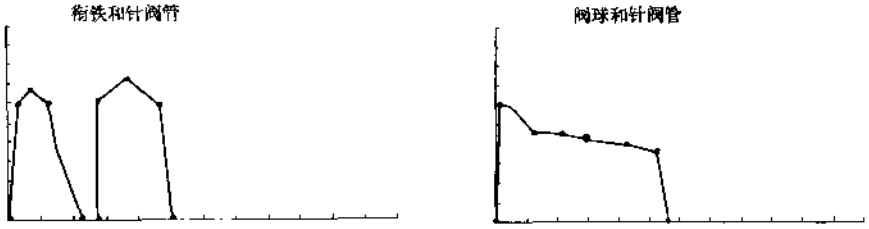


图 3-1-18 激光脉冲波形

(1) 针阀组件 SPC 检测（表 3-1-12）

表 3-1-12 针阀组件 SPC 检测

项　　目	要　　求	设　　备
目检	按缺陷表及缺陷图	
针阀管压入衔铁深度	0.8±0.05mm	压深测量仪
阀球跳动	≤170μm	跳动测量仪
阀球平面平行度	≤140μm	平行度测量仪
阀球顶端至焊缝中心距离	3.325±0.075mm	轮廓投影仪
针阀组件焊缝宽度	0.63±0.04mm	轮廓投影仪
焊接拉断力检验	阀球和针阀管：≥1 100N 衔铁和针阀管≥1 500N	检验夹具

(2) 金相检验

①阀球和针阀管焊接：

针阀管槽的纵向 90°磨片，比例：≥50:1

要求：

- 不允许有裂纹
- 允许有小的缩孔和气泡　≤0.01mm
- 针阀管焊透　≥80%
- 阀球和针阀管间的焊缝宽度　≤0.02mm
- 焊入深度（H）　0.03mm$<H<$0.23mm

②衔铁和针阀管焊接：

针阀管槽的纵向 90°磨片，比例：≥50:1

- 不允许有裂纹
- 允许有小的缩孔和气泡　≤0.01mm
- 衔铁和针阀管间过度处的焊接楔形宽　≥0.25mm
- 焊接深度（H）　≥0.10mm

(3) 针阀组件震动耐久性试验

在高频脉动器（型号：Cractronic 160）上在 80~160Hz 的频率及 120N 负载下进行 10^7 次震动，试验后焊缝不允许有裂纹。（撰稿人：陈贤章）

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.1.9 进气歧管、排气歧管

3.1.9.1 概要

进、排气歧管（Inlet manifold and exhaust fold）的形状对发动机性能影响很大，化油器发动机或单点喷射发动机进气需预热，需布置水套，因而形状较复杂。

3.1.9.2 加工工序

对于多品种小批量生产可由加工中心加工，发挥其改变零件方便、适应性强的优势，但是效率较低，难以适应大批量生产的需要。

对于大批量生产应选择专用设备通过专用夹具来满足快速高效的节拍。

①进气歧管采用铝合金较多，重量轻，导热性好，国际上已开始采用耐热、高强度高分子材料，采用注塑工艺生产，效率高，制造成本低。

图 3-1-19 为进气歧管加工气缸盖安装孔、化油器安装孔、预热器孔、水套孔等各种安装孔。

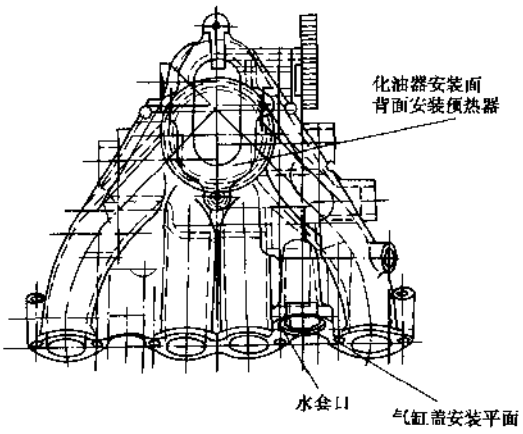


图 3-1-19 进气歧管加工

专用设备通过主轴与夹具的角度配合来满足不同角度加工面的要求，选择耐用度高的刀具，以及切削参数选择最佳化。

②多点喷射进气一般不需预热（极端寒冷地区除外）也有使用树脂进气歧管的，树脂进气歧管机械加工几乎可以省略，使其重量更轻。

工艺设计上要注意成形时尺寸离散度和密封槽尺寸以及法兰面位置设定。

③铸铁型排气歧管的加工。

排气歧管一般采用铸铁，耐燃烧性好，保温性也较好，价格较便宜。

铸铁型排气歧管的加工与进气歧管相同，选择专用设备完成所有加工要求。要注意排气法兰面的角度及尺寸，保证各安装位置的精度。

图 3-1-20 为排气歧管加工气缸盖安装孔、排气法兰安装孔等各种安装孔的加工。

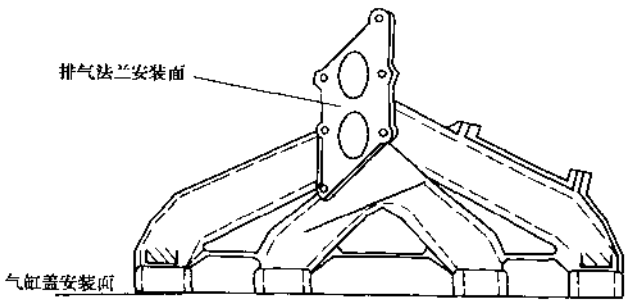


图 3-1-20 排气歧管加工

④一般高性能发动机采用不锈钢

排气歧管，重量轻，耐久性好，内表面光滑，因而排气阻力小，但是加工困难。在工艺设计上要充分考虑连续弯曲的开裂、壁厚不均匀等问题，要正确设定管子成形压力和弯曲速度以及法兰面位置设定。

3.1.9.3 质量保证

为保证进气歧管的密封性，要进行以下检查项目：

①与气缸盖面、化油器、预热器安装面或孔的位置及尺寸精度；

②各螺栓安装孔的位置及尺寸精度；

③水道、气道进行泄漏试验，是进气歧管最重要的检查要求，零件要求水道和气道泄漏量在压力为0.2MPa条件下，分别不大于每分钟10mL和10～50mL，设备分辨率要求是1mL。

④进气歧管内孔壁的粗糙度，减少进气紊流。

排气歧管为保证各零件安装位置的精度，需检查下列项目：

①气缸盖密封面、排气法兰面的位置及尺寸精度；

②排气法兰面的角度；

③各螺栓安装孔的位置及尺寸精度。

3.1.9.4 新的加工方法

随着发动机品种不断增加，排气歧管和进气歧管品种也随之增加，尤其进气歧管品种变化最大，在当前竞争剧烈的汽车制造业，中小批量多品种产品占主导地位，用高速加工中心机床加工进、排气歧管越来越受到人们的关注。（撰稿人：薛亚萍）

3.1.10 触媒转换器

3.1.10.1 产品的主要功能和工艺的主要要求

1）产品的主要功能

（1）触媒转换器的主要功能

①汽车排放污染物的危害

随着世界工业的高速发展，环境污染越来越严重，汽车对环境污染所占的份额日益加重，引起了人们的高度重视。研究表明：汽车排气污染物主要为HC、CO、NO_x和PM等。

研究表明：汽车排放污染物进入大气中，主要集中在离地面1m左右的区域，正处于行人的呼吸带处。随着汽车排放污染的日益严重，就会造成人们呼吸器官的慢性疾病增加。同时由于呼吸系统持续不断地受到污染物刺激和腐蚀，使呼吸道连同肺部的各种防御功能相继遭到破坏，最终导致肺、心病发生

汽车不同排放污染物对人体健康的影响，见表3-1-13。

表3-1-13 汽车排放污染物对人体的影响

污染物		影响
气体状	一氧化碳	对血红中的血色素亲和能力比氧大10倍，能引起严重的缺氧症状即煤气中毒现象。约125mg/m³时就可使人感到头痛和疲劳
	氧化氮	车辆排放的NO_x主要是指NO和NO_2，中毒的特征是对深部呼吸道作用，重者可致肺坏疽，对粘膜、神经系统以及造血系统均有损害，吸入高浓度氧化氮时可出现窒息
粒状	HC+PM	HC、PM吸入肺部后，由于不溶于水，经长时间粘附浓缩和富集后沉积于肺部，大量沉积，易产生肺部和呼吸道癌变

②催化转换器的功用

触媒亦称催化剂，是指在化学反应中改变反应速度而本身的组成和数量在反应后保持不变的物质。通常所说的催化剂是指加快反应速度的正催化剂。国内外大量实验数据已证实，汽车排气催化转换器是能大幅度降低汽车排放中的CO、HC、NO_x和PM等各种污染物的装置。

③汽车安装三元催化转换器的前提

大量的研究表明，贵金属催化剂对汽车尾气虽有较高的催化活性，但也有许多不足，如易中毒、催化活性受空燃比的影响较大、高温性能不太理想以及成本高等弱点。因此，要充分发挥三元催化转换器效率必须有：

A. 好的燃油品质

a. 铅的含量低。

烷基铅添加剂在历史上一直作为提高汽油辛烷值的较便宜的增强剂。这种添加剂不仅会危害人体健康，而且会对排气系统中的催化转换器和氧传感器造成损坏。催化转换效率愈高，催化剂对铅污染的承受能力就愈低。即使非常轻微的铅污染也会对现代催化剂造成破坏。目前，我国对燃油中铅的含量也做出了规定：

普通无铅汽油中铅的含量，按SH0041中规定不超过0.013g/L；

优质无铅汽油中铅的含量，按SH0041中规定不超过0.005g/L。

b. 硫的含量低。

硫天然存在原油中，如果在提炼过程中不把硫去除，就会造成车用燃油污染。硫不仅会对已受热的排气氧传感器带来副作用，而且会降低催化剂的效能。如果燃油中含硫量较高，会导致发动机点火时间延迟，提高了点火温度，降低了发动机效率。

c. 磷、砷、硅、镁、铁等的含量低。

B. 发动机加装电子控制汽油喷射系统

电控汽油喷射系统能保证发动机在很小的空燃比范围内工作，只有发动机在理论空燃比附近工作，更有利于催化转换器发挥对三种废气最大的转换效率。

④汽车废气排放催化净化的实现

汽车排气催化转换器：是指汽车排气系统中能降低废气浓度的部件，通常由金属壳体、垫层、多孔陶瓷载体及贵金属涂层等组成。其典型结构如图3-1-21所示。

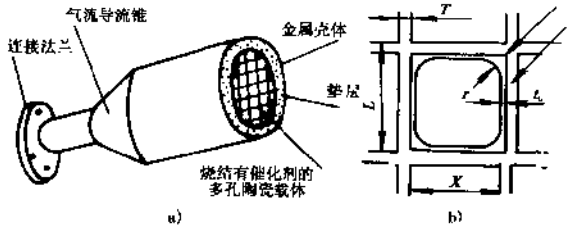


图3-1-21 典型催化转换器结构示意图

a）催化器截面；b）陶瓷载体平面结构

T-蜂窝孔壁厚；r-催化剂涂层自然角；x-蜂窝孔宽×长；t_c-催化剂涂层

催化转换器分为氧化型、还原型和三效型即二元催化转换器。汽油发动机汽车上大量采用的是三元催化转换器，它可以同时氧化CO、HC和还原NO_x。这种转换器一般都采用贵金属作为催化剂。本文主要介绍三元催化转换器。

（2）催化转换器各零部件的主要功能

①载体

起承载、分散活性组分和助剂的作用，并使催化剂具有一定的物理性能（如形状、强度等）。

②催化剂

由于汽车排放污染物以分子或气溶胶状分散于废气中，不会自动生成无害气体，通常是根据这些排放污染物的物理性质与化学性质，采用催化转化方法进行废气治理。汽车排放控制技术特别是排气后处理装置是在催化剂作用下使废气中有害气体发生化学反应转化成无害气体的方法。根据化学反应不同，催化转换法又分为催化氧化法与催化还原法。

催化氧化使汽车排放废气中有害气体 CO 与 HC，在催化剂作用下与排气系统中的氧气发生反应生成无害气体。主要的氧化反应式有：

$$CO + O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad HC + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$$

其中：催化剂通常采用铂系贵金属，起燃温度通常为 200～400℃。

催化还原是汽车排放废气中有害气体 NO_x，在催化剂作用下，与还原性气体发生反应生成无害气体。主要还原反应式有：

$NO + CO \longrightarrow N_2 + CO_2$　　$NO \longrightarrow N_2 + O_2$

$NO + HC \longrightarrow N_2 + H_2O + CO_2$　　$NO_2 \longrightarrow N_2 + O_2$

$NO_2 + CO \longrightarrow N_2 + CO_2$　　$NO + H_2 \longrightarrow N_2 + H_2O$

$NO_2 + HC \longrightarrow N_2 + H_2O + CO_2$　　$NO_2 + H_2 \longrightarrow N_2 + H_2O$

其中：催化剂也通常采用铂系贵金属。

催化转换法应用范围：有机气体及部分无机气体，浓度几百至几千 mg/m^3，温度 100℃以上。

催化转换法净化效率高（可高达 98%以上），反应温度低是目前汽车废气治理广泛应用的方法之一。

贵金属催化剂催化活性高，使用寿命长，是目前汽车尾气净化催化剂的主流。贵金属催化剂主要含铂、钯、铑等元素，有时也添加一部分钌。其中，铂和钯对 HC 和 CO 有很好的催化活性，但对 NO_x 的还原性很低，而铑正好能弥补这一不足，而且铑的低温活性较好。目前，汽车上使用的催化剂大多为 Pt:Rh 和 Pt:Rh:Pd 等。

③垫层

密封垫层的主要作用：

◆固定易碎的陶瓷载体

◆在受冲击时起缓冲作用

◆密封作用，防止废气逸出

◆隔热作用，防止壳体过热

◆隔音作用，降低噪声

密封垫的应用是车用催化转换器中的关键技术。由于排气温度变化大、壳体与载体的材料热膨胀性能差异大，加上车辆行驶时的振动、冲击，所以在壳体与载体之间要求加装垫层，而且要求垫层具有良好的密封性、缓冲性、耐高温、耐腐蚀和隔热性。

④壳体

催化转换器壳体是保护易碎的、涂有贵金属催化剂的陶瓷载体不因受外界冲击而损坏，同时可调节气流使其均匀分布。

2）催化转换器产品工艺的主要要求

（1）优良的密封性能

转换器内部压力在 30kPa 的条件下，泄漏量＜0.5L/min。要求较高的封装技术。

（2）长久的使用寿命

催化转换器的使用寿命一般要求在 8 万 km 以上（如对汽油机欧洲 I 排放标准要求为 8 万 km，欧洲 II 排放标准为 15 万 km；柴油机净化装置的使用寿命更长，有的可达 30 万 km）国内如北京地方法规规定为 5 万 km，上海为 8 万 km。要求较好的封装、涂装及催化技术以及耐机械冲击、耐热冲击的载体等。

（3）良好的低温活性

催化转换器的起始工作温度的高低直接决定车辆排放性能的好坏。起始工作温度愈低，车辆污染物排放愈少。国内催化转换器的起始工作温度一般为 350℃±50℃；国外催化转换器的起始工作温度一般为

汽车论坛 http://www.qclt.com

250℃±50℃，要求催化转换器有低温起活催化剂和保温性能良好的隔热材料和封装结构

（4）较强的耐高温性能

随着排放法规的日益严格，要求发动机启动后催化剂立即就能开始工作，设计者将催化转换器布置于离发动机靠近的位置。因此，要求催化转换器、催化剂、载体及活性涂层具有优良的抗高温性能。

（5）较高的催化转换效率

随着排放法规的日益严格，催化剂的用量和涂层的比表面积越来越大，催化转换效率也就越来越高要求催化剂活性较强、活性涂层的比表面积较大以及优良的总体设计结构。

（6）较好的产品性能一致性

具有电子控制燃油喷射系统的汽油机，一般工作在理论空燃比附近很小的范围内工作。因此，要求催化剂及活性涂层的涂敷工艺严格一致；载体外形尺寸及壳体尺寸应严格控制，确保垫层压缩密度比较均匀。

3.1.10.2 采用的材料及材料的特殊性能

1）载体

（1）载体的结构形式及分类

载体可分为2种：球状式和整体式。整体式载体又分为陶瓷载体和金属载体。颗粒状载体用于早期汽车催化剂上，制备简单，成本较低，而且具有较高的比表面积，但机械性能不理想，气流阻力大，实际使用时有不少困难。国内对球状载体研究较多，但国外研究较少，现已被整体式载体所取代。这里主要介绍陶瓷蜂窝整体式载体。

（2）陶瓷蜂窝载体

①采用的材料

陶瓷蜂窝载体所采用的材料主要有：刚玉（α-Al_2O_3）、堇青石、尖晶石、ZrO_2、TiO_2等，其中，堇青石是用得最多的材料。目前，全球汽车尾气净化器约95%是采用蜂窝陶瓷材料作为载体。堇青石蜂窝陶瓷材料它主要由耐高温的镁—铝—硅酸盐即堇青石（$2MgO·2Al_2O_3·5SiO_2$）组成，其含量占90%以上，外加一定量的添加剂和粘结剂。

②材料的特殊性能

陶瓷蜂窝载体具有以下特点：几何表面积大即每单位体积的壁面容积大，能获得与催化剂及排气大的接触面积，有利于提高催化剂的转换效率；体积密度低，热容量低，故易热起来，有利于汽车冷启动时排气温度较低的情况下催化转换器开始工作；对气流的阻力小，由于陶瓷蜂窝载体的开孔率较大如300/12 cpi^2/mil（1 mil=1/1000 inch，cpi^2=目/$inch^2$，1 inch=25.4mm）型的开孔率为63%，400/5cpi^2/mil型的开孔率高达79%，只要选择得当，对发动机的功率损失较小。

作为陶瓷蜂窝载体的材料的堇青石有如下特点：

◆高温热稳定性

由于陶瓷载体材料本身是高价氧化物，不会在高温下被排气中的氧气氧化，载体能忍受高达1200℃工作温度，甚至可短期忍受更高的温度。软化温度为1360℃。

◆低热传导率

由于堇青石是一中高价氧化物，非常稳定，分子的活性很差，导热率很低，因此，载体有很强的保温性能，易于排气中废气的催化转化。比热为0.8kJ/（kg·K）

◆低热膨胀系数/抗热冲击

非常小的热膨胀系数（热膨胀系数$<6.0\times10^{-7}$/℃）使得蜂窝陶瓷载体对急剧的温度变化有着超强的抵抗力。

◆重量轻

陶瓷载体的密度小，不需要过多地考虑因此而引起的排气系统的强度问题，更重要的是，陶瓷载体可更快地热起来以降低汽车冷启动时的排放污染物，积密度可以小于0.5g/cm^3。

◆多孔性

陶瓷载体的制造加工过程可以精确地控制最终产品的孔隙率，它对于涂层和贵金属在其上的附着尤其重要，也是陶瓷载体在汽车排气净化器中大量应用的主要原因，孔隙率在满足特殊结构强度要求也至关重要。堇青石结晶陶瓷载体孔隙率一般为35%，细孔平均直径为6μm。

③载体的规格

载体的形状多种多样，有圆形、椭圆形、不对称形、不对称四边形等。表3-1-14是CORNING公司常用规格陶瓷载体参数。

表3-1-14 目前常用陶瓷载体的基本性能及规格

CORNING 载 体 标 准 尺 寸 (1 inch=25.4mm)

形状	短轴 (mm)	长轴 (mm)	短轴 (inch)	长轴 (inch)	孔密度 Cell/inch²	壁厚 Mil	前端面积 (cm²)
圆形	93		3.66		400	6.5	67.9
	110		4.33		400	6.5	95
	117.1		4.61		400	6.5	107.7
	118.4		4.66		400	6.5	110.1
	152.4		6		400	6.5	182.4
	177.8		7		400	6.5	248.3
椭圆形	65.80	97.5	2.59	3.84	400	6.5	54.6
	68.1	144.3	2.68	5.68	400	6.5	85
	77	146.3	3.03	5.78	400	6.5	91.7
	80	120.7	3.15	4.75	400	6.5	82.3
	80	125	3.15	4.92	400	6.5	79.6
	80.8	170	3.18	6.68	400	6.5	118.6
	81.3	144.8	3.2	5.7	400	6.5	99.9
	84.1	148.1	3.31	5.83	400	6.5	104.4
	85.6	169.4	3.37	6.67	400	6.5	114
	86.4	127	3.4	5	400	6.5	86.2
	95	147.1	3.74	5.79	400	6.5	110.1
	98	143	3.86	5.63	400	6.5	111.6
不对称形	84.1	144.5	3.31	5.69	400	6.5	90
	11.8	113.5	4.4	4.47	400	6.5	90.5
不对称四边形	91.7	112.5	3.61	4.43	400	6.5	
	104.4	121.9	4.11	4.8	400	6.5	

2）车用催化剂

催化剂是催化转换器的核心，是加快废气转化的化学物质。如何研制出活性好、稳定性高、寿命持久的催化剂是催化转换器成功的关键。

（1）车用催化剂的分类

车用催化剂按作用可分为：氧化型、还原型和三效型。

汽车论坛 http://www.qclt.com

按成分可分为：贵金属、贱金属和稀土金属等。其中，贵金属催化剂（PMC）主要为铂（Pt）、铑（Rh）、钯（Pd）等；贱金属催化剂（BMC）以 ABO_3 型钙钛矿结构的复合氧化物催化剂最为出色，其中主催化剂原子 B 几乎涉及所有的过渡金属元素，如 Ag、Cu、Co、Fe、Cr、Mn、V 等；稀土金属催化剂，稀土金属主要有 Ce、La、Sr、Y、Sm。实际上单独稀土催化剂活性等于零，在同贵金属或贱金属同时使用时，稀土可起助催化剂作用，提高贵金属或贱金属的活性。

贵金属催化剂催化活性高，使用寿命长，是目前汽车尾气净化催化剂的主流。在此，主要描述贵金属催化剂。

（2）贵金属催化剂的成分

在此，规定汽车催化剂为陶瓷载体上所有附着物。汽车尾气催化剂配方和组成成份各不相同。但大体可分为涂层和活性组分。

涂层：γ-Al_2O_3

活性层：贵金属（P_t、P_d、R_h）

添加剂：稀土、过渡元素

（3）催化剂各种成分的特殊性能

①涂层的特殊性能

◆对载体附着性好且附着均匀

对载体良好的附着性可保证涂层不会因振动和冲击而脱落。涂层附着均匀对催化转换效率和阻力都起着重要作用。

◆比表面积大

涂层可几十成百倍地增加载体通道的比表面积，这对提高催化剂转换效率有着非常重要的意义。

◆高温稳定性好

Ao_2O_3 有 8 种不同的存在状态。其中 γ-Al_2O_3 就是其中一种过渡态，在高温下，它可变为比表面积很小的 α-Al_2O_3，使得催化剂的活性急剧下降。因此，确保涂层在催化转换器工作温度范围内的热稳定性显得尤其重要。

②贵金属活性层的特殊性能

◆起燃温度低

起燃温度定义为催化剂在该温度下将 50% 废气转化为可接受的气体。国产贵金属催化剂起燃温度通常在 300℃左右；国外先进的贵金属催化剂起燃温度通常在 200℃左右，甚至可以在常温下起燃。这是贱金属、稀土金属难以达到的。

起燃温度越低，就意味汽车起动后，催化转换器开始工作的时间越短，汽车排放减少。

◆催化剂的转化效率高

催化剂的转化效率取决于以下几个因素：

- 催化剂本身的能力，是最主要因素；
- 催化剂的工作环境温度。

温度高，则反应速度快，转换效率高。温度过低根本就不可能发生净化反应。因此冷起动时转化效率低，甚至为零。温度太高也不行，一般情况下超过 1 050℃活性层晶粒尺寸长大也会丧失活性。催化剂正常工作温度通常应在 300～700℃范围内。

- 排气空速

空速大，则有害物质接触催化剂进行净化反应的机会少，转化效率低。

- 过量空气系数 λ

不同过量空气系数即空燃比下，三元催化转换器对一种不同废气有不同的转换效率。

现代电子控制汽油喷射系统就是为了汽油机控制在理论空燃比区域工作，就是为了保证三元催化剂高的转换效率，

- λ 变动的频率和幅度

λ 频繁变动且变动幅度大，则转化效率低

● 催化转化器老化和中毒程度。

◆ 高温稳定性好

贵金属催化剂在1 000℃以下都能保持良好的热稳定性。

③催化剂添加剂的特殊性能

为保持涂敷层的高温稳定性，需要在 γ-Al_2O_3 中添加一定数量的稀土成分。同样，在贵金属中添加一定数量的稀土添加剂对催化剂的性能有明显的改进。目前最常见的稀土添加剂有 Ce、La、Sr、Y、Sm 等。一般来说，Ce 是汽车催化剂中最主要的添加剂，其作用大致有：

◆调节空燃比和储氧作用

在汽车行驶过程中，即使对电喷汽车而言，其空燃比也很难控制在理想状态，实际工况总是在“稀薄燃烧”或“浓缩燃烧”之间变动。“浓缩燃烧”时，燃料过多，氧气不足，使 CO 和 HC 转化下降，“稀薄燃烧”时，氧量过多，造成 NOx 还原困难。CeO_2 可在一定程度上解决这个问题。Ce 具有变价，在氧气量不足时，Ce 从四价变为三价，同时释放出晶格氧；反之，Ce 从三价变为四价，同时吸收氧。这个过程的反应式如下：

$$CeO_2 \rightleftharpoons Ce_2O_3 + O_2$$

Ce 在以上的反应过程中，为氧浓度的急剧变化提供了缓冲作用，使空燃比基本稳定在理论空燃比附近，从而改善了催化剂的工作环境，提高了催化剂的催化转化活性。

◆改善涂敷层的热稳定性。

γ-Al_2O_3 在高温时有转变为基本无活性的 α-Al_2O_3 的趋势。结果使比表面积减少，在某种程度上降低了催化剂的催化活性。加入一定比例的 La、Ce 可抑制 γ-Al_2O_3 的高温转变行为，使其在高温下保持稳定的表面积。

◆提高催化剂活性

加入一定量的稀土可使催化剂，特别是贵金属组分在高温下保持较好的弥散性和分散能力。阻止催化组分与氧化铝反应形成固溶体，提高了催化组分的活性。贵金属和涂敷层在高温下会发生晶粒长大和烧结现象，结果使催化剂实际比表面积下降，催化活性大大降低，直至完全丧失。添加一定量的稀土如的 La、Ce 等有助于抑制贵金属积涂敷层的晶粒长大和烧结的发生，另外还可促进贵金属及载体的均匀分布。例如，在800℃的氧化环境中，R_h 将向 Ao_2O_3 内扩散，大大减少 R_t 的催化活性中心。加入一定量的 CeO_2 即可阻止 R_h 向活性层内的迁移，保证了催化剂在高温条件下的活性作用。

◆起助催化剂的作用

为节约贵金属、降低 R_h 的添加量，可通过加入适量稀土特别是 La 组分来实现。同时，加入稀土也是改进过渡金属催化剂性能的一条路线，例如国际上近年来开发的全钯催化剂在性能上完全可与 Pt:Pd:Rh 催化剂相媲美。但是 Pt 催化剂对 NOx 还原作用非常小，为此，主要是通过 La 的富集改善 Pd 在 NOx 还原方面的不足。

(4) 贵金属催化剂的种类及其选择

◆贵金属类型的选择

贵金属主要是 Pt、Pd、Ph，其市场价格有较大差异，表 3-1-15 为贵金属市场价格大致情况。

表 3-1-15 为贵金属 (PGM) 市场价格

DGM类型 / 时 期	Pt	Pd	Rh	DGM类型 / 时 期	Pt	Pd	Rh
70 年代早期	150.0	40.0	600.0	1996 年春季	415.0	143.0	345.0
80 年代后期	600.0	140.0	1300.0				

目前催化剂有多种配方：Pt、Pt:Rh、Pt:Pd:Rh 等。贵金属价格差别较大，催化剂贵金属成分选择时应考虑其市场价格。

汽车论坛 http://www.qclt.com

◆贵金属用量的选择

贵金属用量是根据排放标准和催化剂制备工艺水平来确定的，表 3-1-16 为贵金属用量水平。

表 3 1 16 贵金属用量水平（g/ft^3，1ft=30.5cm）

金属含量		高	中高	中低	低
	Pd	300	200	100	33
9:1	Pd:Rh	300	200	100	33
5:1	Pt:Rh	180	90	60	30

目前国外催化剂选择中低或低用量催化剂就能使国内几大轿车制造厂生产的带电喷系统的汽油发动机轿车满足 ECE8301 标准。

◆贵金属配方的选择

贵金属配方的选择通常根据其市场价格和排放标准来确定，例如根据 1995 年 7 月 Johnson Matthey 公司的价格，相同价格的催化剂其成分如表 3-1 17 所示。

表 3-1-17 相同价格的催化剂成分

催化剂类型	负载量 g/L（g/ft^3）	比例	Pt g/L	Pd g/L	Rh g/L
Pt:Rh	1.77（50）	5:1	1.47		0.3
Pd	4.95（140）			4.95	
Pd:Rh	4.24（120）	14:1		3.96	0.28
Pt:Pd:Rh	3.89（110）	1:14:1	0.24	3.41	0.24

贵金属中，Pt、Pd 对 HC、CO 的转换效率非常高，但 Pt 用量过多，有时会将 NOx 过度还原成 NH_3。Rh 对 NOx 的转换效率要比 Pt、Pd 高。

3）垫层

（1）密封垫的分类

目前垫层有金属网和陶瓷密封垫两种形式。但陶瓷密封垫在隔热性、抗冲击性、密封性和高低温下对催化载体的固定力等方面都比较金属网垫要优越很多，是车用催化剂密封垫应用的主流。

（2）陶瓷密封垫采用的材料

陶瓷密封垫所采用的材料一般由三部分组成，见表 3-1-18

表 3-1-18 陶瓷密封垫材料组成

成分	重量百分比	特点
a. 陶瓷纤维（硅酸铝）	30%～60%	具有良好的抗高温性能
b. 蛭石	30%～60%	具有热膨胀和隔热性能
c. 有机粘合剂	3%～10%	在装配时提供足够的强度以便操作

不同的工艺和不同材料生产的陶瓷密封垫，其性能和使用寿命相差很大。性能的优劣一般由以下几方面决定：起始膨胀温度；抗腐蚀能力；抗高温能力；隔热能力。

陶瓷密封垫与不含蛭石的铝纤维垫配合使用，可以耐 1000℃以上的高温，并且抗腐蚀性和隔热性能会大大提高，可用于柴油机、摩托车等小型发动机，也可用于特别薄的陶瓷载体或金属载体的催化转换器。

（3）陶瓷密封垫材料的特殊物理性能

汽车论坛 http://www.qclt.com

①热膨胀性能

热膨胀特性是陶瓷密封垫的重要物理指标。由于陶瓷密封垫是在催化器装配时受到压缩、受热后膨胀时壳体的压力会影响其膨胀，所以热膨胀特性是指在受到一定的压力下的热膨胀率，一般的压力在0.35MPa左右。图3-1-22是陶瓷密封垫热膨胀示意图。

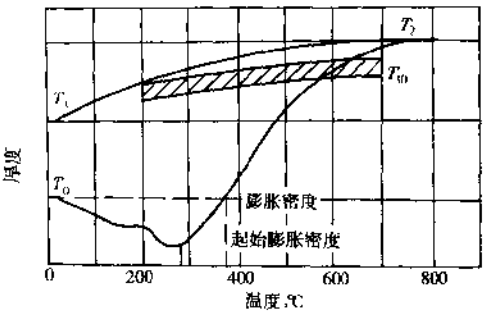


图3-1-22 陶瓷密封垫热膨胀示意图

常温下，陶瓷密封垫的厚度为T_0，当发动机的排气第一次通过催化转换器时，垫层的厚度开始变小，因为垫层内的有机粘合剂在燃烧，变成气体挥发掉，垫层的厚度变为最小T_1，在温度达到垫层的初始膨胀温度，蛭石开始膨胀，陶瓷密封垫的厚度开始增加，在温度达到750℃时，厚度为最大T_2，然后随着温度的降低，厚度开始减小，但是在回到常温，陶瓷密封垫的厚度T_3比原来的要厚。在以后的多次（如50次）循环中，厚度T_{50}要比T_2薄，随着循环次数的增加，阴影区加宽，即垫层越来越薄，直至失去固定作用。不同性能的陶瓷密封垫有不同的热膨胀性能，选用时要慎重考虑。

②压缩力特性

陶瓷密封垫在装入催化转换器时，为了保证有足够的密度，其厚度变为原来的65%，如果在装配时，压缩力过大会压碎陶瓷载体。另外，装配时速度过快，也会导致短时间内局部压缩力过大。所以在设计催化转换器时，壳体与陶瓷载体的间隙不要过小，另外选用较厚的陶瓷密封垫不但可以提高使用寿命，而且会有利于分散装配时过大的局部压缩力，最好控制在3--3.5kg/cm^2。

③抗张强度

在陶瓷密封垫装配时，是将垫层拉伸后紧包在带催化剂的陶瓷载体上，否则因壳体封装时，垫层会因受力取皱，使载体受力不均，因此需要有一定的抗张强度（至少100kPa）来保证在拉伸时不会断裂或是受到其它的损害。装入催化转换器后，垫层的拉伸强度就不重要了。

④热传导系数

陶瓷密封垫的热传导系统决定了垫层内的温度，也决定了催化转换器壳体的最低温度，对壳体的热膨胀和永久性的变形情况，对催化转换器的起燃温度都有较大的影响。

⑤摩擦系数

陶瓷密封垫与陶瓷载体之间以及与不锈钢壳体间的摩擦系数是决定陶瓷载体纵向固定力的重要因素，并且需要在燃烧后和没有燃烧的两种摩擦系数，以确保载体不会因车子行驶冲击而产生不良的轴向窜动，通常状态下，摩擦系数为0.4。

⑥耐腐蚀、耐高温特性

陶瓷密封垫的良好耐腐蚀、耐高温特性能确保其在净化器中的有效使用寿命为30万km。为保证催化转换器的使用寿命和效率，陶瓷密封垫的充填密度（即壳体与陶瓷载体间垫层密度）是很重要的。各个陶瓷密封垫生产商根据各种产品的性能，其推荐值各不一样，如3M公司3M Interam^{TM}100型系列陶瓷密封垫，推荐密度为1.0g/cm^3。

腐蚀率与充填密度的关系见图3-1-23。

（4）陶瓷密封垫的系列及规格

①陶瓷密封垫系列

根据不同的用途，可以挑选以下系列陶瓷密封垫：

Interam 100 通用系列；

Interam 200 初膨胀系列；

Interam X-D 弹性高，密度低系列；

汽车论坛 http://www.qclt.com

Interam I-D 气密性好系列；

Interam IS/IM 抗腐蚀能力强系列；

Interam/Saffil 抗腐蚀能力强系列；

Interam 100 HD/200HD Interam 100/200 的改进型，抗破坏能力强系列；

Interam 2121 HT 耐高温系列；

Interam 2000 LT 耐低温系列；

Interam 1000 HT 耐高温、低压系列。

②陶瓷密封垫的规格

同一系列产品具有不同的规格，例如表 3-1-19 所示为常用系列产品规格。

4）壳体及包装

（1）壳体及包装的分类

①填入式

壳体预成形成管状后，按要求将成形的管状壳体切成一定长度，然后将包有垫层的带有催化剂的载体沿轴向推入切好后的壳体内，用气体保护焊的方式将冲压成形的锥体（有时可能带有保温层）焊在包装好的载体外壳体的两端。这种包装方式生产效率最高。

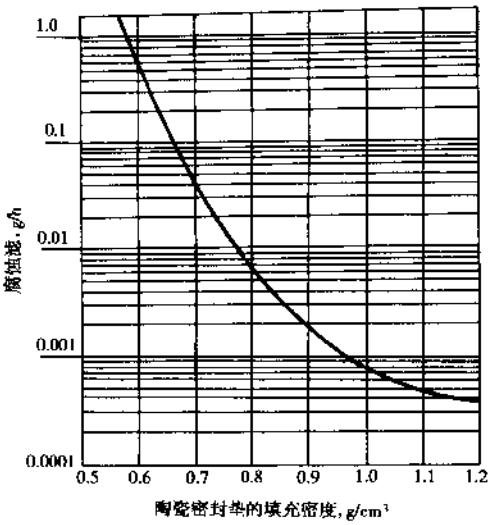


图 3 1 23 腐蚀率与充填密度的关系

②半壳式

表 3-1-19 常用系列产品规格

系列	产品密度 (g/cm²)	平均厚度 (mm)	适用间隙 (mm)
Interam™100	2 600	4.15	2.36～2.60
	3 100	4.90	2.82～3.10
	3 662	5.40	3.33～3.66
	4 070	6.02	3.70～4.07
	4 300	6.32	3.91～4.30
	6 200	9.80	5.64～6.20
Interam™200	3 100	4.90	2.82～3.10
	4 070	6.02	3.70～4.07
	4 320	6.32	3.91～4.30

壳体按载体的形状冲压成形，将包有垫层的带有催化剂的载体放在两瓣式的壳体之间，使载体均匀受压，而后沿壳体边缝焊的一种包装方式。这种包装方式对生产设备要求较低，但使载体受力不均匀。

③捆绑式

将包有垫层的带有催化剂的载体放在一条长和宽都确定的钢带上，然后由包装机将钢带拉紧后，剪切焊接成形的一种包装方式。这种包装方式对生产设备要求较高，要求设备在包装力方面可调整，其最突出的优点是载体径向受力均匀、有利于提高催化转换器的寿命。

（2）采用的材料和材料的特殊性能

催化转换器采用的材料应具有优良的高温抗氧化性、成形性和焊接性。一般采用下列不锈钢板材或带材。

美国	中国
AISI 409 S.S	0Cr13 或 1 Cr13
AISI 304 S.S	0Cr18Ni9

3.1.10.3 制造工艺的主要工序和特殊的加工方法及其关键设备

1）陶瓷蜂窝载体

（1）制造工序

陶瓷蜂窝载体的制造工序如图 3-1-24 所示。

（2）制造方法

陶瓷蜂窝载体的成形主要有波纹法、纸衬法、梳形板层叠法、挤压法等。其中，挤压成形法能保证大批量生产时产品的性能优良，故已成为制造陶瓷载体的主流方法。以下是堇青石陶瓷蜂窝载体挤压成形法的具体内容：

①原料的配制

由于车用蜂窝陶瓷载体要求低热膨胀系数，必须使用容易起定向作用的扁平粒子。堇青石的成分为 $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$，采用滑石（$3MgO \cdot 5SiO_2 \cdot H_2O$）、高岭土（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）及氧化铝（$Al_2O_3$）作添加剂，起定向作用如图 3-1-25。

其中，特别是高岭土对堇青石的定向作用影响最大。高岭土的板状结晶在通过挤压盖子时受到挤压作用，结晶的 C 轴垂直定向于蜂窝壁面。堇青石在生成的过程中其结晶垂直于高岭土结晶的 C 轴，热膨胀为负，C 轴成长。其结果除壁厚方向外，形成热膨胀系数小的烧结体。

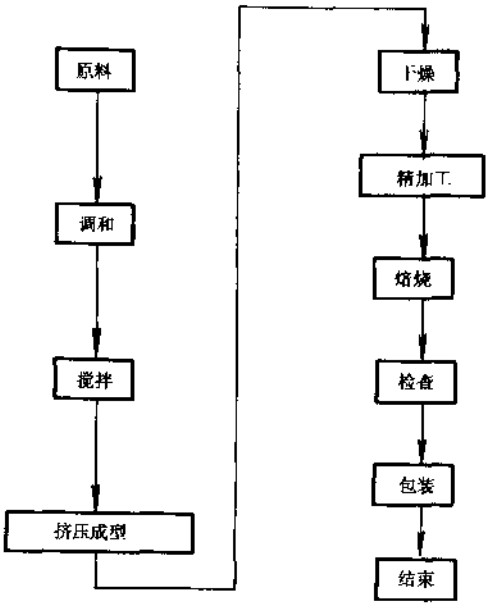


图 3-1-24 陶瓷蜂窝载体的制造工序

②搅拌

蜂窝的挤压是将成形助剂和水混合在原料粉末内，并作搅拌坯土使用。成形助剂有提高生坯（半成品）强度且赋予粘着性的结合剂；有提高粒子间润滑剂；还有能使防水性粒子表面溶解于水里的界面活性剂等。

搅拌是将上述成形助剂（结合剂、润滑剂和活性剂等）、水均匀涂敷在粉体周围的过程。

搅拌机可采用双腕型捏合机、连续捏合机、碾轮式混砂机、艾里奇逆混式混砂机等。

③挤压成形

坯土从背面的供给孔（简称里孔）进入盖，在中途进入窄缝（窄缝呈十字形展开）被挤压成整体式蜂窝结构。用于压出的坯土，进行细分后扩展成薄壁，由于重新接合获得优良的延展性和结合性。另外，为使挤压后蜂窝载体保持形状，要求坯土有较高的屈服强度值。

蜂窝的挤压压力随窝室形状和产品尺寸不同而不同，但一般在 10MPa 以上。成形有螺旋连续挤压和液压柱塞间歇挤压等方法。

挤压机可采用螺旋挤压机和液压柱塞挤压机，其挤后方式如图 3-1-26。

④干燥

蜂窝陶瓷载体的干燥采用通风干燥、调湿干燥、电感应加热干燥等方法。使用这些干燥方法时，要使

汽车论坛 http://www.qclt.com

陶瓷载体的内外干燥状态一致，在特殊的情况下也可以使用真空冻结干燥。

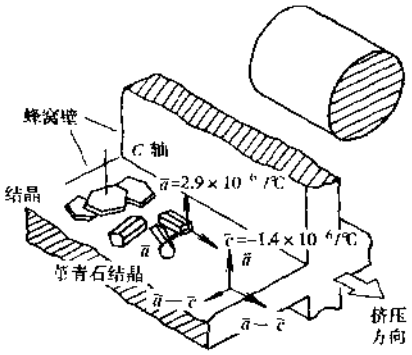


图 3.1-25 挤压堇青石结晶的定向作用

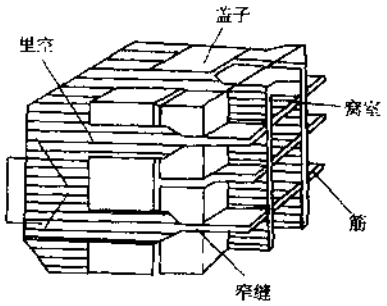


图 3-1-26 蜂窝的挤压机构

⑤焙烧

堇青石蜂窝陶瓷载体的焙烧是去除成形助剂，使原料（高岭土、滑石）分解、烧结和堇青石结晶化的过程。在此过程中，制品会产生膨胀、收缩、内外温差不一致，并由此产生应力而导致制品裂缝。另外，尤其值得注意，因热膨胀系数和孔隙率都随堇青石温度区升温速度的变化而变化，故选择焙烧的加热曲线是重要的。

(3) 特殊设备

①载体挤压成形机

②载体定型窑

定型窑用于载体成形后定型处理。载体成形后水份较高，载体成形后易变形，须预先干燥载体表面水分使其具有一定强度，便于搬运。国内有的企业使用家用微波炉干燥定型，效果较好，但产量较小，操作烦琐，难以满足规模化要求。专用载体定型窑，一般采用远红外线加热元件，窑内辅以热风循环，以网带作为传输工具，实现了连续自动化生产，完全可以满足规模化要求。

③载体干燥窑

干燥窑用于载体的干燥处理。载体入梭式窑高温烧成前含水率要求一般不大于2%，对于汽车用大小、壁厚、多孔的陶瓷载体，如何提高干燥效率以适应规模化要求显得十分重要，提高载体干燥效率的关键在于强化干燥过程中的传热过程，干燥窑应将传统的热风定位干燥与远红外辐射干燥结合起来，以加强系统的传热能力及干燥的均匀性，保证干燥效率的提高及干燥的安全性。干燥窑以网带作为传输工具，实现了连续自动化生产，完全可以满足规模化要求。

④自吸式燃气梭式窑

自吸式燃气梭式窑用于堇青石原料的高温煅烧合成及载体高温烧成。堇青石合成温度一般为1 400℃，载体的烧成温度为1 350℃，烧成时间为13h左右。该窑采用自吸式烧嘴，以液化石油气或天然气作为燃料，无须动力，窑内火焰呈倒焰形式，对于有效容积为几个立方米的窑炉，达到最高温度时的温差可保证小于10℃。该窑结构简单、人工控制、维护方便、能耗低、投资少，目前国内载体生产企业大都青睐这种窑型，但这种窑型无论在温差、产量，还是在自动化操作水平上尚不能满足现代化大批量生产的需求。

⑤旋焰式燃气梭式窑

旋焰式燃气梭式窑用于载体高温烧成。该窑采用高速调温喷嘴，使用清洁气体燃料，烧嘴交叉布置于侧墙，喷出速度大，席卷窑内气流围绕料垛旋转，窑底排烟，窑内温度及气氛均匀，最高烧成温度差小于5℃。使用调温喷嘴能够保证低温阶段入窑烟气温度不会过高，大流量的低温烟气循环有利于减小低温阶段窑内温差。该窑烧成制度可实现自动化控制，避免人为因素的影响。采用自动式调节阀实现燃气与助燃

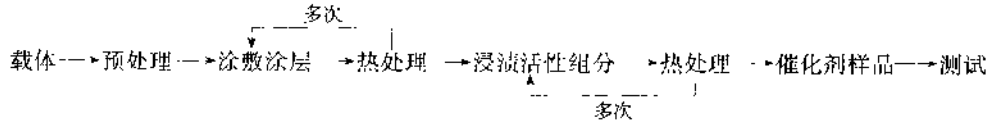
汽车论坛 http://www.qclt.com

风连续比例调节，控制系统采取多区单回路控制方案，系统配置仪表化，功能可靠，操作简便。烧嘴前设有火焰检测及自动点火装置，确保安全生产。

2）催化剂

（1）制作工序

催化剂的制作工艺，因催化剂配方不同而不同，汽车上常用贵金属催化剂制作工序如下：



（2）加工方法

◆陶瓷载体：经过超声波清洗器预处理。

◆浸渍：浸入涂层溶液中一段时间，涂敷液采用铝溶胶的水溶液，其中加有添加剂，液体呈酸性。

◆空中静置：凉干载体通道孔中的残余液滴。

◆热处理：在特定的烘箱中经700℃左右的煅烧以提高催化剂表面活性。

◆如果一次涂敷量不够，可重复以上过程。

◆贵金属活性组分配置：配制活性组分按一定比例选用Pt、Pd、Rh中一种或多种元素的硝酸盐，按一定配比，配成一定浓度的溶液。

◆浸渍：浸渍可分为真空浸渍、湿浸和干浸，可以根据需要选择一种以达到预期的目标。

◆凉干：载体浸渍后吹掉孔中积液，于空中静置一段时间。

◆干燥和焙烧

◆如果一次附着量不够，可重复进行此过程。

（3）关键设备

①催化剂干燥窑

催化剂干燥窑用于催化剂涂层干燥。由于蜂窝陶瓷载体的吸水率较大，被覆涂层后自由吸水率可达30%左右。催化剂涂层干燥与载体烧成前干燥所不同的是载体只能横向放置，以防止涂层流动，造成厚薄不均匀。载体干燥时可以竖向放置，有利于热传导及湿气扩散；催化剂干燥温度要求较低，一般在200℃以下，因此，如何提高干燥效率以适应大规模批量生产要求是干燥窑的重点。

②催化剂烧成窑

催化剂烧成窑用于催化剂烧成处理。催化剂烧成温度一般在800℃以下，该窑炉是催化剂生产的核心热工设备。可供选择的适应批量生产的窑型有推板窑、台车式隧道窑、辊道窑及网带窑。由于催化剂烧成对温度控制较为严格，应优先考虑使用易于控制的电加热，以上窑型的不同之处在于传输工具的不同。前三种使用温度比网带高，但都需要一定数量的推板、垫板或台车，窑炉热惯性比网带窑大，而且窑外需要设置回车线方可实现连续化自动生产，窑炉性能价格比没有网带窑高。网带窑易于实现生产线连接，微机控制，全自动运行，已为国内外广大催化剂用户所采用。

③催化剂还原炉

催化剂还原炉用于催化剂烧成后还原处理。还原处理是催化剂具有催化活性的重要工艺过程。还原温度一般在500~550℃，加热时间在5h左右，采用氢气作为还原介质，氮气作为保护气体。

（4）催化剂制作窑炉设备的研制方向

①继续完善用于载体及催化剂干燥的电热网窑的设计；

②研究开发使用电能之外的干燥设备；

③研究开发微波干燥窑炉；

④改进燃气旋焰式梭式窑的燃烧系统及自控系统采用先进的脉冲燃烧技术与连续比例调节笼系统相结合，进一步缩小窑内温差，降低燃料消耗；

⑤研究开发载体烧成的小断面窑；

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑥深入研究催化剂烧成的工艺要求，确定合理的控制制度。

3.1.10.4 材料和工艺方法的发展趋势和新动向

1）载体

（1）目前车用陶瓷载体存在的问题

陶瓷载体与球状载体相比具有以下特点：气体阻力小、只有球状的二十分之一，且气流通畅、均匀；机械强度高；热稳定性好；催化活性涂层薄，比表面利用率高。但是在汽车上具体应用时仍存在以下不足：

①对发动机的功率损失较大

限于制作工艺，蜂窝的孔径和壁厚不能作的很小。因而，为了减小发动机的功率损失，就必须增加净化器中陶瓷载体横截面积。

②耐急冷急热性能不好

发动机功况经常变化，如果载体耐热冲击性能较差，就会减少其使用寿命。

③质碎，机械强度不高

陶瓷载体的材质及结构决定了它质碎、机械强度不高的物理性能。由于汽车行驶过程中机械振动较大、因载体与壳体材质的热膨胀系数不同而造成的机械应力以及包装不良等原因，使得载体很容易破损。

④热惯性、导热性差

载体材料决定了它的热惯性、导热性差。因此，采用陶瓷载体的净化器冷启动最初阶段催化转换效果很差。

（2）载体材料和工艺方法的发展趋势

①载体工艺方法的发展趋势

陶瓷载体的性能改进方向主要体现在工艺方法方面，如增加单位面积的开孔目数（400cpsi 发展到 900 cpsi），降低通道壁厚（从 8mil 发展到 3mil）和改善各方面的物理性能。表 3-1-20 为同一目数（400cpsi）方孔的陶瓷载体通过改进通道壁厚的性能对比。

表 3-1-20 陶瓷载体的物理性能

项　　目	EX 20	
结构/壁厚 [cpsi/mil]	400/8	400/6.5
结构单元尺寸 [in (mm)]	0.05 (1.27)	0.05 (1.27)
机械强度系数	0.032	0.02
热强度系数	5.97	7.69
通道直径 [in (mm)]	0.042 (0.08)	0.052 (1.09)
孔隙率 (%)	35	35
体积密度 [g/in³ (g/cm³)]	8.11 (0.495)	6.74 (0.41)
端面开孔率 (%)	71	75.7
几何表面积 [in²/in³ (cm²/cm³)]	66.5 (26.2)	69.6 (27.4)
流阻 (L/in²)	21 900	19 800
膨胀系数 [1cm/cm·℃]	6×10^{-7}	6×10^{-7}

※注　cpsi = cells per square inch 目/平方英寸

从表 3-1-19 可以看出，改进后的陶瓷载体除机械强度进一步降低外，其余性能都有较大的提高。目前，陶瓷载体的制造工艺有较大的进展，已有 900/3（cpsi/mil）这种规格的陶瓷载体投放市场，这将进一

步改善陶瓷载体的对发动机的功率损失；增强陶瓷载体的抗热冲击性能；增大催化剂的转换效率；降低净化器重量。但陶瓷载体材料决定了它易碎、低热传导性等无法得到根本的改变，需研究新材料。

②金属载体

a. 采用的材料

金属载体采用 Al Cr Fe，金属片厚可达 0.05～0.1mm。其典型结构如图 3-1-27 所示。



图 3-1-27 典型金属载体结构

b. 材料的特殊性能

金属载体的优点是：耐热冲击性好，导热性好，起动快；由于金属的延展性好，壁厚可薄到 0.04mm，相同体积时，几何表面积可比陶瓷载体大 40%，重量轻 45%。

金属载体的缺点是：比陶瓷载体价格高约 50%，影响了它的推广应用；合金片再加工时，Al 在表面氧化析出的 Al_2O_3 与涂层间的结合牢度问题，尤其是在剧烈的温度变化与频繁的氧化还原交变过程中的牢固性和稳定性，值得格外注意，至少在制备催化剂时，要比陶瓷蜂窝载体在操作上更为严格。

金属载体因热容量小，能很快从冷态加热到工作温度，所以发动机冷启动后很快就能达到催化剂起作用的温度，重量轻，但价格比陶瓷载体昂贵得多。为此，在超低排放标准时解冷起动 HC、CO 超标排放的"预转换器"或对排放要求严格的高档汽车上已取得成功的应用。估计在摩托车净化器上也会取得突破。

2）催化剂的发展趋势

第一代催化剂（1975～1978 年）：

属于氧化型催化剂，可有效地祛除 CO 和 HC，但对 NOx 无能为力。这时期人们对普通金属（Cu、Cr、Ni 等）的催化剂作了大量的研究，但是研究发现普通金属存在催化活性交低、易发生硫中毒、起燃温度过高等明显缺陷，因此人们逐渐增加了对贵金属（Pt 和 Pd）及其他材料的研究的兴趣，并取得了很好的成果。

第二代催化剂（1978～1986 年）：

为了满足更严格的排放法规，尤其是对 NOx 的排放限制，1978 年开发出了第二代催化剂即三效催化剂（Three Way Catalyst）。其主要变化是在 Pt 系催化剂中加入了具有 NOx 还原活性的 Rh，从而可以对汽车尾气中的 CO、HC 和 NOx 三种主要污染物同时具有净化作用。

第三代催化剂（1986～1995 年）：

80 年代中期，为了提高燃油经济性，汽车生产厂家采取了一些措施，如减速时关闭节气门。这使得催化剂经常工作在高温氧化的恶劣气氛中，导致 Rh 与 γ-Al_2O_3 反应生成非活性的铝酸盐，而且高温时 Rh 还会与 CeO_2 反应，降低二者的活性。为此开发了第三代催化剂（1986～1995）以解决这些问题，主要措施是采用多层活性层或用 ZrO_2、BaO、La_2O_3 等氧化物作为稳定剂。第三代催化剂还解决了 P、S 中毒及 H_2S 排放等问题。

第四代催化剂（1995 年～）：

自 1995 年起又开发了第四代催化剂。主要改进是用 Pd 代替部分 Pt 或 Rh，以大幅度降低成本，这一代催化剂的典型代表是 Ford 公司联合 Johnson Matthey 和 Engelhard 公司开发的全 Pd 催化剂。第四代催化剂的使用要求更严格的空燃比控制、进一步减少汽油中 Pb 的含量、提高催化剂的工作温度以减少 S、P 或其它杂质的影响。

3.1.10.5 产品和工艺关键质量控制点的参数要求、检测方法及关键检测设备

1）载体

（1）产品和工艺关键质量控制点的参数要求

堇青石蜂窝陶瓷载体焙烧过程中，制品会产生膨胀、收缩、内外温差不一致，并由此产生应力而导致

制品裂缝。尤其值得注意的是，因热膨胀系数和孔隙率都随堇青石温度区升温速度的变化而变化，故选择焙烧的加热曲线是非常重要的。

堇青石蜂窝陶瓷载体是在 MgO-Al_2O_3 SiO_2 体系中高温合成的，烧成的温度为 1 400 ~ 1 420℃，如图 3-1-28所示。同时载体的热振动抗碎性能也应重视。

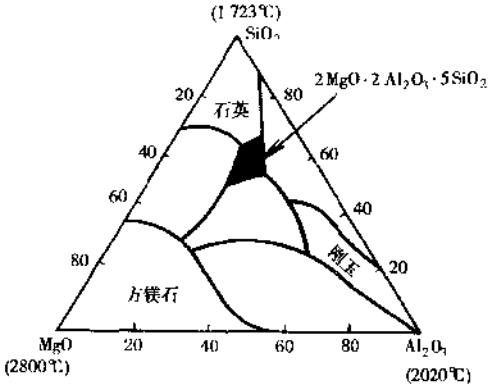


图 3-1 28 堇青石陶瓷载体合成体系

(2) 检测方法及关键检测设备

①材料性能检测及设备

E-模量检测法及设备见图 3-1-29。

温度对材料性能的影响见图 3-1-30。

图 3-1-30 为 EX-20 400/6.5 型陶瓷载体的 E-模量扬氏模量随温度的变化特性。

②温度对热膨胀系数的影响

图 3-1-31 为 EX-20 400/6.5 型堇青石陶瓷载体的热膨胀系数随温度的变化特性。

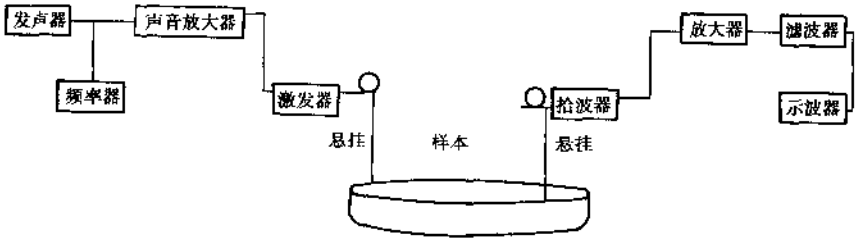


图 3-1-29 模量检测法及设备

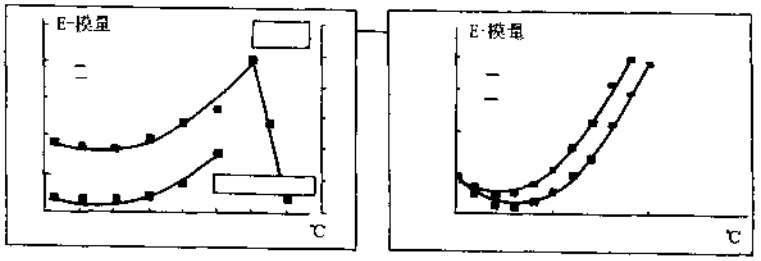


图 3-1 30 陶瓷载体的 E-模量随温度的变化特性

③强度的检测方法

◆切向挠曲强度检测法

切向挠曲强度检测法如图 3-1-32 所示，是一种抗压强度检测方法，抗压强度对于抗热冲击非常重要。

◆等压强度检测法

等压强度检测法如图 3-1-33 所示，可以测出载体在被压碎前所能承受的压力，对等压强度的了解对于包装力的设置以及满足催化转换器的可靠性设计非常重要。

◆轴向抗压检测法

轴向抗压检测法如图 3-1-34 所示，将轴向抗压检测法应用到所有的批次中以确保批次与批次之间的差异较小。

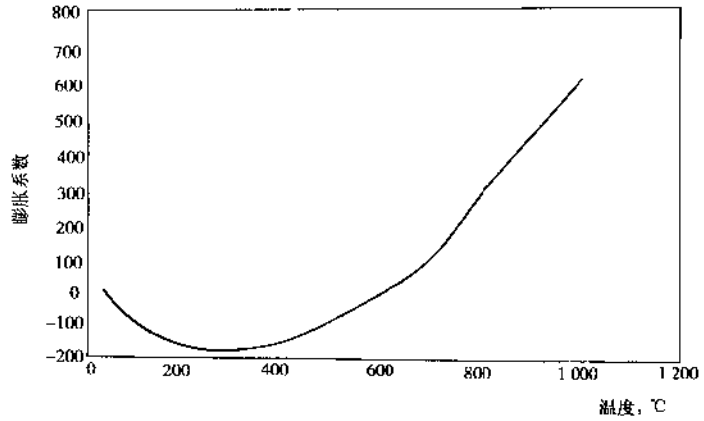


图 3-1-31 陶瓷载体的热膨胀特性

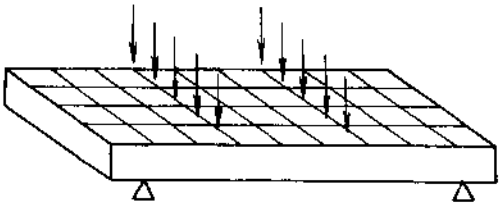


图 3-1-32 陶瓷载体切向挠曲强度检测法

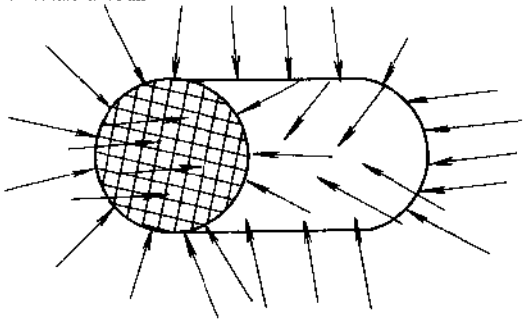


图 3-1-33 陶瓷载体等压强度检测法

如一般规格的陶瓷载体 EX-20 400/6.5 检测压强限为：A 轴 10.34MPa，B 轴 1.38MPa，C 轴 0.17MPa。

①物理性能检查

◆尺寸检测

如圆柱形的直径，高度，椭圆柱形的椭圆长轴、断轴及圆柱高等。

◆外型检测垂直度

如网格缺陷；垂直度；裂纹；边缘是否均匀等。

为确保不断改进产品和保持产品的一致性采用如图 3-1-35 所示激光表面测量和质量检测方法。

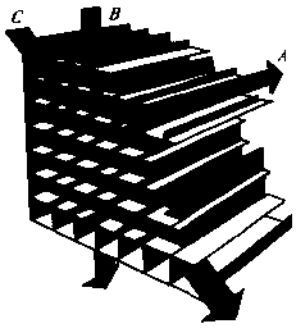


图 3-1-34 陶瓷载体轴向抗压检测法

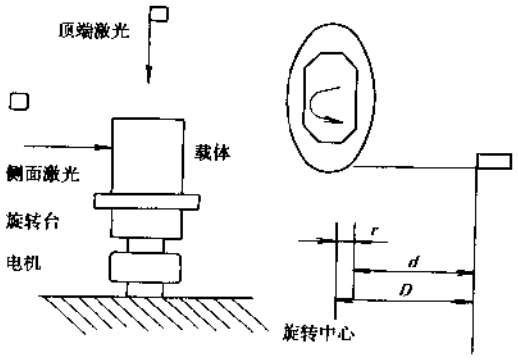


图 3-1-35 激光表面测量和质量检测方法

汽车论坛 http://www.qclt.com

2）催化剂

（1）车用催化剂的评价体系及研制开发过程

为保证催化剂的质量与可靠性、耐久性，国外在几十年的研制开发过程中建立了一套系统的催化剂评价体系。研制开发全过程和评价体系如图 3-1-36 所示。

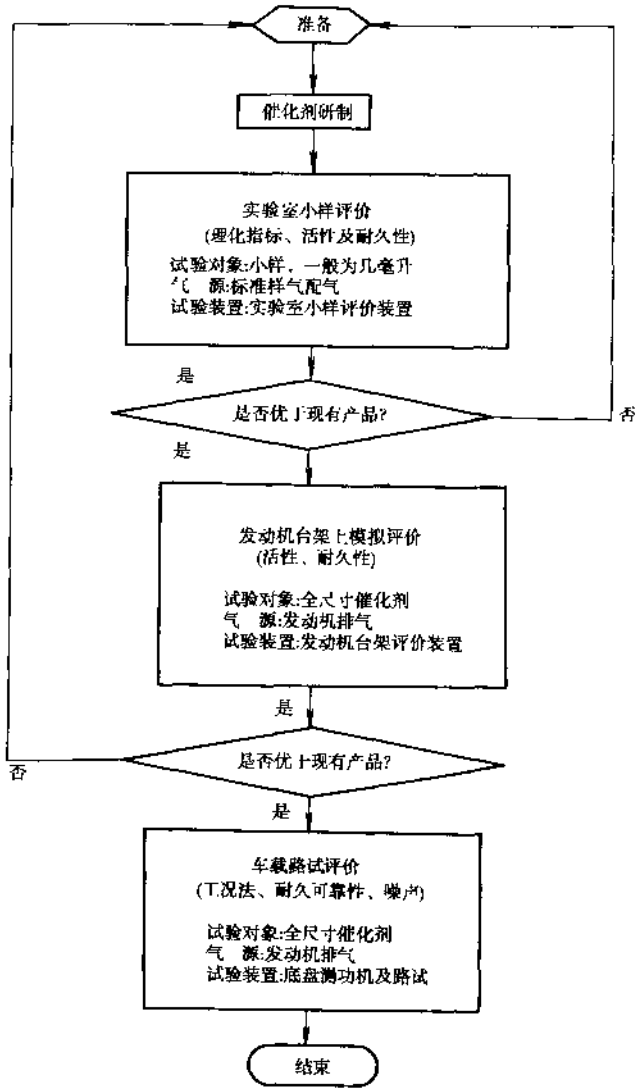


图 3-1-36 研制开发过程及催化剂评价体系

①实验室小样评价

实验室小样评价即把容积为几毫升的小块催化剂样品装入特定试验装置中，通入用标准样气合成的模拟气体，分别测定催化转换效率随氧化还原率 R、反应温度 T 以及空速 SV 变化的曲线。此外，将催化剂小样进行一定时间和一定模式的高温老化后，进行理化分析以考察其失活的原因。通过大量的试验筛选出最好的方案。

②发动机台架上模拟评价

根据小样评价筛选出的方案，制造出车辆上可用的全尺寸催化剂样品，进行包括活性评价和耐久性评价的发动机台架评价试验。由于影响催化剂转换效率的主要原因是排气中的氧浓度（或空燃比 A/F）、反应温

度及滞留时间(或空速)。因而,发动机台架上催化剂活性主要包括催化剂空燃比特性与催化剂起燃温度特性,而催化剂的空速特性则视具体情况而定。耐久性评价,一般采用快速老化方法,通过模拟实车运行中的最恶劣条件来加速催化剂的失活。活性评价试验往往在老化试验后进行,以获得具有实用意义的结果。

③车载路试评价

由发动机台架评价试验筛选出的催化剂被装车接受最终的考核,这包括工况法测定其转换效率和整车排放是否达标,以及由车队的实际路试来考核催化剂的耐久性,以取得具有实际意义的结论。由于路试的试验周期相当长,且费用非常高,一般仅作为一些全新设计和设计变动较大的催化剂商品化前的最终考核。

上述三个评价阶段中,发动机台架上模拟评价阶段最为重要,与小样评价相比,它的试验条件更接近催化剂实际使用条件;与车载路试相比,则试验费用低周期短。但由于发动机台架上模拟评价方法特别是快速老化试验方法要随所模拟的催化剂使用条件和所要满足的排放法规的不同而异,因而这些试验方法的设计和验证都有很大的难度。

(2) 催化剂产品及工艺的关键质量控制点的参数

我国自70年代初开始车用催化剂的开发研制,起步并不比国外晚多少,但目前真正能达到实用化水平的国产催化剂却很少,主要表现在催化剂的可靠性、耐久性及起燃温度等方面。其主要原因为:

①没有合理的催化剂评价技术

我国的车用催化剂评价技术与国外存在相当大的差距,致使催化剂的可靠性和寿命等主要特性难以考核及改进。催化剂评价中最重要的是发动机评价台架模拟试验,它可以通过模拟实车工况快速筛选催化剂样品并预测催化转换器的使用寿命,用几十小时的快速老化试验替代数万公里的实车道路试验,是一种低成本高效率的开发手段,同时也是催化转换器开发过程中最为关键的一环。

②产品的一致性较差

我国车用催化剂在实验室小样评价时与国外催化剂相比差距并不大,甚至有时个别全尺寸催化剂发动机模拟评价试验结果与国外催化剂相比差距也不大,上批量后却保证不了每件催化剂产品具有基本相同性能。这与载体上涂层和催化剂的涂敷方法及热处理方法有关。尤其是在批量生产过程中,热处理工艺能否保证每件载体上涂敷液的干燥及焙烧时按同一种焙烧模式加热。

(3) 检测方法及关键检测设备

①催化剂的台架活性评价试验方法

A. 催化剂的台架活性评价试验方法

整车用催化转换器产品的检测方法按GB执行。这里主要讨论催化转换器产品的台架活性评价试验方法。国外具有代表性的台架评价试验方法如表3-1-21所示。

表3-1-21 国外典型的催化剂活性评价方法

项目 / 条件	FORD		GM		ENGELHARD	ALLIED SIGNAL		JOHNSON MATTHEY
	空燃比特性	起燃温度	空燃比特性	起燃性能(η_{50})的时间	空燃比特性	空燃比特性	起燃温度	空燃比特性
发动机排量	—		1.8L		4.5L (V6)	5.0L (V8)		2.3/1.8L
催化剂容积	—		1.4L		1.6L	1.5L		1.4/1.2L
催化剂入口空燃比 A/F	14.0～15.5 ±0.5@1Hz	15.0与15.3	理论空燃比 -0.5～-0.5	喷二次空气后,O_2浓度5%	理论空燃比 0.3～+0.3 ±0.5@1Hz	14.0～15.0 ±0.4@1Hz	14.56±0.4 @1Hz	λ=0.95～1.05
催化剂入口温度 T_i (℃)	400与650	100～400	482	345	400	370与450	200～460	450
空速 SV (h^{-1})	40 000与80 000	40 000	46 000	—	80 000	30 000与90 000	30 000	60 000

注:14.0～15.5±0.5@1Hz是指A/F的平均值从14.0调到15.5,A/F的波动幅度为0.5,波动频率为1Hz。

汽车论坛 http://www.qclt.com

B. 催化剂活性的台架评价试验方法

a. 空燃比特性评价试验方法

图 3-1-37 表示了三元催化剂的 CO、HC 和 NO_X 转化率随空燃比 A/F（或过量空气系数 λ）的变化，在理论空燃比（$\lambda=1$）附近的狭窄范围（称为窗口）内，往往三种污染物的转换效率同时达到较高水平，因而，催化剂的这一工作窗口越宽，则表示催化剂的实用性能越好，同时也对电子控制燃油喷射系统的要求越低。

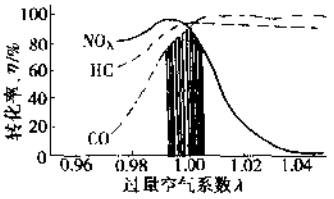


图 3-1-37 三元催化剂的空燃比特性

在空燃比特性试验时，要求催化剂的入口温度 T_i 和空速 SV 保持不变，通过调节发动机燃油供给量而获得不同空燃比 A/F，而这是在普通的发动机台架上是难以做到的。由于 A/F 的波动幅度及频率对催化剂的性能有很大的影响，因此，试验时的 A/F 波动特性应根据实际电控喷射系统的特性而定。同时，T_i 一般取正常行车时的温度（400～550℃），空速取中等空速（40 000～60 000h^{-1}）。

b. 起燃温度特性评价试验方法

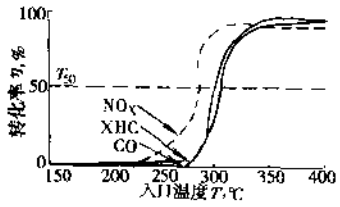


图 3-1-38 催化剂的起燃温度特性

出表 3-1-20 可知，对于催化剂的起燃温度特性一般有两种试验方法。一种是在 A/F 和 SV 不变的条件下，测取转化率随入口温度 T_i 而变化的曲线如图 3-1-38 所示，T_i 范围一般取 150～500℃。其中，转化率达 50%时的温度点定义为起燃温度 T_{50}。T_{50}越低，则冷起动时催化剂起作用的时间越早，即起燃温度特性越好。因此，降低起燃温度一直是研究者孜孜以求的目标。试验中调节排气温度的方法比较复杂，可用排气管中串联换热器的方法来实现，也可以用改变发动机负荷来调节排气温度的同时用排气旁通阀保持流经催化剂的排气流量不变来实现。

另一种评价催化剂起燃温度特性的方法是，从冷起动开始达到 50%转换率所需要的时间作为考核指标，如表 3-1-19 中 GM 公司的评价方法。

这两种方法各有优点，前者能得到明确的起燃温度指标，便于和实验室小样评价指标对比，因此应用最广泛；后者以时间代表起燃性能，对于实车来说更直观。

c. 空速特性评价试验方法

空速 SV 被定义为通过催化剂的排气流量与催化剂容积之比。空速越大，反应气体在催化剂中停留的时间越短，转化效率越低；但同时由于催化剂中的气体流速增大，湍流度加强，这有利于反应物向催化剂表面扩散，使转化率增大，这也是在一定的范围内转换率对空速 SV 的变化并不敏感的原因，一般在 $SV>100\,000h^{-1}$后，转换率才开始下降。因此，SV 试验可以不单独进行，而将 SV 作为空燃比特性试验时的参变量来考虑，如表 3-1-20Allied Signal 公司的试验方法。就车用催化剂而言，希望在比较宽的空速范围内能保持高转化率，以满足汽车车速和负荷在很大范围内变化的要求，同时也可以使催化剂的体积缩小。

②催化剂的失活及耐久性评价方法

a. 车用催化剂的耐久性与失活机理

催化剂经长期使用后，其性能将发生劣化，亦称失活。美国联邦标准局要求催化剂在使用 5 万英里（8 万 km）后整车排放仍能满足法规限值。近年来，一些催化剂的耐久性要求已提高到了 8 万英里甚至 10 万英里以上。影响催化剂寿命的因素如表 3-1-22 所示。

高温失活是一种复杂的物理化学过程，其结果是催化剂的活性表面大大减少，导致活性下降。实车使用过程中引起高温失活的原因有：(1)发动机失火使未燃混合气在催化转换器中发生剧烈反应；(2)汽车连续高速大负荷运行；(3)为减少冷起动排放而紧靠发动机设置的初级催化转换器受到更严酷的高温考验。

车用催化剂的中毒来源主要是燃料和润滑油中的 Pb、P 和 S 等。毒物主要吸附在活性物上，并形成化学吸附络和物。其中 Pb 中毒往往是不可逆的，催化剂在含 Pb 环境工作几十小时就会完全丧失活性；而 P、S 和 Cl 的中毒则在一定的条件下（如高温氧化条件）可恢复催化剂的活性。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 3-1 22 车用催化剂的失活机理

高温失活	化学中毒	结焦与堵塞	机械损伤
●贵金属活性成分烧结 ●涂层中 γAl_2O_3 高温下转化为 α-Al_2O_3 ●载体发生高温烧结	●第 V、VI 族元素的分子如 N、P、S 等 ●重金属化合物，如 Pb、Hg、Zn、Cu 等 ●不饱和高级性分子，如 CO	含碳的沉积物(结焦等)	●热冲击 ●磨损 ●物理性破碎

表 3-1-22 中第一类和第四类的失活，会随着现代催化转换器工艺水平以及发动机制造水平的不断提高而逐步被解决，在国外这两类失活已不是主要难题，而高温失活与中毒失活则是车用催化剂最主要的失活方式。

b. 催化剂的发动机台架快速老化试验方法

催化剂要达到实用化的重要条件是必须具有一定的寿命，因而仅对新的催化剂进行活性评价试验几乎没有任何意义，为缩短开发周期及降低成本，国外大都采用快速老化试验进行催化剂寿命评价，比较有代表性的老化试验方法列于表 3-1-23。

表 3-1-23 国外典型的催化剂台架老化试验方法

	日本推荐的标准 (1978)		FORD (1977)	GM (1988)	ENGELHARD (1985)	ALLIED SIGNAL (1989)		JOHNSON MATTHEY (1993)	
催化剂容量 (L)	50～100mL		1.5	1.4～2	1.6×2	1.5～2		1.23×2	1.42×2
发动机运行工况	稳态	稳态	改进的 AMA 循环	RAT 循环	稳态	稳态	周期断油	满足 FCE3 的中等老化	满足 ULEV/双模式老化
催化剂入口空燃比 A/F	14.7±0.3	14.7±0.3 (二次空气脉冲)	—	—	λ=0.97±0.3@1Hz(二次空气脉冲)	14.56	14.56～24	见图 3-1-38	见图 3-1-38
催化剂入口温度 T_i(℃)	700±20	750±20	≤715	800	850	760 或 900	760 或 850	820～900	560～630
催化床温度 T_{bed}(℃)	—	—	—	—	≤1050	<825 或 <920	<850 或 <910	—	670～900
空速 SV(h^{-1})	80 000		-		—	56 000 或 102 000	56 000 或 102 000	75 000	55 000～120 000
老化时间(h)	100		200	100	150	100		80	45
模拟行车寿命(km)	—	-	40 000	80 000	80 000	—		80 000	

从表中可以看出，不同的厂家对车用催化剂的老化方法各不相同，但具有下列规律：

Ⅰ. 一般采用大排量发动机作为老化试验的废气发生器，这是考虑到大排量发动机更易于实现排气管中的高温条件，而且能提供足够多的废气同时老化两个或两个以上全尺寸催化转换器。

Ⅱ. 随着年代的推移，老化温度不断提高，老化时间不断缩短，从单纯控制催化剂入口温度向入口与床温二者兼顾的方向发展。老化温度的提高除了为提高老化效率外，也反映了现代汽车行驶中高速工况比重不断增大以及催化剂向发动机不断靠近的发展趋势。

Ⅲ. 可利用空燃比波动加速老化。空燃比的波动模式一般有以下三种：

● 单模式自然波动（表 3-1 22 中 Allied Signal 公司的前一种方法）空燃比控制在理论空燃比、波动

汽车论坛 http://www.qclt.com

幅度为电控系统所能达到的控制精度，其波动很微弱。

● 双模式脉冲波动如图 3-1-39a 所示。发动机在理论空燃比稳态运转，每隔一段时间脉冲式断油，使排气成分在理论空燃比与极稀（$\lambda-A/F$）脉冲的双模式之间周期性波动，从而使催化剂床温上升至一个极高的温度。此波动模式的优点是用电控发动机很容易实现，不须添置辅助设备；缺点是发动机不能稳定工作，故断油时间不能太长，使得老化高温的持续时间短，强度低。

● 双模式均匀波动如图 3-1-39b 所示。发动机在部分负荷稳态运转，控制空燃比加浓（$\lambda<1$），通过向排气中周期性地喷入二次空气来产生老化高温，同时利用二次空气系统的供气量与通断周期来调节排气空燃比的波动幅度、频率与占空比，即调节老化高温的持续时间。此方法的优点是，可使发动机稳定工作在部分负荷，但由于需要一套二次空气喷射系统，使试验结构复杂化。

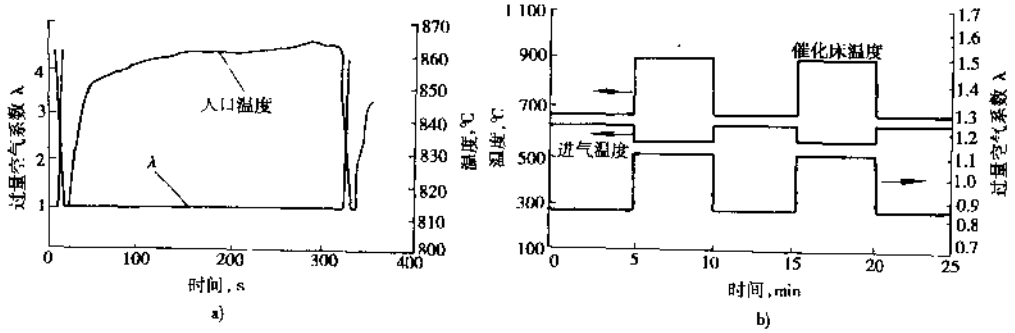


图 3-1-39 催化剂的老化模式

a）满足 ECE3 的中等老化；b）满足 ULEV 的双模式老化

②车用催化转换器性能评价试验装置

a. 车用催化转换器性能评价试验台总体布置

图 3-1-40 为一种常见催化转换器性能评价试验台的总体布置图。由发动机排出的气体经混合器均匀混合后，分成流量均匀的两路，根据试验的内容不同，或经换热器进入或直接进入试验用催化转换器。排气成分分析采用综合排放分析仪，通过测量催化转换器入口和出口的 CO、HC 和 NOx 浓度求出转化效率。空燃比的测量使用空燃比传感器。

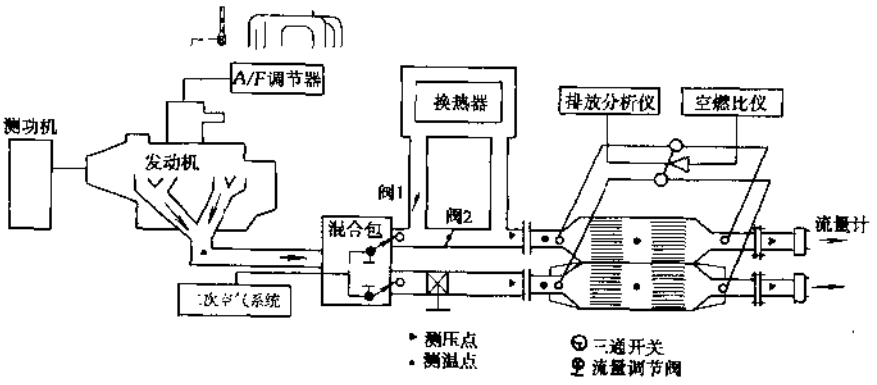


图 3-1-40 车用催化剂台架评价装置总图

b. 空燃比 A/F 控制

空燃比特性试验要求在空速与排气温度不变的条件下能对 A/F 作精确可靠的调节。不同的供油装置采用不同的 A/F 调节方式。试验要求 A/F 在 13.0～16.0 内连续可调，且要求发动机工作比较稳定。在

汽车论坛 http://www.qclt.com

理论空燃比 $A/F=14.7$ 附近的波动控制在 ± 0.2 之内。

c. 催化剂入口温度 T_i 的控制

催化剂入口温度 T_i 的控制一般有两种方法：一是改变发动机的负荷来改变 T_i，但是这时 SV 和 A/F 也会发生变化；另一种是改变排气系统散热量来改变 T_i，这种方法比较常用。依据试验要求的上下限温度进行热换算可设计一套可调式排气换热，如图 3-1-40 所示，通过调节阀 1 和阀 2 调节冷却水流量，可使 T_i 在 140℃～520℃之间改变，而每个试验点的温度漂移不大于 ±3℃。

d. 空速 SV 控制

空速 SV 可通过进气流量来控制 Q_a，当确定 SV 后可如下估计：

$$Q_a = m\left[1+\frac{1}{(A/F)_s}\right] \quad (\mathrm{kg/h})$$

式中：$(A/F)_s$——理论空燃比；

m——排气质量流量，kg/h。

$$m=\frac{SV_s V_i}{10\,000}\times\rho_0 \quad (\mathrm{kg/h})$$

式中：SV——空速，h^{-1}；

V_i——催化剂容积，L；

ρ_0——标准状态下的排气密度，kg/m^3。

在空速特性试验时，通过调节两路排气支管的节流阀可调节流经两催化转化器的排气流量。根据发动机进气流量 Q_a 和催化剂下游的流量计的读数可求得空速 SV。对不同的催化转换器进行老化对比试验时，通过上述调节也可保证两催化转换器流量的均匀性，可保证两催化转换器具有相同的试验环境。

e. 老化高温的实现与控制

一般催化转换器的快速老化试验要求催化转换器的入口温度能达到 700～900℃，而且能连续运行 100h。显然，仅凭发动机的高速负荷运行很难保证这一点，况且高速大负荷长时间运转容易造成发动机损坏，故本试验装置采用向发动机中等负荷供浓混合气，同时向排气管中喷入二次空气如图 3-1-40 所示，以产生二次燃烧反应热的方法，并对排气管采用保温措施来实现老化高温。

应该指出的是，增加二次空气并不是总能提高排气温度，这取决于加入的二次空气自身吸热量与反应热量之间的平衡，实际上升温效果随排气量、排气流量、A/F 以及加气点的位置等因素而变。因此，试验中要对上述影响因素进行优化。

3）垫层

（1）产品和工艺关键质量控制点的参数要求，检测方法及关键检测设备

①陶瓷密封垫性能试验项目

◆垫层热膨胀试验（TMA）

◆压缩力和抗张强度试验（MTS）

◆纵向推力试验

◆工作环境模拟试验（RCFT）

◆气流腐蚀试验（热、冷气流腐蚀）

◆气密封试验

●在线垫层膨胀力试验

●壳体变形试验

◆发动机试验系列

◆热振动试验

●进水熄火试验

◆温度试验

●壳体变形试验

●加速腐蚀试验

●材料综合分析试验

2. 陶瓷密封垫整体性能评估试验方法

a. 环境模拟温度试验方法及设备

因为催化转换器的钢壳体与陶瓷载体的热膨胀系数相差 10 倍左右，两者之间的间隙会随着温度的升高而加大，从而影响陶瓷密封垫的固定和保护作用。所以，评估陶瓷密封垫产生的膨胀力随温度变化而变化的关系是非常重要的。特别是在高温时，陶瓷密封垫必须通过膨胀产生的足够的压力来固定陶瓷载体和保护金属壳体。否则，压力过低，会导致尾气泄漏，净化率降低，并且失去保护作用，车辆行驶时的振动和冲击会损坏载体和壳体。

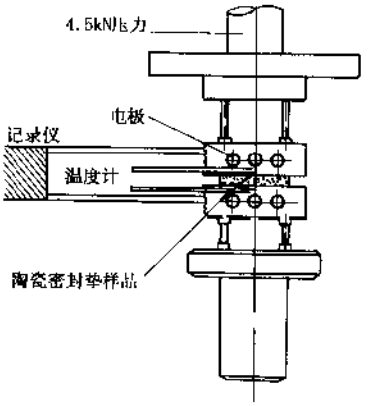


图 3-1-41 环境模拟试验

如图 3-1-41 为环境模拟试验装置，3M Interam™ 100，3100g/cm²陶瓷密封垫（充填密度为 1.0g/cm³）的试验结果如图 3-1-42 所示，陶瓷密封垫在循环四次后，高温时（即壳体温度为 530℃，陶瓷载体温度为 900℃，保持 15min），其膨胀压力保持在 550kPa（约 5.7kg/cm²）以上。

b. 在线试验方法及设备

在线试验是为了测试陶瓷密封垫在催化转换器运行时，其膨胀所产生的压力变化情况。尽管这个试验只是测试催化转换器上一小块地方的压力，但是可以反映整个陶瓷密封系统的情况，可以为催化转换器的设计和使用提供有用的数据。如图 3-1-43 为在线测试仪的示意图。

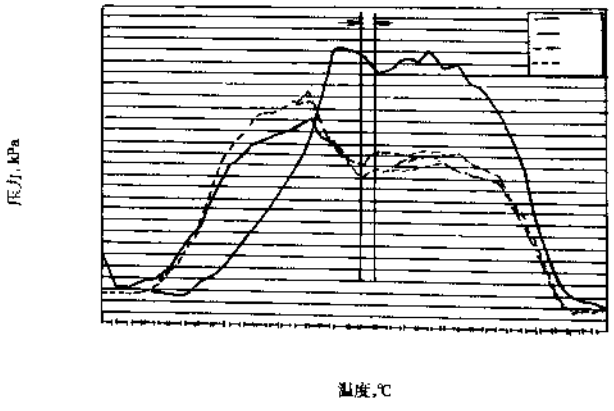


图 3-1-42 3M Interam™100，3 100g/cm² 陶瓷密封垫的环境试验结果

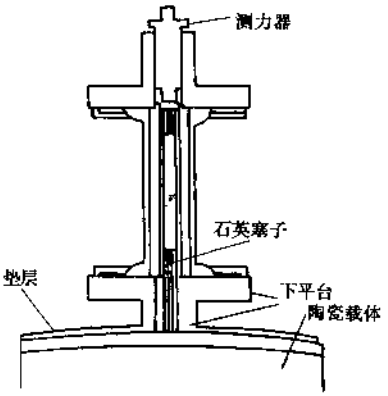


图 3-1-43 在线测试仪的示意图

试验的基本步骤如下：

◆装配之前，在壳体上钻一个小孔，把在线测试仪的底座焊在壳体上。

◆装配之后，再把测试仪的其它部件与底座相连，并使石英棒的石英塞子与陶瓷密封垫贴紧。

◆通入天然气燃烧提高温度，控制进气温度最高到 1025℃，保持 20min，再冷却 20min，然后进行循环测试。

●记录循环中膨胀力的情况。

③耐腐蚀试验方法及设备

陶瓷密封垫的寿命取决于以下四个外界因素：

◆壳体变形 间隙增加会减少陶瓷载体的充填密度，降低陶瓷密封垫使用寿命。

◆散热情况 积累的热量会增加壳体的变形，降低陶瓷密封垫使用寿命。

◆催化转换器的工作位置　离排气口热气越近，陶瓷密封垫的腐蚀越严重。

◆不规则气流冲击　不规则尾气会使陶瓷密封垫局部温度过高。

可以通过试验来模拟尾气的腐蚀，通过加速气流腐蚀试验来评估陶瓷密封垫综合耐腐蚀性能，试验装置如图 3-1-44 所示。

①发动机试验系列

为了动态地检验、评估和研究开发陶瓷密封垫，发动机试验系列是必不可少的。在发动机的试验台架上可进行各种的环境模拟试验如热振动、壳体变形、高温、进水熄火和加速腐蚀等试验，为实际应用提供各种必备的数据及参数。

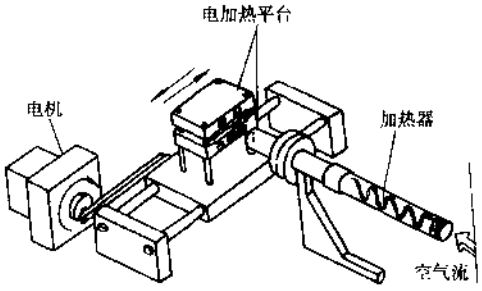


图 3-1-44　耐气流腐蚀试验示意图

除了以上的试验外，还可以根据不同的应用情况，进行如纵向推力试验、壳体变形的气密封试验等，来评估陶瓷密封垫整体密封性能。

4）触媒转化器产品和工艺关键质量控制点的参数要求、检测方法及关键检测设备

触媒转化器在装配过程中和装配完毕后须对其进行一系列的质量控制：

（1）轴向推力试验

对触媒转化器的催化剂载体施加一定的轴向推力，检查催化剂载体的轴向位移。试验时，轴向推力一般采用 1 500N 左右，如载体的轴向位移大于 6mm 或有严重破坏时，触媒转化器被认为不合格。

（2）冷态振动试验

将触媒转化器纵置安装在冷态振动试验台上，试验在一定的振动加速度和一定的频率下持续 3h，然后检查催化剂载体的轴向位移。试验时，分别按 10g、15g、20g 的加速度，50Hz、100Hz 振动频率进行振动 3h，如载体位移大于 6mm，并伴有粉末脱落下来，就认为触媒转化器不合格。

（3）热寿命试验与水急冷试验

将转换器安装在水急冷固定架上，并使触媒转化器与发动机相连，发动机过量空气系数为 1±0.05，排气空速（48 000±240）h^{-1}，另外将一空气泵通过旁通阀与转换器相连，调整水压调节器，使得在水流动情况下得到（172±14）kPa 的压力，按表 3-1-24 循环进行试验。

表 3-1-24　热寿命试验与水急冷试验循环表*

时间(min)	排气状态	空气状态	水状态	空速/流量
2(冷)	关	开	关	空气流速(48 000±240)h^{-1}
5(热)	开	关	关	排气空速(90 000±45)h^{-1}
25(急冷)	开	关	开	水量为(10±1)L/mm
10(加热)	开	关	关	排气空速(48 000±240)h^{-1}

* 共执行 20 循环，以上水温和空气温度均为室温。

按以上循环方式及试验条件试验，如出现壳体、载体等破裂，则认为触媒转换器不合格。

（4）水平热振动试验

将触媒转化器水平安装在热振动试验台上，并使触媒转换器与发动机相连，发动机过量空气系数 λ 为 1±0.05，排气空速（48 000±240）h^{-1}，转换器出口处（距载体 40mm）排气温度（700±10）℃，振动条件为加速度（28±3）g，振动频率为（100±5）Hz，试验运行 5h。如载体位移大于 6mm，并伴有粉末脱落下来或载体裂缝，就认为触媒转化器不合格。

（5）纵置热振动试验

将转换器垂直安装在热振动试验台上，并与发动机相连。发动机工况同水平热振动试验工况，试验持

汽车论坛 http://www.qclt.com

续3h. 试验时，振动试验台使触媒转化器以28g、100Hz振动，发动机过量空气系数 $\lambda = 1 \pm 0.05$，排气空速48 000h^{-1}，排气温度700℃左右，试验进行3h后检查触媒转化器载体的轴向位移和外观，如载体位移大于6mm，并伴有粉末脱落下来或载体裂缝，就认为触媒转化器不合格。

以上共有5项试验，每进行一项试验以后，需要检查触媒转化器中载体的轴向位移，是否有明显的破损，触媒转化器总成的气密性等项目。如经以上五项检验合格，则认为触媒转换器包装合格。(撰稿人：王诗恩)

3.1.11 增压器

增压发动机所用的增压器有机械增压器和涡轮增压器两种。前者的动力直接取自于发动机的曲轴；后者则以发动机排出的废气为动力。

对于涡轮增压器，根据发动机排气进入涡轮方向的不同，又有轴流式、混流式和径流式之分。在汽车工业中，车用增压器基本采用径流式涡轮增压器（以下简称为涡轮增压器）。

涡轮增压器（如图3-1-45所示），主要由涡轮壳、中间壳、压气机壳和转子等几个主要部分组成。

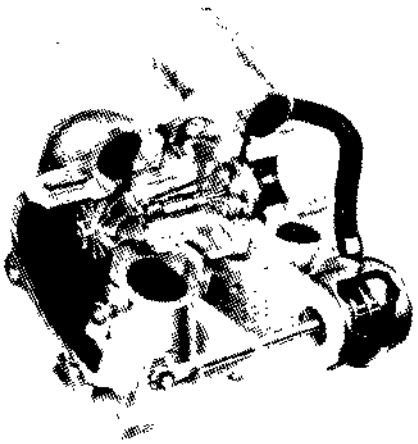


图3-1-45 涡轮增压器

3.1.11.1 涡轮壳

涡轮壳由铸件毛坯经机械加工而成。

铸件毛坯的生产主要采用普通的砂型铸造和壳型砂铸造两种方式。

涡轮壳（如图3-1-46所示）的作用是将发动机排出的高温废气加速并均匀地导入涡轮，所以涡轮壳应采用耐高温材料铸成，根据涡轮工作温度的高低，可分别选用中硅耐热球铁、高硅耐热球铁、合金球铁或高镍耐热球铁。

涡轮壳的加工一般采用单机、自动线或加工中心。对大批生产，则多采用加工中心和自动线。

对于某些应用情况，为了降低涡轮壳与涡轮叶轮之间的间隙以提高涡轮级的效率，可在涡轮壳的子午型线部分涂敷一层可擦合金。

3.1.11.2 压气机壳

压气机壳由铸铝毛坯经机械加工而成，如图3-1-47所示。

毛坯的铸造可分为普通砂型铸造、壳型砂铸造或压力浇铸。

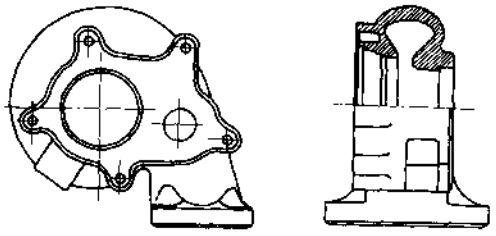


图3-1-46 涡轮壳

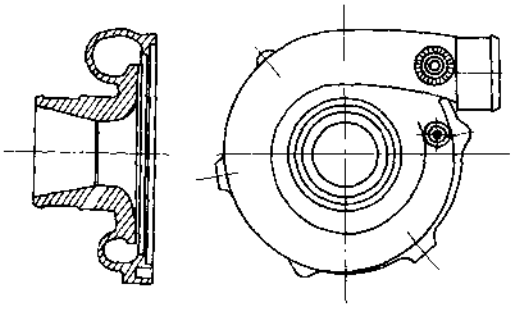


图3-1-47 压气机壳

机械加工的工序和所采用的设备，基本上与涡轮壳加工相同。三坐标仪是最主要的检测手段。

3.1.11.3 中间壳

中间壳是由灰铸铁铸成的毛坯经机械加工而成。

由于中间壳的作用是连接涡轮和压气机的二个端壳，并与滑动轴承、推力轴承及转子叶轮一起组成“中间壳及转子总成”，所以形状复杂、尺寸多、精度要求高，如图 3-1-48 所示，轴承孔须经珩磨加工。

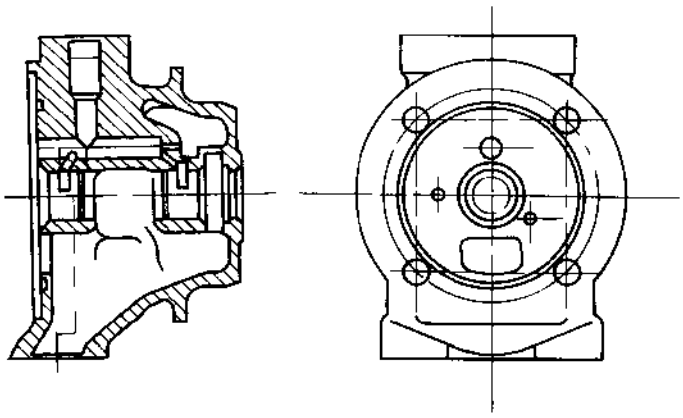


图 3-1-48 中间壳及转子总成

3.1.11.4 涡轮转子总成

涡轮转子总成（如图 3-1-49 所示）是由涡轮叶轮和轴两部分组成。

涡轮叶轮是由耐热耐蚀的镍基合金用失蜡浇铸法浇铸而成，适合大批量生产。根据涡轮在不同类型发动机上工作温度的不同，应选用不同的叶轮材料。

轴的材料为合金结构钢，通常有普通棒材和锻材两种。

涡轮叶轮和轴是采用摩擦焊或电子束焊而焊接在一起的。焊接件在经过高频退火去应力之后，还需经过对轴的成形车削、磨削及对叶轮的磨削等工序，才能完成转子总成的加工。

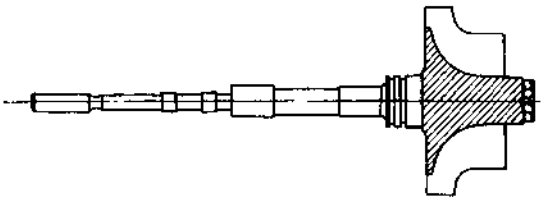


图 3-1-49 涡轮转子总成

由于转子总成在增压器内是以极高的转速旋转，所以对动平衡的要求很高。除了一般的动平衡外，有的厂家，如 GARRETT 还对小型增压器用专有设备对“中间壳及转子总成”进行整体动平衡。通过进一步提高动平衡精度来控制增压器工作时的振动水平。动平衡可通过在涡轮叶轮的背面、叶顶和轮壳处去重来实现。为保证叶轮强度，避免应力集中，去重的部位和形状大小应按专门技术文件的规定进行。

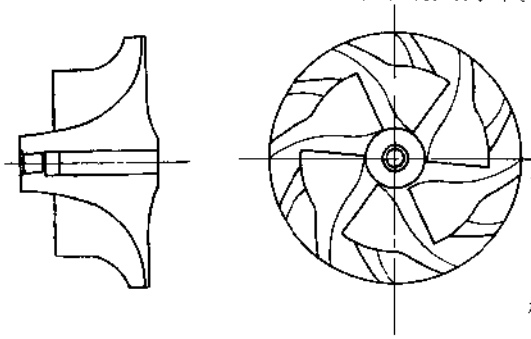


图 3-1-50 压气机叶轮

由于对转子总成的精度和粗糙度的要求较高，生产中须采用投影仪、粗糙度爬行仪、三坐标仪以及专用的数显量具对尺寸和粗糙度进行检测和控制。

3.1.11.5 压气机叶轮

压气机叶轮（如图 3-1-50 所示）由叶轮毛坯经机械加工而成。

叶轮毛坯通常以铸铝为原料，采用石膏模浇铸而成。制造石膏模所需的橡胶模，可以采用铜模法、橡

汽车论坛 http://www.qclt.com

胶模法或环氧树脂模法获得。

叶轮的加工、大批量生产，多在加工中心上进行，包括车背面、钻孔、车曲面、动平衡及清洗等工序。生产中须采用投影仪、气动量具等检测工具对叶轮的子午型线、轴孔等关键尺寸进行控制。

（撰稿人：周恒悦　赵嘉鼎）

3.1.12 蓄电池

3.1.12.1 概述

在各种车辆中用于起动、点火和照明的蓄电池为铅蓄电池。根据电池在使用中的维护情况又分为汽车用蓄电池和铅钙式免维护汽车用蓄电池。与汽车中的其它电气部件不同，蓄电池是通过电化学作用释放电能，容易受到环境温度、汽车行驶状态及道路等条件的影响。

铅钙式免维护起动用铅酸蓄电池为国际上最新一代的汽车蓄电池，具有起动性能高、使用寿命长、自放电小、存放期长、无污染、无腐蚀、安全可靠、使用方便等显著优点，并在整个使用过程中无需加水、无需维护，从而极大方便用户的使用。国内起动用铅酸蓄电池的技术条件可参见 GB3500B 起动用铅酸蓄电池技术条件。

3.1.12.2 结构

汽车用蓄电池一般由正极板、负极板、隔板、电池槽、电池盖、汇流排、极柱、端柱和电解液等构成，而铅钙式免维护蓄电池则在上述结构上增加了顶盖、密度计和阻燃片等零件。

1）正极板和负极板

极板一般由两部分组成，其一是铅合金制成的格子板，统称为板栅。板栅是活性物质的载体，并在充放电过程中起到传导电流的作用。其二是多孔膏状物体，统称为活性物质。正极板的活性物质主要是 PbO_2，负极板的活性物质主要是海棉状铅。活性物质通过参与电化学反应而起到释放或储存电能的作用。

汽车用蓄电池的板栅是由铅锑合金浇铸而成，而铅钙式免维护蓄电池的板栅则由铅钙合金制成。其过程为：首先将铅钙合金铸成合金板，碾压成合金带再经扩展成为多孔板栅，该板栅具有晶粒细化、致密、无夹渣等优点，从而制成的电池自放电小、抗腐蚀性能好和使用寿命长。

2）隔板

汽车用蓄电池所使用的隔板一般为橡胶、聚氯乙烯和玻璃纤维复合式隔板，而铅钙式免维护蓄电池的隔板则为聚乙烯的袋式隔板。该隔板具有电阻低、强度好、耐腐蚀等优点，从而大大提高了电池的起动性能，有关各种隔板的技术要求在 JB/T7630 中有具体规定。

3）电池槽和盖

铅蓄电池的电池槽、盖一般都由聚丙烯复合材料注塑而成。该材料具有耐热、耐冲击、质量轻、易成形等特点。有关电池槽的技术要求在 JB3076 中有具体规定。

铅钙式免维护蓄电池的电池槽，在其中心隔的两侧都设计有弹性筋条，能紧紧地固定极群组，从而极大地提高电池的抗振动能力。

4）电解液

电解液是用纯化水稀释浓硫酸而制成的。汽车用蓄电池在完全充电时，其电解液的相对密度一般为 1.280 或 1.260。浓硫酸的技术要求参见 HG/T26920 蓄电池用硫酸行业标准。

5）密度计

铅钙式免维护蓄电池都配有密度计，该密度计可简便直观地显示电池的荷电状态。当密度计显示绿色圆点时，电池可直接使用；显示黑点时，电池须立即充电；显示淡黄色时，该电池需要更换。

6）阻燃片

免维护蓄电池在其电池顶盖都安置阻燃片。其作用是既允许电池内的气体向外逸出，又防止火星或明火进入电池内部而引起的电池爆炸。

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.1.12.3 制造工艺

免维护蓄电池的主要原材料为纯铅、铅钙合金、聚丙烯和硫酸。一般先将铅钙合金和纯铅熔化后制成铅带，经扩展成为极栅。同时将纯铅加工成铅粉和硫酸、添加剂等混合成铅膏，将铅膏涂在极栅上经固化形成生极板。将生极板配组后装入由聚丙烯注塑而成的电池槽中，再经充电就形成电池。在整个生产过程中都配备了自动在线检查和人工离线检查，从而保证了产品的制造质量。

3.1.12.4 充电装置（交流发电机）

交流发电机是汽车上的供电装置，以保证起动电机、车灯、空调等的用电需求。交流发电机主要由转子、定子、前后端盖、电压调节器、整流器以及皮带轮等零部件组成。目前内装双风叶发电机以其结构紧凑、散热好、安全可靠等优越性逐渐取代了外装风叶发电机。

1）转子

内装风叶发电机转子主要由爪极、磁轭（也有带磁轭的爪极）、线圈、轴、集电环、上下风叶等组成。从工艺的角度看，爪极的加工是比较困难的，它的传统制造方式为失蜡浇铸成形，但由于这一工艺工序繁杂、工件变形大、组织疏松、强度低、噪声大，因此，国内外发电机制造商已逐渐用模型锻造、冷挤压等先进工艺取代。根据工艺不同，模锻、冷挤压前的坯料有棒料和中厚板料两种，相应的设备则为锻压机和大吨位的油压机或多工位冲床。目前，一些高水平的专业工厂已能够通过近十道锻、挤加工，直接达到爪极各档尺寸要求，而无需进行切削加工。

转子中的集电环也是一个工艺较为特殊的零件，由于集电环外径越小，对延长电刷的寿命越有利，因此，直径小、质量可靠、工艺性佳的集电环自然成了研究的课题。目前有两种工艺使用得比较多：一种是转子轴、上下集电环整体注塑；另一种是将集电环先注塑成形，然后再压入开槽的转子轴。两种工艺各有利弊，至于上下环与引出线的焊接，一般都采用超声波焊机或储能焊机。

在内装双风叶转子的制造过程中，双风叶的不等分变薄叶片的冲制和焊接质量至关重要，焊接设备一般为大功率的交流焊机或储能焊机，每端6～12点一次焊接，也有数控或手动回转单点焊接的，这样焊机的功率可大大下降，但生产效率也会有所下降。为控制焊接质量，应经常对各焊点进行拉力破坏试验，同时要确保风叶外径和高度尺寸以防止与定子或端盖擦碰。转子的绝缘处理一般都采用液浸方式，应通过对绝缘漆的粘度和设备温度的控制来保证转子的挂漆量和漆的渗透性，以确保转子的绝缘性能，防止线圈与磁轭在电机工作时发生松动。转子绝缘处理后的极爪和集电环的车削一般都在通用的普通车床、数控车床上完成，但为消除中心孔与轴承档的跳动影响，做到工艺基准与设计基准、安装基准重合，则应该以转子的前后轴承档为基准来车削爪极和集电环外圆，这类以摩擦带为动力的专用车床已在国内外工厂中部分地得以应用。由于发电机的转子工作转速较高，因此，动平衡的校验也是必不可少的。

2）定子

交流发电机的定子主要由铁心、线圈、槽绝缘等组成，铁心有硅钢片或低碳优质冷轧钢板叠压焊接而成，按工艺不同可分三种，即整片冲制叠焊、三片扇形冲片交错叠铆和窄带冲切卷叠焊接，依次工艺复杂程度加大，而材料利用率大大提高，故后二种工艺更适合于大批量的生产，以节约钢材。定子的槽绝缘有二种比较典型的工艺，即环氧涂覆和绝缘纸成形嵌入，相比之下，环氧涂覆所允许的嵌线槽满率较高一些。定子的绕嵌线根据工艺设备不同，可分为同心式和波绕式，后者使用更广泛。

3）前后端盖

交流发电机前、后端盖为了防止漏磁均采用铝合金压铸成形。由于其轴承孔、止口精度、同轴度要求高，各安装挂脚孔相对位置度也有相当要求，故端盖的加工已逐步从传统的车削后用钻模逐个钻孔发展为由高速加工中心一次完成切削或由带Z轴的车削中心加工轴承孔、止口、铣削平面，立式加工中心完成各孔的钻攻。而国外的一些大型企业，由于其规模大、产量高，上述工艺在效率上远不能满足需求，因此都配置了高效多工位加工流水线，实现了自动化，端盖日产量达10 000台套以上，且能根据不同产品的需求，在20min内完成工艺装备的更换。

汽车论坛 http://www.qclt.com

4）电压调节器和刷架装配

电压调节器总成由刷架、电刷、电压调节器及一些小零件组成，传统的工艺是电刷架由热固性塑料压塑成形，铆上连接片、电压调节器，再锡焊电刷架各点。由于热固性压塑生产效率低、劳动强度大，现已开始被热塑性或热固性注塑所取代。后者成形周期短，一模可注多件，效率大为提高，而且一些连接线路片亦可直接作为嵌件注入刷架中，减少了短路的机会。调节器引脚的焊接也逐渐由锡焊向接触焊改变，提高了焊接可靠性。

5）整流器

整流器总成主要由二极管、散热板、线路板等组成。传统的产品中，线路板大多是外露的，与二极管引脚的焊接多采用锡焊，由于表面氧化等原因，很容易造成虚焊，随车振动后出现断路。因此在一些新产品中均已采用接触焊来取代锡焊，数控自动焊机也已得到了应用。另外，线路板、连接片也在注塑时注入其中，减少短路机会。

6）总成装配

交流发电机的装配并不很复杂，需要配置一些气动或手动压床，尽可能地采取一些防错装置，各连接部位的螺栓、螺母的扭矩要受到控制，最好能使用电动定扭扳机，以保证拧紧力矩的可靠，防止振动后松脱。国外的一些大公司因其产量非常高，发电机的装配已实现自动化，紧固件的传送、零部件的抓取装配均采用机械手作业。在产品出厂前，发电机的输出电流、电压调节器的调压功能等性能要求必须全检，并尽可能配备噪声测试装置。皮带轮、端盖挂脚孔等与主机厂安装相关的一些要素，也要进行检测控制，以保证主机厂的装配顺畅。（撰稿人：陈延祥）

3.1.13 火花塞

3.1.13.1 概述

火花塞是汽油发动机点火系统中关键的零部件。火花塞的性能在很大程度上决定了汽油发动机能否达到最佳的工作状态及能否可靠的运转。

火花塞的作用是将脉冲电压转变为电火花点燃发动机气缸内经压缩的可燃混合气，燃烧后产生的爆发力推动气缸内的活塞，连结曲轴驱使发动机运转。

3.1.13.2 火花塞的结构

火花塞由绝缘体、壳体、中心电极、侧电极、外垫圈等零部件组成，见图3-1-51。

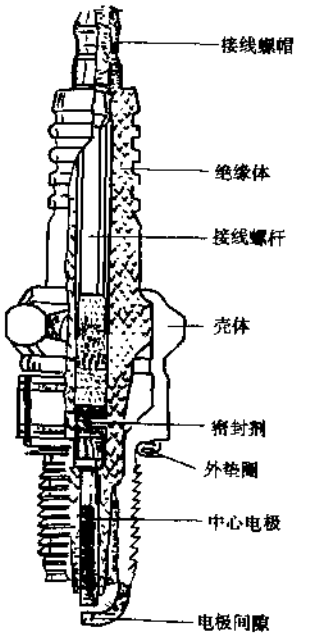


图3-1-51 火花塞

3.1.13.3 火花塞各零件的制造方法

1）绝缘体

绝缘体的材料主要是高氧化铝，制造工艺有热压注成形工艺和等静压磨削成形工艺两种。热压注成形工艺因工艺落后、质量差，逐步淘汰。当今世界上先进的规模大的火花塞制造厂均采用先进、高速、高质量的等静压磨削成形工艺。

绝缘体制造工艺方法：

配料 → 球磨 → 搅拌 → 喷粉 → 等静压 → 烧成 → 上釉 → 釉烧

绝缘体制造工艺关键在喷粉、等静压磨削成形及烧结工序。喷粉是使用喷雾干燥设备，经搅拌后合格的浆料用泵打入喷雾干燥塔内，制造出有一定颗粒级配的粉料，合格的粉料再由等静压磨削成形机用较高的油压使粉料成为有一定机械强度的柱形棒料，再由砂轮磨削成所需要的绝缘体的形状，再经1630℃左右的高温烧结成瓷，这时绝缘体有了很高的机械强度及高的耐电压电气性能。

2）壳体

壳体是用钢材制造，制造工艺有车削成形工艺及冷挤压成形工艺。车削工艺一般是由多轴自动车床用所需要的六角棒料经多工位切削而成，这种工艺材料利用率低，一般只有30%左右，材料浪费大，成本高，壳体机械强度低。冷挤压成形工艺是无切削加工，材料利用率很高，壳体粗糙度、机械强度及生产效率均高于车削成形工艺。当前世界上大的火花塞制造厂及我国的南京华德火花塞有限公司均采用冷挤压成形工艺制造壳体。

壳体车削成形制造工艺方法：

六角棒料 → 多轴车削 → 清洗 → 碰焊 → 滚丝 → 表面处理 → 入库

壳体冷挤压成形制造工艺方法：

圆料 → 冷挤压 → 二次加工 → 清洗 → 碰焊 → 滚丝 → 表面处理 → 入库

壳体后道工序的侧电极焊接及滚压螺纹生产工艺有手工生产和自动生产两种工艺，自动设备生产的产品质量、生产效率大大高于手工设备生产的产品。壳体表面处理目前有镀镍、镀锌及发黑等不同的表面处理工艺。

3）中心电极

中心电极是火花塞非常重要的零件，通常都用含镍量很高的镍基合金制造。现有全镍中心电极和镍铜复合中心电极，见图3-1-52。

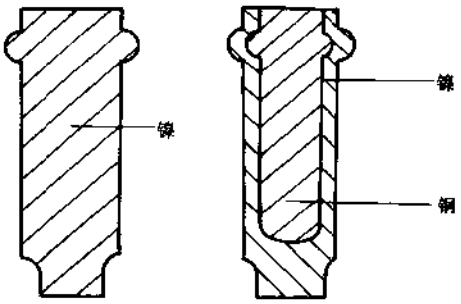


图3-1-52 中心电极

镍铜复合中心电极有更好的导热性能，提高了火花塞的热性能，现被广泛使用。但镍铜复合中心电极制造工艺比全镍中心电极复杂得多。目前镍铜复合中心电极有不同的制造工艺，现简单介绍两种制造方法。

方法一见图3-1-53，方法二见图3-1-54。

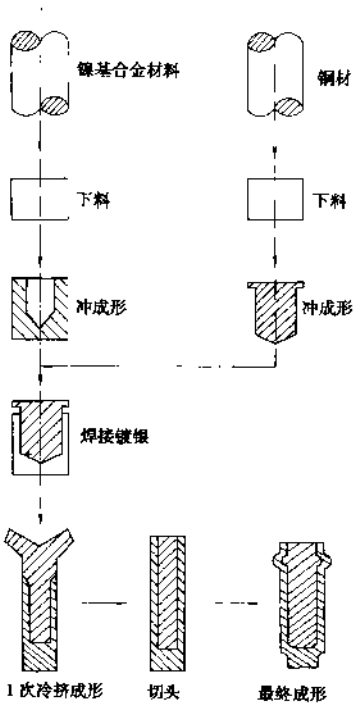


图3-1-53 火花塞中心电极制造工艺（一）

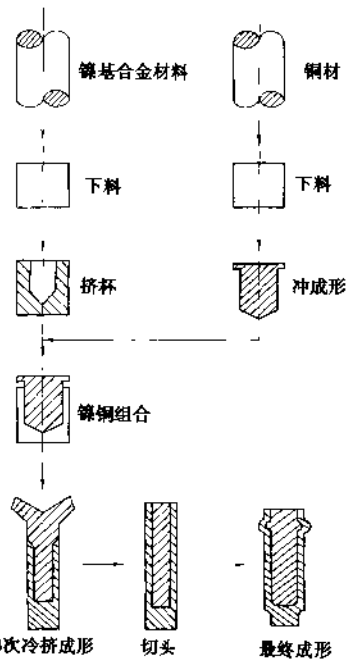


图3-1-54 火花塞中心电极制造工艺（二）

第一种制造工艺的产品质量优于第二种制造工艺，且自动化程度高，镍铜结合好，尺寸的一致性也

好，世界上先进的、有名的火花塞专业厂基本上采用这种制造工艺。

火花塞其他几个零件的制造工艺比较简单，就不一一介绍了。

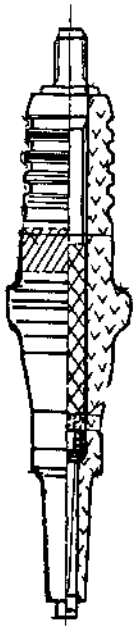


图 3-1-55 火花塞预装

3.1.13.4 火花塞的装配工艺

火花塞产品质量好坏，首先必须从设计上予以保证，设计先进、合理，尺寸、热值与相应发动机匹配，有了好的设计，零部件的制造精度高，完全满足设计要求，更重要的是要有优秀的装配工艺，确保火花塞具有优良的产品性能。

1）预装

预装是将绝缘体、中心电极、接线螺杆用导电、导热的密封胶牢固密封，形成一个绝缘体组件，见图 3-1-55。

绝缘体组件的预装工艺各国各厂都不同，先进的、规模大的火花塞厂都是用全自动的、具有多种检测工位的预装机，生产效率高，产品质量可靠；规模小的厂预装机设备手工操作多，工艺落后，生产效率低，产品质量低，性能不可靠，绝缘体组件质量不稳定，这种火花塞用在发动机上就很难保证发动机工况正常稳定。

2）总装

火花塞总装就是把预装好的绝缘体部件与已焊接好侧电极的壳体部件再加上内密封圈组合在一起予以装配牢，见图 3-1-56。总装决定了火花塞的密封性能。

总装工艺、工艺装备等也是因各国、各厂不同条件而不同，有的厂家总装自动化程度很高，产品质量在自动线上进行自动检测，产品质量高，可靠性好；有的厂家总装工艺很落后，多为人工操作，当然就是效率低，质量难以保证。

随着汽油发动机技术不断发展，对火花塞的品种、性能等要求愈来愈多，愈苛刻，火花塞制造工艺肯定愈来愈先进，产品质量愈来愈可靠。

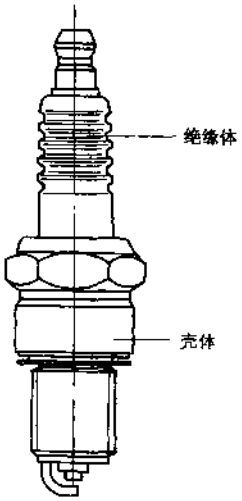


图 3-1-56 火花塞总装

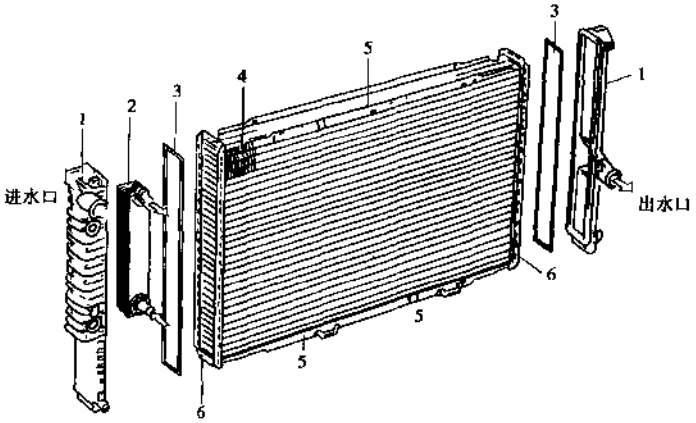


图 3-1-57 散热器构造

1-水室（塑料）；2-油冷却器；3-橡胶密封垫；4-芯部；5-侧板；6-主片

（撰稿人：汪恩荣）

3.1.14 散热器

3.1.14.1 概述

随着汽车工业的迅速发展及各国对环境保护的重视，一系列法规相应出台，对散热器的使用条件越来越苛刻，致使散热器向轻型、高效、经济方向发展。

散热器是水冷发动机冷却系统中重要的组成部分，见图 3-1-57。它是一种将发动机水套内冷却液所携带的多余热量，经过二次热交换过程，在外界强制气流的作用下向大气散发的热交换装置。

散热器按其冷却液流动方向可分为横流与直流二种。散热器主要由芯部和水室二大部分组成见图 3-1-58。就材质而言又可分为铜质与铝质二大类。

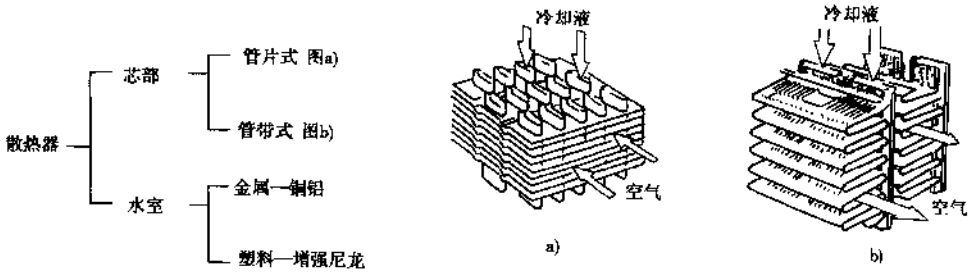


图 3-1-58 散热器组成
a) 管片式；b) 管带式

3.1.14.2 铜质散热器制造

铜由于其有良好的软钎焊性(Solding)，所以是散热器长期来惯用的材料。但铜软钎焊过程中必须用有腐蚀性的氯化锌作为溶剂来去除铜的氧化膜，从而使铜质散热器的制造工艺显得复杂，如图 3-1-59 所示。这工艺沿用至今，即使某些工序有所改进，如塑料水室的应用等，但仍免不了芯部制造中"溶剂处理"。

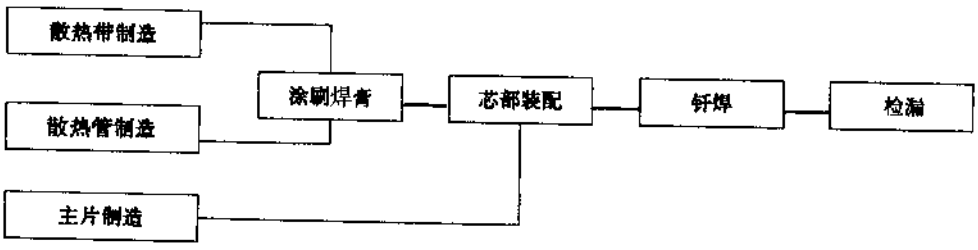
芯部钎焊炉按芯部进入钎焊炉内的置放状态可分为卧式与悬挂式二种。卧式适用于多品种小批量的管片式结构的铜散热器。悬挂式适用于管带式散热器。

炉内加热形式有电加热与燃气加热二种。系强制对流循环加热。

最近瑞典 Outo Kumpu 公司会同国际铜协会（ICA）、通用汽车散热器制造公司联合开发硬钎焊（Brazing）制造铜散热器的 Cupro Braze 的工艺。它使用一种无钎剂的焊接钎焊焊料，这焊料称之为"OKC600"的钎焊合金粉末为基础的膏状焊料。它可以以喷或刷涂方式敷到零件上。

由于使用这种膏状焊料就不存在（或很少）预清洗和后清洗处理这道工序，所以，使铜散热器制造工艺简单化，见表 3-1-25。

表 3-1-25 使用膏状焊料的铜散热器制造工艺



这种工艺类似于生产铝散热器的 Nocolok 工艺。据称"Cupro Braze"工艺可以在 Nocolok 钎焊炉内钎焊，

汽车论坛 http://www.qclt.com

从而扩大了 Nocolok 钎焊炉的应用范围。Cupro Braze 铜散热器成本比相应的铝散热器成本至少节约 10%。

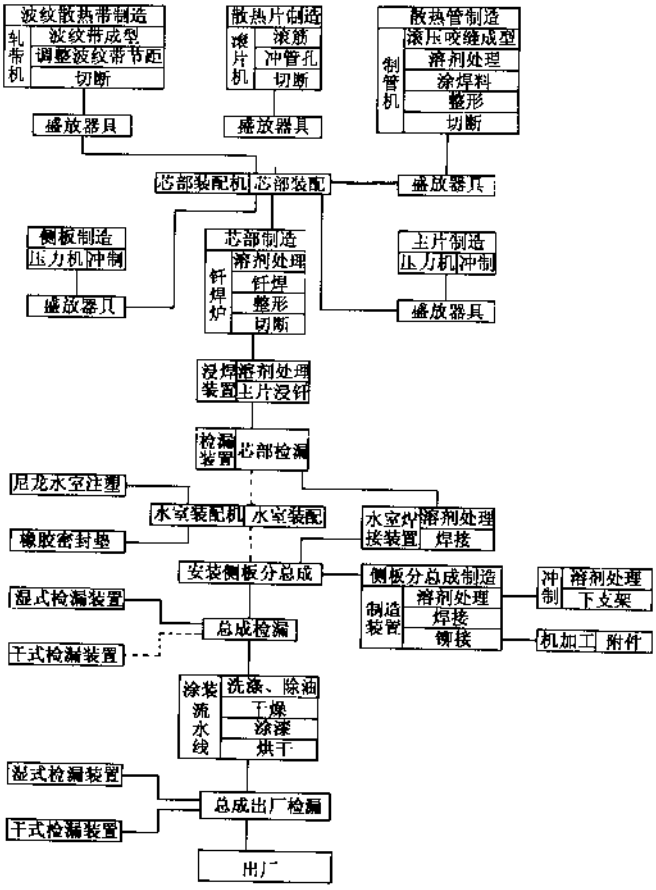


图 3-1-59 铜散热器制造工艺

3.1.14.3 铝散热器制造

铝散热器分两种结构的制造方式：

- 铝散热器
  - 钎接式
    - 有钎剂
      - 浸焊—如盐溶
      - 炉焊—Nocolok
    - 无钎剂
      - 真空焊
      - 惰性气体保护焊
  - 机械装配式
    - 圆管
    - 椭圆管
    - 扁平管

图 3-1-60 为机械装配式铝散热器。

铝在接触空气的瞬间会在其表面形成一层质地坚硬溶点又高于母体的氧化膜——Al_2O_3，氧化膜是钎接的一大障碍。

钎焊式铝散热器的发展实质上是环绕如何去除氧化膜进行钎焊的过程。图 3-1-61 是钎焊式铝散热器的制造工艺。

1）浸焊

早期汽车铝散热器的钎焊是以氯化物为钎剂，在溶融的盐浴炉中浸焊的。

此时氯化物既作为钎剂又是将散热器加热到钎焊温度的介质。所以在整个浸焊过程中会产生大量的腐蚀性气体污染环境。同时钎焊后依附在散热器上残余物清洗后的废水处理都是难以解决的问题，故此方法目前已很少采用。

2）真空焊

真空焊是无钎剂的铝散热器钎焊法，它由美国电气公司于1967年首先提出的专利。

真空炉内在镁（Mg）元素的参与下进行铝的钎焊。镁的存在无损于焊接强度，也不增加焊缝的腐蚀，更不需要复杂的预处理。

镁在真空炉内的作用首先是作为吸收剂，吸收炉内残余的氧。随后在高温中镁被气化与氧化膜（Al_2O_3）产生反应：

$$Al_2O_3 + Mg \longrightarrow 2Al + 3MgO$$

从而防止铝表面再形成氧化膜，使接合表面有良好的湿润性。

镁可以气体、固体形式进入炉内参与反应，也可以掺进铝的钎料包覆在铝合金外。如4045/3003/4045。

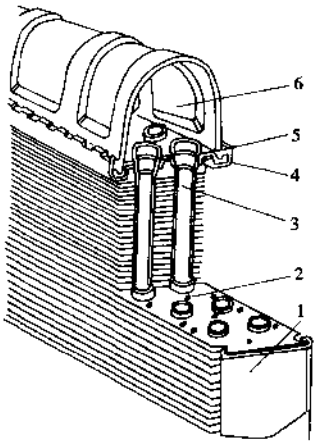


图3-1 60 机械装配式铝散热器
1-侧板；2-散热片；3-散热管；4-主片；5-橡胶垫；6-水室

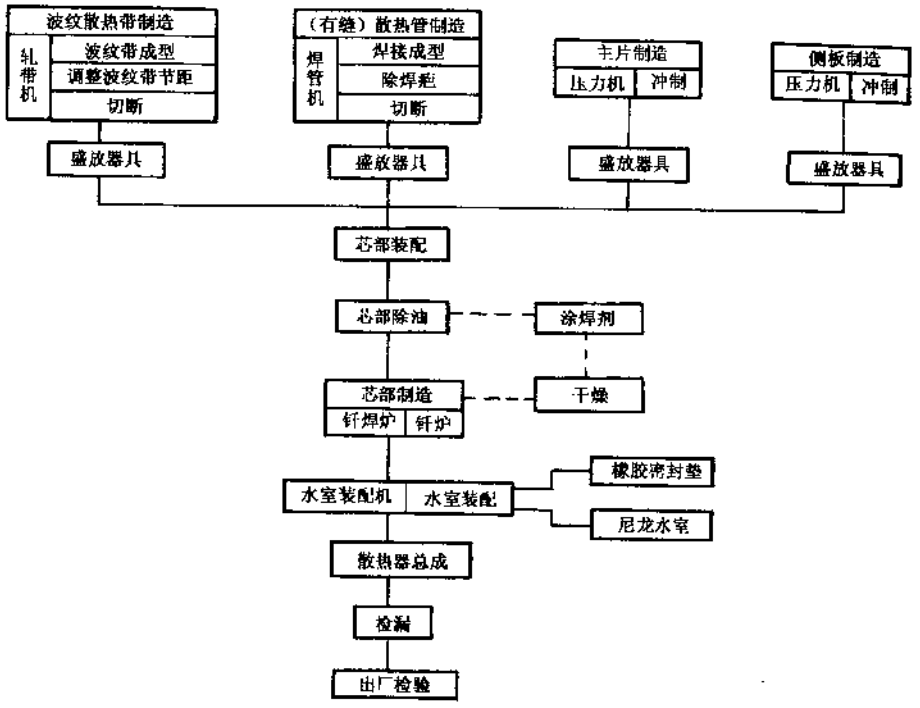


图3-1-61 钎焊式铝散热器制造工艺

真空钎焊由于无溶剂，故优点不少。还因为使用掺有镁的焊料包履层材料，从而简化了工艺如下：即

芯部装配 → 脱脂 → 炉内钎焊 → 冷却 → 检漏

图3-1-62是供批量生产用的真空钎焊炉。它是由传送带输送半连续式钎焊炉。作为主体由进料、准备、预热、钎焊、放热、取出等室组成。虽然真空焊简化了工艺，但由于下列缺点，所以在国内尚难推广。

汽车论坛 http://www.qclt.com

①低效率的辐射加热方式；

②维持钎焊所需真空度耗电量大；

③炉内氧化镁易沉积在热源上，影响热辐射能力及温度分布均匀性；

④铝合金于真空焊中易脱锌，影响抗腐能力；

⑤投资大。

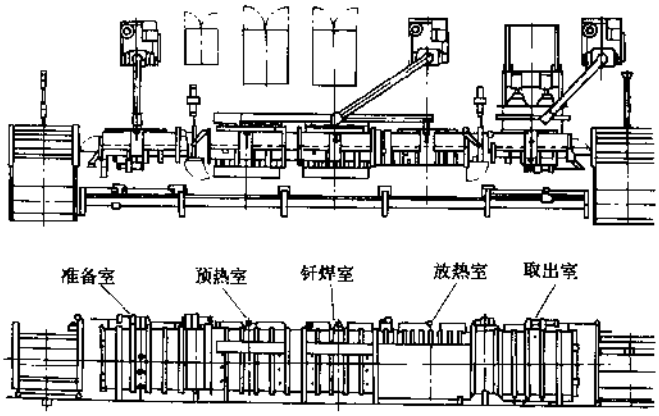


图 3-1-62 真空钎焊炉

3）Nocolok 法

Nocolok 法，是加拿大铝业有限公司于 1980 年研制成功的一种采用不吸湿、无腐蚀、熔点低于钎料温度的钎剂—氟铝酸钾的炉内铝钎焊方法。

Nocolok 钎剂是一种精细的白色粉末。主要是 $KF\text{-}AlF_3$ 混合物中的低共晶结合物 $K_3AlF_6\text{-}KAlF_4$。它具有很好的溶解氧化膜的能力，防止再氧化，并湿润部件焊接面，使填充金属利用毛细管作用自由地流入焊缝。

该溶剂经钎焊冷却后会形成一层厚度只有 1～2μm，既不吸湿、不溶于水、又无腐蚀性的残余物。它不必清洗且可起到防腐作用。故 Nocolok 钎焊工艺在铝交换器生产上得以迅速推广。上海等地已先后引进了多条 Nocolok 钎焊炉为 SVW、SGM 等厂配套生产热交换器。

图 3-1-63 是 Nocolok 钎焊炉的立体示意图，它较详细地描述了钎焊炉各区域的划分、功能、温度分布

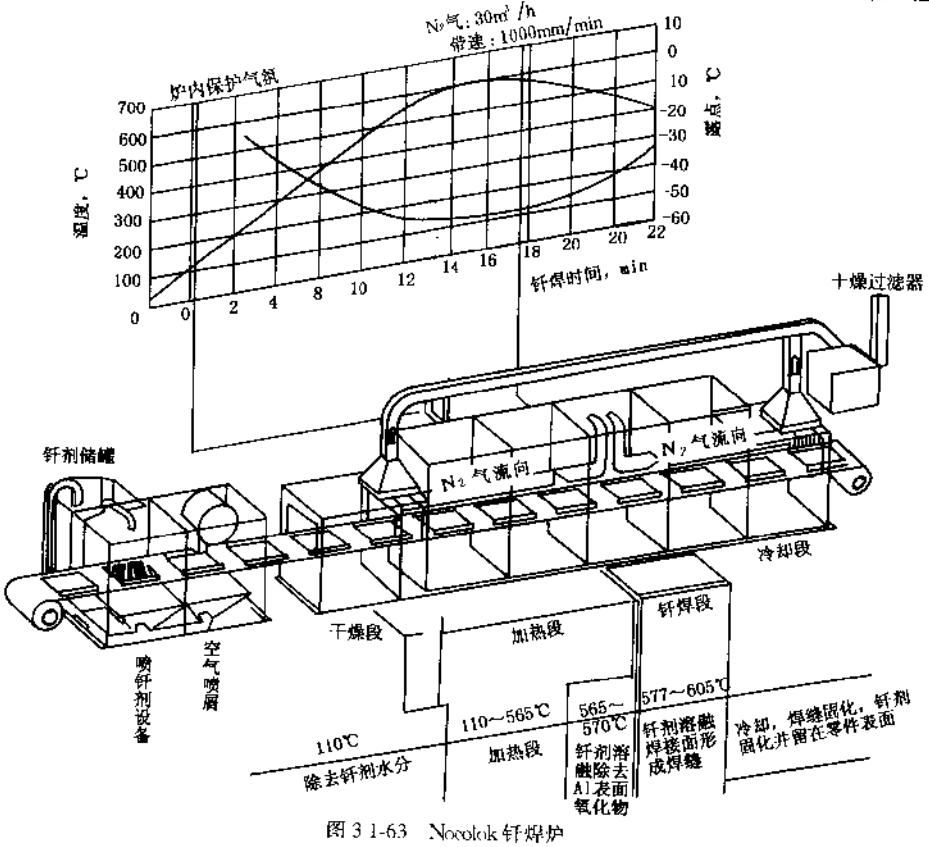


图 3-1-63 Nocolok 钎焊炉

及氮气露点分布曲线，从中可以看出当钎焊炉内 N_2 的露点温度＜－40℃，O_2 的浓度＜100ppm，加之合适的钎焊温度及钎剂用量时，即可获得最佳钎焊效果。钎剂用量以＜5g/m² 为佳。

钎剂是以水悬浮液的状态用浸渍、喷洒或涂刷等方法加到散热器上的。图 3-1-64 是典型焊剂喷涂系统，添加钎剂按排在“装配—固定—涂油”之后较好，可以减少需要添加钎剂部件的处理，减少钎剂溅落的相关问题，但它也有会在夹具中堆积钎剂的缺点。

由于 Nocolok 钎剂对含镁合金表面形成的镁氧化物的溶解有一定限度，会影响钎焊性能。故钎焊用铝合金中的 Mg 含量必须控制在＜0.5%以内。

4）机械装配式

机械装配式散热器是一种完全借助于机械（如顶杆）运动，将散热管的管径扩大以达到与散热片中的管孔紧密配合，然后再对管端进一步扩胀使之通过橡胶密封垫而与主片的管孔紧紧相配（图 3-1-65）。

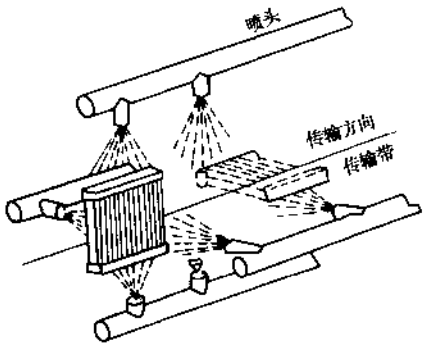


图 3-1 64 典型焊剂喷射系统

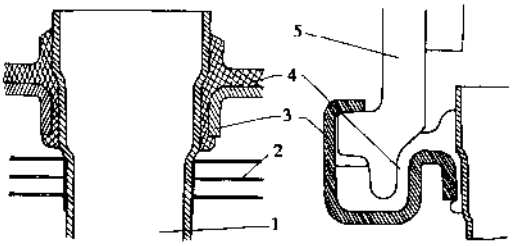


图 3-1 65

1-散热管；2-散热片；3-主片；4-橡胶密封垫；5-水室

由增强尼龙注塑的水室是通过与主片咬合中间衬以橡胶密封垫来达到密封性能的要求（图 3-1-65）。

由于无钎焊所以也就无污染，是绿色产品。它的制造工艺也就简单化了（图 3-1-66）。但平片散热片及其密集排列，致使该散热器的散热效率有限，风阻颇大，故只宜用于发动机排量低的轿车上。

3.1.14.4 散热器的构成件

1）散热管（Tube）

散热管是散热器热交换过程中承担首次热交换功能的热交换件。

散热管按其成形方式可分为：

散热管—┬有缝管—┬咬缝管
　　　　└焊接管—┬高频焊管
　　　　　　　　└激光焊管
　　　　└无缝管—钎焊镀层挤压管

（1）咬缝管（Lock Seam Tube）

铜质散热器用散热管大部分是选用呈扁平状的咬缝成形的咬缝管，见图 3-1-67。

自动咬缝制管机是制造咬缝管的专用制管机。它通常由开卷装置、成形、添加助焊剂、浸涂铅锡焊料、整形及切断 6 道工序构成。

图 3-1-68 所示的 10 个工序是在成形部分完成的，咬缝的紧密程度直接影响散热管的强度及气密性。咬缝缝隙是通过溶融的铅锡焊料槽，且渗入焊料的咬缝的成形方法决定了咬缝管低强度的弱点。材料厚度一般维持在 0.14 左右，水管长（a）宽（b）比 $L=9$ 左右。

汽车论坛 http://www.qclt.com

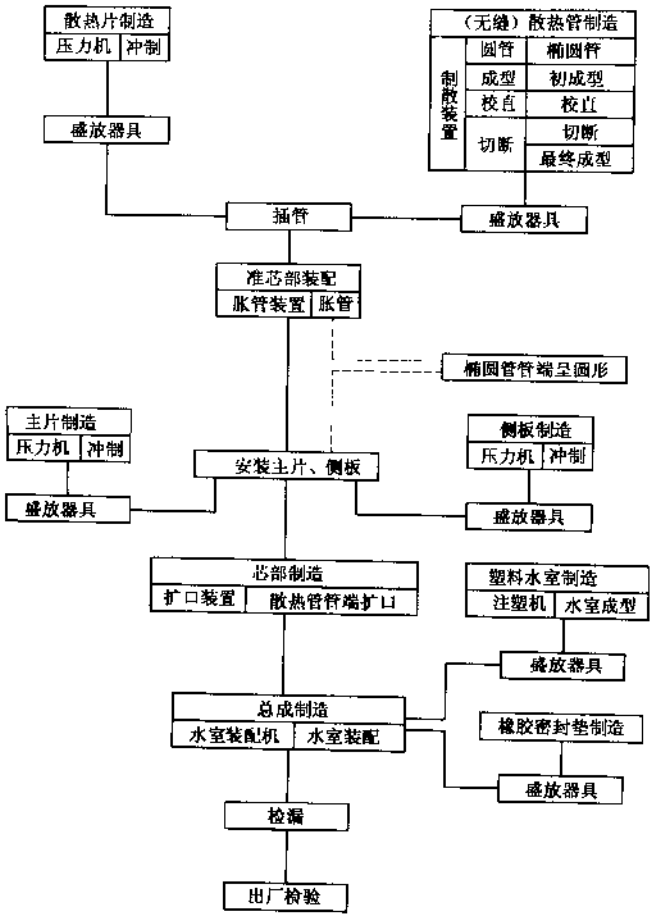


图 3-1-66 装配式铝散热器制造工艺

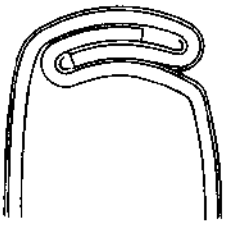


图 3-1-67 咬缝管

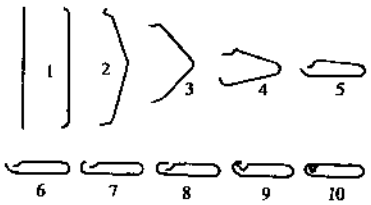


图 3-1-68 咬缝成形工序

(2) 高频感应焊管（HF）

高频感应焊管是利用高频对焊缝进行感应加热焊接的水管，高频感应焊制管机是制造高频焊管的专用制管机，见图 3-1-69。它主要是由开卷装置存料器、成形、焊接区、整形校直、涡流裂缝检测及切断等部分组成。

卷料开卷后进入成形部分时，材料与成形部分之间的直线度必须严格控制在最小范围内。虽然高频焊管用卷料对其宽度及横向弯曲度已有很高的要求。如果在成形前因直线度原因而使带料边缘产生类似于荷

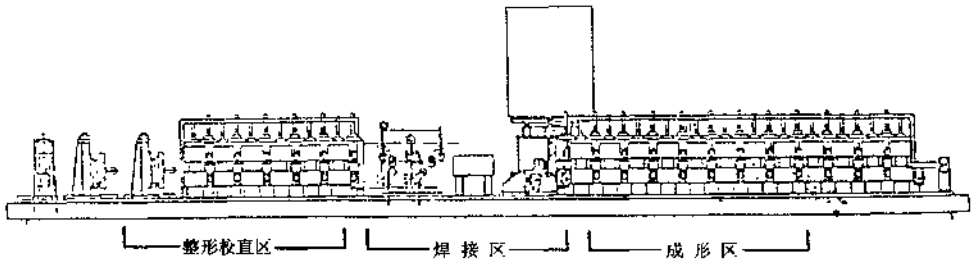


图 3-1-69 高频感应焊制管机（局部）

叶边的卷曲，这就直接影响焊缝的对接及焊缝的焊接质量。

从对接形式的焊缝成形看来，似乎比咬缝成形来得简单，如图 3-1-70 所示。

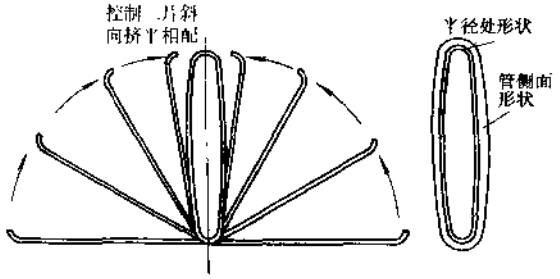


图 3-1-70 对接式扁平管一次成形

但焊缝成功的对接，除上述材料的精度，进入成形区前材料边缘状态外，成形辊轮的设计、安装、调试是关键，其复杂程度往往超过咬缝管的成形。焊缝成功的对接是保证焊接质量的先决条件。

图 3-1-71 是扁平管直接成形法，也有“先圆形后整形的扁形”的二步成形法。如图 3-1-71 所示即先对接焊接成圆管，然而再通过整形成扁平管。圆管的对接及焊接确实比扁平管直接成形简单，但由于圆形整形到所要求的扁平状，就会带来了一系列问题。如需要复杂的整形工序以消除整形后扁平管侧平面凹陷区域。这将直接影响散热器的热交换能力。

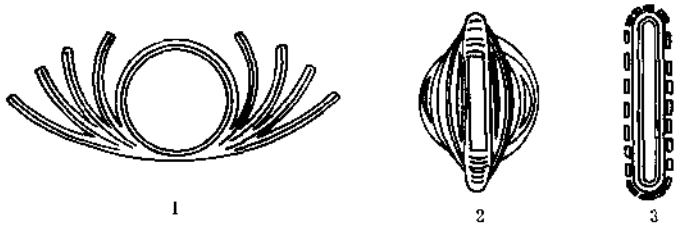


图 3-1-71 对接式扁平管二步成形

1-成圆形管；2-整成扁平管；3-缺陷（侧面易形成凹曲区）

焊接区是高频制管的核心部分。良好的对接焊缝经过该区域后将形成高质量、高强度的焊缝。它由三轴精调焊缝控制导向、高频感应线圈、锻压辊轮及焊疤清除等装置组成。其作用确保已对齐的焊缝能顺地通过感应线圈加热焊接。而焊缝外露的焊疤将由清除装置去除，从而得到精确的长轴尺寸。

高效、高速是高频焊的特点，然而一旦所焊接的焊缝出现虚焊、裂缝等缺陷而混入成品内，其后果是难以设想的。所以涡流裂缝检测的应用可清除这一后顾之忧。

铜或铝均可用来加工成高频感应焊管（图 3-1-72），高频感应焊管与咬缝管相比，它有许多优点。

汽车论坛 http://www.qclt.com

a. 在材料、管形尺寸相同的情况下，高频焊管可比咬缝管节材 14.5%；

b. 可选用更薄的材料，从而降低产品重量；

c. 外表面光洁，管形精确；

d. 由于强度高，故可承受较高的冷却系统压力；

e. 有较大的 L 值，$L=16$ 左右（$\delta=0.30$）。

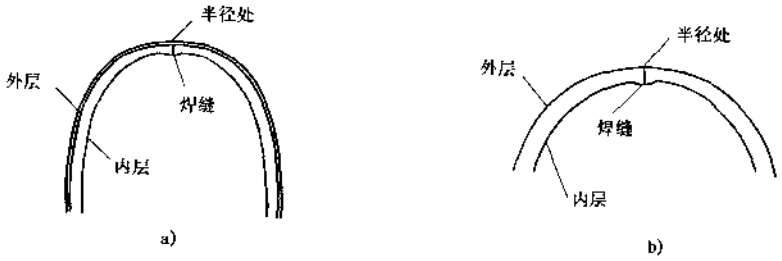


图 3.1-72 高频感应焊管

a）铜管；b）铝管

(3) 激光焊接管

散热管从咬缝管发展到高频管无论从质量还是工艺性都提高了一台阶。然而科技在不断进步，新技术、新工艺的不断推陈出新，在制管领域也是如此。如继高频感应焊接管之后，激光焊接技术在制管上的应用已悄然而起。据称，（德）Scholer Gmb.H 公司通过 1996 年 12 月开始的首批焊接经验，得出该技术应用与高频焊接相比具有投资费用约低 1%、能量可节省 3%，材料减轻（目标为 0.09mm）2%～25% 及节省材料费用 20%～25% 等优点。

激光焊接在制管方面的应用研究方向是减薄材料，提高焊接速度。

铜、铝合金均可以用来焊接成管，铝合金材复合焊接管是真空焊、Nocolok 焊散热器的重要构件。

(4) 钎焊镀层挤压成形管

挤压成形管是金属（如黄铜、铝合金）材料通过挤压冷拉成形的无缝管。它可加工成各种散热器所需的管形，如圆管、扁平管、椭圆管等。这些管形除在机械装配式散热器上应用外，由于管壁外无焊接所需的钎焊层，所以无法在焊接散热器上应用。

对此挪威 HYDRO 公司已开发出一种新的钎焊镀层，敷预挤压管表面。即钎焊镀层挤压成形管，它是针对 Nocolok 焊接方式，通过将锌作为填料金属来达到满足钎焊和防腐两方面的要求。

一条钎焊镀层挤压成形管炉线已在美国密歇根业德里安的生产厂安装完成。挤压成形管由于是挤压成形的，所以有比有缝管更高的强度，它的长宽比可达 $L=19$。

(5) B 型管

B 型管是因其剖面呈字母“B”形而得名的有缝管。

B 型管的对接焊缝置于剖面中间部位，贯穿横截面，尤如支杠撑在中间，见图 3.1-73，强度明显提高。它不但能承受较高的内冲击，而且更能承受外侧压力。在材料厚度相同的条件下，B 型管可得到其它管型无法达到的长宽比 L 值，是“SR”型散热器用最佳管型。

B 型管的成形工艺比其它有缝管简单（图 3.1-74）。至于焊缝焊接目前有二种顺序：

a. 对接焊缝形成后，即刻进行焊接。如 Scholer 公司。

b. 对接焊缝形成后，装配成散热器芯部，然后在散热器芯部钎焊过程中同时进行焊缝焊接。如 Calsonic 公司。

B 型管焊缝焊接有下列三种方法：

a. 软钎焊（Soldering）——如咬缝管一样；

b. 激光焊接——如 Scholer 公司；

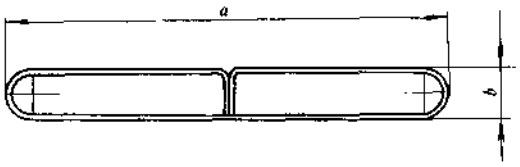


图 3-1-73 B型管



图 3-1-74 B型管成形

c. Nocolok 炉焊——如 Calsonic 公司。

散热管管型的发展是环绕着提高热交换率而展开的。流经管内冷却液的雷诺数、管材材质、厚度、L 值的增长等等均体现了散热管的发展轨迹。

管壁平面凹坑的设置，改善管内冷却液流动状态外，还同时改善流经管壁气流的状态。

水管长（a）宽（b）比值 L 的增长，是有利于改善风冷效果，更有利于散热器总成热交换等。

交错排列的散热管，使流经气侧的气流因错排产生扰动，从而提高传热率。焊接技术的发展也使管材更趋于薄型化，管型多样化。

由于钎焊铝管有其它散热管无可比拟的优点。所以其需求量逐年递增。据国外对 1996～2000 年散热器用管材需求预测（图 3-1-75），2000 年钎焊铝管比 1996 年增加 1 万 t，咬缝管由 1996 年的 3.8 万 t 到 2000 年降到 1.8 万 t，并呈递减趋势。

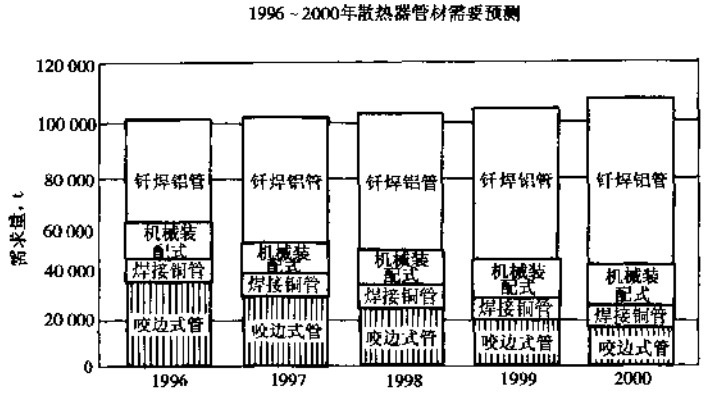


图 3-1-75 散热器管材需求预测

2）散热片

散热片是散热器的二次换热面，散热器通过它将由散热管管壁传递而来的大部分热量向大气散发。所以历来就是研究提高散热器热交换能力的主要研究对象。

平片散热片是最原始的传热效率最低的散热片。在平片上开设类似于百叶窗切口使百叶窗平片散热片的平均传热率得到了提高。波状散热带的研制成功，使散热器气侧的传热系数更进一步提高。若以平片散热片的传热率为 100%，则开百叶窗切口后的百叶窗平片散热片的传热率为 220%，有百叶窗的波状带则更高为 260%。随着研究的深入，工艺的改进，散热器气侧传热系数的不断提高，使散热器的散热性能逐年提高。芯子比重（芯重/功率）也因此而下降。散热器逐渐向轻型、高效、紧凑方面发展。

（1）有百叶窗的平片散热片

该散热片用于“管—片”式散热器。根据散热器管管型，平片散热片的管孔有圆孔、椭圆孔及扁平孔。根据散热管的排列，散热片管孔有单排、多排（图 3-1-76）。

前二种管型的散热片在机械装配式散热器上应用。管孔的错排可使流经管壁的空气产生扰动而改善传热性能。

汽车论坛 http://www.qclt.com

评价百叶窗的三要素是：百叶窗排列形式、百叶窗倾斜角度及切口长度。三要素的有机组合，可获取最佳的传热效果。

我国已普遍运用级进模连续冲制或用滚轧成形技术生产该散热片，而且还能供应自行设计、制造相应的级进模和滚轧机等专用设备。

(2) 波状散热带

波状散热带是一种在平片散热片基础上根据热传导理论发展而成的具有高传热系数的波状散热片。因其形状如波纹而得其名。它广泛应用于热交换上。

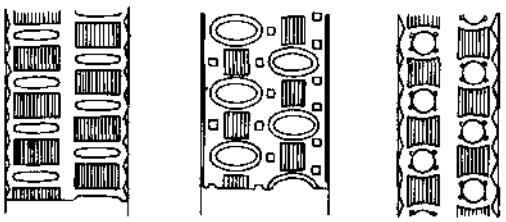


图 3-1-76 管孔错排的散热片

评价波状散热带除上述的百叶窗三要素外，还有波高 h、节距 t 及波形对称性等三要素。波高 h 的精度直接影响同散热管管壁的焊合率，而节距 t 与散热器风阻有关，对称性将影响散热带抗弯强度。

波状散热带是滚轧成形的。滚轧散热带的关键是组成轧辊的切口刀片，由于在滚轧过程中完成百叶窗、管孔的剪切成形及波纹定型，所以切口刀片的设计、制造是非常复杂的。

美国 Livernois 工程公司制造并向福特汽车公司下属的散热器厂提供了第一台轧带机。而该轧带机中关键性的切口刀片是由福特与该公司共同设计的。

自上海率先于 80 年代引进 Livernois 轧带机用于制造管带式散热器以来，国内众多轧带机都已国产化，仅有少数从国外引进。

铜、铝均可作为散热带材料。材料的厚度在散热带对称的前提下与波高 h 及材料强度有关。

3) 水室

水室是集散冷却液的器，对称排列在芯部两端。根据需要在散热器进水室内可安置油冷却器。

水室本体上有进水口、出水口、加水口座、安装支架、凸肩等零件。对金属水室而言，这些零件务必一一焊接在本体上。故工序繁重，费工、费时、费料、质量重、成本高。而用增强尼龙 66 注塑的水室将进出水口等一系列附件注塑成一体，既简化了工艺、降低了成本、又减轻了质量。

3.1.14.5 检漏

散热器必须经 100% 密封性检测后方能出厂。

通常情况检漏这一工序是设置在成品出厂前。只有当钎焊设备或胀扩口机在调试过程中，状态尚不稳定，芯部的泄漏率较高的情况下，为避免因不合格产品流入下一道工序而造成的损失，才在芯部加工与水室装配之间设置检漏工序。

目前有湿式与干式二种检漏方法：

湿式检漏是散热器的传统检测方式。由于它必须将充有气体的成品浸没在水中观察有否气泡来判定泄漏及其部位，故湿式检漏不但使检测环境恶化而且检测后的合格品必须干燥除湿。

而干式检漏是利用压差原理进行检测的。所以检测场地干燥、清洁、对检测后成品更无需干燥处理。它适用于大批量生产线上。

综上所述，基础理论的研究是散热器新产品开始的依据。而制造技术的先进性、完善性及新材料的应用又是被开发了的新产品赖以生存与发展的前提。(撰稿人：徐孝德)

3.1.15 发动机装配

3.1.15.1 概述

发动机装配 (Engine assembly) 是发动机制造工艺中最后一步。发动机装配质量的好坏直接关系到发动机的整体性能和质量。一般来说，发动机装配工艺分为零件总成分装、发动机总装和发动机性能试验。

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.1.15.2 装配方法

一台发动机有200多种零件，在一条生产线上不可能从每一个细小零件开始装配。因为场地不允许，节拍也不允许，发动机中每一个零件都属一定的装配级别，一般分为五个级别。低级别零件一般都是在流水线外进行分装，把低级别零件组合起来成为总成零件，总成零件成为高一级别的零件。如进气管总成、活塞连杆总成。缸盖总成是采用一整条线进行分装，是最大的一个分装。高级别零件和总成零件在流水线上进行装配。

一般来说，装配的原则是：

①由低级别向高级别装配；

②由里向外装配。

活塞连杆的装配是先装配活塞环（二道气环、油环），接着装活塞销，然后拧松连杆螺栓，取下轴承盖，成为活塞连杆总成。

总装线就是从缸体开始，以曲轴、连杆、气缸盖为基本部件组成发动机，最后进排气管和其他管类等外装件装配形成发动机总成下线。

在现代化的装配流水线中，原来以手工为主体的装配线被逐渐多的自动、半自动工位装配线代替，同时增加自动检测工位和返工工位。如自动拧松和拧紧轴承盖螺栓、自动安装气门锁片、自动拧紧油底壳螺栓、缸盖螺栓。有些还采用机器人，如油底壳上胶工位。

装配线的设计安排除了上述装配工艺计划时要注意的要点外，还要根据零件的供给方法，特别是内制件的供给方法来确定。如实现缸体总成从缸体线自动输送至装配线。

3.1.15.3 设备

装配线设备由连接各工序的输送设备和拧紧站、组合机、检查机等构成。

1）输送设备

输送设备输送托板和发动机至各工位，有采用滚链方式，也有采用导轨输送方式。滚链方式以制动滚链原理为基础，可实现非同步式运动，保证输送绝对安全。导轨输送方式有二导轨和三导轨。二导轨采用一根定位导向，另一根驱动。三导轨采用二根定位导向，中间一根驱动。这种方式能使输送很稳定，托板定位也很准确。

目前输送线和托板上都安装了Moby（可读写记录发动机状态装置），它能使工位读取发动机到位和离开等信息，并通过网络传送给中央控制站。

2）螺栓拧紧技术

在装配中，拧紧螺栓是非常重要的工艺。很多部件都是靠螺栓来紧固的。

目前均采用电动拧紧工具，在拧紧站中配备有计算机进行控制。一般都采用扭矩和转角进行双控制，这样的拧紧结果比较可靠。在拧紧枪控制器中，都显示每一次的拧紧数值。拧紧工站中，获取每一次拧紧数值，并进行合格与否判别，并采用LED灯显示。当有不合格扭矩的螺栓拧紧，发动机自动进入下一工位进行返工。采用计算机进行控制的拧紧系统，还可对实际拧紧数据进行统计分析和趋势判断。当趋势超过警戒线时，将自动报警。

电动拧紧枪带两套传感器，一套内接，用于控制器对拧紧值的测量；一套外接，用于标定仪器对拧紧枪进行在线标定。

3）在线质量检测

为保证装配质量，在装配线上设立了众多全自动检查站，目前在生产线上有：

①凸轮轴摩擦扭矩测量，检查液压挺杆质量以及进排气门弹簧上座等是否漏装；

②活塞连杆装配前摩擦扭矩测量，检查主轴瓦是否漏装及由于机加工失误带来的咬死情况；

③活塞连杆装配后摩擦扭矩测量，检查连杆总装装配后的咬死情况；

④汽缸盖气道密封测试，检查是否气、油道相通及各安装密封面是否密封；

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑤发动机油道密封测试，检查是否气、油道相通及各安装密封面是否密封；
⑥发动机水道密封测试，检查是否气、油道相通及各安装密封面是否密封；
⑦水泵泄露测试，检查是否气、油道相通及各安装密封面是否密封；
⑧压入油封时力和位移及油封弹簧是否存在的监控，避免发生窜烧机油；
⑨采用摄像头对活塞安装方向的检测；
⑩气门锁片采用激光检查安装的正确性；
⑪主轴瓦采用激光检查安装的正确性，防止润滑失油，造成咬死。

3.1.15.4 性能试验

一般采用热试验。发动机进入台架并启动后，在高速区（约2 000r/min）跑合，待水温达到80℃，油温达到60℃，检查机油压力。回到怠速区（约800r/min），考察排放、转速稳定性、点火提前角、油压等是否正常，最后检查高速时是否有异响。

3.1.15.5 发动机装配发展趋势和最新技术

随着科学技术的不断进步及生产节拍的需要，为了减少手工装配而带来的错误，发动机装配最终将采用计算机检测全自动装配系统，利用机器人（带检测）来代替手工操作。

在出厂试验方面采用冷测试技术代替热试验，即可减少能源浪费，节约场地，提高效率，又可减少污染。 （撰稿人：俞恒丰）

3.2 动力传动装置

3.2.1 离合器

3.2.1.1 离合器概述

离合器是汽车传动系中连接发动机和变速器的重要部件。其主要功能如下：
①传递或切断发动机输给传动系的动力；
②起步传扭平顺，使用中有效地减少传动系中的振动和噪声；
③在传动过程中，起到过载保护作用。

图3-2-1为膜片弹簧离合器的工作原理。

根据盖总成压紧弹簧的形式，离合器可分为螺旋弹簧离合器和膜片弹簧离合器；按从动盘总成的片数，离合器常有单片和双片形式。

由于膜片弹簧离合器具有压力稳定、操作轻便、寿命长等特点，故已广泛应用在汽车中，成为汽车离合器发展的主流。

离合器由主动部分（盖总成）和从动部分（从动盘总成）组成，其主要零件如图3-2-2所示。

3.2.1.2 制造特征

具代表性的离合器制造工艺如图3-2-3。

3.2.1.3 冲压加工

1）盖

离合器的盖材料一般采用低碳深拉延钢板（重型汽车离合器也有使用铸件）。盖一般通过落料冲孔、拉伸、整形、冲孔切边、精冲等工序加工而成，其冲压流程如图3-2-4所示。

盖的冲压加工一般使用大吨位的压力机，先进的加工方法是在一台压力机上使用多工位级进模来完成

汽车论坛 http://www.qclt.com

一系列冲压工序。

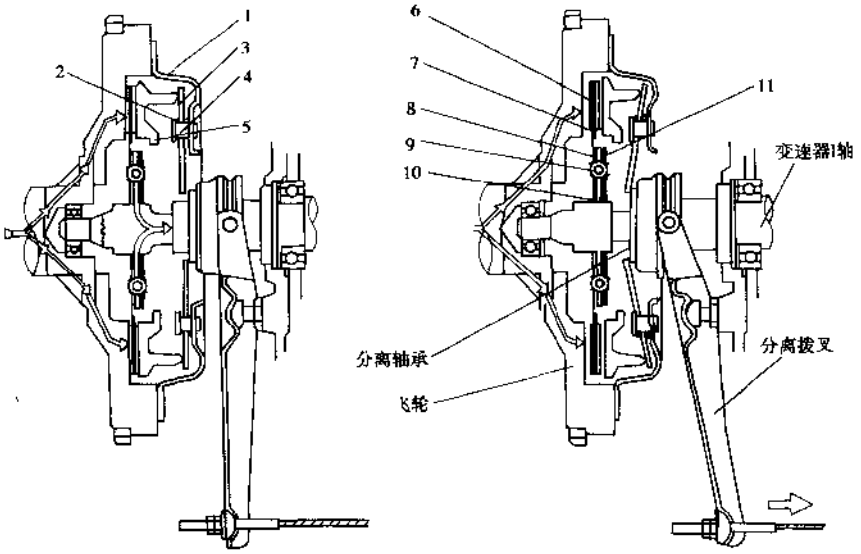


图 3-2-1 膜片弹簧的工作原理

a）接合位置；b）分离位置

1-盖；2-支承环；3-膜片弹簧；4-支承铆钉；5 压盘；6-摩擦片；7-波形片；8-钢片；9 减振弹簧；10-花键轴套；11-盖板

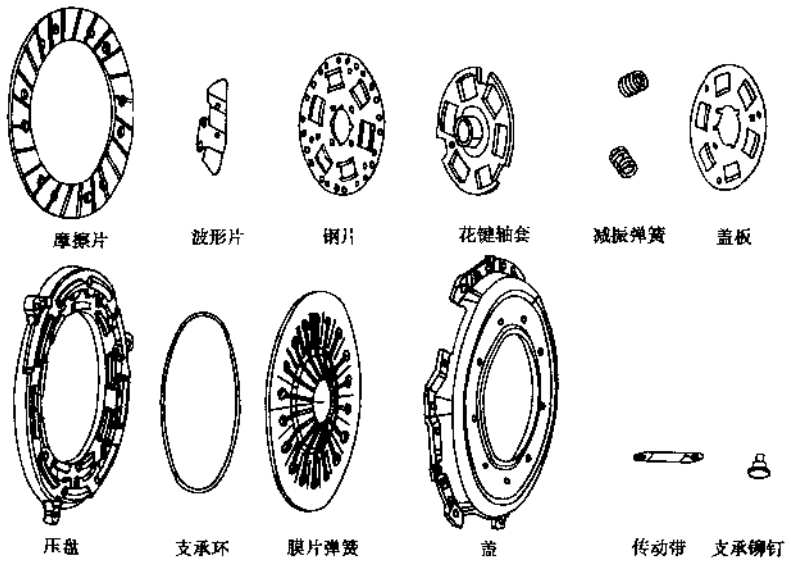


图 3-2-2 离合器膜片

质量上重要的是要保证安装面的平面度、支承面的平行度及定位孔的位置度。

2）膜片弹簧

膜片弹簧的材料通常采用热轧或冷轧的弹簧钢 50CrV4。膜片弹簧是涉及力和变形的关键零件。冲压加工尺寸精度要求高，热处理工艺复杂。其主要工艺过程大致如图 3-2-5。

汽车论坛 http://www.qclt.com

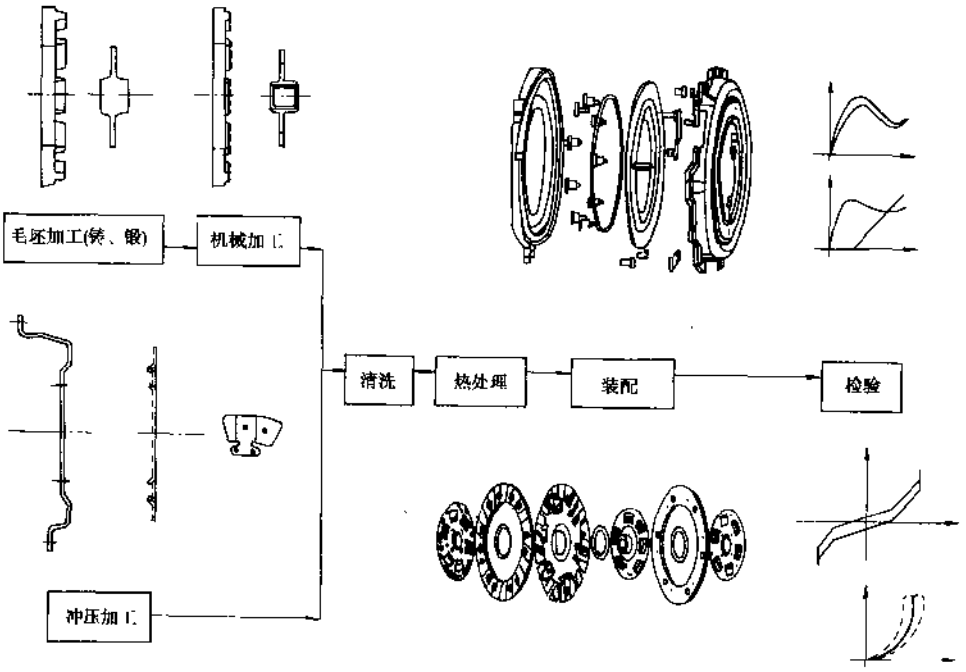


图 3-2-3 离合器制造工艺

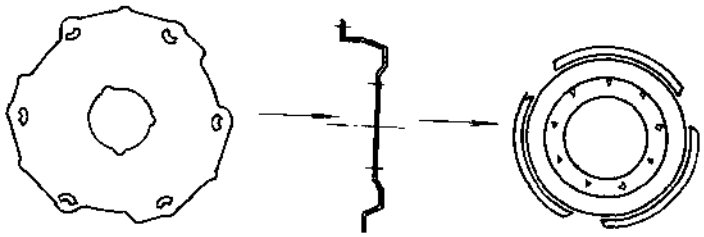


图 3-2-4 盖冲压流程

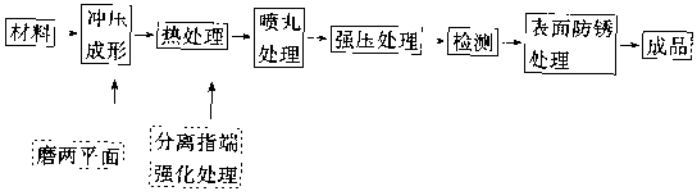


图 3-2-5 膜片弹簧主要工艺过程

由于膜片弹簧要求压力稳定、疲劳寿命长，冲压时必须要对膜片弹簧的外圆及碟簧部分的内侧进行精压圆角 R；热处理通常是加热后进行压淬处理；喷丸时要注意必要的喷丸强度和覆盖率。

在批量生产中，先进的工艺是采用保护气氛辊棒炉加热压淬和热定型工艺。

3）钢片、盖板

钢片、盖板的材料通常采用低碳钢板。经冲压成形后的零件需进行渗碳或碳氮共渗。为保证零件的平面度先进的做法是采用压平淬火工艺。成品的表面须经防锈处理。

由于钢片、盖板的减振弹簧窗口的形状好坏直接影响钢片、盖板与弹簧间的磨损，影响从动盘总成的

汽车论坛 http://www.qclt.com

寿命，故在冲压加工中必须充分注意，保证此形状的冲压质量。

4）机械加工

（1）压盘

压盘材料通常采用灰铸铁，应注重该材料的强度、金相和硬度等，以满足使用性能及安全的需要。

压盘的机械加工一般经过粗车、精车等多次加工完成。目前普遍采用数控车床加工。

成品必须经过严格的检测，以确保支承面的直径和形状；同时必须校正零件的平衡量；装配前，成品还需探伤及表面防锈处理。

（2）花键轴套

花键轴套材料采用中碳钢，其主要工艺流程图如图 3-2-6。

锻造→调质→机加工→冲压→局部热处理→表面处理

图 3-2-6 花键轴套工艺流程

锻坯是在大吨位的压力机中，采用多工位模锻而成，机加工通常采用数控车床，

调质工序中，先进的方法是利用锻造余热进行形变热处理。

5）装配及检测

（1）从动盘总成装配及检测

从动盘总成装配流程如图 3-2-7。

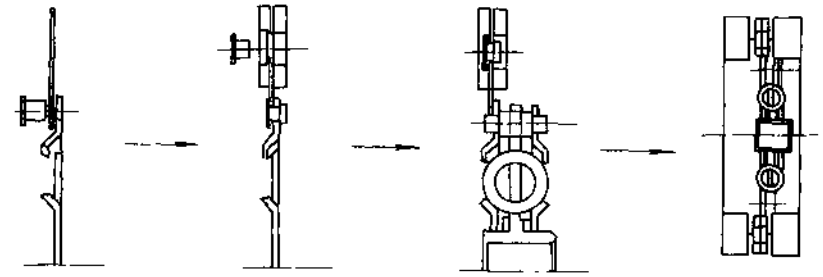


图 3-2-7 从动盘总成装配与检测

装配后，从动盘总成还需经过平衡、工况检查和阻尼测量，其装配和检测的主要设备有液压机、平衡机及工况机等。从动盘总成的性能很大程度上依赖摩擦片的性能，选用时应充分注意。

（2）离合器的盖总成装配

盖总成装配流程如图 3-2-8。

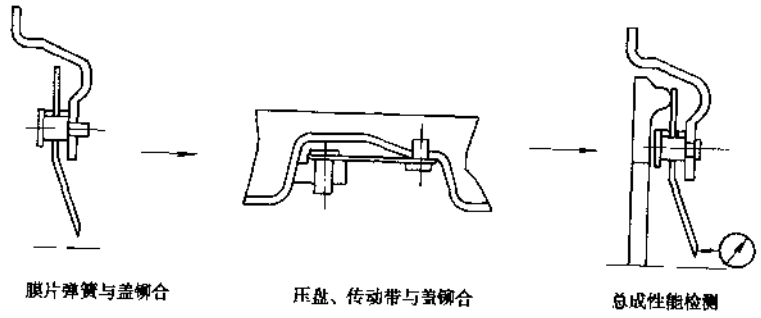


图 3-2-8 盖总成装配流程

装配后，盖总成还需经过平衡、压盘升程检查、压紧力及分离力综合测量等。总成的装配和检测的主

汽车论坛 http://www.qclt.com

要设备有液压机、分离指调整设备、力值及压盘升程检测设备等 （撰稿人：赵永彬 高春明）

3.2.2 手动机械变速器

3.2.2.1 齿轮、花键

手动机械变速器中的传动件主要由带花键的齿轴及齿轮组成，随着汽车发动机功率的不断提高，整车重量的日趋轻量化，以及愈来愈严格的低噪声要求，因此对变速器中齿轴的花键及齿轮的强度及精度提出更高的要求，力求使变速器实现轻、小型化和低噪声的目标。

1）齿轮

汽车变速器圆柱齿轮主要工艺过程如图 3-2-9。

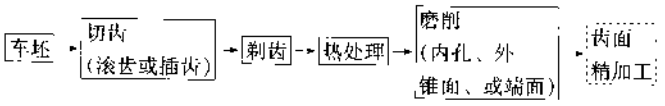


图 3-2-9 圆柱齿轮工艺

目前不少汽车齿轮为了提高轮齿弯曲疲劳强度，增加表面疲劳寿命在热处理后对齿面进行强化喷丸处理。如磨齿后，进行强化喷丸处理。

①滚齿：为提高工效目前多采用高效滚齿机和 CNC 滚齿机进行加工，刹前滚刀一般选用多头滚刀（2～3 头），这种小直径多头氮化钛涂层滚刀，齿形经特殊设计。在使用时，工件的转速随着滚刀的头数增多而加快，切齿效率显著提高，且对机床的刚性与功率提出更高的要求。滚刀的精度，直接影响到齿轮的加工精度，其精度的确定，需参照热处理变形大小及热后有无硬齿面精加工确定。切削用量的确定要从机床精度、刚度、刀具及工件材质各因素综合考虑，目前滚齿切削速度可达 70～110m/min，进给量 1.5～4mm/r。加工直齿轮时，采用小直径滚刀进行逆滚较为有利，而加工斜齿轮时，采用与工件旋向相反的滚刀进行逆滚较为有利。这样刀具刀牙注形磨损较浅，且离切削刃位置远，刀具寿命较长。要提高滚齿精度，刀具的安装、调整环节也不容忽视，有的滚齿机采用机外装校刀具方法，可以提高刀具的安装精度。目前高精度的内涨式夹具已在滚齿加工中广泛应用，因其消除了定心孔处的间隙，可减小齿圈径向跳动误差的齿距累积误差，同时与机床上下料装置的密切配合，实现了滚齿加工过程的自动化。插齿用于加工双联齿、带倒锥拔合齿、内齿轮等。

②剃齿：常用的剃齿方法有：轴向剃齿、切向剃齿、对角剃齿和径向剃齿。目前汽车齿轮大量生产多采用效率最高的径向剃齿方法，一般加工一个齿轮只需 20 多秒种。该方法要求机床刚性高，目前 CNC 剃齿机的应用也日渐增多。径向剃齿时，只有刀具相对工作的径向进给，而无轴向走刀运动，所以能剃削带凸缘齿轮和双联齿轮。生产效率比轴向剃齿高 2～3 倍。径向剃齿根据刀槽错位的排列也分顺剃和逆剃切削两种，在相同切削力的情况下，逆剃比顺剃有利，可使齿面粗糙度明显改善。工件齿形与齿向的鼓形量由刀具保证。剃齿刀具设计参数及修磨参数，根据试剃、测量以及参考热处理变形情况、通过分析计算确定。并经多次试剃修整，才能剃出具有理想接触区、低噪声的齿形。

对角剃齿方法：工件沿其轴线偏斜成一定角度的方向进给，刀具与工件啮合节点在加工过程中沿刀宽方向连续移动，刀具磨损也较均匀、使用寿命较长，同时工作行程短，可减少机动时间，生产效率也较高，因此，在汽车齿轮大批量生产中也较适用。

2）花键

花键分外花键和内花键。外花键加工除滚齿外，冷搓工艺已经广泛采用。有些外花键上有微小扭转角，可由冷搓刀具解决。内花键一般采用拉削成形，但是遇盲孔时要用插齿加工。

3）热处理

渗碳处理和碳氮共渗处理被广泛应用。为了保证尺寸精度，对材料的淬透性、热处理炉的气氛和淬火油的控制应引起足够的重视。

4）强化喷丸处理

对齿轮根部进行强化喷丸处理可以使齿根部产生残余压应力，消除微裂纹，提高齿轮的疲劳寿命，同时有利于零件的校形和改善表面纹理结构。丸粒直径一般不超过被喷丸齿轮齿根圆角半径的一半，通常为0.4～0.8mm，丸粒的硬度一般接近被喷齿轮的表面硬度。喷丸的速度一般为60～100m/s，最大残余压应力值约为材料抗拉强度的50%～60%。关于喷丸强度的测定，目前国外已采用X射线衍射法来直接测量齿轮根部的残余压应力，除了测量表面外，还通过腐蚀的方法测量表面以下0.02～0.05mm处的残余压应力。

5）齿轮热后加工

齿轮热后加工有珩齿加工、磨齿加工、硬齿面刮削等

①珩齿工艺：珩齿有外啮合珩齿、内啮合珩齿和蜗杆珩齿三种工艺。其中内啮合珩齿应用较广、常用的设备为Fassler公司和Hulth公司的珩齿机。

②磨齿：磨齿是齿轮精加工最常用的一种方法，砂轮与工件是强制啮合，故不仅能够加工淬硬齿轮，并且能修正齿轮预加工中的各项误差。有的卧式磨齿机主轴上装5～8个工件同时磨削。砂轮的磨料为立方氮化硼（CBN），砂轮的制造是在轴承钢基体上电镀一层均匀的CBN颗粒（颗粒度25～30μm），粘结剂为镍。CBN层磨损后可以重镀20～50次。国内常用的磨齿设备有碟形双砂轮型磨齿机、蜗杆砂轮磨齿机以及类似的其它磨齿机。

③硬齿面刮削：硬齿面刮削工艺通常采用硬质合金滚刀、CBN涂层滚刀，对热处理后的硬齿面进行加工，该加工方法可以纠正齿向误差。

近年来热后齿轮加工工艺有了很大的发展，如强力齿面珩磨和蜗杆包容硬齿面磨削工艺，强力齿面珩磨工艺得到的齿面精度较好，可取消剃齿加工，但加工成本相对较高。

3.2.2.2 同步器齿环

目前较先进的同步器齿环加工方法是采用精密锻造方法加工而成。其整个制造过程涉及到铸造、锻压、模具制造、机械加工、表面处理等技术领域。目前该项制造技术已取得了飞速发展，主要表现在以下两个方面：一是新型材料的研制推广应用，有新型铜合金材料、铜基双金属材料、钢质及双金属材料与复合材料等；二是采用新型的成形工艺及设备。包括精锻、粉末冶金锻造、液态模锻、摆辗成形等。选材方面：轿车、微型车、中、轻型货车多采用铜基合金，而重型货车则以钢质复合材料为主。对材料的性能要求大体有以下几方面：

①要具较高的强度，且耐高温和足够的抗冲击载荷能力；

②应具有较高的耐磨性；

③理想的摩擦系数；

④稳定的弹性模数；

⑤合格的金相组织、晶粒细化、金属纤维连续；

⑥优良的切削性能。

各厂家采用材料各异，目前国内推荐采用HMn62-3-3-0.7高强度耐磨黄铜合金。

同步器齿环主要工艺过程如图3-2-10。

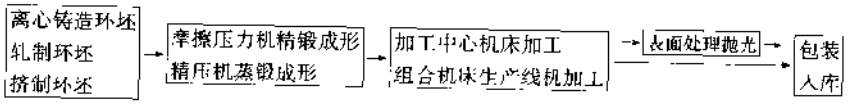


图3-2-10 同步器齿环工艺

为获得较高的摩擦系数及良好的耐磨性能，机加工后，可在锥面上增加喷钼工艺。

制造过程中的几个重要环节：

①毛坯要求精化，其形状尺寸对精锻件的成形质量密切相关，因此，必须采用专用机床进行精确下

汽车论坛 http://www.qclt.com

料；

②模具合理设计与制造；

③合理选用精锻设备；

④尽量采用先进的远红外线测温技术，控制始锻变形温度；

⑤提高锻造过程的自动化程度；

⑥机加工装夹具定位合理，注意定位面清洁，夹紧力要选择合理，以免引起工件变形，且尽量减少装夹次数；

⑦必须配置专用的检测设备及工具，以确保加工出高性能、高精度的产品。

3.2.2.3 换档拨叉

换档拨叉使用材料有钢锻件、钢板冲压件、压铸铝合金、黄铜等。

不同的材料性质加工工序也不同。以一种钢锻件五档拨叉为例，主要加工工序如下：

钻孔→铣槽→去毛刺→清洗→脚面喷钼→拨块槽高频处理→检查。

第一工序是钻拨叉轴孔、再用铰刀加工，还要加工和拨叉轴结合的弹性销孔。第二工序是以拨叉轴孔为加工基准进行拨块槽的铣加工，再进行拨块槽的倒角加工。在机械加工时备有专用夹具供专机使用。第三工序是去除机械加工后的毛刺。第四工序是清洗。第五工序是对拨叉的双脚面进行火焰喷钼处理，以增加其耐磨性，也有的拨叉用注塑成形模将拨叉的双脚表面覆盖一层尼龙或采用高频淬火、硬质镀铬方法，同样可以达到增加耐磨性的目的。第六工序对滑块槽高频淬火，用专用线圈加热后冷却淬火。热处理质量应定期检查，要检查表面硬度、淬硬层深度及分布、金相组织。最后要对换档拨叉的精度进行检查。

3.2.2.4 手动变速器装配

1）装配工序的构成

本文介绍前轮前驱动（FF）乘用车广泛使用的手动变速器的装配工艺，装配工艺图见图 3-2-11 所示，它表示了安装于壳体的齿轮总成组、差速器总成、换档零件、变速器外壳等基本零件的装配，小零件装配的顺序在主装配线上排列构成。装配完成后进行气密性试验和换档校验。

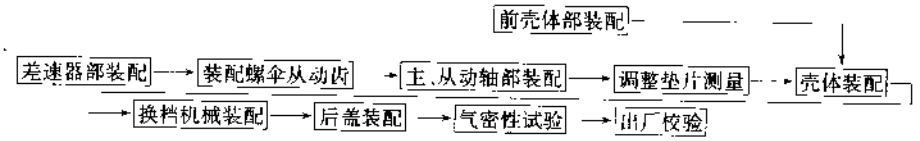


图 3-2-11 FF 变速器装配流程

2）装配线

在变速器装配时，广泛采用的是具有可定位的随行夹具的自由流动输送机。输送机一般为滚子滚动式，链条驱动。

现代化的装配线广泛采用自动装配机械，主要有：

①自动拧螺栓装置，如有的公司螺栓的拧紧采用控制螺栓的扭矩或控制其转角的办法。采用扭矩控制法时，一般扭矩控制精度为±15%，对特别重要的螺栓，如从动锥齿轮与差速器壳体的联接，扭矩公差控制在±5%；采用转角控制法时，先加预紧扭矩，然后扭转一个规定的转角。一般对施加的预紧扭矩控制公差为±10%；对扭转角的控制，一般要求为±15°，要求高的为±5°。

②电子测量装置，决定调整垫片和挡圈的选用。

③装配机器人、自动提升装置。

④小件自动压入机。

⑤油封自动涂抹油脂。

⑥自动加、放齿轮油。

⑦自动涂液体密封材料。

⑧自动测量气密性。

3）自动装配线

国外自动装配线已经出现，一般部件装配以人机结合为主，总装以全自动及机器人为主。自动装配线所有测量自动进行，计算机联网，测试数据全线共享，主要装配尺寸自动测量后自动反馈补偿。

考虑自动装配线时，选择高可靠性的机构等很重要，另外要充分考虑能对应多种变动需要，形成柔性装配系统 FAS（Flexible Assembly System）。

4）检查设备

按设定的运转特性曲线和检查标准对 1～5 档、倒档运转噪声和换档操纵性进行检查。一般加 25% 的载荷，进行牵引和滑行两种工况的校验。在线噪声检查多用人的感官进行，也有用频率分析仪等设备进行判定的。但目前国内轿车变速器噪声标准尚未制订，一般都参照行业标准贯彻执行，汽车行业标准 QC/T29110—93 汽车变速器、分动器总成及其汽车齿轮产品质量分等中规定了载货车、轻型客车变速器总成噪声，前进档为≤89dB（A），倒档和超速档≤93dB（A）。国外轿车变速器一般控制在 80～82dB（A），较差的控制在 86dB（A）。试验条件按专业标准规定。变档系统的检查通过测力传感器对变换力进行检测来判定是否异常，一般换算到变速器换档轴上的换档力为轿车、轻型车≤400N，中型车≤500N，重型车≤620N。（撰稿人：方伟荣　蔡若帆）

3.2.3 自动变速器装配

3.2.3.1 总装配

我国目前生产的电子控制自动变速器总成由近 200 个零部件组成，总装配工艺大致如图 3-2-12 所示：自动变速器的总装配主要由装配、测试和清洗工作段组成，绝大多数零部件以总成形式在总装线上装到变速器壳体上，如包括差速器的终端驱动总成、离合器总成、从动链轮支架总成、阀件/槽板总成、变矩器总成等等。在装配过程中，要保证各个零部件的正确装配，其中终端驱动总成和输入第二离合器总成垫片需要选择后再进行装配，因为变速器的轴向间隙是靠它们来调整的。

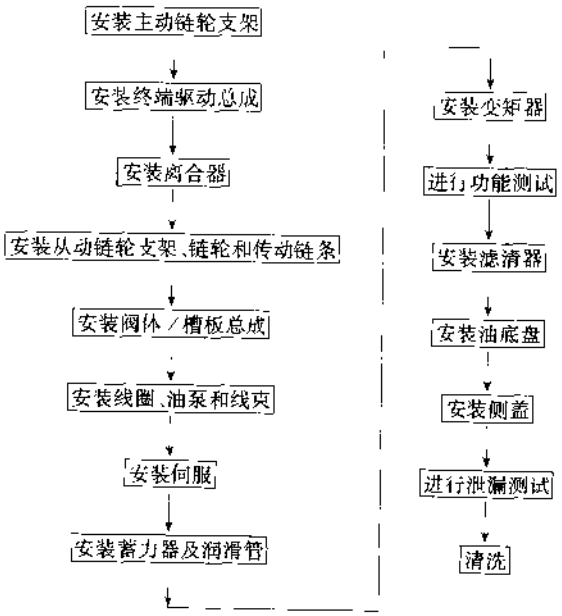


图 3-2-12 自动变速器总装配工艺

3.2.3.2 品质保证

为保证变速器的装配品质，所有的变速器均要进行功能测试和泄漏测试。功能测试安排在已经完成主要零部件的装配之后进行，测试模拟车辆运行过程中变速器的状态，按照测试规范对将近 200 个测试点逐个进行测试，检查每个测试点的测试结果是否在规定范围内，测试内容主要包括电气检查、变矩器测试、离合器测试、泄漏测试、换档测试和差速器功能测试等等，如变矩器测试中主要有变矩器充油检查驱动轮速度、冷却管路压力、线路压力，失速检查、驱动轮速度和 K 系数各项测试；换档测试中主要有每次换档的传动比、换档时间、换档延迟时间、换档时线路压力、冷却管路压力各项测试。测试精度也有严格要求，以某一型号变速器为例，如换档测试中的电子 2 档换 3 档，传动比测试一项测试范围的上下限分别为 3.2 和 3.35，换档时间测试一项测试范围上下限分别为 0 和 2s；变矩器测试中变矩器作用时间测试一项测试范围上下限

汽车论坛 http://www.qclt.com

分别为0和2s。通过测试可以发现装配过程中出现的许多问题，是保证自动变速器装配品质的重要环节。测试设备使用变速器油，测试时对变速器油的温度和清洁度均有严格要求，所以需要一套精过滤油设备向测试台不断提供测试所需的变速器油。精过滤油设备主要由滤清设备、加热设备、油水分离设备组成。在装配完成之后还需要对变速器进行整体泄漏测试。又以某一变速器为例，其整体泄漏测试要求为在27.58kPa压力时，4s内泄漏流量小于105SCCM。

变速器测试后会沾上许多变速器油，所以下线前需要进行清洗并吹干。（撰稿人：周建忠）

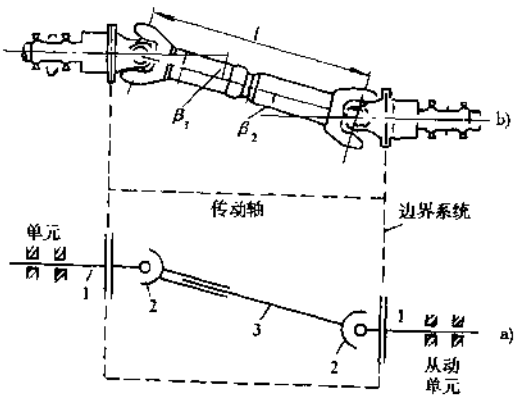


图3-2-13 十字万向传动轴
a）布置形式；b）为系统元件
1-输入（出）轴；2-万向节；3-中间轴

3.2.4 传动轴

3.2.4.1 传动轴概述

传动轴是将输入轴与输出轴联接而成的传动系统，其功能是将驱动装置传来的转矩和旋转运动尽可能均匀地传递给从动装置，同时至少使一个装置在给定范围内能够改变它的空间位置。传动轴的功能可分解为三项单独的功能：

①均匀传递旋转运动；

②具有改变输入轴和输出轴之间距离的功能；

③具有改变输入轴和输出轴之间夹角的功能。

传动轴根据万向节的类型，可分为十字万向节传动轴、球式万向节传动轴和枢轴式万向节传动轴，根据使用场合不同，又可分为汽车、冶金、工程机械和船舶等系列。十字万向传动轴（见图3-2-13）主要零件有十字轴总成、万向节叉、滑动叉、突缘叉、花键轴、轴管、中间花键轴、突缘和中间轴承支架等，见图3-2-14。

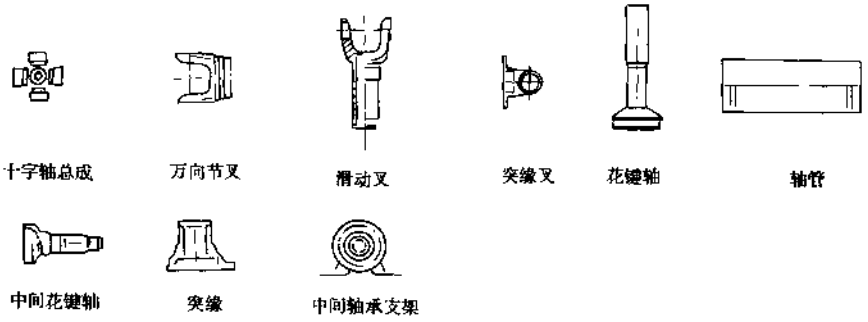


图3-2-14 十字万向传动轴主要零件

3.2.4.2 制造特征

具有代表性的传动轴制造工艺过程如图3-2-15。

3.2.4.3 毛坯制造

传动轴零件的毛坯主要采用锻造（冷、温、热）或铸造方式成形，锻造和铸造用于套管叉、万向节叉、突缘叉、花键轴、中间花键轴突缘和十字轴等零件；冷压精密锻造用于钢碗。

热锻工艺有棒料切断、电加热、预锻、终锻、切边，然后经过热处理正火或调质，最后抛丸、清理。

铸造工艺有造型、浇铸、清砂、热处理（回火或球化）。

汽车论坛 http://www.qclt.com

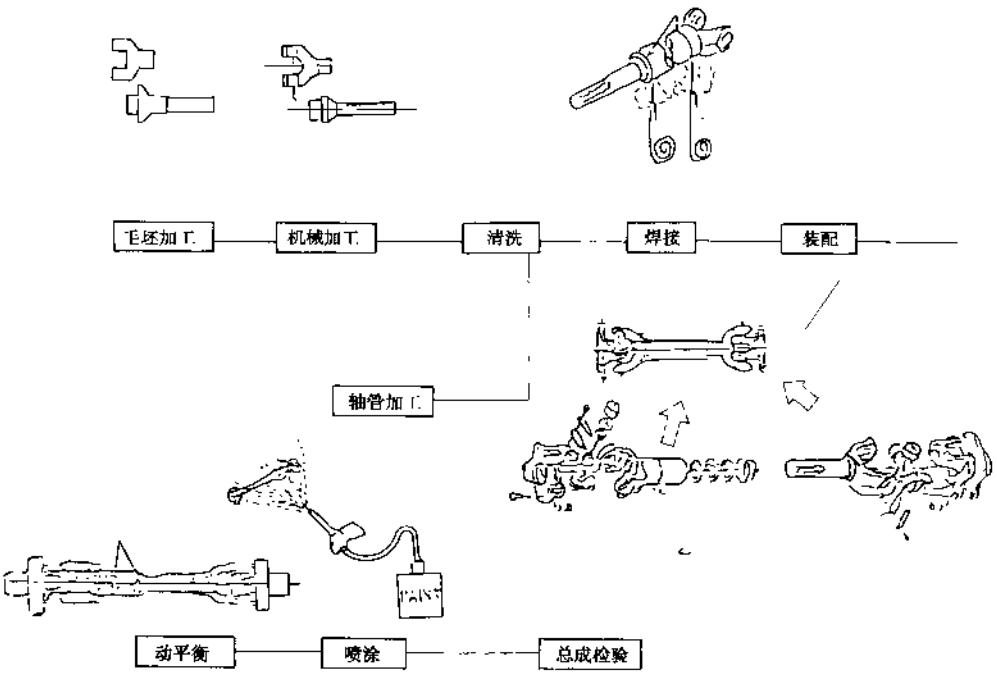


图 3-2-15 代表性传动轴制造工艺过程

冷压精密锻造工艺有棒料切断、退火、冷挤成形，然后经过热处理正火。

3.2.4.4 机械加工

1）三叉制造

三叉是指滑动叉、突缘叉和万向节叉，关键工艺为耳孔加工，目前采用数控耳孔专机，将原来多台机床分别进行的钻孔、粗镗、精镗、割锁圈槽和劈二平面等多道工序，集中在一台机床上加工，数控耳孔专机分为两个工位，第一工位用专用刀具进行钻孔、镗孔、割锁圈槽和劈平面；第二工位采用单面精镗，以保证二耳孔的同轴度和孔径尺寸。此工艺不仅大大提高了生产效率和零件制造质量，并有利于和数控车床组成 CELL 制加工形式，以便于优化生产布局，如图 3-2-16 所示。

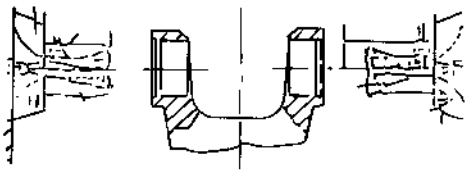


图 3-2-16 三叉耳孔加工简图

2）花键轴加工

花键轴制造过程中关键工艺为花键成形和齿面淬火，花键一般分为渐开线和矩形二种，花键成形采用滚齿、搓齿等手段，成形后的花键，为提高花键轴的强度，齿面需热处理淬火，齿面淬火一般为中频淬火。为进一步改善滑动结构的合理性，可采用目前较为先进的涂塑工艺或进行磨削，花键轴采用涂塑工艺后，使传动轴具有很好的吸振功能和花键的耐磨性，提高了花键配合精度，从而提高了传动轴动平衡转速。涂塑工艺关键工序为磷化、涂塑和推塑整形，其中涂塑采用的是浸塑，先将花键轴加热到一定温度，然后掌握浸塑的时间，以控制涂塑层的厚度，花键轴加温温度和浸塑的时间随不同季节和环境而变化。另外先进的花键轴加工还采用冷打和冷挤压成形等少无切削加工手段。

3）轴管加工

根据各种传动轴对轴管的直径和长度的不同，对轴管进行加工，关键工序为轴管两头缩口，现主要采用液压设备和缩口模手段，其它还有滚压收口工艺。轴管的缩口主要是为提高传动轴的临界转速。

汽车论坛 http://www.qclt.com

4）十字轴总成加工

十字轴总成一般由十字轴、轴承碗组成，轴承碗为组合件，由钢碗、油封、滚针、垫片组成。十字轴总成又称万向节总成，是传动轴中最重要的元件，其最关键的是油封，它的功能为防尘和防止润滑脂的外溢。

十字轴主要加工工艺为车四轴外圆、渗碳淬火、磨四轴外圆和四端面，关键工艺为渗碳淬火和精磨外圆，渗碳淬火应保证表面硬度和淬硬层深度，精磨外圆一般采用无心磨和有心磨二种，无心磨生产效率高适用于单品种、大批量生产；而有心磨则较适合多品种、小批量生产。

钢碗目前有冷挤压钢碗和薄壁钢碗两种，冷挤压钢碗的主要加工工艺为劈大平面、车内外圆、车油沟和止口、渗碳淬火、磨大平面、磨内外圆和底平面等，其关键工艺为渗碳淬火、磨内外圆和底平面，主要控制内外圆的尺寸和同轴度，以及底平面厚度。

3.2.4.5 传动轴装配

传动轴主要的装配工艺有三件焊接、万向节联接、总成联接、动平衡、表面涂装和总成检验。

1）三件焊接

三件是指万向节叉、轴管和花键轴之间的联接，目前主要采用二氧化碳保护焊、磁弧焊和摩擦焊等，二氧化碳保护焊操作时，要严格控制电流和电压的大小，并使焊枪对准焊缝。磁弧焊和摩擦焊的特点是焊接变形小。

2）万向节联接

万向节和三叉耳孔装配原有外卡簧和内卡簧两种联接方式，但此两种联接方式，总是存在着装配间隙，引起钢碗窜动，为此对要求高速的传动轴，会引起不平衡而产生振动，目前为了减少十字轴总成和三叉耳孔中的间隙，提高动平衡转速，故采用铆压新工艺，即通过延展耳孔孔口材料铆紧钢碗，不仅提高了产品质量，同时大大降低了生产成本。

3）动平衡

根据传动轴的不同用途，在动平衡试验机上对传动轴进行不同转速和克量的动平衡，平衡方式有加重和去重两种。随着汽车行业的进一步发展和各种中高档车型的出现，已提出了多根传动轴联接成一体进行多平面的平衡的要求，如三根联接的传动轴要求四个平面同时进行平衡处理。国内现有传动轴动平衡能力：最高转速6 000r/min，最小不平衡量1.5g·cm，最大转子质量为150kg。

4）喷涂

一般采用喷漆和喷塑两种，主要功能是防锈和提高产品的表面质量，涂装时特别注意不要将涂料进入轴承和花键部位。

5）总成检验

传动轴总成最终检验主要项目有：与客户设备相关的装配尺寸、摆角、万向节传动力矩、动平衡不平衡量及表面质量。

3.2.4.6 检测手段

传动轴零件加工和装配过程中主要采用的检测手段有材料和热处理检测设备、几何尺寸检具及形状检具，如电感量仪、气动量仪、专用（综合）量具、通用量具，同时在精测室应具备投影仪、圆度仪、表面粗糙度仪、长度测量仪和布氏、洛氏硬度计等。（撰稿人：尹 平）

3.2.5 等速万向节

3.2.5.1 制造特征

等速万向节（CVJ，constant velocity universal joint）传动轴主要由固定节、移动节和连接轴组成。其中固定节又称球笼式万向节，主要可分为RF节、AC节和UF节三种，移动节主要可分为VL节、GI节、

AAR 节和 DO 节等。以下介绍其中最具代表性的 RF 节和 VL 节。

RF 节由钟形壳、保持架、星形套和钢球等零件组成，钟形壳和星形套的滚道及保持架的窗孔加工是关键。VL 节又称可轴向移动的球笼式万向节，主要由筒形壳、保持架、柱形滚道星形套和钢球等零件组成。筒形壳和柱形滚道星形套的滚道及保持架的窗孔加工也是关键。连接轴分实轴和空心轴二种，花键加工和热处理是关键。

为适应精益生产，无论是零件加工还是总成装配，生产布局大多采用 CELL 制形式，并采取简易料道和自动输送线相结合的方式，以达到减轻操作强度、实现一人多机、多岗，减少在制品，提高产品质量和生产效率的目的。CELL 制工作方式的平面布局如图 3-2-17 所示。

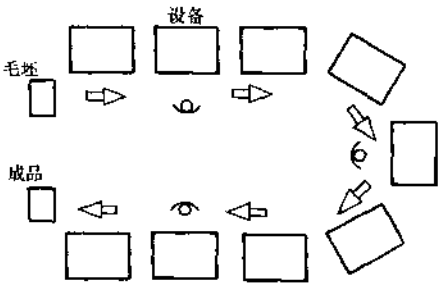


图 3-2-17 CELL 制工作方式

3.2.5.2 毛坯加工

①钟形壳：采用锻造方式，经过棒材切断、加热、辊锻、制坯、预锻、终锻等几道工序，最后进行正火和喷丸处理。

②星形套：采用锻造方式，热锻件经过棒材切断、加热、终锻、切边冲孔等几道工序，然后进行正火和喷丸处理。精锻件经过棒材料切断、加热、温锻、退火、磷皂化、精整等几道工序。

③筒形壳、柱形滚道星形套：也采用锻造方式，工序流程基本同星形套热锻件。

④保持架：主要采用无屑切断、冷成形的工艺方式。也可采用割管后滚压成形的方式。

⑤连接轴：实轴毛坯用棒材。空心轴轴管部分用钢管，二端花键轴一般用冷挤压锻件，空心轴也可用钢管旋压锻造的方式来直接制成毛坯。

3.2.5.3 机械加工

各零件常规加工流程如图 3-2-18 所示。

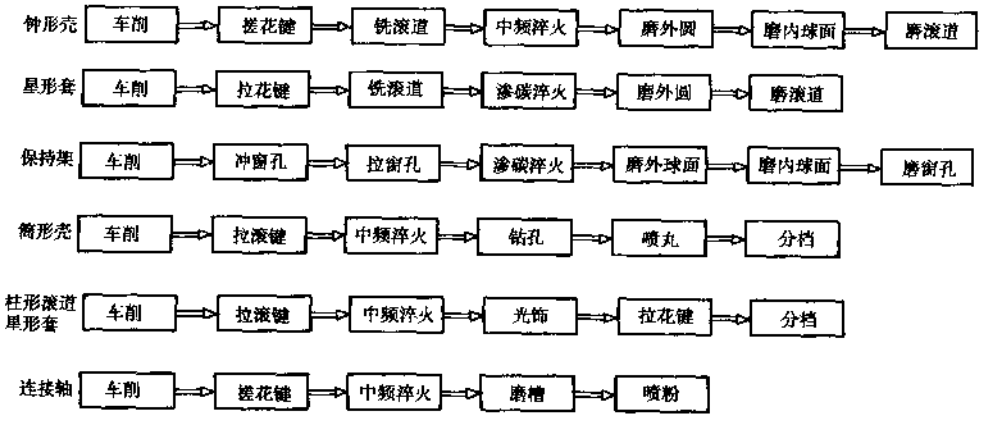


图 3-2-18 主要零件加工流程

1）钟形壳加工

关键工艺有花键搓齿、铣磨滚道、磨内球面、中频淬火等几道工序。对内球面和滚道除采用传统的单机分别磨削外，为保证滚道与球面间的位置精度，现已可用硬车、硬铣（如采用德国 EMAG 设备）或磨削（意大利 NOVA 设备）的方式在同一机床上进行加工。对于滚道的加工无论是用 CBN 砂轮磨削还是用

汽车论坛 http://www.qclt.com

CBN球头铣刀硬铣，其加工方法都是工具高速旋转进给，一条滚道一次进给加工完成，然后工件再分组逐条加工其余五道，加工示意如图3-2-19所示。目前更为先进的制造技术是采用精密锻造工艺直接在毛坯上完成滚道的精加工而无需磨削。

2）星形套加工

关键工艺主要有渗碳淬火、磨外圆和滚道等。滚道磨削加工有二种方式，通常采用工件固定在专用可分度夹具上旋转，砂轮进给同时磨削二条滚道的方式进行，如图3-2-20所示。另一种方式采用砂轮沿滚道轨迹进给磨削的方法，滚道轨迹可数控编程。星形套的滚道也已能用硬铣和精密锻造的工艺方法来完成加工。

3）保持架加工

关键工艺主要有冲窗孔、拉窗孔、渗碳淬火、内外球面磨削、磨窗孔等几道工序。窗孔冲、拉须加工目前也可采用精冲的方式，这样可取消生产线上昂贵的专用拉床投资。窗孔磨削采用六支卧置的CBN砂轮同时进给，先磨下窗孔，再磨上窗孔，工件在磨削时进行圆周小幅摆动的方式进行，如图3-2-21所示。对于窗孔精度要求相对较低的可轴向移动的球笼式万向节保持架，也可采用拉削后控制热处理变形的方法而不进行窗孔磨削加工。

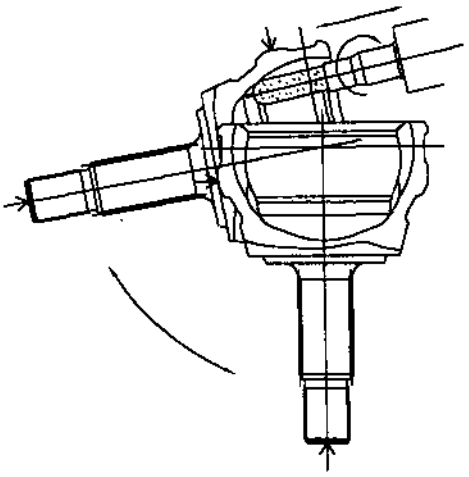


图3-2-19 钟形壳滚道加工

4）筒形壳加工

关键工艺主要有拉滚道、中频淬火、钻孔等。为提高生产效率和保证零件加工质量，拉滚道采用立式自动多工位机床进行加工。同时，为降低制造成本，避免滚道精加工设备的投资，大多采用中频淬火后滚道尺寸分档的方法与柱形滚道星形套配组装配。

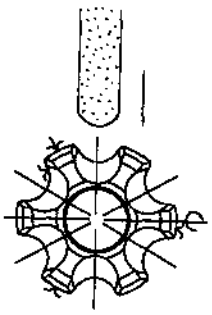


图3-2-20 星形套滚道加工

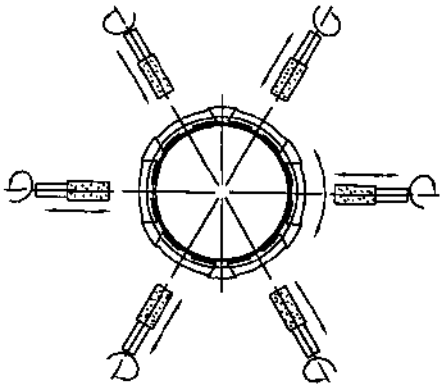


图3-2-21 保持架窗孔磨削

5）柱形滚道星形套加工

关键工艺主要有拉滚道和中频淬火等。拉滚道也采用立式自动多工位机床进行加工。同样，为降低制造成本，也进行滚道尺寸分组选配的方法。

6）连接轴

关键工艺主要有花键搓齿、中频淬火、割槽或磨槽等。花键加工一般采用搓齿工艺，但也已有采用模具进行冷挤成形的制造工艺。中频淬火通常采取扫描式和整体式淬火，整体式淬火的生产效率很高，适合于单品种、大批量生产，而连续式淬火则较适合于多品种、小批量生产。

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.2.5.4 装配检查

一般先装RF节端的挡圈、碟簧、防尘套等，把RF节压至连接轴上，注入油脂并夹箍，然后压上VL节、加油和封住防尘盖。总成的检查除在装配过程中保证油脂量的正确性和压入力等控制在所要求的范围内，对等速万向节传动轴总成在专用试验机上还进行必要的功能试验，主要检测圆周间隙、轴向间隙、移动力、摆角旋转力矩等参数。

3.2.5.5 检测手段

钟形壳与星形套都可采用能自动测量球面和滚道尺寸及其位置精度的测量仪，筒形壳与柱形滚道星形套也是用计算机测量仪进行滚道形状、位置精度的测量和尺寸的分选。

3.2.5.6 其它

固定节三种形式RF、AC、UF节的结构和制造方式基本上大同小异，但移动节四种形式VL、GI、AAR、DO节的结构和制造方式差异较大。GI节（一球销万向节）、AAR和DO节的滚道均为直滚道（VL节为斜滚道），三柱槽壳的毛坯都使用精锻件，机械加工比较简单，主要有车削、拨齿、中频淬火和磨外圆等工序。内部结构为一销轴形式，加工工艺主要采用车削、拉花键、渗碳或碳氮共渗淬火及磨削等方式。（撰稿人：尹 平）

3.2.6 减速装置

3.2.6.1 加工工艺

1）主减速齿轮（见图3-2-22）

①主动锥齿轮：主动锥齿轮的热处理前工序大致包括：粗车、钻中心孔、精车、螺纹加工、冷搓花键、粗精切齿面、倒角去毛刺，加工中心孔时尺寸要求严格控制，并需经研磨以确保后道工序尺寸的一致性，齿形的精加工也需考虑到热处理后的变形，控制热处理前齿形，以使热处理后齿面接触区的位置与长度都应保持在公差范围之内。

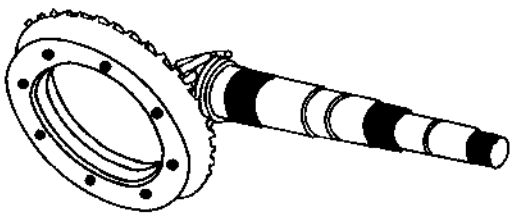


图3-2-22 主减速齿轮副

②从动锥齿轮：从动锥齿轮的热处理前加工工艺大致有：齿坯车削、内径精加工、钻孔、攻丝、齿形粗加工、齿形精加工。

③热处理：主从动锥齿轮加工后均作渗碳热处理，从动齿在热处理时采用压模淬火，另外为提高齿轮强度要按严格的工艺规范进行强化喷丸处理。经热处理的轿车齿轮表面硬度一般为680～780HV30，齿芯部硬度为320～480HV30。

④在完成符合装配要求的内外径精加工后，根据图纸要求的啮合位置和长度进行配对研磨，并作配对标记。

⑤主减速齿轮、齿面接触斑痕的控制。

螺旋锥齿轮接触斑痕的控制比较复杂。一是热前热后因热处理的变形有差异。二是热后的成品检验与变速器实际使用中的情况有差异。因此需经多次反复的试验才能确定切齿时接触斑痕应控制在什么位置，一般的工艺流程是先按常规要求进行切齿加工，经热处理研磨后在变速器中做接触区试验，根据不同载荷的接触斑痕情况来调正切齿和研磨时的接触斑痕位置。一般齿轮在变速器中作满载接触区试验时，要求接触斑痕的长度和高度大于全长和全高的80%，但不可以全长或全高接触。

⑥主动锥齿轮轴上如果有轴承滚道，则必须进行精磨和珩磨，以提高运转的平稳性和降低噪声。是否达到规定要求，需由经专门培训并取得资格的专职人员判定，一般要求噪声不大于76dB（A）。

2）半轴齿轮和行星齿轮

汽车论坛 http://www.qclt.com

半轴齿轮和行星齿轮都是直锥齿轮，其齿形的加工有切削加工和精密锻造二种。在切削加工中常用的有双刨刀刨削和圆拉刀拉削。双刨刀刨削精度高，但是效率低，用于小批量加工。圆拉刀拉削在专用机床上加工，精度虽略低于双刨刀刨削但生产效率高，适用于大批量生产如汽车制造业。精密锻造国内已有几十年的历史，但以前只用于精度较低的直伞齿中，而近年随着精密锻造技术的不断提高，大批量生产的轿车直伞齿也越来越多的使用精密锻造齿轮。精密锻造齿轮虽然精度略低于加工齿轮，但是齿轮的强度得到提高。

3.2.6.2 壳体类

差速器壳体外面安装螺伞从动齿轮，内部安装差速器齿轮，二端柄部安装轴承，壳体材料一般都采用高强度球墨铸铁（QT500-7）。安装从动齿轮的法兰面与二端轴承安装部必须保持垂直，以确保螺旋锥齿轮副的安装精度，同时差速器壳的内球面尺寸应严格控制，以确保侧齿和行星齿之间的啮合间隙。对于带驱动桥的变速器来说，主动锥齿轮也是变速器的输出轴安装于变速器壳体中。变速器壳体的加工在大批量生产中采用生产效率高的自动线。在中小批量和多品种生产中采用柔性加工线，即主要由加工中心组成。

3.2.6.3 装配

1）分类

经清洗的齿轮，壳体进入装配线，差速器齿轮装入差速器中时必须注意到齿轮副的啮合间隙，如果不能达到装配间隙的要求，应需对零件进行预选，确保装配间隙。从动齿轮通过齿背上的螺孔被固定在装有差速器齿轮的壳体上。

2）主减速齿轮的安装与调试

主减速齿轮副的啮合侧隙是有严格要求的，因此在装入变速器之前必须在专用仪器上测出需保证要求侧隙时各处的调整量，以便选择确切的垫片进入正式装配。（撰稿人：方伟荣　蔡若帆）

3.2.7 液力变矩器

3.2.7.1 液力变矩器概述

液力偶合器、液力变矩器都是通过液体动能来传递能量的装置。

液力偶合器仅有一组泵轮和涡轮，所以只能传递扭矩而不能改变扭矩；液力变矩器增加了导轮，可以实现变矩功能。在汽车上得到广泛应用的是液力变矩器，如图 3-2-23。

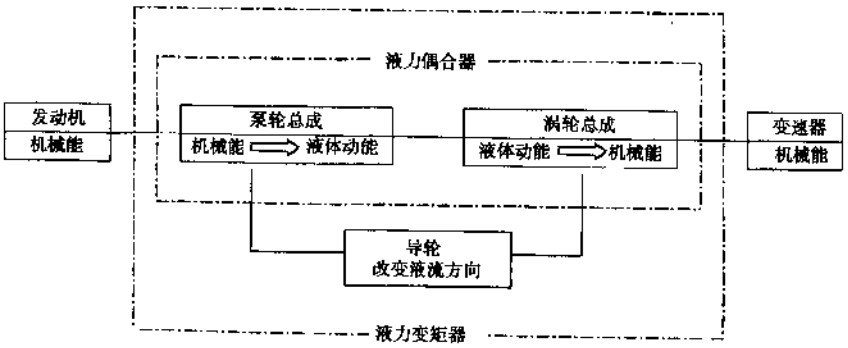


图 3-2-23 液力变矩器的工作原理

液力变矩器是汽车自动变速器中的重要部件之一，它的主要功能为：

①利用液力传动柔性地连接发动机和自动变速器。

②实现无级变速，简化驾驶员操纵。

③可使汽车起步平稳，加速均匀，乘坐舒适。

汽车论坛 http://www.qclt.com

液力变矩器按工作元件的数量不同有三元件、四元件等等。也可根据使用场合的不同，可分为汽车、冶金、工程机械和船舶用液力变矩器等系列。同时根据叶轮制造方法的不同，可分为铸造型和冲压型两种。在汽车上广泛应用的是冲压型三元件综合式液力变矩器，其主要包括泵轮总成、涡轮总成、盖总成、导轮总成和锁止离合器总成（图 3-2-24）。

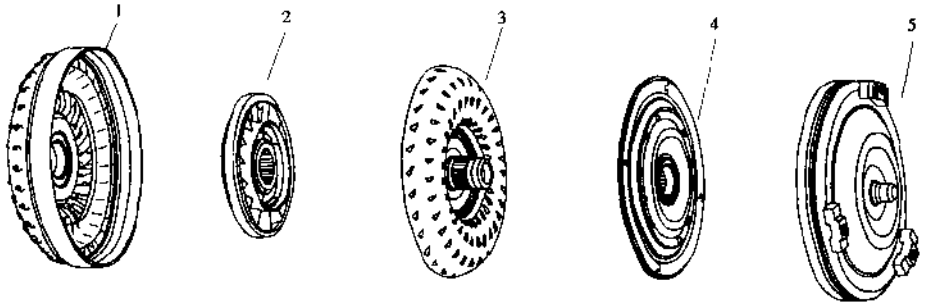


图 3-2-24 液力变矩器总成

1-泵轮总成；2-导轮总成；3-涡轮总成；4-锁止离合器总成；5-盖总成

3.2.7.2 制造特征

具有代表性的液力变矩器的制造工艺如图 3-2-25 所示。

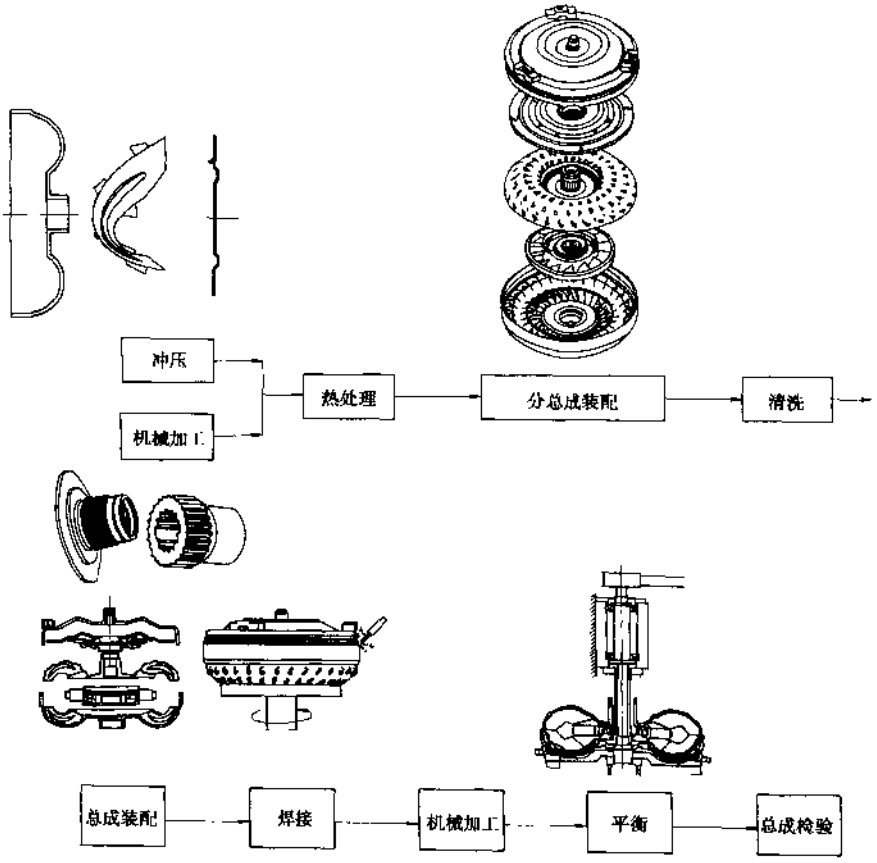


图 3-2-25 液力变矩器的制造工艺

3.2.7.3 冲压加工

1) 盖和泵轮壳

盖和泵轮壳通常采用低碳钢板整体冲压成形或分体焊接连接(图 3-2 26),先进的工艺是在大吨位压力机上经多道冲压成形,从而适宜大批量生产;分体焊接的方式使零件数增加,但是简化了盖的冲压成形工序。

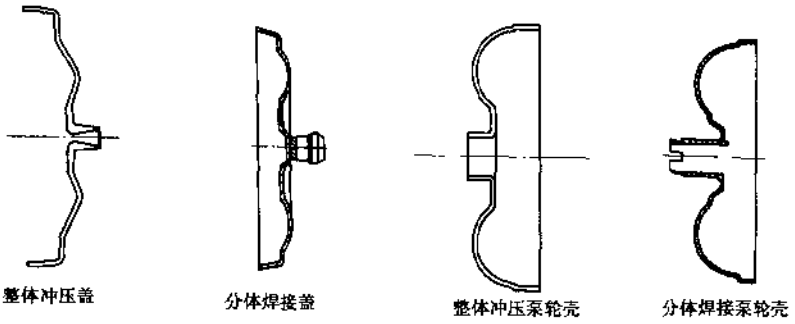


图 3-2-26 盖和泵轮壳的冲压工艺

就泵轮壳而言,质量上最重要的是要保证内腔的线轮廓度要求及零件的壁厚。

2) 叶片

涡轮、泵轮叶片均为复杂的三维空间曲面构成(图 3-2-27),关键是保证叶片曲面的面轮廓度要求和定位爪的尺寸精度。在大批量生产中一般采用级进冲压。



图 3-2-27 泵轮叶片和涡轮叶片

3) 内环、外环

内环、外环关键工艺为成形和冲槽,成形要保证严格的线轮廓度和材料壁厚要求。冲槽需要采用高精度的冲槽模具和专门的冲槽设备。其主要工艺流程如图 3-2-28。

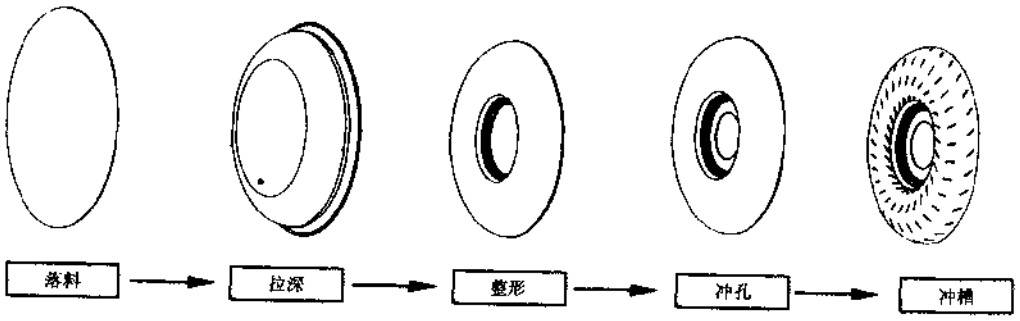


图 3-2-28 涡轮外环主要工艺流程

3.2.7.4 机械加工

1）涡轮轴套的加工

涡轮轴套的主要工序为锻造、热处理、车加工、拉内花键、外花键插齿和表面热处理等。车加工一般采用数控车床，可以保证零件的尺寸精度和表面粗糙度。内花键需经高频热处理以提高耐磨性。

2）油泵轴套

油泵轴套的主要工序为车加工、热处理、滚轧外齿和拉内花键等，零件需经整体热处理。内、外花键表面不允许脱碳。

3.2.7.5 装配

1）盖总成的装配（图 3-2-29）

盖总成主要装配工艺如图 3-2-30。

盖总成装配的关键工艺为连接块和盖的焊接，为了保证生产中的连接块焊接质量，在大批量生产中常采用机器人焊接技术。

车加工通常采用数控车床。盖的摩擦面必须采用抛光，通常可用抛光纸带和抛光盘在专机上加工。

2）泵轮总成的装配（图 3-2-31）

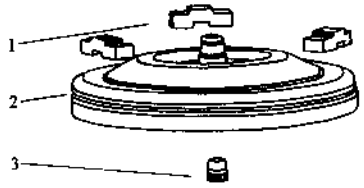


图 3-2 29 盖总成

1-连接块；2-盖；3-油泵轴套

连接块焊接 → 车加工 → 钻孔 → 攻丝 → 抛光

图 3-2-30 盖总成工艺

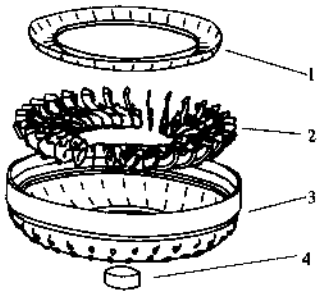


图 3-2-31 泵轮总成

1-泵轮内环；2-泵轮叶片；3-泵轮壳；4-衬套

泵轮总成主要装配工艺如图 3-2-32。

插片 → 滚定位爪 → 铆片或钎焊 → 车加工 → 压衬套

图 3-2-32 泵轮总成工艺

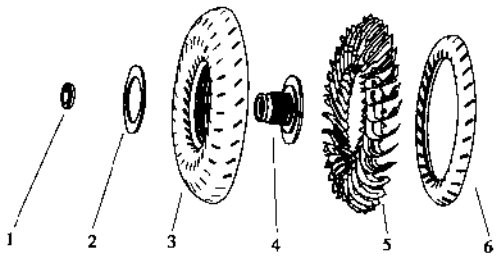


图 3-2-33 涡轮总成

1-止推环；2-加强板；3-涡轮外环；4-涡轮轴套；5-涡轮叶片；6-涡轮内环

泵轮壳和叶片通常有两种连接形式，一种是通过钎焊，将泵轮壳和泵轮叶片连接起来。另一种是采用铆片工艺，即通过挤压泵轮壳金属铆紧叶片。由于叶片数较多，在大批量生产中一般采用专门的插片设备，进行自动插片，以提高生产效率。

3）涡轮总成的装配（图 3-2-33）

涡轮总成主要装配工艺如图 3-2-34。

电子束焊或铆接 → 插片 → 滚定位爪 → 压止推环

图 3-2-34 涡轮总成工艺

汽车论坛 http://www.qclt.com

涡轮外环和涡轮轴套的法兰之间，一般采用铆钉连接或者焊接两种形式。铆钉连接，装配工艺简单，但增加了零件数量。对于焊接连接为减少焊接产生的变形，一般采用电子束焊。

4）导轮总成

导轮总成由卡环、挡板、导轮轴套、滚珠、簧片、楔轮和导轮等零件组成（图 3-2-35）。导轮总成中包括单向离合器分总成，可以实现正向自由旋转，反向锁止。

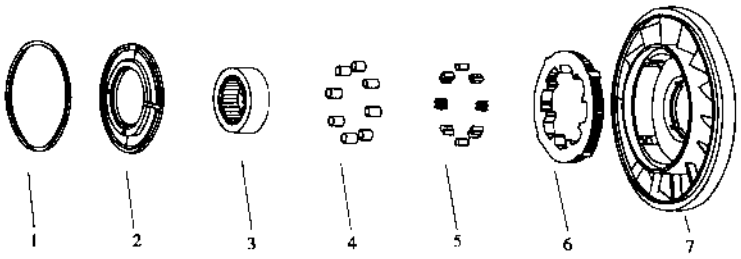


图 3-2-35 导轮总成

1 卡环；2-挡板；3-导轮轴套；4-滚珠；5 簧片；6-楔轮；7-导轮

导轮毛坯由铝合金压铸而成，而楔轮则为高密度粉末冶金件。导轮总成装配的主要工艺有楔轮压入、平衡、装配和检测等。

5）锁止离合器总成的装配

锁止离合器总成由摩擦片、锁止活塞、钢片、轴套板、碟形弹簧、盖板、减振弹簧和铆钉等零件构成(图 3-2-36)。

锁止离合器的主要零件如钢片、盖板等都需要进行下贝氏体热处理。

锁止离合器的装配主要包括装配铆合、平衡、检测等。

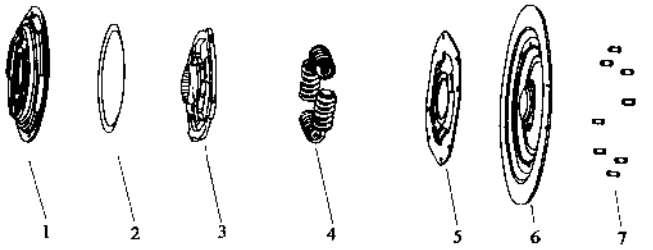


图 3-2-36 锁止离合器总成

1-盖板；2-碟簧；3-轴套板；4-减振弹簧；5-钢片；6-锁止活塞总成；7-铆钉

6）液力变矩器总成的装配

液力变矩器总成的装配工艺主要包括焊接、机加工、平衡和总成检验等。

液力变矩器总成的装配是通过盖总成和泵轮总成的焊接来实现的，目前常用的焊接方法有 MIG 焊、激光焊和填丝电子束焊等，其关键是为了尽可能小的产生焊接变形。同时还需要进行专门的泄漏测试，为了加快测试速度和提高测试精度，目前较先进的测试方法为氦气检漏。

为了保证锁止离合器的正常工作，液力变矩器总成需要进行工况测试，主要是测试拖曳力矩和锁止力矩。

涡轮总成、导轮总成以及锁止离合器总成需要分别进行总成平衡，变矩器总成平衡时，需要将上述分总成不平衡量分离以后再对外壳的不平衡量进行校正，总成平衡需要专门的平衡设备。

3.2.7.6 液力变矩器总成和零件的测量技术

①泵轮壳、内、外环等冲压零件轮廓面的测量：这些轮廓面均为空间曲面，可利用三坐标进行测量，在大批量生产中也可以采用专用量仪。三坐标测量时，需要编制程序，将三坐标测量得到的原始数据和计算机上的数学模型进行比较得到定位槽的位置度的结果。

②叶片定位槽的位置度的测量：可利用三坐标进行测量，在大批量生产中也可以采用综合塞规。三坐标测量时需要将三坐标测量得到的原始数据输入计算机进行处理，然后同标准数学模型进行比较得到线轮廓度的结果。

③叶片的测量：叶片的测量需要设计专用的三坐标定位辅具，借助计算机生成三坐标的测量轨迹，再返

回计算机同叶片的数学模型进行比较，才能得到叶片面轮廓度和定位爪的测量结果。当然，也可以利用一个类似标准叶面的量具，将待测叶片放到此量具上直接对叶片的若干个特征点进行比较测量，从而来指导叶片的冲压生产。（撰稿人：赵永彬　高春明）

3.3 转向机构

3.3.1 转向盘

3.3.1.1 概述

转向盘主要是为掌握汽车方向而设置的机构，随着汽车工业的发展，转向盘在操纵汽车方向的同时也增加了美学概念，即：它既有实用性又具观赏性。

3.3.1.2 构造

转向盘由轮毂、辐条、轮辋和垫块组成，轮毂、轮辋及辐条内部有铁或铝合金制作的内芯。铁内芯通过弧焊、阻力焊接、铆接等方式与各构成零件相连接。随着汽车工业的发展这一工艺已接近淘汰，取而代之的产生了通过压铸成形的方法连接轮毂、轮辋与辐条，内芯也改为压铸成形。采用铝、镁等合金材料通过压铸成形方法，不但简化了转向盘的制造工艺，更为重要的是满足了产品轻量化要求。

轮毂、轮辋、辐条与内芯组成转向盘骨架总成，骨架总成通过注塑成形或发泡成形等工艺组成转向盘本体，对于高级转向盘则在其外侧再包一层皮革，其黏接或缝制几乎全部为手工操作。也有在转向盘本体上印制桃木花纹的。其外皮材质及花纹是根据汽车整体的协调性、创意和机能决定的。

3.3.1.3 工艺

随着汽车工业的发展，转向盘注塑成形工艺已逐步趋向淘汰，代之而取的是聚氨酯发泡工艺在汽车转向盘制造中已广泛采用，聚氨酯发泡是将异氰酸脂等化工原料，按一定的比例通过高压发泡机混合注入模具，经过反应产生发泡产品，目前发泡催化剂使用氟里昂，但由于氟里昂的使用造成大气污染，国外已采用无氟催化剂生产转向盘。垫块也采用转向盘本体成形方法进行生产。此外，转向盘本体与垫块成形时所使用的模具，主要有电铸镍模具、钢模、铝模、树脂模及压铸模等模具，见图 3-3-1。

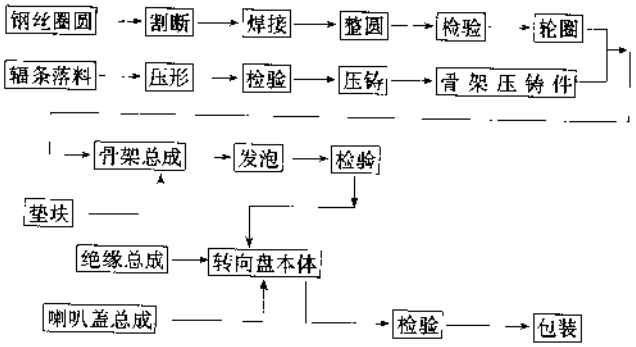


图 3-3-1　转向盘工艺

3.3.1.4 发展方向

随着汽车工业的发展，在汽车领域中，已愈来愈多地采用带有安全气囊系统的转向盘，其主要构成有：气囊、气体发生器、传感器等。一旦车辆发生碰撞，传感器感受信息，控制单元比较、判断信息、指令气体发生器工作为气囊充气，气囊冲出转向盘中部的易碎盖板并完成充气，充满气体的气囊支承、保护人员相关部位。

汽车论坛 http://www.qclt.com

带有安全气囊系统的转向盘主要构成如图 3-3-2.

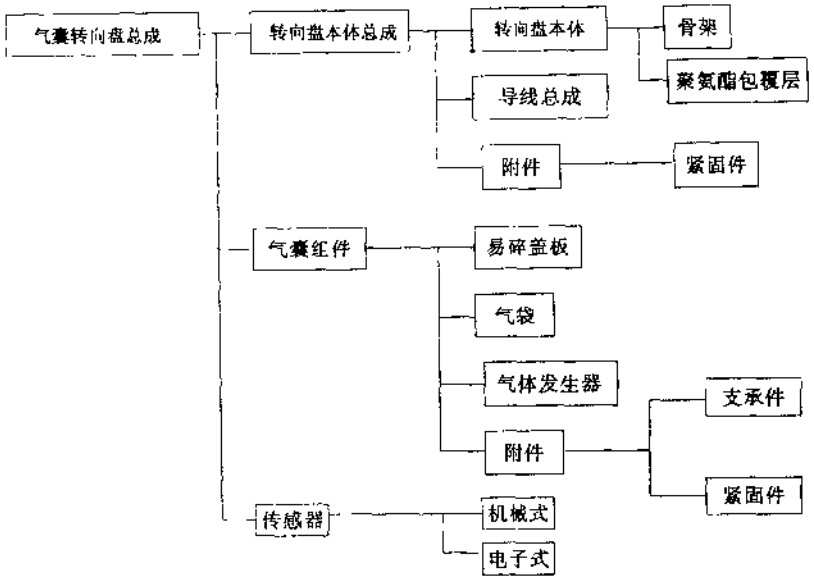


图 3-3-2 安全气囊转向盘工艺

(撰稿人：邹孝元)

3.3.2 转向柱

3.3.2.1 转向柱概述

转向柱将转向盘与转向器相连，驾驶员对方向的操纵是通过转向柱传递给转向器，由此实现汽车的转向。其结构主要由转向上轴、转向下轴以及将其固定于车身的柱式管柱构成。

图 3-3-3 为某转向柱的结构。

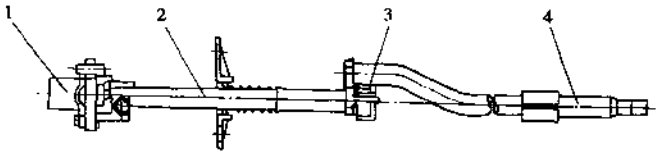


图 3-3-3 转向柱

1-接头；2-下转向轴；3-销钉；4-上转向轴

转向上轴的上端外花键与转向盘毂的内花键相配合，使得扭矩得以传递，发生碰撞时脱销而终止传递。上转向轴与下转向轴连接处的橡胶衬套与销钉在轴向受冲击力最大达 800N 时必须脱开，见图 3-3-4。

目前有些轿车已将转向柱的结构新增加了撞车安全的性能，在撞车时转向盘将连同管柱一起下落，同时安全气囊充气，托住驾驶员上身，使驾驶员免受转向盘的撞击。这种新的转向柱结构除了将转向盘的旋转传给转向器外，新增加了三项功能：

①撞车安全功能；

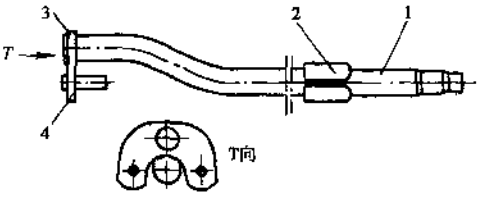


图 3-3-4 转向上轴

1-轴管；2-锁瓦；3-紧固板；4-销钉

②转向盘安装角可调±15°；

③转向盘安装高度可调。

3.3.2.2 主要零部件的加工

1）转向上轴的加工

主要工艺流程如图 3-3-5。

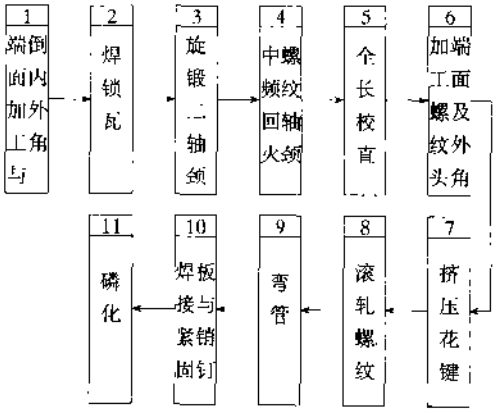


图 3-3-5 转向上轴工艺流程

主要工序介绍：

第一工序加工采用双头套车端面倒内外角专机。

第二与第十工序为二氧化碳保护焊，采用二台机器人焊接专机。焊接采用日本进口逆变型焊接，转台定位误差小于 0.10mm。机器人由微机控制，控制电流在（100±10）A；电压在（19±1）V；CO_2 流量为 15～20L/min，焊枪重复精度控制范围为±0.10mm。

第三工序为精密旋转锻造工艺，旋转锻造工艺是目前最先进的加工方法，这是一种高效率、高精度、节省材料、低成本的冷成形工艺（尺寸精度为 $\phi17.4\pm0.04$mm）。通常有二种加工方法，一种是进料法，另一种是凹进法（中间轴径小，二端轴径大时使用），见图 3-3-6。

旋锻的成形过程为：旋锻头转动时其外圈圆周排列的滚柱每分钟数千次地捶击着四个模爪（或二个、三个），从而不断地挤锻着工件，并使工件纵向进给。工件可随动旋转（也可夹住工件使其不转），见图 3-3-7。

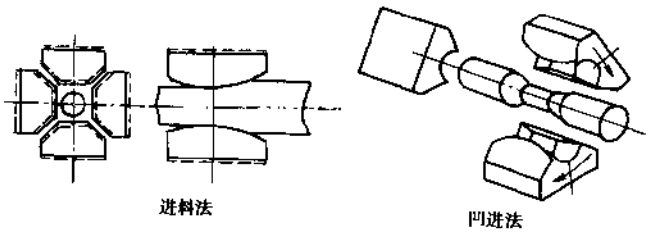


图 3-3-6 两种加工方法

旋转工艺中的进料法，生产效率比凹进法高，且长度尺寸容易控制，能确保长度尺寸精度（46±0.15）mm。而凹进法的颈部尺寸难易控制，它随材料批号的不同而有差异。

第四工序为半自动中频回火（电流

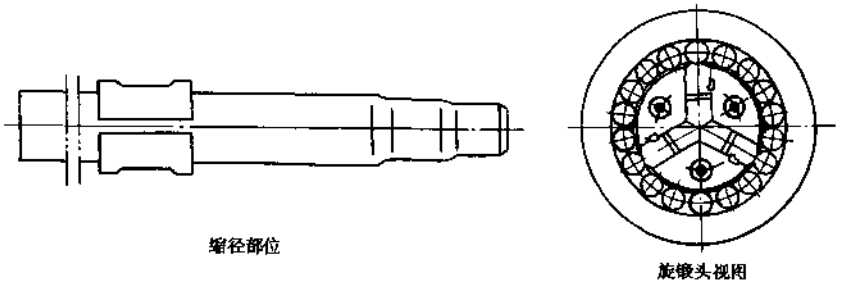


图 3-3-7 旋锻成形过程

$I=35\sim40$A；电压 $U=350\sim400$V，升温 4s，保温 2s，冷却介质为空气），控制硬度为 78～86HRB。无缝钢管经旋转锻造缩径后因旋锻时产生高温而使材料产生应力，如果后续再挤压加工（轧螺纹）必将有 5% 的工件产生裂纹，故需回火处理。

第五工序为点压式校直，目前还有更为先进的数控自动校直机，校直范围内控制圆跳动 0.3mm。

第七工序挤压花键，利用一台卧式花键自动挤压加工设备。对于外花键的加工可有滚花键、轧花键和轴向挤压花键三种加工方法，目前最先进的加工外花键工艺是轴向挤压花键，它不仅效率高而且精度高（表面粗糙度可达 $Ra0.8$ 以上），质量保证。设备的关键在于挤压花键的套模，比套模的渐开线内花键不仅精度要求高，控制任意三个齿距长度内最大累积误差为±0.01mm，粗糙度为 $Ra0.8$，而且要求材料硬度控制在 60～

汽车论坛 http://www.qclt.com

65HRC，故不易加工。套模的寿命可加工18万件，实际上在使用中个别寿命可加工22万件，见图3-3-8。

2)转向下轴的加工(图3-3-9)

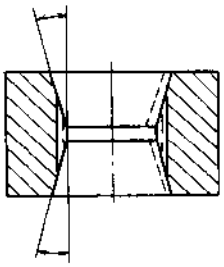


图3-3-8 花键套模视图

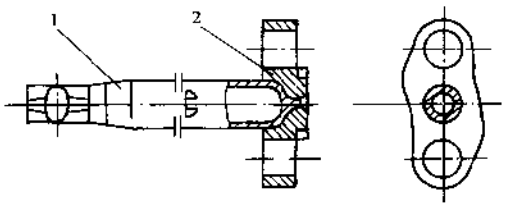


图3-3-9 转向下轴
1-下轴；2-压铸铝合金

主要工艺流程如图3-3-10。

主要工序介绍：

第一工序加工采用自动双端面套车端面倒角专机。

第二工序为自动精密旋转锻造(与转向上轴合用设备)。

第六工序为压铸铝合金，在轴管压扁的一端压铸凸缘部分及凸缘上二孔。

第七工序为自动挤压花键(与转向上轴合用设备)。

第十工序加工采用专用液压机。

3)转向管柱的加工(图3-3-11)

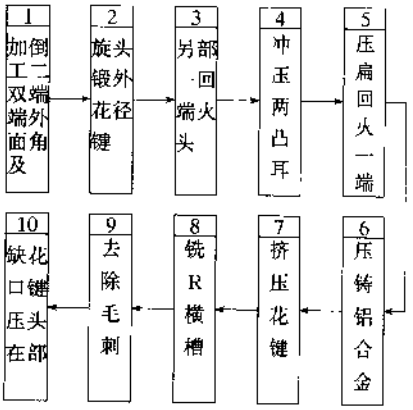


图3-3-10 转向下轴工序

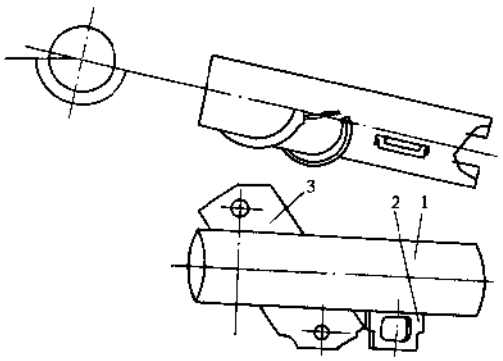


图3-3-11 转向管柱
1-管柱；2-支持板；3-压板

主要工艺流程如图3-3-12。

主要工序介绍：

第一工序采用半自动鼓轮式双端面加工专机。

第四工序为二氧化碳保护焊，使用四工位机器人自动焊专用设备。设备主要控制参数是输入电流和电压，经微机控制输出恒定的电流和电压；机械手位置重复精度为0.10mm。

4)接头的加工(图3-3-13)

主要工艺流程见图3-3-14。

主要工序介绍：

第二工序采用六工位回转加工专机，将内花键孔进行钻、扩、铰、倒角及凸缘平面和二耳孔一次加工成形

（此工序亦可选用加工中心加工）。

第五工序采用四工位鼓轮式加工专机，将横销孔及二端平面倒角和花键孔铣开槽一次加工成形。

第六工序为半自动立式内花键拉削。

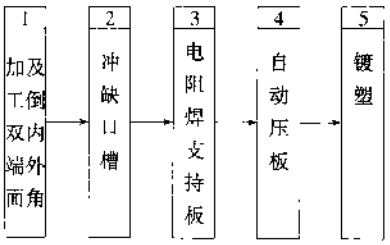


图 3-3-12 转向管柱加工工艺

3.3.2.3 质量检测与监控

对于关键工序必须进行质量监控，设立质量控制点，按工序作业指导书进行操作，进行统计过程控制（SPC），应用统计方法对过程中的各个阶段进行监控，从而达到保证与改进质量的目的。操作工人必须按工序作业指导书所规定的自检频次，进行检测并记录在工序控制图中，供 QC 小组巡回检查，对于比较重要的工序，在工序卡中规定其检测项目每二小时必须自检 5～10 件，对于特别重要的零件必须进行 100% 全数检测。

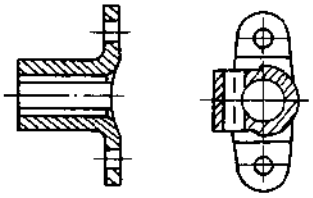


图 3-3-13 转向接头

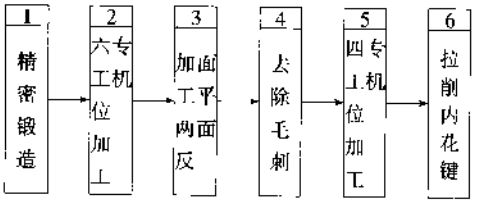


图 3-3-14 接头加工工艺

主要质量控制内容：

①剪切力≥5 000N；

②扭力≥250N·m；

③长度尺寸为 46±0.5；

④角度为 168°±30′。（撰稿人：李家驹）

3.3.3 转向器

转阀式液压助力转向器结构紧凑，响应性好，安全，易于操作，但也对单个零件尺寸、形状、表面粗糙度等提出了较高的精度要求。其主要加工件有：阀套、阀芯、转向齿轮、扭杆和转向齿条。

3.3.3.1 零件加工

1）阀套的加工

阀套为转阀的主要零件，为保证精度，通常采用数控设备进行加工。阀套制造过程主要工序为：钻孔、铣内槽及磨内圆，见图 3-3-15。阀套上的进油孔及出油孔的位置度直接影响到转阀总成的液压特性，采用加工中心一次装夹工件保证了加工精度。具有自动修整砂轮功能的数控内圆磨床，使得阀套的内径圆柱度能达到 0.004～0.006mm。六条内槽位置度将影响液压对称性，通过专用铣床，采用自动分度装置，保证了槽的分割精度在 ±10′ 范围内，并且效率高，能满足大规模生产的需求。

2）阀芯的加工

阀芯是影响液压特性的关键零件，其主要工序为：钻孔、铣凸耳、热爆炸去毛刺、插花键、淬火回火、磨外圆槽控制边、探伤（图 3-3-16）。月牙槽及控制边的尺寸、形状精度要求非常高。阀芯的关键工序为铣凸耳及月牙槽、小孔去毛刺、精磨月牙槽及控制边。加工中心的使用，使得原先分多道工序加工的铣

汽车论坛 http://www.qclt.com

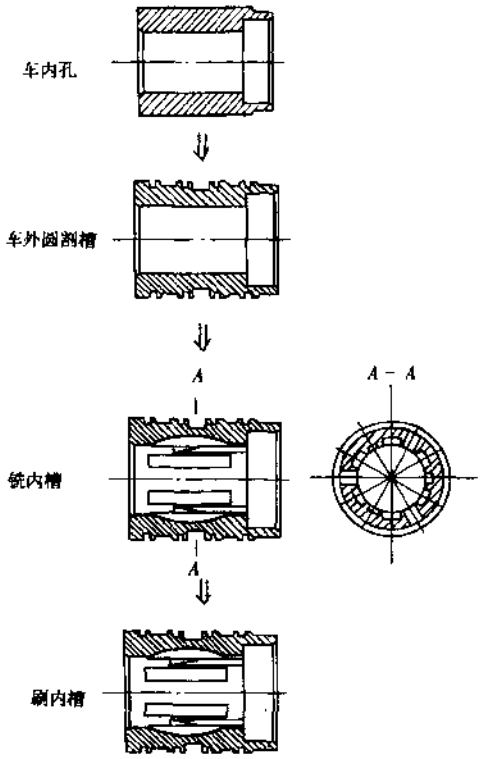


图 3-3-15 阀套加工

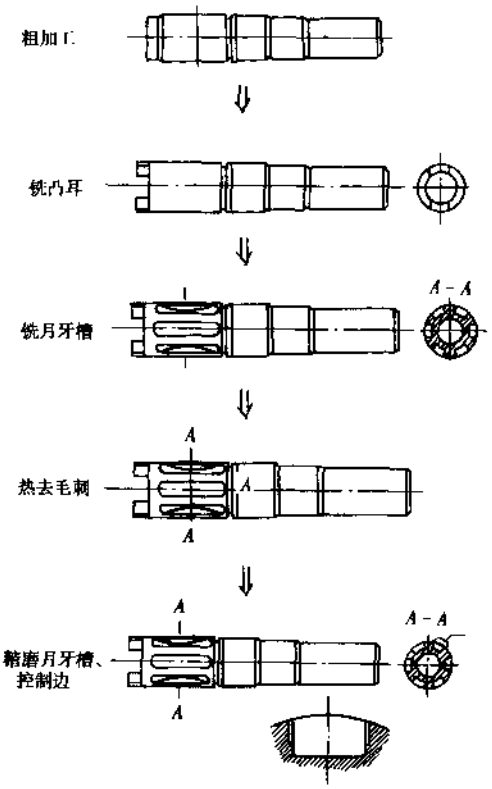


图 3-3-16 阀芯加工

月牙槽、铣凸耳及钻孔一次完成，既保证了槽、凸耳及孔的位置精度，又提高了生产效率。如采用手工方法去除毛刺，不仅效率低下，且孔的尺寸精度难以保证，热爆炸去毛刺工艺即可解决此问题。月牙槽、控制边及外圆的磨削，由于采用专用多工位数控磨床，自动修整砂轮、自动测量工件，精度能被控制在微米级。不合格零件能被自动剔除。

阀芯热处理采用感应淬火。由于设计时对阀芯各个部位的硬度提出了不同的要求，因此通过数控感应淬火机。保证了一道工序即能完成。

3）转向齿轮加工

转向齿轮的齿采用滚齿法加工。通常用两台滚齿机分两道工序进行：先滚齿成形，经渗碳处理后再精滚以达到齿的最终精度要求，避免了由于热处理引起的齿变形而导致齿轮精度下降。

随着新材料的不断出现和热处理工艺的不断进步，热处理引起的齿变形将微乎其微，因此精滚工序可省去。

转向齿轮与扭杆的连接，通过配钻，压入销钉。

4）扭杆的加工

扭杆由毛坯加工成形后，进行感应淬火（图 3-3-17）。

由于整根扭杆被设计成有强度差异，以满足阀特性曲线的要求，因此增加了热处理的难度。为提高效率，目前采用数控热处理设备，先对整根扭杆进行感应淬火，随后按设计要求在不同位置以不同温度回火，实现了扭杆各个位置的强度差异。

5）转向齿条的加工

汽车论坛 http://www.qclt.com

转向齿条的加工采用磨削或拉刀成形。由于齿条兼作油缸活塞杆，因此在热处理后必须增加校直工序以保证零件的直线度。齿条齿面采用电阻法淬火，硬度为52～58HRC。同时为提高轴部油封的密封性，减少密封件磨损，延长使用寿命，齿条轴部先表面镀铬，再进行超精磨抛光，改善了齿条轴部的圆度及表面粗糙度。

随着油封技术的发展和热处理工艺的不断完善，齿条镀铬已被逐步取消，而代之的以表面感应淬火再超精磨抛光。取消高度污染的镀铬工艺，也是环境保护的一大进步。

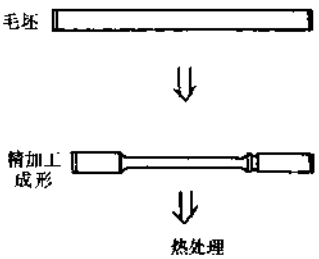


图 3-3-17 扭杆加工

3.3.3.2 转向器装配

液压助力转向器对密封性要求非常高，而高标准的清洁度对保障转向器具有良好的密封性能和可靠的使用性能起着很重要的作用，因此转向器的零件在装配前都必须在专用的清洗设备中清洗。

在装配过程中，特别要避免刮伤或损坏油封和O形圈，以及阀芯月牙槽的控制边，以保证转向器具有良好的密封性及低噪声。

对外购件及配套件要求具有合理清洁的包装，能避免零件的损伤及污染，从而减少装配前清洗的工作量，又能降低装配中零件刮伤O形圈及关键密封面的风险。

1）转阀总成的装配

转阀总成由阀芯、阀套、扭杆及转向齿轮等组成(图3-3-18)。阀芯与阀套的相对位置决定了转阀总成的液压特性。为保证左右扭矩对称(T_L 与 T_R 相等)(图3-3-19)，并符合液压特性曲线要求，需在专用的转阀试验台上对其位置进行调准，调准结束后，在阀套与阀芯上冲出通孔，打入固定销，完成转阀总成装配。

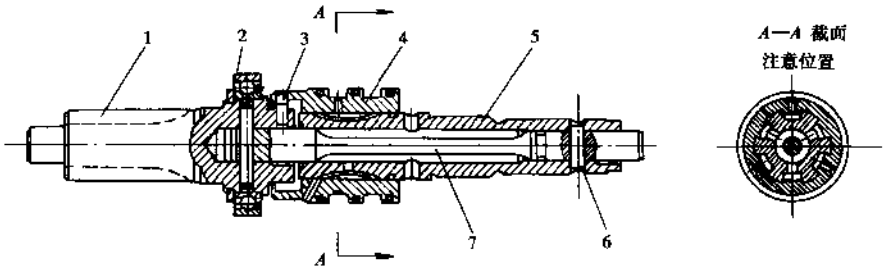


图 3-3-18 转阀总成

1-齿轮；2-轴承；3-固定销；4-阀套；5-阀芯；6-固定销钉；7-扭杆

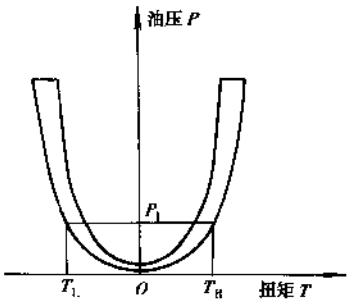


图 3-3-19 转向阀扭矩曲线

2）转向器总成装配

转向器总成的装配是在专用流水线上进行的，线上有挡盖、阀壳的自动装配装置，保证装配扭矩达到要求。在线的气密性检测能阻止气密性不合格的转向器流入下道工序。装配过程如下：

转向器壳体→装齿条→装转阀总成→齿轮齿条间隙调整→气密性试验→总成检验。

总成试验台为检验工序，对每个转向器进行移动力、阀特性曲线、内外泄漏及移动行程的检测，保证出厂前转向器的性能、质量符合要求。

试验条件（桑塔纳2000型转向器）：

油　温：50℃，到油箱回油管的流动阻力 40±10kPa；

油粘度：$17\times10^{-6}m^2/s$；

汽车论坛 http://www.qclt.com

油量：6L/min。

车辆使用的液压油特性数据必须与试验油数据一致。（撰稿人：陈志鑫　黄荫新）

3.4 悬　架

3.4.1 悬架螺旋弹簧

3.4.1.1 螺旋弹簧

汽车悬架螺旋弹簧外观形状须满足弹簧减振的主要功能，具体在满足刚度、负荷、变形外、还有噪声最小化、符合装配空间和装配匹配。常见的弹簧分类有：

①从外轮廓体形看：

有圆柱形、单端猪尾巴形等，见图 3-4-1。

②从节距上看：

悬架螺旋弹簧有等节距、单端不等节距、双端不等节距等。

③从作用圈材料上看：

有钢铁材料、钢铁材料和高分子材料复合，高分子材料的应用有助于降低噪声、保护表面涂层（图 3-4-2）。

④从不同的安装方向看：

螺旋弹簧端圈形状有螺旋形、部分端圈平面形、部分磨削端圈平面型，见图 3-4-3。

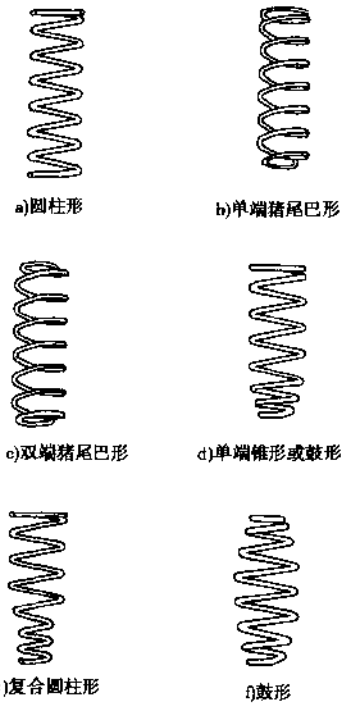


图 3-4-1　悬架弹簧

3.4.1.2 悬架螺旋弹簧的力学特性类型

图 3-4-4 和图 3-4-5 分别是恒刚度、变刚度的悬架螺旋弹簧力学特性曲线。

变刚度的目的是使汽车在正常行驶中具有好的柔性和舒适性，而在受到冲击载荷时又具有高的抗力。

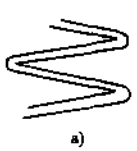


图 3-4-2
a)钢铁材料；b)钢铁和高分子复合材料

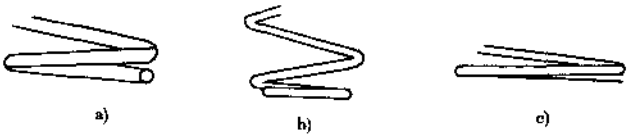


图 3-4-3
a）螺旋形；b）部分端圈平角形；c）部分磨削端圈平面形

3.4.1.3 汽车悬架类型弹簧常用的材料

1）常用材料的种类

悬架类型弹簧常用材料种类有：Si-Mn，Cr-Mn，Si-Cr，Si-Cr-V 系列低合金弹簧钢。国产材料 GB1222，60Si2MnA，60Si2CrA，55SiCr 等。美国 SAE9259，SAE9254，德国 54SiCr，54SiCrV，日本 SUP7，SUP12 等。近来螺旋弹簧向高应力、轻量化发展。国外已应用新一代高强度弹簧钢，这种高强度弹

汽车论坛 http://www.qclt.com

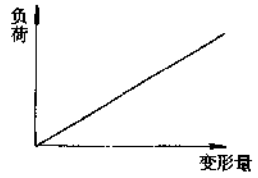


图 3-4-4 恒刚度

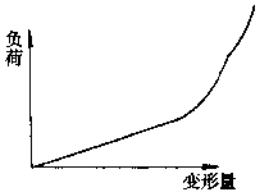


图 3-4-5 变刚度

簧钢是在上述弹簧钢，特别是 Si-Cr 钢基础上添加 V、Ni、Mo 而得，从而提高钢材的强韧性。目前国外已开发了更高强韧性材料，它是通过添加 V、Ni、Mo、Ti、B、RE 多元素综合作用来达到更高的强韧性。

2）常用材料的状态

螺旋弹簧成形加工工艺一般分为热成形和冷成形方式。不同的成形工艺方式采用不同的材料状态。

①热成形方式：采用热轧态、退火态、冷拔态材料。除了保证线径和圆度外，特别要求材料表面质量好、无缺陷（一般都须经过涡流探伤）、表面无脱碳或只极少量的脱碳，有些还须经过表面磨光或剥皮压光处理。

②冷成形方式：采用油淬火回火或感应淬火回火状态材料。在退火态及冷拔态基础上进行专业的热处理加工，以达到与产品相对应的性能要求，如强度、塑性、硬度、韧性、缠绕性能和严格的表面脱碳要求等，注重表面质量，热处理后一般都须经过涡流探伤。另外，此种材料的状态处于不稳定状态，因而常有规定的储存期（自然时效期）。

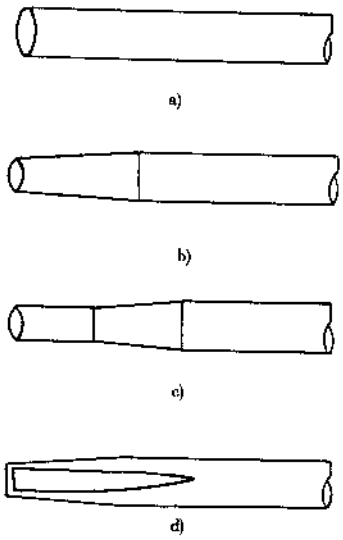


图 3-4-6 常见材料形状

3）常用材料的形状

①等圆截面线材：绝大多数悬架弹簧都采用等圆截面线材。

②部分连续变圆截面线材：材料直径上实施锥形加工。

③分段等圆截面线材。

④端部特殊成形线材，见图 3-4-6。

3.4.1.4 螺旋弹簧生产工艺

螺旋弹簧生产工艺方式主要有二种，热成形生产工艺和冷成形生产工艺。

1）热成形生产工艺

（1）落料

将材料根据产品工艺需要精确其长度。目前国际上流行由供货厂做到精确落料，精度一般为 ±2mm，端截面平整无毛刺；表面端要加工的材料则无需此工序。

（2）加热

一般常用电阻加热炉或燃烧炉。目前也有开始使用感应加热。由于加热温度较高，所以一般都需可控气氛，防止氧化脱碳。在生产线方式上一般均采用连续式或步进式加热炉。

（3）热成形和淬火

热成形一般都采用有芯卷绕方式，节距由相应的成形导向模来控制。目前计算机控制节距方式已被广泛使用。高温状态的材料经有芯卷绕成形后，抽出立即投入淬火油槽。若螺旋弹簧的两端需小圈成形时，则需分步成形。第二端小圈应在另外一台端圈成形机（俗称猪尾巴成形机 Pigtail Forming Machine）进行热成形后才淬火。

（4）回火

汽车论坛 http://www.qclt.com

热成形淬火后需立即进行回火处理，一般都采用连续式或步进式电阻加热炉，具有良好的温度控制和均匀化，从而使产品达到所需的综合性能。回火出炉后或热压工艺后需较快的冷却，以防止产生回火脆性。

(5) 热压（热态调整）

一般利用回火后的余热进行热态调整的压缩，强化其抗松弛性能，有利于提高疲劳强度。

(6) 喷丸强化

喷丸工序使弹簧在表层形成有益的残余压应力。常用的喷丸方式如图 3-4-7。

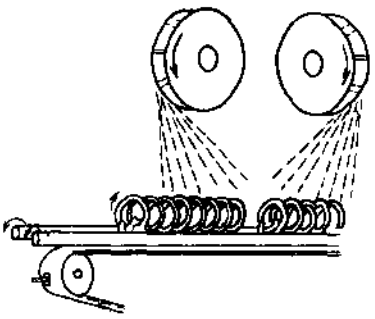


图 3-4-7 喷丸方式

弹簧在二根滚杠上旋转同时以连续方式通过喷丸区域。一般采用两抛轮反向喷丸以达到弹簧表面喷丸覆盖面的均匀化。衡量喷丸强化效果的方法是用阿尔曼试片检查喷丸覆盖率和喷丸强度，以及用应力测试仪检测弹簧表层的残余应力大小和深度。目前国际上开始应用多方式喷丸（Multiple-Shot Peening）工艺，以达到更高、分布更合理的残余应力。

(7) 冷压（常态调整）

喷丸后产生的压应力会使弹簧弹力减弱，冷压工序是通过超大载荷的压缩，有时是多次压缩，可以消除弹力减弱现象，同时可提高弹簧的抗松弛性能。目前热压和冷压工序同时采用的较多，但也有单纯采用热压或冷压工艺。

(8) 磁粉或超声波探伤

此工序是检查出因不恰当热处理产生裂纹、表面创伤或原材料本身存在的裂纹等缺陷。一般采用荧光磁粉探伤或超声波探伤。若原材料质量保证，热处理控制保证，则可以不需要此探伤工序。有时也有把此探伤工序放在回火热压后进行。

(9) 表面预处理和表面涂装

表面预处理主要是对弹簧进行清洗、磷化处理、干燥处理。一般大都采用悬挂链喷淋或浸淋方式进行。表面涂装常采用粉末静电喷涂和固化处理或阴极电泳涂装。由于粉末喷涂具有更好生产调节和更换柔性，因此，目前前者应用较为广泛。一般采用聚酯和环氧混合粉末，也有采用纯聚酯或纯环氧粉末。

(10) 装配和质量检测

有些悬架弹簧在其工作圈或支承圈上安装有高分子材料（聚胺酯类）的碰撞套或平面套。一般采用热熔胶或压敏胶粘合工艺。

在生产线上的质量检测，最主要的是对负荷、刚度进行检测和负荷分组，使悬架弹簧装配后总体精度提高。

2) 冷成形生产工艺

(1) 冷卷成形

油淬火回火或感应淬火回火线材在弹簧自动卷簧机上，一般由数控方法一次成形完成。具有高的效率，但在线材直径上受到限制，一般直径小于 14mm。

(2) 回火

通过回火消除冷成形中所产生内应力，稳定弹簧的形状尺寸，但不减弱材料本身所具有的强韧性。

(3) 自冷压开始至成品的工序

与热成形工艺完全一样，在冷成形工艺中若采用探伤工艺则采用涡流探伤方法，并放置在冷成形工艺中（即对原材料进行涡流探伤），其余工艺流程中无需再进行探伤工序。

3.4.1.5 悬架螺旋弹簧生产工艺中的质量控制

悬架弹簧的生产方式有：集成式全自动生产线和制造岛式生产线，但其质量控制环节基本相同，主要在影响弹簧的主要外形参数、负荷、寿命等工序上进行在线控制（或称质量控制点），质量控制点的设置与产品的重要性和要求有关，同时也与生产工艺方法有关，但被客户指定的关键产品特性（Key Product

汽车论坛 http://www.qclt.com

Characteristic）工序上必须设置质量控制点。一般设置：

1）热成形生产线

①热成形淬火后回火前——主要检测弹簧装配尺寸和外形尺寸（工艺性参数）等。

②喷丸工序——主要检测喷丸工艺效果，喷丸强度、表面覆盖率等。

③压缩工序后——弹簧装配尺寸和外形尺寸等。

④负荷、刚度检测工序——此工序本身就是质量检测作用，主要是100%负荷控制测试和分组。

2）冷成形生产线

①冷成形工序后——主要检测弹簧装配尺寸和外形尺寸（工艺性参数）等。

②与热成形生产线一致。

质量控制点上采用的方式一般是SPC（统计工序质量控制），一般采用的记录和分析方法是X—R图。今后随着智能技术的发展，这些质量控制点都将成为生产闭环处理系统的采样点进行计算机自动分析、动态反馈调整工艺控制参数。

3.4.1.6 悬架螺旋弹簧产品的发展对生产工艺要求

①现代悬架弹簧的发展趋势之一是变刚度、变刚度的目的使汽车在受冲击载荷时具有高的抗力。此设计计算是非线性力学问题，在生产工艺上可以采用变中径、变节距、变线径方式来获得，从而在其成形加工时其几何尺寸要求更加精确。

②现代悬架弹簧的发展趋势之二是同力学性能下其体积更小，如变线径腰鼓形悬架弹簧。因而造成其成形加工复杂，而且几何尺寸要求更精确，才能保证其负荷刚度要求。

③现代悬架弹簧的发展趋势之三是减小悬架弹簧在使用过程中存在的噪声。一般采用聚胺酯材料碰撞套和端圈平面套来降低噪声，保护表面涂层。在工艺流程中加入装套工序，除了对碰撞套和平面套及粘合剂有特殊要求外，还须考虑高分子对弹簧负荷和刚度的影响。

④现代悬架弹簧的发展趋势之四是弹簧的刚度、负荷精度要求更高。现在一般都达到了刚度偏差5%，负荷3%，因此工艺上一般都采用了智能技术，用传感器在工序上采样并动态反馈到前影响工序上进行自动控制调整。

⑤现代悬架弹簧的发展趋势之五是弹簧的轻量化。90年代末悬架弹簧的最大工作剪切应力都超过了1140MPa，要保证其产品质量可靠性除了选择高强韧性材料（一般是Cr-Si、V、Mo等系列）外还要注重强化工艺，如超高温度热处理、快速感应加热热处理、多方式喷丸强化、热压工艺等。

⑥现代悬架弹簧的发展趋势之六是弹簧表面涂层质量要求高。由于现代悬架弹簧的工作应力相当高，因此对弹簧表面的要求也高，不能受到任何的伤害。涂层质量要求高具体表现在不光要求抵抗标准盐雾腐蚀试验，还要考虑气候影响即温度变化、湿度变化的耐蚀能力，低温下涂层与基体的结合力、抗石击试验等，最终还要衡量弹簧在盐雾状态下的疲劳试验。

所以现在一般的阴极电泳不能满足其要求，而通常采用粉末喷涂，即磷化处理后进行复合层粉末涂装工艺。

3.4.2 减振器

3.4.2.1 减振器概述

减振器是汽车悬架的一个主要组成部分，其功能是缓和车辆因路面不平而引起的振动，提高行驶平顺性，保证乘员的舒适，降低车体各部分的动应力，从而增加车辆的使用寿命，并有效地衰减车轮的振动，使车轮更好地贴合地面，保证车辆行驶安全性和操纵稳定性。

3.4.2.2 减振器的类型

①单筒充气减振器。

汽车论坛 http://www.qclt.com

②双筒充气式减振器。

③双筒式液压减振器，结构如图 3-4-8 所示。

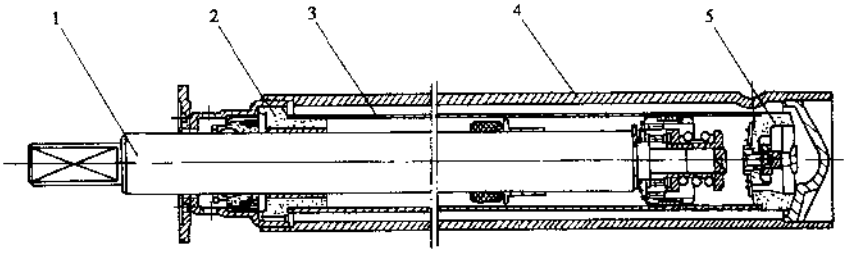


图 3-4-8 双筒式液压减振器

1 连杆活塞总成；2-导向油封总成；3-缸筒；4-贮液筒总成；5-压缩阀总成

由内外两个筒所组成，内筒称为缸筒，外筒称为贮液筒，两筒内均注入一定量的专用减振器液。主要结构为导向油封总成、连杆活塞总成及压缩阀总成。导向油封总成起导向与密封作用，活塞总成用来产生复原阻力，压缩阀总成起产生压缩阻力和补偿油液的作用。

双筒式减振器目前在国内外减振器领域中占统治地位。

④麦弗逊滑柱式减振器，结构如图 3-4-9 所示。

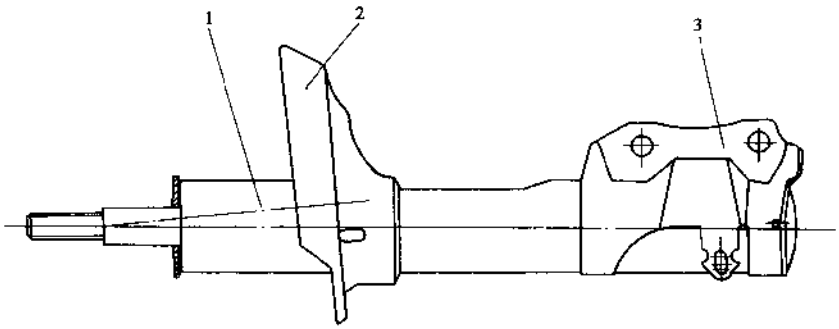


图 3-4-9 麦弗逊滑柱式减振器

1-减振器本体；2-弹簧座；3-夹箍

此结构的减振器在悬架系统中作为一个杆件来使用，即把双横摆臂的上摆臂略去，使减振器兼有减振和强度构件的作用（连杆兼作转向主销）。

目前从全球范围来看，轻型汽车前悬架机构的结构形式比较单一，其发展趋势较为明朗，采用麦弗逊滑柱式减振器已居主导地位。

⑤阻尼力可调式减振器。

由于控制机构相当复杂，造价昂贵，目前只有极少数高级豪华小客车才应用。

3.4.2.3 典型减振器制造

减振器不管是那一种结构形式，其主要的零部件基本类似，大部分采用冲压、粉末冶金、精密拉管等高生产率的加工方法，故很适合于大量生产，制造成本很低。

1）管类加工

（1）缸筒的加工（图 3-4-10）

各种减振器其缸筒的原材料：均采用冷轧钢管，轧制后管材内径尺寸精度为 H8，粗糙度 $Ra0.4$，壁

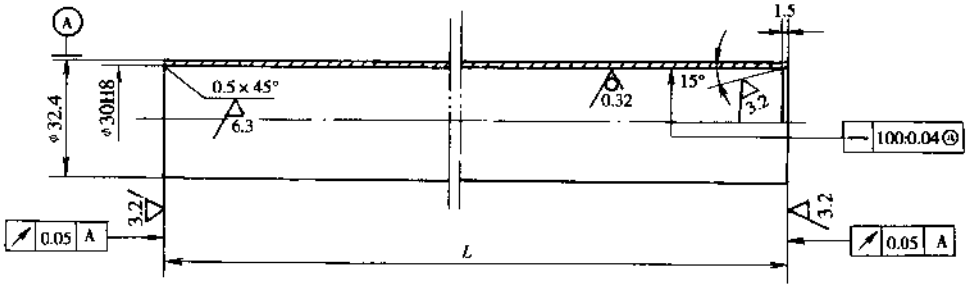


图 3-4-10 缸筒

厚公差小于±0.10mm，形位公差均由管材在轧制时已控制好，因此对缸筒进行加工，其关键工序为车两端并保证总长 $L\pm0.10$mm，和控制对内孔的端跳为 0.05mm，并倒内外角，加工可在三轴自动车床上进行。车切的夹具采用弹簧夹头。并用长度量具和端跳量具，直线度量具（用长 100mm，直径为 $\phi29.96\pm0.005$mm 的塞规能自由通过）等专用量具进行质量检验和控制。

（2）贮液筒的加工（图 3-4-11）

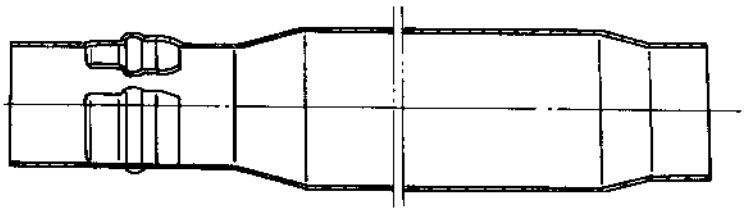


图 3-4-11 贮液筒

其关键工序为：两头缩口和胀三凸台，采用半自动液压缩口专用机床和缩口模、胀三凸台模、感应退火等工装装备，具体工艺流程如图 3-4-12。

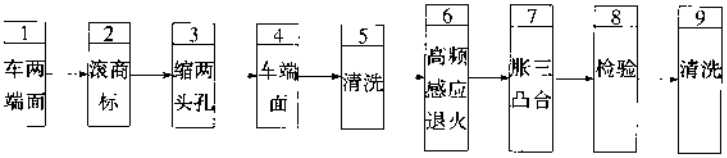


图 3-4-12 贮液筒工艺流程

2）轴类加工

典型零件如连杆见图 3-4-13。

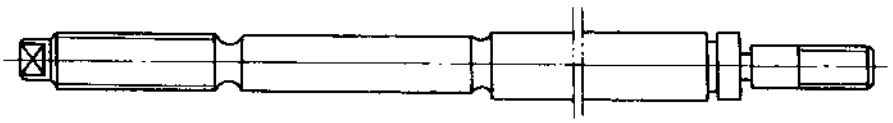


图 3-4-13 减振器连杆

连杆是减振器中最重要的元件，它的功能是与导向衬套（采用耐磨性良好，摩擦系数小的三层复合材料，

即 DU 衬套)作相对高频往复运动,尤其是麦弗逊滑柱式减振器,其连杆兼作转向主销的作用,承受较大的侧向载荷,使连杆表面与导向衬套孔的磨损加剧。连杆一般采用 35# 优质碳素钢,为了提高疲劳强度和耐磨性、抗腐蚀性,表面采用高频淬火和表面微裂纹镀铬,镀铬层厚度(15±5)μm,微裂纹条数 100～400 条/mm。机械加工采用高精度高效率的进口六轴车床来加工两端小头,该车床主轴回转精度为 0.02mm,旋转平稳,机床主轴最大转速大于 1 500 次,故工件切削后粗糙度可达 $Ra1.6$。夹具采用专用弹性夹具,刀具为专用成形刀具,故切削效率高,定位精度、重复上下料精度小于 0.05mm。外表面采用自动连线的无心磨床组进行磨削,系采用宽砂轮,回转平稳,大流量冷却液,并用磁性纸带进行过滤,工件自动上下料,除附有自动检测装置,并能将检测结果反馈给主机,从而使砂轮得到自动补偿,因此磨削尺寸精度小于 0.005mm,精糙度为 $Ra0.1$,直线度 0.01mm。表面镀铬后,最后表面进行超精振动研磨,粗糙度达 $Ra0.03$。

其加工工艺流程如图 3-4-14。

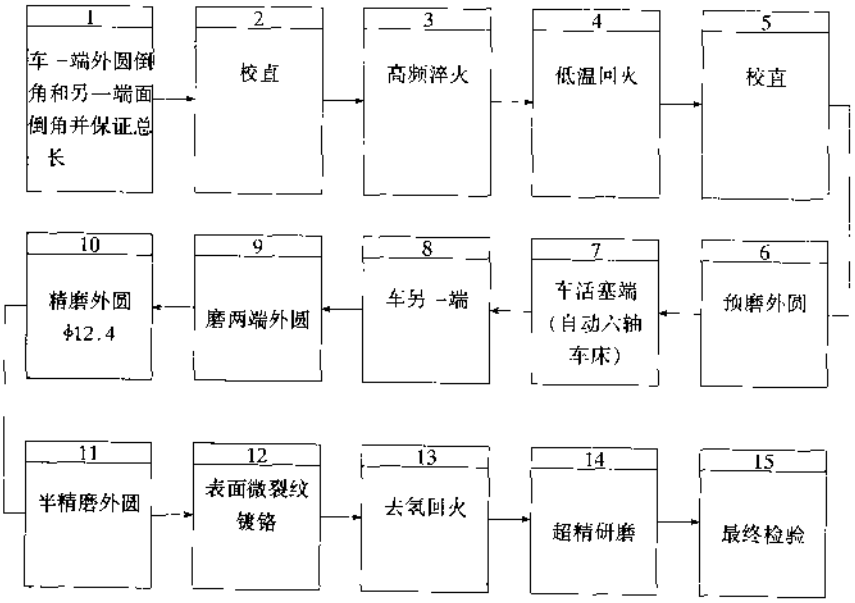


图 3-4-14 贮液筒连杆工艺

连杆在加工过程中主要采用的检测手段:

表面高频淬火硬化层深度 IHT400=0.70～0.95mm,表面硬度 69～75HRA;

几何尺寸的测量检具:有圆度仪和表面粗糙度仪。

金相显微镜测镀铬层硬度≥900HV 及微裂纹条数 100～400 条/mm,以及外观肉眼观察。

3) 焊接加工

典型零件如图 3-4-15 所示。

焊接设备:采用逆变型焊机,机械人操纵重复精度达±0.10mm。

焊接方法:采用 CO_2 气体保护焊,焊丝直径 φ1.2mm。

焊接质量控制:

①焊接强度:在拉力试验机上进行,抗拉强度要求大于 30kN;

②密封要求:在密封性试验台上进行试验,压力为 0.6MPa,并保持 3s,不得有漏气现象;

③尺寸及形位公差检测:±0.10mm;

a. 长度尺寸:长度测量仪,尺寸控制为±1.0mm;

b. 角度控制:角度测量仪,角度要求为±4°;

c. 位置度控制:在位置度测量仪上进行,控制精度为±1.5mm。

4) 装配

①压缩阀分总成装配（图 3-4-16）。

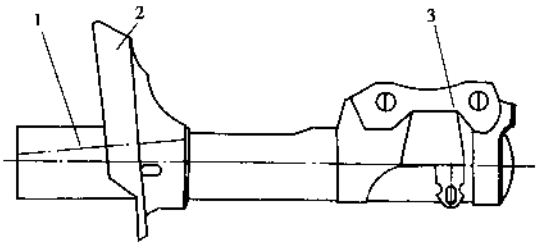


图 3-4-15 贮液筒焊接总成
1-贮液筒；2-弹簧座；3-夹箍

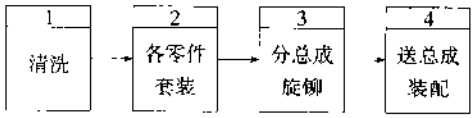


图 3-4 16 压缩阀分总成装配

②连杆、导向器、油封、活塞总成（图 3-4-17）。

③总成装配、油漆（图 3-4-18）。

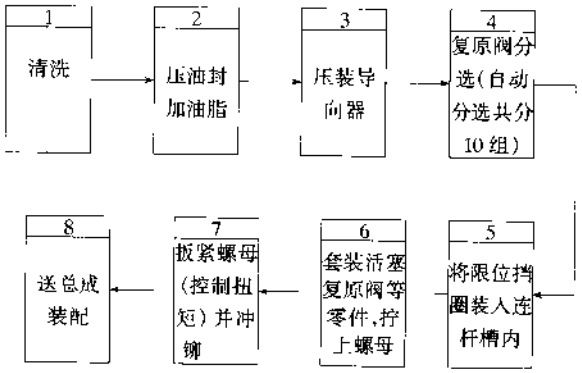


图 3-4-17 连杆等总成装配

3.4.2.3 质量保证

①对缸筒的加工，主要保证其总长 $L\pm0.10$mm 及两端面跳动，控制范围为0.05mm，由相应的长度、端跳量具检测。

②对贮液筒的加工，主要保证其总长、两头缩孔及胀凸台后的外径等，由相应的量规检测。

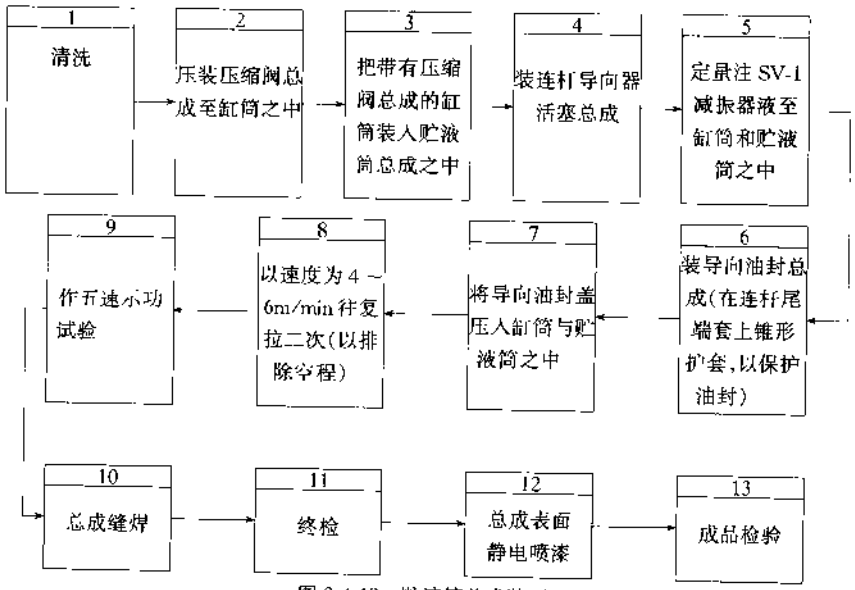


图 3-4-18 贮液筒总成装配

③对连杆的加工，主要保证其表面热处理后的硬度、镀铬质量及其几何尺寸要求，由相应的硬度测量仪、金相显微镜、圆度仪和表面粗糙度仪等来检测。

④对总成装配应保证复原阻力和压缩阻力，且示功图丰满圆滑，不得有畸形等异常现象。由在线的五速示功机来检测（示功机一般带报警装置）。对总成油漆，一般进行外观检验，漆膜应均匀，无明显的针

汽车论坛 http://www.qclt.com

孔、皱皮、流痕、漏漆等现象，涂层厚度大于20μm，定期进行盐雾试验，要求连续试验96h，无裂缝痕迹，无气泡，母材无腐蚀。（撰稿人：阮曼仙）

3.4.3 球铰链接头总成

在部分独立式悬挂的前、后悬架上使用的球铰链接头总成为重要的安全零件（又称保安件），因此，为保证质量，在生产工序上应做充分地考虑，做到安全标识正确、准确，质保文件存档备查。

1）接头

经过热锻、冷锻、冲压成形、制造加工出毛坯之后，进行切削加工。加工的主要工艺为车大孔、车反平面、探伤等。大孔的精度要求公差在+0.02～0.10mm，材料和热处理为重点。

2）球销

采取的主要方式多是对冷锻件、冷挤压件进行机械加工，尤其是对于锥式连接型来说，由于其尺寸精度对稳定疲劳限度非常重要。因此，对冷锻、冷挤模的要求较高，进行机械加工时对零件的表面粗糙度要求亦较高。主要工艺为钻中心孔、仿型车全型、探伤等。其精度要求公差在－0.01～0.008mm左右，圆度公差在0.012～0.008mm，表面粗糙度$Ra0.2$～$Ra0.4$，并视客户需求进行些特殊加工。

3）球座

目前，国内外使用聚甲醛、聚氨酯弹性体等合成树脂具有弹簧作用的结构在增多，这种结构对球座的形状，材料在设计上的要求较高，由于必须在稳定的精度下成形，为此，模具制造时的精度和注塑机的优劣成为重要的管理项目（该结构另有一优异的特性，无需重复加油润滑）。

4）防尘罩

采用耐油、耐水的优质橡胶进行成形加工，其对整个总成稳定疲劳限度非常重要，因此，材料和模具制做为重点。

5）底差

落料成形，打标记。

6）装配

装配应视球铰链接头总成的结构不同而不同，以旋转铆压和直接铆压为多，为防止错装、漏装等现象发生，各工序还应装有扭矩、摆动角等的全数测量仪器。

图3-4-19表示球铰链接头总成装配的实例。

3.4.4 下摇臂

下摇臂是轿车前桥的组成部分，其主要功能是联接发动机托架（副车架）与悬架。

目前较多的下摇臂采用冲片焊接结构，再压入联接部的橡胶轴承，即可完成下摇臂的制造。

主要工艺流程如图3-4-20。

1）冲压

壳体采用冲压成形，工艺如下：落料、成形、切边、翻边、冲孔。套管切割后，亦用冲压翻边。冲压时，为了提高冲头的使用寿命，冲头表面镀钛（提高硬度及耐磨性），镀层厚度一般为2μm左右。冲压过程中，要注意材料的拉伸性能、耐粘附性。由于冲压质量主要靠设备、工装、模具来保证的，故模具及设备的维修保养十分重要，见图3-4-21。

2）焊接

采用焊接将壳体与套管联接，目前主要采用二氧化碳气体保护焊。为确保焊接产品的精度，对焊接热引起的热变形应充分加以考虑。在使热量输入稳定的同时，应通过调整焊接顺序，选用合理的焊接夹具（焊接夹具的精度控制在±0.2mm），对变形进行控制。另外，为了保证焊接质量，焊接部位的冲压件的配合也非常重要，将间隙尽可能控制在0.8mm以内是确保焊接质量的重要方法之一。焊接已大都采用焊接机器人，焊接机器人的位置重复精度为±0.1mm，确保了焊接行走轨迹的准确、稳定；另外，机器人控制系统中设置有焊接参数自动匹配程序，以及摆焊、自动填充收弧弧坑、自动重起弧、自动校核管伸长等多

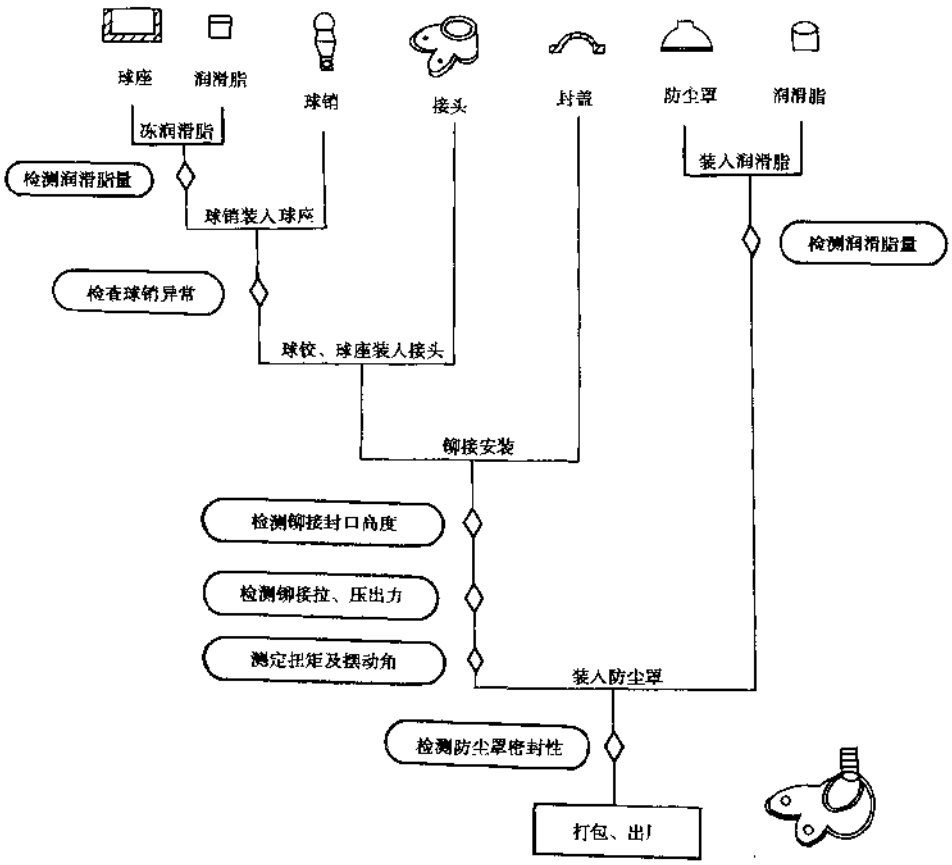


图 3-4-19 球铰链接头总成装配

项功能，使得焊缝质量得以保证，并减少人为因素影响，稳定质量，提高设备柔性。

3）涂装

现较多地采用阴极电泳油漆。涂装主要是为了防锈和提高表面质量。涂装工艺有涂装前的清洁（除锈、油等）、上吊具、预脱脂、脱脂、热水清洗、活化、磷化、清洗、钝化、去离子水清洗、烘干、强冷、检验等。涂层的质量主要有涂膜厚度、粘附性和脆性及耐腐蚀性等，不同的产品有不同的质量标准，一般涂层厚度内侧≥25μm，外侧≥35μm；粘附性和脆性至少 CT0-1（网格刻划试验等级），耐腐蚀性通过盐雾试验 60 次循环，刮痕的损伤深度≤2.5mm。涂装质量取决于涂膜的特性和化学覆盖膜的特性，主要通过对设备、对温度、对涂膜的化学成分的监控来保证。

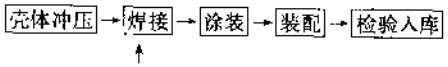


图 3-4-20 下摇臂工艺

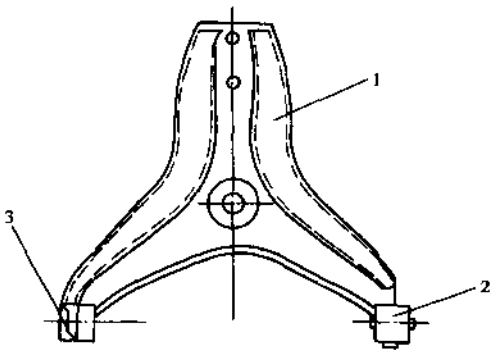


图 3-4-21 下摇臂

1-壳体；2-套管；3-橡胶轴承

4）装配

下摇臂的装配就是在套管中压入橡胶轴承。采用液压机床压装。为了不影响橡胶轴承的特性，压入时使用与其形状配合的夹具，为方便压入作业，

汽车论坛 http://www.qclt.com

有时也在压入部位涂抹润滑油脂。压入橡胶轴承的质量是由脱开力来保证的，脱开力的大小由产品图纸来确定，从1 000N到7 000N不等。对于压入力与脱开力的关系，应在事先进行确认，在检查压入力时，采取由装在压入设备上的相应传感器来完成。

5）总成检验

下摇臂总成最终检验，主要项目有与下道工序和设备相关的装配尺寸及表面质量（包括焊缝表面质量以及油漆表面质量，如：有无焊缝缺陷，有无飞溅，有无油漆磕、碰伤，剥落等）。

6）质量保证

下摇臂冲压、焊接、涂装及装配过程中主要采用的检测手段有几何尺寸检具和形状检具。如：专用（综合）量具，通用量具及测量漆膜厚度的测厚仪等。另外，由于下摇臂有熔深要求，应具有相应剖切设备。

7）生产技术新动向

随着对产品质量要求的不断提高，下摇臂产品已开始采用锻铝件，可以提高柔韧性及刚性，同时可以减轻重量，减少变形。锻铝件球接头连接部一般为锥形孔，对加工精度要求较高，故多用锥形铰刀进行机加工，尤其是铝合金，还要配合工件形状，对切削油也要考虑。

3.5 制　　动

3.5.1 制动钳

3.5.1.1 概述

随着汽车不断向高功率发展，汽车制动减速度增加，对制动钳强度的要求也逐步提高。制动钳壳体和支架多采用球墨铸铁，其中有的制动钳支架强度牌号比壳体牌号高。为达到汽车轻量化，最近几年国际上亦开始使用铝合金材料制造壳体和支架，活塞使用工程塑料，摩擦片使用高强度耐磨碳素纤维。

制动钳的加工工序主要有机加工、表面保护和装配。

机加工工序主要有拉削、钻、攻丝、铣、车等，在机加工后，还进行壳体和支架的表面保护处理，表面保护处理的方法铸铁有镀锌、涂漆、粉末喷涂，铝合金材料为阳极氧化。

机加工方式主要有两种，国外因每种产品的批量很大，故多采用专机加工，具有效率高、人员少的优点。国内因每种产品的批量不大，多在10万套左右，且引进车型繁多，制动钳种类亦多，为降低投资风险，故多采用通用机床组成加工线，以便当产品更替时，只需更换夹具即可。

3.5.1.2 制造工序

在机加工时，工件的夹紧定位很重要。如工件有拉削工序，则多以已拉削面作后道加工的定位基准。如工件无拉削工序，则多采用一次装夹完成全套加工。图3-5-1表示制动钳壳体的机加工工序简图。

壳体：拉削定位基准→铣轴向定位基准→加工放气孔→加工进油孔→加工连接孔→铣外摩擦片支撑面→加工活塞孔。

图3-5-2表示制动钳支架的机加工工序简图。

支架：拉削摩擦片滑槽→全套平面、孔加工。

3.5.1.3 装配

由于制动钳是汽车上的安全件，因此每个总成在装配过程中都需进行一系列检测，检测合格的总成的检测记录需保存15年。

装配流程：密封圈安装、防尘罩安装、放气螺栓初装→防尘罩吹气、放气螺栓、制动膏检查→放气螺

汽车论坛 http://www.qclt.com

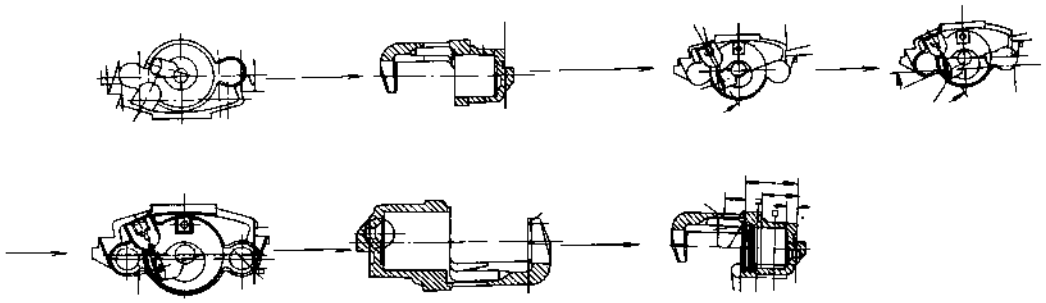


图 3-5-1 壳体加工



图 3-5-2 支架加工

栓旋紧、活塞安装→200MPa 高压试验→低压试验→橡胶衬套、开口导向套管、塑料套安装→支架、摩擦片、摩擦片弹簧片、螺栓安装→最终检查、隔垫和防尘帽安装。

在装配过程中，装配线自动对放气孔通畅性、活塞安装力、螺栓拧紧扭矩、高压密封性、摩擦片安装尺寸等进行检测，以保证装配好的制动钳完全符合要求。检测记录由计算机保存，以备查询。

所有的在线检测均采用压缩空气作为媒介，这种干式检查方式非常有利于整车厂的抽真空加液。

3.5.2 制动防抱死装置（ABS）

3.5.2.1 概述

在传统制动系统中由于制动压力过高而造成的车轮抱死严重影响着汽车的安全性能。当前轮抱死时，车辆将失去转向能力；若后轮抱死，则会导致车辆产生侧滑，甚至出现甩尾现象，其后果更为严重。为防止车轮抱死，保证车辆在各种不同附着条件下制动时既能获得最佳制动效能而同时保持良好制动稳定性及可转向能力的防抱死制动技术（即 ABS 技术）在近 15 年来得到了突飞猛进的发展。国产 ABS 产品 MK201 外形照片见图 3-5-3。

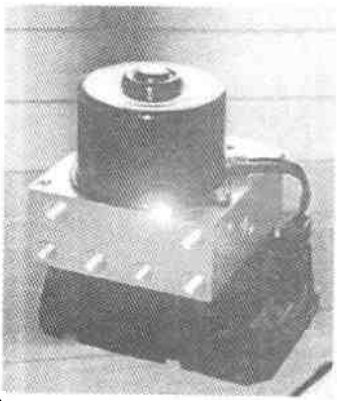


图 3-5-3 MK20I 外形照片

3.5.2.2 MK20 的产品技术特点

作为世界上最新一代 ABS 装置，MK20 在优化 ABS 控制功能，完善安全监控系统以及小型轻量化方面采用了一系列先进技术，概括起来有：

①硬件采用整体式模块结构设计。液压控制单元与电子控制单元集成于一体，体积小，重量轻，成本低。整个装置质量不到 3kg，体积仅为（153×132×100）mm，见图 3-5-4 及图 3-5-5。

汽车论坛 http://www.qclt.com

②采用高级语言（C语言）编写的控制软件程序以模块方式加密固化在电子控制单元中。不同车型可根据自身技术参数任意调用和组合程序模块以获得最佳的控制效果，这样一个硬件可应用于多种不同车型。

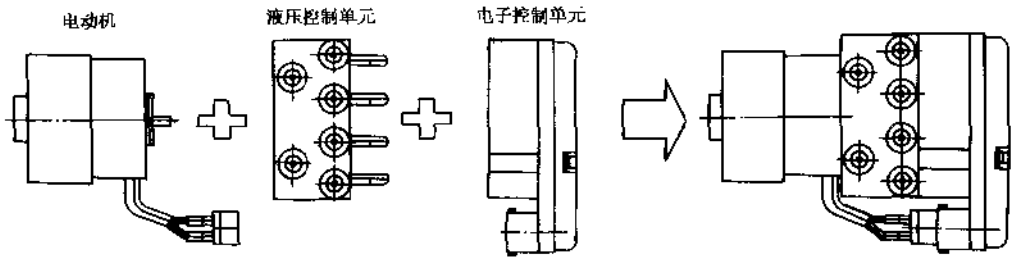


图 3-5-4 ABS模块装配结构图

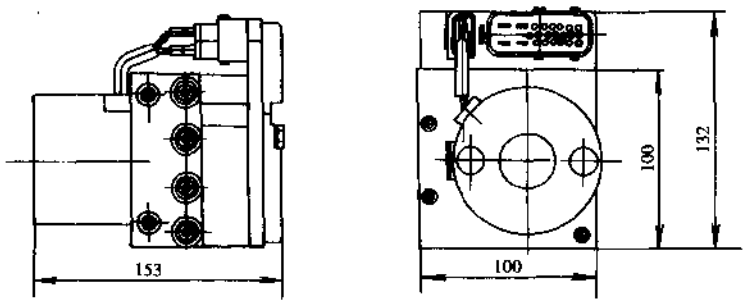


图 3-5-5 MK20I的外形尺寸

③电子控制器采用数模混合的微电子集成技术，内外部通讯均通过总线实现。电磁阀线圈集成于电子控制器内，省去了电磁阀线圈与控制器之间的连接电线，大大提高了系统的抗电子干扰能力。采用大功率集成电路直接驱动电磁阀及泵电机，省去了较占空间的电磁继电器。

④两个微处理器以不对称冗余方式工作，可以识别控制系统的任何错误，包括系统的逻辑错误。对于重要的传感和执行元件，如电磁阀、传感器、电动机等设有定时信号监控，从而保证了系统的高可靠性。

⑤不增加任何硬件，通过更改软件程序即可实现电子制动力分配（EBV）功能，同时很容易实现驱动打滑控制（ASR）功能的扩展。

⑥控制器内部具有故障存储功能，随车带有故障诊断接口，借助专用仪器可方便地进行故障诊断和排除。

3.5.2.3 MK20的阀体加工

安装各个液压元件且形成液压控制单元内部液压回路的阀体是ABS最重要的零部件之一。MK20阀体采用特殊的铝合金材料制造。由于阀体内多孔相互交贯，结构复杂，且对内孔表面的耐磨性能及整体的防腐性能和洁净度有着很高的要求，因而它的机加工和后处理比较特别。

宽度和厚度尺寸及公差已符合产品图纸要求的铝合金型材，经化学成分检验合格后入库存放。采用圆盘锯下料后按检验程序进行检验，之后在数控加工中心上加工所有的孔，孔的尺寸精度及表面质量由计算机控制和保证。计算机可根据流水线上的托盘识别不同的产品，因此数控中心在同一时刻可加工不同的产品，适应于多品种生产。

汽车论坛 http://www.qclt.com

阀体机加工完成后，紧接着进行清洗。清洗过程包括以下步骤：首先用水以4MPa的压力冲洗，之后用中性洗涤剂以200MPa的压力洗涤，之后用纯水以20MPa的压力清洗，最后在1MPa压力以下进行真空干燥。

阀体清洗以后即进行热爆去毛刺，在大于1 000℃的高温下利用甲烷和氧气混合燃烧所产生的爆破力去除阀体的机加工毛刺。

后处理的最后一道工序是表面阳极氧化，用硫酸和草酸混合液将阀体冲洗两遍后，进行表面及内孔阳极氧化处理，但电磁阀安装孔除外。之后再重新进行两次酸洗后再次进行阳极薄膜增密，最后在1MPa压力以下进行真空干燥。

3.5.2.4 MK20液压电子控制单元的装配

MK20ABS装配流程（见图3-5-6）主要特点有：

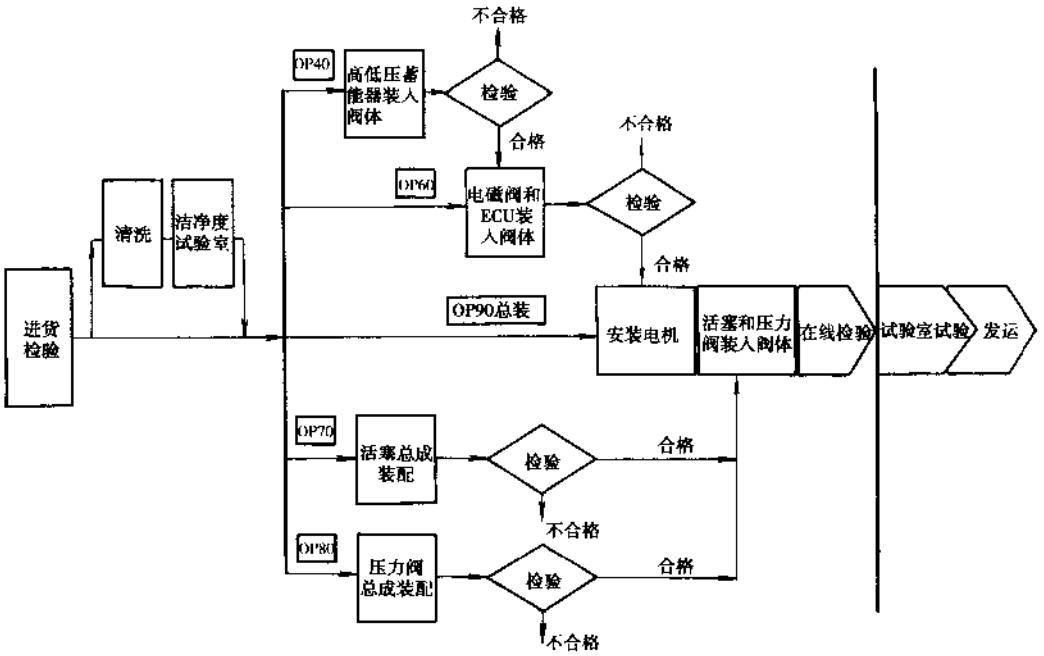


图3-5-6 MK20 ABS装配流程

①整个生产线全部采用计算机控制，自动化程度高。每个工位装配后由计算机控制的测量检验设备进行100%的检测，检验结果可用光盘保存15年。

②电磁阀与阀体采用材料变形技术挤压装配，省去了橡胶密封件，系统的密封性能可得到彻底保证。

③所有在线检查，包括密封性试验和最终检查的功能试验，均采用压缩空气作为试验媒质，这种干式检查方法非常有利于汽车制造厂的加液排气。（撰稿人：王志煌 金海东）

3.5.3 制动摩擦片

3.5.3.1 制动摩擦片性能

当前国际上比较先进的摩擦材料，是新型的无石棉有机物基摩擦材料，该种摩擦材料因为其独特的配方，而具备了以往半金属基摩擦材料所无可比拟的优良性能，见表3-5-1。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 3-5-1 两种配方的基本组成

	半金属基摩擦材料（以桑塔纳 2000 原摩擦片为例）	无石棉有机物基摩擦材料（以桑塔纳 2000 新型摩擦片为例）
金属含量	60%	30%
增摩剂	30%	55%
粘接剂	10%	6%
合金纤维	—	9%

通过以上的比较看出，有机物基摩擦材料在配方上相对于半金属基摩擦材料有着巨大的改进，这也就决定了其在性能上也必然有着巨大的进步。概括而言，由有机物基摩擦材料生产的制动片在性能上具有如下的使用性能：

①配方中金属含量的大幅减少，大大改善了摩擦块在制动过程中因质地太硬而产生对摩擦副的损伤，同时也减少了摩擦热量向制动系统的传输，保证了制动系统的正常工作。

②由高分子有机物组成的粘接剂含量的减少，使得该摩擦材料高温抗热衰退性能得以大大提高，从而具有良好的耐高温性能。

③增摩材料的大量使用使得制动片在制动过程中平稳性相当好，且无任何不良的制动噪声。

④独特的烧烤工艺（对制动片摩擦表面的高温处理）使其在跑合之前既已获得稳定的摩擦性能，因而具有非常好的跑合性能。

⑤在使用过程中不会产生任何有害气体和粉尘。

⑥合金纤维的运用及金属含量的减少，使得该摩擦材料具有良好的耐腐蚀性。

⑦良好的摩擦磨损特性和抗热衰退性能，在很大程度上延长了制动片的使用寿命。

3.5.3.2 摩擦片的工艺流程

摩擦片是由背板、粘接剂、摩擦材料和副件四部分组成。除摩擦材料之外，其它组成部分的质量好坏对摩擦片的作用性能也有直接的影响。因此在这里有必要逐个加以解说。

①底料/面料储存：是指在保证一定的温度和湿度的条件下，且不超出保质期的情况下保存原材料的过程。

②钢背作为摩擦片的骨架，它的强度将直接影响到摩擦块总成的强度。

③喷砂处理的目的是使钢背的表面无锈迹、无油渍、无灰尘及形成一相对凹凸的表面，以便于用作粘接剂的树脂能牢固地吸附在上面。

④涂胶是将树脂溶液均匀喷涂于钢背表面。

⑤干燥是指在一定的温度条件下，树脂溶液中的酒精溶剂充分挥发，使钢背表面树脂处于初始固化状态。

⑥热压成形的机理是指在加热加压的条件下，树脂经一个由固态到液态（可塑性状态）再到未完全固化状态的过程，使摩擦材料颗粒间相互粘合而固化成形。钢背表面的粘接剂也同样经历这样一个过程。因此一定的温度、压力和时间对热压成形的过程意义十分重大。

⑦热处理过程是指在一定的温度条件下，使摩擦材料充分固化的过程。它同热压成形一样，作为摩擦片生产的特殊工序，对刹车片的性能起着至关重要的作用。

⑧磨削工序目的是使摩擦片有一个符合要求的尺寸。

⑨烧烤是一独特的表面处理工艺，目的就是使摩擦片在装车之前既已获得一个相对稳定的摩擦性能，且烧烤后的摩擦表面性质又十分有利于跑合。

⑩气铆工序虽然不是特殊工序，但涉及到的弹簧、铆钉等的装配强度及使用寿命，均直接关系到制动系统整体的使用性能和安全性。

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑪喷漆、打印、和检验包装作为辅助工序，也都在一定程度上对摩擦片的生产和使用起着一定的作用。

摩擦片的工艺流程图见图 3-5-7。

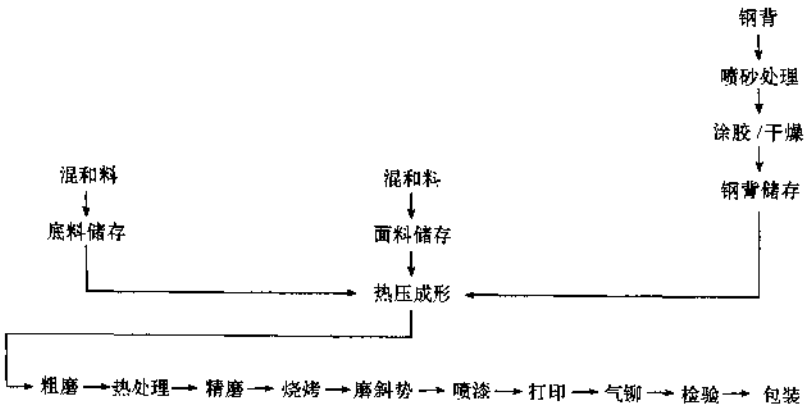


图 3-5-7 摩擦片工艺流程

3.5.4 制动主缸、真空助力器

3.5.4.1 制动主缸

1）概述

制动主缸是轻型客货车、轿车等车辆中与真空助力器匹配使用的主要液压制动部件。其功能是输出高压制动液，经制动硬管、制动软管、轮缸，最后推动轮缸活塞，带动制动钳或制动蹄，以产生制动力，实现车辆的减速或停止。由于是汽车主要安全件之一，所以对其零、部件的加工、装配均有非常严格的要求。

制动主缸结构、类型有多种，目前大多数的制动主缸结构如图 3-5-8 所示，由主缸缸体、第一活塞、第二活塞、皮圈、弹簧等零件组成。结构为串列双腔，一腔失效时，另一腔仍然有效。

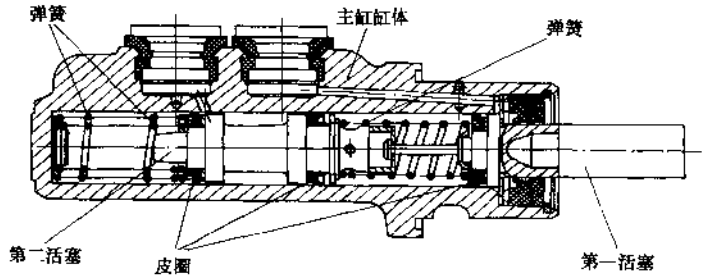


图 3-5-8 制动主缸结构示意图

2）零件制造

①缸体中橡胶件因为直接影响密封性能及产品寿命，必须由高水准的专业厂定点生产。橡胶件要具备耐高温和低温的能力，一般为 -40～+120℃，其使用寿命一般为 25 万次以上。

②弹簧、螺栓等零件一般有各专业厂定点生产。

③活塞是制动主缸中的主要零件之一，其主要外圆的精度为 d7 或 d8，表面粗糙度为 $Ra0.4 \sim Ra0.8$，材料为铝合金并经冷拉淬火时效硬化或挤压淬火时效硬化处理。制造方法一般为机械加工，由数控车床或

汽车论坛 http://www.qclt.com

多轴自动车床（大批量年产 100 万件以上）、磨床等设备组成柔性加工线，机械加工后再进行表面阳极氧化处理，氧化膜厚度从几个微米至 30μm 不等，以提高耐蚀性和增加使用寿命（至少可使用 25 万次以上）。

主缸缸体精度高，主缸孔精度为 H8 至 H10，表面粗糙度 $Ra0.4 \sim Ra0.8$，少数产品要求 $Ra0.2$，圆柱度为 15～20μm，为深孔。主缸缸体结构较复杂，所以加工工序较多，特别是 $\phi0.7$ 补偿孔有 $R0.2 \sim R0.4$ 的内圆角，需安排独特的反冲内圆角工序。

一般结构如图 3-5-9 所示。

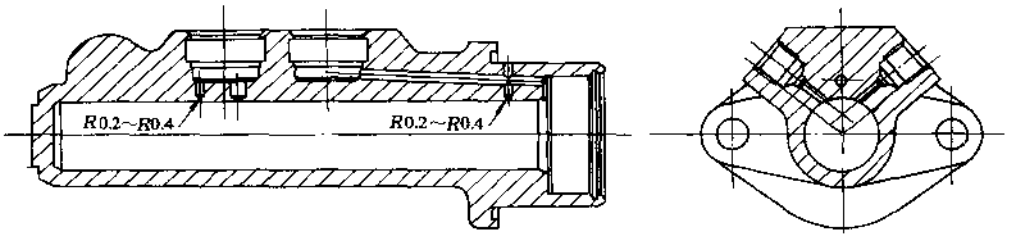


图 3-5-9 主缸缸体示意图

主缸缸体毛坯及加工过程如下：

①主缸缸体毛坯为铸件，材料为灰铸铁或铝合金，一般为一箱多模铸造，要求各模型间误差要小。

②选用的主要定位方案有二种：一种是以安装凸缘外圆、安装面及缸体尾部外倒角（中心孔）。另一种是安装面、2—安装孔及缸体尾部外倒角（中心孔）。

③工艺流程见图 3-5-10。

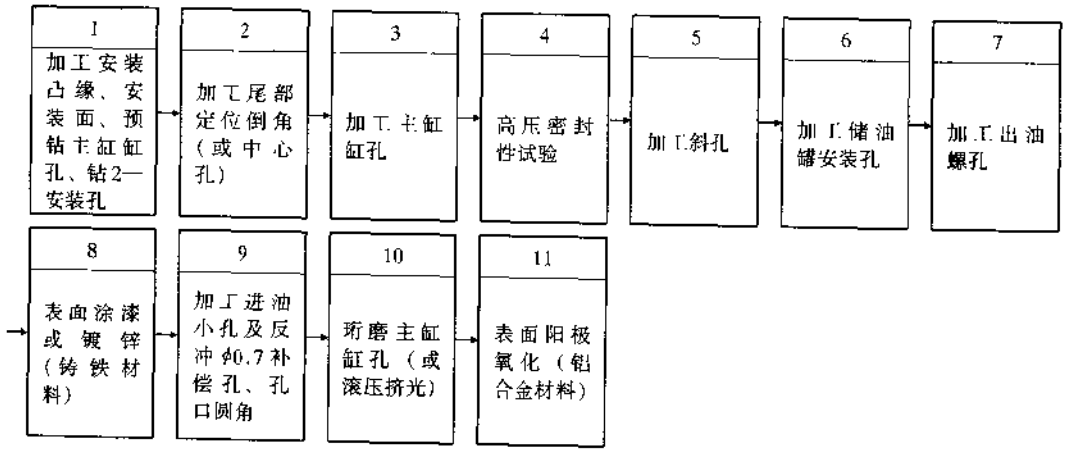


图 3-5-10 主缸缸体毛坯工艺

④设备选用：一般选用数控车床、深孔钻床、加工中心、珩磨机等组成柔性加工线。由于机床数控技术的发展，现也有在铝合金主缸的中、小批量生产中采用加工中心，再加上一台加工 $\phi0.7$ 补偿孔及内圆角的专用设备组成的加工线。

⑤检测除一般通用量具、通用量仪、专用量具外还应备有气动量仪及 $\phi0.7$ 孔孔径、圆角内窥镜以用于主缸缸孔及 $\phi0.7$ 补偿孔、内圆倒角的检测。

3）总成装配

①工艺流程见图 3-5-11，

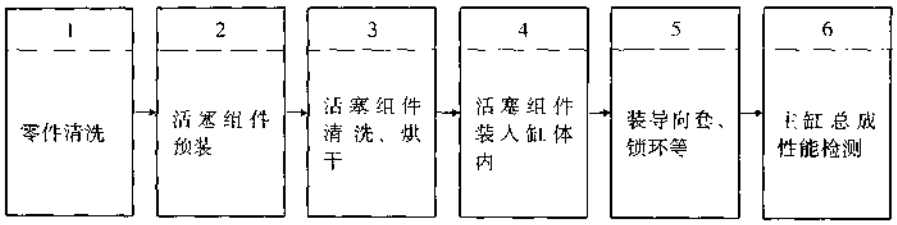


图 3-5-11 总成装配工艺

②装配生产线中几乎每个工位的设备，都有自动检测零件装配情况的功能，如不合格或异常均会自动将设备锁闭，只有解锁后才能继续生产。

③主要性能如皮圈的密封性、ϕ0.7 补偿孔畅通性等，随线都配置 100%的性能测试手段，以确保产品质量。

④装配中注意事项：由于在装配过程中的环境清洁程度和零件的清洁度，对制动主缸的性能及寿命有很大影响，所以在装配的整个过程中要严格控制环境、各零件和总成的清洁度，制动主缸清洁度应在 7mg 至几十毫克之间。零件清洗设备应带有高压冲洗、超声波清洗、漂洗及热风干燥、真空干燥等过程以确保零件的清洁、干燥。

3.5.4.2 真空助力器

1）概述

为了减少驾驶员的劳动强度，并获得整车所需求的制动效果，目前轿车、轻型客货车，制动传动系统大多采用真空伺服式助力器，配制动主缸的液压制动。目前的真空助力器都是橡胶反馈盘式，尤空行程结构，前、后壳体连接分可拆及不可拆二种，在整车上的安装方式有后壳体上的螺栓连接、过渡块连接或贯串式的安装螺栓连接，工作腔有单腔、双腔。大多单腔真空助力器结构如图 3-5-12 所示。

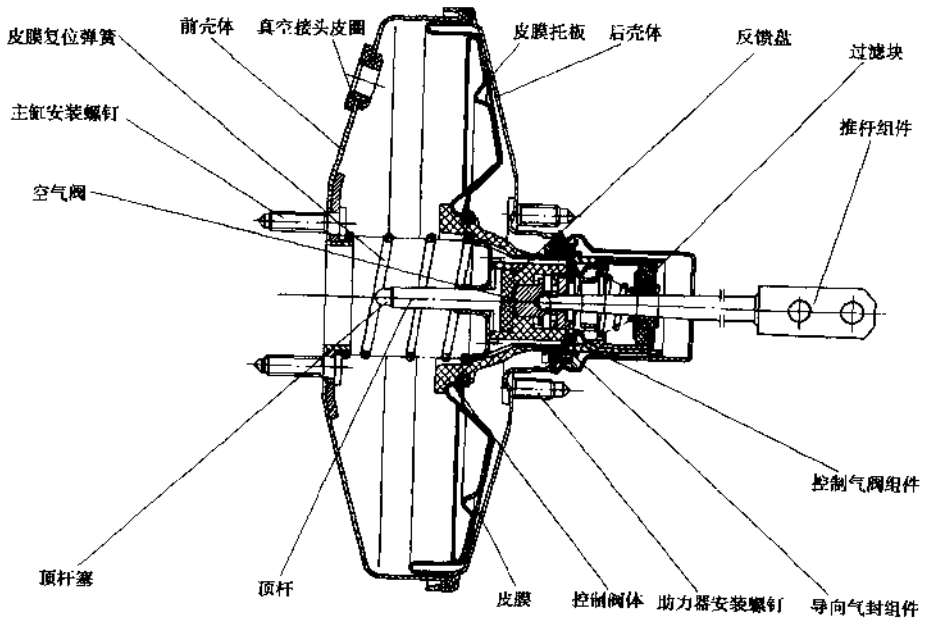


图 3-5-12 真空助力器结构示意图

2）零件制造

①前、后壳体、皮膜托板、隔板(双腔真空助力器)、推杆复位弹簧套筒、顶杆导向圈、过滤块垫片等冲压件，

中小批量大多采用单机成线的冲压设备加工，特大批量一般采用级进模多工位冲压设备连续生产方式。

②空气阀、顶杆塞等金加工零件多采用简易数控机床加工。

③顶杆（冷挤）、螺栓、弹簧一般为专业厂定点生产。

④橡胶件因为直接影响密封性能及产品寿命，必须由高水准的专业厂定点生产。

⑤其它非金属件，可以自制或委托专业厂定点生产。

⑥前、后壳体与安装螺栓的连接采用焊接或铆接。

⑦前、后壳体组件的表面保护层为阴极电泳涂漆或镀锌，涂漆时涂层厚度一般为 15～20μm，盐雾试验应满足 96～240h，其它性能指标也应同时满足用户要求或有关标准。

3）装配工艺

①工艺流程见图 3-5-13。

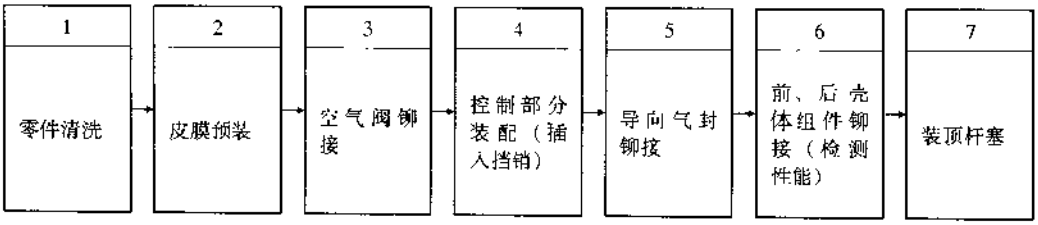


图 3-5-13 真空助力器装配工艺流程

②装配生产线几乎每个工位的设备都有自动检测零件装配情况的功能，如不合格或异常均会自动将设备锁闭，只有解锁后才能继续生产。

③装顶杆塞前尺寸调整的方式一般有二种，通过设备检测长度后调整垫片的厚度，或直接进行刮削以达到规定尺寸，其公差值一般小于 0.2mm。

④主要性能如真空密封性、输入—输出性能等方面，一般都配置有 100% 的性能测试手段和方法，以确保产品质量。（撰稿人：王延正 郑士荣）

3.6 车轮、轮胎

3.6.1 车轮

3.6.1.1 车轮的概念

车轮是介于轮胎和车轴之间承受负荷的旋转组件，通常有二个部件组成：轮辋、轮辐。

3.6.1.2 车轮的分类

1）车轮根据轮辋结构分为

①一件式轮辋；

②多件式轮辋。

2）车轮根据材料分为

①钢板车轮：用钢板材料或异形钢加工生产的车轮；

②铝板车轮：用铝板材料加工生产的车轮；

③铸、锻车轮：用铸造或锻造方法加工生产的车轮；

④钢铝组合车轮：铸造或锻造轮辐与钢板轮辋结合而成的车轮。

3）车轮以铸造或锻造方法分为

①一件式车轮：轮辐、轮辋一体成形并通过机械加工而成的车轮；

②二件式车轮：轮辐、轮辋分体成形并通过焊接加工而成的车轮。

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.6.1.3 钢制车轮制造工艺

1）轮辋工艺

（1）板材轮辋工艺（见图 3-6-1）

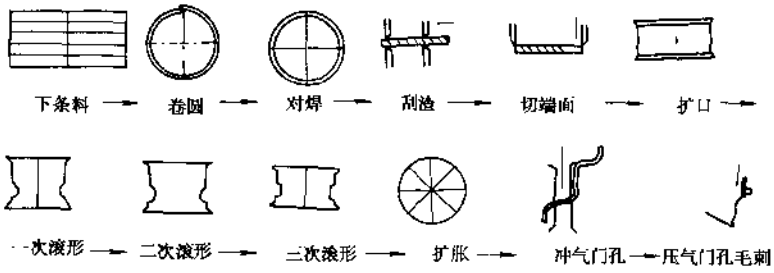


图 3-6-1 板材轮辋工艺

对焊工序中焊接有二种方式：闪光焊接与无火花飞溅的直流焊接，后者的特点是生产率高，自动化程度高，焊接质量好，但是投资较大，对焊机性能要求甚高，对车轮原材料要求亦很严格，它适合板材轮辋对焊。

刮渣工序中的关键技术是焊缝处的厚度，由于工作时的温度较高，因此对使用的刀具材料要求较高，一般采用的刀具材料为 YW1、YG6、YG8N，检验此道工序的量具是测厚仪。

一、二、三次滚形中的关键技术是材料的减薄度、轮缘对称度。检验此道工序的量具是测厚仪、廓形样板。

扩胀工序中的关键技术是轮辋标定直径、驼峰直径，由于轮辋的最后成形尺寸是靠扩胀保证，因此模芯的廓形尺寸和制造精度要求颇高。检验此道工序的量具是廓形样板、专用球带尺、平尺或游标卡尺。

气门孔是用于安装气门嘴，冲气门孔易产生毛刺，压气门孔毛刺是必不可少的。

（2）异型钢轮辋工艺

工艺为：下条料→卷圆→整平→对焊→刮渣→扩胀→车圆→冲气门孔。

图 3-6-2 为异型钢截面图。

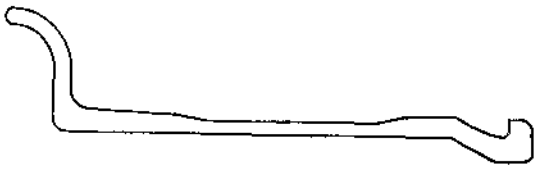


图 3-6-2 异型钢截面

卷圆时的质量指标有卷圆后工件螺旋形、轮辋体锥度大小、胎圈座处撕裂及轮缘表面擦伤程度等。螺旋形过大，接口处易错位；轮辋体锥度大，造成扩胀量不均匀、工件断裂或整形不彻底。

异型钢截面较大，需要大的电流和顶锻力，设备功率就要大，有预热的闪光对焊能够满足异型钢轮辋对焊的要求。

刮渣工序中不仅要克服温度高的因素，还要克服形状因素，因此刮渣分二次完成，其目的是克服刮渣不彻底的缺陷。

由于异型钢轮辋的形状复杂，卷圆对焊后零件成锥体状，扩胀的目的是将锥体状校正为圆柱状并对材料进行一次拉伸，改变晶格以提高强度。扩胀工序中需要掌握的主要环节是选择好扩胀量。合理的工艺参数通过扩胀整形，轮辋体的端面跳动量将会得到有效控制，同时圆度也能保证。检验此道工序的量具为专用平尺。

扩胀整形后车削的目的，一是保证合理的过盈量及配合质量，二是降低车轮的端面跳动量。

异型钢轮辋与板材轮辋的主要区别是前者为等强度设计用钢，而后者为等厚度设计用钢。用异型钢轮辋的车轮一般用于货车、公交车、拖拉机的制动轮等，用板材轮辋的车轮一般用于轿车、大客车、拖拉机的被动轮等。

工艺的不同点是异型钢轮辋不需滚形，由于异型钢已成形，因此给后道加工带来困难。卷圆后失圆度较大，必须通过整形加以校正。对焊工序中一般采用闪光对焊，闪光对焊分为有预热的闪光对焊和无预热的闪光对焊，预热闪光对焊的特点是：

减少焊机容量，可以在小容量焊机上焊接截面尺寸较大的焊件。

汽车论坛 http://www.qclt.com

缩短闪光时间、减少烧化量，从而减少母材金属的流失，这对于贵重金属尤为重要。

如果采用高压预热，可缩短焊接时间，提高生产率。

(3) 弹性挡圈工艺

卷螺旋圆→扩胀切断→整形→冲气门孔。

弹性挡圈属异型钢类，工艺简单，其关键工序是扩胀切断，采用的设备一般为专用设备。检验的方法是将成形挡圈套于标准圆盘上，检验挡圈端口处宽度，弹性挡圈是挡圈和锁圈的综合，因此锁圈将被淘汰。

2) 轮辐工艺

(1) 薄板轮辐工艺

薄板轮辐一般用于轿车，与板材轮辋组合成车轮，见图 3-6-3。

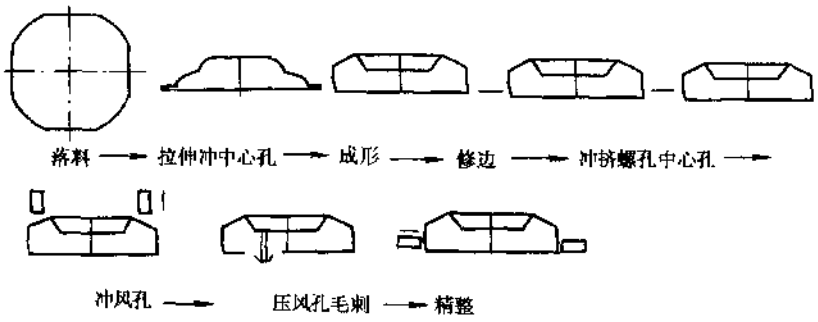


图 3-6-3 薄板轮辐工艺

轿车轮辐形状较复杂而材料薄，每一次的弯曲好比增加了加强筋。成形工序、冲挤螺孔中心孔工序是比较关键的，成形时所使用的设备压力较大，一般≥1 000t。精整的目的是保证轮辐圆度，减小由前道工序带来的缺陷。检验的量具有螺孔位置度测量仪、深度尺、平面度测量仪等。

(2) 中板轮辐工艺

中板轮辐一般用于货车，与异型钢轮辋组合成车轮。它可分为等强度设计用轮辐和等厚度设计用轮辐。

①等厚度设计用轮辐工艺：

落料→成形→冲中心孔→钻扩螺孔→冲风孔→压毛刺→辐底整形→车削外圆。

中板轮辐材料厚度一般≥6mm，成形时所使用的设备吨位很大，螺孔加工时用多钻头同步进行方式，为保证精度而进行外圆车削。

②等强度设计用轮辐工艺：

载货汽车已普遍采用无内胎滚形车轮，该种车轮能大大提高高速性能，且节省能源，产生巨大的经济效应和社会效应。它的主要特点是轮辐采用不等厚而等强度结构。加工过程与等厚度设计用轮辐工艺的不同处在于成形方式，其所使用的设备是压力旋压机，其优点是整个加工过程可有计算机（CNC）控制，产品精度高，产品更换灵活。旋压时变形力可达几十吨。影响轮辐旋压成形的精度有：

a. 旋轮进给速度，由于轮辐各阶段变形性质不同，旋压时的进给速度就不同。高的进给速度有利于贴模，但会影响工件表面质量。

b. 减薄率，不同的变形阶段采用不同的变形量，每个旋轮的径向减薄量要一致。

c. 旋轮的同步，若调整正确，则金属纤维流向均匀。反之容易引起内应力增加。

d. 其余工艺基本与等厚度结构工艺相同。

3.6.1.4 车轮总成

1) 车轮总成工艺

车轮总成是将轮辋与轮辐用焊接的方法连接起来的过程。

总成焊接被设置为质量控制点，焊接的方法较多，有手弧焊、埋弧自动焊、CO_2 保护焊、富氩 CO_2 气

体保护焊等。

①手弧焊的焊接方式简单机动灵活，特别适用各种不规则形状的低碳钢焊件的焊接。缺点是生产效率低，劳动强度大。

②埋弧自动焊的特点是保护效果好，允许采用大电流密度，无金属飞溅，与手弧焊相比生产率高，劳动强度低，特别适用中厚板长焊缝和大直径环缝的焊接。缺点是起弧较困难，不适合轮辐分瓣的车轮焊接。

③CO_2保护焊的特点是引弧可靠，热量集中，熔深大，生产率高，成本低，易实现焊接过程自动化。缺点是飞溅较大，易生成气孔，且焊缝表面成形不理想，烟雾大。

④富氩CO_2气体保护焊的特点是采用85%氩气与15%CO_2混合气，对焊缝进行保护，提高焊缝成形效率及焊接质量，减少飞溅，具有CO_2保护焊的特点。缺点是氩气价格高。

2）钢板轮辋车轮总成工艺（图3-6-4）

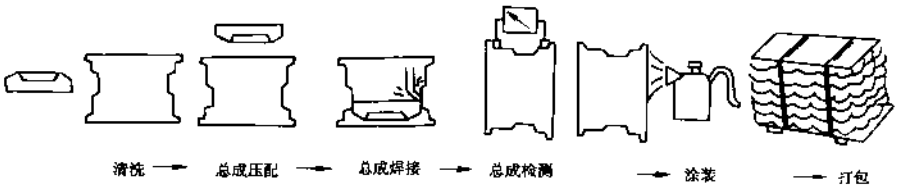


图3-6-4 钢板轮辋车轮工艺

①从钢板到成品（轮辋和轮辐）每道工序均涂拉伸油，总成焊接前必须清洗；

②总成焊接一般采用的是CO_2保护焊或富氩CO_2气体保护焊。检验焊缝质量的主要方法是将车轮以轴向断开，检验熔深或用X光探伤仪。目前世界上采用较先进的设备有单头、双头和多头焊接机，一般有以下几部分组成：

a. 电源、焊接用机架、供气系统、送丝机构、焊枪、控制系统；

b. 以世界较先进公司的专用焊接设备为例，见图3-6-5。

先进的专用焊接设备在焊接时采用85%氩气与15%CO_2混合气，对焊缝进行保护，对焊缝成形和焊接质量起到积极作用。每个焊枪配有一个电源、一个控制系统、一个送丝机构，分路的供气系统、焊炬冷却系统、焊炬清洁系统。工作时集中供气，系统间互不干扰，超出焊接规范自动报警并显示故障情况。该设备生产效率高，能在短时间内进行调整不同规格的产品生产。

③总成检测用来检测车轮的径向和轴向跳动。径向跳动大，汽车高速行驶时易产生跳动，降低舒适性。轴向跳动大，汽车行驶时的轨迹为S形，易给驾驶员操作转向盘带来困难，同样会降低舒适性。因此总成检测采用全检的方式，采用的设备有径、轴向跳动仪，采撷的数据可以是跳动量，可以是一次谐波。

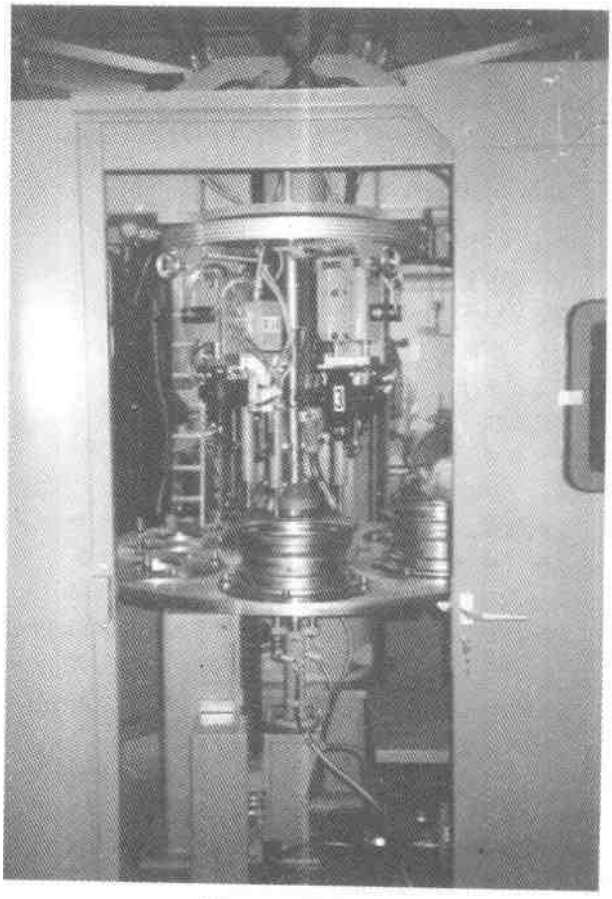


图3-6-5 专用焊接机

汽车论坛 http://www.qclt.com

④涂装的种类很多，有阳极电泳油漆、阴极电泳油漆、粉末喷涂等。阳极电泳油漆与阴极电泳油漆的主要区别是工件带的离子不同，阴极电泳油漆质量较稳定，用的较多。

3）型钢轮辋车轮工艺

型钢轮辋车轮工艺与钢板轮辋车轮总成工艺基本相同。

3.6.1.5 铝板工艺

目前国内应用铝板制造车轮还没有，美国、德国等先进国家在1998年刚刚推出其产品。其优点是重量轻、散热快、成本比铸造铝车轮减少25%。

1）铝板轮辋工艺

下条料→卷圆→对焊→刮渣→扩口→滚形→冲气门孔→扩气门孔。

①铝带料的边缘不能滚压，冷滚压会产生硬化而造成微裂纹；

②轮辋卷圆时轧辊应镀铬，以防止粘连；

③轮辋对焊可以采用直流或交流焊机进行焊接，采用交流焊会造成污染，最佳的焊接方式为直流。由于铝材特性与钢材特性不同，因此加热时间长，且不能用平电极；

④铝圈刮渣的速度要比钢圈快，刮渣时必须有润滑；

⑤由于铝离子较活跃，焊缝边缘存在非常硬的氧化皮，因此滚形时的线速度必须是相等，且滚形时必须采用润滑液；

⑥铝材弹性模量低，冲气门孔时易产生裂纹，因此冲孔后须用钻孔形式将气门孔加工到尺寸。

2）铝板轮辐工艺

铝板轮辐加工存在同样问题，在此不作详述。

3）铝板总成工艺

铝板总成工艺与钢板总成工艺基本相同，只是铝板总成焊接时往往采用满焊。

3.6.1.6 铸、锻车轮

1）铸造铝车轮工艺

铸造技术被用于铝制车轮生产，铸造法有重力铸造法、低压铸造法和压铸法，工艺如下：

铸造成形→热处理→机械加工→气密性试验→表面涂装→包装发运。

①在一般情况下，熔入金属的流入速度慢，则空气夹砂少，不易产生气孔、水泡，冷却均匀、也较彻底，内部质量好。低压铸造法是从距离直浇口远的部分向直浇口进行有向性凝固，比较容易得到稳定的铸件，因此低压铸造法采用的较多。

②铸造成形是最关键的一个生产工序，不仅难度大，而且其质量直接关系到产品的结构、强度和安全。此道工序被设置为质量控制点，控制的参数有铝液温度、铝液成分、铝液质量（针孔度、铝水杂质）、压缩空气的压力及模具的温度。设备一般采用功率大的中频感应炉，此类设备具有熔化时间短，温度控制准确，生产效率高。铝液成分用光谱法测定，铝水针孔度用真空减压试验法检测，熔炼除渣以确保铝液质量，成品检验用X光探伤仪。

③热处理是对毛坯进行固溶处理和时效处理，其目的是提高产品机械性能。一般可达到：

$$\sigma_s \geqslant 230\text{MPa} \qquad \sigma_b \geqslant 270\text{MPa} \qquad \delta = 9\% \sim 13\%$$

这些指标是产品通过多种形式试验来保证。此道工序被设置为质量控制点。铸铝材料一般采用ZL101系列（国外称之为A356），热处理采用T6—完全人工时效，固溶处理时温度一般为（530±5)℃，保温4~6h后进行淬火，时效处理时温度一般为（165±5)℃，保温6h左右后进行空冷。硬度可达到70~100HB，有时为了增加强度和提高表面性能而进行表面抛丸处理。

④车轮的内外表面全部采用机械加工，由加工中心完成，此道工序中的相关尺寸也被设置为质量控制点。车削加工一般都采用CNC车床，此类车床的转速快，可达2 000r/min，轮辋廓形线精度可以达到0.05mm。螺栓孔一般用立式加工中心，此类机床可保证位置度小于0.04mm。检测的量具有球带尺、深

度尺、位置度测量仪及一些常规检验等。

⑤铸造易产生缺陷，气密性试验一般采用全检 将车轮内腔形成封闭式并置于水中，然后对其加压，水中无气泡则表明合格，如图 3-6-6、

另外一种是将车轮置于封闭的容器中，内设微型高灵敏度麦克风，如有小孔，则空气通过小孔时产生噪声，此噪声有麦克风接收，信号通过电器部分进行分析、传输。

⑥铝制车轮的表面涂装质量比钢制车轮高，外观要求几乎和轿车车身的标准一样，不允许有瑕疵。采用的涂装方法有电镀、粉末喷涂及电泳油漆，粉末喷涂采用最广泛。检验漆膜厚度有漆膜厚度测量仪。常规检验的有漆膜结合率、色泽率、外观无流挂。

2）锻造铝车轮工艺

锻造技术在车轮制造中应用的较少，它与铸造技术的区别在于成形方式不同，铸造是铝液浇注成形，而锻造是以铝坯挤压成形，其余工序基本与铸造工序相同。

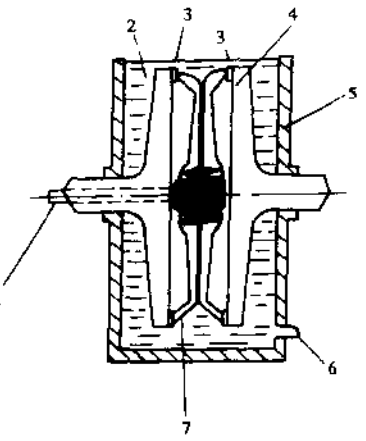


图 3-6-6 气密性试验装置

1-冲气孔；2-水；3-密封环；4-压板；5-水箱；6-注水孔；7-车轮

3.6.1.7 钢、铝组合车轮

钢、铝组合车轮是轮辋用钢板成形，轮辐用铸、锻造铝成形，二者总成焊接而成。其优点是车轮造型美观，散热性能好，可以不加装车轮用装饰盖，轮辐经过车削后精度高，起到降低成本，提高整车质量及美观的作用。其缺点是轮辐与轮辋连接处易与汽车制动系统发生干涉。

钢制轮辋的制造工艺与前面所讲的板材轮辋工艺基本相同，铝制轮辐的制造工艺基本采用铸造铝合金工艺。轮辋轮辐总成工艺如下：

总成压配→总成焊接→总成检测→表面涂装→包装发运。

①钢、铝组合车轮总成压配与钢板轮辋轮辐总成压配方法相同，方向相反。

②总成焊接是将预埋在轮辐里的锲块与轮辋进行焊接，一般有 3～5 段焊缝，每段长度与锲块长度相同，采用富氩气体保护焊。

③总成检测也是测量径向和轴向跳动，或者测量一次谐波。

④表面涂装的方法众多，有电镀、粉末喷涂、电泳油漆及组合喷涂等。

3.6.1.8 产品质量控制

有一个完整的质量保证体系才是批量生产质量稳定产品的基础。

1）标准

标准是质量控制的基础，从原材料到成品出厂，必须制定一整套严格的质量控制程序及程序文件。企业参照的标准有美国 ASTM（材料试验标准）、美国 TRA（汽车工程协会）、德国 DIN（德国标准）、日本 JIS（工业标准）、JASO（日本汽车标准）、NF（法国标准）、BS（英国标准）、ISO（国际标准）及 GB（国家标准）、制定的企业标准、用户要求等。

车轮标准体系有：

①轮辋轮廓检测	GB9769—88、JB4162—85
②汽车轮辋检验球带尺	ZBT22002—89、ZBT22003—89
③车轮安装面平面度要求及测试方法	QC/T243—1997
④汽车无内胎车轮密封性试验方法	QC/T241—1997
⑤摩托车和轻便摩托车铝合金车轮试验方法	QC/T211—1996
⑥汽车车轮平衡块	QC/T199—1995
⑦轿车钢制车轮性能要求和试验方法	GB/T5334—1995
⑧货车汽车车轮性能要求和试验方法	GB/T5909—1995

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑨汽车铝合金车轮性能要求和试验 QC/T221—1997

⑩摩托车和轻便摩托车铝合金整体车轮通用技术 QC/T212—1996

2）质量控制程序

质量控制是质量保证的必要条件，企业必须具备完整的《质量控制手册》和相应的工作程序。

3）质量控制设备

车轮在整车中属安全件。从产品第一次送样到大批量供货必须通过各种形式试验，试验的主要项目有：

a. 径向疲劳试验；b. 弯曲疲劳试验；c. 车轮动平衡试验；d. 冲击试验；e. 轮缘变形能试验；f. 轮辋气密性试验；g. 漆膜耐腐蚀性试验；h. 漆膜耐光照试验；i. 漆膜耐石击试验；j. 螺栓孔球窝强度试验。

实验室必须具备以上试验的设备及车轮装胎机。所有的试验车轮必须是新车轮。

①车轮弯曲疲劳试验的目的是主要检验车轮轮辋和轮辐的连接强度以及轮辐的结构强度。其设备应有一个从动旋转装置。车轮在一固定的弯矩和轴向载荷下旋转，或车轮静止不动，而承受旋转弯矩和轴向载荷。以轿车为例：

最小循环次数——18 000 次，试验期间任何部位有目视可见的新裂纹或原始裂纹扩展或车轮不能继续承受试验负荷导致机器异常，即判定被试验车轮失效，如图 3-6-7。

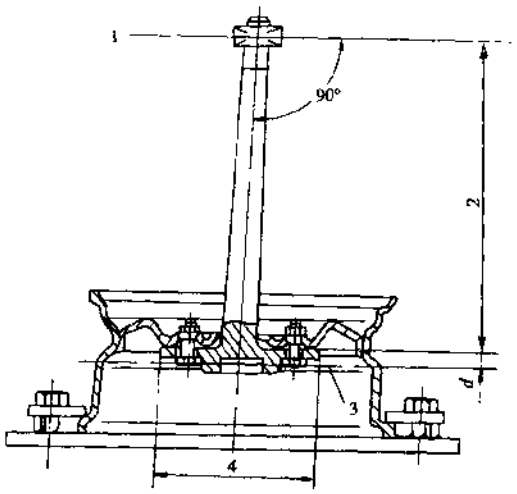


图 3-6-7 弯曲疲劳试验

1-试验载荷；2-力臂；3-轮辋中心线；4-直径

弯矩——作用于试验车轮的弯矩（力×力臂）：

$$B_M = L_c\ (R_R\mu + d)\ S/12$$

式中：B_M——弯矩（磅英尺）；

L_c——前轴垂直方向最大静负荷的 1/2；

R_R——车轮上最大轮胎负荷静半径，一般由主机厂给定（英寸）；

μ——轮胎与地面的摩擦系数；

d——车轮安装偏距；

S——强化试验系数。

②车轮径向疲劳试验的目的是主要检验车轮的轮辋和轮胎的配合性能，轮辋和轮辐的连接强度和结构强度。其设备应是车轮转动再施加一固定的径向负荷于车轮。包括有一个从动的转鼓，转鼓有一个比承载的试验轮胎端面要宽的光滑表面。推荐的转鼓直径是 1 700mm。以轿车为例：

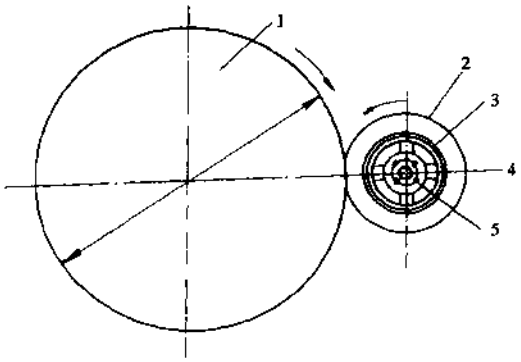


图 3-6-8 径向疲劳试验

1-驱动转鼓；2-轮胎；3-车轮；4-径向负荷；5-螺栓

最小循环次数——400 000 次，试验期间车轮任何部位有目视可见新裂纹产生或原始裂纹扩展，或车轮不能继续承受试验负荷导致机器工作异常，或由于车轮原因轮胎与车轮不能正常配合工作，即应判定被试车轮失效，如图 3-6-8。

径向负荷——作用于试验车轮的径向负荷：

$$R_L = L_r - K$$

式中：R_L——试验的径向负荷；

L_r——前轴垂直方向最大静负荷的 1/2；

K——加速试验系数。

③车轮冲击试验的目的是检验车轮耐轴向（横

向）路边石冲撞特性的试验，并用于车轮的筛选或控制。其设备应当是可以将冲击载荷加载于装有轮胎的车轮轮辋轮缘上的装置。车轮的安装应以其轴线与冲头垂直方向成 13°±1°角，以便使轮辋的最高点与冲头接触。冲头的冲击面至少为 125mm 宽和 375mm 长，轮胎的冲气压力应按车辆制造厂的规定，在无此说明时，冲气压力应为 200kPa，见图 3-6-9。

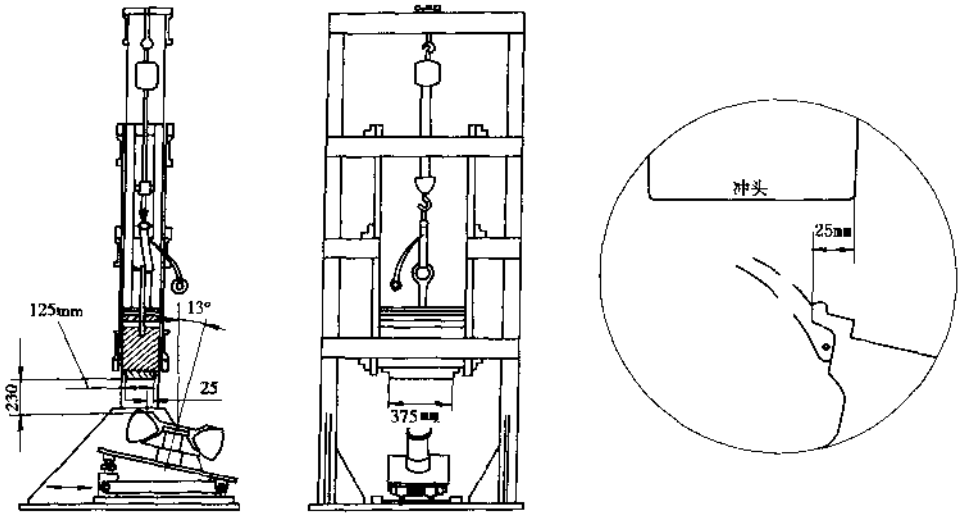


图 3-6-9 车轮冲击试验机

冲头的下落高度应在轮辋轮缘的最高点上方（230±2）mm；

冲头应在轮胎上方，并且必须与轮辋轮缘重叠（25±1）mm；

冲头质量的大小：

$$D = 0.6W + 180$$

式中：D——冲头质量±2%，kg；

W——车轮最大静载荷，kg。

④螺栓孔球窝强度试验的目的是检验螺栓孔球窝的耐压力，性能要求一般由用户提供。

⑤漆膜耐腐蚀性试验俗称漆膜盐雾试验，其目的是检验漆膜的结合率、色泽率等。试验方法是将涂装后的车轮或样板置于盐雾试验箱中放置 240h（铝合金车轮）或者 24h×30 天（钢制车轮）无变色、针孔等缺陷。漆膜还须做漆膜耐光照试验、漆膜耐石击试验。

整车的整体效果还有一个不可忽视的部件——车轮用装饰罩，其功能是美化整车，铝合金车轮使用它，钢制车轮更需要它，因此装饰罩的款式不仅多，而且很新颖。

车轮在整个主机上起着至关重要的作用，其重量影响耗油量；径向和轴向跳动，影响运动轨迹及舒适性；外观影响整车的整体效果。

3.6.2 轮胎制造

3.6.2.1 概述

轮胎是汽车极重要的部件之一，是将汽车的动力传递到地面并承载负荷的载体，决定了车辆的转弯、制动和加速，根据轮胎结构可分为子午线轮胎和斜交轮胎（见图 3-6-10、3-6-11），子午结构即以平行的帘

汽车论坛 http://www.qclt.com

布与圆周成90°角度为特征，帘布直接从轮胎一个钢丝圈绕到另一个钢丝圈；斜交结构即帘线与圆周成很大角度（35°～40°），帘布同方向交叉，胎体有二层或多层帘布。子午线、扁平化、无内胎化是当今轮胎发展的趋势。

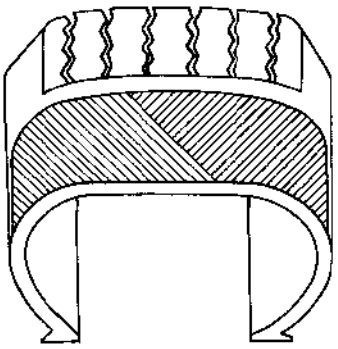


图3-6-10 斜交轮胎断面示意图

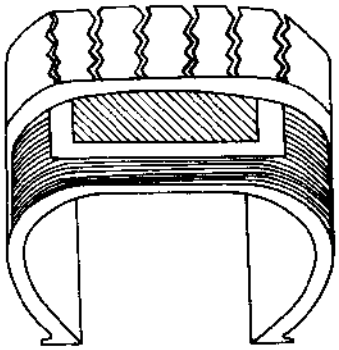


图3-6-11 子午线轮胎断面示意图

轮胎规格，轮胎与轮辋协会有明确的规定。斜交轮胎规格（如9.00—20）第一个数字表示断面宽，第二个数字表示轮辋直径，都以英寸表示。近期的P制命名方法中，断面宽以毫米表示，轮辋直径仍以英寸表示。如195/70HR14：195表示断面宽（mm），70表示扁平率，R表示为子午胎，H为速度级别（最高时速210km/h），14为轮辋直径（in）。

轮胎是由多个部件组成的（见图3-6-12），子午线无内胎轮胎包括胎面胶（有的胎面分胎面上层、下层、胎面肩部胶一块）、带束层（有的无尼龙带束）、密封胶、胎侧胶、胎圈增强胶、钢丝圈、三角胶、外包布等。子午线有内胎轮胎、斜交胎还有垫带、内胎。

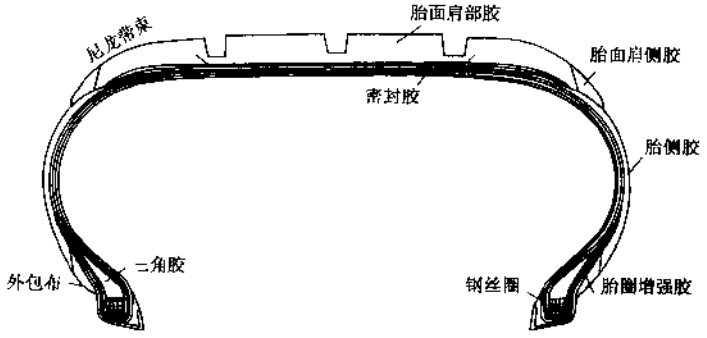


图3-6-12 子午线轮胎剖面图

轮胎制造是一个复杂的过程，从模具加工、胶料混炼、半制品压延、压出、裁断、胎圈制造、轮胎成形、生胎硫化、成品检测，大体分为九道工序，并因轮胎结构、轮胎种类（轿车胎、货车胎、农用车胎等）不同，各工序而有所不同。

3.6.2.2 轮胎模具加工

轮胎模具是由结构设计工程师、花纹设计工程师和模具设计工程师共同设计，经加工而成。模具通常分为两种：两半模和活络模。两半模用于生产斜交轮胎，活络模主要用于生产子午线轮胎。用活络模生产的轮胎，产品质量比用两半模生产的轮胎好，但成本也高。

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.6.2.3 胶料混炼

混炼是把橡胶与各种配合剂均匀混合，从而制得用于轮胎制造使用的混炼胶。现代轮胎工业，大部分已采用密炼机进行混炼，混炼系统实现炭黑自动输送、称量及投料，橡胶、油、各种防老剂、促进剂、硫化剂等半自动称量及投料，采用温度或功率控制胶料的混炼周期，整个过程实现了高度的自动化。

在混炼过程中，胶料和配合剂按照规定的工艺条件（由配方工程师经大量实验确定的），目前一般采用二段混炼生产工艺（因配方不同，混炼生产工艺可相应变化），排胶后，用压片机压片，经冷却系统冷却，备下道工序使用。

3.6.2.4 压出

压出是使混炼胶由挤出机通过一定的口型板，压制成具有一定形状和尺寸的半制品，如胎面、胎侧等。在轮胎工业中使用的挤出机有冷喂料和热喂料两种，由于冷喂料挤出机压出的半制品的质量和尺寸稳定性高，子午线轮胎的胎面和胎侧大部分采用冷喂料压出。

半制品的重量、尺寸、形状对成品轮胎的各项性能都会产生很大的影响。因此，为了控制半制品的质量，减少人为因素，满足顾客对轮胎综合性能的要求，现大部分使用双复合和三复合挤出机，使多个部件一道压出，通过压出制成的半制品有：胎面、胎侧、三角胶等。

3.6.2.5 压延与裁断

压延是使混炼胶经压延机在帘布（纤维帘布、钢丝帘布）表面覆胶，或使混炼胶经压延机压出薄皮的过程。压延厚度的变化对成品轮胎也有很大的影响，过厚不但浪费胶料，而且使轮胎的重量增加，导致轮胎在使用中生热加快；过薄或不均将影响帘布层的粘合力，从而影响轮胎的寿命。为了得到高质量覆胶帘布，在压延过程中，对供胶、辊筒速度、辊筒温度、帘布含水率、帘布张力控制都有特殊的要求，并根据不同的胶料、不同的帘布而有不同的要求。

裁断是使覆胶的长卷帘布经裁断机裁成一定角度和长度的帘布，再自动或经人工接头，供下道工序使用，如用作胎体、带束等。

3.6.2.6 胎圈的制造

胎圈由钢丝圈、三角胶和胎圈包布组成，其中钢丝圈使轮胎紧固在轮辋上，从而传递动力到地面。钢丝圈是由钢丝通过挤出机覆胶，再经缠绕成形而成，由于钢丝表面覆有橡胶，故钢丝彼此紧密连成一体，可充分发挥其强度。钢丝圈的断面形状有矩形、六角形和圆形，其中对钢丝的有效利用以圆形断面最高。

胎圈是由钢丝圈和三角胶等在胎圈成形机上制成的，子午线轮胎的三角胶比较厚，其中载重子午胎一般采用复合三角胶。

3.6.2.7 成形

轮胎的成形是在成形机上，将轮胎的各个部件，如胎面胶、胎侧胶、胎圈、胎体层、带束层、气密层等，按照施工表制成生胎的过程。轮胎的成形工艺因轮胎的结构（斜交胎、子午胎）不同而不同。

斜交胎的成形设备较为简单，大部分多采用压辊包边的成形机，采用套筒层贴法成形工艺。子午胎的带束不能伸张，因此不能用生产斜交轮胎的成形机生产子午胎。子午胎成形精度要求很高，一般采用一次成形法或二次成形法。

一次成形法的特点是在成形鼓上一次完成轮胎的成形。在成形鼓上把子口胶、胎侧、气密层、子口加强层、胎体帘布、胎肩垫胶、胎圈贴合成形，同时在另一个贴合鼓上把带束层、带束夹胶及胎面贴好后，送到成形鼓上，经膨胀将胎体的组合件与胎面和带束的组合件贴合、压实而成生胎。

二次成形法即二步制造法，在一段成形机完成胎体的制造，再在二段成形机上将胎体膨胀后上带束层和胎面，从而完成生胎的制造过程。

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.6.2.8 生胎的硫化

轮胎的硫化是生胎在硫化机的模具中进行，它在热和压力的作用下使生胎中橡胶进行交联、各部件形成网络，从而生成具有预定性能的轮胎的过程。硫化设备主要有双模硫化机和硫化罐。

硫化罐在硫化过程中，把高压过热水通入水胎，使轮胎内、外受热进行硫化。硫化罐一次可硫化十多个轮胎，但上、下模的温差大，影响轮胎的质量，在工厂中的使用量正逐渐减少。

双模硫化机的自动化程度高，能自动完成装胎、定形、硫化、卸胎及后充气的操作，产品质量高。根据硫化胶囊的不同，双模硫化机可分为A型硫化机、B型硫化机和AB型硫化机。子午线轮胎和大部分斜交轮胎均采用双模硫化机，硫化工艺（温度、压力、时间）条件因轮胎的结构、大小不同而有所不同，并对轮胎的质量有至关重要的影响。

3.6.2.9 成品胎的检测

对成品胎的检测可分为生产在线检测、抽检和试验性测试。

在线检测即每一条轮胎在出厂前都将受检验，包括外观、X光、动平衡、均匀性的检验。对硫化好的轮胎首先进行外观处理，除去逃边，然后进行外观检测，对外观检验和X光检验不合格的轮胎按规定处理。对动平衡、均匀性不合格的轮胎，可进行打磨加工使其达到要求。通过以上检验将轮胎划分为不同的等级。

抽检即对出厂的轮胎进行抽样检验，包括外缘尺寸、静负荷性能、高速性能、耐久性能、强度性能等。对以上性能，不同的国家会有不同的测试方法和标准，而不同的汽车厂对以上性能也会有不同的要求。

轮胎产品试制时还需进行的试验性测试，包括操纵性和舒适性、牵引性（干滑、湿滑、雪滑性能）、力和力矩性能、气密性能、跑偏、噪声性能、加速耐久性能、耐臭氧、耐高温性能、滚动阻力等。对以上性能，国际上尚无统一标准，各汽车厂对以上性能通常会有不同的要求和测试方法。

轮胎的性能测试，一部分性能可以在室内进行，如动平衡、均匀性、高速性能、力和力矩性能等，另一部分则必须在室外的专用路面上进行，如操纵性和舒适性、牵引性、耐磨性能等。

3.6.3 车轮装配

车轮的径向振动和侧向摆动是车辆振动的主要原因，特别是轿车，在高速行驶的过程中由于车轮的径向振动和侧向摆动，而造成轿车的上下振动及行驶不稳，有的甚至造成严重的后果。车轮的跳动主要有三个原因：几何跳动、不均匀性和动平衡，其中动平衡是最主要因素。因此，轮胎的装配及平衡对汽车生产厂商是十分重要的。

一般大型汽车生产厂由于需要的轮胎总成品种多、要求高、数量大，故轮胎装配主要以流水线的形式进行，具有现代化程度高、节拍快、精度高等优点。

以轿车轮胎装配为例，以流水线形式进行作业的轮胎装配，其工艺如图3-6-13。

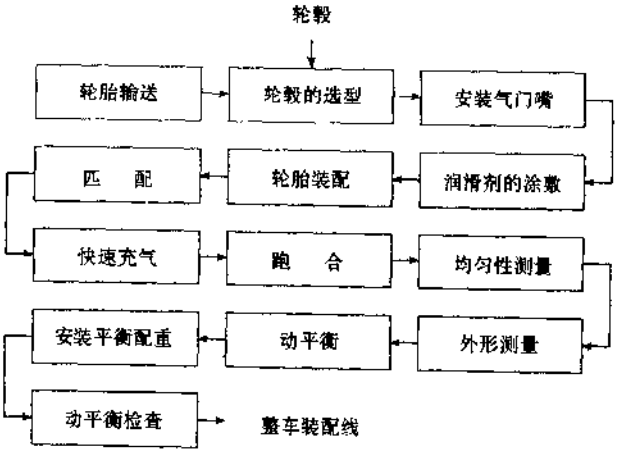


图3-6-13 轮胎装配工艺图

3.6.3.1 轮胎输送

由输送系统把不同规格的轮胎按规定的顺序输送。如某一轿车的轮胎为 185/70 R13 86T，另一型轿车的轮胎为 195/60 R14 85H。

3.6.3.2 轮毂的选型

根据轮毂的直径、宽度选择型号。如某一轿车的轮毂直径为 13″，轮毂宽度为 5.5″。如另一型轿车轮毂直径为 14″，其轮毂宽度为 6″。

3.6.3.3 安装气门嘴

由气门嘴压装机选择正确的气门嘴，涂上润滑油并安装到轮毂上。气门嘴压装机能够适用直径为 12″～16″，宽度为 $3\frac{1}{2}$″～7″的轿车轮毂。装配工时一般为 5s 左右。

3.6.3.4 润滑剂的涂敷

润滑剂的涂敷机分别检查轮胎与轮毂的结合部位，并在轮胎的轮缘涂敷润滑剂。

3.6.3.5 轮胎装配

轮胎装配机固定轮胎和轮毂，可根据轮胎和轮毂的尺寸自动调节装配夹具的高度和宽度，把不同型号的轮胎装进轮毂。轮胎装配机能够适用直径 12″～16″，宽度为 $3\frac{1}{2}$～7″的轿车轮毂。装配工时一般为 5s 左右。

3.6.3.6 匹配

由配点机自动识别轮胎和轮毂上相应的标点，通过点对点或旋转的方式来改善轮胎和轮毂的匹配，如改善均匀性或初始不平衡状态。

3.6.3.7 快速充气

充气头内侧首先下压在轮毂外边，充气头外侧下压轮胎侧边，形成一个环形气隙。充气机配有高压储气罐，因此，可将高压空气通过气隙快速射入至轮胎内至规定气压，使轮毂的内表面和轮胎的轮圈在高压状态下贴紧，从而使轮胎处于密封状态，充气压力可根据要求自动选取，如某一轿车的规定气压为 (0.25+0.1) MPa。充气时间一般为 5s 左右。

3.6.3.8 跑合

模仿最初使用状态对车轮组件施加动态载荷来稳定轮胎与轮毂的结合部位。

3.6.3.9 均匀性测试

检测轮胎总成的力学均匀性。如果径向力超差，可通过相对旋转轮胎、轮毂加以改善。如某一轿车的径向力规定的质量控制标准为 0～100N。

3.6.3.10 外形测量

测量轮胎的径向和侧向的几何跳动，检查是否超差。如某一轿车轮胎的径向和侧向的几何跳动规定的质量控制标准为 0～1.5mm。

3.6.3.11 动平衡

轮胎的动平衡是轮胎装配工艺中最重要的工序之一。轮胎总成经过轮胎动平衡机的测试，在轮胎动平衡机上显示校正不平衡用的平衡配重的重量和安装位置。轮胎动平衡机模块化设计，可适合于各种不同的产品

汽车论坛 http://www.qclt.com

要求和生产设施，可混型生产，效率极高，并保证很高的质量标准。如轮胎动平衡机上显示的配重量是以 1g 为一个单位。同时，每种轿车的不平衡量的要求都可设定，然后存储在轮胎动平衡机的计算机系统中，轮胎动平衡机可自动判断该轮胎总成是否合格，如某一轿车轮胎总成要求允许的不平衡量为轮胎重量的 0.5%。

3.6.3.12 安装平衡配重

由人工或平衡块装配机将平衡配重，装在轮胎动平衡机上显示的轮毂的内、外表面相应的位置上。而且每个轮辋边缘只允许使用一块平衡块。平衡块一般以每 5g 为一个单位。

3.6.3.13 平衡检查

由平衡复检机对校正过的车轮总成的剩余不平衡量进行复检，根据车型的要求复检可选取动平衡、静平衡或纯偶平衡三个方面的不平衡进行检查。每种不平衡的公差都可设定，然后存储在平衡机的计算机系统中。如某一轿车轿车轮胎要求每个轮辋边缘的动平衡量最大不超过 8g。

最后轮胎进入总装车间整车流水线轮胎装配工位。

3.6.4 维修站的轮胎装配

在维修站由于轮胎的需求量比较少，要求比较低，故一般采用较为简单的轮胎装配方法，其设备也是由较为简单的维修型装轮胎机和维修型动平衡机组成。其工艺如图 3-6-14。

3.6.4.1 安装气门嘴

人工将气门嘴安装到轮毂上。

3.6.4.2 润滑剂的涂敷

为了方便轮胎和轮毂间的装配，将浸有润滑剂的毛刷沿轮缘涂敷润滑剂。

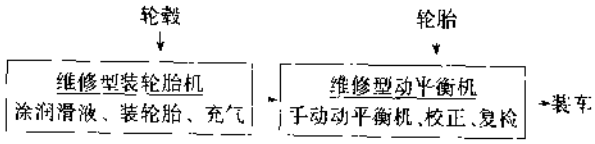


图 3-6-14 维修站轮胎装配工艺图

3.6.4.3 轮胎装配

将涂敷好润滑剂的轮毂放在轮胎装配机夹具上，夹紧夹具，并把轮胎放在轮毂上，开动轮胎装配机，通过轮胎装配机上的转动辊柱撬开轮胎轮圈，使轮胎嵌入轮毂。

3.6.4.4 快速充气

快速充气至规定的空气压力，使轮毂的内表面和轮胎的轮圈在高压状态下贴紧，从而使轮胎处于密封状态。

3.6.4.5 动平衡

将充气完毕后的轮胎总成放在轮胎动平衡机上。开动轮胎动平衡机，在轮胎动平衡机上显示校正不平衡用的平衡配重的重量和安装位置。

3.6.4.6 安装平衡配重

人工将平衡配重装在轮胎动平衡机上显示的轮毂的内、外表面相应的位置上。而且每个轮辋边缘只允许使用一块平衡块。

3.6.4.7 动平衡检查

轮胎动平衡机对校正过的车轮总成再次进行动平衡检查。

汽车论坛 http://www.qclt.com

3.7 车　身

3.7.1 副车架

3.7.1.1 副车架概述

副车架是发动机前置前驱动轿车前桥的组成部分，其主要功能是承载发动机，即它是发动机的安装托架，见图 3-7-1。因而采取的工艺方法主要是为增加其承载能力

目前较多的副车架采用冲片焊接结构，再压入联接部的橡胶轴承，即可完成副车架的制造。

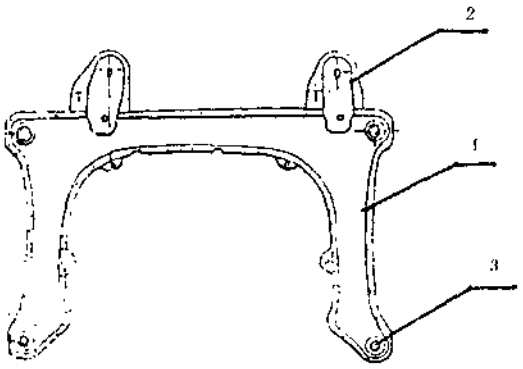


图 3-7-1　副车架

1-上下壳体；2-发动机支架；3-橡胶轴承

3.7.1.2 副车架的制造

主要工艺流程如图 3-7-2。

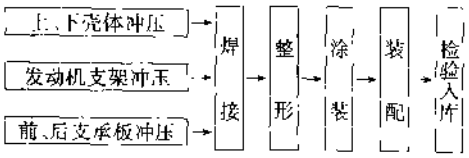


图 3-7-2　副车架工艺流程

1）冲压

副车架的冲压加工序有落料、成形、切边、翻边、冲孔等。冲压加工的产品质量主要取决与模具的状态以及设备的动态精度。加工过程中应注意材料的弹性变形对质量的影响，注意型材的表面处理，提高耐磨损性和耐粘附性。

2）焊接

副车架的焊接主要采用电阻点焊和二氧化碳气体保护焊。包括上、下壳体的电阻点焊；发动机支架的方形螺母凸焊；以及上、下壳体发动机支架与支承板的二氧化碳气体保护焊。电阻点焊变形较小，只要选择合理的焊接顺序及焊接装夹具，基本能保证产品精度。而弧焊则不然，为确保精度，必须严格控制热变形。焊接质量主要靠合适的焊接参数以及严密的监控、合理的焊装夹具（夹具精度控制在±0.2mm，焊接可达性良好，尽可能实现全方位最佳位置焊接）。目前，已普遍采用焊接机器人。采用的焊接机器人，其位置重复精度为±0.1mm，确保了焊接行走轨迹的准确、稳定；另外，机器人控制系统中设置有焊接参数自动匹配程序，以及摆焊、自动填充收弧坑、自动重起弧、自动校核管伸长等多项功能，使得焊缝质量得以保证，并减少人为因素影响，稳定质量，提高设备柔性。同时，拼焊的冲压件的配合间隙也有一定的要求，尽可能≤0.8mm，至少必须稳定。这样，焊接质量才能稳定。

3）整形

由于副车架在以后的装配工序中有一定的装配尺寸要求，及焊后少量变形，故采用专机对焊后副车架进行孔的精整，以及开档的整形，整形的精度以产品图纸要求为准。

4）涂装

现较多地采用阴极电泳油漆。涂装主要是为了防锈和提高表面质量。涂装工艺有涂装前的清洁（除锈、油等）、上吊具、预脱脂、脱脂、热水清洗、活化、磷化、清洗、钝化去离子水清洗、烘干、强冷、检验等。涂层的质量主要有涂膜厚度、粘附性和脆性及耐腐蚀性等，不同的产品有不同的质量标准，一般涂层厚度内侧≥25μm，外侧≥35μm；粘附性和脆性至少 GTO－1（网格刻划试验等级），耐腐蚀性通过盐雾试验 60 次循环，刮痕的损伤深度≤2.5mm。涂装质量取决于涂膜的特性和化学覆盖膜的特性，主要通

汽车论坛 http://www.qclt.com

过对设备、对温度、对涂膜的化学成分的监控来保证。

5）装配

副车架的装配就是在轴套中压入橡胶轴承，采用液压机床压装。为了不影响橡胶轴承的特性，压入时使用与其形状配合的夹具，为方便压入作业，有时也在压入部位涂抹润滑油脂。压入橡胶轴承的质量是由脱开力来保证的，脱开力的大小由产品图纸来确定，从大于1000N到7000N不等。对于压入力与脱开力的关系，应在事先进行确认，在检查压入力时，采取由装在压入设备上的相应传感器来完成。

3.7.1.3 总成检验

副车架的总成检验，主要项目是与客户相关的装配尺寸和表面质量（包括焊缝表面质量以及油漆表面质量，如有无焊缝缺陷，有无飞溅，有无油漆缺、碰伤、剥落等）。

3.7.1.4 质量保证

副车架冲压、焊接、涂装及装配过程中，主要采用的检测手段有几何尺寸检具和形状检具。如综合量具、通用量具及测量漆膜厚度的测厚仪等。另外，还具有焊点金相试验、产品疲劳试验等相应设备。在管理上，还应有一套完整的质保体系。

3.7.1.5 生产技术新动向

目前新车型中，已采用管子弯曲成形的副车架，其加工工序为：管子成形→焊接→涂装→装配。

管子成形的副车架加工方便，成形精度高于冲压成形，焊接量少，焊接变形小，刚性好。管子弯曲成形的副车架，加工过程中应注意材料的弹性变形，在成形过程中有时会用热处理方式（如退火）来进一步保证材料成形质量。

3.7.2 车身本体

3.7.2.1 轿车车身车间总体规划

车身是具有复杂形面的壳体零件，它是由数百件薄板冲压件通过焊接、粘接、铆接或机械连接等方法，使其构成一个完整的车身。车身质量的好坏，直接影响汽车性能。其中装配焊接是车身制造中最重要的环节之一，它直接影响车身质量、生产率和经济性。提高装配精度和焊接质量是车身制造的核心工作。

1）生产纲领、生产节拍

汽车车身属于大型薄壁结构，由于生产纲领不同，其生产方式有很大区别。根据不同的生产纲领，可以分为单件生产、成批生产和大批生产。随着生产规模的扩大，有可能采用高效率设备。这虽然使投资额增加，但将降低每辆汽车的成本。从技术上来看，当产量超过一定界限时，生产成本反而上升，最佳生产规模随设备投资的大小、设备的通用程度、工艺的不同而异。

规划一个车身装焊车间，首先要确定该车型的年产量、车型种类、自动化程度、每天的工作时间、工作班数，以及设备开动率等，得出生产流水线的生产节拍（T）。T＝年生产量/［工作天数（年）×班数×工作时间×设备开动率］。

2）车间面积、平面规划

车间面积是由生产设备、通道、仓库零件存放地、辅助部分动力和通风装置等的平面布置完成确定的。其中生产面积如下：

①流水线占地面积；

②分总成装焊工段；

③小部件工段。

车身车间相应的辅助面积如下：

①主通道；

⑫维修区域；
⑬工具间；
⑭样板工作区域；
⑮测量检验区域；
⑯仓库和存放地；
⑰车间办公区域；
⑱车身最终检验区域。

车间平面规划要求：

①保证焊装部件流水线生产同工厂总平面图的基本流水方案相适应；
②使货流最短、没有倒流现象；
③根据生产方式、划分专业化的工段。

例如可以根据轿车生产的特点，可以将整个车间划分为：前围工段、侧围工段、后围工段、四门二盖工段、地板生产线工段和总拼线工段以及调整工段、点凸焊工段，各个工段内部可以有其自身的小流程，满足装焊顺序的要求，最后形成一个大的生产流程。

3）装焊夹具

在汽车车身的装配焊接生产工程中，为了保证产品质量、提高劳动生产率和减轻劳动强度，必须使用夹持并确定工件位置的装置来完成装配和焊接工作，这些装置称之为装焊夹具。

装配夹具的使用，主要是按车身图纸和工艺上的要求，确定各个零件或部件的相互位置，并使处在各种位置的焊点和焊缝都尽可能地调整到最利于施焊的位置。

在车身制造中，为了便于装配和焊接，通常是将车身分为总成、各个分总成又分为若干个小总成，各个小总成则由若干个零件组成，这样在车身装焊时，通常都是先将零件装焊成小总成，再将小总成装焊成分总成，最后将分总成装焊成车身。

装焊夹具的基本要求：

①保证焊件焊后能获得正确的几何形状和尺寸，并在焊接时能阻止焊件产生变形；
②使用时安全可靠；
③便于操作，在保证强度与刚度的前提下，应轻便灵巧，定位、加紧和松开应省力而又迅速；
④制造容易，便于维修；
⑤便于施焊。

在70～80年代，国内汽车制造业采用装焊夹具，是以手工夹具为主，特点是制造和维修简便，费用低，但工人劳动强度较大。80年代后期，开始大量使用气动夹具，采用国产和进口气动元件作为行动元件，进入90年代，多点焊机、自动焊机、焊接机器人开始大量进入各大汽车制造厂和零部件生产厂，并广泛采用PLC程序控制的形式，将零件输送与定位夹紧和焊接工作联系起来，做到了部分生产线无人操作的全自动生产。

4）车身零件谱

车身零件谱是车身制造工艺中一个重要内容，车身由几百个零件组成，必须在确定各零件及其总成之间的关系、焊接顺序方式后，才能对整个车间的平面采取合理的布置。轿车生产大体上一般分为几大模块，如门盖、前围（前仓）、侧框、后围、地板、车身骨架总成、车身总成七大模块，这些模块确定以后，再根据不同的要求，最终采用手工焊接，还是自动装焊，小总成可以集中在一个区域焊接后送往各模块，或者出于成本的考虑，可以将某些小总成放在横向配套厂，便于专业化生产，例如将运输较为方便的门、盖等大总成全部交于外协厂生产。最终确定内部的装焊形式和零件运输方式。

5）车间内部物流

车身车间从表面形式来看，就是将几百个冲压件送到车间，装焊成一个车身壳体流出车间的物流过程。物流的合理与否决定了车间面积的利用率、生产成本的大小。物流的原则是最短的距离、没有倒流、最小的时间存转。在汽车制造的初期阶段，由于各方条件的制约，一般在车间内部建立一个中转场地，将

汽车论坛 http://www.qclt.com

零件从仓库驳运至中转场地后，再运至各工位，占用了大量的车间面积和驳运工作量。随着技术水平和管理水平的提高，车间内部的物流形式也从手工搬运改为自动输送，采用方式有机械搬运、吸盘托架、悬挂链往复式输送、自行小车等多种方式。

3.7.2.2 车身制造中的焊接技术

1）熔化极气体保护焊

车身焊接中常用的电弧焊主要是熔化极气体保护焊，特别是CO_2气体保护焊。气体保护焊可以采用直流、交流或脉冲电源。低碳钢熔化极气体保护焊一般采用平硬或略为上升外特性的直流或直流脉冲电源。这些焊机都是次级整流式电源。这类焊机目前主要有下列几种形式。

（1）抽头式或次级调压器式

抽头式焊机，在焊接电源的初级侧设几个到十几个抽头，调节输出电压的大小。调压器式焊机是在焊接变压器的次级，用碳刷来调节输出电压的大小。

（2）自饱和磁放大器调压式焊机

磁放大器调压式焊机，它通过改变磁放大器的工作状态来控制输出电压，优点是输出电压可无级调节，有电源电压反馈功能，维修方便。

（3）可控硅（晶闸管）整流调压式焊机

通过改变可控硅导通角大小来调节输出电压。它能自动稳压，有很好的引弧特性和波形控制功能。国外汽车厂CO_2气体保护焊大量使用的是该型焊机。

（4）逆变式焊机

逆变式焊机，是目前弧焊电源中最好的焊机。它与其他焊机相比，有以下几个突出优点：

①重量轻，体积小。

②功率因数高，高效节能。

③具有良好的动特性和弧焊工艺性能。

2）电阻焊

（1）电阻焊电源

电阻焊生产效率高，焊接质量易得到保证，易实现机械化和自动化生产，所以是轿车车身焊接的主要方法。电阻焊机有工频单相降压变压器式、电容储能式、次级整流式、逆变式等。

次级整流式和逆变式焊机功率因数可达到0.85～0.95。随着大电流整流二极管价格的下降，次级整流电阻焊机也开始实用化，特别是三相次级整流焊机，它的直流输出脉动系数很小，在大的二次回路和二次回路里有较多的铁磁物质插入时，得到了广泛的应用。近年来由于大功率半导体器件的发展，逆变式直流电阻焊电源也已开始应用于生产线上。

在一般的手工点焊和焊接回路小的机器人和机械手点焊场合，应尽量采用一体式焊钳；在焊接回路较大的手工点焊场合，应考虑用分体式悬挂焊机；在焊接回路大，焊接时焊接回路内可能伸入的铁磁物质变化大时，特别在使用点焊机器人和机械手点焊这些场合时，应该考虑使用逆变式电阻焊电源。

（2）电阻焊控制器

电阻焊控制器多由单片机组成，有下列一些功能：

①同步恒流控制和同步恒压控制，响应速度一般在1～2个周波（CY）；

②焊接工艺规范可以灵活调节，有矩形、阶梯矩形、梯形、马鞍形等形式，可以设置多个独立规范程序；

③具有群控接口，可根据电网电压情况，通过PLC或上位机对焊机的通电进行群控；

④通过反馈系统来保证焊接压力及焊接电流在允许偏差范围内；

⑤检测报警功能和显示功能。

为了使电阻焊生产线和车间的数据管理、跟踪、故障标记记录等进行集中监控，轿车生产厂还可用工业控制计算机建立焊接工作站，在工作站可对各被控控制器进行实时编程，数据输入，实测的焊接参数记

汽车论坛 http://www.qclt.com

录和故障监视记录，以确保焊接质量的稳定和生产线的正常工作。目前，国内可以生产这种工作站。

(3) 汽车车身焊接自动焊接机

焊接自动机是汽车制造厂白车身焊接车间的专用设备，有别于传统的夹具和焊枪分离的焊接方式，它是将夹具和焊枪有机地结合起来，通过自动控制设备（可编程控制设备）进行自动控制，从而完成焊接过程的一种专用设备，由于它自动化程度高，能有效地提高工作效率，减轻工人的劳动强度，并且产品质量稳定可靠，所以在现代的汽车制造厂白车身焊接车间中已广泛采用了此类设备。

(4) 凸焊与凸焊工具

凸焊是在一焊件的贴合面上预先加工出一个或多个凸出点，使其与另一焊件（母体）表面相接触并通电加热然后加压，而在凸出点处形成焊点的电阻焊方法。凸焊有以下优点：

①由于压出了凸点，使电流集中，提高了电流密度，故可用较小电流进行焊接，而节约能源。

②能可靠的形成较小焊核，提高焊接质量。

③可同时进行多头焊接，提高了生产率。

④凸焊可以使用截面积较大的平面电极，电极寿命长。

凸焊的应用范围：

①螺钉焊于平面板零件上。

②螺母焊于平面板零件上。

③两个相当零件焊接。

3) 钎焊

在汽车车身生产中，经常会用到铜钎焊工艺。传统的方法是用氧乙炔焊，使用锡黄铜等焊丝和铜焊粉，难以彻底清除的焊渣使得磷化液的使用期限无法控制。现在，较先进的生产方式是使用液态钎剂来取代铜焊粉，焊后无渣，既省去了去渣的时间，又解决了磷化液失控的问题，提高了表面预处理的磷化质量，同时在钎焊时省去了蘸铜焊粉的时间，使生产效率大大提高。

4) 激光焊接在汽车车身制造中的应用

(1) 用于汽车工业的激光焊设备

用于汽车车身焊接和切割的大功率激光器主要有两大类，即Nd：YAG激光器（钕：钇铝石榴石固体激光发生器）和CO_2激光器。Nd：YAG激光器主要用于焊接，CO_2激光器主要用于切割。CO_2激光器的功率从数千瓦达到数十千瓦。由于其波长较长激光束不可能通过光导纤维传送，只能经折射镜和聚焦镜达到工作表面。目前商品化Nd：YAG连续激光器的输出功率一般都在3kW以下，其波长短。激光束可通过光导纤维输送，比较灵活方便，适用于机器人手执激光喷嘴配程序控制进行精确地操作。目前国外许多公司已开发出能用于汽车工业的系列化的激光器。

(2) 激光焊在汽车工业中的应用

①取代传统的电阻点焊接头

由于激光焊接头的动载强度是点焊接头的4倍多，而前者搭接翻边尺寸仅仅为后者的1/3，零件用材减少，效率高，所以将取代一些点焊接头。传统的电阻点焊，需从两个方向接近工件，操作性能差。采用LBW，仅需从一个方向接近工件，改变电脑的程序即可改变焊缝形式。一个LBW机器人通常可代替3～4个电阻点焊机器人。现有的电阻点焊机器人每分钟仅能完成20个焊点，1个焊点相当于25.4mm的LBW焊缝，激光焊机每分钟能完成5 000mm以上焊缝，相当于200个焊点。由于采用激光焊可以减少搭接宽度和一些加强部件，还可以压缩车身结构件本身的体积，仅此一项车身的质量减少56kg。采用激光焊接方法还能提高部件的尺寸精度，提高刚度，减少变形。

另外，电阻点焊需要很多工艺装备，需定期修磨电极和修正时间参数，更换电缆、电极、水气管等，LBW则不需要。同时，覆盖件毛坯基本成形后，使用激光切割进行修整和加工，可节省大量的样板和工艺装备。与现有的焊接方法相比，使用激光焊和加工切割可使车间面积减小一半，并使车间柔性化，从而大大节约投资。

②大面积镀锌薄板的拼接

汽车论坛 http://www.qclt.com

当前，车身的单个冲压件都有设计制造成大规格的倾向，原来几个冲压件装焊成一个合件，现改由一个大冲压件代替。零件的整体性更好了，冲压工艺与装焊工艺的成本降低了；由于激光焊焊缝窄，仅1mm左右，镀锌板焊接时接头处镀锌层烧损不严重，故可实施对大面积镀锌薄板的拼接，以解决大尺寸冲压件毛坯问题，目前已成功应用于轿车的底板、轿车整体侧围、车身顶盖等的坯料拼接。

⑤不同板厚、不同强度等级的冲压坯料的拼接

当今世界汽车制造上采用定制拼焊坯板方式来生产白车身部件已越来越风行。LBW被认为是最具竞争性的焊接方法。焊缝接头是一种特殊的I形搭接形式，即所谓的“裁剪毛坯”（Tailored Sheet）搭接形式。这种形式用于连接不同板厚（0.7～2.5mm）和/或不同类型的薄板。焊接后进行深冲拉延并在深冲拉延过程中产生和载荷强度相适应的空间结构。这种加工形式已经在系列车和样车的车身加工领域投入了实际应用并有了很多成功的范例，例如底板总成、前轮罩纵梁、B立柱、C立柱、侧围薄板件等。

此外，有些冲压件的材料利用率低，改成激光拼焊板坯后，由于改进排样方式，材料利用率大大提高。

5）轿车车身车间焊接设备对动力源等的要求

轿车车身车间动力配备的合理与否，直接关系到焊接生产的正常进行和焊接质量的稳定。所以，在考虑焊接设备的问题时，也应注意车间的动力配备问题。

（1）供电系统

白车身车间往往要用到几百台点、凸焊机，所以，白车身车间的供电问题，首先要考虑到对点、凸焊机的供电。各点、凸焊机工作时，要求电源电压的变化小于额定电压的10%。电阻焊变压器的工作性质都是瞬时脉冲通电，通电时间一般在0.1～0.5s左右。负载持续率较低，瞬时功率却很大，一台凸焊变压器使用时的瞬时功率可达到1KKV·A以上（例凸焊门铰链）。车间的总装机容量常常达到好几万千伏安，所需电源变压器的容量往往好几千千伏安甚至上万千伏安，所以规划配电时，常用几只电源变压器同时向车间馈电。用几只电源变压器同时向车间馈电时，从保证焊接质量讲，以各电源变压器并联后向各焊机供电为佳。在决定白车身车间供电容量和供电系统规划时，不仅要从发热角度考虑，以保证供电系统安全，还应该从限制供电系统的压降方面考虑，以保证焊接质量。决定供电系统后，还应该核算是否符合规定允许的焊机同时通电的几率，如不合要求，应该增加电源变压器的容量和加大配电线路的截面。

焊机的实际使用容量往往超过额定容量很多，大功率焊机通电时对电源电压影响很大。为防止因电源电压下降太多而影响焊接质量，除上述在选电源变压器和供电系统时应注意符合允许的同时通电焊机数的几率外，对焊机的通电进行群控也很有必要。用工业计算机和可编程序逻辑控制器（PLC）都可以对焊机进行群控。但后者的抗干扰性更好。

（2）供水系统

焊接中电阻焊的电流很大，产生的点焊热也很大。电极、可控硅、变压器，焊钳等都要由冷却水来冷却。冷却水系统不良，也要影响到生产和焊接质量。每台焊机的冷却系统，都有进水、出水总管，然后分成若干支路，分别给发热大的部件如焊接变压器、电极臂、次级通水电缆、电极、导电板、可控硅等进行冷却。一般焊接变压器应单设一个支路。可根据生产节拍和环境情况，进行冷却。应允许变压器有一定温升。不然，在空气湿度大、冷却水温度比室温低时，在变压器上易出现冷凝水。长期如此，将会降低变压器的绝缘强度，甚至绝缘击穿而烧毁变压器。冷却水应使用电阻系数大的软水，不然易产生水垢而堵塞冷却水管。若用了防触电开关，还易使防触电开关误动作。在进行冷却水系统设计时，还应考虑冷却水进出水管路的设计。焊机冷却水管的进出水压力差不能低于1MPa，出水压力不能超过1.5MPa。不然，冷却效果不好，焊机的冷却系统长期在较高的压力下工作，容易损坏。对悬挂焊机讲，由于通水电缆内压力高而变硬，使焊工操作不便。

（3）压缩空气

车身焊接车间内，焊接压力的获得，机械手、多点焊机的动作、各种气动夹具、风动工具等广泛使用压缩空气为动力源。车身零件复杂，使用的夹具多，生产时，要求互相间不干涉，焊钳能伸到要求的焊接处，要求气缸等气动元件的尺寸尽量紧凑。但是，焊接工艺要求焊接时有一定的焊接压力，焊接动作迅

汽车论坛 http://www.qclt.com

速，推动力大。所以，车身车间的压缩空气配备，除常用的压力为0.6MPa外，最好还配备压力为1.2MPa的压缩空气，以便在进行生产线设计时多一种选择。凸焊机和有的要求特别紧凑的地方用1.2MPa的压缩空气，以便尽量缩小气动元件的尺寸。

3.7.2.3 车身制造折边与涂胶

1）折边

四门两盖制造工艺，目前都是通过内、外板分总成（或外板为冲压件）后合拢，在专用或通用设备上折边制成，折边质量在很大程度上反映了轿车车身制造水平。车身的门盖总成折边压合部位要求光滑平整，没有压痕，并且要求工件整体尺寸精确稳定，在白车身总成装配后要和周围零件保持均匀的间隙，以达到良好的互换性，因此折边压合工序需要很好的设备及工装模具。

折边设备分为专用折边机和通用折边机两种。专用折边机是将设备和工装设计成一体，也称专用的气动或液压夹具，它专门为一种工件设计、造价较贵，只能适合在大批量流水生产线上使用。通用折边压力机折边是在通用折边压力机上安装折边压合模具进行折边，这种工艺方法适合于任何批量的门盖总成生产，而且，这种形式的生产线具有一定的柔性，能够适应多种生产，并能满足产品换型的需要。

折边压力机一般多采用液压机，公称压力大多为2 000kN左右。折边压合模具有的分两套，即45°和90°折边模各一套；有的采用复合折边模具，将45°和90°折边模具设计成为一套复合模具，使折边压力机一次行程即可以完成折边压合。复合折边压合模具的结构比较复杂。

门盖总成生产线的折边压合生产方式由车间的生产性质来决定。单一品种的大量流水生产线多采用专一的门盖总成生产线，即六种门盖总成采用六条生产线，每条生产线只生产一种工件。多品种、大批量或单一品种、中等批量的生产采用1～3条门盖总成生产线进行轮番式生产。门盖总成的轮番式生产要求车间的生产管理水平很高，要根据车间生产的门盖种类、批量及生产线的生产能力来确定生产周期，并有足够的工艺储存面积。

2）涂胶

轿车门外板总成与内板总成在合拢之前，在其与内板总成相配合的边缘部位涂上一条不连续的圆形环氧树脂胶或其它热塑性胶粘材料，经内板总成合成及翻边，这种工艺方法具有如下优点：

①以装配式结构代替焊接结构，使四门两盖总成的外板避免了点焊变形、开焊、击穿及表面点焊压痕，保证了车身总成的表面光滑；

②使门盖整体结构的应力分布状况更加合理，提高了整体组件的强度和刚度；

③具有较好的密封性和抗腐蚀性。

因此，门盖总成翻边胶粘工艺已越来越被人们所重视，并且已被通用、福特、克莱斯勒、大众及其它汽车公司或制造厂家所采用。

（1）涂胶设备与方式

涂胶机由空气动力泵（包括各种阀、高压柱塞缸等）、活塞式固定支架、涂胶枪及输胶软管等组成。涂胶的方式有手工涂胶、专用多头涂胶枪及机械手涂胶（或机器人涂胶）等三种涂胶方式。手工涂胶由人工控制涂胶枪进行涂胶，这种方式方便灵活并可以一机多用，但它的缺点是人为因素较大，涂胶枪的运动轨迹没有规律，运动速度不恒定，涂胶量不易得到控制，而且还增加了翻边后的清理工作。专用多头涂胶枪涂胶是在工件的上部、沿工件的涂胶曲线布置若干个涂胶枪自动进行涂胶，涂出的胶为点状，胶点之间有一定的距离，因此，翻边固化后对工件的强度、刚度及密封防腐性等都有一定的影响。机器人涂胶可以使运动程序、运动轨迹及运动速度更加灵活地调整，以适应工件的变化。机械手或机器人涂胶是最理想的涂胶方式。但是，选择何种涂胶方式要根据工件的生产批量、工件的外形及产品结构的要求来确定，同时还要考虑到投资的经济合理性。

（2）胶的固化

胶的固化工艺与所采用胶粘材料有关，不同成分的胶粘材料其固化工艺也不一样。如环氧树脂分为单组份和双组份两种，采用单组份的环氧树脂胶必须在加热状态下固化，而采用双组份的环氧树脂胶在常温

汽车论坛 http://www.qclt.com

下就可以固化，但达到完全固化的时间需要 12～24h。轿车门盖总成生产线的生产率一般很高，生产节奏在几十秒至几分钟之间，这么短的时间任何胶粘材料也无法自然固化。如果不进行加热固化，门盖总成则需要在翻边后沿周点焊若干个焊点，以保证工件具有一定的装卸强度。但是，这种工艺对焊点的质量要求很高，特别是要保证门盖总成外表面的光滑，因此，焊接工艺比较复杂。

粘接胶加热固化工艺有烘干式固化炉和感应加热固化两种方式。烘干式固化可以采用电能、天然气或煤气等几种方式进行加热，有间歇式传送工件和连续式传送工件两种形式。感应加热固化工艺是将工件通过自动或手工方法送进加热夹具中，并通过与零件外形相仿的感应器（感应器加热线圈）对门盖总成翻边涂胶部位进行加热。感应加热装置由交流电源（机械式发电机或可控硅中频发生器）、感应器及电容器组成。电容器是用来补偿感应器功率因素的。

由于这种方法加热的热量不是由外界输入，而是靠工件本身产生，并且是局部加热，所以加热迅速，冷却也快。一般工件被加热部位的温度在 200～300℃，加热时间及加热层深度由感应加热电源的功率和频率来确定。功率愈大，加热速度愈快，反之加热速度愈小；频率愈高，感应电流愈大，集肤效应也愈强，结果是加热愈迅速，但加热厚度愈小。一般轿车门盖总成类工件选择功率为 27～75kW、频率在 5～10kHz 的电源，加热时间在 5～30s，加热厚度要达到 3mm 左右。因为工件的加热时间很短，胶粘材料不可能达到彻底固化，但部分固化已使工件具有了一定的装卸强度，待到门盖总成随白车身总成进行表面涂装烘干时，胶粘材料可以达到完全固化。

3.7.2.4 车身车间的机械化运输设备

1）焊装生产中机械化运输的作用和意义

焊装自动化不仅要提高焊机自动化水平，还要进行工件自动化和工件传送自动化，即提高机械化运输水平。车身焊装自动化，最初是指单台焊机自动化。但实际的整个焊接进程中，真正用于焊接的时间很少（只有几秒到几十秒），大量时间花在人手移动焊件的动作上，并且，汽车生产中的车身覆盖件在工序间由手工搬运，不仅增加劳动强度，降低生产效率，而且又可能产生磕碰伤痕，影响制件的表面质量，所以，车身覆盖件与总成的机械化运输是车身焊装机械化自动化的重要问题之一。机械化运输设备在整个焊装生产中还起着组织与协调作用，是实现焊装过程省力化、自动化和科学管理化的核心，它的可靠性、稳定性，将会直接影响车身焊装过程的生产效率和焊接质量。

2）焊装生产中机械化运输设备的分类

车身车间的常用机械化运输设备通常可分为：架空运输设备（工件挂在输送机下面）、地面输送设备和起重运输设备。

（1）架空运输设备

同其它输送设备相比较，架空运输设备具有以下特点：

①能够形成空间线路和容易按焊装工艺要求布置线路；

②可以有很长的线路，单驱动装置时可达 400～500m，多驱动时可达 2 000m；

③不占用地面生产面积，动力消耗比较小；

④可以实现高度机械化和自动化，可以进行连续的、有节奏的生产；

⑤复杂线的安装精度要求高。

架空运输机的种类和规格很多，以牵引介质来划分，可分为链式输送、滚轮输送、C 形钩输送等。

（2）地面输送系统

地面输送系统也是车身车间普遍采用的输送方式，同样按传输介质来划分，常用的可分为往复式齿轮/齿条式输送机、皮带输送机、板式链输送机、滚床输送机、机器人输送等等。

①齿轮/齿条式往复输送机

往复式齿轮/齿条式输送机的结构原理如下：各工位拼焊结束后，往复式齿轮/齿条式输送机在举升电机的驱动下，各工位的举升装置打开，将位于工件下部的齿条举起，随后在水平驱动电机的驱动下，主驱动齿轮带动齿条向设定的方向运动，在控制系统的作用下，工件就可以被准确地送至下一工位，然后，输

汽车论坛 http://www.qclt.com

送机在举升电机的驱动下行，将工件放在拼焊夹具中，最后，输送机再在水平驱动电机的驱动下回到初始位置，结束了一个完整的输送循环。通常它的一个输送循环只需要 10～15s。

一般该系统采用电机驱动，利用齿轮/齿条传动，这是一种快速、准确的运输方式，可以实现工件的长距离、多工位间同时输送，它是目前的大规模汽车生产中经常采用的一种方式。由于该系统的举升装置占用一定的空间位置，而且拼焊夹具也有一定的高度，从人体工程学的角度出发，通常要在生产线的两侧搭建操作平台，这样，工人就可以在比较合理的高度进行操作。往复式齿轮/齿条式输送机系统往往由刚性材料组成，惯性较大，行进速度较快，而且它的行进路线与工人的工作区域干涉，所以对安全措施的要求较为严格。该系统由于采用齿轮/齿条传动，还会产生冲击噪声；同时，由于使用该系统后，留给夹具的空间有限，通常会给夹具的设计造成一定的困难。

②雪橇输送系统

很长一段时间内，运输系统的作用仅仅是工件在工位与工位之间运输，往往会出现由于一个工位的工装夹具的偏差而引发随后工装夹具所产生的适应性偏差，造成偏差在工位间的传递和放大，这样就会给发现偏差源及技术整改带来很大的困难，尤其是在工装夹具的调试阶段，更是需要一个相对独立于各工位工装夹具、且工位工装夹具能引以为参照的定位系统，这就是雪橇输送系统所发挥的作用。

雪橇往往与定位夹具做在一起，起着参考定位系的作用。雪橇在行进中，参考定位系及车身随之一同移动，这样就保证了每台车身参考定位系一经确定就始终保持恒定，避免了各工装夹具的偏差在各工位之间的传递和放大，有了恒定的参考坐标系，也易于发现偏差的来源。

雪橇在各工位的输送，通常采用往复式齿轮/齿条式输送机，由于该系统使用电机驱动，可实现准确的位置控制。在输送方式上，既可以作成由一个统一的驱动单元驱动，也可以实现仅由相邻两个工位间的往复式齿轮/齿条式输送机传动来实现摆渡。雪橇在运行过程中到达接近开关处或离开时还会发出感应控制信号。

③其它地面输送系统

地面输送系统的其它形式有皮带输送机、板式链输送机、滚道输送机、机器人输送及无人驾驶小车等等。

(3) 起重运输设备

起重运输设备对车身车间的机械化输送也发挥着重要的作用，它们通常用于各输送线之间的连接，在手工工位与自动输送线之间的连接中起到过渡的作用，常用的有电动葫芦、自行葫芦、龙门起重机和地面升降台。

3.7.2.5 汽车车身装配焊接夹具

1）汽车车身装配焊接夹具的特点

汽车车身装配焊接夹具由于汽车车身的特点、工作条件的限制，决定其结构形式的特性，较其它的机械装置（如金加工、车、铣、刨夹具）结构上有很大差异，从而带来了汽车车身装配焊接夹具的设计内容，设计方法的特殊性。

①汽车车身装配焊接夹具的定位方式、定位元件形状复杂，车身装配焊接夹具由于车身零件大多是三维空间曲面的冲压件，它们不仅形状复杂，而且刚性差，易变形。在夹具中定位时往往要合理地取车身某特定的曲面、孔作定位面、定位孔，定位孔的首选应是产品图的基准孔，从车身的装焊夹具整体考虑，定位基准孔应具有连续性。定位元件的正确性取决于车身零部件上的孔与面，准确的配合、贴合，及其加工精度。

②汽车车身零部件外形复杂，大多是三维空间曲面，尺寸较大，汽车车身装配焊接夹具上的定位控制与其他机械加工的夹具装置有较大的差异，装焊夹具的定位往往是过定位的设计。汽车车身各焊接部件的零件，分总成中的各零部件均有薄钢板装焊制成，其钢度较差，易变形。设计夹具时须考虑主定位辅助定位等多点定位，以保证在装焊部件时的正确性，尽量减少车身焊接时产生的焊接变形。

③汽车车身装配焊接夹具夹紧装置一般情况下通常采用手动与气动装置，大部分采用气动夹紧装置。

汽车论坛 http://www.qclt.com

在生产中要求快速加紧自锁，待焊接工作完成后，立即快速打开，夹紧装置的位置与结构设计需合理、精确、牢靠；动作的程序设计需准确、简捷。动作程序元件的选择要求较高，同时更要考虑工人操作的绝对安全和便利，这些都是在设计中绝对保证的。鉴于这些因素，夹紧装置的结构往往比较复杂。

④汽车车身装配焊接夹具设计时要充分分析车身零部件，考虑定位、定位装置、夹紧装置、输送装置及焊枪、焊钳之间的干扰问题。因为，通常是两个或两个以上的汽车车身零部件装配在车身装配焊接夹具上进行焊接，待焊接按工艺要求完成后，夹紧装置开启，从装焊夹具上取出已联成整体的汽车车身焊接部件或分总成、总成。这样设计人员必须充分考虑车身冲压件、分总成、总成在装配焊接前后取出等一系列的干涉问题，如定位装置、夹紧装置之间的干涉；焊枪、焊钳与定位装置、夹紧装置之间的干涉；定位面、夹紧位置尽量避开焊接的位置，免得在焊接工作中干涉。（注：在特殊的情况下，无法改变定位夹紧的位置与焊接的位置干扰，则采取补焊、分工位、逐步开启夹紧、利用其他焊接方法等处理装焊中的部分装焊干扰问题。）

2）汽车车身装配焊接夹具设计内容

汽车车身是一个由几百余种薄板冲压件，按所规定的装配焊接工艺，通过在装焊夹具上的定位，用多种不同的焊接方式，使各种车身的零部件构成一个完整、正确且复杂的结构体——汽车车身焊接总成。当然在构成一个完整、正确且复杂的汽车车身焊接总成中也包括采用其他一些机械联接方法。

①汽车车身装配焊接夹具必须由正确的工艺保证。

在将车身的各种合格的冲压件装配焊接成正确的车身各种零件、部件、分总成、车身总成的整个车身装配焊接制造过程中，制订正确的装配焊接工艺，严格按装配焊接工艺操作是一个非常重要的过程。所以，在装配焊接夹具的设计中，首先必须了解和熟悉其装配焊接的工艺及工艺要求。以桑塔纳2000前车门总成装焊工艺分析，它具有严格的程序性，即将冲压件的装配、焊接按先后顺序置放特定的装焊夹具定位销或面上，然后进行焊接。为了更合理和大批量生产，汽车车身的装配、焊接一般是将车身分成若干分总成，各分总成又可分成若干零部件，各零部件则是由若干个冲压件、零件组成。

②汽车车身装配焊接夹具具有合理的程序性。

汽车车身装配焊接程序，一般是按：零件→部件→分总成→汽车车身总成。在汽车车身的整个装配焊接过程中，一般是考虑符合汽车车身产品图的尺寸（零件的尺寸、部件的尺寸）及装配焊接中的定位正确与否。在装配焊接工艺中则考虑分总成、部件的划分应与整个汽车车身总成的装配焊接的程序及工艺要求相适应。汽车车身一般分前后底板、后围、前围、侧围、顶盖及四门二盖等主要部分。汽车车身总成装配焊接中，不论采用什么形式的装配焊接方法，往往都是先将分总成的下部作夹具的定位基准，孔（以基准孔为主），面（以基准面为主）作为定位基准。并且应考虑定位的连续，因为定位的连续性可以更加保证车身的准确和可靠，然后由左右部分装配焊接组成汽车车身骨架。

③汽车车身产品图是装配焊接夹具设计的主要依据。

首先对规划员开出的装配焊接夹具任务书进行确认，并且对设计任务书上方案设计的描述（或是对设计的具体要求）进行方案分析。然后，对由规划员提供的有关装配焊接设计的零部件、分总成或产品图进行详尽分析，了解该零件、部件、分总成或总成的相对坐标位置的关联。用三坐标的汽车车身产品图可以明确地表示各零件的所置的位置及零件与部件、分总成、总成的相互间空间尺寸的关系，有利于工艺装备的准确地设计和制造。在设计中按坐标系，可分成局部的车身，绘出装配焊接夹具中的各个构件，并正确表示出各构件的位置关系。

④在汽车车身装配焊接夹具设计制造中计算机辅助设计、计算机辅助制造应用的可靠性与必然性（CAD/CAM），电子计算机技术、数字测量技术、数控加工技术的发展、推广和应用使汽车工艺装备的设计跨入了信息加工时代。

在汽车车身设计中，汽车车身CAD的造型功能可进行内外覆件，车身外型的设计即直接在计算机上进行扫描测量，对测量后的数据进行分析处理，经计算整理后，建立车身表面形状数据模型，利用车身表面数学模型可获得车身表面形体数据。在整体结构设计的基础上进行详细的车身结构分析包括有限元分析、机构运动分析、人体工程分析、碰撞分析、热传导分析、空气动力分析、流体力学分析等。通过分析

汽车论坛 http://www.qclt.com

形成更合理的内外覆盖件，可达到更理想的产品设计的技术指标。

车身表面的形体数据作为传递车身尺寸的数据，依据这些数据设计与制造的工艺装备可得到更高的精度。利用这些共享的形体数据将车身设计、造型设计、结构设计、生产准备中的工艺装备设计（其中主要的工艺装备设计之一——汽车车身装配焊接夹具设计）及生产制造中检验测量等多方面有机地结合起来，从而形成了系统同步工程，使设计、制造紧密结合，大大缩短工艺装备、检测夹具设计、生产准备等周期，加速新产品开发，更快地把新车型推向市场。现代的车身设计已从传统的车身设计（例如美术造型设计、制造木质主型，然后获得一系列的人工测量数据，依据这些原始的数据，测绘出近似的车身结构、表面不稳定的形体设计图）变成为以机算机为主要手段的汽车车身CAD数据设计。

具有三维空间的汽车车身主要是由内外骨架冲压件与外覆盖件装配焊接（部分由机械联接方式）而构成的。且车身大型外覆盖件更为复杂，难度很大。汽车车身覆盖件生产的关键环节是工艺装备的设计、制造的协调，而由CAD/CAM来进行工艺装备的设计、制造，使协调环节减少到最少。加上同步工程的实现，这样大大缩短了生产准备的时间，不仅赢得时间，而且工艺装备的精度有很大的提高。这样对提高汽车车身的质量起了巨大的作用，从而增强了产品的市场竞争力。因此，在工艺装备、冲压模具、装配焊接夹具、检验夹具上CAD/CAM的推广应用理所当然受到人们的重视。汽车车身的装配焊接夹具设计是汽车车身工艺装备设计的主要部分之一。CAD/CAM的应用将是装配焊接夹具的设计与制造中的主要方式方法之一。

3.7.2.6 车身质量控制

1）车身缺陷分类

车身的缺陷一般分为三个方面：表面质量、尺寸精度和焊点质量

（1）车身表面质量

这是直接影响车身外观，是用户十分关注的问题。按区域分可分为三级：

①一级缺陷

指在外表可见部分及有特殊要求的部分内表面上的缺陷。这部分表面不允许有任何波纹、凸包、瘪塘、划伤、拉毛，并有相应的粗糙度要求。

②二级缺陷

车身中开闭部位（当车门开启时可见）及车身内部的缺陷。这部分只要求光滑、平整、均匀、无光照检验要求。

③三级缺陷

车身装完内饰后完全被遮盖，及完全不暴露的部分的缺陷，这部分允许有轻微的波纹。

（2）车身尺寸精度

车身尺寸精度对车身的装配是十分重要的，它会影响外表质量，如门的间隙，也会影响内部装配质量。为保证达到车身的尺寸精度，必须控制好两个方面：一是冲压件的尺寸精度，二是组成总成的夹具精度。

①定位面的精度要求

定位面是指冲压件与装焊夹具上定位块支撑面贴合的部分，无论在冲压件上或在夹具上的面都必须在图纸要求的范围内，并且两者间有很好的接触，也就是讲零件放入夹具后必须服贴，不得有强行压紧的现象，即压紧过程中不得有变形。并将零件固定在正确的位置上，从而保证总成件的尺寸精度。

②焊接面的精度要求

一般在车身上搭接面较多，除了型面符合要求外，还要求两搭接件之间互相贴合，允许有0.5～0.8mm的间隙，间隙过大会影响焊接质量，尤其是点焊件使零件拉扯发生变形，对质量影响很大。

（3）车身焊接质量

①点焊接头尺寸要求；

②焊缝的外观要求；

汽车论坛 http://www.qclt.com

③焊缝质量要求（包括焊点质量）

2）影响车身质量的因素

影响车身质量的因素除了焊缝质量外，还有以下三个方面：

①焊装是保证质量的中心问题。

焊装工艺过程不合理会影响质量。夹具的设计与制造对焊装质量起很大的作用。基准点的选择是导致误差积累的一个重要方面，结构形式的选择对质量也有很大的影响。

②冲压件的质量是焊装总成质量的基础。

③产品设计与工艺也是互为基础的。

产品设计的工艺性不能超越当时的工艺水平。为了提高质量，可以将冲压件设计成大分块零件，但工艺难度等大大增加，成本就高了。反之，假如分块太多，冲压件容易达到要求，材料利用率也高了，但拼焊的误差也随之提高，质量势必下降。所以，设计与工艺是质量矛盾的两个方面。

3）车身质量各种检测方法

（1）线外抽样检查

①检验样架

在生产中用检验样架是比较方便、直观的办法，实际上是一种与标准位置作比较的方法，可以测定零件的形状和位置偏差。

②三坐标测量仪

在现代化生产中，三坐标测量的优点是检测精度高，可以精确到1μm，检测时直接与计算机配合工作将所采得的数据与CAD数据比较得出偏差。

（2）激光在线检测

①在线检测的目的

在线检测是指将检测手段放置在生产线上，作为生产中必须的一个步骤的检验方式。这样作的目的，一是扩大检测量，可以作到百分之百检测；二是为了发现生产中的问题，有效地控制质量。三是为搞好工序质量统计控制提供足够的样件数据。

②在线检测的特点

a. 快速：由于是在生产线上设置的检测工位，必须跟上生产节拍，不仅要快速检测，还要快速作出结论；

b. 实时性、有效性；

c. 可以作到百分之百的检查：根据需要可做百分之百的检查，也可以设计成重点部位的轮流检查。

（3）综合匹配样架

这里的综合匹配样架是一个放在三坐标测量仪上的大型框架，框架按车身的相关尺寸精确地制造出来，然后将标准的车身零件（主要以外覆盖件为主），用螺钉连接的方式固定在框架上，经三坐标测量仪校核，确保车身有较高的精度，也就是不仅每个零件都要符合产品质量的要求，并且都经过匹配，达到整体符合产品质量的要求。在使用中凡要检测的零件只需拆卸下相应的零件，将被测件用螺钉连接上，就可以利用三坐标测量仪测出偏差，也可直接目测被测件的使用效果，在样架上确定改进的方法。

4）车身质量新的控制系统

（1）RPS（Reference Point System）系统

RPS系统就是汽车设计制造中始终贯穿前后的参考点系统。是目前正在汽车制造业中逐步得到应用的新的定位体系，它对保证汽车零部件尺寸稳定性和零部件功能，保证整车质量稳定性方面所起到的作用越来越被人们所重视。这个体系实际就是指在产品开始设计时，到制造过程中的各个环节，能找到并使用一种统一的、通用的，并带有相应公差范围的在空间固定部件的定位点。也就是讲，在产品设计、制造和质量保证过程中，能够考虑引入一个基准点系统，使其成为产品设计制造和质量保证共同使用的定位体系。这里强调的是在产品设计一开始，就把这个基准点系统确定下来，这个系统就称之为RPS系统。

（2）“2mm工程”简介

这里的“2mm”是一个描述车体尺寸变量的参数。由于车体尺寸服从正态分布，因此在给定样品数量的条件下，对车体上各测量点的测量值进行统计，统计分布的6倍标准差（$\pm 3\sigma$）应不大于2mm，也就是说，无论统计均值和标准差具体是多少，其测量值在上下界限（$\mu+3\sigma$）与（$\mu-3\sigma$）为± 1之间出现的概率都是99.73%。

提出“2mm工程”的目的是找出一组或一种可以控制轿车车体制造过程中的白车身尺寸精度的行之有效的方法，将白车身的制造误差控制在2mm以内，进而改善车体的质量，并且通过这种方法，进一步带动多种先进技术的开发与应用，提高人们对车体装配过程的科学认识。

“2mm工程”在工程中的意义：

①可以减少从发现产品缺陷到查明其原因的时间，缩短试制周期，降低产品的开发费用；

②可以有效地解决由于各部件误差导致的白车身装配过程中的装配困难或无法装配等故障而生产效率较低等问题。

③有效的防止车体局部渗水，提高车体性能及使用寿命，较小的车门间隙，降低噪声，提高乘坐的舒适性。

3.7.3 车身外部饰件

3.7.3.1 保险杠概述

保险杠，安装于车辆前后端。保险杠既是汽车的缓冲机构也是汽车的重要外装饰件，其主要作用为：

①当汽车同其它车辆或物体相接触时，起防护车身及相关装置的作用；

②当汽车同其它车辆或物体发生碰撞时，起缓冲作用，耗散一定的能量，避免或减轻汽车受损；

③是汽车外形设计的重要载体，给人以重要外形视觉效果。

3.7.3.2 保险杠构成

汽车自诞生发展到目前，随功能要求的不断提高，结构不断完善，目前，保险杠主要由以下部分构成：

①保险杠面罩；

②缓冲部分；

③支承部分。

3.7.3.3 保险杠使用材料

汽车安装保险杠的历史悠久，几乎在汽车面世时同时诞生。在很长的历史阶段内，保险杠的材料几乎都是钢板。以后，在欧洲汽车保险杠上开始采用铝制件；此外，有一些汽车使用橡胶件作为保险杠的局部缓冲构件。

1）传统材料

①以钢板作为保险杠材料，早期一般取厚度为3mm的板料，其断面是单一的刚性元件；以冲压，辊压成形为主要制造手段。当保险杠发展为车身前后覆盖件的一部分时，其断面形状日趋复杂，以冲压拉伸为主要制造手段，拉伸工艺的使用，为提高制件的刚性和轻量化创造了有利条件，现一般使用2mm左右厚的钢板。

②铝合金保险杠具有质量轻、耐腐蚀性强等优点；较低的弹性模量使铝合金具有有利的物理特性；铝制件在受到永久变形前，允许承受较大弯矩。所有这些特点曾引起各汽车制造厂商关于保险杠铝制化的研究，并在公共客车上应用。保险杠铝制件一般采用挤压成形的制造手段。

③树脂材料的应用：20世纪60年代末，随着安全、节能等社会性要求的增长，汽车业全球性竞争的加剧，汽车制造业降成本风起云涌，汽车保险杠使用树脂材料的进程得到极快发展，现在轿车保险杠几乎全部采用树脂材料。树脂保险杠与金属制保险杠相比具备以下方面的优势：形状的自由度、碰撞能量的耗

汽车论坛 http://www.qclt.com

散性、形状的复原性、易于零件一体化设计、防锈蚀、轻量化、制造周期短。

2）树脂保险杠的材料

（1）聚氨酯（PU）

具有良好的成形性，制品受外力变形后复原性好；美国及日本汽车制造业曾经较多运用。随着生产效率要求和物理特性要求的不断提高，材料供应商曾经积极致力于高活性化材料、玻璃纤维增强材料、反应模塑分型剂的研究开发。PU保险杠采用模内反应模塑工艺制造（RIM成形），除模具外，还需专用压机。对于PU保险杠，在制造过程中产生的不合格品、车辆报废后的废旧保险杠，可回收性较差。目前，聚氨酯材料日益被其它塑料材料所取代，用于保险杠生产。

（2）二甲氨基

在欧美，PC/PBT合金材料曾经被大量用作保险杠材料，由于材料成本较高，日益被其它塑料材料所取代。

（3）合成橡胶材料

烯烃、聚酯等与聚氨酯类类似并具有橡胶特性的材料在保险杠上的应用，得到原材料供应商的关注、研究和开发。由于可以采用注射成形工艺，作为聚氨酯材料的替代材料已开始得到应用。

（4）PP材料

当前，PP作为保险杠材料，所占份额越来越大。这是由于其具备材料成本低的优势；随着材料改性技术、聚合物混合技术，涂装底涂技术的不断纵深和发展，制造工艺性得到优化、制造成本下降，所以其应用范围还在扩大之中。目前，一般通过在PP树脂中加入滑石粉和橡胶来提高材料性能，以适应保险杠的刚性和耐碰撞性要求。

3.7.3.4 树脂保险杠的制造工序

1）成形制造工序（图3-7-3）

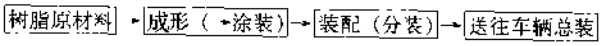


图3-7-3 树脂保险杠成形制造工序

目前，成形方法以注射成形和RIM成形为主要方式。

2）注射成形工序

注射成形主要设备为注塑机，主要工序组成如图3-7-4。

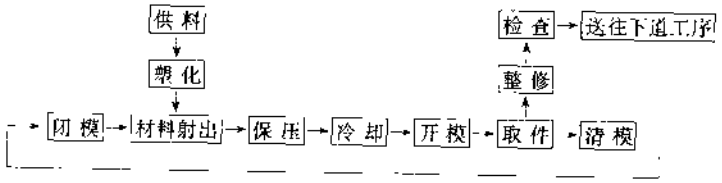


图3-7-4 注塑机工序

结合自动化工程，设置必要的机械手及自动输送装置，注射成形易于实现无人操作、多台设备联机监控，是一种生产效率较高的生产方式。

注射成形生产保险杠，常见产品缺陷主要有：气孔、缩瘪、融接痕、浇口汶流痕等。为保证高质量、高效率的生产，注重材料的流动性、优化模具结构、提高模具精度、完善成形工艺条件极为重要。在注射成形领域，产品设计、模具设计阶段，随着预测成形加工性的CAE技术不断进步，将成为缩短开发周期、提高质量、降低成本的有效途径。

3）RIM成形工序

RIM成形主要设备为压力机和高压发泡机，主要工序组成如图3-7-5。

RIM成形在低压下成形是其特点，由此，设备费用、模具费用相对较低，常见产品缺陷主要有：气孔、空洞、针孔、表面层皮等。由于材料粘度低、注射速度快，气孔、空洞是主要缺陷。生产过程中，模内清理及清理制件飞边毛刺均需人工操作。

汽车论坛 http://www.qclt.com

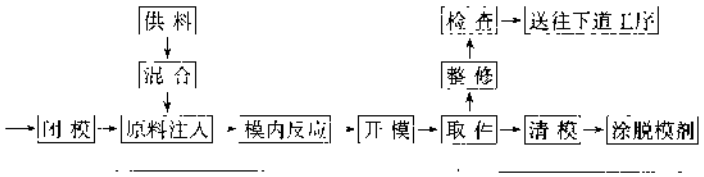


图 3 7 5 RIM成形工序

注射成形与 RIM 成形的比较情况如表 3-7-1。

表 3-7-1 注 射 成 形

成形方法	适用材料	锁模力	循环时间	主要特点
注射成形	PP系列 二甲氨基系列 合成橡胶系列	约 2 000～3 200t	约 1～1.6min	效率高
RIM成形	聚氨酯系列	约 100～160t	约 2.5～4min	设备、模具费用较低

3.7.3.5 树脂保险杠的涂装工艺

树脂保险杠的主要涂装工艺过程如图 3-7-6。

成形件→清洗脱脂→等离子处理→底漆→烘烤→色漆→面漆→烘烤→检查

图 3 7-6 树脂保险杠的涂装工艺

一般，脱脂工序时还考虑达到激活制件表面材料的效果；底漆为提高、确保涂层粘合性；对于 PP 系列材料，通过等离子处理，提高、确保涂层与材料表面的粘合性；涂料与树脂原料的伸长率一致性要求较高。

3.7.3.6 涂装树脂保险杠的形式试验

涂装树脂保险杠具有完备的形式试验要求，除了有关原材料（树脂、涂料）的标准、试验要求外，形式试验一般包括以下内容：

①产品的尺寸热稳定性；

②漆膜厚度；

③涂料耐久性；

④面漆外观要求；

⑤冲击试验等等。

3.7.4 车身内饰

3.7.4.1 仪表板

1）概述

仪表板是汽车主要的内饰件之一。

从产品的功能角度出发，要求仪表板能安装驾驶员驾车时需要的各种仪表，控制开关及驾驶控制区域的各种附件，例如，除霜器、除雾器、空调及其冷热空气的出风口、音响、手套箱、安全气囊等。随着汽车驾驶者花在路上的时间越来越多，汽车的易操作性也就更为重要。为保证它们正常和可靠地工作，应有相应的强度和刚度，由于乘上车首先进入视野的就是仪表板，因此，对其造型、质感、舒适性要求较高，

汽车论坛 http://www.qclt.com

同时耐热性、耐寒性、耐光照、耐摩擦也是必要的指标。

从安全的角度来说，还要求仪表板具有防眩目、难燃烧，能吸收汽车碰撞时的冲击能量等要求。

在设计仪表板和选择材料时必须考虑以上功能和要求，这些功能、性能和安全要求都有具体的技术规范和国家法规。随着用户要求的日益多样化和法规的逐步完善、加工技术的进步，尤其是尖端电子技术的产业化，预计今后还将有更大的发展。

2）仪表板本体的结构和常用的主要材料

（1）结构

仪表板本体是用于安装以上各种组件的基础件，它的结构大致可以分为软化型、半软化型和硬质三类。

①软化型仪表板：

整个仪表板本体的骨架上都覆盖着半硬质的聚氨酯泡沫填料，手感好　图 3-7-7 表示其断面结构。

②半软化型仪表板：

只在仪表板的本体部分手易触摸到的部位，镶嵌带有半硬质的聚氨酯泡沫填料的覆盖件。

③硬质仪表板：

整个仪表板本体用金属材料或钢性较好的塑料材料制成，完全不覆盖带有半硬质的聚氨酯泡沫填料。

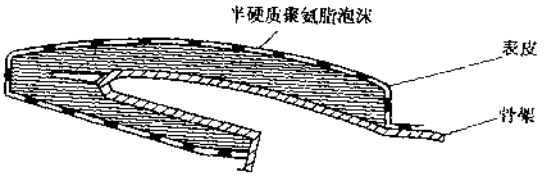


图 3-7-7　软化仪表板断面结构

除此之外，随着新工艺技术的开发，介于软、硬仪表板之间的，还有一种用粘合剂直接将 PVC 薄膜黏附在金属骨架上的仪表板，由于工艺的局限性，只适用于形状简单，产量较小的仪表板产品。

（2）主要材料

仪表板本体常用的材料如下：

①表皮材料：

PVC 和 ABS 复合或混合制成的薄膜、PVC 干粉等。

②骨架（基体）材料：

PPG、ABS、PPO、PU＋玻纤或金属。

③填充材料：

半硬质聚氨酯泡沫。

3）仪表板本体的制造工艺流程

仪表板根据汽车形式、规格要求，应采用不同的成形方式进行制造加工。

软化仪表板本体的工艺过程具有一定的代表性，具体见图 3-7-8。

表皮成形→骨架注塑→半硬质的聚氨酯泡沫发泡填充→冲孔、切边→焊接或装配相关组件→检验

图 3-7-8　仪表板本体成形工艺

（1）表皮成形

表皮成形又分为真空成形和搪塑成形。

真空成形采用的材料是 PVC/ABS 薄膜，用压框将加热后的薄膜与模具型面构成封闭的空腔，真空泵将空腔内的空气在很短的时间内抽去，借助于大气压力使薄膜拉伸变形，覆盖在模具的型面上，再经适当的冷却定型，脱出后就获得需要的制品。真空成形工艺又有凸模真空成形和凹模真空成形两类。图 3-7-9 表示的是凸模真空成形工艺，常用于仪表板产品。

搪塑成形工艺采用的材料是 PVC 干粉。将一定量的干粉加入预热的凹模中，启动旋转设备和加热装置，使粉料熔融塑化，粘附在模腔壁，待冷却后，从模内脱取出所需制品。这种工艺制成的制品，表皮纹理逼真，厚度均匀，残余应力很小，造型的自由度大，但模具的制作工艺复杂，设备投资大，因此，常被高级车的仪表板采用

汽车论坛　http://www.qclt.com

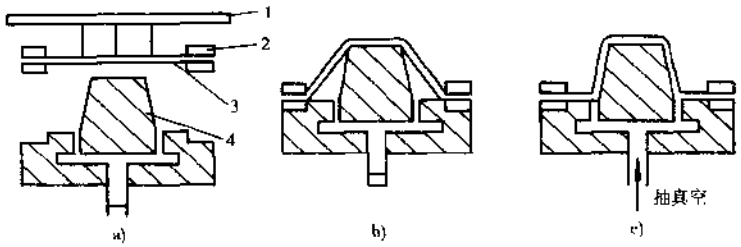


图 3-7-9 凸模真空成形工艺
1-加热板；2-压框；3-表皮；4-凸模

(2) 骨架制造

仪表板骨架一般采用注塑件，生产效率高，一般生产节拍在 90s 左右。少量的废品可以回用。由于仪表板骨架体积大，形状复杂，其尺寸和形状以及相对位置要求高，为保证注塑制品的质量，注塑工艺参数应严格控制。

(3) 泡沫填料

半硬质的聚氨酯泡沫填料采用的反应注射成形法，是将两种液体的组合料，在压力下通过混合室，同时注射到模具内，均匀混合的液体在表皮与骨架之间的空腔内反应发泡成形。待反应基本完成后开启模具，将制品取出。图 3-7-10 示意带有浇注混合头的仪表板发泡模具。半硬质的聚氨酯的聚氨酯泡沫是开空性的，制品具有良好的回弹性，使人接触后感觉舒适，并能吸收 50%～70%的冲击能量

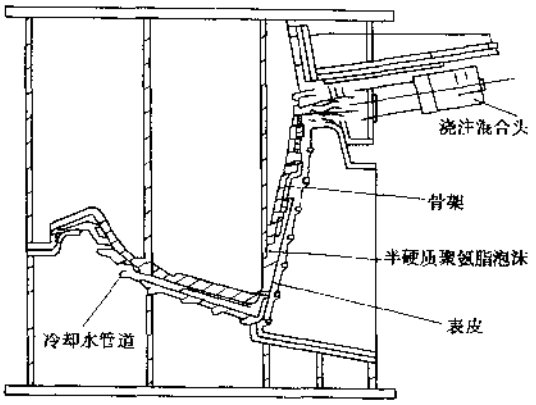


图 3-7-10 带浇注混合头的发泡模具

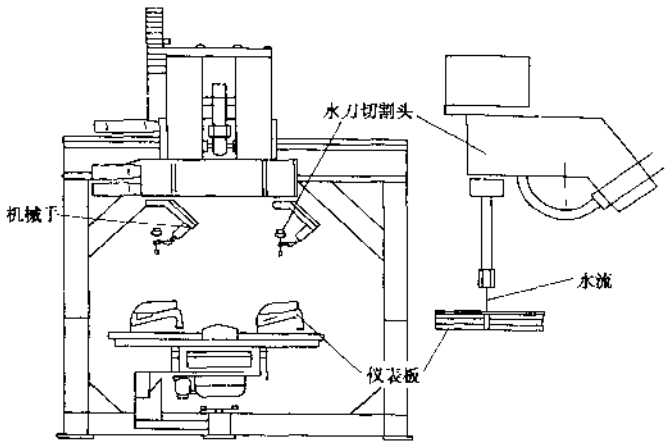


图 3-7-11 水刀设备示意图

(4) 冲孔、切边

冲孔、切边工艺可以根据产品的形状和生产批量，选择压力机冲切、热刀切割和水刀切割等方式。

热刀切割是采用电加热割刀来切断表皮，一般用在只需割去表皮的部位

水刀切割是利用高压水流冲去需切去的部位，如果只需切去表皮，水的压力一般为 20 000psi，如果需切断表皮、泡沫层和骨架，则水的压力要增加到 50 000psi，切割的速度根据不同的材料可以从 10cm/min 到 350cm/min，切割头联接在机械手上，切割轨迹由计算机控制。图 3-7-11 为常见的水刀切割设备。

4) 仪表板的检验及其装备

日常生产的仪表板，在工艺条件稳

汽车论坛 http://www.qclt.com

定的状态下，一般出厂检验注重在外观要求和重要的配合尺寸。生产厂应备有总成检具及配有合适照明条件的外观评定区，此外，应建立适当的检查颜色和纹理的标准样板和培养合格的外观检验人员。

由于轿车仪表板产品大部分采用非金属材料，因此对仪表板产品重要的检验项目应包括检验其耐热、耐低温、耐环境气候、耐红外线、耐阳光、耐摩擦等性能。对法规要求来说，其阻燃、吸收冲击能量和安全气囊的爆破试验必须满足规定的性能指标要求。

能满足以上仪表板性能试验的设备有：气候老化试验箱、低温试验箱、氙光仪、摩擦色牢度仪、气雾试验机、热失重分析仪、标准光源、燃烧特性测定仪等通用设备和头型体冲击仪、气囊爆破试验机等专用设备。

3.7.4.2 车门内饰板

1）概述

（1）功能

①覆盖和保护作用

用于覆盖安装于车门板金属本体内的各种功能性零部件，确保乘员的安全和这些零部件的正常工作。

②防尘防水作用

用于防止车外的灰尘、雨水进入车内。

③隔音、吸振作用

用于隔断车外的噪声，吸收车辆自身或音响设施甚至外界碰撞带来的振动和冲击。

④美化作用

它与车内其它饰件共同构成一个汽车车箱整体空间和艺术造型效果。

随着车型和车辆档次的不同，这些功能将受到不同程度的侧重。

（2）分类与构成

①分类

车门内饰板的分类，按不同诸元区划有不同的分类方法，按其自身结构、功能、适用的车型、档次等因素综合起来可分为：简单经济型、普通型、中高档型。

②结构

a. 简单经济型：

这类门内饰板的特点是：结构简单，造型简洁，基本上是呈平面型，材料价格与制造工艺成本低廉，主要用于货车、客车、吉普车等车型。其构成由：芯材、衬垫和蒙皮三部分，根据整车的具体配置需求：有芯材、芯材上加蒙皮或芯材与蒙皮之间夹一层衬垫等，组合使用（图 3-7-12）。

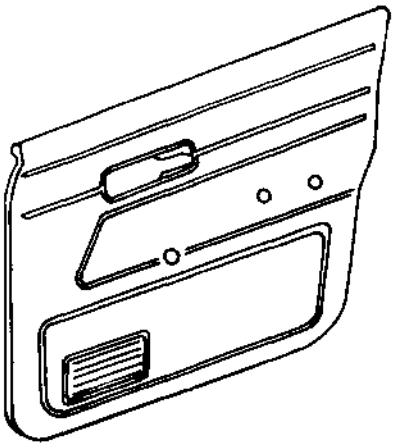


图 3-7-12 简单经济型门内饰板

芯材的材料：主要有纤维板、硬纸板、胶合板、塑料板、压延钢板等。

衬垫的材料：主要有聚氯乙烯无纺布、氯乙烯泡沫等。

蒙皮的材料：主要有聚氯乙烯革。

b. 普通型：

这类门内饰板的特点是：结构比较复杂，造型比较注重人体工程因素，选材比较讲究，加工设备比较复杂，总体上比较美观，主要用于普通型、中低档轿车。

其结构主要有：芯材、蒙皮、局部衬垫和装饰条等构成，这类车门内饰板有时下部还设有防护板，以提高饰板使用寿命和方便清洁（图 3-7-13）。

汽车论坛 http://www.qclt.com

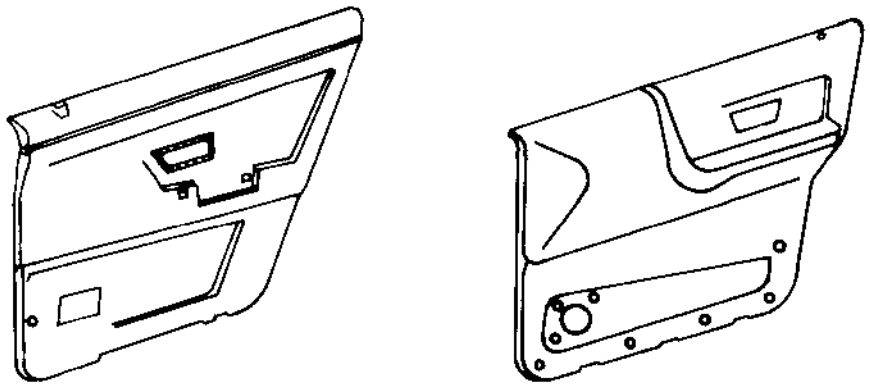


图 3 7-13 普通型门内饰板

芯材材料：主要有注塑件、聚丙烯加填充料板材等。

蒙皮材料：主要有织物、聚氯乙烯针泡革。

衬垫材料：主要有海棉、较厚的聚氯乙烯无纺布、半硬质聚胺酯主要用于搁手部位。

饰条材料：主要有聚氯乙烯、ABS、热融薄膜构成的复合材料。

门护板材料：主要有 ABS 等。

c. 中高档型：

这类车门内饰板的特点是：结构复杂，造型与配置上充分考虑到舒适、安全、人体工程等因素，功能齐全，选材讲究，加工设备与制造工艺复杂，总体上美观中呈豪华。

其结构主要由芯材、蒙皮、软化件单体、隔音垫、防撞吸振块、指示照明灯等构成（图 3-7-14）。

芯材材料：主要有注塑件等。

蒙皮材料：主要有带有较厚泡沫层的聚氯乙烯针泡革、真皮等。在一些乘员经常触摸的部位一般均覆盖有软触漆。

隔音垫材料：主要有再生棉毡、泡沫、泡沫橡胶等。

防撞吸振材料：主要有 PU 聚胺酯发泡、PP 聚丙烯发泡。

指示照明灯罩材料：主要有 PC 聚碳酸酯、丙乙酸酯等。

软化体单件：由芯材、衬垫和蒙皮组成的小构件，主要置于门内饰板相对乘员人体手臂与肩等部位接触处。

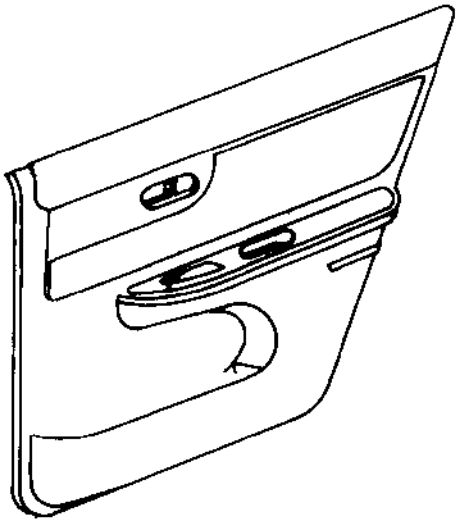


图 3-7-14 中高档型门内饰板

(3) 决定车门内饰板技术状态的诸因素

①车辆的类型与档次及所要满足的功能。

②与乘员人体工程学相关的安全性、舒适性、操作性。如尽量少减少车内宽度、搁手作用、软化要求及门锁内扳手、玻璃升降机摇手柄、车门内拉手等操作的方便性。

③能承受必要的最低限度的外力和重力。

④有良好的工艺性、生产率、拆装方便，以便维修。

⑤总体上与车厢内饰及整车外部协调。

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑥在选材上应考虑到：重量小、便于加工，具有高频加热性能；安全性、外形美观、手感好；隔音、防水、阻燃、隔热等性能。

(4) 与车门内饰板相关的零部件

①操作件：

车门内扳手、玻璃升降机摇手柄（或电动升降按钮）、门锁内扳手及保险按钮、后视镜操作手柄等。

②附件：

搁手（简单经济型车门内饰板有单独的搁手，普通型与中高档型车门内饰板搁手往往由车门内饰板本体自身造型构成）、地图袋或杂物箱（盒）、烟尘盒、扬声器、照明灯、指示灯或安全气囊等。

这些零部件的配置随车辆类型与档次不同而不同。

2) 制造工艺

(1) 加工工艺

①简单经济型：

这类车门内饰板的加工工艺最为简单，其典型工艺流程如图 3-7-15。

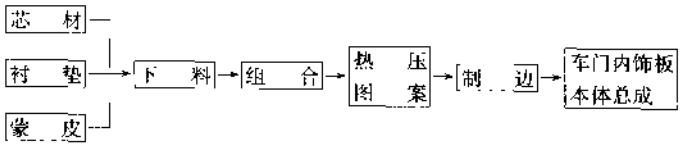


图 3-7-15 经济型内饰板工艺

②普通型：

这类门内饰板的加工工艺比较复杂，其典型工艺流程如图 3-7-16。

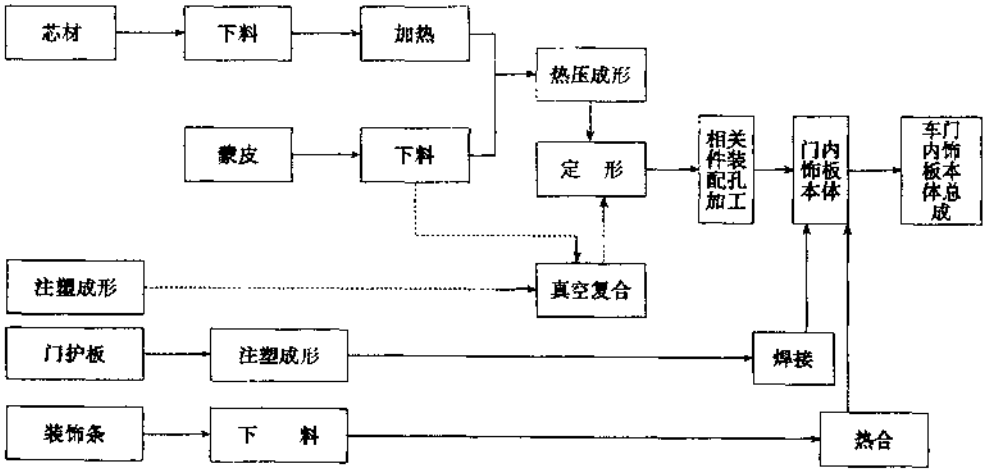


图 3-7-16 普通型内饰板工艺

③中高档型：

这类门内饰板的工艺最为复杂，其典型工艺流程如图 3-7-17。

(2) 装配工艺

①车门内饰板总成装配

a. 简单经济型：主要有粘合、高频熔焊、打钉、铆接、螺纹联结等。

b. 普通型：主要有粘合、热压复合、真空复合和塑料焊接工艺，如：高频熔焊、摩擦焊等，以及一些特殊场合下使用的借助于机械辅助夹固零件的机械式装配。

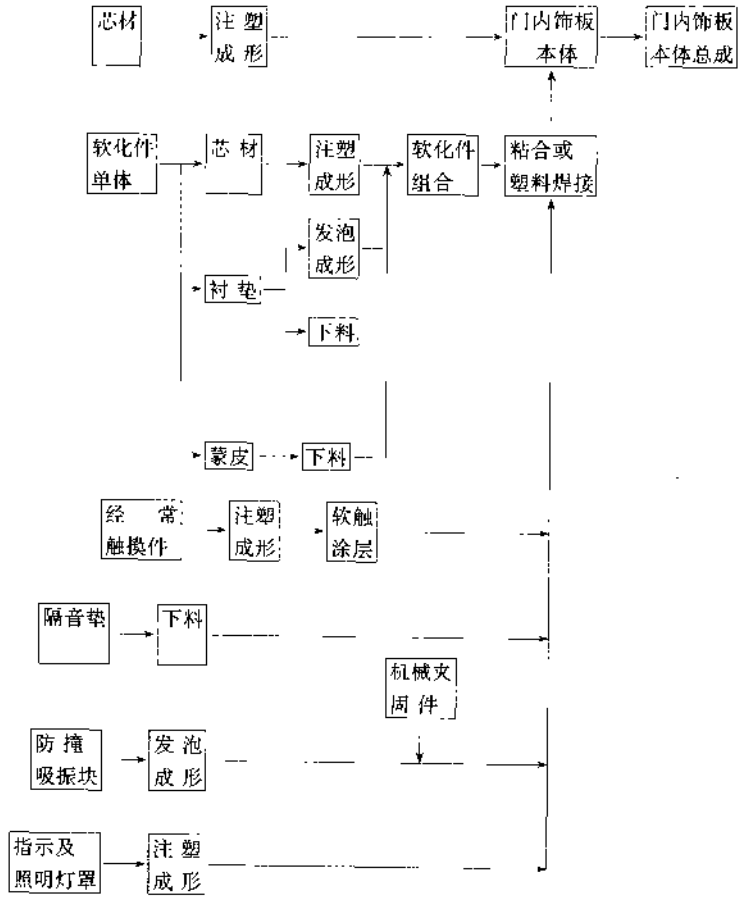


图 3-7-17 中高档型内饰板工艺

c. 中、高档型：主要有粘合和塑料焊接工艺（如：超声波焊接、热柱焊接等）等工艺。

②车门内饰板装车：

一般采用的方法有：螺钉连接、卡口和嵌入式等连接方法，或者是这几种方法组合使用。

a. 螺钉连接：

由紧固件螺钉直接或通过中间连接件将门内饰板固定于车门板金属本体上。

b. 卡扣连接：

门内饰板借助于带有弹性胀紧止退功能的金属卡钉，直接卡入车门金属本体上的预置孔或预置孔上的嵌管孔眼中的方法，固定在车门板金属本体上。

c. 嵌入连接：

此连接方式一般不单独使用，往往要借助于车门总成上的车门窗玻璃密封条，辅以螺钉连接组合使用。另外，装在车门内饰上的门锁内扳手、车门内拉手、玻璃升降机手柄、搁手、后视镜手柄等均与门内饰板构成装配关系，并兼有固定门内饰板的作用。

3）质量考核典型试验

（1）几何形状与尺寸检查

应符合图纸要求。

（2）外观检查

色调、花纹、加工与装配过程中产生的局部缺陷。

汽车论坛 http://www.qclt.com

(3) 称重试验

考核门内板饰件本体总成自身质量。

(4) 老化试验

系高、低温及湿热交变试验。考核在极限气候使用条件下，外观和功能上的变化。

(5) 耐光照试验

系褪色试验。考核光照条件下，蒙皮颜色变色、开裂、老化情况。

(6) 撕裂试验

考核常温及老化试验后蒙皮与骨架间的结合。

(7) 磨试验

考核蒙皮耐磨性。

(8) 燃烧性试验

考核门内饰板材料燃烧速度的限制。

(9) 装车路试

考核门内饰板在车门总成中及整车中的装配关系和对门内饰板在实际工况下进行综合性考核。

(10) 车门内饰板试验考核的新趋势

①与人的相容性。

产品必须对人体生理无害，不允许有皮肤刺激和嗅觉损害，散发的成分必须无毒性。

②对洗涤剂的耐抗性。

3.7.4.3 座椅

1) 概述

座椅是汽车中唯一的每一个乘员都要接触的系统，也是除了动力系统之外最为昂贵的汽车部件系统。汽车座椅有四个主要的功能：

(1) 支承乘员

座椅必须能够使乘员长时间地处于一个稳定的位置，并必须在其调节装置（如滑道、调角器等）的调节范围内能够适合于社会人群中的绝大多数不同体重、个头的人。

(2) 定位乘员

乘员在汽车里的位置对于安全驾车极为重要，乘员在汽车里的位置有三个关键因素必须考虑：头、手臂和腿的空间，视野以及驾驶员与控制装置之间的距离。

(3) 提供乘员舒适性

汽车座椅必须为所有乘员提供一定的舒适性。除达到短时间的舒适性之外，重点应在于当长时间驾车或乘车时，使疲劳程度尽可能的低。

舒适性是一个主观因素相当大的问题，有关汽车舒适性的研究还在不断的进行之中。目前在座椅设计中主要采用三个指标来评价其舒适性。即负载压陷变形、静态压力分布、固有频率。

负载压陷变形是用于评估座椅硬度的指标，座椅过硬可能导致不适，但如果没有足够的承载能力则可能导致乘员容易疲劳或感受到有不适的硬点。该指标的测试是针对泡沫件而并非座椅总成。

静态压力分布是在座椅的各个部位放置许多压力传感器，将收集到的数据经计算机处理后可通过二维或三维图形来表示。一个舒适的座椅在与人体接触面上的压力分布应是相当均一的，没有太多的高点或低点。

固有频率，座椅的频率应避开对人体有影响的频率范围和车身的固有频率，以免产生共振和使乘员不适。

此外，客户的反馈意见在决定座椅的舒适性上也起到很重要的作用。

(4) 保护乘员

保护乘员是一个非常严肃的问题。设计中有好几个因素会影响到坐在汽车座椅里乘员的安全：

座椅设计必须能够阻止乘员无论是前后还是左右的无意识移动。尤其对驾驶员来说，无意识的移动会导致失去控制和交通事故。

座椅的设计必须能够阻止乘员在保险带或其它限制系统下滑动。如果事故发生，乘员在保险带下滑动，会使乘客造成内伤。

座椅与车身的固定和座椅调节装置的锁定必须十分可靠，当汽车突然停止或快速减速时，不会发生移动或倾翻。

保险带往往被固定在座椅上，在这种情况下，座椅必须能够承受足够的冲击载荷以防止限制系统失控对乘员造成伤害。

座椅的头枕在事故发生时可以限制头部和颈部的运动并吸收冲击力，防止或减轻对乘员的伤害。

由于座椅对保护乘员的安全起到至关重要的作用，在汽车中被定义为安全件。

2）座椅的类型和构成

（1）座椅的类型

有单座座椅、完全式长座椅、分开式长座椅(可按 50/50、60/40 或其它比例分开)、折叠式后座椅等，见图 3-7-18。

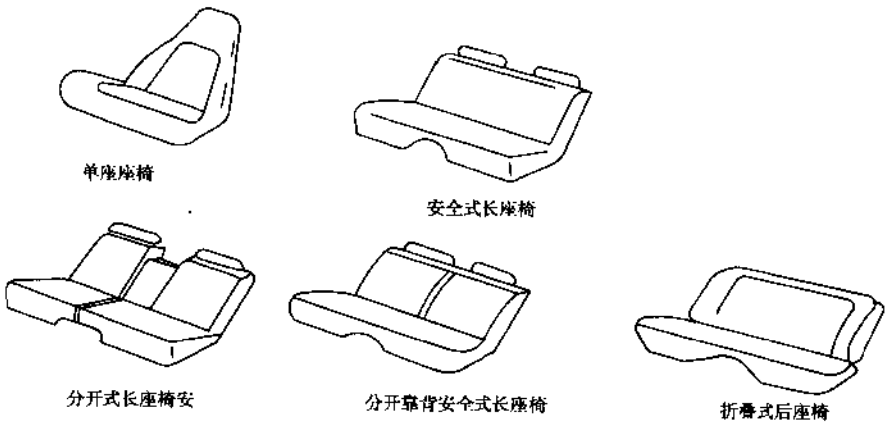


图 3-7-18 座椅的类型

前座椅一般采用单座座椅，通常是可以调节的。轿车中后排座椅由车身支撑，通常是不可调节的，但一些新设计的后座椅被设计成可以移动或翻转，以增加后行李箱的容积；轻型客车的中间座椅和后排座椅有用单座座椅的，也有用长座椅的，有些单座座椅可以旋转，有些座椅被设计为可以快速拆装以适应不同用途需要。

（2）构成

在座椅中，根据各部分所处位置可分为靠背、座垫、侧翼、侧垫、中块、头枕和扶手等，见图 3-7-19。

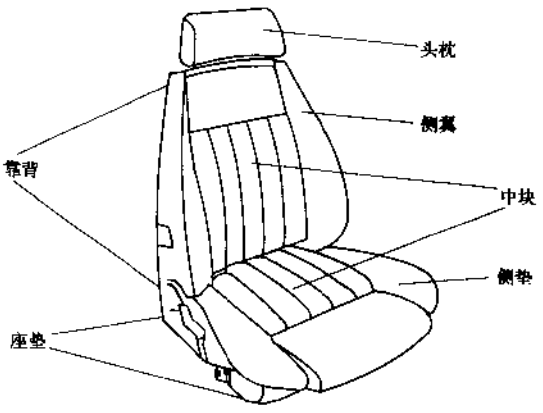


图 3-7 19 座椅各部位名称

①靠背

靠背是座椅中用于支撑乘员背部的部分。靠背通常可以通过调角器调节倾斜角度，在靠背中也可以设置可调节的腰托和侧翼，一个完整的靠背还包括面套。靠背总成通常通过调角器与座垫总成组合。

②座垫

汽车论坛 http://www.qclt.com

座垫是座椅中用于支承乘员的坐骨和大腿的部分。座垫可以装上滑道，也可以有可调节的大腿支撑垫。一个完整的座垫也同样包括面套，装上面套的座垫总成即可与靠背总成组合。

③侧翼

侧翼位于靠背的侧边，用以防止乘员身体向两边滑动。在一个单座座椅的靠背上有内侧和外侧两个侧翼。

④侧垫

侧垫位于座垫的侧边，用以防止乘员下身的两边滑动。单座座椅的座垫在内侧和外侧各有一个侧垫。

⑤中块

中块是位于侧翼和侧垫之间的区域。中块的材料和设计都可以不同于侧翼和侧垫，使座椅具有更好的舒适性。

⑥头枕

头枕位于靠背顶部，大部分汽车要求前座椅有头枕，相当多的汽车后座也设有头枕。头枕有整体式和可调式，可调式头枕在造型上有实心和面包圈之分，在结构上可分为二位可调和四位可调。

⑦扶手

扶手的设计是为乘员提供一个放松手臂、肘部的地方，有三种类型的扶手：

自由式扶手——有独立支架，不与靠背连接，不可调，多用于前座椅。

整体式扶手——用时放下，不用时可折起收拢至与靠背在同一平面，多用于后排座椅。

侧装式扶手——固定在靠背侧面，通常是可调的，用于前座椅及面包车等中间排座椅。

3)座椅零部件及其制造工艺

座椅的关键零部件有骨架总成、泡沫件总成，面套总成和调角器、滑道等机械零件。

(1) 骨架总成

座椅骨架是座椅系统的结构件，必须有足够的强度并通过各种静态和动态的载荷试验。

骨架总成由许多零件拼装而成，这些零件通常用钢板和钢管分别由冲压机和弯管机加工成形，并用弧焊机或点焊机在专用定位夹具的固定下进行焊接拼装，随着自动化程度的提高，很多场合使用了机器人操作的自动焊机进行焊接，在弧焊中也更多地采用气体保护焊。汽车厂往往还要求对骨架涂漆，通常采用电泳涂漆工艺。

许多座椅骨架还设有用蛇形簧或金属丝网格作成的悬置装置来提高座椅的缓冲减振性能。

轿车后座椅常用金属线材成形的骨架，并将其埋入泡沫件中，这是因为后座椅通常由车身来支撑，不需要有很高的结构要求。

出于轻量化考虑，也有用铝铸件或镁铸件来制作骨架，但成本较高，因而不常用。

塑料和合成材料也可用于骨架和悬置装置，但还不广泛。

典型的骨架制造工艺如图 3-7-20 所示。

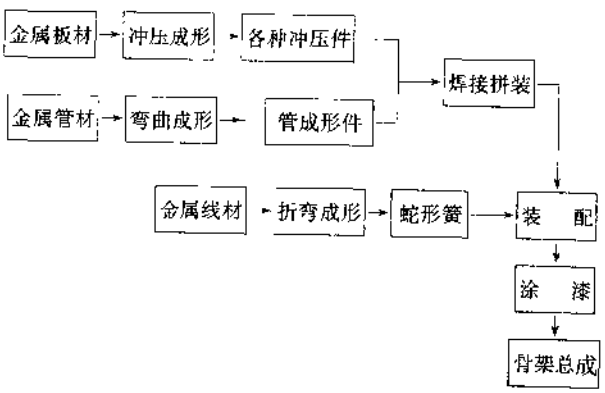


图 3-7-20 座椅骨架制造工艺

(2)泡沫件总成

泡沫件总成作为衬垫直接对乘员提供支撑，起吸振缓冲作用，对座椅的舒适影响重大。

座椅用的泡沫塑料是由聚醚多元醇和异氰酸酯在发泡剂、催化剂、稳定剂等助剂参与下经化学反应而得到的软质聚氨酯泡沫塑料，具有极佳的回弹性、耐疲劳性，在较低温度下也能保持柔软性，并能通过改变化学配方在很宽的范围内改变泡沫密度和承载性能。模塑发泡工艺可以方便地加工出按人体工程学原理设计的各种复杂的造型，可容易地埋入各种金属和塑料制成的骨架或嵌件。

除一些造型较简单的泡沫件采用块状泡沫切割而成之外，大部分泡沫件都采用模塑发泡工艺制得。根据原料系统和成形温度的差别可分为热熟化模塑和冷熟化模塑两种，由于冷熟化泡沫有更好的回弹性和舒

汽车论坛 http://www.qclt.com

适性以及较低的设备投资和低的能耗，现已越来越多地被采用。

座椅泡沫件的密度根据各种部件的不同要求，通常在 30～55kg/m³，热熟化泡沫的密度一般较冷熟化泡沫低一些，但目前技术的发展已可使冷熟化泡沫的密度接近或达到热熟化泡沫的密度。

为了兼顾乘坐舒适性和横向稳定性，作为座垫的泡沫件常做成中块稍软，侧垫稍硬，被称为双硬度座垫或双密度座垫。

因环境保护的原因，在泡沫件的生产中，已不再允许使用氟里昂作为助发泡剂，而采用全水发泡或其它替代品作为助发泡剂。

泡沫生产中原料的计量和混合由一种专用的带有工作料罐、计量泵、混合头的发泡机来实施。按其工作压力和混合方式的不同，发泡机可分为高压和低压两种，高压发泡机混合头有自洁功能，无须用有机溶剂清洗并减少了原料的损耗，得到更广泛的应用。在泡沫体生产中还须严格控制原料温度和模具温度。

典型的冷熟化泡沫件生产工艺如图 3-7-21 所示。

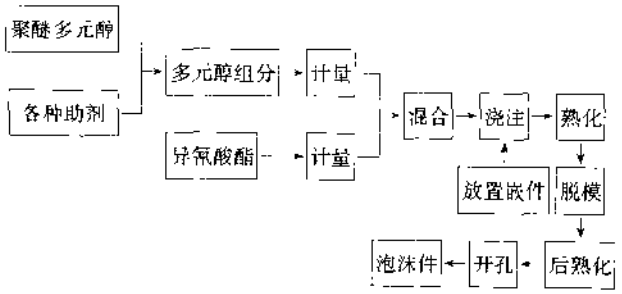


图 3-7-21 泡沫件生产工艺

还有一种称为整体发泡的工艺，即在缝制好的面套中，直接灌入化学混合料发泡成形而得，可以提高劳动生产率。这种工艺在头枕和扶手中使用较多，造型较简单的座垫也有采用。

（3）面套总成

面套的作用是包覆在泡沫件的外面，具有很强的装饰功能，并可以通过面套上的附件与骨架作固定。

面套通常用织物、皮革或人造革制成，传统的面套制作工艺为裁剪和缝纫。面套上线条的风格和外观通过精细的缝纫技术来达到，并使用不同类型的紧固件如吊钩、型条等与泡沫件贴合，以体现出泡沫件的造型，还常常将面料与泡沫片材制成复合材料来制造面套，以进一步提高座椅的外观和触摸感。

对于一些造型深度不大的座垫，也可以利用面料的可拉伸性，用真空抽吸的方法将面料吸贴在发泡模具上，直接在其上发泡而一步得到完整的座垫。

（4）机械零件总成

座椅中主要的机械零件总成有调角器、滑道、腰托和小件机械零件。

①调角器：用于调节靠背的倾斜角度。有单边和双边，线型和齿型，无节和有节，手动和电动之分。

②滑道：用于支撑座椅骨架总成，调节座椅位置，并与汽车地板相固定。滑道有二方位、四方位、六方位，一般多方位可调节的滑道采用电动调节，有的还与电子技术相结合，可以记忆几种不同的设定位置。

③腰托：用于支撑乘员腰部区域，有气动型和机械型两种基本类型，有二位（前后）可调和四位（前后、上下）可调。

④小件机械零件。其它座椅系统中运用的可能的机械零件有可调节的大腿支撑垫，以及可调节侧翼和侧垫，以增加乘员的舒适程度。

机械零件的构造设计变化很多，采用的材料和制造工艺也多种多样，这里不一一赘述。

4）座椅总成装配

座椅总成装配的典型工序如图 3-7-22 所示。

现在兴起一种热固化的粘接工艺，在泡沫体面上喷上粘接剂，加热后将缝制好的面套压上，使其粘合。该工艺可省去面套上许多用于与泡沫贴合的紧固件和泡沫件中的钢丝嵌件，提高了工作效率，并使得在以后报废后，易于将各种材料分离回收，符合环境保护潮流。（撰稿人：吴可）

3.7.4.4 遮阳板

1）概述

汽车论坛 http://www.qclt.com

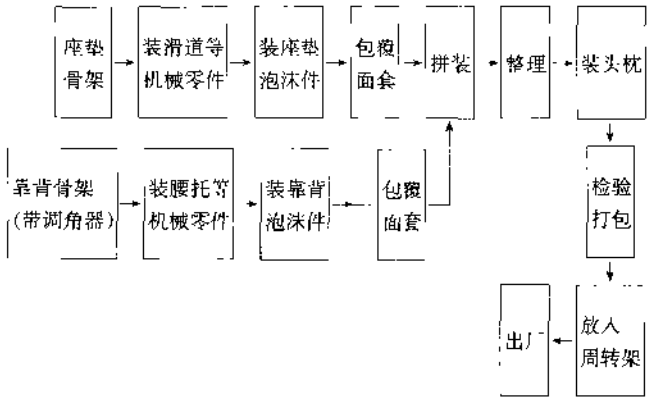


图 3-7-22 座椅总成装配工序

遮阳板顾名思义用于阻挡汽车行驶时，由于阳光的照射而影响驾驶员的行车安全的部分光线。为了确保驾驶员的生命与确保交通安全，汽车驾驶室内设置了遮阳板。

2）性能

遮阳板在性能上有三种结构形式，即单轴回转型、双轴回转型及随遇平衡型。

单轴回转型。为了自由地选择铰链部分的安装位置，沿前挡风玻璃周边的弯曲形状容易接合，而在曲率大的情况下单轴回转型最能满足遮阳板的各项性能。

双轴回转型，在前风窗玻璃上缘和车门从 X 轴与 Y 轴合并的关系选定 Y 轴是困难的，用作图法布置的情况来看，在前风窗支柱与顶盖内上梁的交叉部分设置 Y 轴的撑杆受到车身构造上的限制。

随遇平衡型。多数情况下使用球节，用于顶棚高，窗子面积大的大客车和中重型载货车等，但把双轴回转型的 Y 轴改用球节做为支点也容易，并能增加遮阳板的固定范围，在设计上如果能解决固定方法，不失为一种应用范围广泛的机构。

3）构造

遮阳板的本体构造大致分为四类：聚氨脂发泡型、软型、板型与硬型。

①聚氨脂发泡型：把遮阳板取形的钢丝骨架经聚氨脂发泡组成遮阳板泡沫本体总成，然后在其表面覆盖 PVC/ABS 表皮经高频融接而成，也可采用皮革、织布等物经缝制而成。该产品具有高弹性与高安全性，目前广泛用于轿车工业。

②软型：把遮阳板取形的钢丝和做为芯材的衬垫用软垫包起来，表面用薄膜覆盖，做为芯子材料也可采用毛毡，包装软垫的蒙皮采用氯乙烯泡沫材料可采用高频融接完成，也可采用皮革、织布等各种软垫缝制而成，该产品的特点是具有柔软的表感。

③板型：用硬板、纤维板和胶合板等做芯材而制做的形状，其它的构成部件与软型是相同的。外表是柔软的，操作时动作确切。

④硬型：是完全作为单独使用的塑料制品或板材结构，也有卷入牛皮纸板做装饰用的，这两种都具有硬感和薄而轻的特点。仅以遮阳板原有的性能为重点，在极需轻量化的汽车上，或在顶棚高，窗子面积大，要求有大型遮阳板而不适宜采用软型和板型等遮阳板的中重型载货车上使用这种遮阳板。

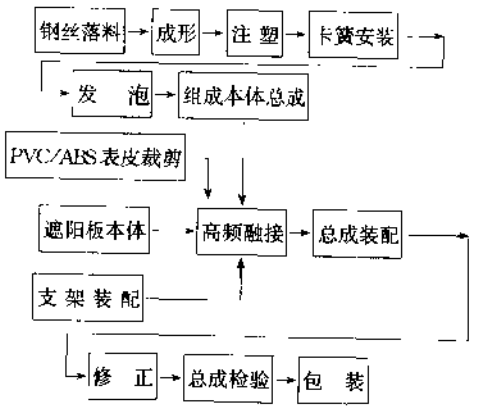


图 3-7-23 汽车遮阳板工艺

4）工艺

以聚氨酯型为例，见图 3-7-23。

5）发展方向

随着汽车工业的发展，遮阳板的功能已由阻挡阳光，保护汽车驾驶员的安全，变为向既具有遮阳功能又有装饰功能的方向发展，如在遮阳板上设置化妆镜、安置灯泡等附加装置。（撰稿人：邹孝元）

3.8 附　　件

3.8.1 汽车空调系

3.8.1.1 汽车空调系统概要

汽车空调系统的主要作用是调节车室温度，给乘员创造一个舒适的环境。

汽车空调系统由图 3-8-1 所示的各种不同功能的部件构成。主要部件是压缩机和热交换器。

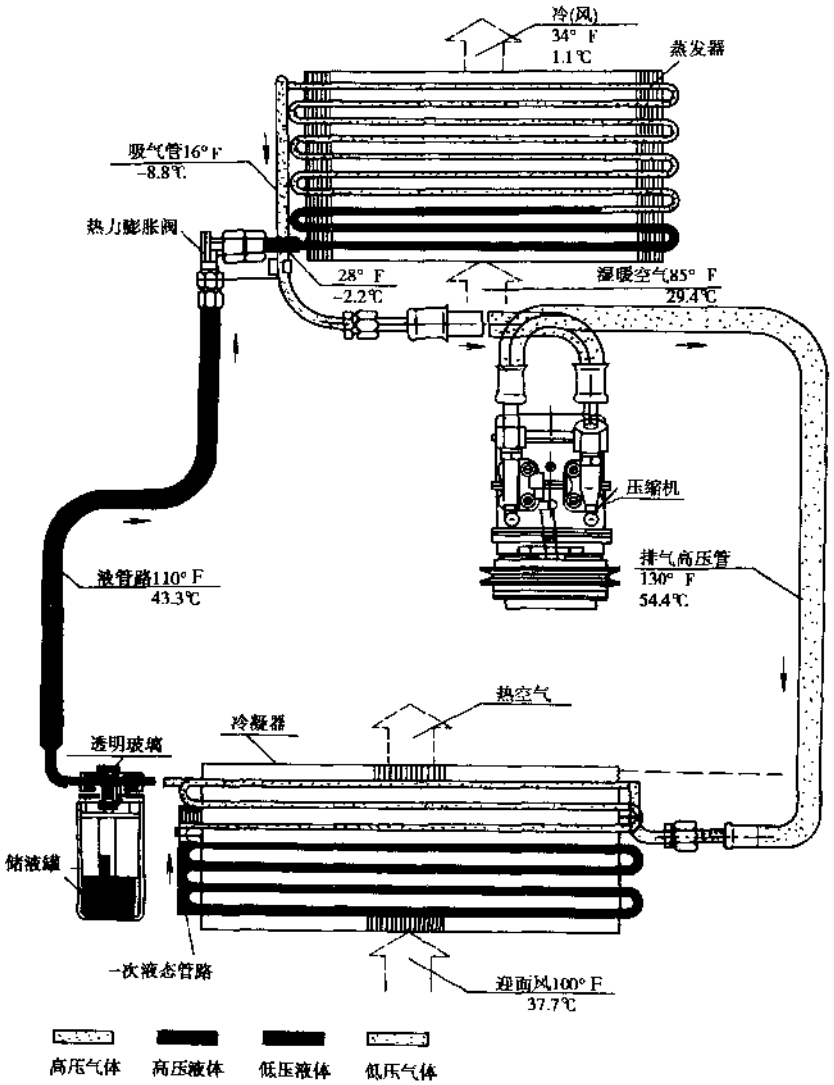


图 3-8-1　制冷工作循环图

3.8.1.2 压缩机

1）概述

压缩机在汽车空调系统中安装在蒸发器和冷凝器这两个热交换器之间，其功能是吸入从蒸发器出来的低压制冷剂蒸汽，压缩为高压高温气体，然后排出到冷凝器。

汽车空调用的有曲柄式、转子式、涡旋式和斜板式等多种形式。

曲柄式压缩机为立式往复式压缩机，这种形式的产品现趋淘汰。

转子式压缩机，其排量较小，适用于微型汽车。其特点是零件较少，结构简单，高速性能好，易于小型化。缺点是摩擦损失大，对密封性和润滑要求严格，因此高温性能差，制冷效果及可靠性低。由于受其性能缺陷和应用范围所限，无法成为压缩机产品的主流。

涡旋式压缩机具有许多突出的优点，特别是在容积效率、绝热效率、功率以及体积和质量方面都是其它压缩机不能相比拟的，在理论上是一种比较完美的机型。但目前其设计和制造工艺尚不成熟，关键技术问题有待解决，暂难形成规模、实现大批量生产。

斜盘摇板式压缩机经过40余年的改进、发展，其设计制造、工艺均已成熟，因此得到广泛应用，斜盘摇板式压缩机占世界汽车空调压缩机生产总量的80%左右，并仍将是下世纪初的主导产品。

压缩机原先使用的制冷剂均采用CFC-12，由于CFC（氯氟烃）对大气臭氧层的破坏，从而引起对人类健康及生态平衡的危害，为此使用CFC-12制冷剂的压缩机受到限制。现在汽车均要求采用HFC-134a制冷剂的汽车空调压缩机。

斜盘摇板式压缩机主要有固定排量压缩机和可变排量压缩机两大类，每类均有5缸、7缸和10缸三大系列。

固定排量压缩机的排量是固定不变的，而可变排量压缩机的排量是根据汽车空调要求自动调节的，使汽车行驶平稳，舒适性好并且节能，使用范围正在不断扩大。图3-8-2为七缸可变排量压缩机内部结构图。

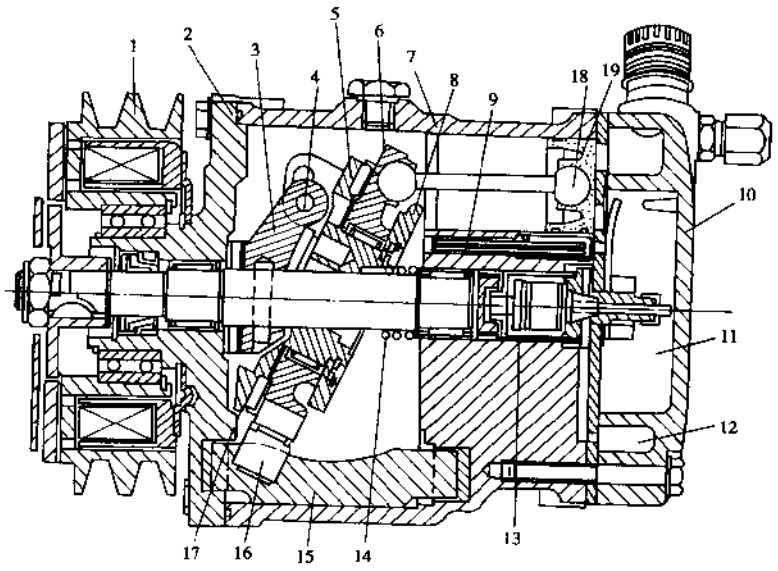


图3-8-2 7缸变排量压缩机

1-电磁离合器；2-前盖；3-转臂；4-销；5-斜盘；6-行星盘；7-缸体；8-平衡块；9-喷孔；10-后盖；11-排气腔；12-吸气腔；13-控制阀；14-复位弹簧；15-导向块；16-滑块；17-主轴；18-连杆；19-活塞

2）压缩机的制造

汽车论坛 http://www.qclt.com

压缩机是汽车空调系统的心脏，对汽车空调系统起到至关重要的作用。由于制造精度高，难度大，因此，汽车空调压缩机的制造也是反映汽车零部件工艺水平的重要标志之一。斜盘、摇板式压缩机生产工艺主要有铸造、机械加工、装配和检测等。

（1）铸造

汽车空调压缩机铸件零件主要有缸体、前盖、后盖、斜盘、活塞、行星盘等。由于压缩机零件体积较小，结构复杂，质量要求又高，铸件一般采用铝合金压铸工艺生产。铝合金的熔炼是铸造生产的基础，一般可直接采用电阻保温炉熔炼铝合金，当生产批量扩大时，可采用工频感应炉熔炼铝合金，当溶化吨位更大、质量要求更高时，可采用中频感应炉熔化，保温可采用电阻炉保温。压铸可采用500t冷室压铸机进行压铸生产，为了准确控制和保证熔炼质量，要采用先进的检测仪进行快速化学成分分析，严格控制原材料成分，在熔炼过程中要控制夹渣和气孔，降低废品率。

（2）机械加工

压缩机机械加工零件主要有：缸体、前盖、后盖、斜盘、行星盘、活塞、连杆、皮带轮等，可采用高效专机组成刚性生产线，数控生产设备组成的柔性生产线和完全自动加工生产线进行加工。

（3）装配

装配是压缩机生产的关键工艺之一，汽车空调压缩机结构复杂，装配要求高，必须采用装配线进行装配，装配线应配备随线检测设备，全部装配工序均应采用自动、半自动装配方法，确保装配质量。

（4）产品检测试验

汽车空调压缩机是技术密集型产品，其生产具有专业化、大批量、多品种、系列化等特点，产品检测试验在压缩机生产中是一个重要环节。

出厂试验应进行压缩机全性能试验、耐久试验、噪声试验、振动试验以及环境模拟试验等检测试验，确保压缩机出厂质量。

3.8.1.3 热交换器

1）概述

在汽车空调系统中，热交换器主要有冷凝器和蒸发器。冷凝器是通过周围空气来冷却从压缩机排出的高温高压气态制冷剂，使之变成高压过冷液态制冷剂的热交换装置。而蒸发器是一利用低压低温液态制冷剂蒸发潜热，来吸收空气中所含热量达到降温去湿的热交换装置。

冷凝器和蒸发器都属于空气—制冷剂型热交换器，只是制冷剂换热条件和传热机理不同。在汽车上安装位置和使用条件不同。冷凝器内制冷剂为冷凝换热，一般都安装在发动机舱室，重点要考虑其耐高温、耐振动、耐腐蚀和耐压性。而蒸发器为沸腾换热，表面会发生结露结霜，一般都安装在仪表板下或车室内，重点要考虑其耐振动、冷凝水排出等问题。

2）结构形式

冷凝器和蒸发器主要由制冷剂通道和用于扩大传热面积的散热片构成，但结构形式各异。其换热效果主要取决于换热结构单元形式、材料、工艺条件、介质流动方式和流速流量等因素。

冷凝器常用结构形式有管片式、管带式和平行流式等几种。管片式主要用于轻型客车和大客车空调系统中，管带式和平行流式主要用于轿车、微型车和卡车空调系统中。管片式通常由铜管＋铝翅片组成，如图3-8-3所示。而管带式和平行流式则通常由多孔扁铝管带＋波纹形翅片带组成，如图3-8-4和3-8-5所示。

蒸发器经常采用的结构形式有管片式、管带式和层叠式（亦称板翅式或板带式）等几种。管片式管带式与同类型冷凝器结构相似。层叠式蒸发器是由铝制复合平板中间夹一层波形散热片，两侧再用封条进行钎焊密封，形成一个单层换热单元，将一个个单层叠放起来进行钎焊，就构成层叠式蒸发器芯，再与集流管焊接，就构成完整的蒸发器，层叠式蒸发器结构如图3-8-6所示。为提高换热效果，翅片的结构可以采取一些强化换热措施，如图3-8-7所示：a）为光直翅片，b）为锯齿翅片，c）为多孔翅片。

目前蒸发器和冷凝器的发展趋势是结构紧凑、质量轻、换热效率高、安装维修方便。

汽车论坛 http://www.qclt.com

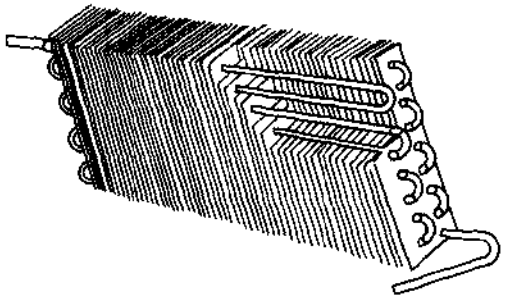


图 3-8 3 管片式

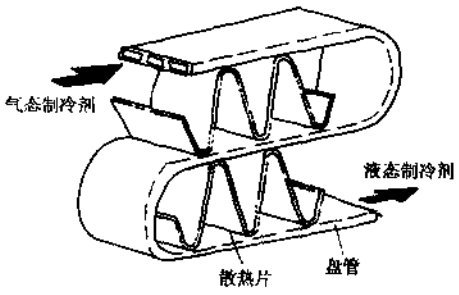


图 3-8-4 管带式

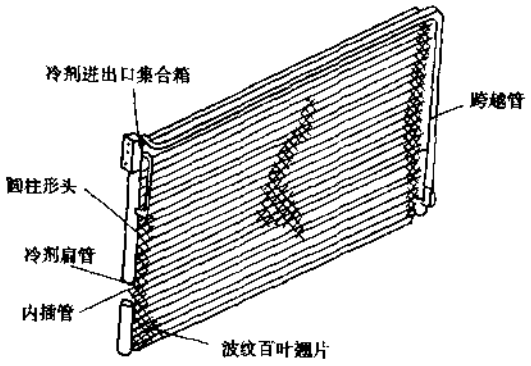


图 3-8-5 平行流式

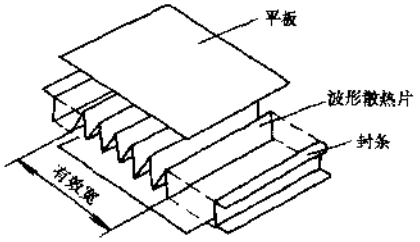


图 3-8-6 层叠式

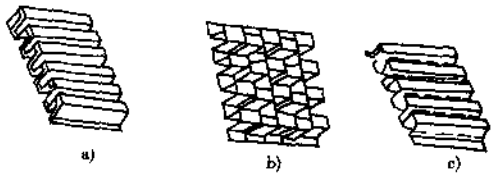


图 3-8-7 翅片

3）性能对比

上述几种换热交换器的主要性能对比见表 3-8-1，其中对比数据以管片式换热器作为基准。

表 3-8-1 几种热交换器的性能对比

名　　称	管片式		管带式		平行流式	层叠式
	蒸发器	冷凝器	蒸发器	冷凝器	冷凝器	蒸发器
单位体积散热面积	1	1	0.8	0.8	0.85	0.9
单位体积质量	1	1	0.8	0.8	0.8	0.9
传热系数 K	1	1	1.1	1.1	1.45	1.35
流动阻力	1	1	0.9	0.9	0.8	0.9
风阻	1	1	0.9	0.9	0.8	0.85

4）制造工艺

（1）管片式

①铝箔翅片成形、切割；铜（铝）直管弯管、切割；

②弯管翅片装配；

③机械胀管；

④U 型弯头焊接；

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑤进出液接头焊接；
⑥气密性检查；
⑦清洗、表面喷涂、油漆
(2) 管带式
①铝箔翅片带成形、切割；扁平多孔铝管弯管、切割；
②弯管翅片装配；
③涂钎剂；
④钎焊；
⑤进出液接头焊接；
⑥气密性检查；
⑦清洗、表面亲水处理（蒸发器）；清洗、表面喷涂、油漆（冷凝器）。
(3) 平行流式
①铝箔翅片成形、切割；扁平多孔铝箔切割；集管开槽、内插板焊接；
②翅片直管集管装配；
③涂钎剂；
④钎焊；
⑤跨越管、进出液接头焊接；
⑥气密性检查；
⑦清洗、表面喷涂、油漆。
(4) 层叠式
①铝箔翅片成形、切割；
②铝制平板冲裁成形；
③翅片、平板、封条装配；
④真空钎焊；
⑤集流管焊接；
⑥气密型检查；
⑦表面亲水处理。
5) 钎焊技术
铝制热交换器目前最普遍采用的焊接工艺为 NOCOLOK 钎剂钎焊、真空钎焊、惰性气体保护钎焊。以下对铝（铜）热交换器所采用的钎焊工艺进行简要介绍，见图 3-8-8。

焊接工艺进行热交换器制造时，钎焊工序是热交换器制造中的关键工艺，直接影响热交换器质量好坏，焊接接触率的高低是影响其散热效果的一个关键参数。

3.8.2 仪表

3.8.2.1 仪表概述

仪表是指示汽车行驶状态，传递行驶信息的重要部件。按功能分，仪表主要有车速里程表、转速表、燃油表、温度表、压力表、电流表和电压表等，按车辆功能要求可将多个仪表、若干信号装置、报警装置等组合在同一外壳内构成的仪表则称为组合仪表。由于组合仪表具有功能较多、结构紧凑、造型美观等优点，其使用已越来越广泛。

1) 车速里程表

车速里程表用于指示汽车行驶速度并记录行驶里程，其中指示速度部分称为车速表，记录里程部分称为里程表。

按工作原理分类，车速里程表主要有磁感应式和指针电子式两种。

汽车论坛 http://www.qclt.com

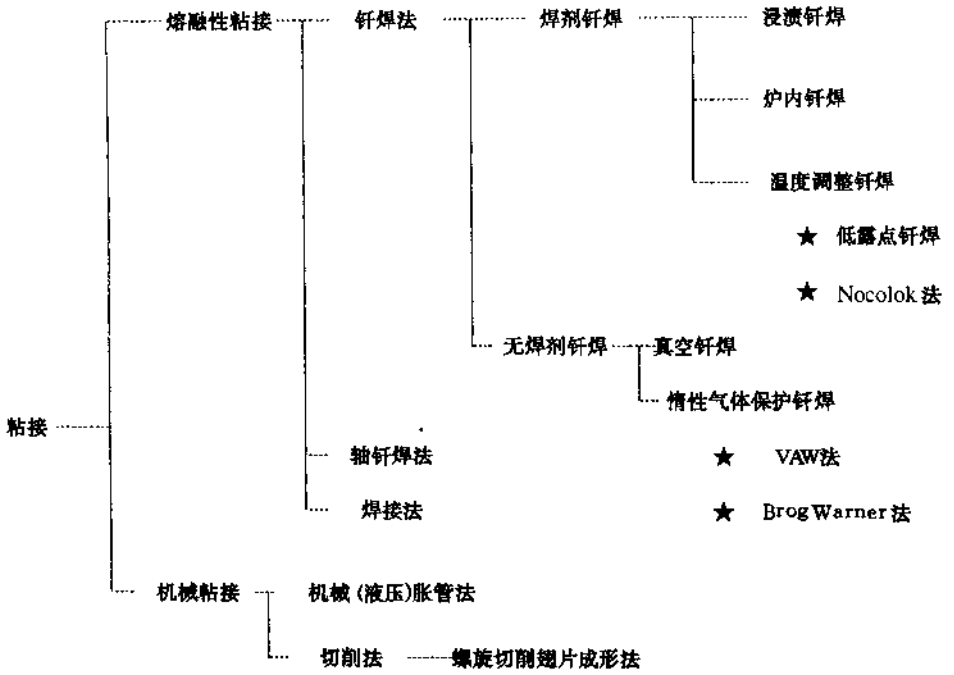


图 3-8-8 钎焊工艺

(1) 磁感应式车速里程表

车速表由软轴驱动的旋转磁钢和铝罩、游丝等组成，通过磁钢和铝罩间磁感应作用，驱动指针偏转来指示车速的大小，指示速度方式为指针式；

里程表由软轴驱动的数对蜗轮蜗杆、传动齿轮和计数器装置等组成。通常只有一组机械式累计里程记数机构，但在轿车和档次较高的车辆仪表中，同时装有累计和小计两种里程记数机构，小计用于记录单程或一天的里程数并可复零。

(2) 指针电子车速里程表

车速表有三种基本结构：一种是动圈式结构，另一种是动磁式（也称十字线圈式）结构，第三种是步进电机式结构。它们通过输入脉冲信号或串行通信数据驱动指针偏转来指示车速。

里程表主要有步进电机驱动的机械计数器式和 LED 或 LCD 数显式。其里程记数可只配置累计，也可同时配置累计和小计。

由于指针电子式车速里程表结构合理、指示稳定、可靠性好、有利于微处理器控制和串行通信等新技术的应用，已成为当今车速里程表发展的主流。

2) 转速表

转速表用于指示汽车发动机工作转速。按工作原理分类，转速表主要有磁感应式和指针电子式两种。

①磁感应式转速表的结构与磁感应式车速里程表的车速表相似，其驱动方式亦为软轴驱动。

②指针电子式转速表的结构与指针电子式车速里程表的车速表相似，它们也通过输入脉冲信号或串行通信数据驱动指针偏转来指示转速。

指针电子式转速表也已成为当今转速表发展的主流。

3) 燃油表

燃油表用于指示汽车燃油箱内燃油油位（表示容积）。燃油表一般由指示燃油油位的指示器和传递燃油油位信号的传感器组成，按工作原理，主要分类如表 3-8-2 所示。

表 3-8-2 燃 油 表 分 类

指示器	传感器
电磁式	可变电阻式
动磁式	
双金属式	双金属式
	可变电阻式

目前，双金属式和动磁式的燃油表使用较多，而动磁式的燃油表是今后发展的主流。

4）温度表

温度表用于指示汽车发动机冷却水或润滑油温度。温度表一般由指示温度的指示器和传递温度信号的传感器组成，按工作原理，主要分类如表 3-8-3 所示。

目前，双金属式和动磁式的温度表使用较多，而动磁式的温度表是今后发展的主流。

5）压力表

压力表用于指示汽车发动机润滑系统和制动系统压力。压力表一般由指示压力的指示器和传递压力信号的传感器组成，按工作原理，主要分类如表 3-8-4 所示。

表 3-8-3 温度表分类

型式	指示器	传感器
电气式	电磁式	可变电阻式
	动磁式	
	双金属式	双金属式
		可变电阻式
机械式	弹簧管式	温包

表 3-8-4 压表表分类

型式	指示器	传感器
电气式	电磁式	可变电阻式
	动磁式	
	双金属式	双金属式
		可变电阻式
机械式	弹簧管式	—

目前，双金属式和动磁式的压力表使用较多，而动磁式的压力表是今后发展的主流。

6）电流表

电流表连接于汽车发电机和蓄电池组之间，用于测量蓄电池组充电或放电的电流强度。电流表一般具有双向标尺，零位居于标尺中间，标尺两旁分别有“+”、“-”标记，发电机向蓄电池组充电时，指示值为“+”值；蓄电池组向用电设备放电时，指示值为“-”值。

电流表按结构形式，主要分为极化电磁式和动磁式两种。目前，电流表多数被指示灯替代，其使用已日趋减少。

7）电压表

电压表用于测量汽车蓄电池组充电电压和发电机电源电压。电压表按结构形式，主要分为双金属式和动磁式两种。目前，电压表的使用正日趋增多，有逐渐替代电流表的趋势。

8）组合仪表

组合仪表由若干仪表指示机芯、信号指示、报警指示和照明等装置组合在同一外壳内组合而成。按照不同车辆的要求，可方便地设计组合成功能不同、结构不同、形式多样的组合仪表，不但功能齐全、而且造型美观。随着新技术的不断发展，组合仪表正在向结构电子化、电路集成化、功能多样化的方向发展，以满足不同车型的需求。国内现有轿车用组合仪表已集微处理器控制、串行通信、电子式仪表、LCD 显示等技术于一身，仪表的造型不但美观大方，而且其指示和报警功能多达 28 项，代表了当今国际 90 年代汽车仪表的先进水平和我国汽车仪表的发展方向。

若组合仪表的车速、里程、转速、燃油、温度、压力、电流、电压等指示方式都采用 LED 或 LCD 显示，则称为全电子式组合仪表，虽这类仪表的技术含量较高，但目前在车辆中的使用较少。

3.8.2.2 仪表制造

1）仪表零件制造

仪表零件主要由注塑成形件、金属切削件、印制件、冲压件、电子元器件、磁性元件和印制电路板等构成。一般来说，仪表零件的体积不大，但制造精度要求较高，因此，注塑成形件主要采用闭环程控或闭环微机控制的注塑机制造而成；金属切削件主要采用数控、自动机床和普通机床等制造而成；印制件主要采用半自动或全自动丝网印刷机和热印机等制造而成；冲压件主要采用高速冲床、精密冲床和普通冲床等

汽车论坛 http://www.qclt.com

制造而成。

仪表零件制造中富有特点的零件制造工艺主要有：

（1）标度盘制造

仪表标度盘一般采用成形的金属板材或塑料板材，经丝网印刷、烘箱干燥、冲床冲孔、压制等工序加工而成，较典型的制造流程如图 3-8-9 所示

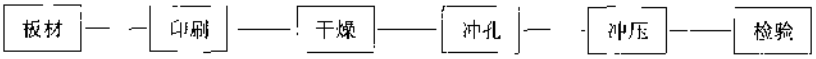


图 3-8-9 标度盘制造工艺流程

由于灰尘、湿度等环境因素对印制产品质量产生较大的影响，因此，标度盘丝网印制场所保持洁静是非常重要的，一般要求相对湿度控制在 60%～80%，空气洁静控制在 10 万级左右。

（2）计数轮制造

仪表用计数轮一般采用黑色或白色 ABS 塑料，经注塑成形和计数轮表面印字等工序加工而成，较典型的制造流程如图 3-8-10 所示。

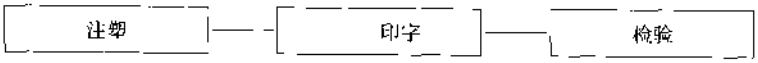


图 3-8-10 计数轮制造流程

就制造设备而言，采用多工位程控注塑机制造计数轮较为理想，其中 T5LC 型八工位注塑机具有同时安装八付注塑模具，可对安装模具的合模、注塑、保温、保压、开模等工位和参数进行程序控制，采用旋转循环的工作模式，充分发挥了设备的有效加工时间。该设备不但工艺参数稳定、加工效率高，而且计数轮质量稳定。

计数轮表面印字加工，一般采用全自动或半自动热印机印制而成。其主要制造过程是：将注塑成形的计数轮放入全自动或半自动热印机中，经热印漆带、印字模与计数轮圆周接触并热印成“0－9”十个阿拉伯数字，印字颜色可通过选用不同颜色的热印漆带来调整，字体可通过印字模进行调整，热印温度是一个重要的控制参数。本制造方法不但功效高，而且计数轮表面印字既清晰美观、漆膜又牢固、不易脱落。

2）仪表装配

仪表装配一般分成零部件装配、仪表机芯装配、总装配等。目前，仪表装配中富有特点的装配工艺主要有：

（1）注塑件焊接装配

仪表中各种塑料零件的应用已十分广泛，因此两种不相同的注塑零件的焊接装配已在仪表装配中十分常见，较典型的注塑件焊接装配是采用超声波焊接机或振动焊接机来进行。

重要的是应根据被焊件的材质、形状和尺寸大小，合理选择不同型号、不同功率的超声波焊接机或振动焊接机，设计制造出合理的焊接头也同样很重要。

焊接装配时，将注塑成形的两种注塑件按装配要求装入超声波焊接机或振动焊接机的专用夹具中，选用合适的焊接头，调整好焊接机的工艺参数。当焊接头与被焊接件接触受压时，焊接能量通过焊接头传递到被焊接处并将被焊接件迅速加热熔化成一体，既使焊接牢固，又使焊接处的表面保持原有的表面粗糙度。

（2）动圈式机芯装配中的动平衡

较典型的动圈式仪表机芯的动平衡是在专用动平衡机上进行的，主要通过被平衡仪表机芯的定速旋转，测取其不平衡量值和方位并在对应位置去除其不平衡量，从而达到设计要求。一般要求动平衡机的最高转速能达到 2 000r/min、最小不平衡量能达到 0.05g·mm。

动平衡时，动平衡机将安装在支架上的仪表机芯以一定转速旋转，其产生的不平衡量由该机测量系统自动纪录、储存并传输给去重的微型占床，整个测试过程形成一个闭环系统。若不平衡量一次去重不能达到设计要求时，可分几次去重，一般要求仪表机芯的不平衡量不大于 0.08g·mm。

随着汽车行业的发展和各种中高档车型的出现，动圈式仪表机芯已被广泛地应用，因此动平衡工艺在

汽车论坛 http://www.qclt.com

汽车仪表制造中已成为提高产品质量的重要工艺手段。

（3）动磁式机芯的自动装配

目前，仪表动磁式机芯装配中较为先进的装配方法是采用三台专用的自动装配机进行组装，其典型的装配流程如图 3 8-11 所示。各台专机又各自完成多个工位的自动装配工序，以机芯自动装配机为例，其主要流程如图 3-8-12 所示。

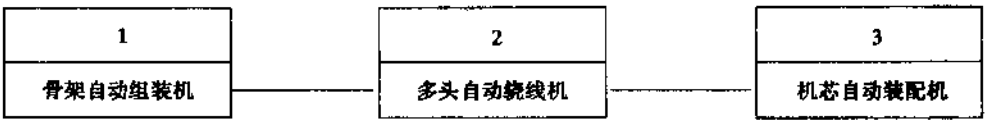


图 3-8-11 自动装配机流程

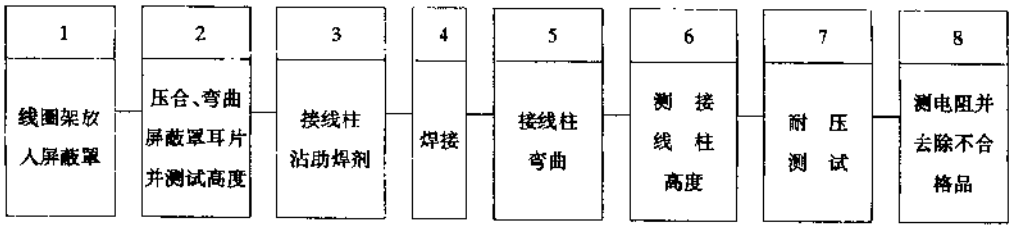


图 3-8 12 机芯自动装配流程

仪表动磁式机芯自动装配机由微机控制，装配流程中的压合、弯曲、测量、焊接、测试、检验等装配功能均可自动完成，可减少装配差错、提高产品质量，是今后发展的方向，对大批量生产的仪表尤其适用。

（4）总装配

较典型的仪表总装配是采用流水线作业方式装配，一般要求装配流水线具有装配节拍、装配工位的调节功能，并通过配置工位器具、装配设备和校验装置的变化，完成多种仪表的部件组装、测试、总装、功能校验和包装出厂。现以组合仪表总装配为例，其较典型的流程如图 3-8-13 所示。

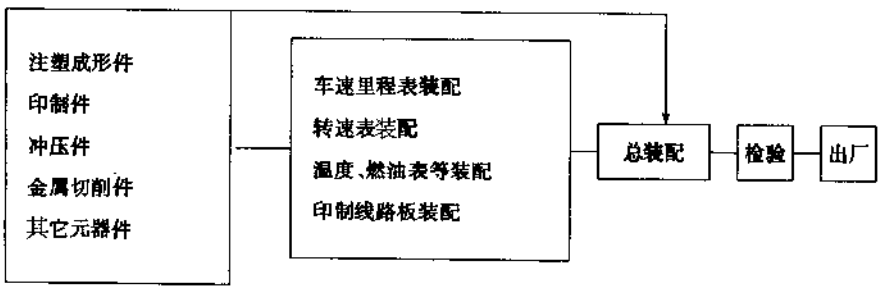


图 3-8-13 组合仪表装配流程

3.8.2.3 仪表检验

1）仪表最终检验的主要项目

仪表最终检验的主要项目为仪表的外形尺寸、外观质量、指示精度（如车速、转速、燃油、温度、压力、电流/电压等指示误差）和各类指示功能（如信号指示、报警指示、照明）等。

2）仪表检验的主要设备

仪表检验用的设备中，采用微机或可编程控制器控制的设备已越来越多，目前主要有：

①仪表功能测试：仪表功能专用校验台；

汽车论坛 http://www.qclt.com

②零部件尺寸检验：三座标测量仪和投影仪；

③仪表线路板测试：各种多功能在线测试仪一应具有线路板短路和开路测试能力，自动模似检测线路板被测电子元器件，如集成块、电容、电感、电阻、三极管、二极管等的功能参数并自动输出不合格件的名称和位置，其测试精度、测试范围和结点测试能力应按被测件的要求来确定。（撰稿人：姚逸邦）

3.8.3 电子门锁

3.8.3.1 电子门锁概述

电子门锁根据其机械结构和输出方式主要分为两大类：

一是齿条结构，直线输出方式；二是齿轮结构，旋转输出方式。

以下主要介绍采用电动机齿轮结构，旋转输出方式的电子门锁，电子门锁主要由电动执行器和电子控制模块两大部分构成，其构成示意见图 3-8-14。

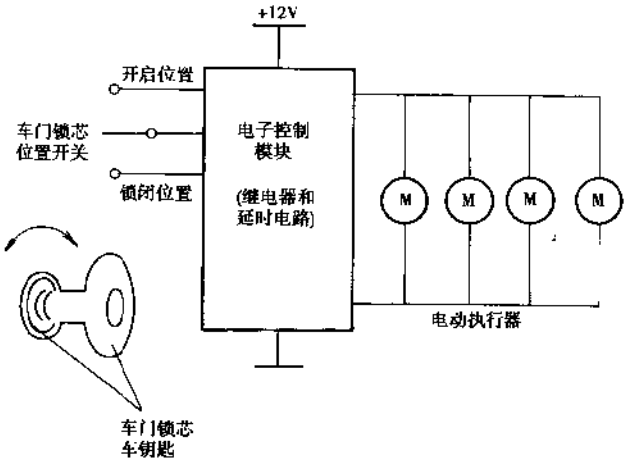


图 3-8-14 电子门锁构成示意图

电动执行器安装在车门的内部，通过拉杆与车门机械门锁相连，其安装示意如图 3-8-15。

当电子控制模块发出正向控制脉冲，电动执行器的摆柄顺时针方向转动，通过与之连接的拉杆带动车门机械门锁的拨杆向上移动，开启机械门锁的保险。当电子控制模块发出反向控制脉冲，电动执行器的摆柄逆时针方向转动，通过与之连接的拉杆带动车门机械门锁的拨杆向下移动，锁闭机械门锁的保险。

3.8.3.2 电动执行器的结构和原理

电动执行器的传动部件主要包括：电机、小齿轮、大齿轮、齿轮部件、扇形齿轮和摆柄组件，其结构示意见图 3-8-16。

当电机接通 12V 直流电压，开始转动，套在电机输出轴上的小齿轮一起转动，小齿轮带动大齿轮转动，大齿轮通过缓冲弹簧圈将转动传至齿轮部件，扇形齿轮与齿轮部件啮合，随着齿轮部件的转动而转动，再通过摆柄销带动摆柄组件顺、逆时针转动，以力矩的形式输出。

电机为微型直流永磁电动机，其额定电压为 12V，输出力矩为 6.86×10^{3}N·m。

为了保护电机在堵转状态下不致烧毁，在电机回路中，串接着一只 PTC 热敏电阻，它的全称为正温度系数电阻，是一种过流保护元件。它的材料是以钛酸钡为主要成分的氧化物半导体陶瓷，PTC 热敏电阻的特点是：从居里温度开始，其电阻值会随温度升高而急剧增加。正常情况下，PTC 热敏电阻的电阻

值很小，在零点几欧姆的数量级，串接在电机回路中相当于开关接通状态，不影响电机的正常工作；而当电机回路发生故障短路时，流过 PTC 热敏电阻的电流很大，PTC 热敏电阻迅速发热，电阻值急剧增大到原来的几百倍，电机回路中的电流随之减小，从而保护电机免遭损坏。其动作时间一般在几秒到几十秒，维持电流在 200mA 上下，以保持 PTC 热敏电阻的发热状态。待故障排除，PTC 热敏电阻会自动恢复到原始状态。所以采用 PTC 热敏电阻既能起到熔断丝的保护作用，又能免除更换熔断丝带来的麻烦，它是一种新型的可自恢复的保护元件。

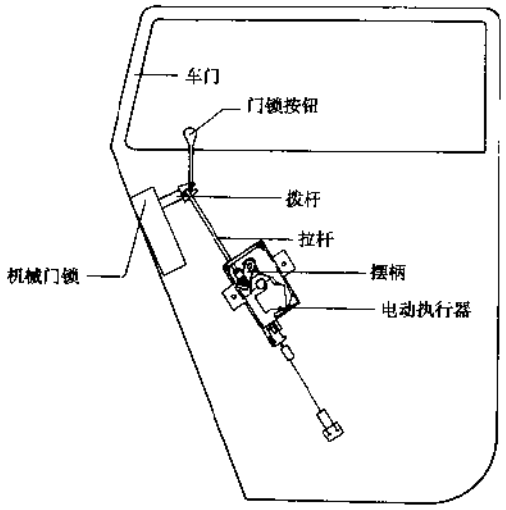


图 3-8-15 电动执行器在车门内的安装示意图

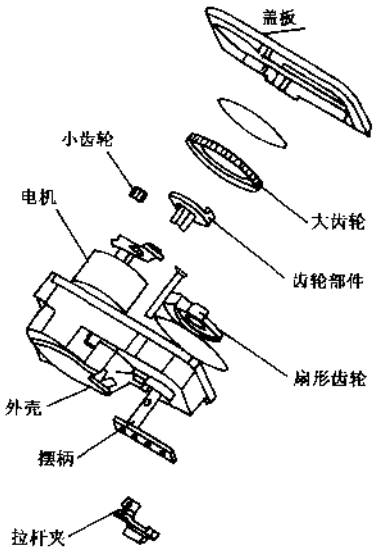


图 3-8-16 电动执行器结构示意图

小齿轮采用粉末冶金经压铸烧结成形。由于小齿轮齿数少，仅 11 齿，在齿根部有根切现象，且其模数小，因此齿根应力较大，不宜采用塑料制造。

大齿轮尽管模数与小齿轮相同，但齿数多，齿根应力较小，所以一般采用聚甲醛或尼龙制造，这两种材料强度高、韧性好，摩擦系数小，具有较高的耐热性。

齿轮部件由二种材料组成，齿轮部分采用粉末冶金经压铸烧结而成，此齿轮虽然模数比小齿轮大，但齿数仍然较少，为 12 齿，且未变位，齿根部有根切现象，加上电机已经过一级减速，力矩增大，因此采用粉末冶金材料。将齿轮作为嵌件，在其上注塑一个带凸台的部分。这两部分若单用粉末冶金则凸台部分无法制造，若单用塑料则强度不够，采用两种材料正好利用了两种材料的长处而避开了它们的不足之处。

扇形齿轮与齿轮部件啮合，其模数与齿轮部件的齿轮模数相同，齿数为 58 齿，齿根无根切，材料采用聚甲醛。

摆柄组件是用来输出扇形齿轮的旋转力矩，因为传递的力矩较大且摆柄轴直径小，对材料的强度有较高的要求，所以采用金属材料制造。

3.8.3.3 装配工序

电动执行器的装配工序流程图如图 3-8-17。

小齿轮压入电机轴要采用专机，以保证垂直压装和精确的压装压力、位置。点焊机的工艺参数的设置和焊接能量的反馈对点焊的可靠性是相当重要的，同时要有对焊接牢度进行定时检查的检具。电机的安装位置和固定方法对整个机构的运转灵活和耐久性也有着相当大的影响。

汽车论坛 http://www.qclt.com

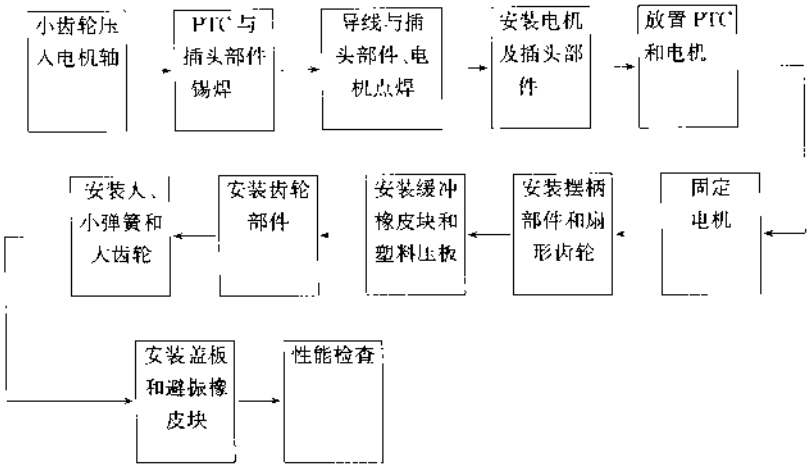


图 3-8-17 电动执行器装配工序流程图

3.8.3.4 质量保证

电动执行器的性能要求通常如下：

①工作温度：－40℃～＋70℃

②工作电压：9～15V

③在额定电压 12V±0.2V 时，摆柄的推拉力不小于 16N；电机的电流不大于 4A；摆柄的行程不小于 18mm；摆柄的行程时间小于 0.8s。

3.8.3.5 电子控制模块的结构和原理

电子控制模块的电路原理图如图 3-8-18。

其中：

*K*1：车门锁芯位置开关，用于检测车钥匙或车门按钮是否对车门锁芯进行了开启/锁闭。它只在开启/锁闭车门锁芯时接通，一旦车门锁芯处于开启/锁闭状态时即断开。

*K*2：双刀双置开关，用于根据车门锁芯的开启/锁闭来接通不同的位置开关，输出正向/反向电压，对电动执行器的电机进行正转/反转的交替控制。

图 3-8-18 中各种电子元件的规格见表 3-8-5。

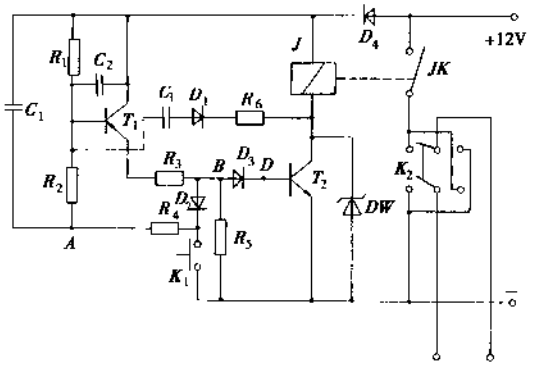


图 3-8-18 电子控制模块电路原理图

表 3-8-5 电子控制模块的电子元件规格

符号	电子元件规格	符号	电子元件规格	符号	电子元件规格	符号	电子元件规格
C1	22μ/25V	R6	3.3K	R2	27K	D4	2CN3
C2	0.47μ/50V	D1	2CN3	R3	3.3K	DW	4748A
C3	1μ/50V	D2	2CN3	R4	100Ω	T1	2SA1015
R1	4.3K	D3	2CN3	R5	100K	T2	2SC1959

3.8.3.6 装配工序

电子控制模块的装配工序流程图如图 3-8-19。

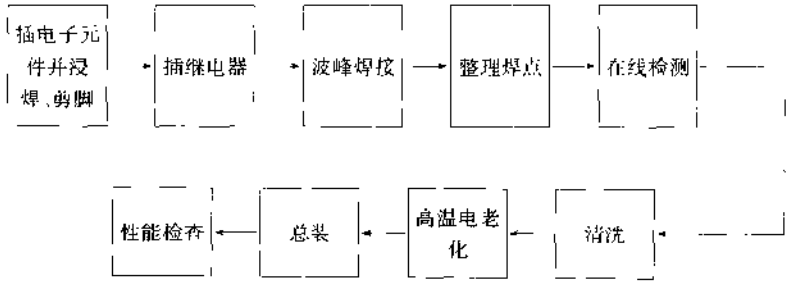


图 3-8-19 电子控制块装配工序流程图

波峰焊机的参数设置对电子控制模块的焊接质量有较大的影响，要将其作为质量控制点严格控制。由于波峰焊时析出的焊剂残渣、焊锡球及其它不纯物对电子元件和印刷电路板的可靠性产生影响，因此要进行清洗。一般来说，电子元件带有早期失效的故障隐患，为减少电子控制模块早期失效故障的出现，采取在高温条件下对其进行电老化，以消除隐患。

3.8.3.7 质量保证

电子控制模块的性能要求通常如下：

工作温度：－40℃～＋70℃；工作电压：9～15V

在额定电压 12V±0.2V 时，电子控制模块的延迟时间：0.3～1s。

3.8.3.8 电子门锁的发展趋势

电子门锁的两大构成部件，电动执行器和电子控制模块随着整车零部件系统化、集成化的发展趋势，各有其各自的发展趋势。

电动执行器的发展趋势主要是与机械门锁集成为一体化电动门锁，从而获得更高的安全性、可靠性，体积更小，安装布置更加灵活方便，同时通过零部件的减少，既可以减轻质量，又可以降低产品的生产成本。

电子控制模块的发展趋势主要是采用微处理器将遥控控制功能、防盗控制功能等诸多电子控制功能集成在一起构成车身电子控制模块，同时在其生产工艺上则是采用贴片电子元件和相应的焊接工艺，不仅可以减小产品的体积，更可以提高产品的性能和可靠性。（撰稿人：季 强）

3.9 电子设备

3.9.1 集成电路

3.9.1.1 概要

汽车电子正向着系统优化的趋势发展，并且在安全性、舒适性和智能性方面正在实现机械结构根本无法达到的功能。汽车工业已紧密地与计算机、集成电路和传感器等电子工业联系在一起。

电子技术主要应用于汽车油路、电路和动力系统，以及安全保障、防盗措施和路面导航方面。相对于机械系统，电子系统有着可靠性高、无磨损、模块化设计、易系统优化、即时控制和智能化等优势。

汽车用 ECU（Electronic Control Unit：电子控制器）的核心器件是 IC。与民用电器相比，因其使用环境更为恶劣，故在温度、湿度、振动和电磁兼容性等耐环境性方面的质量和可靠性要求很高。

这些汽车所使用的 IC，根据结构可分为单片 IC 和混合 IC，除此之外，还有应用半导体技术的各种传感器用 IC。

单片 IC 是在一个单晶硅大圆片上，可集成二极管、三极管、电阻、电容等许多个电子元件，分为双

汽车论坛 http://www.qclt.com

极型 IC 和 MOS（Metal Oxide Semiconductor）IC。双极型 IC 是将数个或数百个平面型晶体管加工在同一小片硅片上，使其成为一个电路。而 MOSIC 是将数十个或数万个的 MOS 晶体管加工在同一小片硅片上，因此与双极型相比，结构更精密，集成度也更高。

另一方面，混合 IC 是指在陶瓷电路板上进行厚膜加工后，再表面安装晶体管、电容等元件而形成一个电路的 IC。它与单片 IC 相比，不仅可以处理高电压输入，还能在高速情况下得到大电流输出。并且，随着汽车对小型化，多样化 IC 需要的增多，成本较低，且开发周期短的混合 IC 也正被广泛采用。

另外，半导体应用传感器起着向控制用 IC 传送输入信号的作用，其在压力、温度、磁性、光、加速度等多个领域得到开发，并实现了对高精度系统的控制，其制造也应用了 IC 的制造技术。

3.9.1.2 制造工序

1）单晶硅片

IC 加工的基片所使用的单晶硅片是采用多晶硅与特殊添加剂混合在石英坩埚中熔化后，边转动边拉起晶棒，从而制成具有需要直径的单晶棒。然后，用金刚石刀片将单晶棒切成需要的厚度，再通过研磨将晶片表面加工成镜面状。

2）芯片

芯片的制造工序是在一个单晶硅片表面通过平面扩散工艺形成全部有源或无源的电子元件，并在硅片氧化表面上蒸发沉淀上金属线条以连接电子元件形成所需要的电子电路，它是以微米为单位的精细加工技术。

基本的工艺流程如图 3-8-20，为简便起见，仅表示了加工一个晶体管的结构，并且只表示了硅的外延层。

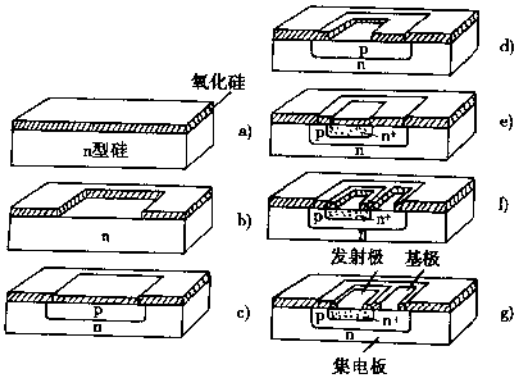


图 3-8-20 平面晶体管工艺的步骤

a）氧化的 n 型硅片；b）经第一次光刻工序在氧化物中开的基极窗口；c）p 型基区扩散并且形成新氧化层；d）经第二次光刻工序开的发射极窗口；e）n 型发射极扩散并且形成新氧化层；f）经第三次光刻工序开的基极与发射极接触窗；（g）蒸镀铝并经第四次光刻工序，确定铝接触电极

工艺过程的顺序如下：

①在一片经研磨和化学抛光后具有非常平滑表面的硅片上，将所需电阻率和厚度的外延层沉淀于硅片表面。

②在 100℃的水蒸汽流中加热硅片约 2h，把外延层表面氧化 10 000 埃。

③在氧化硅表面涂上一层光致抗蚀剂，通过光掩膜使光致抗蚀剂紫外线曝光，然后浸入氢氟酸溶液，为硅片开出相应的扩散窗口。

④使硼磷等杂质元素沉淀在硅片表面上，并在氮气流中加热必要的时间，使杂质扩散至所需深处形成 pn 结。近年来，通过高精度控制的离子注入装置，打入硅片的方法亦广泛采用。由于此方法可以在统计原子数量的同时注入离子，因此可以自由控制注入杂质的浓度和注入的深度。

⑤将铝蒸镀在硅片表面并使用接触掩膜的负版去除接触窗口以外的铝，在氩气流中将芯片加热到 550℃左右，使铝与硅合金形成低阻接触。

3）芯片的封装及测试

加工好的个大圆片（Wafer）往往集成了几百或几千个相同的小芯片，每个小芯片（Die）均是具有一定功能的电路，它们首先要被分割开来，工艺上先采用圆片贴膜（Wafer Mount），即在圆片上贴上一层塑料膜，这样在下一步的圆片切割（Wafer Saw）后，每个小芯片还能留在原位不至散落。之后分割开的小芯片逐个被吸取安装在点了热固化胶水的引线框架（Lead Frame）上，专业称芯片粘贴（Die Attach）。接下是引线焊连（Wire Bond）、注塑（Molding），注塑后的 IC 已基本封装了起来，但还要经过引脚电镀（Plating）、打印标记（Marking）、切筋成形（Trim and Form）及 100% 的外观目检、老化、功能测试等后

道工序后，才包装出厂。

4）混合 IC

混合 IC 的加工首先从厚膜印刷工序开始，即将糊状的导体（电阻）印刷到陶瓷线路板上，在高温炉中干燥、烧成后，密封保护表面。接着是印刷锡膏，利用其粘附性，将各种表面安装元件安装在规定的位置，再用热熔焊焊接起来。为使电路不受灰尘、湿气等因素的影响，用硅凝胶、树脂壳体、散热片进行封装。最后在与整车相似的环境，如高温、低温、温度交变的条件下进行功能测试。以保证质量可靠性。

5）半导体传感器及其它

半导体传感器应用了半导体所具有的各种特性，使光、温度、压力、加速度、电磁等多种传感器得以实用化，在制造时，由于可以应用 IC 的制造技术，因此推进了小型化、轻量化和低成本的进程。例如，半导体压力传感器将压力转换为变形的硅膜片及将变形量转换为电信号的扩散电阻（应变仪）组成。它们可在硅片的加工中形成。但是，由于半导体存在温度特性、元件间特性的偏差问题，因此通过电路对信号的补偿及调整可解决这些问题。作为压力传感器特性之一的偏心电压是利用激光束切割与传感器总成做成一体的陶瓷电路板上的调整电阻来进行调节的。

最近，还采用激光束直接对硅片上的薄膜电阻进行调整的方法（薄膜激光修边）。

半导体传感器的制造因传感器的种类而有所不同，主要有硅片（芯片）制造、元件安装、调整和检查，与单片 IC 和混合 IC 一样，考虑到汽车较为严格的环境使用条件，最后还要进行各项检查才能成为产品。

3.9.2 安装

3.9.2.1 概述

车用 ECU 的技术要求不仅繁多而且十分严格，尤其是针对小型化、轻量化的要求，因此表面安装技术（SMT）已成为当今的主流工艺。双面印刷电路板和多层带金属化孔的印刷电路板已被广泛应用。SMD（Surface Mount Device：表面贴装元件）正逐步走向实用阶段。

由于表面贴装不需要在印刷电路板上设计直插安装的通孔，因而相对节省空间，并且因减小了焊盘面积，故还可以减小元件引脚的间距，同时，因可以在电路板的正反两面进行元件贴装，从面更提高了贴装密度，进一步顺应了车用 ECU 的小型化要求。

3.9.2.2 制造工序

ECU 按加工工艺，目前主要是采用多层印刷电路板，利用正反面表面安装各类封装好的单片集成电路元件及不同类型的被动电子元件，并在正面安装少量直插式元件。

图 3-8-21 流程图表示了基本制造工序，其中也包括了在下一章节将要专门进行说明的检查工序。以下将按照加工顺序进行说

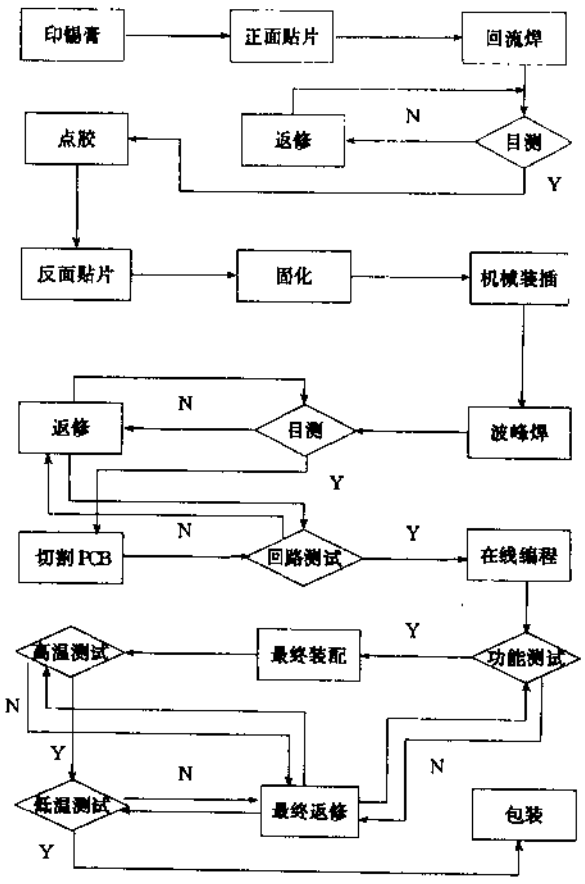


图 3-8-21

明。

1）印锡膏

在PCB（Print Circuit Board：印刷电路板）的正面将要安装SMD的焊盘上利用精密加工的钢网板印刷上一定厚度的锡膏。丝网印刷机的印刷速度为15～30mm/s，压力为70～90N，锡膏的厚度需要严格控制在170～260μm。

2）正面贴片

采用自动贴片机，高速地将各类集成电路、电阻、电容、二极管、三极管精确地贴装在PCB正面上。

3）回流焊

利用回流焊将锡膏熔融，使元件引脚与焊盘实现焊接。回流焊炉各区的温度曲线及产品途径的时间均要求严格控制，以保证焊接质量。回流焊炉的输送带速度32.00imp。

4）点胶

正面焊好后的PCB经翻转后，在原反面贴装SMD元件前，为固定元件需要，全自动高速点胶设备在元件贴装部位精确地点上一定量的热固化胶。点胶机一号针头压力：0.72～0.74MPa，二号针头压力：0.69～0.71MPa。

5）反面贴装

反面贴装与正面贴装大致相同，区别在于用热固化胶水固定元件，而不是利用印在焊盘上的锡膏了。

6）固化

由于反面贴装的元件将采用双波峰焊焊连工艺，故SMD必须被可靠地固定在PCB上。经过温度控制的热固化炉，胶水被完全固化，SMD也就牢牢地粘贴在了PCB上。固化炉的输送带速度为15.00imp。

7）机械装插

对于一些尚未实现SMD的元件，如连接器，大容量电解电容等，需要采用手工或自动的机械装插方式将它们安装到PCB正面上。

8）波峰焊

PCB正面朝上经过双波峰焊设备，使PCB的反面元件及少量直插元件被可靠地焊在PCB上。通常双波峰焊采用氮气保护焊接，并通过顺时针，逆时针两轮焊锡波峰完成焊接。波峰焊炉的传送速度为120cm/min，小波峰为：280－305r/min，大波峰为：230～245r/min，焊锡温度：245～255℃。波峰焊工艺相对比较难以控制，若将来所有元件都实现SMD化，则波峰焊将被回流焊所替代，以提高产品的质量及可靠性。

9）切割线路板

为提高生产效率，一般一块PCB板上合成了几个ECU的PCB，有二合一，或三合一等等。这样就要将它们用设备按一定的轮廓自动铣开，分成为单块PCB。

10）最终装配

为使元器件均安装好的电路板在使用时得到保护，必须再加装金属的盒盖，以达到防尘甚至防水的要求，同时也起到屏蔽作用，以满足电磁兼容性的要求。另外也有些外壳被设计利用为散热功能。

11）包装

对通过了低温功能测试的ECU进行包装，准备出厂供货。

3.9.2.3 新的安装工艺

另外还有一种混合式的ECU（Hybrid ECU）也已开始逐渐应用，其采用多层陶瓷电路板，单面或双面贴装各种裸芯片（即尚未经封装的集成电路芯片）和其它SMD元件，采用裸芯片既有利于芯片本身散热，又减少了ECU的质量及体积，故将大大地提高ECU的耐高温性和抗振动性。裸芯片与电路板的连接采用不同直径的金线全自动焊连，类似于集成电路封装中的Wire Bond工艺，对于ECU中某些大电流信号的连线中采用了全自动焊连铝线的工艺技术，从而实现大功率信号的连线。当前芯片倒装技术也已悄悄兴起，这一技术的推广应用将省去金属线焊连工序，进一步提高ECU的集成度，降低加工成本，并继续

汽车论坛 http://www.qclt.com

朝着小型化的方向发展。

3.9.3 检查

车用ECU因常常在十分恶劣的环境条件下使用，为保证其工作稳定，并充分发挥出用户所期望的性能，应从设计初期开始对质量进行细致的考虑，保证从设计到制造，直至出厂的各个阶段的质量得到保证。在本章节里，将对在制造的最后阶段，如何进行质量控制及检测，以上一节所举例的ECU流程为例，加以说明。

在上一节的生产工艺流程图中的菱形图框即代表生产中的检验或测试项目。

3.9.3.1 目测检验

这一检验工序主要为了检查正反面元件安装及回流焊、双波峰焊的焊接质量，以检查错装、漏装或焊接元件是否倾斜，焊点是否有虚焊、焊桥等等。也可采用先进的全自动光学检查系统，这样有利于检查引脚间距很小的集成电路的焊接质量，可节约人力，也更加可靠。

3.9.3.2 电路回路测试

在线电路回路测试是通过针床对安装了元器件的电路板上的测试点进行的电测试，可进一步检查有无元件错装，元件电性能参数是否超出允许误差范围，及PCB本身是否有开路或短路现象的缺陷。

3.9.3.3 功能测试

ECU加工好后为确认其功能的可靠性，故必须对ECU进行常温、高温、低温功能测试，这些在线的功能测试的特点为测试速度快，以满足高效率的大规模生产要求。测试设备对ECU仿真输入各种电信号，并加上一定的负载，再监测输出信号是否在设计要求值范围内，这样就完全保证了ECU的功能可靠性。

（撰稿人：张 东）

参 考 资 料

1.GB/T 1148—93 内燃机铝活塞技术条件

2.德国 Kolbenschmidt AG 标准

3.S. K. Schaefer, J. M. Larson, L. F. Jenkins, Y. young, etc. Evolution of Heavy Duty Engine Valves-Materials and Design, Valvetrain System Design and Materials, 14-15 April 1997, ASM, Editor: Hope A. Bolton, Jay M. Larson

4.Ted Tunnecliffe, Internal Combustion Engine Valve Technology, Met Tech, Inc. Olivet, MI

5.侯天理，何国伟．柴油机手册．上海：上海交通大学出版社，1993.12.

6.J. M. Larson, L. F. Jenkins, etc. Engine Valves-Design and Material, p. 1. Engine Components-New Materials and Manufacturing Process-ICE-Vol. 1. (1986) Editor: J. M. Bailey.

7.21-4N, Armco Steel Co. US Patent 3, 336, 472 (1968)

8.吴旭初，沈文君．发动机气门材料应用及进展．内燃机工程，1999 (1)

9.L. F. Jenkins and J. M. Larson, The Development of a New Austenitic Stainless Steel Exhaust Valve Materials, P780245-78039 1978 SAE

10.T. Tunnecliffe, The Development of Passenger Car Valves in the United States, Valvetrain System Design and Materials, 14-15 April 1997, ASM, Editor: Hope A. Bolton, Jay M. Larson

11.Engine Comperations Operctions May 1996.

12.Bosch. 汽车工程手册．中国汽车工程学会译．北京：北京理工大学出版社，1999.

13.林平．汽车电子控制汽油喷射系统结构原理检修．福州：福建科学技术出版社，1997.

汽车论坛 http://www.qclt.com

14. 钱耀义．汽车发动机电子控制系统结构原理．北京：机械工业出版社，1999.
15. 王云松．汽车燃油喷射系统原理与维修．北京：人民交通出版社，1997.
16. 沈鸿．机械工程手册．机械工业出版社．1997.
17. 本书编委会．化工词典．北京：化学工业出版社．1979.
18.'98 国际汽车摩托车排放污染综合控制技术研讨会及成果展论文集．1998.10. 中国武汉
19.J C Summer, J F Skowron and M J Miller, Use of Light-off Catalysts to Meet the California LEV/ULEV Standards. SAE paper 930386
20.N R Collins, G R Chandler, R J Brisley, P J Anderson, P J Shady and S A Roth, Catalyst Improvements to Meet European Stage III and ULEV Emissions Criteria. SAE paper 960799
21.M Harata, Catalysis Surveys, Japan 1 (1997) P61
22.Corning 公司产品规格及性能
23. 冯昭仁．车用催化剂与汽车污染治理．工业催化，1998 年，第 2 期
24. 陈勇．'99 国际汽车摩托车排放污染综合控制技术研讨会及成果展论文集．1999.10. 中国云南
25. 国外内燃机．1995 年，第 2 期
26.Skowron J F, et al. Effect of Aging and Evaluation Conditions on Three-way Catalyst Performance. SAE Transaction, 1989, Sec. 4, 892093
27.Mooney J J, et al. High Temperature Aging Cycle for European Catalyst Application. SAE Transction, 1985, Sec. 4, 852098
28.Sims G S, Johri S. Catalyst Performance Study Using Taguci Method. SAE Transction, 1988, Sec. 4, 881589
29.Bartley G J J, et al. Advanced Three-way Catalyst Formulations for High Temperature Applications. SAE Transctions, 1993, Sec. 4, 930076
30.Nox 触媒评价委员会编．自动车用三元触媒评价试验方法．日本自动车研究所研究报告，1978, No.47
31.Heyde M E, et al. Dynamometer Test Procedurces for Three-way Catalyst Screening. SAE paper 770371
32. 最新齿轮加工技术．南京第二机床研究所编译
33. 弧齿锥齿轮加工工艺的概要．綦江齿轮厂．沈剑平．赵世纯
34. 汽车同步环制造技术的现状及发展．武汉联合齿环有限公司．贾建军
35.TL82114. 转向器总成功能要求．Technische Lieferbedingungen Lenkgetriebe ZSB
36.ZFN5008 Teil1. 产品的清洁度．Sauberkeit Von ZF-Produkter Pruefvorschrift
37.DIN17200. 调质钢
38.DIN17210. 渗碳钢
39.DIN1651. 易切削钢
40. 本书编委会．金属机械加工工艺手册．上海：上海科学技术出版社，1992.
41. 吉林工大汽车教研室．汽车设计．北京：机械工业出版社，1983.
42. 吉林工大汽车教研室．汽车构造．北京：人民交通出版社，1988.
43. 中国汽车工程学会制动专业委员会第七届年会暨学术交流会论文集．1996.4
44. 上海汽车制动器公司的企业标准和产品图纸
45.ISO 3911—77 (C) 车轮/轮辋—术语、规格代号、标记和计量单位
46.ISO 3006—76 (C) 道路车辆—轿车车轮—试验方法
47.ISO 7141—81 (C) 道路车辆—车轮—冲击试验规程
48.SAE J328a—70 轿车车轮的性能要求和试验方法
49.SAE J175—88 公路机动车车轮的冲击试验规程

汽车论坛 http://www.qclt.com

50. John C. Dixon. Tires, Suspension and Handling, 2nd ed. U. K.. Cambridge University Press, 1996.
51. Anil K. Bhowmick, Malcolm M. Hall, Henry A. Benarey. Rubber Products Manufacturing Technology. New York: M. Dekker, 1994.
52. 梁守智，钏延熹，张丹秋．橡胶工业手册，第四分册，修订版．北京：化学工业出版社，1989.
53. 郑正仁，黄荣期．汽车轮胎制造与测试．北京：化学工业出版社，1989.
54. General Motors Corporation. Tire Performance Griteria. USA. GM. 1982.
55. 世界汽车 .1997.Vol. 11，“日本大发轿车车身柔性焊接线”，阎功杰．
56. 汽车工艺与材料 .1998.Vol 5，“汽车车身装焊夹具的结构设计”，熊晓萍、陶明元．
57. 国外汽车 .1998.1.“国外轿车车身的焊接装配技术”，鲍力立．
58. 吉林工业大学编．汽车车身制造工艺．北京：机械工业出版社，1983.
59. 李嘉宝编．夹具设计．北京：机械工业出版社，1985.
60. 夹具标准．上海大众冲压及车身规划科编．
61. 汽车技术 .1993.Vol 9，“轿车车身门盖总成生产工艺探讨”．
62. 第九届全国汽车车身制造技术研讨会论文 .1996.5.“桑塔纳 2000 型轿车四门两盖生产工艺探讨”.
63. 上海市焊接学会 1999 年年会论文集 .1999.5.“车身车间焊机的供电问题”．姚培亨．
64. 上海市焊接学会 1999 年年会论文集 .1999.5.“激光焊接在汽车车身制造中的应用”，庄永明．
65. 张美曾等译 .BOSCH 汽车工程手册．学术书刊出版社，1986.
66. 陈幼军主编．制冷与空调设备手册．北京：国防工业出版社，1984.
67. 梁荣光．实用空调制冷技术．广州：广东科技出版社 .1996.
68. 张豫南、王宪成．轿车新型设备结构与使用维修．北京：金盾出版社，1995.
69. 赵新民等．现代汽车空调器的使用与维修．北京：电子工业出版社，1994.
70. 王应钦．汽车仪表．北京：人民交通出版社，1983.
71. 本书编委会．汽车摩托车构造与工作原理．上海：上海科学技术出版社，1996.
72. 1984 年引进德国 VDO 公司技术资料
73. 1993 年引进德国 VDO 公司技术资料
74. 1996 年引进美国 DE 公司技术资料
75. 华中理工大学．电机工程手册．第 2 版．北京：机械工业出版社，1996.

汽车论坛 http://www.qclt.com

4 汽车装配

4.1 概 述

4.1.1 汽车装配概念及其特点

汽车装配是汽车全部制造工艺过程的最终环节，是把经检验合格的数以千万计的各类零件，按规定的精度标准和技术要求组合成分总成、总成、整车，并经严格的检测程序，确认其是否合格的整个工艺过程。

汽车产品要求有好的动力性、经济性和耐久性，以实现在各种复杂环境中的运载功能，现代汽车产品更要求安全可靠、造型美观、乘坐舒适并满足环保要求。这些要求，最终是通过装配工艺来保证的。若装配不当，以昂贵的代价制造出的高精度的合格零件，不一定能装出合格的汽车。因此装配是保证产品质量的重要环节。

汽车装配的特点是零件种类多、数量大、作业内容复杂。装配零部件除发动机、传动系、车身、悬架、车轮、转向系、制动系、空调系等之外，还有大量内外饰件、电器、线束、软管、硬管、玻璃、各类油液加注等。汽车总装工作量约占全部制造工作量的20%～25%，其操作内容包括过盈配合、焊接、铆接、粘接、镶嵌、配管、配线、螺纹连接、各类油液定量加注等。图4-1-1为各类装配作业所占比例。

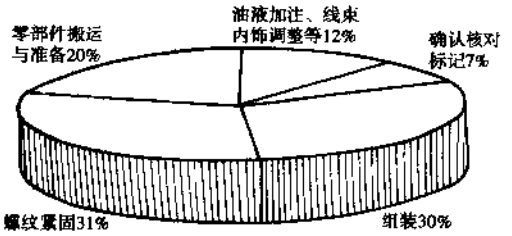


图4-1-1 装配作业的分配比

综上所述，除产品设计先进、零件制造精良外，好的装配工艺是保证汽车产品水平、质量、降低生产成本和提高劳动生产率的重要因素。装配的生产组织、生产线、设备、工具、检测手段的配备以及提高装配自动化程度的问题，也是汽车制造的重要课题。上述因素，也必然要追溯到车辆结构的合理性和产品设计的工艺性。

4.1.2 装配的种类

汽车产品结构比较复杂，通常生产批量较大，为保证装配质量，提高劳动生产率，根据产品的结构特点，从装配工艺角度将其分解成为可单独组织装配的单元，以便合理地安排人员、设备和工作地点，组织平行、流水作业。故装配可以分为部装（分装）和总装（含内、外装饰），其成品分别称为分总成、总成和整车。为保证最终产品的质量，对每一级装配成品都要设有试验、检测工序即总成试验与整车试验。图4-1-2为装配单元示意图。

4.1.3 装配生产组织形式

对于整车和可以单独组织装配的大型总成（例如发动机等）其装配生产组织，可以分为固定式装配和流水式装配两大类。

汽车论坛 http://www.qclt.com

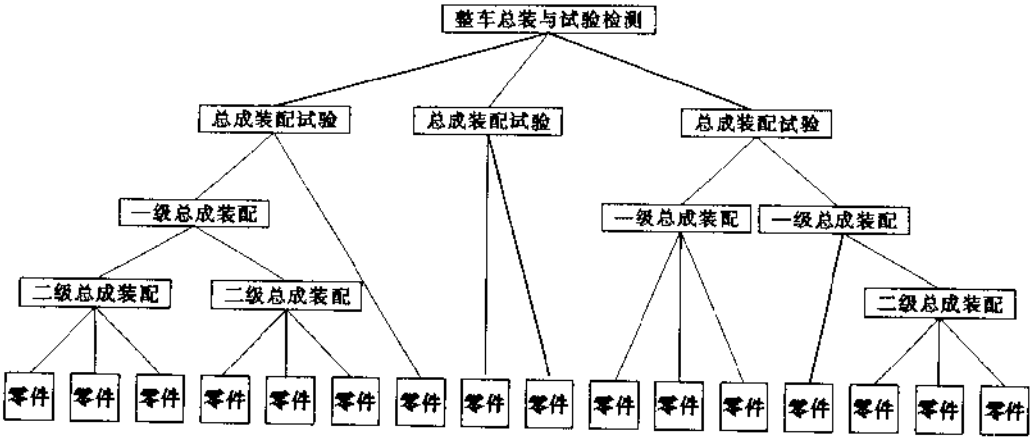


图 4-1-2 装配单元示意图

4.1.3.1 固定式装配

装配对象的基础件安放在固定工位上，工人将零件和总成按次序逐一安装，最后形成成品的装配方式，称固定式装配。这是原始的最简单的生产方式，在装配过程中允许对零件进行加工、修理和选配，零件不具有（或很少具有）互换性，装配以手工操作为主，一般不采用复杂的工艺设备，对工人的技术水平要求很高，而劳动生产率较低。这种生产方式只适用于个别品位极高、需求量很少的特种用车，批量生产较少采用。

4.1.3.2 流水式装配

产品随输送装置在多工位生产线上按装配顺序由一个工位向另一个工位移动，在每个工位按工艺规程完成一定的装配工序，最后完成整个产品的装配形式，称流水式装配。这种生产组织形式将整车各个零部件上线和装配动作划分为一个个工序，每个工位完成若干个工序内容，每个工人只需要熟悉某个或某几个工序即可上线操作，各工位配以必要的设备和工具，可大幅度提高劳动生产率，且保证产品质量。根据产品及其生产批量不同的需要，产品在生产线上的移动可以是自由的，也可以是强制的。

1）自由流水方式

产品的工序间移动没有严格的时间要求，生产的节拍不在单一产品上体现，允许工序间积存，使生产具有一定的柔性，这种方式主要用于小型部件或总成装配。适用于多品种成批生产。

2）强制流水方式

产品的工序间移动以某种形式的机械化输送装置来实现，有严格的节拍要求，工人必须在规定的节拍时间内完成规定的全部装配工序。这种方式适用于大批量生产，在目前汽车装配生产中应用最广。强制流水方式又分为间歇式移动和连续式移动两种。

3）强制间歇式流水装配

即产品在输送装置上完成周期性移动后，工人在该工位上对每个产品完成同一装配工序，而后产品按节拍要求进行下一个周期的移动。此时，生产节拍＝工序操作时间＋位移时间。很显然，产品的移动占用了一定的时间，造成了工时浪费。因此，这种方式对整车装配而言只适用于产量小、生产节拍较长的装配生产，如重型汽车、大型客车等。

4）强制连续式流水装配

即产品按严格的生产节拍在输送装置上连续缓慢移动，工人在固定的区域范围内，按节拍时间要求完成规定的装配工序。此时产品的移动时间重叠在作业时间内，而每道工序的工时安排必须等于或略少于节

汽车论坛 http://www.qclt.com

拍时间，生产线才能正常运行。这种方式是大批量生产的汽车总装车间常用的生产组织形式。

由于各总装厂的厂址条件、产品与产量以及各种内、外部条件的差异，装配的生产方式也各不相同。表 4-1-1 是装配生产方式的某些对比。

表 4-1-1 装配生产方式的对比

比较项目 \ 生产方式	少（单一）品种大量生产	多品种中、小批量生产
零件运入	按周、双周生产计划	按机型的日生产计划
零件保管	零件箱	自动化立体仓库
零件供给	小件：线旁批量供给 中、大件：按车间计划顺序供给	小件：线旁批量供给 中件：按车间计划顺序供给 大件：准时供给
设 备	专机＋通用装配台架	通用机器人＋可按机型转换功能的通用装配台架
装配作业指导	机种、类别、选装件等组合种类不多、作业指导书较简单	机种、等级、色别、类型、选装件发送地等选择组合数量庞大，应按作业指导书使每台产品与用户要求一一对应
生产管理方式	简单生产调度	把用户的订货要求输入计算机系统，制定生产计划，打印卡片制成看板，以指挥生产工位、准备工位和仓库，并由闭路电视系统执行监督

（撰稿人：陈毅夫）

4.1.4 汽车装配技术的最新发展

近年来，随着汽车消费市场需求的个性化和多样化，汽车装配作业也从传统的单一品种、大批量生产向多品种、中小批量转化，装配生产的批量性特点趋于复杂，安装零件的品种，数量进一步增多，对零部件的接收、保管、供给、装配作业指导等都提出了新的要求。市场的变化，必将使装配生产方式产生新的变革。尤其是进入 90 年代以后，由于电子技术、计算机技术和机器人的迅速发展，使汽车装配技术进入一个新的发展阶段。

4.1.4.1 机器人在汽车装配中被广泛采用

随着机器人的功能和控制技术的提高，机器人已经逐步进入到装配领域，并在国外各大汽车公司装配生产中被广泛采用，从而使汽车装配自动化水平大大提高。目前，国外大量生产的轿车装配自动化程度有的已达 50%～65%。另一方面，机器人的使用减轻了工人的劳动强度，使装配人员大为减少，减少了故障与事故的发生并大大提高了劳动生产率。在汽车整车装配中机器人不仅用于挡风玻璃的密封剂涂敷、安装，车轮、仪表板、后悬架、车门、蓄电池等部件的安装，也用于发动机动力总成等大件的安装。

①挡风玻璃安装。一般采用两台机器人，并配有真空吸盘和传感器，一台涂敷密封剂，一台将挡风玻璃装入窗框。英国罗孚集团装配厂使用的挡风玻璃安装系统，装备了带有激光器的机器人、摄像机和电子计算机。当车身到达挡风玻璃安装工位时，首先由摄像机确定车身位置，然后，按照控制器的指令，两台机器人举起准备好的挡风玻璃送到检查工位，检查工位上配备的视觉系统计算机，检查挡风玻璃的形状和尺寸，在挡风玻璃与所要求的参数相适应时，机器人即将挡风玻璃安装到窗框中。

②车轮安装。德国库卡机器人公司生产的车轮自动装配系统，轮毂孔的位置和形状由电视—图像系统测定，装车轮采用六轴机器人。

③仪表板安装。法国雪铁龙公司耐奥装配厂仪表板安装，先将仪表板分装成整体后，再用机器人将仪

表板装到驾驶室前面板上，然后自动进行功能检测和校正。

④车门安装。机器人将车门拆下送至车门分装线，待分装好后，再用机器人将其安装到车身上。

⑤后悬架安装。机器人将后悬架从下面举起装到车体上，其上配有螺栓自动供应装置和电子扭矩控制仪。

电子计算机的发展和应用范围的扩大，是装配自动化发展和提高的主要因素。

4.1.4.2 电子计算机技术在生产管理系统中得到广泛应用

电子计算机技术在装配厂的另一重要功用是进行大量多品种混流生产的管理，这也是汽车装配技术发展的一个重要标志。采用计算机进行生产管理是常设在中央控制室的主机和各分控点终端机组成计算机控制生产管理系统，来指挥全部生产工艺和储、取信息。使得制定计划、准时制供给、监控库存量、向协作厂定货、待装件输送等全部内容均由计算机控制，从而达到根据用户需求及时生产，及时供货，并且具有很高的精度和效率。

汽车生产采用计算机进行自动化控制和生产管理的目的，不只在于节省人力，提高产品质量，更重要的是它能满足和适应生产工艺和产品品种迅速变化的要求。计算机控制有效地保证了总装线上混流装配的正常进行。因此，目前新建的大型汽车装配厂都采用计算机控制系统进行生产管理。

4.1.4.3 采用柔性装配线

随着汽车市场竞争的不断加剧，促使汽车生产厂依靠多品种来满足不同层次和越来越具个性化的用户需求，因此，汽车产品的生命周期逐渐缩短。如果每次更换产品，设备与工装必须全部更新的话，新产品就有可能因投入生产时间过长而失去市场。因此，企业要利用一次改造在一个相当长的时期内满足日益变化的多种车型混线生产的要求，同时又具有高的生产率，唯一的途径就是采用可以满足大量生产要求的柔性装配生产线。

所谓柔性装配线就是指能够同时满足一个或多个系列汽车产品生产要求，可以灵活改变夹具及运行方式，以适应无法预知的产品更新变化后的同类汽车产品装配需要的生产线，它具有以下特点：

①具备灵活多变的运行速度以适应不同生产节拍的生产要求；

②具有积放功能，使装配工时具有弹性；

③被输送的产品能在任意位置停止，以满足不同产品、不同装配内容的不同操作要求，并使于实现自动化装配；

④具有可编程序操作控制系统；

⑤随行夹具的装夹方式和支承形式能够灵活改变以适应多品种的装配要求。

在汽车装配生产中柔性装配输送线的主要形式有：积放式悬挂输送机；自行葫芦输送机；滑撬式输送系统；RAMRUN 输送系统又称为电动单轨输送机系统，按形式可分为悬挂式电动单轨输送机（OH 型）和地面式电动单轨输送机（FL 型），这种输送系统，在日本汽车装配生产线上被广泛应用。

4.1.4.4 采用模块化装配

所谓模块，就是零部件和子系统的组合。为了提高装配的自动化水平，人们越来越意识到必须加强产品开发设计、生产工艺、生产管理和产品制造的密切合作。从产品设计开始就应尽可能考虑简化总装配工序，使尽可能多的分总成在总装线外先进行预装配，构成整体后再上总装线安装到车体上，也就是采用模块化装配。这样不仅可大大减少总装线上的装配时间、降低生产成本、提高产品的可靠性，而且便于实现自动化装配。国外很早就开始采用模块化装配技术，德尔福是模块化供应的倡导者和领先者，德尔福公司首先提出了模块化供应的新概念，并率先向奔驰公司在美国生产的 M 级车供应前座舱模块。模块化装配结构一般包括：

①车门模块。在车门分装线上，以内板为中心将门锁、玻璃、玻璃升降器及密封护板等用螺栓安装于其中部，再将其与车门外把手、车门铰链、密封条及玻璃滑轨安装一起，形成车门模块，然后，再将其装到车身上。

汽车论坛 http://www.qclt.com

②仪表板模块。在模块骨架上安装仪表板、空调、离合器踏板、制动踏板及转向柱等，分装好后检查仪表和开关的技术性能，然后装到车身内。

③底盘部件模块。将分装好的发动机和变速器总成、前悬架总成、后悬架总成、传动轴、排气管、油箱等底盘部件在线下合装好后，再装入车身。

④车头模块。系指安装于车身前端覆盖件上的前大灯、雾灯、喇叭、发动机罩盖锁和散热器面罩等。

（撰稿人：卞　岩）

4.2　整车装配工艺与设备

4.2.1　轿　车

4.2.1.1　生产线组成和车间平面布置

1）车间工艺流程

轿车总装车间工艺流程如图 4-2-1。

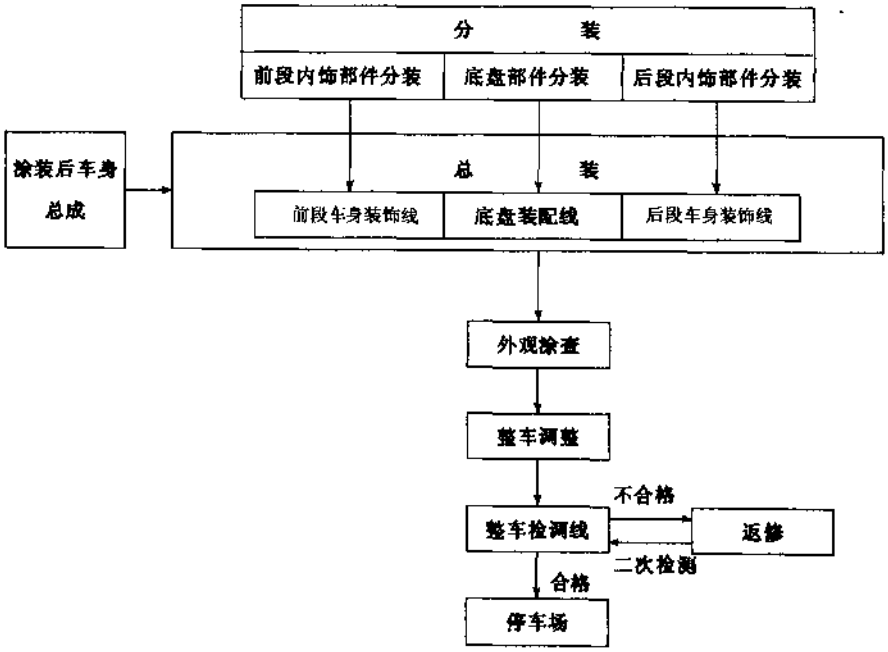


图 4-2-1　轿车总装车间工艺流程

2）生产线组成及工艺特点

从上述工艺流程可以看出，轿车总装车间生产线一般包括：总装配线、分装线、整车检测线以及整车返修区。

（1）总装生产线及工艺特点

根据轿车的结构特点，大多数为承载式车身，其装配特点是以车身为装配基础件，所有总成、零件都依附于车身上。因此，轿车装配是将车身内外饰和整车装配工作放在一条线上完成。轿车总装配线一般分成三个部分：前段车身装饰线、底盘装配线、后段车身装饰线。

①前段车身装饰线主要是车身上线及进行电线束、工艺堵塞、顶棚装饰板、挡风玻璃、仪表板、侧围

内饰板、后行李箱内饰、刮水器及其电机等部件的装饰工作。

为了保证总装线实行混流生产，车身上线是由计算机进行控制的，每个车身上线前都贴有条形码，条形码内包含该车的车身号、流水号、车型、备件组织号以及与之配套的发动机型号等信息，从而保证了整个总装线的生产有条不紊地进行。

②底盘装配线主要进行燃油管、制动油管、油箱、发动机和变速器动力总成、前悬架、后悬架、传动轴、排气管、消声器、车轮等车底部件的装配。

根据各种不同的车型结构，底盘部件装配可以采用模块化装配，即将分装好的发动机与变速器总成、前悬架总成、发动机前托架（带三角臂、转向器、横向稳定杆等）、传动轴、排气管、油箱、后悬架等底盘部件安装并定位到合装小车上。合装小车在合装区可与底盘装配线同步运行，小车上设有液压举升装置，将分装好的底盘合件直接举升上线与车身合装。

③后段车身装饰线主要进行前保险杠装配、座椅装配、前面罩及前照灯装配、发动机各种管路连接、燃油、制动液、冷却液及制冷剂等各种油液的加注工作及整车下线前的调整工作。

为了保证质量，制动液、冷却液及制冷剂加注前需进行必要的检测和抽真空，具体方法如下：

①制动液加注：由于在制动系统内可能存在泄漏和可能含有水分等其它杂质，因此，在加注制动液时应进行制动系统的渗漏检查。首先采用液氮扫气，来干燥、净化汽车制动系，然后分两次抽真空，第一次抽真空达到一定的真空度后保持一定时间，如变化不大，则表示没有渗漏，第二次抽真空进行制动液加注。如检查发现泄漏，则应作上标记，并在返修区进行检查返修。

②冷却液加注：在加注冷却液前，需进行油、水密封性检测。水循环系统的密封性检测，主要是检测散热器、水管、缸体水道及水泵的密封性。测试时，将水管塞头与水箱口相连，加压，并保持一段时间，无压力下降，则为正常，可以加注冷却液，在加注冷却液时需要进行抽真空，获得一定的真空度后，方可加注。

③制冷剂加注：在加注制冷剂之前，要进行两次抽真空检测，一次氮气加压扫气，如无泄漏则进行加注。第一次抽真空，达到一定的真空度后保持一定时间，若无明显变化，则说明无大的泄漏。继续抽真空，达到一定的真空度保持一定的时间，若无明显的变化，则说明无小的泄漏，可以进行加压检测。液氮加压扫气的目的，一是为了检测制冷系统有无由内向外的渗漏，二是为了扫除制冷系统内的潮湿空气，以便加注纯净干燥的制冷剂。加注时，将加注头接到制冷系统的高低压油管接头上，操作工只需启动自动检测加注循环程序，即可自动完成加注任务。

④燃油加注：一些生产厂在进行燃油加注前首先进行供油系统的密封性检测，主要是检查燃油箱到化油器前各管路的密封性。测试前，将燃油箱通大气的管口及通往化油器前的供油管路夹住，然后将检测设备的气源塞头与油箱口相连，加压检查，并保持一段时间，若无压力下降，则油路密封正常，可以加注燃油。

（2）分装线及工艺特点

分装线主要包括：仪表板总成分装线、车门分装线、散热器总成分装线、车轮总成分装线、前后悬架总成分装线、发动机与变速器动力总成分装线等。

①仪表板总成分装线。仪表板总成分装线可以采用空中悬挂式，也可以采用地面式，空中悬挂式一般为带吊具的普通悬挂输送机和积放式悬挂输送机，地面式一般采用带随行夹具高出地面的双链牵引输送线，为了便于操作，夹具可翻转一定角度，并设有定位机构。在分装线上配有线束检测仪。

在仪表板分装线上分装部件一般包括转向柱、仪表板框架、组合仪表、仪表板线束、组合开关、收放机、空调鼓风机、暖风热交换器、蒸发器及壳体总成等。仪表板分装完成后，采用线束检测仪100%进行仪表板功能检测，主要检测仪表板功能是否正常，检测时，将仪表板总成的相关线束插头与仪表板线束检测仪的对应接口接上，启动检测按钮，即可逐项检测转向、灯光、报警等功能，检测完毕后，根据仪表板总成上所贴的条形码由计算机控制上线，从而保证不同车型安装相应型号的仪表板总成。

②车门分装线。车门分装线的形式与仪表板分装线的形式基本相同，也包括空中悬挂式和地面式两种。在分装线上主要进行门锁、玻璃升降器、防水帘、玻璃、内饰板、内手柄、外手柄、密封条等部件的

汽车论坛 http://www.qclt.com

装配。

车门分装工艺被越来越广泛采用，这主要是由于采用这种工艺不仅可以提高车门零件的装配效率，便于实现自动化装配，而且拆掉车门后，便于座椅、仪表板及车身内部其它零部件的装配。

③车轮总成分装线。车轮分装采用的主要设备是车轮装配机、充气机及车轮动平衡机，各设备之间的连接一般采用机动辊道。在车轮分装线上，首先将轮胎安装到轮辋上，充气到规定的压力，然后进行动平衡检查和调整，再送到总装配线上。

在各种分装线中，车轮分装线自动化程度最高，如某轿车厂的无内胎车轮自动装配线具有自动装配、快速自动充气、车轮动平衡、自动选择配重等自动功能。

④前后悬架总成分装线和发动机与变速器动力总成分装线。前后悬架总成分装线和发动机与变速器动力总成分装线根据不同的车型结构，若不带副车架，一般采用环形地链牵引小车式，小车上设有液压举升装置，可与底盘装配线同步运行，直接上线。

⑤挡风玻璃分装。挡风玻璃分装主要包括粘胶部位的清洁、涂胶预处理、安装玻璃密封条等。分装完成后，由人工将玻璃放到玻璃放置台上，然后由自动涂胶机和高精度机械手自动完成玻璃位置找正，自动涂上一整圈胶，自动将玻璃用吸盘吸起，最后自动将玻璃装到车身上。

(3) 整车检测线

整车出厂检测是汽车生产过程对整车质量以及零部件功能进行综合检测的一个至关重要的环节。为确保整车的出厂质量，整车装配完成后，要在整车检测线上对其主要性能进行检测，并进行必要的调整。目前，国内几大轿车生产厂均采用计算机控制全自动检测线，该检测线可对整车质量检测实现自动控制、自动采集数据和判定、自动打印输出检测结果。由于车型不同，各厂检测线的组成也略有不同。图 4-2-2 为整车检测线的一般组成。

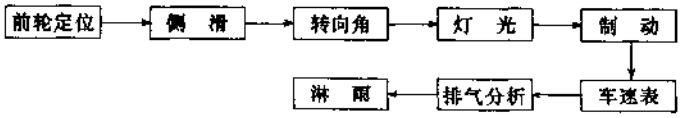


图 4-2-2 整车检测线的组成

除上述检测项目之外，一些生产厂在检测线上还进行外观检查以及配备整车电器综合检测设备，检测线上具体的检测内容如下：

①外观检查。外观检查在灯廊内进行，主要检查车身面漆质量、表面有无划伤、碰伤，车门及车窗密封条的装配间隙是否正常，紧固件的拧紧力矩是否满足要求，以及有无漏装、错装等现象。对不合格项在返修区进行返修。

②12V 外接电源启动发动机试运转。为了保证安装到车上的 12V 蓄电池在出厂时电量充足，有的生产厂在检测线上设有 12V 外接电源，用它来启动发动机运转一定时间，以保证以后用装车蓄电池启动发动机时能够顺利启动。

③车轮定位参数检测。主要检测车轮前束和外倾角，在检测线上一般仅对前束进行调整，其它参数由产品结构保证。不同的生产厂所采用的车轮定位检测设备不同，因此，检测方法也不相同。某轿车厂车轮定位参数检测过程为：汽车驶上车轮调整仪，四个车轮定位卡盘自动靠在四个车轮上，同时测出四个车轮的外倾角和前束值，并在显示屏上显示测定值。前束不合格时，可以在该检测台上通过观察显示屏的读数变化进行调整。

有的轿车厂前束调整台比较先进，它主要包括五大部分，分别为调整装置、监控装置、四轮测量装置、汽车控制装置和程控装置。

a. 调整装置：该装置设置在地沟中，包括工作平台和调整用检测扳手。在进行前束调整时，由操作人员在操作平台上进行手动调整，调整对象为左右转向横拉杆。操作人员根据指示灯提示进行调整，调整完毕后，另一指示灯会提示将转向拉杆调整螺母锁紧。

b. 监控装置：该装置具有输入、打印功能。在进行调整时，通过键盘或光电笔读条型码输入车型、车身号等参

汽车论坛 http://www.qclt.com

数，通过屏幕显示各种传感器数值及菜单，通过打印机可输出小卡片，以记录前束调整是否有效。

c. 四轮测量装置：当汽车驶入调整台时，该装置起作用。在汽车四个车轮旁边都有相应的探测触杆，保证汽车处于调整前的正确位置，同时，传感器给出需要调整的不平行度或前束，另外，也可用于计算车轮的变形程度。

d. 汽车控制装置：该装置通过光电管传感器告知汽车是否到位，同时通过红绿灯提示操作人员能否出车，这些都取决于前束调整是否有效。

e. 程控装置：该装置主要是通过监视器系统控制计算机工作。

①车轮侧滑量检测。侧滑试验是动态检测前轮前束与前轮外倾的配合是否合适，并检查悬架的几何特性。具体的检测方法是，汽车的前轮或后轮驶过试验台的两块滑板时，车轮的驶入点和驶出点被扫描，显示屏即显示测定值及合格与否的标志。

⑤转向角检测。检测汽车转向轮的左、右最大转角。检测方法：将转向盘分别由中间位置向左、右转到最大位置，即可测出内外轮转角。

⑥前照灯检查。检查前照灯发光强度及调整前照灯远光光束照射位置。某轿车厂前照灯的检查方法如下：汽车停在距检测仪光屏 1m 远的位置、打开远光灯，发动机转速为 1 500 r/min，此时，检测仪自动跟踪灯光位置，并在表盘上显示发光强度及光束照射位置的数值。通过调节前照灯的调整螺栓，来调整光束照射位置。发光强度规定值应≥15 000cd。

⑦制动性能检查。通过检测前后制动器的制动力，确定行车制动系及驻车制动系的工作是否正常。在检测时，前轮先驶上试验台，并施加一定的踏板力，测量每个车轮制动力及左右车轮制动力之差，测得的值应符合规定值。然后后轮驶上试验台，施加同样的踏板力，测量每个车轮制动力及左右车轮制动力之差，应符合规定值。后轮在试验台上时，还进行驻车制动力检查。

⑧动力传动系统检查及车速表校验。主要是通过换档加速检查发动机和变速器的工作是否正常。同时检查车速表的指示是否正确。汽车在试验台上起步换档加速，显示屏显示车速和加速时间，并显示加速时间合格与否的标志。与此同时，检测人员需观察发动机和变速器及其换档装置有无异常。另外，当被试车从低速开始，逐渐提高车速，当测试器速度指示值达到一定值时，试验车上车速表指示值应在规定的范围内。

⑨怠速排放污染物检查。采用排气分析仪检查怠速排放，检测时发动机应暖机、怠速转速应正常，将分析仪探头插入汽车排气管中，分析仪将 CO、HC 含量分析结果输入到数据处理机，分析结果可由屏幕显示或打印。

⑩防雨密封性检查。该项检查在淋雨试验室内进行，汽车由地面链传送通过淋雨试验室，淋雨试验时间约为 3min，试验后车内不得有漏水、渗水现象。

⑪整车电器综合检测。使用的设备为整车电器综合检测台。该设备有一个主控制柜，控制程序和软件装在此控制柜的计算机中，有一个带显示及数据采集功能的单片机，并具有结果打印输出功能。

进行检测时，将蓄电池负极拆下，单片机的接头分别与蓄电池正极、主机及拆下的蓄电池负极相接，在主机显示屏控制程序指令中选择车型、车身号等参数后，开始进入检测程序。

整套检测系统不只是对各仪表和灯光的功能进行检测，还对整车各电器系统的电压、电流进行测试，以检查可能存在的接触不良、短路等隐患，保证电器系统的装配质量。

⑫路试检查。在完成上述检查外，按一定的百分比抽查一定量的整车，在专用的试车道路上进行路试，以确保整车的质量。

(4)整车返修区

在整车检测线检验不合格的车送往整车返修区。整车返修一般包括机械部件返修、电器部件返修、钣金件返修、补漆等。在返修区一般设有整车举升机、地沟、补漆室以及必要的检测设备。

3)车间平面布置

在进行车间平面布置设计时，首先需根据轿车的结构特点编制装配工艺过程卡，内容包括轿车各零部件的装配顺序、采用的装配工具、装配设备及每一工序所需要的装配时间。然后以装配工艺卡为基础，根据生

汽车论坛 http://www.qclt.com

产纲领、平均工作密度计算出装配节拍、装配线的工位数和设备台数。再根据厂址条件、零部件的供应方式、车间的物流等综合因素进行车间平面布置，应力求使各生产线的布置符合生产过程规定的工艺顺序，使零件、部件及成品的运输路线为最短。轿车装配车间平面布置举例示于图 4-2-3。

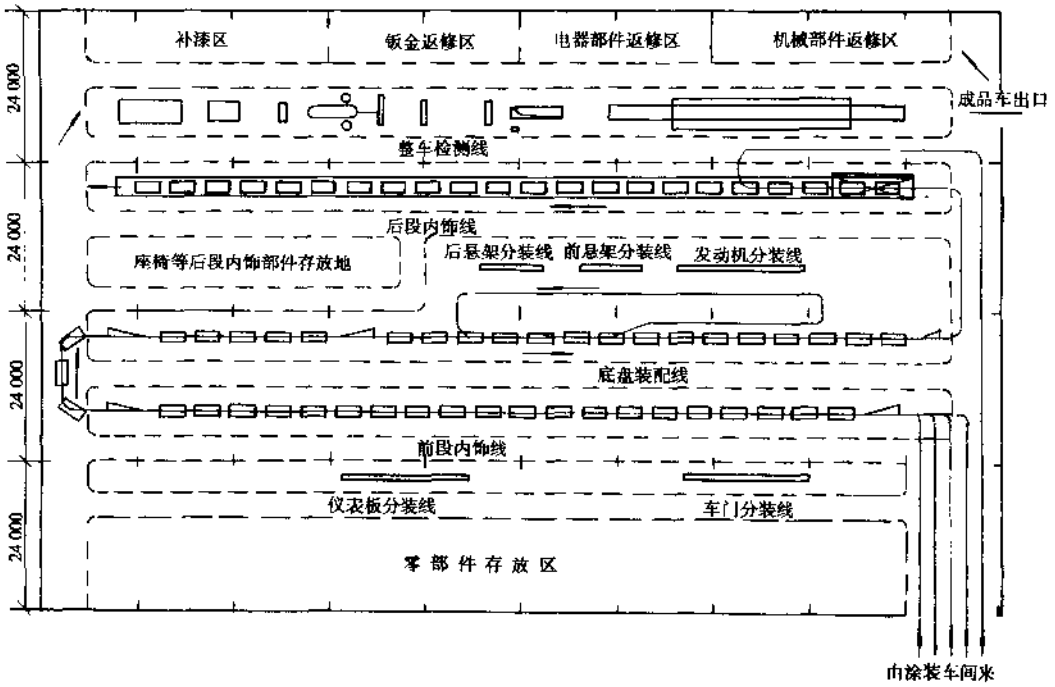


图 4-2-3 轿车装配车间平面布置图

4.2.1.2 装配方法和装配设备

1)装配方法

常用的装配方法有螺纹联接法、粘接法、充注法等。

(1)螺纹联接法

螺钉、螺栓联接是机械装配的基本方法，它约占汽车装配作业工作量的 31%，个别部位的螺纹联接采用手动扳手，较普遍的是采用风动扳手或电动扳手以及电动螺丝刀等。由于风动扳手的噪声较大，污染环境，电动扳手的应用越来越广泛。对于有拧紧扭矩要求的地方，现在一般都采用静扭定值风扳机或定扭电动扳手来代替传统的冲击式风动扳手。静扭定值风扳机的特点是扭矩易控制，当拧紧扭矩达到预调的某一定值时，风扳机便自动停止转动，并且工作噪声较小，使用它可实现固定扭矩的螺纹连接。另外对一些必须使用手动拧紧的螺纹连接地方，使用一种扭力杆工具，此种扭力杆扭矩可调，使用时，当扭矩值达到预调值时，扭杆失效，以此控制扭矩。在整车装配中最重要的螺纹联接是车轮装配，现在一般多采用多头气动或电动定扭组合扳手进行车轮螺栓紧固。为保证装配质量，各种定扭扳手需定期检验、校正。

(2)粘接法

需粘接的零部件，内饰件一般有衬垫、隔音材料、车门内装饰护板，外饰件一般有挡风玻璃、车灯、标志等。粘接方法：小件预先在车身上涂粘接剂，大件则在需要装的零件上直接涂粘接剂，所使用的设备由高压空气泵、储胶罐、管子、喷枪等组成。

在轿车装配中一个重要的粘接部件是挡风玻璃，挡风玻璃装配的好坏直接影响着整车的密封性。因此采用条状涂胶，所使用的设备是自动涂胶机和定量供给装置。

(3)充注法

是指装配时注入发动机机油、变速器齿轮油、散热器冷却液、制动液、动力转向液压油、空调制冷剂、挡风玻璃洗涤液、燃油等各种液体的方法。发动机机油、变速器齿轮油在分装线上加注，其它液体加注在后段车身装饰线上进行。

发动机机油、变速器齿轮油、后桥齿轮油、动力转向液压油、制动液等油液设专门的液体库，并通过泵及管路供至加注点，由定量加注装置定量加注。燃油在厂房外设地下油库，并配有远距离供油系统，采用自动定量加注机加注。我国在轿车装配中，已普遍采用具有抽真空、自动检漏、自动定量加注等功能的加注机，以保证加注质量。

2)装配设备

轿车装配所用的设备主要包括五类：输送设备、油液加注设备、出厂检测设备、起重运输设备以及装配零件和总成时所用的各种专用装配设备。

(1)输送设备

输送设备主要用于总装配线、各总成分装线以及大总成的输送。根据轿车装配工艺特点，既有车身内外装饰，也有车下底盘部件装配，因此轿车总装配线，通常由二类输送机组成，一类是高架空中悬挂式输送机，另一类是地面输送机。空中悬挂式输送机主要形式有普通悬挂输送机、积放式悬挂输送机和自行葫芦输送机。地面输送机主要形式有地面板式输送机、单链牵引地面轨道小车式输送机和滑橇式输送系统。各种输送机的特点见表 4-2-1。

表 4-2-1 轿车总装配线所采用的各种输送机形式及特点

输送机名称		运行速度	特点
高架空中悬挂式输送机	普通悬挂输送机	0.5~15m/min	优点是：结构简单，价格低，可以充分利用空间，易于工艺布置，地面宽敞，动力消耗小。但用作内饰装配线时操作的稳定性较差。另外，工件上下需配置升降设备，不便于多品种空间储存，适合于单一品种大量生产，属刚性输送线，无积放功能
	积放式悬挂输送机	0.5~15m/min	优点是：可利用升降机构根据工艺需要来实现输送机线路中某一段承载轨道的上升或下降。 利用停止器根据工艺需要来控制载货小车的定点停止，以便在静止状态下进行装配，便于实现装配自动化。 载货小车之间具有自动积放功能便于储存和实现柔性装配。 是适于高生产率、柔性生产系统的输送设备，集精良的工艺操作、储存为一体，在轿车生产线中被广泛应用。其缺点是造价较高
	自行葫芦输送机	常用：10~30m/min 最大：60m/min	自行葫芦输送机也称电动自行小车输送机，在国内是一种新型的全自动输送系统，其特点是： 可采用集中控制、分散控制或集散控制方式，并能实现自动控制。载货小车可以根据工艺需要，按设定的程序在工位上进行自动停止、自动升降、自动行走等各种动作。在需要装配的工位、工人也可手动控制叫车、放车、上升、下降、前进、后退等工作。 在配备道岔的输送线上，小车能将成品按工艺要求自动分类，积放、储存。实现多品种混流生产。 是集仓储、运输、装卸、工艺操作四大物流环节为一体的柔性生产系统，更适于有频繁升降要求的工艺操作区域，并且有准确的停止和定位功能。其缺点是造价高，属间歇流水设备，技术等工时间较长，因此在国内大批量生产轿车的装配线上还没有应用

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

输送机名称		运行速度	特点
地面输送机	地面板式输送机	0.6~18m/min	板式输送机有单板和双板两种，单板一般用于前段车身内饰线，双板用于后段车身内饰线，在双板的中间根据工艺要求可设地沟，便于车下调整作业。采用板式输送机，其操作性好，另外其结构简单，故障率低，便于维修。其缺点是刚性输送，没有柔性，另外造价较高
	滑橇式输送系统	1.5~60m/min	滑橇式输送系统具有自动实现运输、储存、装配等功能，是一种机械化程度较高的综合性地面输送系统，其主要优点是：工艺性强，灵活性大，柔性好，易于与其它输送装置相连接，适合于多品种大批量生产。其缺点是占地面积大，价格昂贵
	单链牵引地面轨道小车式输送机	0.5~15m/min	优点是结构简单、建设速度快、造价较低、便于布置、改变小车支撑位置，可适合于多品种生产。 缺点是刚性输送，没有柔性

国内几大主要轿车生产厂装配线形式见表 4-2-2。

表 4-2-2 国内几大主要轿车生产厂装配线形式

序号	生产厂	生产车型	装配线形式
1	上海大众汽车有限公司	桑塔纳轿车	滑撬+普通悬挂输送机+地面双板式输送机
2	一汽大众汽车有限公司	高尔夫、捷达轿车	积放式悬挂输送机+地面双板式输送机
3	神龙汽车有限公司	富康轿车	滑撬+积放式悬挂输送机+地面双板式输送机
4	天津汽车工业总公司	夏利轿车	地面反向积放输送机+积放式悬挂输送机+地面双板式输送机
5	北京吉普汽车有限公司	切诺基	积放式悬挂输送机+地面双板式输送机

从表中可以看出，轿车装配线多分为两段或三段，这主要是由轿车的结构特点所决定的，具体采用那种形式的装配线，需根据车型的品种、结构、生产纲领、投资情况等多方面因素决定。

(2)起重运输设备

轿车装配车间所用的起重设备主要有电动单梁悬挂起重机、单轨电动葫芦、气动葫芦、立柱式旋臂吊等。

运输设备，厂房内运输一般采用电瓶叉车、手动托盘搬运车、电动托盘搬运车等。厂房外运输一般采用内燃叉车。

发动机、变速器、车桥等大总成，从发动机厂或零部件库至装配工位，一般采用积放式悬挂输送机和自行葫芦输送机运输。

近年，国外又出现一种新的物料搬运设备——自动导向搬运车（AGV）。AGV 是一种靠蓄电池驱动按输入程序选择行驶路线及停靠位置的无人驾驶车辆，根据需要其行驶路线可以修改、延长或缩短。由 AGV 组成的自动导向搬运系统（AGVS）是一个程序控制系统，通过主计算机对每台小车上的微机进行控制，使小车自动的把物料在准确的时间内送到车间内的各个预定位置。另外它还装有安全报警装置，在行驶中碰到人和障碍物就自动停止。它的优点是可实现对物流的一体化控制，安装灵活，生产线易于调整，可与机器人和输送带等设备配合，便于实现自动化装配。

(3) 各种油液加注设备

各种油液的加注设备和加注方法见表 4-2-3。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 4-2-3 各种油液加注方法和加注设备

序号	液体名称	加注设备	加注方法
1	散热器冷却液	冷却液真空加注机	抽真空后，定量加注
2	制动液	制动液真空加注机	
3	空调制冷剂	制冷剂真空加注机	
4	动力转向液压油	动力转向真空加注机	
5	发动机机油	发动机机油定量加注机	定量加注
6	变速器齿轮油	变速器齿轮油定量加注机	
7	挡风玻璃洗涤液	洗涤液定量加注机	
8	后桥齿轮油	后桥齿轮油定量加注机	
9	燃油	电动计量加油机	

（4）出厂检测设备

出厂检测设备及检测内容见表 4-2-4。

表 4-2-4 整车出厂检测设备及检测内容

序号	检测项目	检测设备	主要检测内容
1	前轮定位	前束试验台	检测前轮前束和前轮外倾角
2	侧滑	侧滑试验台	侧滑试验是汽车在动态下对前轮定位的准确性检测，即动态检查前轮前束与前轮外倾角是否正确匹配
3	转向角	转向试验台	检测汽车转向轮的左右最大转角
3	灯光	前照灯检测仪	检测前照灯的发光强度和光轴位置
4	制动	制动试验台	检测各个车轮的制动力，同轴左右轮制动力的差值
5	车速表	车速表试验台	检测车速表的精度，汽车动力传动装置工作情况，如变速器有无跳档、脱档现象及传动装置有无异响等
6	排气分析	排气分析仪	检测发动机怠速时废气中 CO 和 HC 的浓度
7	淋雨	淋雨试验室	检测整车的密封性
8	电器综合检测	整车电器综合检测台	对整车电器系统进行综合检测

4.2.1.3 工艺文件和质量管理

1）装配作业标准

至今汽车总装配仍属劳动密集型作业，手工操作仍占相当比重，作业繁杂，特别是轿车装配线上的作业，所用零部件和材料的种类繁多，形状、尺寸各异。加之，装配操作的内容复杂，工人在车内外进出频繁，另外还有车身下部作业，在这样的条件下，为了保证装配质量，必须制定出高质量的工艺文件，来指导操作工人作业。装配工艺文件一般包括“装配工艺卡”和“装配工位卡”，也称装配作业标准。指导工人操作的是装配作业标准，操作人员必须具有质量意识，严格执行装配作业标准。

装配作业标准一般包括以下内容：

①操作要点：说明部件的装配顺序及每一装配工序的装配时间。例如，当采用螺栓装配时，应该说明螺栓拧紧的顺序和拧紧技术要求；

②质量要求：装配完成后应进行自检，操作工人必须知道产品质量的控制数据，如紧固件的拧紧扭矩要求、液体的加注量要求等；

③装配工具和设备：指明操作时所用的装配工具和设备的型号及规格。

汽车论坛 http://www.qclt.com

装配车辆的型号以及装配零件的名称、编号、规格；

④零件装配关系图：这种图是轴测图，立体感强、非常直观，给操作工人提供了极大方便。

2）装配作业标准编制

装配作业属于集体劳动工序，提高劳动效率显得非常重要，在车型品种多、设备及平面布置等条件的限制下，为了使作业质量保持稳定，并消除窝工、停顿等不必要的损失，必须使每个工人的操作时间与生产节拍相吻合，以达到平衡生产。而要达到上述目的，必须合理地编制装配作业标准。

编制装配作业标准应遵循的原则是：

①以汽车结构所决定的零部件装配绝对顺序编制；

②对不受原有设备和生产线限制的新建厂应考虑采用先进的装配方法，采用高效率的设备工具，实现工序的机械化和自动化；

③将产品划分成各个独立的装配单元，尽可能减少总装线上的工作量；

④每个操作工人的作业时间尽可能相等，并等于或略小于装配节拍。

以上述原则为基础，首先编制主要零部件的装配作业顺序，然后根据装配线上的设备条件加以修正，若新建厂则需确定装配方法和选择设备，再确定每一工序的作业时间，这就大致完成了装配作业编制工作。以这种作业编制为基础，根据生产纲领确定每一生产工人的操作时间，为了平衡操作时间，可加入小型零件的装配来进行调整，最后制定出装配作业标准。

3）质量管理

装配作业以手工操作为主，操作人员素质是保证质量的基础，因此，在操作者上岗之前，必须对其进行充分的作业教育和培训，使其熟悉装配作业标准，熟练掌握各种设备、工具的使用和维护方法以及零部件的物流供储方式，另外还需要对其进行质量意识和安全意识等方面的严格培训。培训结束后需对操作者从以下几方面进行资格审查。

①是否具备保证装配质量的意识；

②是否按照作业标准进行装配作业；

③是否了解本工位的特殊工艺规定；

④是否熟悉本工位的零部件及其编号；

⑤能否正确使用和维护本工位设备和工具；

⑥能否在所规定的时间内完成操作；

⑦是否了解本工位的安全因素；

⑧是否进行自主检查。

只有达到上述要求的操作者才能上岗作业，这样才能充分保证整车装配质量。

保证质量的另一方面，需强化工序质量控制，在装配线上设检查调整工位，使装配过程中的质量缺陷在线上消除。加强重要装配工位的在线检测，如采用专门的仪器或设备检测制动力和调整制动行程、汽车电器综合检测等，发现问题及时解决，这样才能大大减少整车返修的工作量，保证整车出厂质量。

4.2.1.4 装配车间生产管理系统

1）车间生产管理系统

由于轿车生产属大批量生产，并且车型品种多，因此计算机技术在车间生产管理上得到广泛应用。车间生产管理系统一般由下述几部分组成：

①生产顺序指示和零部件供应顺序控制系统；

②生产线自动控制系统；

③质量信息反馈系统；

④工业电视监视系统；

⑤显示系统。

计算机管理系统一般采用集中控制方式，设中央控制室。所有控制装置、工业电视监视装置等均放在

控制室内，安装于控制室外的终端设备（显示屏、键盘输入装置、读码器等）均通过电线电缆与控制室各主机设备连接，向主机传递信息或接收指令。车间生产管理系统简图见图 4-2-4。

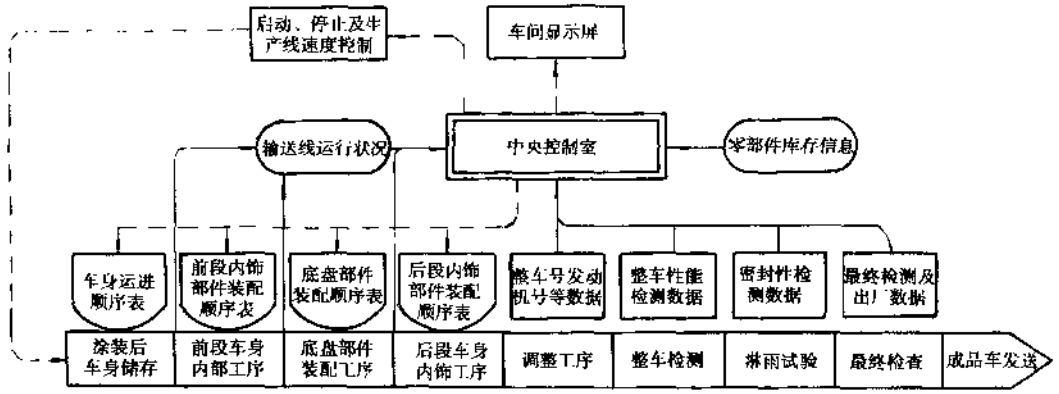


图 4-2-4 装配车间生产管理系统简图

2）生产顺序指示和零部件供应顺序控制系统

根据轿车的结构特点，一种系列车型可能有几百种形式，零部件的组合有数万种，并且焊接工艺和涂装工艺有一定的返修量，因此送到装配车间的车身顺序与原生产计划安排的顺序会有一定的差别，故需在生产管理系统中设置一套自动识别车身类型的装置。首先必须将涂装后的车身储存起来，以便控制装配顺序，并将下述内容输入计算机中：①生产计划；②根据市场需求的优先顺序；③前道工序生产情况；④不同车型的作业负荷率；⑤零部件的库存情况等。综合上述因素，计算机将所需要涂装好的车身从储存线自动输送到装配线上，并向装配线发出零部件供应顺序指示。

3）生产线自动控制系统

轿车装配生产线属于高效率生产线，因此总装配线输送机不是一个孤立的系统，而是与其它分装线输送设备或工艺设备组成一个整体，为保证均衡生产，在中央控制室内设生产线自动控制系统，控制输送机的启动、停止以及速度调整。该系统可对设备和各生产线的运行状态信息进行分类处理、存储和显示，如在控制室内设显示板，显示运转、停止、故障部位；生产线运行速度；停止次数和累计时间；发生停止的原因和部位，一旦发生生产线停止可方便地查明原因。总之，该系统可实现对整条生产线设备的监控和预警，使之处于正常的工作状态。

4）质量信息反馈系统

在生产线的重要工位设检验人员，将所装车的质量信息，包括车身编号、检查出来的不合格项目、不合格程度等数据输入计算机，从而在计算机中储存了每一车辆的质量信息。计算机可将所储存车辆的不合格数据进行分类并对质量数据进行统计分析，通知该工序的操作人员采取防止不合格项目的措施。

5）工业电视监视系统

在重要的装配工位设置摄像机，各摄像机的视频信号通过设在控制室的监视器可固定显示或顺序显示，并经分配器分路送到生产调度室、经理室等有关管理部门，以提供生产情况，便于调度和管理。

6）显示系统

在车间内设大型显示屏，显示日期、时间、当日计划产量、当时生产数量、设备运行状况等信息。

7）零部件供应管理

为了按计划及时供应零部件，必须根据生产计划与装配顺序计划，考虑到适当的库存量，制定零部件供应计划表，并向各部件供应部门发出指示，然后将零部件编号、供应部门代号，数量等数据输入控制室中的计算机内。计算机记录着最佳库存量，一旦库存异常，就能发出警告信号，通知管理人员。

（撰稿人：卞岩）

汽车论坛 http://www.qclt.com

4.2.2 载货汽车

4.2.2.1 生产线组成、生产工艺特点和车间平面布置

1）车间工艺流程

载货汽车总装车间工艺流程如图 4-2-5。

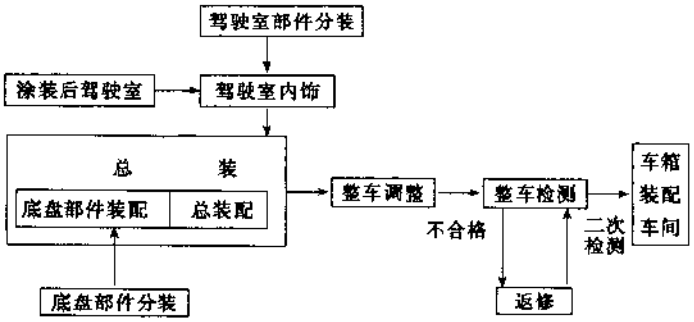


图 4-2-5 载货汽车总装车间工艺流程

2）生产工艺特点及总装生产线工艺流程

载货汽车主要装配的零部件见图 4-2-6。

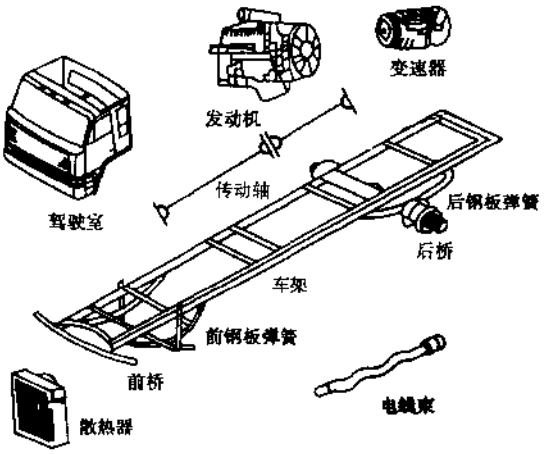


图 4-2-6 载货汽车主要装配的零部件

载货汽车的车身，是非承载式车身，整车结构以车架为主体，所有总成和零件都依附于车架上，其整车装配以车架为基础件。总装配工艺大体分为三部分：第一部分是车架反放，装底盘部件；第二部分是翻转车架正放，装底盘部件；第三部分是装驾驶室、连接各管线、装车轮以及制动液、冷却液、燃油等各种油液加注。总装生产线主要装配工艺流程见图 4-2-7。

3）生产线组成及主要装配工艺说明

载货汽车总装车间生产线一般包括：总装配线、驾驶室内饰线、分装线、整车检测线以及整车返修区。各生产线主要工艺说明如下：

①车架翻转前装配：用起重机将车架反放在装配线的随行夹具上，在车架侧面打刻车号，将已分装好的后桥装到车架上。然后进行各种制动管线固定、装燃油箱、装前桥，在车架反放状态下装配底盘部件，工人操作性好。在国外，也有一些生产厂完全在车架正放的状态下进行底盘部件装配，即不翻转，在

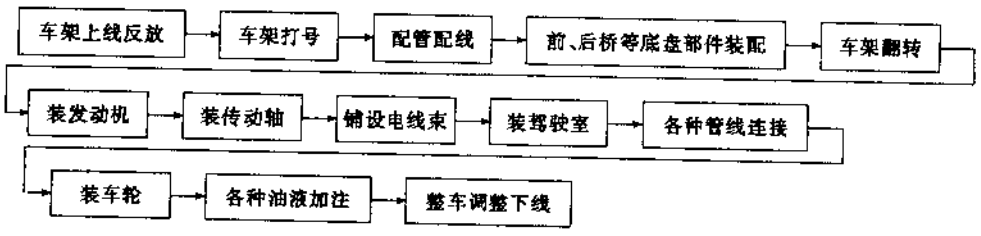


图 4-2-7 载货汽车总装生产线主要装配工艺流程

汽车论坛 http://www.qclt.com

这种情况下采用升降机将车架举升起来安装车架下部零部件

②车架翻转后装配：采用底盘翻转机，将车架翻转使其正放，装转向器、装燃油管和制动软管、装发动机和变速器动力总成、装传动轴、铺设电线束、装散热器等。关于传动轴装配，也有一些厂放在翻转之前，这主要是考虑操作方便

③驾驶室与底盘合装：将驾驶室吊到底盘上与底盘合装，然后进行各种管线的连接，装车轮、装座椅、加注冷却液、燃油、制动液等各种油液，最后经过检查调整，并启动汽车驶出总装线，进入整车检测线。

④整车检测：为了保证整车的装配质量，整车下线后在整车检测线上需进行前束调整、侧滑试验、转向角检测、灯光检测、制动性试验、车速表精度检测、废气排放分析等各种性能检测。检测合格的整车开往车箱装配车间安装车箱。不合格的整车在返修区进行返修，并进行二次检测直至合格

⑤驾驶室内饰：将涂装后的驾驶室放到内饰线上，然后装顶灯及电线、装挡风玻璃洗涤器、粘顶盖护面、铺设线束、装收放机、装门锁机构及锁体、装车门密封条、装玻璃密封条、装玻璃升降器及侧窗玻璃、装车门内护面、装后视镜、装暖风机、装仪表板总成、装前后挡风玻璃等内外饰件。

⑥发动机分装：在发动机分装线上主要是进行发动机与变速器合装以及装一些附件，如机油压力报警器、机油表传感器、散热器开关、起动机等，并加变速器齿轮油和发动机机油。最后通过空中输送设备直接运到总装配线与底盘合装。

⑦散热器合件、后桥和钢板弹簧合件、消声器合件及其它内饰部件、底盘部件等分装。一般采用固定装配方式，并布置在装配线的相关车位附近。

4）车间平面布置

车间平面布置时，应考虑生产纲领、部件供应方式、车辆的结构、车间内外的物流、场地面积等多方面因素，若场地面积有限，可考虑建二层厂房，或建二层钢平台，将驾驶室内饰线放在二层。载货汽车总装车间平面布置举例示于图 4-2-8。

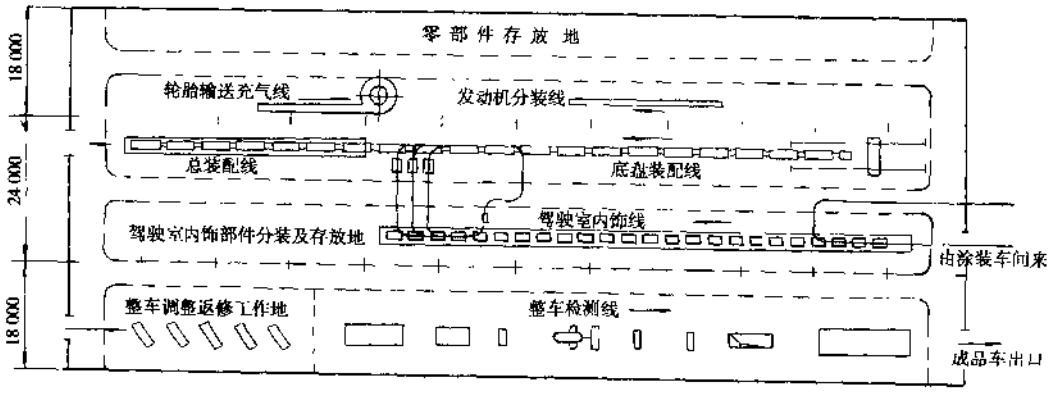


图 4-2-8 载货汽车装配车间平面布置

4.2.2.2 装配设备

载货汽车装配所用的设备主要包括：装配线所用输送设备、发动机、前后桥等各大总成上线设备、各种油液加注设备、出厂检测设备以及各种专用装配设备。各种油液加注设备以及出厂检测设备基本与轿车相同，在轿车一节中已做论述，这里重点说明与轿车装配不同的其它几类设备。

1）装配线所用输送设备

载货汽车装配线一般包括：驾驶室内饰线、整车装配线、发动机与变速器合装线、车轮装配线。

（1）驾驶室内饰线

目前国内普遍采用的输送线形式是带随行支架的地面板式输送带和单链牵引地面轨道小车式输送线，还有少数厂采用的是积放式悬挂输送机和滑辊式输送装置。前两种形式输送线的优点是结构简单、故障率

低、便于维修。其缺点是刚性输送、没有柔性。积放式悬挂输送机的优点是可利用升降机构根据工艺需要来实现转线，减少了转线用起重设备，另外该输送机具有自动积放功能，便于储存和实现柔性装配。其缺点是结构复杂、故障率高，另外造价较高，因此在小批量载货汽车生产中很少采用。滑撬式输送装置优点是工艺性强、灵活性大、柔性好；缺点是占地面积大，价格昂贵。

(2) 总装配线

①根据载货汽车的结构特点，总装配线通常采用二段式结构。目前，国内载货汽车装配线采用最多的一种形式是双链半桥式加地面双板式。即前段为双链半桥式，后段为地面双板式。在桥式段主要进行底盘部件装配，装完驾驶室、车轮后进入板式段进行总装配。这种形式的输送线优点是结构较简单，能适应不同轴距车辆的装配。缺点是桥式段接近性差，造价较高。轻型载货汽车和中型载货汽车总装配线，一般采用这种形式输送机。

②重型载货汽车装配线一般采用下述两种形式：一种是单链牵引地面轨道小车式；另一种是带随行夹具的地面板式带。

单链牵引地面轨道小车式输送线，支架小车用插销与单链连接，在单链的驱动下向前运行。该装配线优点是小车的间距可以调整，能适应不同轴距的变型车的装配。且造价较低。缺点是小车返回占用空间较大。

带随行夹具的地面板式带，随行夹具从地下返回，优点是接近性好，便于装配；缺点是结构复杂，且不易满足多品种生产。

(3) 发动机与变速器合装线

发动机与变速器合装线一般采用双链牵引带随行支架小车式，小车垂直返回。

(4) 车轮装配线

车轮装配线一般采用机动辊道式，线上配有车轮充气机、轮胎拆装机、动平衡机等设备。

2) 大总成上线设备

大总成上线设备是指发动机、前桥、后桥、驾驶室、车轮等总成在分装、组装后送至总装配线并在相应工位上线所采用的输送及吊装设备。车轮上线一般采用普通悬挂输送机和积放式悬挂输送机。发动机、前桥、后桥、驾驶室等大总成上线，传统的方式是采用单轨电动葫芦和电动单梁悬挂起重机。随着汽车装配的机械化、自动化水平的提高，目前各大总成上线普遍采用自行葫芦输送机和积放式悬挂输送机，也有少数厂家采用了带有升降装置的电动磁轨小车（AGV）自动上线。自行葫芦输送机的特点是工人操作方便，可实现自动控制，可根据工艺需要，按设定的程序在工位上实现自动停止、自动升降、自动行走等各种动作，并可空中积放贮存，节省占地面积，因此被广泛应用。

3) 专用装配设备

载货汽车装配所用的专用装配设备主要有以下几类：

(1) 车架打号机

用于在车架上打车型代号，打号机有液压式和气动式两种形式。

(2) 底盘翻转机

根据载货汽车的结构特点，为了使装配操作方便，在总装配线上需设底盘翻转机，翻转机有机械式、气动式和液压式，有地下式和地上式，目前国内比较普遍采用的是地上式的。

(3) 螺纹紧固设备

载货汽车最重要的螺栓拧紧部位是车轮螺母和前、后桥与钢板弹簧连接用的U形螺栓螺母。车轮螺母采用车轮螺母定扭多头拧紧机，U形螺栓螺母采用定扭四头螺母拧紧机，这样能充分保证装配质量并提高生产效率，改善工人的工作环境。对于其他安全件、重要件的螺纹连接以及工艺上有扭矩要求的螺纹连接部位，采用单头或多头定扭矩气、电动扳手。定扭矩扳手一般有两种形式，一种是刻度盘式，检查扭矩时，看指针的指示值。它使用时需另配套筒头，其优点是可以测量不同规格的螺母扭矩，适用范围大，主要用在检验已被拧紧的螺母是否达到规定的扭矩；另一种是单向极限式扭矩扳手，有固定的扭矩值，使用时当达到额定扭矩后，扳手就会发生“咯嗒”的响声，这时就无需再拧。这种扭力扳手可以当普通扳手

汽车论坛 http://www.qclt.com

用，用于扭矩不允许超过规定的螺纹连接。

4.2.2.3 车箱安装

1）车箱安装的种类及特点

车箱安装一般是指在货车底盘上安装适应不同用途车箱的工序。普通货车的车箱大都在专门的车箱制造厂内安装，采用大量生产方式。

2）车箱安装的工艺特点

车箱安装的基本工序可大致分为：底盘改制作业；车箱的钣金、焊接、木工作业；车箱与车身涂漆作业等。这些工序可适用于各种车辆。

对于木结构的车箱，一般都建有较大的木工车间，在车间内装有木工锯床、平面刨床、钻孔机等设备。木材烘干采用蒸汽烘干炉，车箱分装配采用流水生产线，涂漆一般为手工喷漆，烘干室烘干。

整车安装车箱一般采用地面板式输送带组织连续流水生产方式装配。车箱安装作业顺序的实例示于图4-2-9。（撰稿人：卞 岩）

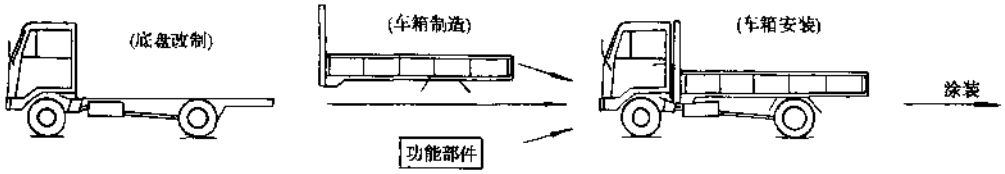


图4-2-9 车箱安装作业顺序

4.2.3 客车

客车是专供乘用的车辆，根据不同的使用用途，可以分为城市客车（公共汽车）、公路客车（长途汽车）、旅游客车和各种专门用途客车，如学校客车、会议客车、机场客车等，按车身承载方式又可分为非承载式、半承载式和承载式等几种，另外，还有不同的底盘高度和各种不同的车身结构形式。按内饰件的水平，这些客车又都可以分为普通型和豪华型等，所以客车装配是典型的多品种、中小批量生产。本节介绍车身长 $L>7m$ 的大、中型客车装配。

4.2.3.1 影响客车装配工艺的因素

客车的装配工艺流程，决定于车身结构、车型大小和生产规模，这几个特征对客车装配工艺的制订、设备的选用和车间的布置有着重要的影响。

1）不同车身结构的客车装配工艺

客车车身结构的不同直接影响着装配工艺的制定，下面介绍几种典型的工艺方案。

（1）半承载式车身客车装配方案

在底盘装配线上装配底盘，并在车架两侧伸出承载梁，在它们上面焊接车身构造件（五大片骨架），再进行外板蒙皮焊接，然后送涂装车间，经涂装后到总装车间进行电线束和内外饰装配、油液加注、调整、整车检测、淋雨试验，合格品驶往停车场。

对由其它工厂或车间提供三类底盘的，可以先将车身构造件组合焊接，然后组焊到装有周转用工艺轮胎的二类底盘上，再进行外板蒙皮焊接、涂装，内外饰装配并更换轮胎，以下工序同前所述。一般车间区划见图4-2-10a）。

（2）全承载式车身、后置发动机客车装配方案

先将车身构造件（五大片骨架）分块焊好，组焊到底架上，进行外板蒙皮焊接，然后送涂装车间，经涂装后送总装车间进行前后悬架总成、发动机变速器总成、电线束及内外饰装配、油液加注、调整、整车

汽车论坛 http://www.qclt.com

检测、淋雨试验，合格品驶往停车场，车间区划见图 4-2-10b)。

(3) 非承载式车身装配方案

车身与底盘分别在两条生产线上生产，车身在焊装车间组焊后进入涂装车间，经涂装后进入总装车间与装配好的底盘合装，再进行内外饰装配、油液加注、调整、检测、淋雨试验，合格品驶往停车场。

对于由其它工厂提供三类底盘的，先在底盘改制车间进行底盘改制，然后将改制好的底盘送到总装车间与车身合装，再进行内外饰装配、油液加注、调整、检测、淋雨试验，合格品驶往停车场。

这种装配方案车身组焊方便，防锈处理彻底，涂装质量容易保证，生产效率一般也较高。一般车间区划见图 4-2-10c)。

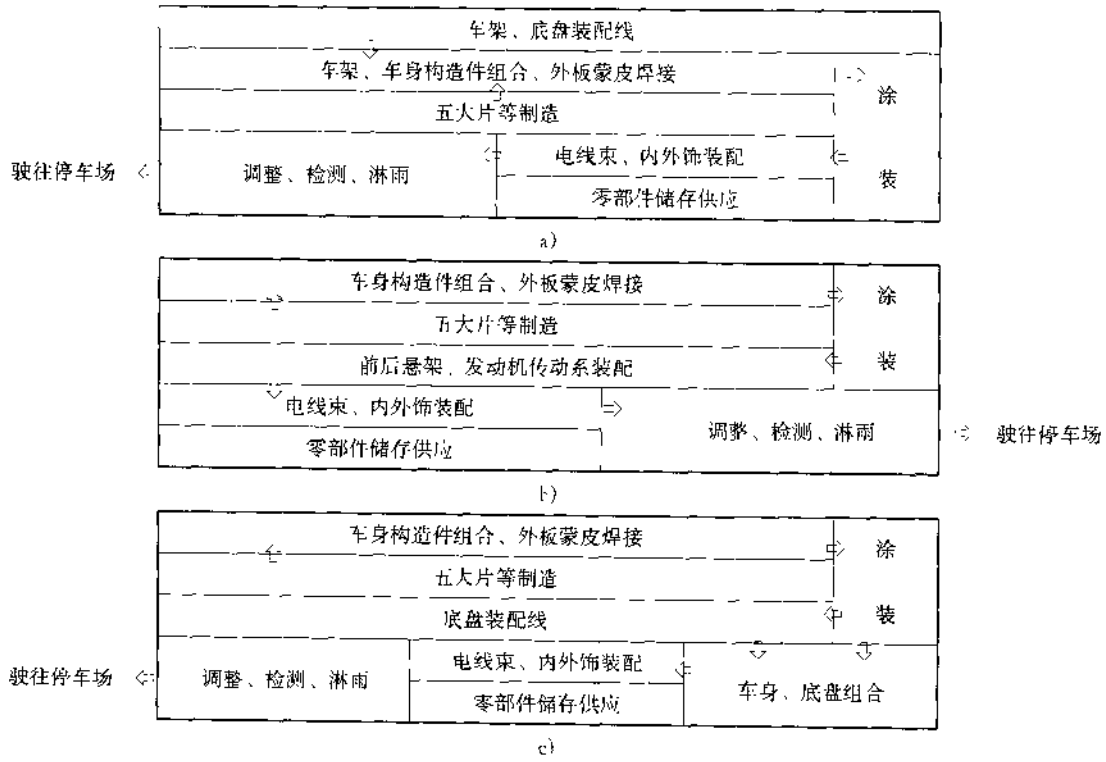


图 4-2-10 几种典型的客车装配工艺方案流程图

a) 半承载式；b) 后置发动机全承载式；c) 非承载式

2) 车型大小

根据我国汽车分类标准，客车分为微型、小型、中型、大型和特大型五类，其车身长度外型尺寸规定如下：

大型、特大型： $L>10\text{m}$

中型： $7\text{m}<L\leq10\text{m}$

小型： $3.5\text{m}<L\leq7\text{m}$

微型： $L\leq3.5\text{m}$

客车长度尺寸大小相差很悬殊，对于有“移动式的房屋”之称的大中型客车，组织移动式装配流水作业，其工艺制订、工艺装备和输送装置的选择、物料供应组织和车间地面、空间利用等，都不同于轿车和其它中、小型车辆的装配，有许多特殊的问题需要认真地研究、策划。

3) 生产规模

在正常的市场经济环境中，一种产品只有达到了一定的生产规模，企业才能有较好的经济效益和较强

汽车论坛 http://www.qclt.com

的竞争实力，才能在市场上立足。为此，确定企业的生产规模，除考虑可能拥有的适度合理的市场份额和较为充足的资金条件外，按经济规模批量组织生产是十分重要的因素。

经济规模，是指一种生产方式，就一定的工艺水平和自动化程度的一条生产线、一个车间、一个工厂而言，得以发挥其最大生产能力的最低限度的生产规模，以这种规模组织生产，一条生产线、一个车间或一个工厂得到了充分的利用，获得了最低的生产成本，这是企业参与国内、外市场竞争的基本条件。

就装配工艺而言，按经济规模组织生产、采用流水线方式是比较合理的选择。当前世界汽车生产已经经过了单一品种、大批量生产的历史阶段，进入了繁多品种、中小批量、满足市场多样化、个性化要求的阶段，其品种的变化、主要体现在车身颜色、各种饰件和组件单元的选装等，就其基本构造来讲，总体上仍属于大批量生产方式，装配生产组织形式仍以流水线生产方式为主，其各项技术经济指标仍优于固定式装配作业。

4.2.3.2 生产线的构成和车间布置要点

客车制造中，冲压、钣金、涂装、部装、总装、检测调试等工艺环节与轿车、载货汽车等没有什么不同。但是大、中型客车车身尺寸大，因此在工艺制定、设备选择和车间布置上要特别注意装配的顺序和流程的合理性，以及操作、搬运的方便性。

1）总装线的直线布置

大中型客车体积大，车身长，其长度一般在7m以上，单车长度可达12～13m，铰接式大型客车可达18m。曲线的输送方式，除装置本身存在诸多难题外，还不利于车间面积与空间的利用，所以大、中型客车总装线应尽量直线布置，避免转弯。

2）尽量减少总装劳动量

为了保证总装线能直线布置，减少总装工位数，缩短总装线长度，就成为装配工艺制定的重要原则。另外，车身构件与其它零部件的安装，诸如汽车电气件及其配线、配管，汽车空调系、窗框、内饰件、行李架等的安装，要在客车车身内进行室内作业，极易发生干涉，并且，工人的作业姿势和设备、工具的使用，都要受到很多限制。因此，工艺编排上，应尽量采用部件分装配线等与总装线并行安排进行负荷转移。

3）装配质量的保证

最终的客车产品是一个庞大的整体构造，部件装配过程中要对每一件产品的尺寸精度和使用性能进行严格的在线检测，总装也要安排必要的序间检测，以实现符合产品技术要求的累积误差，确保产品质量。

在生产线上，需配备构思巧妙、制作精良、便于操作的各类装配工具、夹具、量具和检测装置，以保证顺利实现最终装配精度。

4）工业仿真技术的应用

工业仿真技术能解决装配工艺设计中的诸多难题，应用前景广阔。

一般在工艺设计方案形成后，把生产线各序各工位按实际运行情况制成仿真软件，全部工艺过程、设备工装布置等按设计情况输入，物料搬运、装配故障、返工维修时间等则以采集到的类似现场的大量数据整理、输入，做到及时、逼真，然后模拟运行，以发现工艺设计所存在的各类问题，进行反馈，修改设计，直到成功。

工业仿真技术的应用在大客车装配工艺制定中显得尤为重要。

5）产品设计的工艺性

在整个产品设计和工艺制定过程中，产品设计人员与工艺人员的密切配合，对改善产品工艺性、降低生产成本是至关重要的。

4.2.3.3 设备

客车装配采用的设备与轿车和载货汽车等没有什么大的不同，只是由于客车本身形体较大，必须采用便于移动、方便操作、通用性好的设备。

图4-2-11是大型客车装配车间布置示例。

（撰稿人：陈毅夫）

汽车论坛 http://www.qclt.com

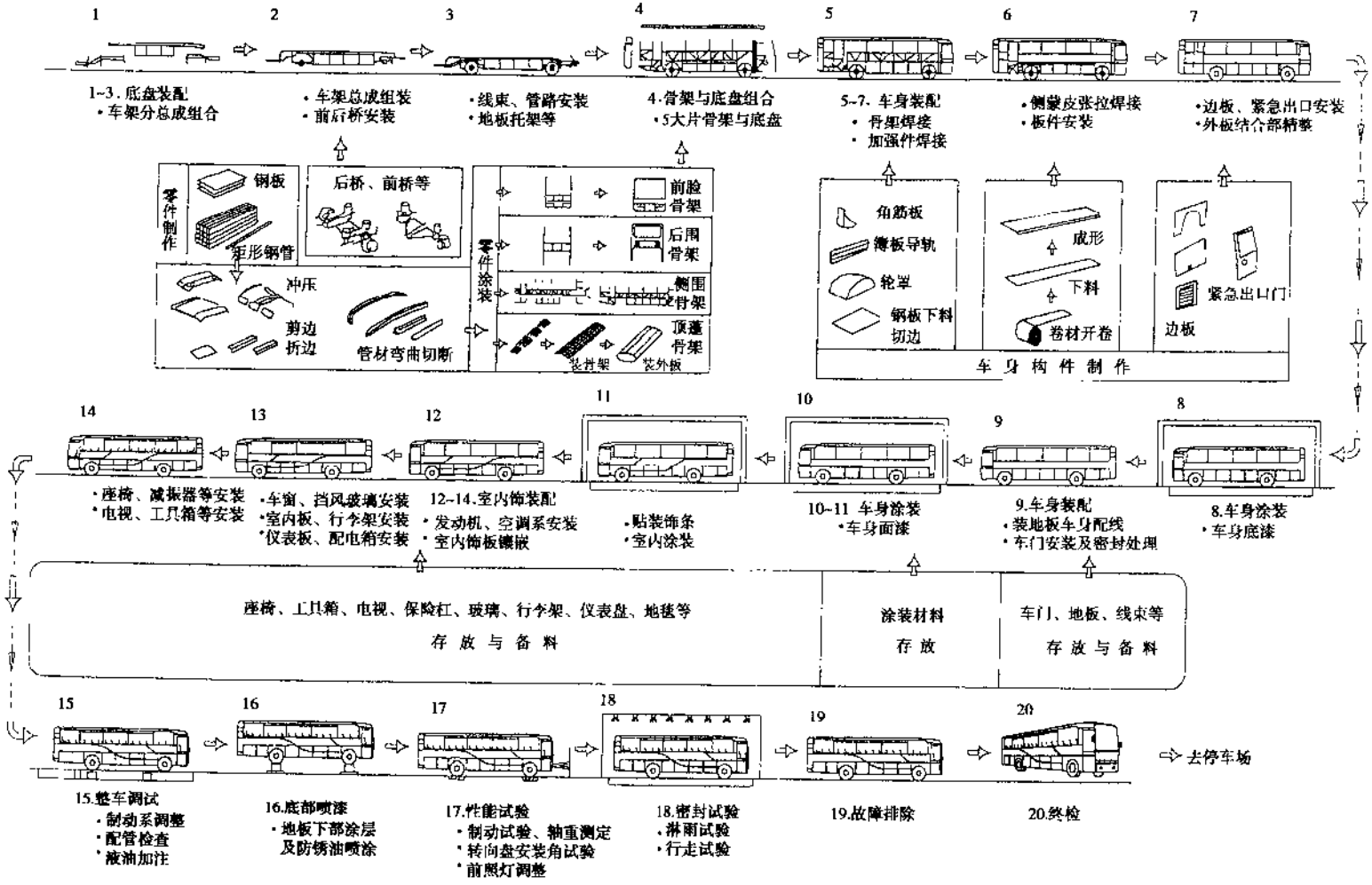


图 4-2-11　骨架式结构大型客车制造工艺流程

汽车论坛 http://www.qclt.com

参 考 文 献

1.（E）自动车技术会，小林 明等．汽车工程手册．北京：机械工业出版社，1985.

2.龚微寒．汽车现代设计制造．北京：人民交通出版社，1995.

3.黄天泽．大客车车身．长沙：湖南大学出版社，1998.

4.齐桂森．机械制造工程概论．北京：航空工业出版社，1997.

5.郭宗连、秦宝荣．机械制造工艺学．北京：中国建材出版社，1997.

6.吴佳常．机械制造工艺学．北京：中国标准出版社，1992.

7.陈家起．汽车车身制造工艺学．重庆：重庆大学出版社．1993.

8.神龙汽车有限公司．中国轿车丛书．富康．北京：北京理工大学出版社，1998.

9.天津汽车工业（集团）有限公司．中国轿车丛书．夏利．北京：北京理工大学出版社．1998.

10.阮兵．大批量多品种汽车装配生产中的柔性输送系统．汽车工厂设计．编辑部．1997年第3期

11.张之仪、吴葵等．机械化运输设计手册．北京：机械工业出版社．1997.

12.席忠民：．应用工业工程技术优化总装作业系统．重庆：汽车研究与开发编辑部

13.（日）自动车技术会．ロボット小委员会报告．自动车工业における车辆组立の自动化の现状と今后の课题．1986.7

14.（日）本田技研サ? ビスマニュアル，LEDGENDシャシ整备编，p.13～37，1986.11.

15.（意）Global Viewpoints.New Fiat，Automotive Engineering，p.108April.1988

16.（日）越智英树ほか．自动车制造法，自动车工学便览，第9编，第1章，第12项

17.（日）荒井英辅．自动车制造法，自动车工学便览，第9编，第1章，第13项

18.（日）自动车工学全书．第19编．第1章．三海堂．

19.（日）茂木：バスボデ——构造の结合技术ほどのように变ってきたか，自动车技术，Vol.36，No.9 1982

20.（日）铃木：バスボデ——构造の最近の动向，自动车技术，Vol.34，No.9 1980

21.（德）维而弗里德·施陶德．汽车技术基础教程．北京：北京大学出版社，1996.

22.（波）杨巴甫洛夫斯基．汽车车身．北京：人民交通出版社，1983.

23.（德）霍尔斯特·皮佩特．汽车车身技术．北京：科学普及出版社，1992.

汽车论坛 http://www.qclt.com

5 生产管理系统

5.1 概 述

5.1.1 汽车工业生产管理的变迁

在世界汽车工业发展史上有过两次生产方式的重大变革。第一次是美国福特公司的福特生产方式，即大量生产方式。它取代了欧洲企业领先若干世纪的单件生产方式；第二次是日本丰田公司的丰田生产方式——即精益生产方式，这两次生产方式的变革都极大的推进了世界汽车工业及整个世界经济的发展。三种生产方式的比较见表 5-1-1。

表 5-1-1 三种生产方式特性比较

特 性	单件生产方式	大量生产方式	精益生产方式
工 艺	简单、应用非标准的零部件，通用工具设备	复杂、应用标准件、专用机床、在改制新产品时要很多时间与费用	高度柔性生产，应用标准尺寸的零部件系统总成，相当容易生产改型产品
劳动力	高度熟练的技工	非常专的熟练设计人员、熟练与半熟练的可更换的生产工人，每人有单一的任务	小组组织，多面手工人，不仅可操作多台、多种设备，还可作简单维修，人人对产品负责，工人参与管理
协作厂关系	与用户和协作厂关系紧密，大多数协作厂位于一个城市	松散关系，在总装厂内有大量库存，以便在协作发生变化时使生产连续进行	与用户第一层协作厂关系密切，共同开发，应用准时化送货系统，尽量靠近协作厂与用户
产 量	非常低	极高	极高
产品品种	非常宽，产品按照用户的特种要求	标准设计，品种少，变型少	大大增加变型车的品种

（撰稿人：冯云翔）

5.1.2 生产管理的组织机构

生产管理的组织由行政指挥系统和生产管理的职能系统组成。

5.1.2.1 行政指挥系统

通常由企业的生产副经理（副厂长）、车间主任、工段长、班组长组成。

5.1.2.2 生产管理的职能系统

通常由生产管理部门及其下属的生产调度科（组）组成，生产管理系统是各级行政指挥人员的参谋和

汽车论坛 http://www.qclt.com

办事机构。

5.1.2.3 生产管理职能机构的类型

①第一种类型，把生产管理系统分成生产和技术两个职能部门。生产部门负责生产过程中的产品数量和进度的控制。技术部门负责生产技术准备、生产要素的合理组织及其改善活动，见图5-1-1所示。

②第二种类型，把生产调度部门与技术部门合并成立统一的生产管理系统，见图 5-1-2 所示。

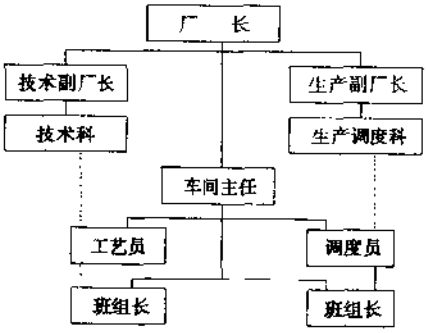


图 5-1-1 生产管理职能机构示意图（1）

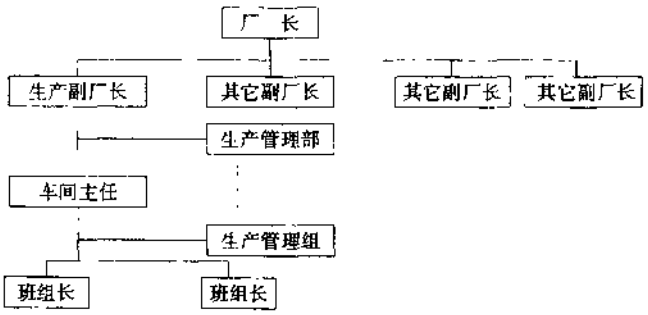


图 5-1-2 生产管理职能机构示意图（2）

5.2 生产过程的组织

5.2.1 概述

5.2.1.1 基本生产过程

是指直接改变劳动对象的物理和化学性质，使之成为产品的过程，也即直接制造产品的工艺过程。基本生产过程是由各个阶段组成的，主要可分为毛坯（铸、锻）制造阶段；零件加工（切削、冲压成形）阶段和装配阶段，见图 5-2-1。

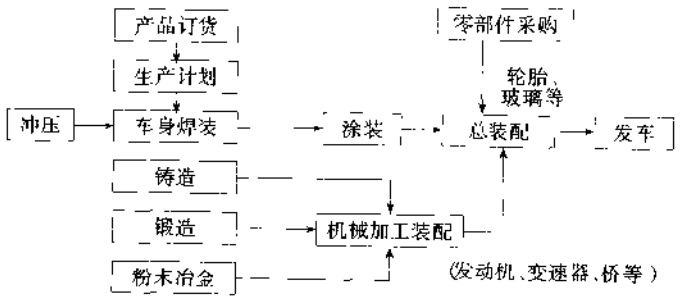


图 5-2-1 汽车生产工艺流程图

基本生产过程是生产过程的中心环节，其它还有生产技术准备过程、辅助生产过程、生产服务过程等都是为之服务的。本章主要叙述基本生产过程。

汽车论坛 http://www.qclt.com

5.2.1.2 合理组织生产过程的要求

合理组织生产过程的具体要求是：

①连续性 是指产品生产过程各个阶段、各个工序之间的流动，在时间上是紧密衔接的，不发生或很少发生中断现象，劳动对象在整个生产过程中始终处于运动状态，尽可能减少迂回和往复，并注意提高生产过程的机械化、自动化水平。

②平行性：是指生产过程的各个阶段、各个工序实行平行作业、平行地完成各个工序和过程。这就要做到合理布置车间、工段、班组等生产环节，使生产过程的各个组成部分、阶段、工序以及产品的各个零件、部件的生产都能同时在不同的空间内进行。

③比例性：是指各基本生产与辅助生产之间、各工艺阶段和各工序之间、各生产要素之间都要根据产品的生产要求保持一定的比例关系。

④节奏：是指产品生产过程的各个阶段和各个工序，在相同的时间间隔内，所生产的产品大致相同或均衡递增。实现均衡生产，可以使工作地负荷均匀，有利于充分利用企业资源，提高产品质量，利于生产稳定的进行。

⑤经济性：是指产品生产全过程要体现节省的精神，生产过程的布置形式和组织形式具有灵活性，能适应市场变化，能以最小的劳动消耗，取得尽可能大的经济效果。

5.2.2 生产类型

5.2.2.1 生产类型的概念

企业生产类型由产品品种数、产品的生产规模及设备条件等进行划分，加工装配企业按上述标志可划分三种不同的生产类型，即大量生产，成批生产和单件生产三种。

5.2.2.2 各种生产类型的特点

1）大量生产。

产品品种少而稳定，每种产品的产量大，工作地长期完成同种产品的一、二道工序，专业化程度很高。

2）成批生产

产品品种较多，每种产品有一定的数量但数量多少不等，每个工作地要负担较多的工序，每种工序经过一定时间间隔重复进行。大批生产接近大量生产，一般称之为大批量生产，小批生产接近单件生产，一般称之为单件小批量生产。

3）单件生产

产品品种很多，每种产品的产量很小，工作地要担负很多道工序，很少重复，专业化程度很低。

5.2.2.3 生产类型的确定

在一个企业里，可能同时存在各种不同的生产类型。确定生产类型的主要根据是专业化程度。衡量专业化程度可用工作地负担的工序数表示，一般有以下几种方法：

①按工作地固定加工的工序多少来确定。

②按工序的大量系数来确定，工序大量系数的计算公式：

$$\text{工序大量系数}=\frac{\text{工序单件时间}}{\text{节拍}}$$

③按生产节拍确定，见表 5.2-1。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 5-2-1 确定生产类型的参考值

生产类型	工作地固定加工工序数	工序大量系数	生产节拍（min）
大量生产	1~2	0.5	5以下
大批生产	2~10	0.1~0.5	5~15
中批生产	10~20	0.05~0.1	15~60
小批生产	20~40	0.025~0.05	60以上
单件生产	40以上	0.025	

④按工作地负担的平均工序数来确定。设有 n 个工作地，负担 m 种零件的加工，每个工作地负担每种零件的工序数目为 a_{ij}，各工作地平均工序为 S，其计算公式为：

$$S=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}}{n}$$

计算平均 S 后，对照表 5-2-2，就可确定工作地的生产类型，然后，根据比重最大的原则，确定小组、工段、车间、企业的生产类型，例如某小组（如表 5-2-2 所示），各工作地的平均工序数是：$S=27/6=4.5$

查表 5-2-1 可知，该小组各工作地为大批生产类型。

表 5-2-2 某作业组各工作地工序数

工作地序号 / 零件序号	工作地 1	2	3	4	5	6
1	2	0	1	2	1	1
2	2	2	0	2	2	0
3	0	1	1	0	1	2
4	1	1	2	1	1	1

5.2.3 生产过程的空间组织

是指企业内部各生产阶段和生产单位的设置和运输路线。企业内部各生产单位车间、工段、班组的设置通常有以下二种形式。

5.2.3.1 工艺专业形式

是按照生产过程各个阶段的工艺特点来建立生产单位。在生产单位里集中同类型的机器设备和同工种的工人，完成各种产品的同一工艺阶段的生产。即加工对象是多样的，但工艺方法是同类的。铸造、锻造、冲压等生产都属这种形式。

5.2.3.2 对象专业化形式

是按照产品确定的生产单位，即在生产单位里集中不同类型的机器设备、不同工种的工人，对同类产

汽车论坛 http://www.qclt.com

品进行不同的工艺加工，能独立完成一种或几种产品的全部或大部分工艺过程。机械加工流水线如缸体生产线、车桥生产线、中间轴生产线都是属于这种形式

5.2.3.3 综合形式

在一个生产单位里既运用工艺专业化形式，又运用对象专业化形式，因而也称之为混合形式。比如，零件的机械加工阶段是对象专业化，加工后的热处理又是按工艺专业化组织的。

5.2.4 生产过程的时间组织

是解决各生产单位、各工序之间在时间上紧密衔接，最大限度地提高生产过程的连续性和均衡性，缩短生产周期，加速物流速度。

生产过程在时间上的衔接程度，主要表现为劳动对象在生产过程的移动方式。主要有三种。

5.2.4.1 顺序移动方式

一批零件只有在前道工序加工完后，才送到后道工序去加工。其特点是就整批零件而言，在工序之间的移动是顺次连续的，但就每个零件看，却有加工等待时间。

顺序移动方式时加工周期计算公式如下：

$$T_{顺} = N\sum_{i=1}^{m} t_i$$

式中：$T_{顺}$——顺序移动方式一批零件的加工周期；

N——零件的批量；

m——工序数目；

t_i——零件在 i 道工序上的单件作业时间。

5.2.4.2 平行移动方式

就是在一批零件中的每个零件在前道工序加工完成之后，立即转移到后道工序去继续加工。特点是一批零件同时在不同工序上平行加工，因而缩短了生产周期。但由于前后工序时间不等，当后道工序时间小于前道工序时，后道工序在每个零件加工完之后，都有一部分停歇时间。

平行移动方式时的加工周期计算公式为：

$$T_{平} = \sum_{i=1}^{m} t_i + (N-1)\ t_{长}$$

式中：$T_{平}$——平行移动方式下一批零件的加工周期；

$t_{长}$——单件作业时的工序时间。

5.2.4.3 平行顺序移动方式

是既考虑到生产的平行性又考虑了生产连续性。当前道工序时间短于后道工序时间时，每加工完一个零件立即移到后道工序加工；而当前道工序时间比后道工序时间长时，则等到前道工序能满足后道工序加工时，才能将完工的零件转入后道工序。这样，就可将人力和设备的零散时间集中使用。这种移动方式较顺序移动方式周期短，但较平行移动方式的周期长。

平行顺序移动方式下的加工周期：

$$T_{平顺} = N\sum_{i=1}^{m} t_i - (N-1)\ \sum_{i=1}^{m} t_{较短i}$$

式中：$t_{较短i}$——相邻工序中加工时间较短的工序。

以上三种移动方式的优缺点见表 5-2-3。

表 5-2-3 三种移动方式的优缺点

移动方式	优点	缺点
顺序移动方式	保证了工作地(设备)的连续不断地加工，有利于提高设备利用率，缩短设备和工装的调整时间，整批地运送，使下运输和管理	会造成制品的等待加工的现象，一批零件在某道工序上必须全部完工，才能整批转移下道工序，生产周期长
平行移动方式	保证了制品(零件)的连续不间断地加工，在各工序之间无停歇等待加工现象，生产周期较短，能迅速地提供制品(零件)，在制造微量	如果各道工序时间不相同，就会造成工作地(设备)有停歇中断现象
平行顺序移动方式	既能保证工作地(设备)的连续加工，又能保证制品(零件)的连续加工，生产周期介于顺序移动方式和平行移动方式之间	生产管理与生产组织工作比较复杂

5.2.5 流水生产组织

5.2.5.1 单对象流水线

1) 计算流水线的平均节拍

$$\text{流水线节拍}=\frac{\text{计划期有效工作时间}}{\text{计划期制品产量}}$$

计划期有效工作时间 = 计划期制度时间 × 工时利用率

2) 工序同期化

是通过采用各种可能的技术组织措施调整工序时间，使之尽可能与平均节拍相等或成整数倍比的关系。

工序同期化的主要措施有：①改进机床或改变设备型号，提高设备生产效率；②改进工艺装备，减少装夹零件、更换刀具、测量尺寸的时间；③改进工作地布置和操作方法，减少辅助作业时间；④改变切削用量，减少机动性时间；⑤适当分解和合并工序；⑥采用高效的工具改进装配工艺，减少装配时间；⑦提高工人的熟练程度和工作效率。

3) 计算设备数量和设备负荷系数

其公式为：

$$\text{流水线第 } i \text{ 道工序所需设备数}=\frac{\text{第 } i \text{ 道工序单件时间定额}}{\text{流水线节拍}}\quad(\text{台})$$

计算出来设备数若不为整数时，应取接近于计算数的整数。

$$\text{设备负荷率}=\frac{\text{流水线第 } i \text{ 道工序所需设备数}}{\text{采用的设备数}}\%$$

设备负荷率决定流水线的连续程度，当这一系数在 0.75~0.85 之间时，以组织间断流水线为宜。

4) 确定流水线的节拍性质和实现节拍的方法

选择节拍的主要依据是工序同期化程度和对工序对象的质量、体积精度、工艺性等特征。当工序同期化程度很高、工艺性良好、制品的质量、精度和其它技术条件严格地按节拍生产制品时，采用强制节拍，否则可以采用自由节拍或粗略节拍。

强制节拍流水线采用分配式、连续式、间歇式三种类型的传送带。

自由节拍流水一般采用连续式运输传送带、滚道、平板运输车、滑道等。

粗略流水线一般采用滚道、重力滑道、手推车、叉车、吊车等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

5）流水线的平面布置

应有利于工人操作方便，制品运动路线最短，流水线之间互相衔接以及生产面积的充分利用。流水线的形状一般有直线形、L字形、山字形、环形、S形等。

5.2.5.2 多对象可变流水线

多对象可变流水线的组织设计步骤如下：

1）确定流水线节拍

假设可变流水线加工A、B、C三种零件，其计划期产量分别为N_A、N_B、N_C，在流水线加工各零件的单件工时分别为T_A、T_B、T_C，则计算流水线节拍可用以下两种办法。

①代表零件法，即将各种零件折合为一种零件产量，然后计算节拍。若选择A零件为代表零件，则计划期流水线加工的零件总量为

$$N = N_A + N_B\varepsilon_1 + N_C\varepsilon_2$$

式中：N——以代表零件表示的计划期总产量；

ε_1、ε_2——零件B、C劳动量与零件A劳动量比值。

$$\varepsilon_1 = T_B/T_A$$

$$\varepsilon_2 = T_C/T_A$$

各零件的节拍r_A、r_B、r_C的计算公式为：

$$r_A = \frac{F_0\eta}{N_A + N_B\varepsilon_1 + N_C\varepsilon_2}$$

$$r_B = r_A\varepsilon_1$$

$$r_C = r_A\varepsilon_2$$

②加工劳动量比重法，即按各种零件在流水线上加工总劳动量中所占比重分配有效工作时间，计算各种零件的节拍。

三种零件加工劳动量在总劳动量中所占比重分别为a_A、a_B、a_C，则

$$a_A = \frac{N_AT_A}{N_AT_A + N_BT_B + N_CT_C}$$

$$a_B = \frac{N_BT_B}{\Sigma N_iT_i}$$

$$a_C = \frac{N_CT_C}{\Sigma N_iT_i}$$

三种零件的节拍为：

$$r_A = \frac{a_AF_0\eta}{N_A} \quad r_B = \frac{a_BF_0\eta}{N_B} \quad r_C = \frac{a_CF_0\eta}{N_C}$$

式中：F_0——计划期有效工作时间；

η——工时利用系数。

2）计算各工序的设备数量

先分别按不同加工对象计算各工序的设备需要量，计算时可利用公式$S_i = t_i/r$，则A零件在流水线上第i道工序的设备需要量S_{Ai}为

$$S_{Ai} = t_{Ai}/r_A$$

依此类推，可计算出其他零件在流水线上的设备需要量，然后将各种零件在各道工序上的设备需要量列表对比分析。一般要求各种零件在某一定工序上的计算设备需要数相等或近似，即

$$S_{Ai} = S_{Bi} = S_{Ci}$$

$$S_{A2} = S_{B2} - S_{C2};\cdots\cdots$$

$$S_{An} = S_{Bn} - S_{Cn}$$

$$S_A = S_B - S_C$$

3）计算设备负荷

各工序的设备负荷计算公式如下：

$$K_i = \frac{N_j t_{ji}}{S_{ei} F_0 \eta}$$

式中：K_i——第 i 道工序设备负荷系数；

t_{ji}——第 j 号零件在第 i 道工序的加工劳动量（min）；

N_j——第 j 号零件的计划产量（件）

S_{ei}——流水线上第 i 道工序采用的设备总数。

整个流水线的设备负荷系数计算公式为

$$K_a = \frac{\sum_{j=1}^{q} N_j T_j}{S_e F_0 \eta}$$

式中：K_a——流水线的设备负荷系数；

T_j——第 j 号零件在流水线上加工总劳动量；

S_e——流水线采用的设备总数（台）。

设备数量确定之后，还要计算和配备工人，确定流水线节拍，选择运输工具和运输方式，进行流水线的平面布置。

在可变流水线上，为使每批零件在各工序上加工时间成比例，不影响其连续性，应检查各种零件在各工序上的设备负荷系数，使之尽可能相等或接近，使工序同期化。

5.2.5.3 成组流水线

成组流水线是按照成组技术建立起来的一种新型流水线形式。它与普通流水线的主要差别在于，在流水线上流动的不是固定的一种零件，而是一组相似的零件。这些零件成组地进行加工，成组地在工序中转移。在更换产品对象时，设备和工艺装备不须调整或只作微小的调整。

成组流水线的设计步骤与其它流水线相同，也是先从计算流水线的平均节拍开始，进行工序同期化，计算每道工序的设备需要数量和设备负荷率，最后确定流水线设计。在实施成组流水线中应注意以下问题：

①成组流水线的加工对象是一组或几组工艺要求相似性较强的零件组，应有较大的成组批量，以提高成组流水线的利用率；

②各工序的加工时间应该一致，以保证生产的连续性。若后道工序的加工时间不相等，就必须在相应的地方安排零件存放地或备用机床；

③成组流水线上的工装、设备应有较强的适应性，使调整迅速方便。（撰稿人：冯云翔）

5.3 生产计划与控制

5.3.1 生产计划

5.3.1.1 生产计划体系

产量产值计划和生产作业计划统称生产计划。

产量产值计划规定了企业计划期生产的产品品种、质量、数量、进度以及用不同价值表示的总产值与

汽车论坛 http://www.qclt.com

工业增加值，是对企业生产活动的全面统筹安排，生产作业计划是产量产值计划的延续和强化，是落实生产计划任务的执行性计划。

公司（厂）生产作业计划有：年度、季度生产作业计划，月份汽车装配日程进度计划，年、季、月备件生产计划，每日汽车装配顺序计划等。

由专业厂（车间）编制的生产作业计划有：月份总成、零件生产计划，月份总成、零件生产日程进度计划，月份备件生产计划，月份零件毛坯发交计划，零件、毛坯要货计划，班昼夜生产指令等。

随着管理科学的发展和生产方式的变革，凡是实行看板生产由后工序向前工序要货的单位，已取消编制日历进度计划而用看板进行生产控制和调整计划，用看板取代作业计划起着生产指令作用。

5.3.1.2 年度生产计划的编制

年度生产计划按年分季、按季分月采用滚动计划方法进行编制。在对第一个计划期的实施计划作出具体安排时，对后两个计划期的生产计划以预测为基础作出初步安排。其工作程序见图 5-3-1、图 5-3-2。

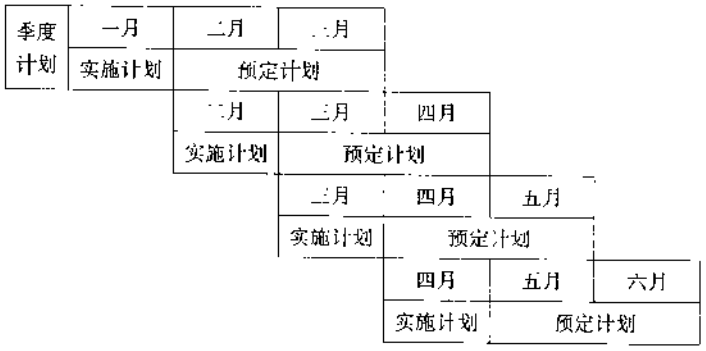


图 5-3-1 季度滚动计划示意图

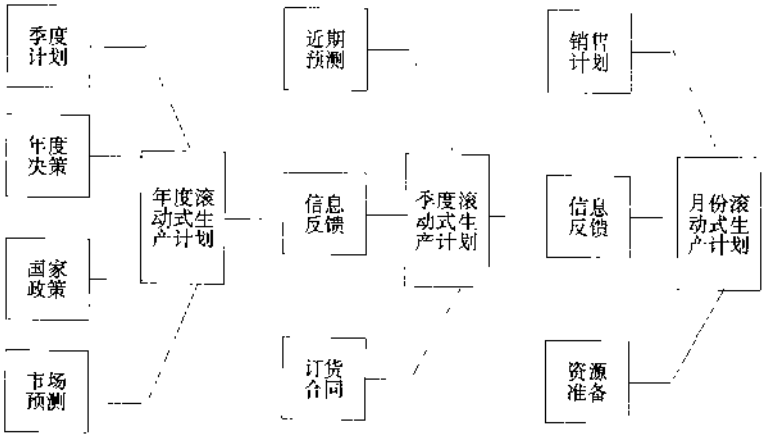


图 5-3-2 季、月滚动式生产计划示意图

5.3.1.3 月生产计划的编制

月生产计划是确定的实施计划，是根据销售部门提出的销售计划制定出每条装配线上生产的车型及月产量，编制汽车装配日程进度计划，并据此安排人员、材料和外购件采购、资金筹措等一系列活动。月生产计划的编制时间通常在计划期上月的中旬，实际上各项生产准备早已按滚动计划提前 1～2 月进行安排，

这时只是再次进行修订调整确定，见图 5-3-3。

5.3.1.4 月生产计划的变更

月生产计划所依据的销售计划是根据经销商反馈的预测资料与预订单来确定的。此计划与实际订货数量还有相当的差距，而且也经常发生订货后顾客要求更换汽车规格式样的情况。为此必须在执行中进行修正，避免产销脱节，满足用户需求，其做法见图 5-3-4 所示。

5.3.1.5 零部件生产计划的编制

1）零部件表

零部件表是汽车生产的基础信息资料之一，用以表示每一产品和构成关系的图表，又称作零部件结构表，见表 5-3-1。

表 5-3-1 零 部 件 结 构 表

母零件	×		a		b		c		f	
序号	子零件	数量	子零件	数量	子零件	数量	子零件	数量	子零件	数量
1	a	1	c	2	d	1	d	3	g	2
2	b	2	e	1	e	1	e	1	h	2
3	c	2	-	-	-		f	2	-	-
4	e	4	-	-	-		-	-	-	-

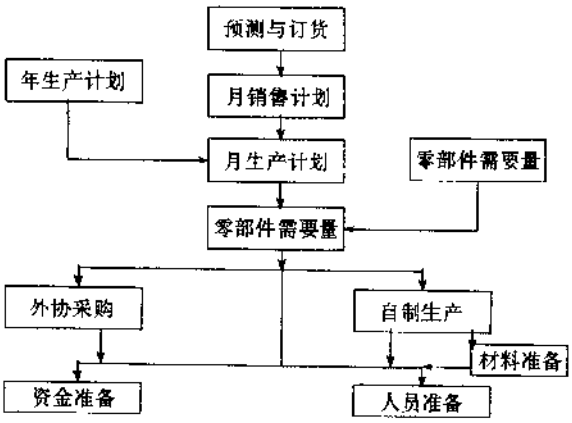


图 5-3-3 以月生产计划为中心的生产准备工作流程图

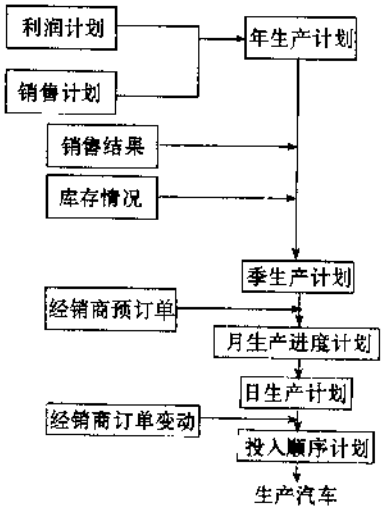


图 5-3-4 生产进度计划体系图

零部件结构表按树形结构图编制（图 5-3-5）。图表中反映零部件构成的数量、零部件在产品结构上的

汽车论坛 http://www.qclt.com

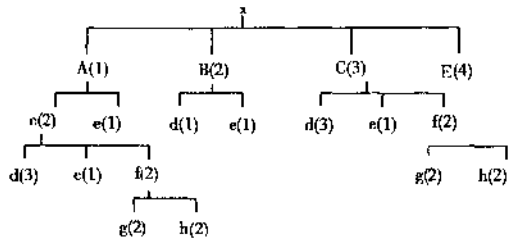


图 5-3-5 树形结构图

位置和顺序。在结构图中还引入一个称之“层次”的概念，汽车产品构成的层次最多可分为 13 层。

2）确定计算零部件需要量

零部件需要量是借助零部件表通过展开方法计算的，当前这项工作主要运用电子计算机进行。

3）大量生产作业计划的编制

大量生产条件下，从成品产出的最后一个车间开始，逐个往前推算。其计算公式如下：

某车间产出量＝后车间投入量＋（库存半成品定额－期初库存半成品结存量）

某车间投入量＝该车间产出量＋本车间计划废品量＋（车间在制品定额－期初在制品结存量）

4）成批生产作业计划的编制

先按需求信息制定合理的期量标准，再编制出标准生产指示图表，规定每个零件的生产批量、生产周期和投入、产出时间，在产量大、生产基本稳定的情况下，标准操作规程一般每年编制一次，每月按此图表重复循环生产，当日产量有变动时，利用在制品储备进行调整。

5.3.2 生产作业控制

5.3.2.1 生产作业控制的职能

一是保证按交货期投入市场或提供用户；二是使生产过程按质、按量、按进度进行；三是按资金、成本的要求，控制物料的投入、消耗和在制品储备。

生产作业控制的主要内容有：进度控制，实物控制，作业能力控制，生产信息管理。

5.3.2.2 进度控制

①投入进度控制

②产出进度控制

③工序进度控制。

5.3.2.3 实物控制

①控制在制品以及各种物料的合理储备和保管存放，严格按定额、计划发放领用；

②加强物料的搬运管理，提高物流效率和准时性，减少物料在搬运中的污染与损失；

③搞好各种物料的质量控制。

控制赶工突击所造成的质量下降和废次品的发生，控制运输、保管、存放的在制品、半成品发生磕碰而影响产品质量；

④控制成批生产过程的投入批量，降低在制品储备。

5.3.2.4 作业能力的控制

①实现计划规定的进度；

②通过作业调整，谋求生产负荷和能力之间的平衡。

汽车论坛 http://www.qclt.com

5.3.2.5 生产信息管理

①从预测到生产指令的信息，包括计划与看板两种方式，它指令企业制造部门的生产、取货、送货、运输等活动，沟通各生产车间、生产工序之间生产提前期、同步化和生产衔接保证物流畅通和准时化。

②动态信息，生产过程中采用生产作业统计，准确、及时、完整地反馈生产的投入、产量、品种、产出的质量、数量、品种，生产条件的变化，物耗与进度；计划与实际的差异，生产停工、设备和工装运行的状况以及物流变化等各种动态信息。

③现场显示信息：把生产现场的一切进程、故障及时显示并反馈给有关部门，以便及时跟踪处理。此外还有电视监督、电讯、电话及网络信息等。

5.3.3 期量标准

5.3.3.1 期量标准的含义

期量标准又称作业标准，它是产品（零件）在生产过程中的流动所规定的期限和数量方面的标准。产品在过程中什么时间投入、产出，从投入到产出需要多少时间，这就是“期”的标准。一批产品按多大的量投入或产出，就是量的指标。

5.3.3.2 大量生产的期量标准

除节拍外还有：

①标准作业指示图，即流水线内各工作地在正常条件下的具体工作制度和劳动组织形式。

②标准交接期，这是供需双方按规定时间和数量收发零件的标准，有定期不定量，定量不定期两种方式。

③在制品储备量定额，可分为以下四种：

a. 运输储备量定额，是要货单位或取货单位在取送零件时在途中运输的在制品数量。

b. 工艺储备量定额，指流水线各道工序、各个工作地的在制品数量。

c. 周转储备量定额，是为调节两个相接工序或单位连续生产而储存的在制品数量。

d. 保险储备量定额，是指为在发生设备等临时故障时，能保生产正常而储备的在制品数量。

5.3.3.3 成批生产的期量标准

1）批量与生产间隔期

批量是一次投入（或产出）的同一制品的数量。生产间隔期是指两批相同产品投入或产出的间隔时间。

确定生产批量和生产间隔期有以下三种方法：

（1）最小批量法

是指在考虑充分利用设备的条件下，通过计算求出的最小批量，其公式为：

$$Q_{min} \geqslant \frac{t_c}{t_p \cdot R_t} \qquad 或\ R_t \geqslant \frac{t_c}{Q_{min} \cdot t_p}$$

式中：Q_{min}——最小批量；

t_c——主要设备调整时间；

t_p——主要工序单件时间定额；

R_t——设备允许的调正时间损失系数，即平均每个零件分摊的调整时间占单件工序时间的比值。表 5-3-2 为该系数的参考值。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 5-3-2 设备调正时间损失系数参考值

零件种类	生产类型		
	大批	中批	小批
小件	0.03	0.04	0.05
中件	0.04	0.05	0.08
大件	0.05	0.08	0.12

(2) 经济批量法

是从经济预测综合考虑各种因素的影响来确定批量的方法，又称最小费用法。

生产中各项费用与批量的关系可分为三类：一是与批量大小无关的费用，如单位产品的原材料费等直接费用；二是与批量大小成正比的费用，如在制品占用流动资金所需利息，以及在制品管理费用等；三是与批量大小成反比的费用，如设备调整的费用，它随批量的增大而减少。上述三类费用的关系见图 5-3-6。

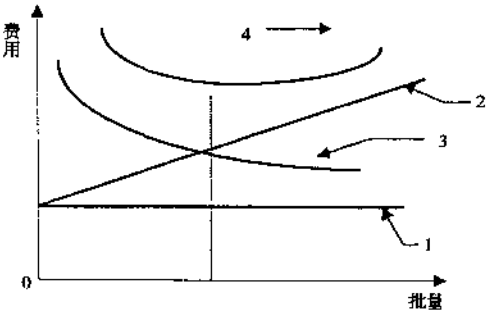


图 5-3-6 费用与批量的关系

1-制造直接费用；2-储存保管费用；3-设备工具调整费用；4-总费用

在图中直线 1 为全年的制造直接费用，直线 2 为全年的储存保管费用，曲线 3 为全年设备工具调整费用，曲线 4 为全年总费用。

经济批量法计算公式如下：

$$Q = \sqrt{\frac{2AN}{C}}$$

式中：Q——经济批量；

N——年产量；

A——每次设备调整费；

C——零件单价或单位成本。

(3) 以期定量法

这种方法是先确定生产间隔期，使批量与之相适应。先确定装配的生产间隔期，然后按工艺顺序分别确定加工和毛坯的生产间隔期。生产间隔期主要根据产品价值、生产周期、占用生产面积等因素来确定。基本原则是价值高、大型、生产周期长的零件生产间隔期要短些；价值低、小型、生产周期短的零件生产间隔期可长些。

生产间隔期确定批量按下列公式计算

$$Q = R \cdot N$$

式中：Q——批量；

R——生产间隔期；

N——平均日产量。

2) 生产周期

生产周期是指原材料投入到成品产出所经过的全部日历时间，它是确定产品在各个生产环节的投入、产出时间和编制生产作业计划的主要依据。

产品的生产周期由各个工艺阶段的生产周期组成，而每个工艺阶段的生产周期又由各个工序的生产周期组成，其计算公式如下：

(1) 工序周期

$$T_p = \frac{t_p \cdot Q}{t_e \cdot S \cdot k \cdot g} + \frac{t_c}{t_e}$$

式中：T_p——一批零件某道工序的生产周期；

Q——零件的生产批量；

汽车论坛 http://www.qclt.com

t_p——零件工序单件加工时间；

t_e——每日有效工作时间（考虑班次数）；

S——同时完成该工序的工作地数；

g——一个工作地同时加工的零件数；

k——定额时间完成系数；

t_c——设备调整转换时间。

(2) 工艺周期

$$T_1 = \Sigma T_p + \Sigma T_B + \Sigma T_M$$

式中：T_1——工艺周期；

T_B——工艺中断时间；

T_M——自然过程时间；

T_p——各工序的周期。

(3) 产品的生产周期

就是各工艺过程的生产周期与保险期之和。

3) 生产提前期

指各车间投入与产出的日期比成品最后产出的日期所要提前的日历天数。提前期可分为投入提前期和产出提前期两种，其公式如下：

某车间投入提前期＝该车间产出提前期＋该车间生产周期

某车间产出提前期＝后车间投入提前期＋保险期

生产周期与生产提前期的关系见图 5-3-7。

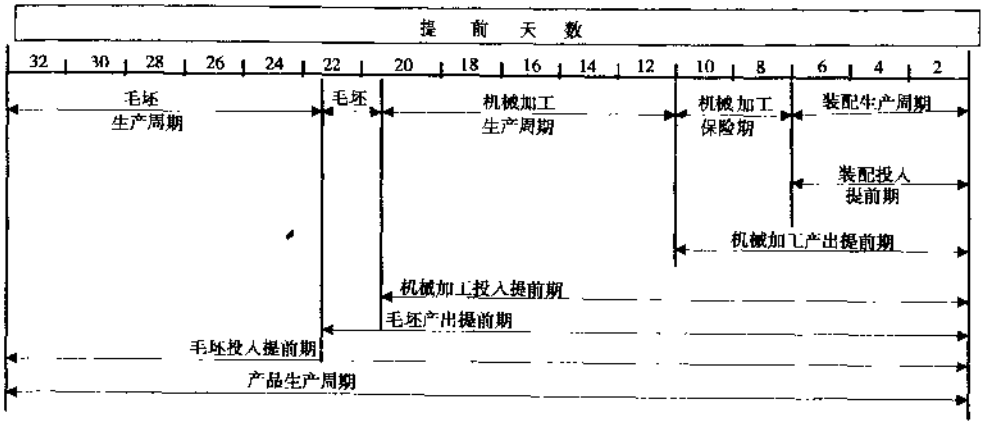


图 5-3-7 生产周期与生产提前期示意图

上述公式，适用于前后车间生产间隔期相等的情况。当前后车间或工艺阶段的生产间隔期不等时，其投入提前期的计算方法同上，而产出提前期的计算公式为：

某车间产出提前期＝后车间投入提前期＋本车间保险期＋（本车间生产间隔期－后车间生产间隔期）

4) 在制品储备定额

在成批生产条件下在制品有如下两种：

①车间在制品占用量，是指由于成批投入，尚未形成的在制品，用如下公式计算

$$Z = T_p Q$$

式中：Z——车间在制品占用量；

汽车论坛 http://www.qclt.com

T_p——批零件生产周期；

Q——平均每日需要量。

②车间之间在制品库存，由周转和保险两部分储备量组成，其形式和确定方法如下：

第一种形式是成批入库，每日领用，见图 5-3-8。

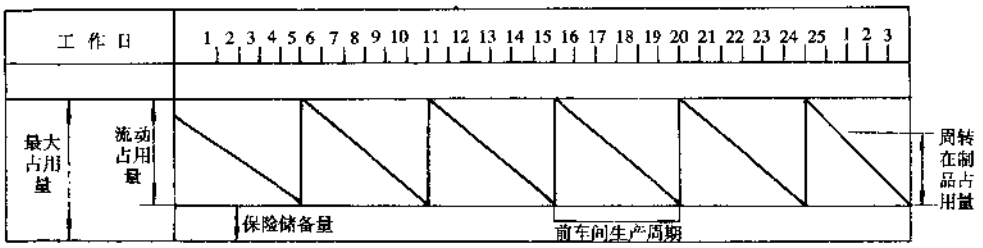


图 5-3-8 周转在制品出入库的第一种形式

周转在制品占用量用下列公式计算：

$$\text{周转在制品占用量}=\frac{\text{前车间初期第一次生产零件入库标准日期}}{\text{前车间生产周期}}\times\text{前车间批量}$$

第二种形式，成批入库整批领出，其批量相等。在这种情况下，前车间计划期最后一批交库的标准日期到期末的天数，如果小于后车间计划期最后领用一批零件的标准日期到期末的天数，就有一批周转在制品在仓库，反之就没有，如图 5-3-9 所示。

第三种形式。成批入库，分多批领用，见图 5-3-10。周转在制品占用量计算公式为：

$$\text{周转在制品占用量}=\text{前车间批量}-\frac{\text{前车间最后一批零件入库的标准日期到期末的天数}}{\text{后车间生产间隔期}}\times\text{后车间批量}$$

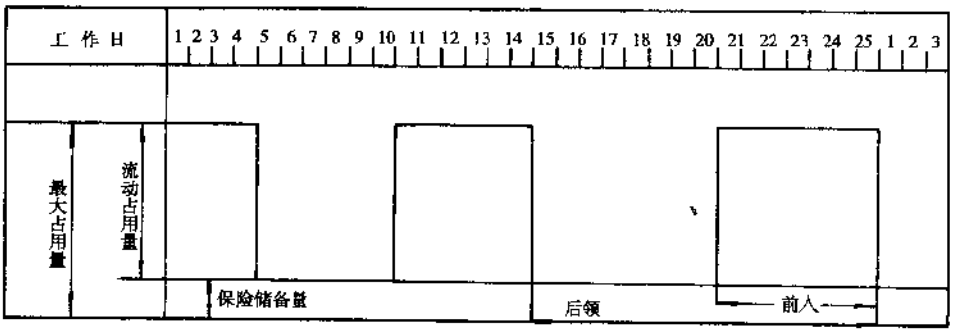


图 5-3-9 周转在制品出入库的第二种形式

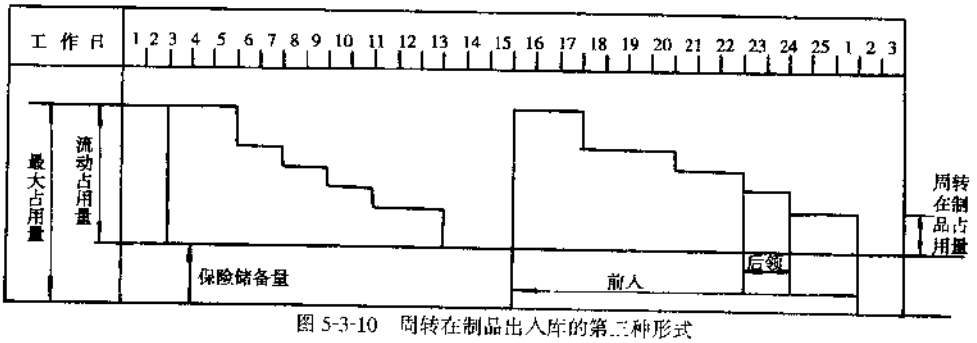


图 5-3-10 周转在制品出入库的第三种形式

（撰稿人：冯云翔）

5.4 准时化生产方式

5.4.1 准时化生产方式概述

5.4.1.1 准时生产方式的概念

准时化生产的基本含义是“在需要的时候生产需要的品种和需要的数量”。由于它强调“非常准时”、“排除超前过量制造”，能够最大限度地消除生产中的不平准化的现象以及企业不合理的管理方法，因而又称之为“彻底消除无效劳动的思想和技术”。

准时化在生产方式变革中，处于独创的领先地位，在精益生产方式这个名称出现之前，准时化生产在世界汽车产业及其它有关产业中已经广泛传播。

5.4.1.2 准时化生产的内容

主要有：拉动式看板生产，多品种混流平准化生产，一个流同步节拍生产，快换工装，标准化作业，多工序操作和省人化，自动化的防失误装置，全面质量管理，全员预防性设备维修和安全，现场目视管理，5S 管理和群众性改善活动等。各项内容的关系见图 5-4-1.

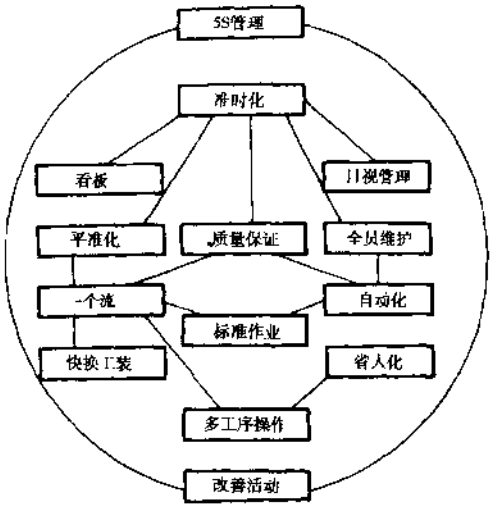


图 5-4-1 准时化内容

5.4.1.3 准时化生产方式与传统生产方式的差别

准时化生产方式与传统生产方式的主要差别见表 5-4-1。

表 5-4-1 准时化生产与传统生产方式的主要差别

	传统生产方式	准时生产方式
1. 生产组织方式	顺向型计划供应体系，由前工序按计划向后工序供货，又称推动式体系	逆向性看板取货体系，由后工序按需要到前工序取货，目的是取消中间环节，控制超前过量制造，又称拉动式体系
2. 生产指令	生产指令是生产作业计划	生产指令主要看板，用看板进行生产微调，控制在制品库存
3. 多品种生产	采用大批量多批次轮番生产办法	采用多品种混流平准化生产，与小批量多批次办法
4. 在制品管理	用足够多的在制品库存保证均衡生产	提出在制品向“零”进军，最大限度的压缩在制品
5. 作业方式	一人一机作业，个别情况下一人看管多台同类型机床，按定额考核工作任务完成情况	实行一人多工序操作，考核人工作业率

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

	传统生产方式	准时生产方式
6. 设备平面布置	一字型平面布置，机床之间间距大，生产线间零件成批流动，在制品多	U形平面布置，机床之间间距小，生产面积占用小，工序间在制品实现一个流
7. 质量控制	主要依靠专职检查人员实行把关性质量控制，容易出现质量漏检现象	开展TQC活动，开展生产工人自主控制质量活动，在设备和工装上装上防失误装置，确保产品合格率100%
8. 设备维修	实行设备计划预修制，用过量的设备维修力量保证生产正常进行	实行全员参加的设备预防性维修制度，采用针对性修理、改善性修理、以及设备无故障管理等办法，保证生产正常运行
9. 现场管理	强调职能管理，不重视现场管理	提倡现场管理，职能管理深入现场，提供准时服务，开展改善活动

5.4.2 看板管理

5.4.2.1 看板管理的概念

看板（又称信息卡）管理是一种实行准时化生产的科学管理方法，它以看板为工具，采用反工艺路线的做法，对产品（零件）的生产和流动进行有效控制，做到“准时领取、准时运送、准时生产”。

5.4.2.2 看板的形式

看板，通常是一张长方形或三角形装在塑料口袋内的卡片。经常使用的看板有：取货看板，标明后工序应领取的物品和数量，见表5-4-2；生产看板，表示前工序应生产的物品和数量，见表5-4-3与表5-4-4。这两种看板分别是生产活动中的取货指令、运输指令和生产指令，起着控制生产和微调生产作业计划和信息反馈的作用。

表5-4-2 取货看板

前工序	零件号_____			后工序
车间	零件名称_____			——车间
工位	容量	张数	料箱代号	——工位
或——仓库	每箱装			
——货位	——件	3/8	Q_2	

说明：①前工序为取货地点

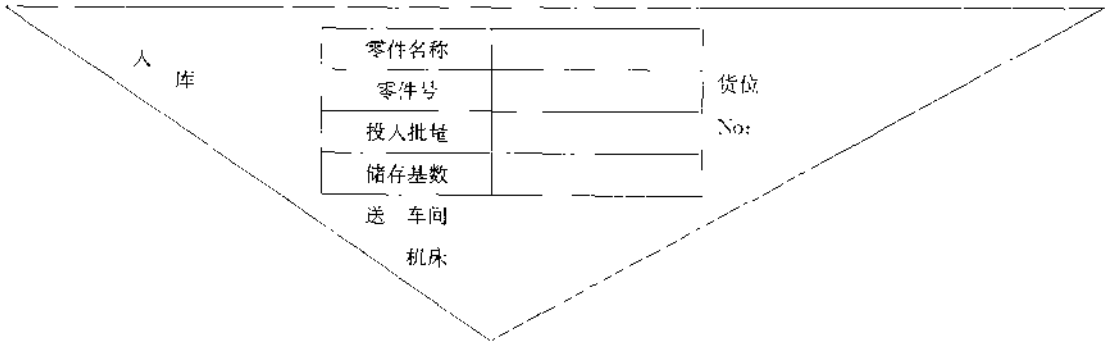
②发行张数：8是一共有8张看板，3是表示第三张。

③料箱代号Q_2是全厂所有料箱的分类号顺序代号。

表5-4-3 生产看板（下料用）

零件名称	
零件号	
投入批量	
储存基数	
材料名称	
材料规格	
送 车间	工位

表 5-4-4 生产看板（生产用）



说明：储存基数即该零件下料剪切或生产期所需周转储备量

外协看板与取货看板类似，在主机厂和外协厂之间运转，是主机厂提供外协厂的送货指令。

看板的形式并非固定不变，除了不同尺寸规格的卡片式看板以外，还可以采用彩色小球、专用工位器具、信号灯等多种形式。

5.4.2.3 看板张数的计算

看板运行的张数分别采用下列公式计算确定，在实际执行中，随着技术进步和生产管理的不断改善，看板的张数将逐步减少。

1）大量生产看板张数

$$N = \frac{a(b + c) + u}{\omega}$$

式中：N——看板周转张数；

a——要货车间单位时间产量；

b——取货运输往返时间；

c——看板停留在车间的时间；

u——保险量；

ω——每箱固定盛装的零件数。

2）批量生产看板张数

$$M = u \cdot t(1 + u')$$

式中：M——储存基数；

u——后工序平均使用量；

t——生产提前期；

u'——保险系数。

3）外协看板周转张数

$$N = \frac{[A/B(1 + c) + u] \cdot a}{\omega}$$

式中：A——交货期；

B——送货次数；

C——第几次回收上一次看板；

u——保险天数。

5.4.2.4 实行看板管理原则

①后工序只有在需要的时候，向前工序领取需要的零件和数量；

汽车论坛 http://www.qclt.com

②前工序应该只生产足够的数量，补充后工序取走的零件；

③不良商品决不送往后工序；

④看板的使用数目应尽量减少；

⑤看板应满足小幅度生产数量变化的需要，其调整幅度控制在计划的10%以内。

5.4.2.5 看板的流程

1）机械加工单位看板流程

①后工序的取货人员将需要数量的取货看板和取货用的工位器具，送往前工序贮存处；

②当后工序的取货人员在贮存地领取零件之后，立即将原来挂在装零件工位器具上的生产看板取下，放到看板接收箱内。并将带来的空的工位器具，置放在前工序所指定的地方；

③取货人员每当取下一张生产看板时，必须相应挂上一张取货看板。在这两种看板交换之际，取货人员必须小心核对，以确定是否同一零件；

④后工序在开始生产时，必须将取货看板取下，并放入取货看板置放箱内；

⑤前工序在经过一定时间或生产一定数量零件后，必须将生产看板从看板箱内收集起来，并依照看板在贮存处被取下的顺序放入生产看板放置箱内；

⑥依照生产看板在其放置箱内的顺序进行零件生产；

⑦进行生产的零件及其生产看板在加工过程中同时运动；

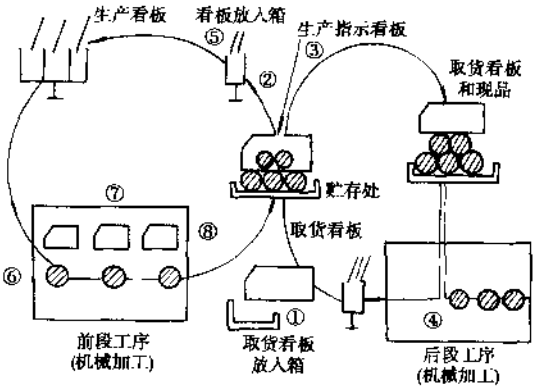


图5-4-2 机械加工看板流程示意图

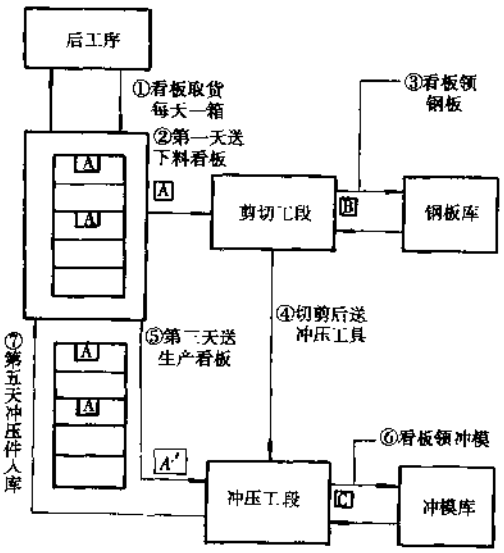


图5-4-3 冲压生产看板流程图

A-下料看板；*A'*-生产看板；*B*-领钢板看板；*C*-领冲模看板

⑧在零件加工完成后，零件和生产看板同时放到指定的贮存处。以便后工序取货人员在任何需要时刻取走。其流程见图5-4-2。

2）冲压（锻造）生产看板流程

冲压生产过程除生产看板外，还有下料看板、领料看板、领工装看板三种，又称信息看板。其流程见图5-4-3。

图中设定某冲压件生产批量为5 000件，每箱1 000件，共5箱，生产周期为5天，其中切剪2天，冲压3天。

①后工序取货工人从成品库取走第一箱零件时，摘下下料看板按顺序挂在看板架上；

②成品库工人按摘下的时间、顺序准时地把下料看板送到切剪工段；

③切剪工段的领料工人看到下料看板就带着看板去钢板库领料，并在领取材料上挂上领料看板，送往切剪工段；

④切剪工人摘下领料看板，剪切后挂上下料看板送冲压工段；

⑤这时正好成品库第三箱冲压件被领走，在取走零件的同时，成品库工人摘下生产看板，并按摘下的顺序送往冲压工段；

⑥冲压工人看到下料看板和生产看板，以及下料钢板，立即带着领工装看板，到冲模库领冲模，并进行冲压加工；

⑦冲压件加工完后，送到成品库以便后工序领取。

3）外协件看板流程

外协件看板供货，采用看板送货制，即由外协厂按看板要求直送生产工位，其看板流程见图5-4-4。

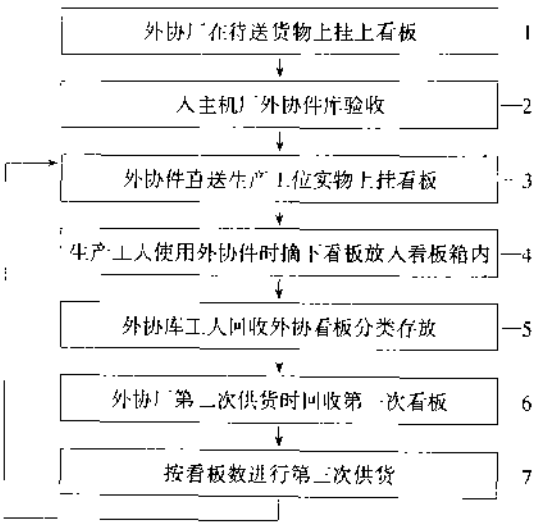


图5-4-4 外协看板流程图（1~7为流程顺序）

5.4.3 “一个流”生产

5.4.3.1 “一个流”生产的含义

“一个流”生产是同步节拍生产的高级形式，是准时化生产的重要组成部分。

流水生产中有“一个流”和“分批流”两种组织形式。“一个流”就是各工序加工完了一个制件后立即流到下一工序，工序间只有一个制件。而“分批流”，是在各工序加工到一定批量后，才流到下一工序。工序间流动的制件是一批一批地流下去的。

如某制品经过三道工序，每工序加工时间为1min，按“一个流”为制件在工序间一个接一个地流，“分批流”为制件在工序间是一批（三件）流。二种方法差异对比分析如表5-4-5。

表5-4-5 “一个流”与“分批流”两种方式比较

生产方式 / 差异比较	“一个流”方式	“分批流”方式
1. 生产作业时间	时间短（5min）	时间长（9min）
2. 计划变更适应性	易适应，有灵活性	适应性差
3. 在储品储存量	储存量少（3个）	储存量多（9个）
4. 产品质量	不合格件易发现，有利保证质量	不合格件发现慢，可能出现成批废品
5. 管理中浪费现象	易暴露，有利及时纠正	不易暴露，不利及时纠正
6. 生产面积	占用少	占用多
7. 安全性	安全性提高	不安全因素多

5.4.3.2 “一个流”生产的要点

1）实行多工序管理和同步作业组合

就是在规定的节拍时间，通过合理安排作业组合，实行一人进行多道工序的操作，以最大的省人化完

汽车论坛 http://www.qclt.com

成生产作业。

多工序管理与传统的多机床管理有差别，后者适用于按工艺原则组织的生产线，由一人看管多台同型号的机床，两者的差别见表 5-4-6

表 5-4-6 多工序管理与多机床管理比较表

比较项目 \ 作业方法	一人看管多道工序	一人看管多台同类机床
准备时间	短	长
在制品	少	多
不合格品	立即发现清除	难以发现
工人技能	多技能工	单技能工
设备	小型低价	大型高价
搬运	基本没有	有
效率	整体效率	单机效率

2）建立 U 形线设备平面布置

其特点是：机床按 U 形排列，面积紧凑，每台机床的操作台都调到同一水平上，便于工人实行多工序操作管理。机床之间用滑道连接，实现工件不落地，工序间只允许有一个在制品。U 形线的出入口在同一位置，首尾两道工序由同一工人操作，便于实施看板管理，有效进行生产过程的控制。

5.4.3.3 采用单机自动机床或对原有设备进行必要的改造，实现机床的自动进刀、退刀和自动动车

采用各种自动化防失误装置，做到工人一般只需往机床上安装并夹紧毛坯、开动机床及松卸加工后的零件，而直接改变毛坯尺寸或性能使之符合工艺要求的基本作业，全部由机床自动完成，使工人完全可能在机床自动作业时间内去进行另一台或几台机床的人工作业。

5.4.3.4 设立信息显示装置，建立服务保证系统

实行刀具定置集配，强制换刀；毛坯协作件看板取货直送工位；机电修理人员现场驻守、巡回检查，快速修理；做到后方服务和职能人员为生产操作工人提供优质、准时服务。

5.4.3.5 “一个流”生产的组织实施

①查定生产能力，在时间分析和改进的基础上，测定零件每道工序的机动和手动时间；

②制定生产节拍和工序节拍，当工序节拍超过生产节拍时，采取必要的措施，使“瓶颈”岗位的工序节拍，小于生产节拍；

③编制零件工序能力表，按顺序列出每道工序的名称、机床型号、机动和手动时间、刀具更换时间、加工能力等；

④确定作业岗位数和初算各岗位的平均作业负荷，其计算岗位为

$$作业岗位数=\frac{全线人工作业时间之和}{生产节拍\times人工作业负荷指标}$$

$$计划岗位平均负荷=\frac{全线手动作业时间}{作业岗位数\times生产节拍}\times100\%$$

⑤组成作业岗位将U型线两侧相邻工序或单侧的上下工序的人工作业时间相加，使其负荷接近或等于初算的岗位平均负荷。在组岗时必须注意不使两个作业岗位的行走路线重合或交叉。

⑥在组织作业岗位的同时，对设备平面布置、物流运输方法、加工设备、工位器具进行必要的改进。

⑦根据机床排列，修正走路时间，最后确定各岗位人工作业负荷率及全线的人工负荷率。

$$岗位人工作业负荷率=\frac{岗位人工作业时间}{生产节拍}\times100\%$$

⑧制定标准作业组合表，见表5-4-7。

⑨绘制标准作业图，见图5-4-5。

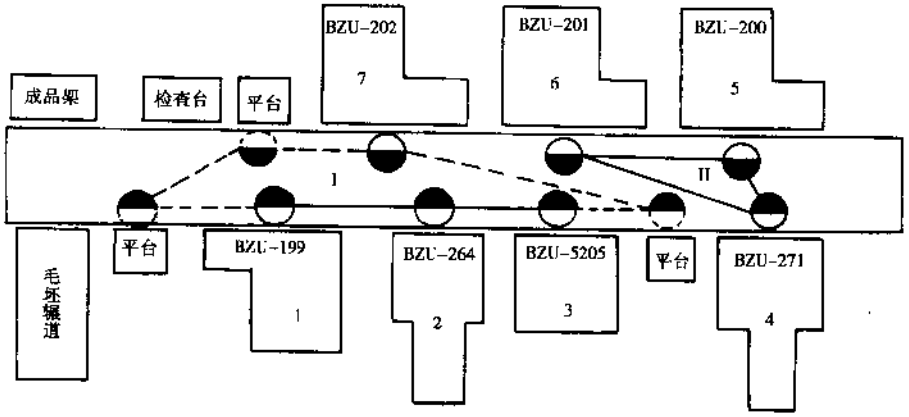


图5-4-5 标准作业图（1~7为设备序号）

5.4.4 多品种混合流水生产

5.4.4.1 多品种混流生产的特点

多品种混合流水生产（简称混流生产），是在同一条线上混合生产多种产品，并根据科学的排序计算和快换工装模具，有节奏、按比例，达到品种、数量、工时、负荷都均衡的生产组织形式。

多品种混流生产不仅可以最大限度地满足市场和用户对产品品种多样化的需求，而且可以通过快换工装、减少设备停滞时间等措施，使多品种系列产品产量的总和达到规模经济纲领的要求。

柔性制造系统（包括柔性加工中心、柔性生产线）也适于多品种生产，但多品种混流生产采取的都是组织管理和制造技术上的措施其设备投资要比柔性制造系统省得多、易于得到推广运用。

5.4.4.2 多品种混流生产的平准化和投产顺序

平准化生产，就是在组织多品种混流生产中根据各个品种的产量按最合适的投产顺序交替生产，使各个产品每个间隔或单位时间所生产的产品保持基本相等，达到品种、产量、工时、设备负荷的全面均衡。所以平准化就是多品种生产前提下的均衡化，为区别于单一品种条件下的均衡生产，则称之为平准化生产。

多品种混流生产的投产顺序，根据各个品种的特性和生产条件共有三种排序方法：

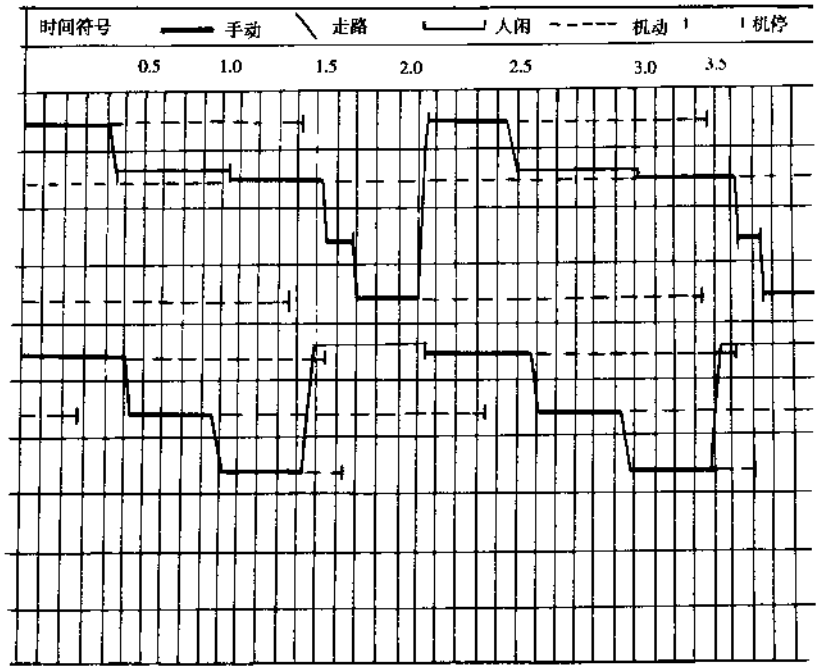
①生产比例数法，它并不把作业时间全部考虑在内，而是以各品种产量的不同，按产量比例倒数确定投产顺序。

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 5-4-7　标准作业组合表

车间	生产线	零件号	变速器厂　标准作业组合表	班作业时间	班产量	生产节拍	工艺节拍
零件车间	导块线	-1702056-11		402mm	174	2.31mm	2.07mm

对应号	人工作业率	工序号	工序内容	设备型号	时间(分) 工序作业	手动	机动	行走	时间符号 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5
1	63.2%	1	铣两端面	BZU 199	1.42	0.40	1.02	0.041	
		2	钻扩铰叉轴孔	DU-264	2.07	0.49	1.58	0.025	
		3	倒角	ZQ-5025	0.107		0.107	0.031	
		7	铣槽	BZU-202	1.36	0.33	1.03	0.036	
		4	钻铰锁销孔	DH-271	1.547	0.527	1.02	0.014	
1	63.9%	5	铣两端面	BZU-200	1.81	0.43	0.63	0.033	
		6	铣斜面	BZU-201	1.05	0.42	0.63	0.028	



汽车论坛 http://www.qclt.com

②逻辑计算法，它依据各品种生产特性值和固有值，按数学模型编排投产顺序。

③启发式排序法，以工时均衡的要求来编排投产顺序。

在产品品种众多的情况下，编排投产顺序比较繁琐，必须运用电子计算机进行计算。

5.4.4.3 多品种混流生产的实施

①产品结构要系列化、标准化、通用化，在不同的品种中尽可能少采用专用的零部件；

②工艺设计要成组化，对汽车系列产品中，结构型体类同、工序类似的零件编组在一起，采用适合这几种零件产量总和的工艺方法和工艺装备；

③设备布置合理化。在成组工艺的基础上，合理调整设备布置，把单一品种的固定生产线改造为多品种可变流水生产线；

④工装模具要快换化，在后节专门叙述；

⑤要有科学的精确的时差计算组织同步节拍生产，特别要注重日程管理、信息管理、现场管理，统一按总装配线的顺序计划指令组织生产，采用看板方式、控制物流运输。

5.4.4.4 多品种混流生产中的快换工装模具

实行快速调换工装模具，是在可变流水线上组织小批量多品种混流生产的关键环节。

工装模具的更换可以分解为停机进行的机内更换和不停机进行的机外更换两部分，实行快换工装模具的要点是合理划分机内更换与机外更换的作业内容，通过各种改进措施，尽可能地把机内更换作业转变为机外更换作业，最大限度地缩短机内更换的时间，见图 5-4-6。

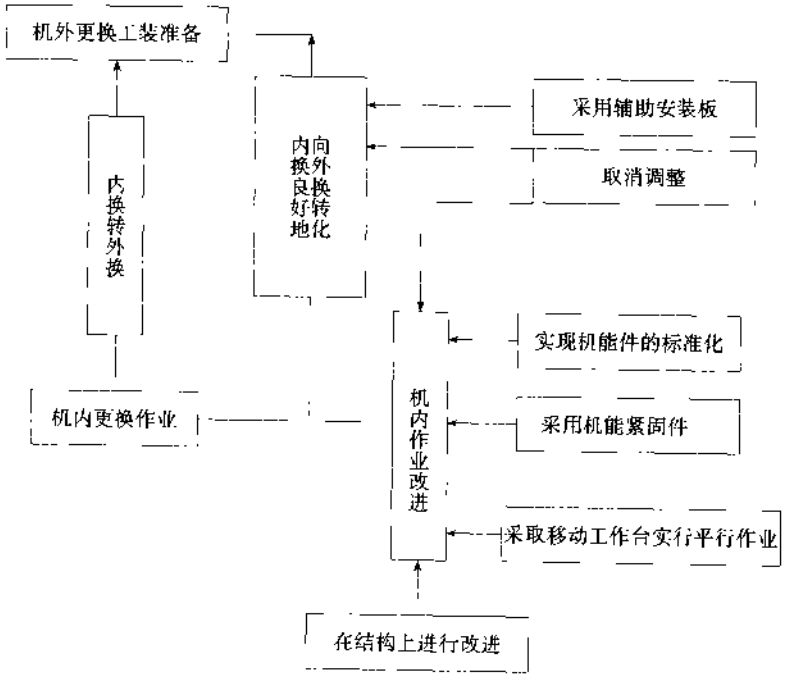


图 5-4-6 快换模具示意图

其主要做法有：

①做好机外的准备工作，将更换的工装模具、安装用的工具材料全部备齐，放在机旁适当位置，处于良好的使用状态。

②用涂色法标明各类物品。把不同规格的工具、螺栓及其它紧固物用颜色分类，以加快选取速度、不出差错。

汽车论坛 http://www.qclt.com

③编制更换工装模具作业顺序表，使更换工作不漏一个操作，不出任何差错，严格按顺序进行。在几个人同时操作的更换作业中，有利于分工合作和安全作业。

④实行工装模具的标准化。工装模具的外形尺寸要尽可能标准化，如模具的高度统一，可以不调整或减少调整时间，模具座厚度统一，可便于紧固，并统一紧固螺栓，缩短时间，节省开支。

⑤采用机能紧固件。装卸工装模具的紧固件合理，更换作业就能节省时间，如果只需要紧固、松开的单纯机能，可采用单头螺栓，最好采用U形槽方式、凸轮方式、夹紧方式、可倾斜曲柄方式、楔调整方式、配合方式等，以达到一次紧固所有部位，同时还要注意操作方便、材质耐压、减少更新次数。

⑥采用辅助安装板。把大型压床的模具事先固定在辅助安装板上，换模时，连同模具一起装上压床，以缩短换模时间。

⑦采用移动工作台。在压床上备有两个移动工作台，后生产零件的模具可以在前生产零件加工时同步安装。转换零件时，只需把移动工作台移入压床的工作空间，用快速夹紧机械紧固即可。

⑧采用转位刀具、快换元件方式。车削加工、铣削加工、钻削加工、镗削加工等切削加工机床，可以采用转位刀具，或者采用更换刀夹、刀柄、定位元件方式，均可实现快工装。

5.4.5 物流合理化

5.4.5.1 物流的概念

物流，就是物品在时间和空间的移动。在企业里，存在着各种各样的物品移动，就生产组织而言，最重要的是加工对象在生产过程中的物流。

物流贯穿于生产过程的始终（图5-4-7），物流组织得是否合理，在一定程序上决定着生产周期的长短，资金周转的快慢。建立良好的物流管理系统，是组织准时生产的重要组成部分。

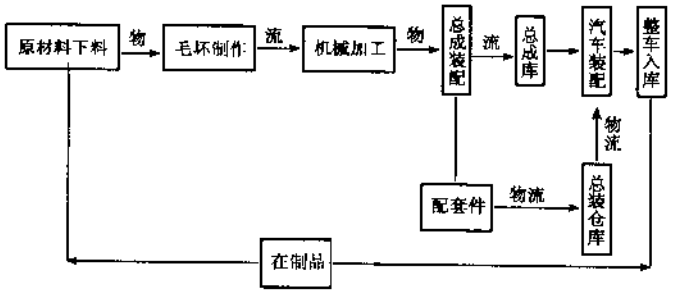


图5-4-7 物流示意图

5.4.5.2 物流合理化的要求

合理设计和组织生产过程各个环节物流的流向、流量、途径、时间和存储，消除等待、积压、拥挤等现象，乃是实行准时化生产的基本要求。主要有：

①物流的运输距离要尽可能短，做到道路畅通，避免倒流，物料搬运环节要尽可能少，做到直送工位，不设不必要的中间仓库和中转环节，在一条生产线上要尽可能取消上下工序之间不必要的运输小车，采用滑道、滚道等加以替代。

②物流要准时化，尽可能地采取用移动式装配流水作业方式、“一个流”作业方式、多批次小批量作业方式，以减少在制品的运输量。实行看板送货，不产生过剩、积压，没有停滞、等待，实现各零部件生产线与总装配线同步生产。

③合理配置起重运输工具，包括各种运载车辆、起重设备、人力运输小车、重力斜面输送装置、动力输送机械等，实现运输、装卸机械化，做到零件不落地，尽可能减少人力搬运，消除笨重体力劳动和无效劳动。

汽车论坛 http://www.qclt.com

④物品的包装、装卸存放都要有合适的容器和良好的环境，使物品在物流过程中能够保持原有的技术状态，做到不丢失、不损坏、不堆积拥挤、过目知数。

5.4.5.3 运输方式

采用什么样的运输方式，取决于运输批量、运输时间和运输距离。准时化生产提出了多品种小批量分批次取送货的要求，运输方式必须作出相应的改进。

①交货方法，从送货制运输改为取货制运输和取货式的送货制运输。

送货制运输，就是前工序单位将生产出来的产品送交后工序单位或中间仓库。

取货制运输，就是后工序单位根据需要的时间，到前工序单位去取需要的品种和数量。

取货式的送货制运输，就是由后工序单位根据需要的产品品种向前工序单位提前发出信息，由前工序按信息在规定的时间内把需要的品种和数量送到后工序工位。一般在两个生产单位距离较远时采用。

②装载方法，从单一品种成批运输变为多品种混载运输，并进一步转向按照生产顺序号依次混载，见图 5-4-8。



图 5-4-8 装载方法示意图

③运输路线，从单向交货运输变为往复交货运输，进一步发展为复合交货运输见图 5-4-9。

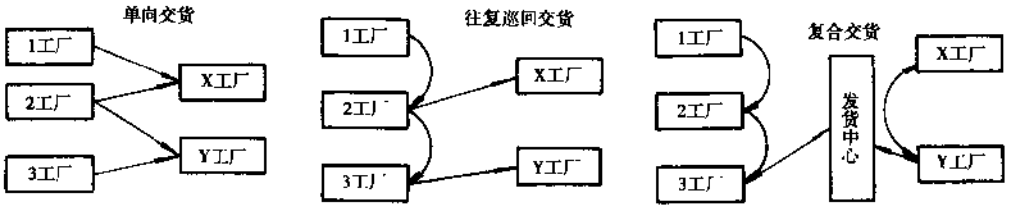


图 5-4-9 运输路线示意图

④运输次数，从每日一次变为每日数次。

5.4.5.4 工位器具

工位器具是在生产过程中用于盛装各种零部件、原材料的容器，是实现物流合理化的重要手段。

工位器具有通用、专用之分，下边介绍几种标准通用的工位器具。

①人工搬运的工位器具，存放螺钉螺帽等小件，其总质量不超过 16～18kg。在结构上有适当的“把手”并能多层“立体叠放”，见图 5-4-10。

②叉车用的工位器具。这类工位器具，除应保持其标准的通用性外，在容器底部要与地面留有一定高度的空隙，供叉车的托叉插入之用，见图 5-4-11。

③分层叠放的工位器具，是为提高作业面积利用率，便于分层向空间叠放的大型工位器具，见图 5-4-12。

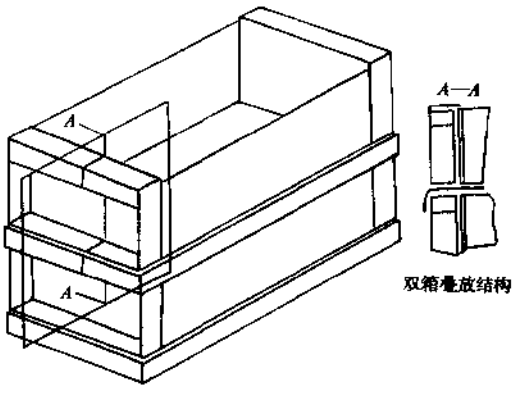


图 5-4-10 人力搬运的工位器具

汽车论坛 http://www.qclt.com

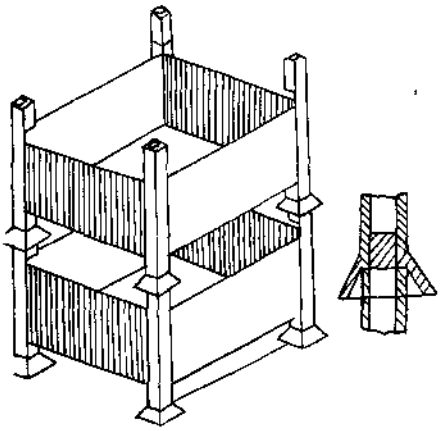


图 5-4-11 叉车用工位器具的结构

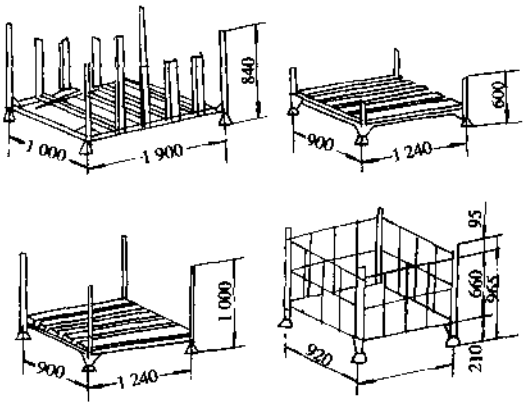


图 5-4-12 二下角有定位的工位器具

5.4.5.5 物流组织

物流组织是物流控制的有效保证，它通常是以建立有关图表和制度来实施的，主要有：

1）物流图

是根据看板取送货标准制定的，一般标明原材料、毛坯、在制品、半成品、产成品的来源、流向、流程、运输工具、收发时间、批量、库存最低最高储备及动态变化等。它是组织车间（分厂）之间、生产线之间物品搬运作业的指导性文件。

2）物流时刻表

根据要货单位要求的批次、批量和时间，编排每个单位车辆到达时刻、装卸时间、离开时刻。该时刻表悬挂在工厂车间仓库大门口，以防止车辆同时到达造成交通拥挤、忙闲不均的现象。

生产线之间的物流运输按多品种、小批量的运输原则，实行分片包干、循环作业的运输方式。需要按物流路线，确定每台运输车辆的物流时刻表，绘制物流时刻图（图 5-4-13）作为每个运输操作人员的作业标准。这样的组织方法，可减少生产线之间的在制品存放，加快零件的周转，又有利于作业人员的工作负荷。

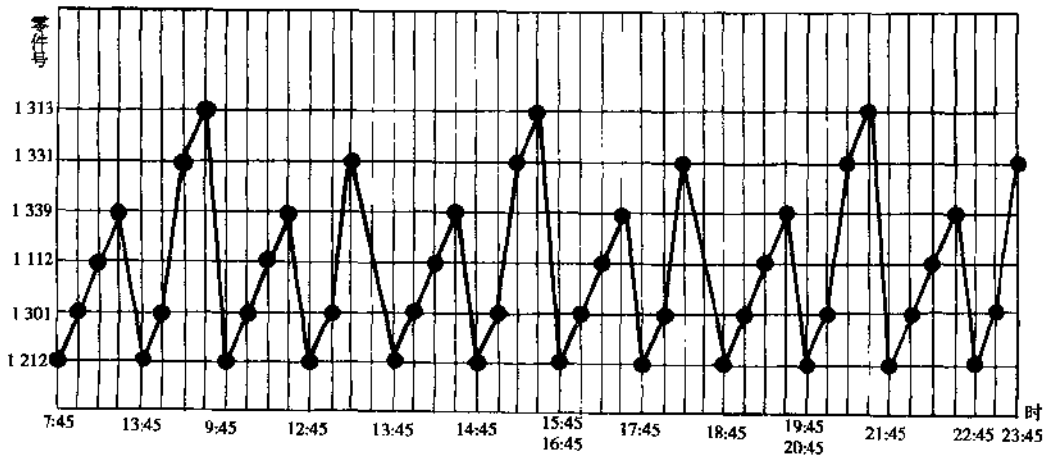


图 5-4-13 物流时刻图

3）物流信息反馈制度

每个取货单位都建立物流信息动态板（图 5-4-14）及时向供货方准确反映取货动态信息。

时间	情况 / 单位	锻造厂	铸造厂	反馈
上	7：30～8：30			
	8：30～9：30	A B C	D E F	
下	9：30～10：30			
	10：30～11：30			
上	12：30～13：30			
	13：30～14：30			
下	14：30～15：30			
	15：30～16：30			

图 5-4-14 物流动态信息板

注："A"等表示取货动态牌；正面为蓝色，表示货已取到，反面为红色，表示无货可取。

4）总装配线强制停线制度

要求送到总装配线的零部件从品种、数量及规格必须百分之百符合要求，一旦某一工位发现有问题，就立即停止装配，直到解决问题，以防止装卸完毕返工拆卸造成大量无效劳动与浪费，这种强制停线制度是准时化生产所特别提倡的。（撰稿人：冯云翔）

5.5 现场管理

5.5.1 现场管理体制

现场管理体制基本内容有：

5.5.1.1 以现场为中心的管理体系

生产现场是生产产品的第一线，管理人员和工程技术人员要了解现场的情况，采取现实的措施和对策，以稳定现场生产秩序和保证生产活动的进行。

5.5.1.2 以生产工人为主体的生产组织体系

生产工人是产品附加价值直接创造者，是现场生产的主体，其它各类人员都有是围绕着创造价值服务的。各类辅助工人和管理人员要主动深入现场提供准时服务、保证生产工人分分秒秒不停地创造价值，见图 5-5-1。

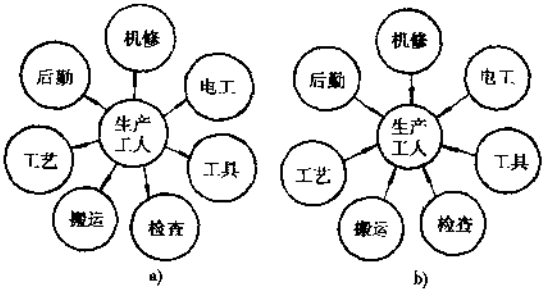


图 5-5-1 新老生产组织体系

a)传统生产组织体系示意图；b)新的生产组织体系示意图

汽车论坛 http://www.qclt.com

5.5.1.3 以车间主任为中心的现场生产指挥体系

由车间主任执掌指挥权，把驻扎在现场的辅助服务工人和管理人员组织起来到现场办公，针对现场问题，及时组织处理，见图 5-5-2。

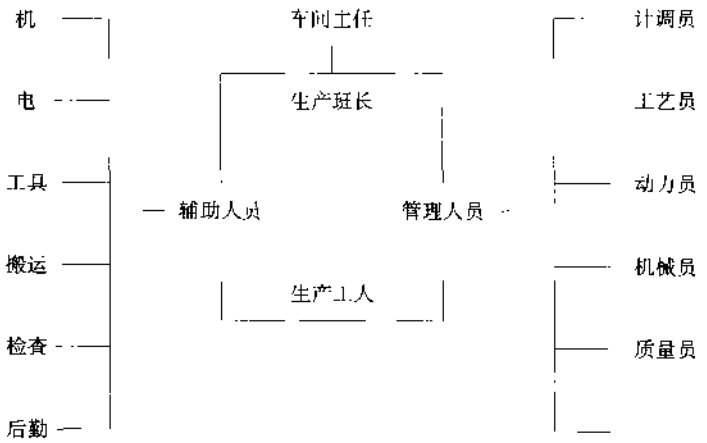


图 5-5-2 以车间主任为首的生产指挥系统图

实行这种体制，可以有两种做法：第一种是，把现场管理人员和服务人员集中在厂部，有关职能部门定人、定点到现场上岗服务，接受车间主任的协调和考核。第二种是指导现场管理人员和服务人员全部或部分下放到车间实行封闭管理，职能部门对他们实行业务指导。

5.5.2 “5S”——生产和办公区的清洁工作

有良好素养的人员和整齐清洁的工作环境，是减低浪费、提高生产及降低产品不良最重要的基础工程。日本企业就是本着这样的信念开展“5S”活动，现在，“5S”活动越来越普及。

“5S”是指：整理(SEIRI)、整顿(SEITON)、清扫(SEISO)清洁(SEIKETSU)、素养(SHITSUKE)。

5.5.2.1 整理

就是对现场上的物品进行分类清理，这是现场改善的开始。其要点是区分对生产有用还是无用。无用的东西，应当果断地清理出现场；不常用的东西，要放远一点（仓库）；偶然使用的东西，在车间集中存放；经常用的东西，要放在作业区。

5.5.2.2 整顿

应是对整理后需要的物品，进行合理的布置摆放，使现场整齐、紧凑协调，无论是谁都一目了然。整顿的要点是需要的东西，定位摆放、物各有位，物在其位；定量摆放，目视化，过目知数；取用返回方便，无寻找时间。

5.5.2.3 清扫

就是把现场打扫干净，把机床擦洗干净。创造一个明快舒畅的工作现场。其要点是：自己用的东西，要自己弄干净，不是增加清洁工；在设备清扫的同时，检查是否有异常，清扫是点检；在设备清扫的同时，要润滑，清扫也是保养；清扫地面时要调查铁屑飞出及油水气滴漏的原因，清扫中要有改善。

汽车论坛 http://www.qclt.com

5.5.2.4 清洁

就是坚持和保持整理、整顿、清扫所取得的成果，也包括对人身有害的烟雾、粉尘、噪声、有毒气体的防除。其要点是：不搞突击、贵在坚持；清洁是一种美德，看上去使人有舒服感；要尊重别人，也要尊重自己。

5.5.2.5 素养

就是养成良好的风气和习惯，高尚的道德品质，自觉执行制度、标准，改善人际关系，增强集体观念。提高人的素养是开展“5S”活动的中心环节。

5.5.3 定置管理

定置管理是在整理、整顿的基础上使现场人与物的联结最佳化的管理方法。通过定置管理达到人定岗、物定位、流动有标准，现场信息目视化。定置管理是规范化和标准化的整理、整顿工作，因此通常与“5S”活动结合起来进行。

5.5.3.1 定置图

它是对现场进行诊断分析的基础上，确定了人、物、场关系之后所制定的管理图，是进行日常整理、整顿的科学依据，图 5-5-3 是某个生产班组的定置管理示意图。

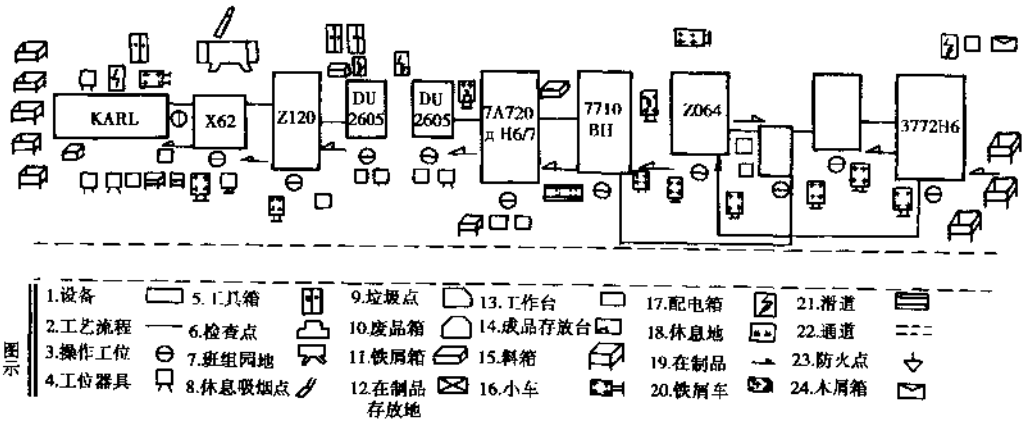


图 5-5-3 定置管理示意图

5.5.3.2 定置率

是反映是否按定置图进行整理、整顿、现场达到标准程度的定量指标。其计算方法是

$$\varepsilon = \frac{W - W_n}{W} \times 100\%$$

式中：ε——定置率；

W——定置图规定摆放物品的单元数；

W_n——未按规定摆放物品的单元数。

5.5.3.3 定置管理摆放物品的分类

A 类——与人处于直接联结状态物品或是在工作地区域的物品，例如正在加工、装配的工作，以及正在使用的工装夹具等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

B类——遵守一定作业程序，可以转化为直接联结的物品。例如，待装配或待加工的零部件，及待使用的刀具、辅具、夹具和技术文件等。

C类——与现生产没有直接关系，但又是生产现场不可缺少的物品，间歇使用或不定期使用的物品。如生产现场的茶水桶、消防器材，设备润滑用的油桶以及清扫工具等。

D类——生产现场无用的物品。需要清除如铁屑、废品、垃圾等。

5.5.4 目视管理

目视管理就是看得见的管理。对生产活动起着指导和约束作用的信息，都要在现场通过目视管理的手段表现出来，以便使每个人都能够得到快速反映，受到提示规范行为，避免错误。目视管理是职工参与管理的一种主要形式，是实现准时生产的重要手段。

目视管理的手段有以下几种形式。

5.5.4.1 标志线

在厂房的地面上划出白色或红色的标志线，通道的边上设置标志杆，明确表示各种设备、工艺装备、工位器具、车辆、在制品的存放地，通道的位置和路线等，它与定置图是一致的。

5.5.4.2 标志牌

做成统一规格的标志牌，可以表示生产区域、生产线；物流路线，或提示设备正常操作，维修保养，或提示安全、防火、穿戴劳动保护用具等。

5.5.4.3 标志色

以不同的颜色表示不同的动力管线等以利正常运行、避免误操作。

5.5.4.4 作业指导书

又称作业标准指示图表，见图 5-5-4。

作业标准指示图表示在每条生产线的起端或适当位置，用以指导生产工人的作业。其内容有工艺流程、作业组合、操作规程、生产节拍、设备点检、润滑要求，换刀批量、质量检验频率，在制品定额等。

5.5.4.5 信息显示装置

有生产进度显示板，生产线停工显标板以及设置在生产线每个工位或信息台上的信号指示灯，如呼唤批示灯、进度指示灯、开机指示灯、异常指示灯，其主要作用是把生产现场发生的异常情况，即时通知管理者及有关人员，以便迅速加以解决。

5.5.5 设备故障管理

设备一旦出现故障，应尽快地组织排除，这是现场管理的一项重要内容：

①维修人员不脱离现场，能保持与设备不断接触。现场出现异常，能立即发现及时处理。

②使用故障信息显示报警方式或挂牌示警。故障发生后，生产工人发出故障信息，维修工人立即赶到现场诊断修理，见图 5-5-5。

③认真抓好故障分析，用“5个为什么”的方法，追查发生故障最原始的原因，在迅速排除故障的同时，采取针对性措施，预防和杜绝故障的再次发生。

④利用工休日或生产间隙时间进行修理，尽量减少对生产时间的占用。

⑤开展生产操作人员与维修人员相结合的设备点检管理，实施针对性修理和改善性修理，清除故障隐患，提高设备开动率。

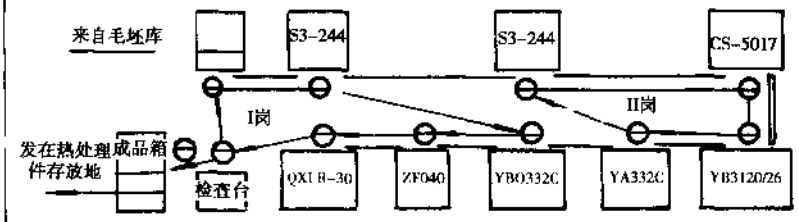
⑥组建打破工种界限团队式的修理作业班组，培养机、电、夹一体化的多能维修工，提高维修队伍的

汽车论坛 http://www.qclt.com

车间	同步器车间	标准生产线内在制品数	19件	毛坯架容量	120件	工人作业时间		制约生产线节拍工序		会签
零件号	1701336-11	标准工序间流动在制品	11件	最高成品储备	225件	I岗	II岗	工序号		
零件名称	固定齿座—倒车	标准工艺在制品	8件	最低成品储备	75件	1.957min	2.207min	节拍		

10	测量批量																
9	润滑时间																
8	换刀批量																
7	终检批量																
6	检查员巡检时间																
5	手动时间																
4	机动时间																
3	工序绿化																
2	工序间流动在制品				≤2件						≤2件		≤1件				
1	工位号					1						2		3			

劳动组合平面布置物流路线



1	工位号						8		7		6		5		4		
2	工序间流动在制品						≤1件		≤1件		≤2件		≤1件		≤1件		
3	工序绿化																
4	机动时间																
5	手动时间																
6	检查员巡检时间																
7	终检批量																
8	换刀批量																
9	润滑时间																
10	测量批量																

图 5-5-4 作业指导书

技术业务素质。

⑦维修人员配备手提工具箱和维修工具小车，除常用工具外，配上较复杂的维修工具、检测量具和常

汽车论坛 http://www.qclt.com

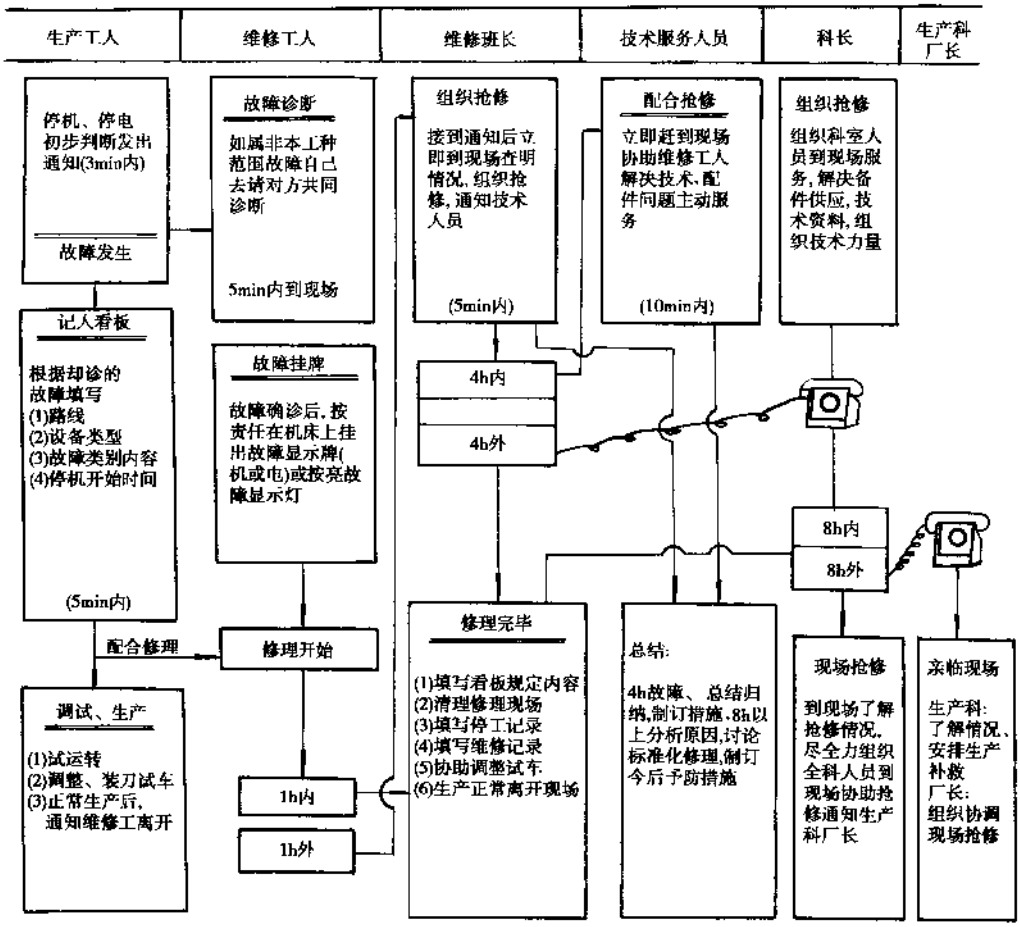


图 5-5-5 设备故障管理示意图

用小型备件，做到一般性故障，只带手提箱即可维修。对大的故障，则将小车推入现场。

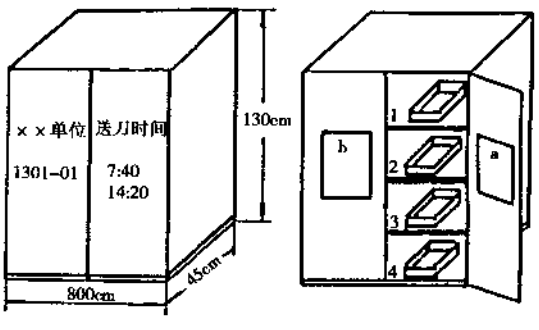
⑧建立易损备件库，并制造必要的“合件”作为储备。当设备出现故障时，采用更换合件的方法，以缩短设备的停歇时间。

5.5.6 工具集配管理

工具集配管理的基本内容是：定时直送工位、现场定置集配、强制合理换刀。其目的是缩短操作人员的辅助作业时间，确保刀具的合理使用。

5.5.6.1 现场定置集配

是在每一条生产线上设置刀具集配箱，作为工具集配管理的中转环节，集配箱的形式见图 5-5-6。



a) b)

图 5-5-6 刀具集配箱示意图

5.5.6.2 定时直送工位

刀具集配人员按指定时间将指定数量的合格

汽车论坛 http://www.qclt.com

刀具送到指定的生产箱内，同时将待磨的刀具送到磨刀部进行磨锋处理，将损坏报废的工具送工具库办理更新补充的手续。

5.5.6.3 强制合理换刀

根据刀具的磨钝标准、切削规范、加工条件和生产批量，制定换刀作业指导书，由生产操作人员按照换刀指导书规定时间或换刀频次换刀。对精密复杂的刀具，由集配人员按照规定换刀时刻表的要求，把磨锋合格或更新的刀具按时送到刀具使用点，指导或帮助生产操作人员强制换刀。

5.6 制造资源计划 MRPⅡ

5.6.1 MRPⅡ的概念

制造资源计划 MRPⅡ（Manufacture Resource Planning）是来自美国的现代生产管理和企业管理模式。它是在狭义和广义（闭环）物料需求计划 MRP（Material Requirement Planning）的基础上发展形成，因而称之为 MRPⅡ。

MRPⅡ管理模式系统框图见图 5-6-1。

实施 MRPⅡ系统必须对六类基本数据进行规范化管理。它们是：项目主文件、物料清单 BOM、工作中心、工艺流程、提前期、库存纪录。

MRPⅡ系统的主要功能是：技术管理、计划管理（包括车间控制）、物料管理、产品成本与分析。

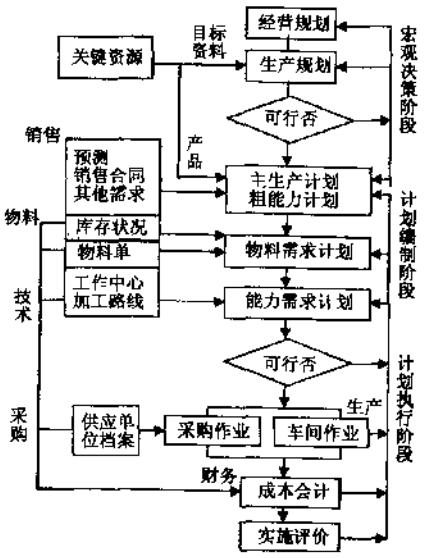


图 5-6-1 MRPⅡ管理模式系统框图

5.6.2 MRPⅡ的基本数据

5.6.2.1 项目主文件

MRPⅡ系统把所有物料项目编码信息存入一个数据库中，作为整个企业系统运行的主控数据。这个数据库称为项目主文件。

项目主文件说明物料的各种参数、属性及有关信息，反映物料同各个管理功能的联系。具体内容有以下几个方面：

①设计管理信息：如图号、物料号、质量、体积、设计修改版次、生效日期和失效日期等。

②物料管理信息：如物料类型（自制、外购）、分类（原材料、零件、成品）、计量单位（个、kg 等）、库位管理、有效期、批量、定货策略、安全库存量、合格率、ABC 分类、盘点频率、采购员码、主要供应商编号等。

③计划管理信息：如计划期、提前期、需求时界与计划时界、计划员码等。

④成本管理信息：如标准成本、价格等。

⑤销售管理信息：如价目表、折扣原则、销售员码等。

⑥质量管理信息：如批号、待验期、保存天数等。

5.6.2.2 物料清单 BOM（Bill of Materia）

MRPⅡ系统要正确计算出物料需求的数量和时间，首先要使系统识别产品、产品结构及相关的物料，必须把产品结构图转换成规范的数据格式。这种用规范的数据格式来描述产品结构的文件，就是物料清单。它是一种描述装配件的结构关系的零件表，也称为合件装配表。

BOM 表的内容包括层次号、物料号、物料名称、单位、数量、类型、成品率、ABC 码、生效日期、

汽车论坛 http://www.qclt.com

失效日期、提前期等.

5.6.2.3 工作中心

工作中心是产品制造中每个加工路线的一个工序作业的生产单元，可以是一台设备、生产线、机床群、装配地、班组、车间等。它是能力核算、成本计算及车间控制必须的技术文件。其单位是工时。

工作中心的计算公式是：

工作中心能力 = 每日可用班次 × 每班可用的工作小时 × 工作中心平均效率 × 工作中心利用率

其中：平均效率取决于操作人员的技术水平和设备的使用年限；利用率取决于设备完好率、工人出勤率、停工率等因素。二者都是统计平均值。

5.6.2.4 工艺流程

MRPⅡ系统中的工艺流程是生产过程中，反映加工方法和加工次序的文件。

工作中心的计算公式是：它的主要内容是实际加工和装配的工序号，每道工序用的工作中心，各项时间定额（准备定额、加工定额、排队定额、传送定额等），外协工序的工时、费用、工装、人员等。

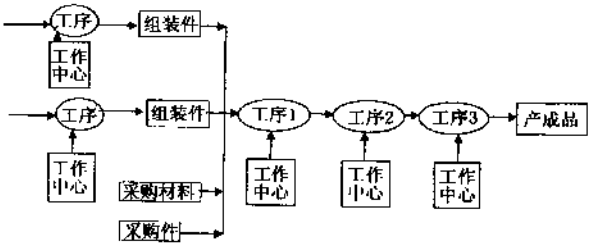


图 5-6-2 工艺流程、工作中心和物料清单之间的关系

可以用图 5-6-2 说明工艺流程、工作中心和物料清单二者的关系。

5.6.2.5 提前期

①物料的提前期(包括自制件和采购件)是从初始定单下达开始到该物料入库可供使用为止的时间期。

②采购提前期是从发出采购定单开始到采购物料入库为止的时间期。

③累计提前期包括加工提前期、采购提前期和装配提前期。

④总提前期包括设计提前期、生产准备、累计提前期和销售提前期。

提前期包括了制造工艺时间和管理事务处理时间在内的经验数据。实践中要不断调整优化各种参数。

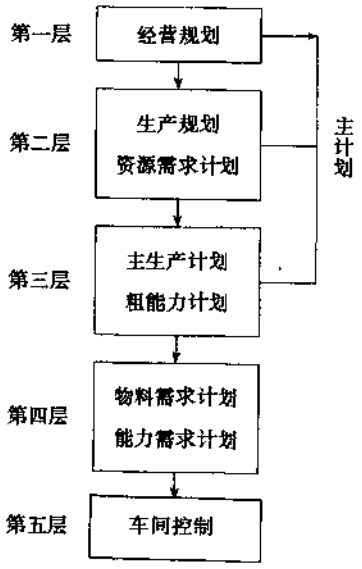


图 5-6-3 MRPⅡ计划管理层次

5.6.2.6 库存数据

MRPⅡ需要的库存数据，一部分在项目主文件中提供，包括各种物料的提前期、安全库存量和批量策略；一部分是动态数据，包括现有库存量、已经分配或预留的库存量及计划接受量。

5.6.3 MRPⅡ的功能

5.6.3.1 技术管理

包括企业设计部门、工艺部门的工作，如建立和维护物料清单、设计修改单、工作中心和工艺流程等。

5.6.3.2 计划管理

MRPⅡ系统的计划管理层次分五层，如图 5-6-3 所示：

·经营规划

·生产规划

·主生产计划/粗能力计划

汽车论坛 http://www.qclt.com

·物料需求计划/能力需求计划

·车间控制

1）经营规划

确定企业经营目标和经营方式，包括市场销售预测、利润、投资、产品类型资源、（技术、生产能力、资金）等。

经营规划跨度2~7年，计划周期6个月至1年。

2）生产规划

根据经营规划中的市场目标，编制生产规划。

内容包括产品大类生产数量、资源（类型、等级、可能性）、设备和人力水平、库存水平等。

为了验证生产规划的可行性，应进行资源需求计划，分析现有工厂设施、设备、库存水平、人力等情况能否满足生产规划的要求。

生产规划的跨度为1~3年，计划周期1~3月。

3）主生产计划（MPS）/粗能力计划

（1）主生产计划的作用

主生产计划根据客户合同和市场预测，把生产规划或营销计划确定的产品大纲或产品系列具体化，使之成为展开物料需求计划和能力需求计划的主要依据。它类似于传统的台份计划。

在计划方法上，编制主生产计划要同时运行粗能力计划，保证计划可行。

（2）主生产计划的对象

①最终产品；

②备品配件；

③产品变形；

④选装件、套件。

（3）时间要素和主生产计划的变更

①主生产计划编制中要应用几个时间要素

a. 计划期或称计划展望期、计划水平期，说明主生产计划能计划多长时间。为了便于安排产品开发或生产准备计划，计划期通常不短于产品的总提前期，如1年以上。

b. 时段，说明计划期分段能分多细。时段的长度可由用户设定，一般为周，也可为日。时段的划分可以变长，可按需要任意划分时段，如近期时段细分为日或周，中远期划分为月或季。

一般MRPⅡ系统的计划报表可显示40个左右时段。它与传统的年/季/月度计划不同，它是一个按时段长度显示各期间的产出量的计划报表。

c. 时区和时界。这是主生产计划人员控制计划变动的限定条件，以获得比较稳定的主生产计划。

3个时区的划分——在计划期内最近的计划期，其跨度等于或不小于最终产品的总装配提前期称为第1时区；把稍后的计划期，其跨度等于或略大于最终产品的累计提前期（仍以第1时段起点算起）称为第2时区；第2时区以后的计划期称为第3时区。

需求时界和计划时界——1、2时区的分界线称为需求时界。2、3时区的分界线称为计划时界。

②主生产计划的变更

主生产计划既应可行，又能应变，还不能频繁变更，否则，涉及到正在执行中的计划时，变更计划会给企业带来损失。MRPⅡ的计划变更的时间跨度规律是：

a. 短于需求时界的计划已在进行最后总装阶段，除非有紧急情况，一般不宜再做变动。一旦变更计划，损失较大，需要高层决策人员参与。

b. 在需求时界和计划时界之间的计划已经确认，一些物料已经下达定单，资金已经投入。这时的计划需要变动，必须由主生产计划员来控制，不应由系统自动生成。

c. 在计划时界以外也即第3时区内的计划，允许系统自动变更。

时区、时界和计划变更规律的关系简图见图5-6-4。

汽车论坛 http://www.qclt.com

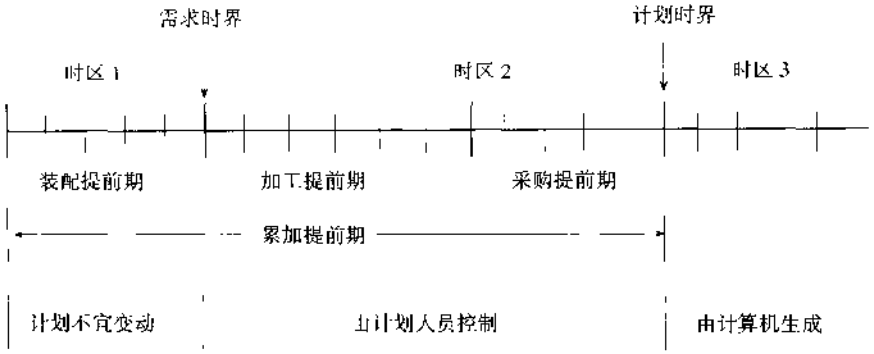


图 5-6-4 时区、时界和计划变更规律的关系简图

(4) 主生产计划报表的计算

报表的计算步骤如下：

①根据市场预测需求量和客户合同定货量，计算出 MPS 毛需求量；

②确定计划接收量，即正在执行的定单或已被确认的定单数量；

③计算预计可用库存量（PAB），公式如下：

PAB = 本时段初结余库存量（上一时段余额结转）+ 本时段计划产出量 + 本时段计划接收量 − 本时段毛需求量

④计划定单和计划定单的下达。

当 PAB 出现负值时或小于安全库存量时，该时段要确定计划定单，计划定单数量为生产批量的整数倍。再考虑到产品的提前期，计划定单下达应在确认的计划定单前的某个时段（提前期）内。

⑤计算可供销售量。

在某些时段内，计划产出量超出真正需求的合同量，多出的差额可供销售。

MPS 的典型报表如表 5-6-1 所示：

表 5-6-1 MPS 典型报表

项目编号：AB2000　　计划日期：1997/05/19

物料名称：　　产品计划员：

提前期：2　　批量：20　　需求时界：6

现有库存：3　　安全库存：5　　计划时界：3

项目编号：AB2000		1	2	3	4	5	6	7	8	9
预计需求量		16		23	21			27		10
客户合同定货数量		6	4	22	2	5	6			
MPS 毛需求量		16	4	23	21	5	6	27		10
预计可动用量 (PAB)	3	7	3	0	−21	14	8	−19	1	−9
					19			1		11
计划定单					40			20		20
计划接收量		20								
确定的计划定单				20						
计划定单下达		20	40			20		20		
可供销售量（ATP）		11		0	27			20		20

(5) 粗能力计划（RCCP）

在编制主生产计划时，同时要计算 MPS 的能力需求，这时编制的能力需要称为粗能力计划（RCCP），通常只考虑关键工作中心及相关的工艺路线是否满足能力需求。

4）物料需求计划 MRP/能力需求计划

MRP Ⅱ系统的物料需求计划 MRP 是依据主生产计划所列的产品数量，根据 BOM 表的产品结构关系和库存状况，按时段，同时编制出零部件和原材料的采购和加工详细进度计划。

MRP 的运行系统示意图如图 5-6-5。

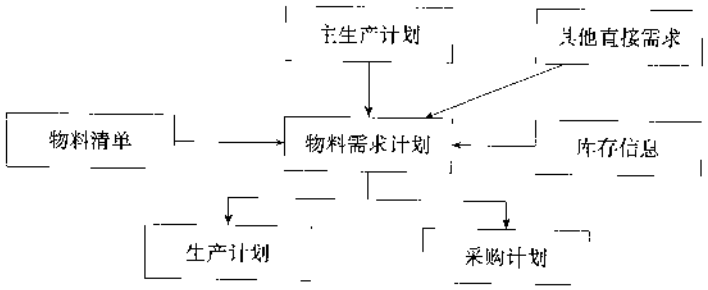


图 5-6-5 MRP 的运行系统图

（1）物料需求计划的功能

①能按零部件同时下达加工任务单及采购定单，并具有反馈功能。

②是时段计划。每个计划时段由人来确定，可定为周或日。计划时间跨度可为半年或 1 年。

③允许不断修改，是滚动计划。修改计划有两种方法：

a. 重排法：可定期重排整个物料需求计划。重排时，把变化因素考虑进去。

b. 净改变法：计划总体不变，只对需要改编部分调整。

④具有模拟功能预测可能发生的问题；能并行计算出多种变更方案，供计划人员选择。

（2）物料需求计划报表的计算

①MRP 的计算的准备数据有：

a. 主生产计划；

b. 其它独立需求项目。如备品备件；

c. 上述两项的物料清单；

d. 库存信息。包括物料的提前期、安全库存、批量策略、现有库存、已分配量、以及计划接收量。

②预计毛需求量的计算。其公式如下：

预计毛需求量＝父项计划的计划产出量×BOM 中的单位需求数量

在产品结构比较复杂（层次多）的情况下，MRP 展开时，要先计算出父项（上一层）计划的计划产出量（包括数量和需求时间段），才能得出本层次物料的毛需求量。

③计算预计可动用量（PAB），公式如下：

预计可动用量 PAB＝该项目的现有库存余额－已经分配量＋计划接收量－本期的需求量

④计划定单和确认计划定单。

在上述计算中，如果 PAB 小于零或安全库存量，MRP 系统会在该时段生成计划定单数量，并根据提前期安排在前几个的时段内。

MRP 的典型报表如表 5-6-2 所示。

计划定单是 MRP 展开时生成的，它会因各种情况而自动调整甚至取消。如果该计划定单经计划人员手工确认可行，则计划定单就变成确认计划定单。

（3）能力需求计划（CRP）

在物料需求计划展开后，MRP Ⅱ系统要对生成的计划定单进行详细的能力需求平衡。深度是检查到

汽车论坛 http://www.qclt.com

所有工作中心，时段为日/时。

表 5-6-2 MRP 工作样表

物料编码：	提前期：	批量策略：						
安全库存：	现有库存：	已分配量：						
项目编号：	1	2	3	4	5	6	7	8
独立需求量								
毛需求量 1								
毛需求量 2								
……								
合计毛需求量								
计划接收量								
预计可动用量 PAB								
预计净需求量								
计划定单								

能力需求计划把计划定单转换为能力需求数量，求出生产这些物料在各个时段要占用工作中心的工时，再与工作中心能提供的工时数相比较，生成能力需求报表。这个报表也可用直方图方式表示，如图5-6-6所示。

当能力需求超负荷时，由计划人员进行调整，一般调整 MRP 计划或工作中心能力，或预先安排加班加点。

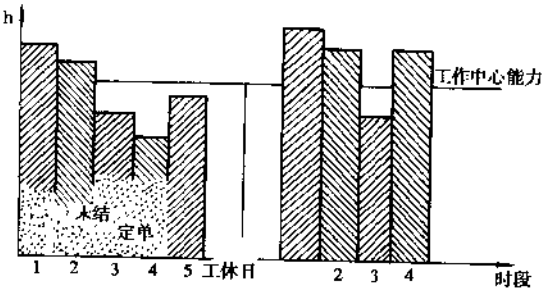


图 5-6-6 能力计划示意图

5）车间作业控制 SFC

车间作业控制工作内容一般分四个方面：

①车间定单的下达。

MRP 生成的计划定单，按采购件和自动件分类，生成车间定单和采购定单。下达车间定单时要生成车间作业文档包括车间定单、工票，领料单和工艺路线单等。

②调度/优先级控制。确定下达的车间定单的作业顺序。

③能力控制（投入/产出控制）。解决拖期、短缺在制品库存等问题。

④生产信息及时回报计划及营销系统。

5.6.3.3 物料管理

1）物料管理的特点

物料管理集中了企业整个物流全过程的所有管理功能，从采购到生产物料，到全部在制品的计划和控制，到产成品的入库、发货和分销。

MRP Ⅱ系统改变了过去由不同部门分管库存的模式，由一个物料部门统管所有的物料，如库存控制、

物料搬运、厂内外运输、外协外包、废材利用、采购供应等，并由一个物料经理统一领导。

物料统管有利于协调这些职能工作，杜绝各行其是、推诿扯皮，为企业带来更好的管理效率。

2）库存管理

（1）库存控制，强调合理的库存和控制库存费用。

①库存类型：合理库存通常包含以下五种类型。

·安全库存

·储备库存

·批量库存

·在途库存

·周积库存

②库存费用，考虑以下四个因素：

·物料价值

·定购费用：如合同、洽谈、运输、搬运、验收等费用；

·保管费

·短缺费用

（2）定货批量

MRPⅡ系统最常用的批量规律有四种：静态方法有固定批量法和经济批量法，动态方法有因需定量法和定期定量法。

3）ABC 分类和循环盘点

MRPⅡ系统把物料分成 ABC 三类。统计发现，占品种数约 20% 的物料，其价值占企业库存物料总价值的 80%；而占品种约 80% 的物料，其价值只占总价值的 20%。

表 5-6-3 说明了 A、B、C 物料的划分和库存盘点的要求，表中的数字仅是举例，各企业应有差别。

表 5-6-3 A、B、C 物料划分及盘点间隔的关系

分 类	数量比例（%）	价值比例（%）	盘点周期
A	10～20	60～80	月
B	15～30	15～30	季
C	60～80	10～20	年

有的 C 类物料，因生产关键或不易采购等原因，也应列入 A 类。

MRPⅡ为了实现准确的库存记录，采取了循环盘点库存的方法。其具体做法是：根据物料的 ABC 分类，确定各种物料的循环盘点次数（如 A 类月盘、B 类季盘、C 类年盘）。系统每天生成盘点任务卡后，上面标明每天需盘点的物料项目、库位、现有库存帐面数量等；盘点人员据卡实际盘点，把实际库存量填入卡片、输入计算机；计算机据此生成盘点报告。

循环盘点的优点是：盘点不中止库存出入业务；突出重点管理；能及时发现问题，提出原因；保证库存记录准确性。

4）采购管理

采购管理的程序如下：

（1）建立供应商主文件。包括供应商名称、联系人、联系地址、商品、价格、供货记录、质量检验等。系统只执行向有文档记录的供应商下达采购定单。

（2）生成请购单。根据 MRP 生成的建议采购单，拟定采购计划。

（3）经过确认审批通过后，形成正式采购单下达。

汽车论坛 http://www.qclt.com

(4) 与供方签合同，确定交货条款（价格与付款条件、批次、运输方式、交货地点等）。

(5) 验收入库（与合同核对）。

(6) 付款结算（与合同、发票、采购单、验收单核对）

5.6.3.4 产品成本与分析

衡量企业生产管理水平最终归结到企业的经济效益，产品成本与分析是发展到MRPⅡ系统阶段的标志。MRPⅡ又称为制造成本法。

MRPⅡ是企业物流、信息流和资金流的统一，物流经过的每一监控点都设有帐户。它在财务管理上的功能分3大类：①成本计算和产品成本累计；②成本合计；③总账、应收账、应付账。

1）建立分类帐户：

①库存帐户；

②约定的财务往来帐户；

③总在制品帐户；

④易耗品帐户；

⑤有关的企业内部金融帐户的接口。

2）成本计算和产品成本累计

①计算方法：根据BOM表的树型结构，采用汇总回归法或逐层上滚法（滚加法），来计算成本。

②成本分类：

a. 标准成本：用上述方法计算所得，通常半年或一年不变。

b. 现行成本：计算同标准成本，但随BOM表或工艺流程的变更而变化。

c. 建议成本：是为了模拟目的所拟定的预计费用，为下一年度制定的标准成本作准备。

3）成本会计

成本会计的任务是：

①建立和维护一系列有财务往来的分类帐户。

②建议和维护职工记录，主要是标准的班次时数和标准工资率。

③建议和维护工作中心记录中的标准工资率和分摊系数。

④监视库存值。审核和分析流动资金占用以及月末结清生产费用分类帐。

⑤平衡人工费。

⑥差异入帐。对各种差异审核、入帐和结清任务单。

⑦过账到企业的总分类账。

4）总账、应收账、应付账

①应收账子系统掌握企业在产品销售、技术服务、劳务等业务过程中产生的应收帐情况，客户实际回款及发票使用情况、坏帐情况。通过分析，及时评估客户信誉，了解资金占用，以便采取相应措施。

②应付帐子系统掌握采购发票及各供应商的应付款和实际付款情况，以便根据企业现有资金情况，合理支付欠款。

③总帐子系统完成全面的会计核算业务，实现企业内部的资金监控，应用核算等。（撰稿人：胡金芳）

5.7 生产自动系统

5.7.1 可编程序控制器（PLC）

5.7.1.1 概述

可编程序控制器（PLC）是在工业环境中使用的数字操作的电子系统。它使用可编程存贮器内部储存

汽车论坛 http://www.qclt.com

用户设计的指令，这些指令用来实现特殊的功能，诸如逻辑运算、顺序操作、定时、计数以及算术运算和通过数字或模拟输入/输出来控制各种类型的机械或过程。

当今 PLC 具有采集和处理大量数据、完成数学运算与其它智能器通信的能力，具有先进的人机对话手段（包括语音对话），广泛应用于单机和生产线的自动化，乃至工厂的生产自动化。从柔性制造系统，工业机器人到大型分散型控制系统，PLC 都发挥重要作用。

目前，PLC 向大型和超小型两个方向发展。

大型产品的 I/O 点数超出 4 000 点，有些达到 8 000 点，用户存储容量超过 32kB，配置各种智能模块和通信模块，扫描速率超过 0.47ms/kB，指令功能上，除了基本的运算控制外，还有浮点运算，PID 调节功能、图形组态功能、网络和通信指令等。编程普遍采用梯形语言，同时也使用语句表和顺序功能图语言。在设计上考虑了容错和冗余技术等。

PLC 的软件实现模块化设计，提供大量功能模块，用户通过简单的功能调用就可实现复杂的控制作业。使用的编程器更加完善，除专用编程器外，很多 PLC 可用通用微机实现编程。

PLC 具有的特点有：

①控制程序可变、柔性好；

②可靠性高，适于工业环境。PLC 的平均故障间隔时间（MTBF）一般可达 5 年以上；

③功能完善；

④易于掌握、便于维修；

⑤体积小，省电；

⑥价格低廉。

5.7.1.2 PLC 的硬件组成

1）PLC 的系统结构

图 5-7-1 为 PLC 系统的结构框图。

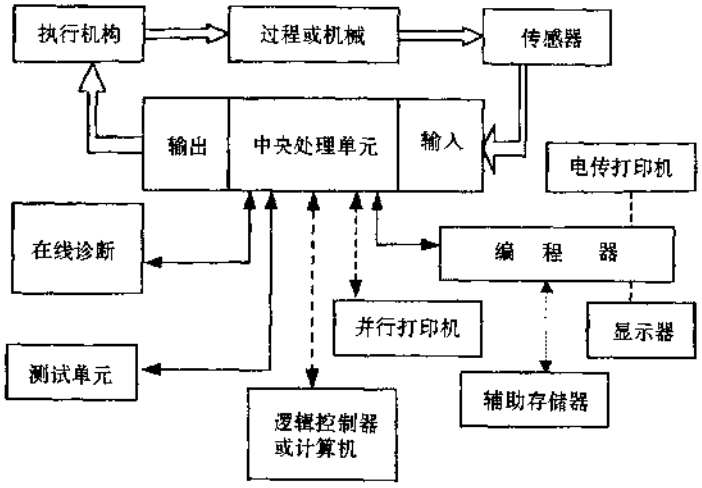


图 5-7-1 PLC 系统结构框图

PLC 控制的是“过程”或“机械”，由传感器采集信息，送到 PLC 的输入单元，经 PLC 处理，结果通过 PLC 的输出单元驱动执行机构，执行机构控制“过程”或“机械”。

PLC 由中央处理器、中央存储器和输入输出接口三部分组成。具体组成见图 5-7-2PLC 的 CPU 结构框图。

2）PLC 的工作原理

PLC 的程序是自动循环执行。程序一开始，扫描和采集输入模块上各输入变量的数据，送到中央存储器的输入变量区，接着执行用户程序，把运算结果送到输出变量区，再送到输出模块去控制具体过程。然

汽车论坛 http://www.qclt.com

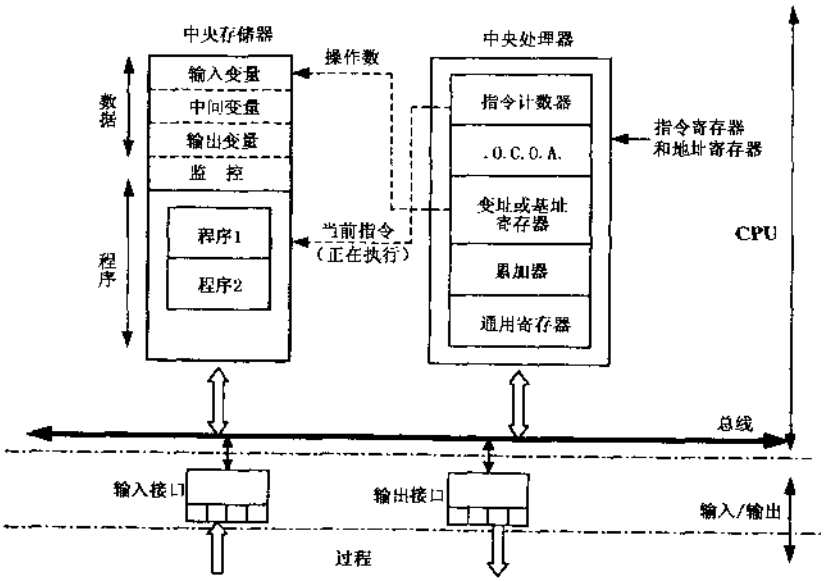


图 5-7-2 PLC 的 CPU 结构框图

后又回到循环起点，周而复始。

3）输入输出（I/O）接口

常用的 PLC I/O 接口分为：

①直流开关量输入模板；

②直流开关量输出模板；

③交流开关量输入模板；

④交流输出模板；

⑤继电器输出模板；

⑥模拟量输入模板；

⑦模拟量输出模板；

4）智能 I/O 模板。

现代高档的 PLC 系列，一般都配置有智能 I/O 模板。它是指模板自身有单独的处理器芯片，能完成某种专用的功能。它可接受 PLC 主 CPU 的命令，通过驻留在模板上的程序或软件功能块，完成主 CPU 所要求的工作，它和 CPU 平行作业，这样提高了 PLC 运行速度，节省主 CPU 的开销。

主要的类型有“计数和位置编码器模板”、“温度控制模板”、“阀控制模板”、“轴定位模板”、“闭环控制模板”等。

5）远程 I/O 模板

当 PLC 所控制的对象分布范围较大时，可采用远程 I/O 模板。它就近放置在远距离的被控对象附近，每一组单元可控制 16 个到 256 个 I/O 点不等，每组单元用双绞线与中央处理器框架连接。传送距离可达 6km。

PLC 的编程器是作为编程和开发应用程序的工具，是人与 PLC 对话的媒介，介入 PLC 和过程控制的手段。

现有的 PLC 编程器大致为三种，一种是小型的手握式编程器；一种是高功能编程器，配置相当于一台微机；另一种是采用微机作为编程器。

5.7.1.3 PLC 编程语言

在 PLC 中最常使用的编程语言是梯形图 LDL 和语句表 STL，以及 GRAFCET 语言。

梯形图语言类似于传统的继电器控制线路图，适合解决逻辑控制任务。

语句表，又称指令表语言，是将梯形图以语句形式表示，指令使用助记符，类似于汇编语言。它适于手握式编程器将程序输入到可编程序控制器中。

GRAFCET是一种图形编程语言，它是把一个PLC程序组织单元划分成一组由相互连接的“步”和“转移”的方法。与每个步有关的是一组“动作”，与转移有关的是一个转移条件。

GRAFCET语言使PLC编程系统化（自顶向下、分层、可控），使程序便于理解、维护、诊断。

5.7.2 数控设备

5.7.2.1 数控设备的结构

数控设备是指通过数字化操作指令进行控制的一种设备，其基本结构框图如图5-7-3所示。

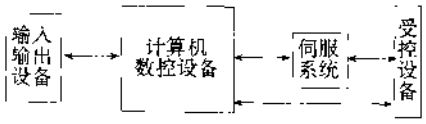


图5-7-3 数控设备基本结构框图

5.7.2.2 数控设备的分类

①按受控设备的工艺用途分类，可分为：

a. 普通数控机床；

b. 加工中心机床；

c. 多坐标数控机床；

d. 数控特种加工机床，如数控线切割机、数控电火花加工机床等。

②按受控设备的运动轨迹分类，可分为点位控制、直线控制、轮廓控制系统。

③按伺服系统的控制方式分类，可分为开环控制，闭环控制、半闭环控制、混合控制（开环补偿型、半闭环补偿型）。

5.7.2.3 计算机数控系统（CNC）

计算机数控是在硬件数控的基础上发展起来的，其控制功能部分或全部由软件实现。因此，CNC系统有很好的通用性和灵活性。

CNC系统根据输入的程序，由计算机进行插补运算，形成理想的运动轨迹，其位置数据输出到伺服单元，控制电动机带动执行机构，加工出所需的零件。

1）CNC系统的基本构成（见图5-7-4）

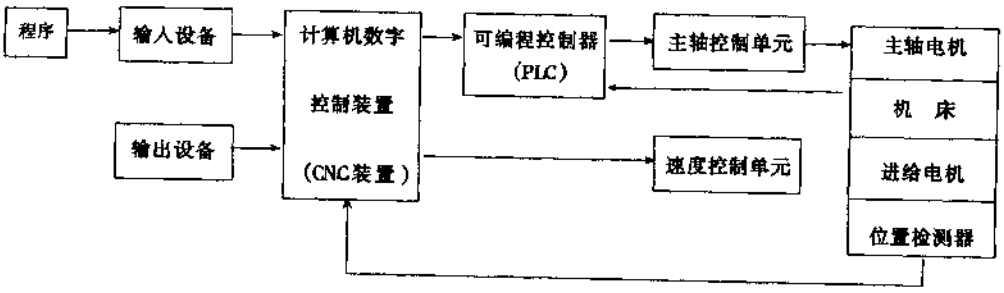


图5-7-4 CNC系统框图

2）CNC系统软件

CNC系统软件由管理软件和控制软件组成。管理软件包括输入输出处理、显示、诊断等。控制软件包括译码、刀具补偿、速度处理、插补运算、位置控制等。

在插补运算方面，普通CNC装置仅具有直线和圆弧插补功能，高档CNC装置还具有抛物线、螺旋线插补功能。目前，曲面直接插补技术能进行曲面轮廓的直接控制，实现高速高效高精度复杂曲面加工。

汽车论坛 http://www.qclt.com

5.7.2.4 数控自动编程

数控机床程序编制主要包括：分析零件图样、工艺处理、数学处理、编写程序单、制作控制介质和程序检验。自动编程时，程序员根据零件图样的要求，按照NC语言的规定，编写零件源程序，输入计算机进行自动编程，以得到零件加工程序和控制介质（如穿孔带）。

5.7.2.5 发展动向

数控设备不断采用最新技术成果，朝着高速高精度化、多功能化、智能化、小型化、系统化与高可靠性等方向发展。

1）高速高精度化

①采用以通用32位工业控制机为核心的开放式体系结构。实现了在最小位移单位0.1μm的情况下，最大进给速度为100m/min。

②提高主轴转速的手段是采用高速内装式主轴电机，将转速提高到4000～5000r/min。

③提高分辨率，交流伺服电机的位置检测精度能达到0.01μm/脉冲；位置伺服系统采用前馈控制与非线性控制等方法。

④在补偿技术上，除采用齿隙补偿、机械螺距误差补偿和刀具补偿外，还采取热补偿技术。

2）多功能化

采用多系统混合控制方式，用不同的切削方式（车、钻、铣、攻螺纹等）同时加工零件。数控设备的控制轴数多达15轴，同时联动轴可达6轴。

3）智能化

①引进自适应控制技术AC。

数控系统能测量到某些加工状态的参数（如切削力、材料特性变化、刀具变形等），及时对主轴转速、进给速度等进行修正，从而使加工过程处于最佳状态（如提高加工精度、表面粗糙度和生产率等）。

②具有三维仿真校验和加工过程图形动态跟踪过程，使图形显示形象直观；并采用汉字用户界面，提供完善在线帮助功能。

③增加人机会话自动编程功能、建立切削用量专家系统和示教系统，在WINDOWS环境下，采用先进的5C（Computer、Control、Communication、CRT、C/C++语言）技术开发监控和编程系统。

④设置故障自诊断和保护功能。

4）小型化和系统化

超大规模集成电路及彩色液晶显示屏的应用，使CNC装置进一步小型化，可方便把它们装在机械设备上。

同时，现代化工厂正逐渐应用柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造系统（CMS）等高新技术。数控设备为适应新技术发展，实现上下级CNC之间的通信，建立起通信局部网络LAN，使各种机种互通信息，促进系统化和集成比。

5.7.3 工业机器人

在汽车行业，工业机器人的应用广泛，主要用于喷涂、喷釉、点焊、弧焊、装箱、搬运、码垛及装配等作业。在汽车装配工位上，机器人能装配车轮、备胎、挡风玻璃、仪表盘总成、后悬架、车门等。使用机器人着重于改善劳动环境，提高产品质量和劳动生产率。

5.7.3.1 工业机器人的分类

1）按坐标形式分类，主要有：

①直角坐标型机器人；

②圆柱坐标型机器人；

汽车论坛 http://www.qclt.com

③球坐标型机器人；

④关节型机器人；

2）按控制方式分类，可分为：

①点位控制工业机器人；

②连续轨迹控制工业机器人。

还有按技术进程、驱动方式、用途等进行分类。

5.7.3.2 工业机器人的驱动系统

1）驱动系统的分类

驱动方式主要有液压驱动、气压驱动和电气驱动三种基本类型。这三种驱动方式又有直线型和旋转型。工业机器人应用初期，大多使用液压和气压驱动方式，目前主要使用电气驱动机器人。表 5-7-1 为工业机器人驱动系统分类。

表 5-7-1 工业机器人驱动系统分类

驱动方式	液压	气压	电动
直线型	活塞液压缸	伸缩软管、气缸	音圈电机、直线电机
旋转型	旋转马达	气压马达、涡轮	直流伺服电机、交流伺服电机、步进电机

2）各种驱动方式的特点及比较，见表 5-7-2

表 5-7-2 各种驱动系统的特点及比较

比较内容 \ 驱动方式	液压驱动	气压驱动	电气驱动	
			交、直流电机	伺服电机、步进电机
输出力	大	小	大	小
控制性能	可无级调速，反应灵敏 可实现连续轨迹控制	精确定位难 低速不易控制	较差，不易精确定位	好，能精确定位 控制系统复杂
体积	小	较大	较大	较小
维修及使用	方便，对环境温度有要求	方便	方便	较复杂
环境影响	易漏油，易燃	排气有噪声	无	无
应用范围	适于重型低速驱动	适于中、小型 快速驱动	适于抓重大而低速的 中重型机器人	适于严格控制运动 轨迹的中小型机器人
成本	较高	低	低	较高

3）工业机器人的示教、编程及语言

汽车论坛 http://www.qclt.com

(1) 示教再现技术

为使机器人完成规定的任务，可把作业要求的内容预先教机器人，进行这种操作称为示教。使机器人按示教的内容动作称为再现

机器人示教有示教盒和手把手二种方法。

①示教盒示教

示教盒是一个手提式的以微处理器为基础的单元，有字符数字显示和许多按键供操作者移动操作人手臂或输入各种功能和数据。

②手把手示教

人工手把手引导机器人的末端执行器通过所要求轨迹的示教称为手把手示教。它主要用于连续轨迹控制的机器人，适用于喷漆、弧焊、密封和抛光等作业。

(2) 离线编程技术

部分或完全脱离机器人，借助计算机来编制机器人程序，称为离线编程。它能完成示教难以完成的复杂、精确的编程任务，并通过图形编程系统的动画仿真验证和优化程序。

(3) 编程语言

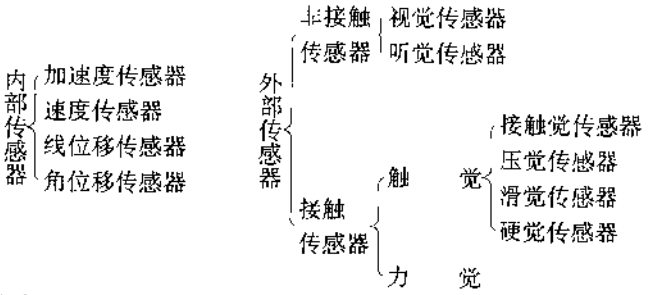
机器人语言是供用户编写机器人程序的专用计算机语言。

机器人编程分为四个等级（由低到高）：关节级、操作机级、物体级、目的级。现在目的级语言还不成熟，大多是以通用语言或数控编程语言发展而来的较低级实用语言。使用较广的有 VAL-II 和 AML 两种编程语言。

4) 工业机器人的传感器

机器人准确的操作决定于对其本身状态、操作对象及作业环境的准确认识，这完全依赖于传感技术。

机器人传感器按其用途可分为内部传感器和外部传感器。具体分类如下：



(1) 机器人内部传感器

内部传感器检测机器人自身状态。它包括位置、速度、加速度等传感器。

①位置传感器主要检测机器人的零位和极限位置，采用微动行程开关、精密电位计或光电开关。

②位移传感器分为线位移和角位移两种，位移传感器一般安装在机器人各关节上，检测其位移量。位移传感器采用差动变压器式、旋转变压器式、感应同步器式、光栅、磁栅、光电增量码盘、光电数字式编码盘等。

③速度和加速度传感器是实现机器人各关节的速度闭环控制和加速度控制，采用应变式或压电式加速度传感器。

(2) 机器人外部传感器

外部传感器检测器人作业对象和作业环境。如判别机器人抓取对象的形状、空间位置、周围是否有障碍等，它包括触觉、视觉、听觉传感器。

①触觉传感器

在机器人外部传感器中触觉传感器种类多、应用广。它包括接触觉、压觉、滑觉、力觉等，都是以力传感器为基础的。它主要检测机器人与作业对象之间的接触情况、力的大小、相对位移等。

②接近觉传感器测试机器人与操作对象的距离或图像信息。目前使用光电式、超声波式、涡流式传感

汽车论坛 http://www.qclt.com

器，也有气压或电容式传感器。

③视觉传感器检测操作对象的空间位置和图像特征，一般包括照明、接收、光电变换、扫描等四个部分；它基本上采用固体摄像元件，其元件分为MOS型、CCD型及其混合型三种。目前还有光导纤维视觉传感器。

5）发展趋势

当前，工业机器人技术发展表现在机械系统性能的提高和控制系统的智能化。在伺服控制上，逐渐采用全数字式交流伺服控制替代相对落后的直流伺服控制。

机械系统性能，须进一步提高工业机器人的运动精度、运动速度和响应频率、手臂的灵活度和避障能力，手爪和手腕的操作能力；加强机器人的移动功能等。

控制系统的智能化，要综合提高传感器等元件技术，运用现代控制和模糊控制等技术，进一步发展具有感知功能的第二代电脑程序自动机器人，而且要使机器人具有一定的决策和规划能力，即发展第三代从感觉信息到处理信息的模拟器官智能型机器人。（撰稿人：胡金芳）

5.7.4 自动化立体仓库

5.7.4.1 自动化立体仓库的定义和用途

仓库内物品堆垛、搬运实行自动化，操作人员遥控操作。近年来为适应多品种批量生产的需要，自动化立体仓库使用越来越多。

5.7.4.2 自动化立体仓库的分类

按货架承载形式分为：整体式和分离式。按货架高度分为：低层（5m以下）；中层（5～12m）；高层（12m以上）。按规模可分为：小型（库容量2 000个托盘以下）；中型（库容量2 000～5 000个托盘）；大型（库容量5 000个托盘以上）。按使用特点可分为：冲压件库、外购件库等。

5.7.4.3 储存方式

储存方式分以下三种：

1）固定位置方式

每个货格存放固定的物品的方式为固定位置方式。“货格存放的物品”和“物品存放的货格”明确区分，具有存取方便的特点，对体积小的物体特别适用。

2）自由定位方式

货架物品存储不固定货格的方式称为自由定位方式。“有空格就可以存储”是其特点，这种方式空间利用率不高，需要较强的库存管理，适用于大容量存储。

3）固定、自由混合方式

固定（出库）和自由（入库）各占各的位置，也可将自由位置移到固定位置的货架上。这样有“索取方便和利用率高”的两个优点，但限于特殊用途。

4）自动化立体仓库的构成和堆垛机性能

主要构成如下：堆垛机、货架、周边设备、电气控制设备及信息处理系统、建筑物。表5-7-3表示自动化立体仓库堆垛机的基本性能。

表5-7-3 堆垛性基本性能

行走速度	60～5m/min（变速器、无级变速）
升降速度	15～7.5m/min（二级换档）
货叉速度	30～5m/min（变速器、无级变速）
安全装置	防止落下、检查货物破损、防止重复放入等

汽车论坛 http://www.qclt.com

5.7.4.4 应用实例

近年来，很多汽车装配工厂使用的自动化立体仓库，如图 5-7-5 所示。撰稿人：（姜文龙）

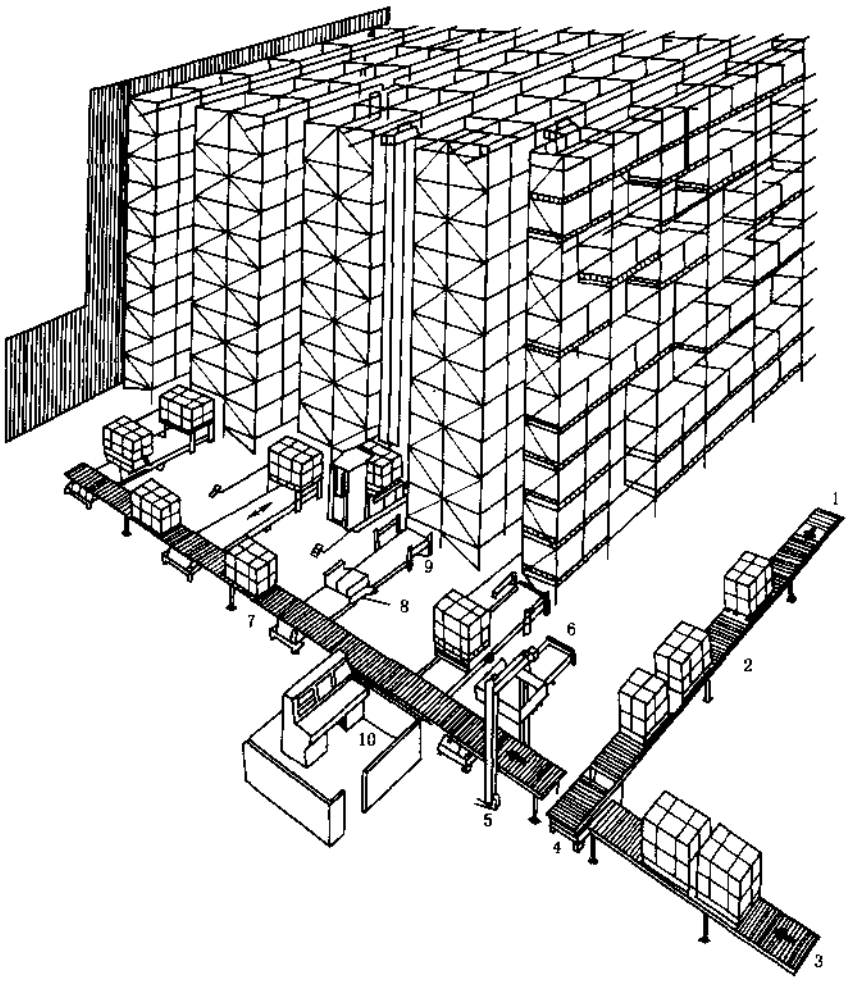


图 5-7-5 自动化立体仓库概貌

1-从生产车间输送货物的辊道输送机；2-中间贮存；3-从接受货台接受货物的重力式辊道输送机；4-转向台；5-托盘检验装置；6-不合格托盘存放段；7-输送机；8-移动式小车；9-出入库台；10-控制室

5.7.5 柔性制造系统（FMS）

5.7.5.1 概述

柔性制造系统（FMS）是在 CAD 和 CAM 的基础上，用控制和输送系统联接起来的一系列加工设备，它是能在一定范围内自动地完成不同零件的不同加工任务，使产品设计和生产制造相互结合的一种先进生产系统。

FMS 主要由电子计算机、数控机床、机器人、料盘、自动搬运小车和自动仓库等组成。它以计算机

为核心，将硬件、软件、数据库与信息结合在一起，形成一个系统，达到以下目的：

①在计算机控制下实现产品自动化制造；

②使生产过程的控制和流程规则连续，实现最佳化；

③直接调整物件流（即工件流、工具流）和制造中的各项工序；

④实现系统中材料、刀具、机床、运输、夹具及检测点的合理配置。

因此，柔性制造系统柔性良好，精度高，可靠性高，可提高生产率。FMS从简到繁逐步发展。其初级阶段是计算机数控（CNC）；后发展为柔性制造单元（FMC）；然后是柔性制造线（FML）；它是以少数几个品种工件为对象形成的一种生产线；FMS是更完善的发展。

5.7.5.2 柔性制造单元FMC

FMC是一种柔性加工生产设备。它的基本构成如图5-7-6所示。

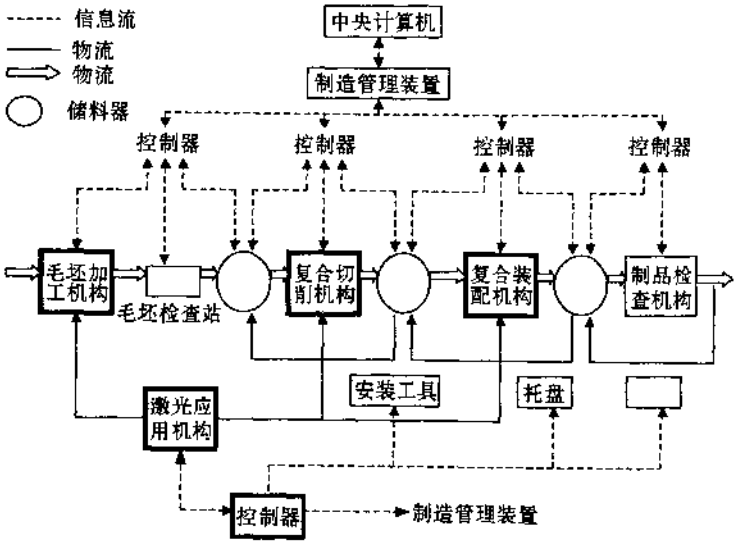


图5-7-6 FMC的基本构成框图

其主要功能包括复合切削、复合装配及产品检查功能。

FMC采用CNC控制系统，它具有以下功能：

·数据存储器能存储大量工作程序；

·按所加工对象提取相应的加工程序；

·外部修正功能，如刀具自动补偿。

5.7.5.3 柔性制造系统FMS

1）FMS的特性和基本结构

FMS是自动化制造系统，由加工系统、物流系统和信息流三大部分组成。

FMS具有四个特征：

①具有数控机床等自动化加工机床；

②具有物料（工件、刀具、切屑）自动运输和搬运机能；

③具有工件、夹具等储存管理机能；

④具有完成各工序必须的控制信息，并实现自动控制的制造系统。

FMS包括自动加工、装配、检验及其它作业，是能自动完成多品种综合加工任务的柔性自动化生产

汽车论坛 http://www.qclt.com

系统，它包括硬件和软件。图 5-7-7 为 FMS 的构成框图。

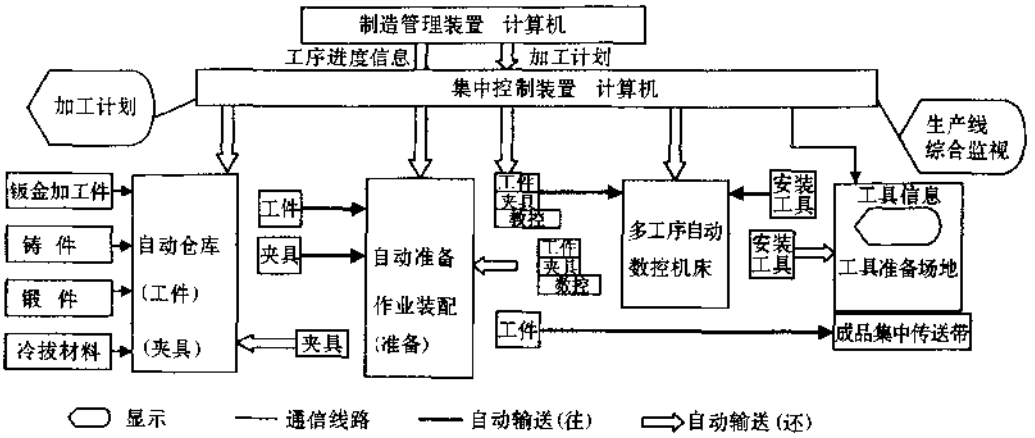


图 5-7-7 FMS 构成框图

2）FMS 的信息流系统

(1) FMS 的信息流实现两大基本功能

①过程控制：完成加工系统与物流系统的自动控制；

②过程监视：自动化在线检测、数据采集、处理和分析。

系统的核心是一个分布式数据库管理系统和控制系统。

(2) 对加工系统的控制和监视

①控制的功能，包括：

·实现各种自动加工工序；

·实现自动换刀；

·实现自动装料/卸料；

·控制排屑和清洗工作。

控制主要通过控制计算机或 FMS 单元控制器实现。单元控制器可以是一个和 PLC 对接的 CNC 装置，也可以是一个和 CNC 控制器对接的微型机。

②监视的项目，包括：

·测量工件尺寸变化情况；工件表面粗糙度；

·测量刀具几何形状变化；刀具的振动和噪声变化；刀具载荷变化；

·测量切削温度的变化情况；

·切屑的变形情况

检测到的数据在线反馈到计算机，系统进行综合分析，作出自动校正决断。系统有适应能力，根据专家系统分析改变切削参数或者停止机床运行发出报警。

(3) 对物流系统的控制和监视

①FMS 的物流系统包括自动小车、输送带、工业机器人、随行托板（托盘）、更换系统和托板输送系统、叉车和工件缓冲储料装置等。

物流系统一般由输送系统、储料系统、操作系统等三部分组成。

②对输送系统的控制和监视：

输送系统和输送方式可分为单向、往复和环流输送三种；

控制方式分为距离式、分散式和集中式路程控制三种。对物流输送最基本控制是识别标记、优化输送路线、控制输送速度。

③对储料系统的控制由管理生产的计算机实施，具有自动存取功能。

(4) 对物流操作系统的控制

物流操作系统的作用是改变物料在物流中的方向和位置。自动运行的控制涉及到对象识别、位置识别和控制掌握方面。

3) FMS的实施

实施FMS是一项较复杂的系统工程，它涉及到系统设计、机械、电子、计算机以及生产管理等各个方面。

实施过程一般应有以下几个阶段：概念设计（或称可行性分析）；详细设计；软、硬件配置、安装和调试；试运行和生产；验收、鉴定。

在设计过程中都必须进行仿真，FMS仿真是系统实施的重要研制步骤。仿真使用一个系统模型，利用数据处理技术获得有关系统性能的信息，利用动态模拟对FMS设计和运转的不同决策作出评价。

为了实行FMS仿真，有必要应用通用的仿真语言。GPSS是高度结构化的专用仿真和面向动态实体的语言，适于对排队网络模型进行仿真。SIMSCRIPT、SLAM、GAPSP等高级仿真语言，其结构专为简化模型而设计，使问题直观，易于掌握。

5.7.6 网络系统

在生产自动化系统中，人们努力把可编程序控制器、数控设备、工业机械人、无人搬运小车、自动化仓库与柔性制造系统有机地结合起来，实现从单体自动化向系统自动化的发展；而且，人们努力把现代企业的物流、信息流和资金流集成起来，实现现代集成制造系统。其关键的支撑环境是网络系统，即计算机网络。

计算机网络（Network）利用通讯设备和线路将不同地理位置上具有独立功能的多个计算机系统互连，以网络软件（即网络通讯协议、信息交换方式及网络操作系统等）实现网络中资源共享和信息传递。

5.7.6.1 网络的类型

按照联网的计算机所处位置的远近不同，网络可分为局域网(LAN)和广域网(WAN)。其特点如表5-7-4所示。汽车工厂内部一般构成局域网。但随着跨地域集团公司的发展，以及全球性销售网点的建立，网络正朝着由若干局域网组合成广域网的方向发展。

表5-7-4 局域网与广域网的主要特点

	局域网	广域网
连接距离	近，最远几十公里(光纤)	远，全球
传输速率	可达200M/s	几千字节/秒，几兆/秒
传输介质	双绞线、同轴电缆，光纤等	电话线、专线、微波、无线电等
通讯协议	IPX/SPX、NetBEUI、TCP/IP、NFS、DLC等	TCP/IP等
联网硬件	网卡、收发器、集线器、中继器等	调制解调器，路由器等

5.7.6.2 网络的体系结构

网络的体系结构是通讯系统的整体设计。它为网络硬件、软件、协议、存取控制和拓扑提供标准。

汽车论坛 http://www.qclt.com

1)网络的国际标准

网络体系结构广泛采用国际标准化组织(ISO)制定的开放系统互连参考模型,称为OSI/ISO标准。该标准共分七层,分别负责数据在网络中传输一特定功能。这七层结构的内容见表5-7-5。

美国通用公司制定推广制造业自动化协议,作为处理生产信息的各种设备间的标准通信规范MAP,就是以OSI标准为依据。

表5-7-5 OSI/ISO参数模型的层次内容

层 次	层 名	结 构 内 容
第七层	应用层(Application Layer)	担任用户应用程序与网络之间的沟通,如文件传输、终端仿真、电子邮件等
第六层	表示层(Presentation Layer)	将数据转换计算机能看懂的格式(字码转换、数据压缩展开)
第五层	会话层(Session Layer)	负责两节点在正式通讯前的会话(通讯如何建立和结束)
第四层	传输层(Transport Layer)	节点到节点的数据发送
第三层	网络层(Network Layer)	处理数据(包)在多个网络上的路由选择
第二层	数据链路层(Data Link Layer)	将物理层的信号组成帧(Frame) 负责帧的传输和差错检验
第一层	物理层(Physical Layer)	处理在通讯通道上的信号传输

2)网络的拓扑

拓扑(Topology)是网络上的设备之间的连接方式。局域网拓扑类型包括总线(BUS)、星型(Star)与环型(Ring)三种。

(1)总线型拓扑

状态如图5-7-8a。单条传输线路,以广播方式交换信息,采用载波监听/碰撞检测(CSMA/CD)技术。较易增删节点和位置变动,灵活方便,但传输速率受节点个数影响,并不易查出故障点。

(2)星型拓扑

状态如图5-7-8b。多条传输线路,多点对中心点收发信息,由中枢装置控制通讯。线路管理集中,容易检错;一旦中枢装置故障,整个网络瘫痪。

(3)环型拓扑

状态如图5-7-8c。结构为环型圈,靠令牌(Token)方式单向传递信号,每个节点中继转发。优点是:网络的延迟时间基本确定,节点以有源方式相连可增加传输距离,结构和控制比较简单。缺点是:一个节点故障影响全线,增减节点不方便。

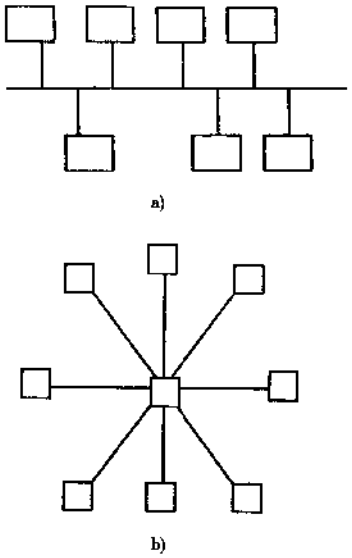


图5-7-8 网络的拓扑类型
a)总线型;b)星型;c)环型

5.7.6.3 网络的数据传输

1)传输介质

常见的有线传输介质有同轴电缆、双绞线、光纤;无线传输介质有无线电、激光、红外线、微波等。有线传输介质的特点如表5-7-6。

2)传输方式

网络的传输方式可分为基带和宽带传输两种。

基带(Baseband):整个传输介质的频宽全被同一组信号占用,一个物理传输线路上提供一个数据通道。一般的微机局域网属于基带传输,如以太网络。

宽带(Broadband):通常采用频分多路(FDM)技术将一条物理传

输线路均分为多条逻辑通道，利用调制解调技术混合或分离多组独立信号。它能将视频、音频及数字信号同时传输，而不互相干扰，如有线电视。

表 5-7-6 有线传输介质的特点表

传输介质	带 宽	受电磁干扰	传输速率	长度限制	价 格
同轴电缆	高	几乎不受干扰	10M/s	185m（细缆）500m（粗缆）	一般
非屏蔽双绞线 UTP	低	受干扰	10M/s 100M/s 155M/s（ATM）	100m	便宜
屏蔽双绞线	中等	几乎不受干扰	10M/s 100M/s（五类） 155M/s（ATM）	100m	一般
光纤电缆	极高	不受干扰	10M/s （10base-T） 100M/s（FDDI 令牌环）	2km（多模） 100km（单模）	贵

在传输方式上，还可分为单工、半双工、和全双工传输；可分为串行和并行传输。

在通信技术上可分为同步（Synchronous）和异步（Asynchronous）。

3）数据传输权

工厂内网络所使用的局域网络中，数据传输权取得的方法有碰撞侦听和令牌传送两种，每种方法各有优缺点。

（1）碰撞侦听 CSMA/CA

CSMA/CA 方法是国际 IEEE802.3 标准所定义的数据传输权取得的方法，其动作步骤如下：

步骤一：网络上任一站点在确认线路上已无数据传送，才发送数据。

步骤二：数据发出后，不断侦听数据传送状态，当数据发生碰撞时，可等待一段时间后再以步骤一方式重送。

CSMA/CA 方法简单，网络管理容易，在线路使用率低时效果好，反之传送效果差。适合于中小型网络，如以太网。

（2）令牌传送（Token Passing）

令牌传送是 IEEE802.4 所定义的标准，它是在一个封闭的回路中逐站传送一个电子令牌（Token），令牌传送谁的手中，谁就有权传输数据，因为在一个时间内只有一个站点有令牌，故数据不会碰撞。

令牌传送按星型和总线拓扑的应用，又分为令牌环 Token Ring 与令牌总线 Token Bus 两种。

这种方法效率高，适用于线路使用率高的网络，各站点可公平地取得数据传输权，数据不发生碰撞。但网络管理较复杂，设备费用较高，适用于大中型网络，如 FDDI 网络。

5.7.6.4 计算机网络技术

目前普遍采用的计算机网络技术有以太网 Ethernet、光纤分布式数据接口 FDDI、异步传输模式 ATM。

1）以太网

以太网是采用 CSMA/CD 方法的局域网技术，最初由 Xerox 公司于 1975 年研制成功。20 多年中以太网技术不断开展，IEEE 802.3 以太网标准在 1989 年正式成为国际标准。以太网是迄今最广泛的网络技术，它产生了十多种技术标准，如 10base5，10base-T，100base-T 等等。

其中 10base-T 是 1990 年通过的以太网物理层标准。它使用两对双绞线，一对发送数据，一对接收数据，用 RJ-45 模块作端接器，星形拓扑结构，布线按照 EIA568 标准，站点与中继器最大距离为 100m，速率为 10Mbps。10 base－T 价格便宜、配置灵活、易于管理，成为以太网的主流。在此基础上，又发展了 100base－T 快速以太网技术。

2）FDDI

一种环形共享介质网络，它融合了令牌环网的许多特征和管理、控制和可靠性设施。可选择的第二环

汽车论坛 http://www.qclt.com

路提高网络可靠性，速率为100Mbps支持长达2km的多模光纤。为了使FDDI能在双绞线上运行，又发展了铜质分布式数据接口CDDI和屏蔽分布式数据接口SDDI。

FDDI主干网主要使用光纤信道，其标准为ANSI X3T11，目前速度为100Mbps～1Gbps，今后将提高到24Gbps；介质类型有多模光纤（最远2km，200Mbps）和单模光纤（最远10～100km）。

FDDI在高速网络产品中是成熟的技术，标准完整，厂商支持众多。它具有高速度大容量、可靠性高、安全性好的特点。

3）ATM

一种固定长度信元交换技术，在LAN和WAN上使用统一的数据格式传输数据、声音和图像，其关键标准尚在制定中，ATM是一种正在发展的新技术。

5.7.6.5 汽车工厂的网络系统

1）工厂的网络层次

按照国际标准化组织ISO TC184工作小组提倡的工厂参照模式，其工厂网络层次可分为六层。

（1）装置阶段

可编程序控制器PLC、数控设备、机器人等装置及输入/输出之间的信号通信。

（2）工位阶段

为对上述自动化装置关联工作进行必要控制所需的通信。

（3）单元网络（小型MAP网）

网络连接对象是各生产工序内同步工作的设备（系统），如以柔性制造系统为中心的控制装置、分散设备控制系统和自动化加工系统等。

（4）区域管理网（车间管理）

实现对工序及生产线的制造过程管理以及零部件、材料管理、安全管理等，网上连接的是管理计算机。

（5）工厂阶段

管理工厂的工程设计、制造过程、生产管理等。主要采用以太网，工厂范围较大时，可采用FDDI网。

（6）企业阶段

承担全公司的经营管理。一般采用广域网。

2）企业Internert网的建立

现代化汽车制造企业利用国际网Internert技术建立起企业内部Internert网。在企业为建立高速光纤骨干网，把各专业厂、职能部门的局域网贯穿起来，能将多种不同计算机系统互联，设定多个网络、数据库服务器；既能使各专业部门子网内部通信互相独立、互不干扰，又使企业各部门之间信息畅通。企业网在客户/服务器（Client/Server）基础上利用Web技术实现客户（浏览）/主页服务器/数据库服务和应用服务器模式的三级服务体系。

企业网的应用主要包括计算机辅助信息管理系统、计算机辅助设计、制造、分析系统（CAD/CAM/CAE）和办公自动化管理系统。

5.7.7 计算机集成制造系统（CIMS）

5.7.7.1 概念

汽车行业随着时代环境的变化、科技技术的发展，不断改变其生产方式和结构，从而提高生产率和经济效益。

从1970年开始，在零件制造中逐渐采用PLC、NC加工中心、机器人、自动搬运系统等，以及自动化生产线、柔性制造系统，到1999年开始发展以工厂全部自动化为目的的无人化工厂（FA）。

汽车工厂为了迅速适应市场需求结构多样化，需要一个将经营、生产管理、制造、研究开发等信息和技术高度集成的现代制造系统，即高度利用计算机的CIMS系统。

汽车论坛 http://www.qclt.com

计算机集成制造（CIM）是一种组织、管理和企业运行的理念。它将传统的制造技术与现代信息技术、管理技术、自动化技术、系统工程技术等有机地结合，借助计算机，使企业产品全生命周期，即市场需求分析、产品定义、研究开发、设计、生产、支持（包括质量、销售、采购、发送、服务）及产品的最后报废、环境处理等各阶段活动中有关的人/组织、经营管理和技术三要素及信息流、物流和价值流（以产品上市时间T、质量Q、成本C、服务S、环境E等价值指标所体现的企业业务过程流）的有机集成，并优化运行，以达到产品上市快、高质、低耗、服务好、环境清洁，进而提高企业的柔性、健壮性、敏捷性，使企业赢得市场竞争。

我国高技术计划863/CIMS主题组，从计算机集成制造概念开始，经历了信息集成、过程集成和企业间集成的研究和实践，在应用示范工程、目标产品开发、重大关键技术和应用基础研究等四个层次上取得重大进展，提出了现代集成制造（Comtemporary Integrated Manufacturing）和理念、技术、工具与实施途径，在深度和广度上拓宽了传统CIM的内涵。

总之，CIMS的目标是建立一个提高制造企业对市场竞争具有快速应变能力的综合性自动化系统。

5.7.7.2 CIMS的组成内容

CIMS的基本模型如图5-7-9所示。

从图中可以看出计算机集成制造系统可分为总体技术(内核)、支撑技术(中圈)和应用技术(外圈)。

1）总体技术

①系统集成方法论，包括信息集成、过程集成、企业间集成及知识集成等方法论。

②系统集成技术，包括设计、生产、管理等子系统间集成技术，企业三要素和三流的集成技术。

③标准化技术，包括产品信息标准、过程信息标准、数据交换与格式标准、图形标准及零件库标准等。

④企业建模和仿真技术，包括企业功能、信息、工作流、资源和组织模型等的建立、确认及仿真技术。

⑤CIMS系统开发与实施技术。

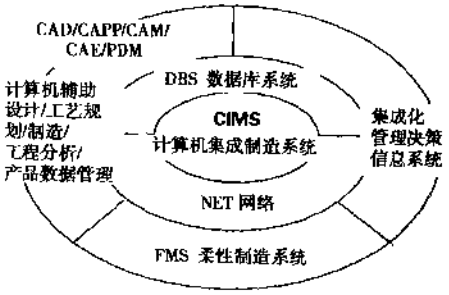


图5-7-9 CIMS基本模型图

2）支撑技术

计算机网络及数据库，包括集成平台/框架，计算机辅助软件工程，产品数据管理PDM，计算机协同工作及人/机接口等技术。

3）应用技术

①集成化管理决策信息系统，包括制造资源计划MRPⅡ及企业资源计划ERP。管理信息系统MIS、自动化OA、辅助质量管理CAQ。

②设计自动化技术。包括计算机辅助设计CAD，辅助工艺规划CAPP，计算机辅助制造CAM，计算机辅助分析CAE，面向下游工作的设计DFX及虚拟样机VP等。

③加工生产自动化技术。包括计算机数控机床CNC，柔性制造单元FMC，柔性制造系统FMS，虚拟制造VM及快速成形制造RPM技术等。

5.7.7.3 CIM的标准化发展

随着CIM研究的发展，相继出现一些实际问题：

①不同系统之间，如工程设计CAD/CAM、研究开发、生产制造和管理、财务等，它们之间的集成连接；

②工程数据基础的统一；

③不同的通信系统和自动化生产单元间的联接、统一等。

针对这些问题，国际标准化组织提出一些CIM参照模型，推动CIM标准化工作，其中ISO的ISO/TC184/SC5/WG1参照模型，表示制造企业共分12种功能及其相互关系，如图5-7-10所示。

汽车论坛 http://www.qclt.com

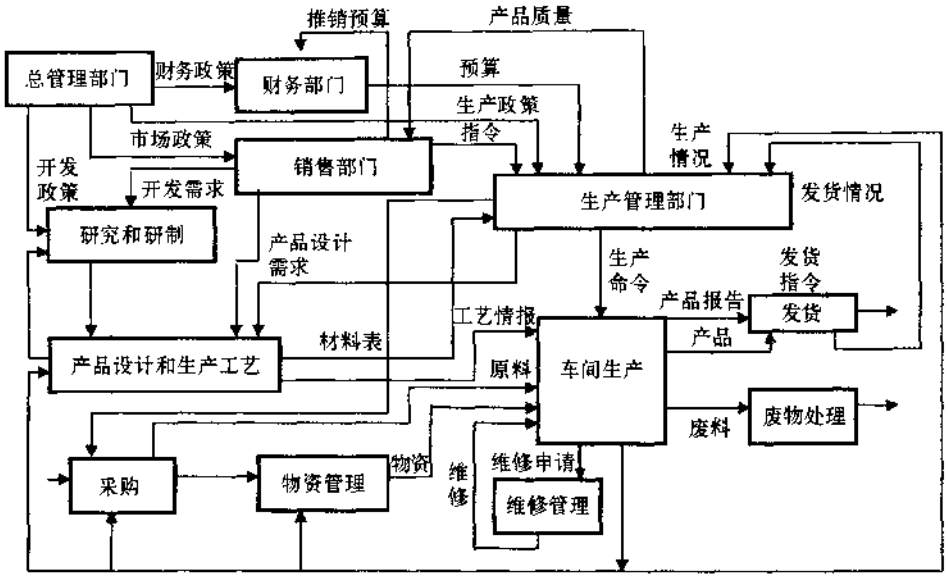


图 5-7-10 制造功能实例（ISOTC184/SC5/WG1 参考模式）

5.7.7.4 CIMS 的应用效果

我国 CIMS 主题开展十年多，取得明显社会和经济效益。平均量化的统计表明：新产品开发周期缩短 30%～50%，生产周期减少 20%～40%，流动资减少 20%～30%。（撰稿人：胡金芳）

参 考 文 献

1. 中国机械工业企业管理手册编辑部，中国机械工业企业管理手册第十一卷．北京：机械工业出版社，1991.

2. 自動車技術會．自動車技術ハンドブック［日］生產．品質．整備编．1991.

3. 芹野洋一．自動車の生产技術［日］．朝仓书店．1997.

4. 侯家驹、冯云翔．汽车工业企业管理．长春：吉林教育出版社，1993.

5. 中国汽车工程学会现代化生产管理分会、陈金荣．生产管理实践．长春：吉林科学技术出版社，1991 年.

6. 第二汽车制造厂，一个流生产方式——现场综合管理．1988.

7. 洪国芳．生产组织学．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1981.

8. 冯云翔．精益生产方式．北京：企业管理出版社，1995.

9. 第一汽车制造厂变速器厂．准时化生产方式——生产管理工程．长春："吉林人民出版社，1992.

10. 李治国．精益生产方式与企业经济效益．北京：北京科学出版社，1994.

11. 沈希瑾、李京生、张文杰，改变世界的生产方式．北京：中国经济出版社 1996.

12. 初壮．MRP Ⅱ原理应用基础．北京：清华大学出版社，1997.

13. 唐仲文、王信义等．机电一体化技术手册．北京：机械工业出版社，1994.

14. 蔡青、高光泰．CAD/CAM 系统的可视化集成化智能化网络化．西安．西北工业大学出版社，1996.

15. 李正吾、汤德忠、王芳卿．机电一体化技术及其应用．北京：机械工业出版社，1990.

16. 白英彩、唐冶文、余巍．计算机集成制造系统—CIMS 概念．北京：清华大学出版社，1998.

汽车论坛 http://www.qclt.com

6 质量管理

6.1 质量管理概论

6.1.1 质量的定义

GB/T6583－1994 idt ISO8402:1994"质量管理和质量保证——术语"标准中,对"质量"做出了如下定义:
质量:反映实体满足明确或隐含需要的能力的特性总和。

6.1.2 质量的特性

特性是指实体特有的、区别于其它实体的性质。
特性反映了实体满足需要的能力,因此,应将"需要"转化为特性。
对于汽车产品,其质量特性通常包括满足国家法律、法规、法令、强制性标准要求的能力;性能;可信性;经济性和时间性等五方面。

6.1.2.1 满足国家法律、法规、法令、强制性标准要求的能力

它反映了国家和社会对产品的基本要求。主要包括安全、环境保护和节约能源三大方面的内容。
世界上主要的汽车技术法规有美国、欧洲、日本三大体系。按照各个国家的认证制度的规定,达不到技术法规要求的产品,不准销售。出口汽车,必须达到进口国的技术法规要求。如果发现市场上的汽车产品未达到要求,生产企业将受到严厉的处罚,产品将被勒令回收。企业的声誉也将受到很大影响。为了避免发生上述问题,企业要制定高于政府规定要求的本企业技术规范。
被列入技术法规的内容,一般包括以下方面:
1)安全性
①主动安全性;
②被动安全性;
③防火。
2)环境保护
①废气污染;
②噪声;
③电磁波干扰;
④有害粉尘;
⑤废车及材料造成的垃圾。
3)能源消耗(燃料消耗)

6.1.2.2 性能

它反映了顾客对产品功能的需求。以汽车产品为例,包括以下内容:
1)使用性能
①动力性(加速性,最高车速,爬坡能力等);
②安全性(未列入法规的有关内容);

汽车论坛 http://www.qclt.com

③操纵稳定性；
④舒适性（平顺性、车内噪声、人体工程、空调、使用方便等）；
⑤机动性（通过性、停车方便性、气候适应性等）；
⑥驾驶性。
2）外观
①车身造型；
②内部造型及内饰；
③涂层；
④手感；
⑤零件外观。
3）原材料和中间产品的可制造性和装配性。

6.1.2.3 可信性

它反映产品在实际使用中的可用程度（或有效性），它包括可靠性（Reliability）、维修性（Maintainability）和保障性（Supportability），统称 RMS。

1）可靠性
可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力（详见本篇第 7 章）。
2）维修性
维修性是指产品在规定的条件下和规定时间内，按规程和方法进行维修，恢复到规定功能的能力。
维修性可以用给定时间的维修度（完成维修的概率），平均维修时间，平均维修费用等指标来评价。
3）保障性
保障性是指资源满足产品使用与维修要求的能力。
对于汽车产品，使用过程的燃料、材料、备件的供应，维修工具的性能和售后服务能力，构成保障性的重要内容。

6.1.2.4 经济性

它反映产品合理的、具有竞争力的寿命周期费用。它包括产品的价格、使用费用和维修费用。

6.1.2.5 时间性

它反映规定时间内满足顾客对交货数量的能力，以及满足顾客随时间变化而变化需要的能力。供货的及时性也反映顾客对服务的基本要求。

6.1.3 质量管理

根据 GB/T6583—1994 idt ISO8402：1994 标准，“质量管理”的定义如下：
确定质量方针、目标和职责并在质量体系中通过诸如质量策划、质量控制、质量保证和质量改进使其实施的全部管理职能的所有活动。

6.1.3.1 质量管理的发展和演变

质量管理随着人类工业化进程而不断发展完善，差不多每隔 20 年，质量管理的方法就会有一次重大变革，见图 6-1-1。
在质量领域发展的初期，操作者本身就是质量管理者。在这种制度下，一名工人，或是很少几名工人负责加工制造整个产品。因此，每一名工人都对个人工作的质量实行全面控制。这阶段称之为“操作者”的质量管理（1900 年）。
20 世纪初期（1918 年），演进到工长的质量管理。

汽车论坛 http://www.qclt.com

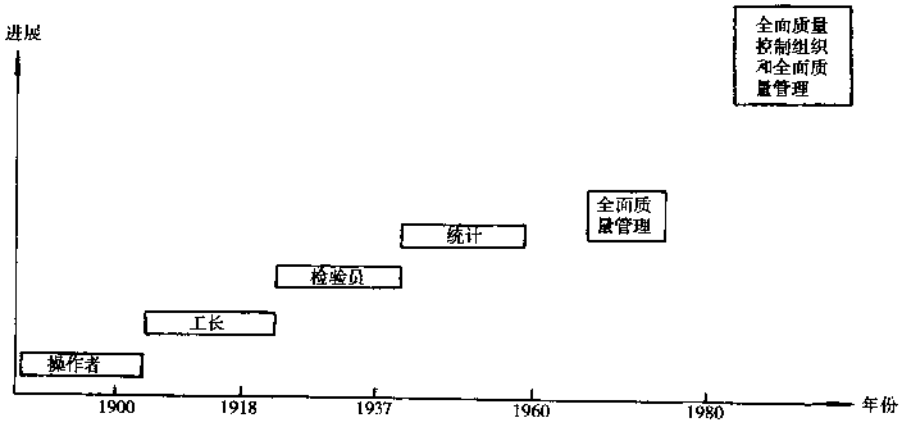


图 6-1-1 质量管理的演变

在第一次世界大战期间，制造体系复杂起来了，于是，第一批专职的检验人员就从生产工人中分离出来，从而使质量管理走上了正规化，至今经历了质量检验、统计质量控制和全面质量管理三个阶段。

1）质量检验阶段

质量检验阶段，形成于本世纪初期第一次世界大战期间。

质量检验就是设立质量检验专职人员，通过严格检验来控制和保证出厂产品或转入下道工序的产品的质量。在成品中挑出废品，虽然可以保证出厂产品的质量，但却有其固有的弱点。一是它属于"事后检验"，无法在生产过程中起到预防、控制的作用，即使检验出了废品，也成了"既成事实"，很难补救。二是初期的质量检验，要求对成品进行百分之百的检验，这样做在经济上并不合理，有时从技术上考虑也不可能做到（例如进行破坏性检验），在生产规模不断扩大和大批量生产的情况下，这一弱点就暴露得更加明显。

在质量检验阶段产生的质量检验理论和方法，虽然存在着某些缺陷和不足，但它仍是质量管理的宝贵的基础性理论与方法，并且这种理论与方法在后来的质量管理中不断得到完善和发展。

质量检验所验证的质量目标是确定制造质量是否符合规格或标准的要求。其质量的含义是静态的符合性质量。

质量检验职能主要是：把关、预防、报告（信息反馈）三个方面。

实现检验职能的基本环节包括：测量（度量）比较、判断和处理。

质量检验实施方式基本可分为全数检验和抽验两大类。

2）统计质量控制阶段

到第二次世界大战，由于大量生产（特别是军需品）的需要，企业质量检验工作成了生产中最薄弱的环节，原始的质量检验方法显示了致命的弱点。企业生产事先无法控制质量，检验工作量越来越大，军火生产常常延误交货期，影响前线的军需供应。因此，美国政府和国防部组织数理统计专家去解决问题，全面应用休哈特（W.A.Shewhart）于 1924 年首创的用于工序控制的控制图和道奇（H.F.Dodge）与罗米格（H.G.Romig）提出的统计抽检检验原理和抽检表，取代了原始的质量检验方法，并制订和实施了一些标准，主要有：

①Z1.1——质量控制指南；

②Z1.2——数据分析用的控制图法；

③Z1.3——生产中质量管理用的控制图法。

这一阶段的手段是利用数理统计原理，预防产生废品并检验产品的质量。在方式上是由专职检验人员转移给专业的质量控制工程师和技术人员承担。这标志着将事后质量检验的观念改变为预测质量事故的发生并事先加以预防的观念。

（1）质量控制理论的基本出发点就是产品质量的统计观点。

汽车论坛 http://www.qclt.com

在大量生产的条件下，产品质量的波动或变异是客观存在的。合格的产品质量是指产品质量的波动被限定的既定的标准或规格允许的范围内。

造成产品质量波动的原因是因为构成工序的操作人员、设备、原材料、操作方法、环境、测量（简称人、机、料、法、环［境］、测）等几方面质量因素存在波动的结果。可消除的异常因素造成产品质量的异常波动，不可消除的偶然因素造成产品的质量的正常波动。

统计理论表明，产品质量的正常波动可以用统计分布来描述，如计量值波动一般服从正态分布，计数值波动一般服从二项或泊松分布等。因此，通过研究和分析产品质量波动的统计规律，即分布状态的变化，可以区分出工序中存在的两类不同性质的质量因素，消除给产品质量造成危害的异常因素（或称系统因素），达到控制产品质量的目的。

(2) 对产品质量的控制是通过控制工序质量来实现的。工序质量孕育产品质量，产品质量是工序质量的反映。

对工序质量的评价主要有两个方面：①工序是否稳定？所谓稳定就是工序中不存在异常因素；②工序能力是否充分，即工序所加工的产品质量波动是否被限定在规格或标准之内。

(3) 工序质量控制主要是借助于控制图以及工序标准化活动来实现的。

3) 全面质量管理阶段

全面质量管理的理论产生于本世纪的60年代，至今仍在不断地发展和完善。主要代表人物是美国的质量管理专家菲根堡姆（A.V.Feigenbaum）和朱兰（J.M.Juran）等人。

美国通用电气公司的质量经理菲根堡姆在1961年发表了一本著作《全面质量管理》，最早提出了全面质量管理的概念。该书强调了执行质量职能是公司全体人员的责任，应该使全体人员都具有质量的概念和参与质量管理。菲根堡姆指出："全面质量管理是为了能够在最经济的水平上并考虑到充分满足用户要求的条件下进行市场研究、设计、生产和服务，把企业各部门的研制质量、维持质量和提高质量的活动构成为一体的有效体系。"

全面质量管理理论的出现，改变了前两个阶段中仅仅依赖质量检验和运用统计方法以及把质量职能全部交给专业的质量控制工程师和技术人员的做法：公司各级管理层次，各个职能部门都被赋予不同的质量管理职能，使公司的全体人员都参加质量管理，建立起从产品的研究、设计、到服务的全过程的质量保障体系；把过去的事后检验和最后把关改为事前控制，以预防为主；把过去的就事论事，分散管理转变为全面的系统的综合管理，使产品的开发、生产全过程都处于受控状态，既提高了产品质量，又降低了质量成本，使企业获得了丰厚的经济效益。

全面质量管理与传统质量管理的区别在于：它具有鲜明的经营性，是一种以质量为中心的经营；它具有完整的系统性，是一种应用系统的观点和方法来分析和解决问题的系统管理；它具有广泛的群众性，是一种各部门、全体人员共同参与的质量管理；它具有强烈的自主性，是一种自主型、自控型的质量管理；它具有明显的开发性，是一种突破型、开拓型的质量管理；它具有严格的经济性，是一种要求以最经济的办法保证和提高质量的效益型质量管理。

6.1.3.2 质量管理的发展趋势

目前，世界质量管理已具有了完整的质量管理理论和方法。各国质量管理普遍采用费根堡姆博士的"全面质量管理理论"、戴明先生的"14点质量管理要素"及柯劳斯毕"高层经理质量战略概念"、朱兰博士的"质量突变理论"及哈灵顿的"质量改进和追求卓越理论"。从方法上看，主要应用休哈特博士的控制图、统计质量管理方法及石川馨先生的因果图，还有田口先生的三次设计方法及其它科学方法。从开展质量管理形式上看，各国推行全面质量管理的同时重视统计质量管理，近年又积极推行"参与质量管理"，并通过"质量月"等活动开展提高人们质量意识的活动。

纵观世界各国质量管理的发展演变情况及对今后发展的预测，质量界普遍认为，今后的世界质量管理的发展特点和发展趋势，有以下几个方面：

①以高层领导为主导的质量管理。

汽车论坛 http://www.qclt.com

②迎接无缺陷挑战，以无缺陷为质量管理的目标。

③强调群众参与质量管理。

④开发软件管理。

把整个质量管理看作是一个完整的过程，并通过生产一种产品和达到一定目的来体现这一过程。这种全过程的质量管理形成完整有效的软件管理组织系统。

⑤“质量文化”的兴起和塑造。

“质量文化”是随着全面质量管理的深入发展而提出的新概念。因为全面质量管理的发展，要求在一定文化环境下，才能真正实施和发展。为了提供和塑造一种适宜的文化环境，使全面质量管理得到健康发展，随之出现了质量文化的新概念，并成为质量管理的基础。

⑥实行质量认证已成为世界大趋势。

质量认证制度从本世纪初出现，到30年代逐步发展，50年代已普及到各发达国家。从70年代起，发展中也得到了推广。ISO于1970年成立了认证委员会（CERTICO），后来更名为合格评定委员会（CASCO），专门研究制定规范认证和合格评定活动的准则、指南。目前参加ISO的91个成员中有70个国家建立了本国的质量认证制度，参加IEC的42个成员国都开展了电器产品的安全认证。随着国际贸易的不断扩大和世界市场的一体化进程的加快，质量认证在全球经济活动中将发挥着愈来愈重要的作用。

6.1.4 质量保证

按照GB/T6583—1994 idt ISO8402：1994规定，质量保证是指“为了提供足够的信任表明实体能够满足质量要求，而在质量体系中实施并根据需要进行证实的全部有计划和有系统的活动”。

由此可见，质量保证的实质在于提供信任。在一个企业内部，质量保证是给管理者提供信任，使管理者能够确信本单位的产品或服务能够满足明确或隐含的需要。这就是内部质量保证。而在合同环境下，供方企业要通过有计划、有系统的活动，其中也可以包括出示一定的证据，为需方提供信任，使需方确信该企业的产品或服务能够满足自己的要求，这就是外部质量保证。因此，可以把内部质量保证看成是一种管理手段，而把外部质量保证看成是供方取得需方信任的一种方法。当然，只有供方规定的质量要求完全反映用户的需要，质量保证才能给需方提供充分的信任。

质量保证的基础是建立完善的质量体系。通过质量体系的有效运行，实施质量管理，并取得充分的证据，以取得需方相信企业所提供的产品确能满足其规定的质量要求，这就是外部质量保证。

6.1.5 质量体系

6.1.5.1 质量体系的概念

根据GB/T6583－1994 idt ISO8402：1994标准规定，质量体系的定义为：为实施质量管理所需的组织结构、程序、过程和资源。

①质量管理需通过质量体系来实施，质量体系是由组织结构、职责、程序、和资源五个部分组成的有机整体。

②组织结构是指组织为行使其职能按某种方式建立的职责、权限及相互关系。它包括一个组织的机构设置和每个机构的行政领导关系或隶属关系，通常用组织结构图来表示。

③程序是指为进行某项活动所规定的途径，即对质量活动如何进行所作的规定。内容一般包括这项活动的目的和范围；应做什么和由谁去做；何时、何地和如何去做；应使用何种材料、设备和文件；以及应如何对其控制和记录。

④过程是指将输入转化为输出的一组彼此相关的资源和活动。即质量形成的各个阶段和为控制每个阶段的质量需要开展的质量活动。

⑤资源是开展和完成质量活动的条件。资源可包括人员、资金、设施、设备、技术和方法。

汽车论坛 http://www.qclt.com

6.1.5.2 质量体系情况

所谓质量体系情况是指质量体系存在于哪些情况之中。它有如下四种情况。

1）质量管理情况

为了质量管理的目的所建立的质量体系。

任何一个组织为了搞好内部的质量管理，实现其质量方针和目标，都需要建立并保持一个质量体系，确保影响其产品质量的技术、管理和人员的因素处于受控状态，以经济有效的方式实现产品质量要求。通常这种质量体系情况，应能同时满足内部的需要、顾客的需求和第二方认证的要求。

2）合同情况

合同中规定的顾客对供方的质量体系要求。

顾客在向供方订货时，为确保其订购的产品质量达到规定的要求，往往要提出对该供方的质量体系要求，作为订购产品技术要求的补充。

3）第二方认定

合同前评定的质量体系。

顾客为选择合适的供方（或供方选择分承包方），在签订合同之前往往需对候选供方的质量体系进行评定，以确定其是否具有满足顾客要求的质量保证能力。

4）第三方认证或注册

这种情况的质量体系需认证机构对其进行评价，符合规定要求的准予注册，已经注册的则应保持其质量体系。（撰稿人：于洪涛）

6.1.6 汽车工业质量保证体系标准

国际标准化组织自1987年推出的ISO9000族标准，能够适用于各种行业，在汽车行业，按ISO9000族标准建立质量体系并取得第三方认证也越来越普遍，这充分体现了ISO9000族标准的影响力。但因为ISO9000族标准的通用性，不可能仅体现某一行业的特点，对于象汽车行业这样一个要求高安全性、可靠性，高质量标准、低成本以及不断缩短产品更新周期的行业，必然有其特殊的行业要求，为了体现这些特殊的要求，美国、德国、法国、意大利等国家的汽车工业集团/组织以ISO9000族标准为基础，开发了各自的汽车行业质量体系标准，本节简要介绍美国的《QS—9000质量体系要求》和德国的《VDA质量保证体系标准》。（撰稿人：向兴球）

6.1.6.1 美国QS—9000汽车工业质量保证体系

为统一对供方的质量保证要求，1988年美国三大汽车公司会同有关货车制造公司开始组织制定《QS—9000质量体系要求》及其一系列配套参考手册。

1998年3月，在第一版、第二版QS－9000标准实施的基础上制定了第三版的QS—9000标准。《QS－9000质量体系要求》由两部分组成，第一部分是以ISO9000为基础的要求，除完全包含了ISO9000标准的20条要素外，还结合汽车工业产品设计开发、生产、制造、服务的实际要求，每个要素上均增加了补充规定。第二部分为顾客特殊要求，即保留了通用、福特、克莱斯勒三大汽车公司及有关货车制造公司在第一部分无法协调的特殊要求。

为细化和实施QS—9000标准，美国三大汽车公司还编制了有关配套参考手册，这些手册主要包括：

①生产件批准程序（PPAP）	第二版 1995.7
②QS—9000质量体系评定（QSA）	第二版 1998.3
③产品质量先期策划及控制计划（APQP）参考手册	第一版 1994.6
④失效模式和后果分析（FMEA）参考手册	第二版 1995.2
⑤统计过程控制（SPC）参考手册	第一版 1992
⑥测量系统分析（MSQ）参考手册	第二版 1995.2

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑦半导体—补充件	第一版 1995.4
⑧AEC－A100：QSA半导体部分	第一版 1995.4
⑨工装与设备（TE）－补充件	第二版 1998.7
⑩工装与设备（TE）QSA－TE	第二版 1998.7
⑪机器与设备制造的可靠性和维修性导则	第一版 1993

QS—9000质量保证体系紧紧抓住与汽车产品的质量相关的车辆安全性、政府法规符合性、重要的配合/性能，以及基本的可靠性和外观项目等特殊性，突出以预防为主和持续改进的思想，同时强调减少在供应环节中出现的质量变差和浪费，确保顾客满意，并使各有关方面都受益。

QS—9000质量管理的先进性已为世界各国所认可。

6.1.6.2 德国汽车工业质量保证体系

德国汽车工业联合会(VDA)和德国质量研究会(DGQ)组织汽车工业质量控制专业组于1991年根据ISO9004标准，并结合ISO9001标准的各要素要求和汽车工业的具体实际，制定并开始实施了《VDA汽车工业质量保证体系标准》。VDA6质量体系审核提问的方式全面完整地对汽车制造厂及其配套厂提出了系统的质量保证要求，它包含了ISO9001的各项要求，以及ISO9004的有关规定，并结合汽车行业产品设计/开发、生产制造、服务的特征，补充了相应的特殊要求。完整的VDA汽车工业质量保证控制主要包括：

①VDA1《汽车制造厂内重要的必须记录备案的零件》；

②VDA2《汽车工业供货质量保证》；

③VDA3《汽车制造厂及其配套厂的可靠性保证》；

④VDA4《批量投产前的质量保证》；

⑤VDA5《汽车制造厂及其配套厂产品审核》；

⑥VDA6《质量保证体系审核》。

VDA6已进行了二次全面修订，体系要求日臻完善，它和QS—9000标准一样对各国的汽车工业质量管理有重要参考作用。（撰稿人：于洪涛）

6.1.6.3 其它质量保证体系标准

除QS—9000和VDA外，其它国家发布的质量体系保证标准有：

AVSQ94 意大利汽车工业质量要求

EAQF94 法国汽车工业质量要求

为了尝试出版特殊工业行业的质量体系，标准国际标准化组织发布了ISO/TS16949质量体系—汽车工业供方应用ISO9001:1994标准的特殊要求，并希望以ISO/TS16949代替各国发布的汽车工业质量体系标准。

另外，在本手册编辑过程中，ISO9000标准已发布2000版的DIS稿，对1994版的ISO9000族标准进行了修订。（撰稿人：向兴球）

6.2 产品形成各阶段的质量管理

产品的质量管理按开发研制、批量生产到销售服务的阶段进行划分，从不同角度，根据不同的产品特点和企业的性质而有所不同。

朱兰博士的"质量曲线"将产品质量的产生和形成分为13个环节（见图6-2-1）。而瑞典人桑德霍姆设计的"质量循环图"将其归结为企业内部的八项活动及企业外部的2个环节（见图6-2-2）。从建立质量体系要求出发，ISO9004将产品一般的寿命周期划分为12个阶段（见图6-2-3）。根据汽车产品的生产特点以及国内一般作法，汽车产品应主要在策划、设计、生产工艺的策划和开发、采购、生产现场、质量检验、服务等7个方面做好质量控制。

汽车论坛 http://www.qclt.com

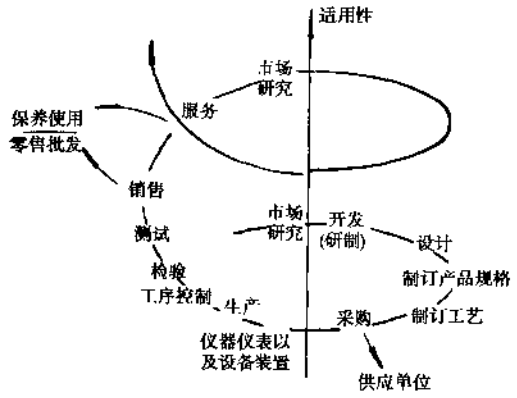


图 6-2-1 朱兰质量螺旋曲线

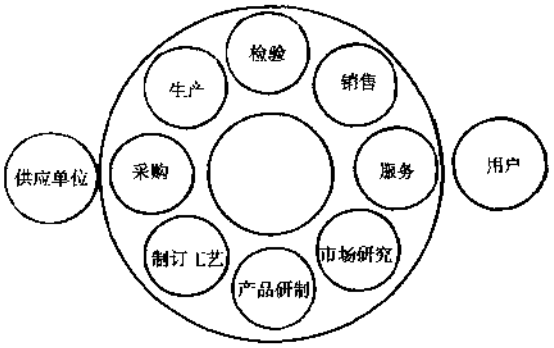


图 6-2-2 质量循环图

6.2.1 策划

策划是对产品质量、综合性能及成本价格的总体设想，这一阶段主要包括市场调研、方案探索和方案确认等几方面的工作，主要的工作内容有：

①应用有关理论和知识，通过调查、预测、分析、试验等一系列工作，将用户的需要和合同要求转变为产品的功能参数和物理参数。

②从系统优化角度，对功能、费用、可靠性、维修性、安全性、可生产性等进行权衡研究和综合分析，确定几种备选方案。

③权衡研究，就技术指标、成本价格等确定最终方案，并下发设计任务书。

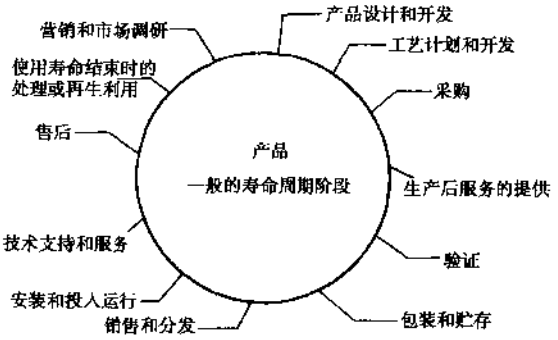


图 6-2-3 对质量有影响的主要活动

6.2.1.1 市场调研

识别顾客的需要和期望，使生产出来的产品能够克服以往产品的缺陷，最大限度地满足用户的要求，是市场调研的主要目的。市场调研应主要考虑以下几方面：

1）政策法规调研

国家对汽车产品制定了许多强制性标准法规对其安全性能、环境污染以及节能等实施控制，并且随着汽车工业发展及社会进步，要求的项目逐步增多，指标不断加严。搜集类似最新的信息，对于产品符合国家要求是至关重要的。

2）技术水平调研

①国内外同类产品的性能、可靠性、维修性、安全性、成本等指标情况；

②保修记录、退货记录、企业内部质量报告、顾客投诉等情况；

③同类产品所采用的新技术、新工艺、新结构、新能源；

④存在的技术关键及解决这些关键的途径。

3）市场需求调研

①对顾客进行访问，征询顾客的意见和建议，了解顾客对性能、价格、时间等方面的要求；

②市场分布情况、市场需要量的预测；

汽车论坛 http://www.qclt.com

③产品的售价和企业效益的估计等；

④竞争产品质量的研究：

对现已生产或将要生产的同类产品厂家的数量、市场占有率、生产能力、生产方式、生产成本、技术水平、产品特性、售后服务、销售渠道以及用户对这些产品反映等情况进行调查、分析、研究；

⑤由设计、生产、采购、销售、质检等方面的人员，根据他们以前的经验，对各方面情况进行汇总、补充、讨论，从技术、经济和经营销售等方面进行可行性分析，最后形成对新产品的整体设想，并编制产品建议书（市场调研报告）。

6.2.1.2 方案探索

该阶段工作重点是对市场调研后编制的产品建议书进行评审，形成产品开发建议书，为新产品的开发决策提供系统分析意见。并在市场调研分析的基础上，补充以下内容：

①开发新产品的理由、目的和技术性能指标要求；

②待开发的新产品与企业发展规划的一致性分析；

③国家有关标准、法规及政策导向可能对产品开发的影响；

④市场和顾客的需求情况以及新产品在市场上生存期的预测；

⑤技术性、经济性和可行性分析；

⑥新产品的价格和利润预测；

⑦竞争企业和竞争产品的形势分析；

⑧研制新产品所需的生产、物资的保障条件，如设备、能源、器材、经费等；

⑨有关人员的素质要求与培训建议；

⑩产品、销售渠道和销售方式的建议；

⑪产品开发的具体计划和日程安排；

⑫关键技术和先行试验项目。

6.2.1.3 方案确认阶段

该阶段应该由设计、开发、经营、财务、工程质量、采购、生产、销售、服务等各类人员组成联合工作组，对方案探索阶段中产品开发建议进行进一步的分析和确认，以便最终制定设计方案。这个阶段需要对产品的功能、可靠性、维修性、安全性、可生产性、经济性做权衡分析；对技术上的可靠性、资源的充分性和计划的现实性进行检查和确认；需要时应做各种试验并分析有关数据，以便减少风险。

为确保这个关键阶段的质量，实现系统管理和预防为主的思想，通常需要同时提出几个备选方案，在充分权衡各个方案利弊的基础上，通过分析、比较和论证，选择并确认一个最佳方案，并对方案探索阶段提出的《产品开发建议书》中的有关内容进行修正，编制《产品设计开发任务书》，报上级领导批准。《产品设计开发任务书》的主要内容是：

①通过多种方案的论证比较，优选出最佳开发方案，并进行方案设计；

②确定新产品的功能特性，包括产品的性能、规格、寿命、可靠性、维修性、安全性、环保性、使用性、可生产性等。

③进一步估算产品的技术、经济效益，包括成本概算、销售量、价格、利税、投资回收期等；

④对产品研制方式和可行性进行分析，包括研制费用的估算、研制条件保证和人员的组织等；

⑤研制设计阶段的划分以及各阶段的评审要求；

⑥确定研制过程中各部门职责以及组织和技术接口；

⑦确定研究周期时间表；

⑧对研制过程中可能出现的关键技术提出解决途径；

⑨必要时进行样机研制与试验。

《设计开发任务书》应由所有相关部门具备一定资历的人员进行评审，对不完善的、含糊的或矛盾的

汽车论坛 http://www.qclt.com

要求，应会同提出者一起解决。

在可能的情况下，在方案确认阶段，应同时制定以下文件：

①初始材料清单及早期分承包方名单；

②初始过程流程图；

预期的制造过程应用初始材料清单和产品/过程设想发展而来的过程流程图来描述。

③产品和过程重要特性的初始明细表。

该明细表的内容主要来自于以下几个途径：

a. 顾客指定；

b. 对顾客期望和需求的分析；

c. 可靠性目标的确定；

d. 类似零件的失效模式及后果分析。

6.2.2 设计

产品设计是从明确设计任务开始，到完成产品图样和技术文件为止的技术工作过程。它包括对使用要求的分析、设计方案优选、制图、试验、验证、最终确认并形成产品图样和技术文件等内容。设计是产品寿命周期的一个重要阶段，也是决定产品固有质量水平和适用性的关键。

产品设计的依据，除有关国家标准、法规、行业标准的要求外，在合同环境下是《产品研制生产合同》、《研制开发协议书》等。在非合同环境下是经过充分论证并经批准的《产品设计开发任务书》。产品设计的最终表现是产品图样和技术文件，产品设计质量的内容主要体现在：

1）产品功能质量

要求所设计的产品达到合同或《研制开发协议书》和《产品设计开发任务书》上规定的功能指标；

2）产品价格质量

指产品的研制费用、制造费用、使用费用尽可能地低，从而使产品在价格上有较强的竞争力；

3）产品图样质量

指设计的图纸和其它技术文件能正确反映设计思想和使用要求，避免因设计图样质量不好，影响产品质量或造成其它不应有的损失。

产品设计质量管理的任务是：按规定程序和控制规范来协调各阶段的工作，以设计工作质量保证产品质量，在规定时间内以最少的成本完成设计工作。

产品设计工作主要由设计部门的人员完成，但在工作进展到不同阶段，应考虑邀请下列部门的人员参加工作：

①生产制造；

②采购；

③检验；

④财务；

⑤产品服务；

⑥工装管理；

⑦包装控制；

⑧市场营销；

⑨顾客；

⑩分供方。

为了高质量地完成设计工作，负责设计的人员应具备一定的经验和专业知识，并提供必要的专门培训。在可能的情况下，应考虑应用以下工具：

①几何尺寸和公差（GD&T）；

②质量功能展开（QFD）；

③制造设计（DFM）/装配设计（DFA）；
④价值工程（VE）；
⑤试验设计（DOE）；
⑥失效模式及后果分析（DFMEA/PFMEA）等；
⑦有限元分析（FEA）；
⑧实体造形；
⑨仿真技术；
⑩计算机辅助设计（CAD）/计算机辅助工程分析（CAE）；
⑪可靠性工程。

对顾客的合同或《技术协议书》以及《产品开发任务书》在经过反复论证、风险分析、认真评审的基础上，着手开始进行产品设计工作。设计工作主要包括初步设计、详细设计和设计定型等几个主要阶段。

6.2.2.1 初步设计

初步设计又称方案设计或草图设计。它是根据《产品设计任务书》的要求，为已确定的产品总体方案而进行的设计工作，也是方案确认阶段各项任务的具体化。在初步设计中，应从总体上对产品的工作原理、产品结构、主要部件的尺寸和质量进行验证，并绘制出产品的总体草图。

初步设计质量控制的主要特点是：
①产品总体方案主要内容的技术指标是否先进、合理、协调；
②总体草图中各部件或分系统接口问题是否得到妥善处理；
③规定的各种制度、规范、程序能否保证设计质量和设计工作的有效开展；
④人、财、物及必要的资源是否得到保证。

6.2.2.2 详细设计

详细设计一般包括技术设计和工作图设计。

1）技术设计

技术设计是在已批准的初步设计的基础上进行的，这个阶段应完成：
①产品的技术性能表；
②产品总图、分系统和重要部件图；
③产品特性分类，确定关键特性和安全特性；
④产品技术文件，包括产品制造、装配、试验、验收、包装、运输、使用技术条件等；
⑤性能和结构参数的计算方法和计算数据；
⑥外购件、通用件、标准件、特殊材料的明细表；
⑦产品的工艺性和可生产性的检查；
⑧试制样件，对产品结构及各项参数进行实际试验和验证。

技术设计的质量控制要点是：
①总成或产品总体要求是否分配到各子系统中；
②审查关键特性、安全特性的确定是否合理；
③采用同步技术，生产部门应同时确定总体工艺方案，进行生产装备的准备；
④设计依据是否充分；
⑤设计中的疑难问题是否得到妥善解决；
⑥详细设计中的资料是否齐全并符合要求。

2）工作图设计

根据已批准的详细设计完成产品研究所需的全套图纸和制造、使用所需的全部技术文件。主要工作内容有：

汽车论坛 http://www.qclt.com

①完成全部零件的工作图并详细注明工作尺寸、公差配合和技术要求；
②在零部件和子系统图的基础上，根据样件试验的结果对产品图纸进行协调修改；
③列出零件明细表；
④备件和易损件清单；
⑤产品的关键特性和安全特性明细表；
⑥编制产品说明书和使用维护说明书。
在工作图设计阶段，质量控制要点是：
①生产中所需的图纸、技术资料是否配套并符合要求；
②用于生产的图纸是否进行工艺审查和标准化检查；
③零部件、元器件的选用是否符合系列化、通用化、标准化要求；
④设计结构、配合尺寸、关键尺寸的尺寸链计算是否正确；
⑤特性分类是否已标注在图纸和有关文件上；
⑥特种工艺、新工艺、关键工艺是否经过质量评审。

6.2.2.3 设计定型

设计定型是上级主管部门、主机厂或企业自身对设计质量进行全面考核的主要形式，以确认其是否达到《产品开发设计任务书》和有关合同及协议书的要求。

设计定型的质量控制要点是：

①最终设计是否符合《产品开发设计任务书》及合同的要求；

②需验证或试验的关键项目、关键参数、安全特性、关键零部件是否按规定进行，结论是否可靠，依据是否充分；

②图纸、技术文件是否进行了质量复查；

④设计中所有遗留问题是否得到妥善处理；

⑤用于定型的样品是否采用与批量生产相同的生产设备和操作人员；

⑥最后鉴定过程中，是否听取了企业内部、外部各类专家包括顾客和最终使用者代表的意见。

设计阶段各种质量控制活动。在设计进行的过程中，随着设计工作的进展，需适时采用设计评审、设计验证和设计确认等手段对设计过程进行不断补充和完善。

1）设计评审

设计评审是为了评价设计满足质量要求的能力，识别问题，若有问题提出解决办法，对设计所做的综合的、系统的并形成文件的检查。

设计评审在设计过程的各阶段工作完成后适时进行。设计评审应该按照设计开发计划的要求，以会议的形式进行，由企业组织包括与设计阶段有关的所有职能部门的代表参加，需要时须聘请外部专家，顾客及分供方的代表。

2）设计验证

设计验证是指在设计开发过程中，通过检查和提供有关证据，证明设计阶段输出是否满足设计阶段输入的要求，设计验证输出的可以是文件，也可能是样品或某种计算数据。

设计验证的方法可包括：采用不同的计算方法进行验算；将新设计与以往类似设计进行分析、比较；利用样件进行试验和证实；设计文件发布前进行评审等。

3）设计确认

设计确认一般是指在成功的设计验证后，在规定的使用条件下，针对最终产品检查其是否满足顾客的要求或设计开发任务书的规定。

设计确认一般包括产品鉴定试验和召开鉴定会两个阶段。对整车产品，应根据有关国家标准要求进行鉴定试验。零部件则要进行台架及实际装车试验。

汽车论坛 http://www.qclt.com

6.2.3 生产工艺的策划和开发

工艺策划和开发是指工艺人员在产品设计的基础上，从参与产品设计和工艺调查开始，直到完成工艺验证、总结与调整等一系列的工艺工作过程。它是直接影响产品制造质量的十分重要的质量体系要素，是关系到产品质量的稳定性和产品制造的经济性、合理性的一项重要工作。

工艺策划和开发的质量职能，是根据产品设计及规范文件的要求，对制造过程质量进行统筹规划和安排，将材料、设备、工艺装备、能源、操作人员和专业技能等生产要素合理地组织起来，明确规定最经济有效和确保产品质量的生产制造方法和程序，用以指导和说明整个生产制造系统保质保量地完成生产活动，提高预防控制效果，保证生产按照规定的工艺方法和程序在受控状态下进行。

6.2.3.1 工艺策划和开发的主要工作内容

1）制定制造质量控制计划

制造质量控制计划是为了有效地实施预防控制，以保证产品制造按照规定的方法和程序在受控状态下进行。制造质量控制计划的主要内容一般包括以下几个方面：

①工艺调查与研究；
②结构工艺性审查；
③工艺方案的设计与评审；
④工艺路线的设计与优选；
⑤工艺规程的设计与审批；
⑥专用工艺设备的设计与评价；
⑦工艺装备的设计与评价；
⑧确定产品的主要质量特性；
⑨制定检验计划；
⑩制定合理的材料和工时消耗定额；
⑪对操作人员进行培训；
⑫工艺验证；
⑬工艺总结；
⑭工艺调整。

2）验证工序能力和开展工序质量控制

工序能力是否满足产品的技术要求，应按照影响工序质量的因素——人、机、料、法、环、测量、计算软件等进行分析和验证，开展工序质量控制。其主要活动内容是设置质量控制点，并编制工序质量控制文件，这些文件包括：工序控制点明细表、关键零件工艺流程图、工序质量因素分析表、操作指导书、设备日点检记录表、控制点设备精度定期检查记录卡、控制点工艺装备周期检定记录卡、检验指导书、产品自检、巡检、专检记录及控制图等。

3）工艺策划和开发的类别

工艺策划和开发可分为两类：

（1）样件试制的工艺策划和开发

样件试制的目的在于考核产品的结构、性能和主要工艺。样件试制的工艺策划和开发包括：结构工艺性审查、样品试验的工艺方案设计、必要的工艺规程设计、新材料、新工艺的试验、主要材料和工时的估算以及工艺装备设计。

（2）批量生产的工艺策划和开发工作

这个阶段的主要工作包括：编制全套的工艺文件（包括工艺方案、工艺路线、工艺规程、工艺装备目录、材料消耗定额等）；工艺装备的设计和制造；专用设备或生产线的设计制造；工序评审；关键工序质量控制计划和车间平面布置图等。通过工艺策划和开发，应达到：工艺文件完整、正确；工艺装备合格、

汽车论坛 http://www.qclt.com

齐全；检验条件齐备；关键工序的工人配备并加以培训；对样件试制中出现的问题已得到解决。

批量生产工艺策划和开发的质量是产品正式投产后稳定进行生产的关键。

6.2.3.2 结构工艺性审查

结构工艺性是指所设计的产品和零部件的结构，在满足规定功能和质量标准的基础上，并在一定的生产条件下，进行制造和维修的可行性和经济性。

一般情况下，结构工艺性包括零件结构铸造和锻造工艺性、零件结构机械加工工艺性、产品结构装配工艺性和产品维修工艺性等。

1）结构工艺性审查方法

（1）定性评价

定性评价根据评价人的经验，概略地对产品结构工艺性进行评价，这种评价方法简单易行，但不太准确，适于产品最佳方案的预选。

（2）定量评价

定量评价主要考核以下几种指标：

①产品材料利用指标 K_m

$$K_m=\frac{g_o}{g_z}$$

式中：g_o——产品净重，kg；

g_z——产品材料消耗定额，kg。

②产品结构继承性系数 K_s

$$K_s=\frac{N+N_t}{N_z}$$

式中：N_j——产品中借用件数；

N_t——产品中通用件件数；

N_z——产品零件总数。

③产品标准化系数 K_t

$$K_t=\frac{N_b}{N_z}$$

式中：N_b——产品中标准件数量；

N_z——产品零件总数。

④产品结构装配性系数 K_a

$$K_a=\frac{N_m}{N_z}$$

式中：N_m——产品独立零部件数之和；

N_z——产品零件总数。

⑤产品修配劳动率 K_{xp}

$$K_{xp}=\frac{T_{xp}}{T_{zp}}$$

式中：T_{xp}——修配工作总劳动量，h；

T_{zp}——装配工作总劳动量，h。

⑥装配劳动生产率 K_{zp}

$$K_{zp}=\frac{T_{zp}}{T_{qx}}$$

汽车论坛 http://www.qclt.com

式中：T_{zp}——装配工作总劳动量，h；

T_{QX}——切削加工总劳动量，h

2）结构工艺性审查步骤

（1）准备

在准备工作阶段，主要应收集整理有关信息，为审查做准备。

表 6-2-1 一般结构工艺性评价指标值（参考）

主要评价指标	计算公式	指标数值	主要评价指标	计算公式	指标数值
材料利用率系数	$K_m=\frac{g_0}{g_z}$	0.5～0.7	修配劳动率	$K_{xp}=\frac{T_{xp}}{T_{zp}}$	0.1～0.15
结构继承性系数	$K_s=\frac{N_1+N_t}{N_z}$	0.4～0.5	装配劳动率	$K_{ZP}=\frac{T_{zp}}{T_{QX}}$	0.05～0.1
产品标准化系数	$K_t=\frac{N_b}{N_z}$	0.27～0.35			

（2）审查

为保证产品良好的工艺性，在产品设计各阶段均应进行工艺性审查。

①方案设计阶段工艺审查的主要内容有：从制造观点分析产品结构方案的合理性；分析产品结构的继承性及其标准化和系统化程度；分析产品是否便于装配、调整和维修；分析主要材料选用是否合理和主要件加工的可行性。

②技术设计阶段工艺审查内容有：分析产品各组成部件平行装配和检查的可行性；分析总装配的可行性；分析装配时避免或减少切削加工的可能性；分析工艺关键件在本厂制造的可能性等等。

③工作图设计阶段，工艺审查的主要内容包括：各部件是否具有装配基准面和正确位置、尺寸联系、是否便于调整和装卸；零件铸造、锻造、冲压、焊接、热处理、切削加工、装配和维修的工艺性。零件的几何形状、精度、粗糙度是否合适等。

工艺审查应由产品设计人员、工艺设计人员、生产人员、财务人员、主管领导等各方面人员共同完成。

6.2.3.3 工艺方案设计

工艺方案是工艺策划和开发工作的总纲，是工艺规程设计、工艺装备设计和试制工作的指导文件。

1）工艺方案设计的主要内容

（1）样件试制

①产品结构工艺性的评价结果和工艺准备工作量的大体估计；

②提出自制件和外协件的初步划分意见；

③提出必须的特殊设备的购置或设计、改装意见；

④必须的专用工艺装备设计、制造意见；

⑤关键零（部）件的工艺规程设计意见；

⑥有关新材料、新工艺规程设计意见；

⑦主要材料和工时的估算。

（2）小批生产

①对样机试制阶段工艺工作的小结；

②对自制件和外协件的调整意见；

③自制件的工艺调整意见；

④提出应设计的全部工艺文件及要求；

⑤提出主要铸、锻件毛坯的工艺方法；

⑥专用工艺装备的设计意见；

⑦专用设备的设计或购置意见；

⑧特殊毛坯和原材料的要求；

汽车论坛 http://www.qclt.com

⑨工艺、工艺装备的验证要求；

⑩有关工艺关键件的制造周期或生产节拍的安排意见；

⑪根据产品复杂程度和技术要求所需的其他内容。

(3) 批量生产

①小批试制阶段的工艺和工艺装备验证情况的小结；

②工艺关键件质量攻关措施意见和关键工序质量控制点设置意见；

③工艺文件和工艺装备的进一步修改、完善的意见；

④专用设备或生产线的设计制造意见；

⑤有关新材料、新工艺的采用意见；

⑥对生产节拍的安排和投产方式的建议；

⑦装配方案和车间布置的调整意见。

(4) 老产品改进

老产品改进工艺方案主要是提出老产品改进设计后的工艺组织措施。凡设计变动较大的改进型老产品，均应有相应的工艺方案，其设计内容参照本节的相关内容。

(5) 零件

零件工艺方案是对工艺关键件提出主要工艺措施。其主要内容有：

①对关键件的原材料或铸、锻件毛坯的要求；

②对关键件的工艺路线的安排意见；

③对工序质量控制的意见及关键工序的处理意见；

④关键工艺装备的要求；

⑤采用专用设备或生产线的意见。

2) 工艺方案设计的要求

工艺方案设计的要求包括技术和经济两个方面，现分别叙述如下：

(1) 保证设计的技术要求

工艺方案设计的技术要求包括可靠性和技术先进性两个方面。工艺方案设计的可靠性就是指工艺方案能够保证实现产品设计图纸规定的各项技术要求和质量标准。技术先进性是指工艺方案中所规定的设备、工艺装备、加工方法和工作规范，能够使产品质量和制造产品的生产率较高而成本较低。

(2) 选用经济合理的方法

当存在能够满足技术要求的若干方案时，选用经济合理的最优方案至关重要，常用的方法有工艺成本分析法和投资回收期法等。

6.2.3.4 工艺装备设计

工艺装备是产品制造过程中所用的各种工具的总称。其范围为：刀具、夹具、计量器具、模具、辅具、钳工工具和工位器具等。

工艺装备按应用范围可分为标准、通用和专用工艺装备。标准工艺装备一般可外购，不必自行设计制造。通用工艺装备有的可订购或租赁，有的需要部分自制或全部自制。专用工艺装备一般应自行设计与制造。

设计制造专用工艺装备的工作量很大，往往要占工艺准备总劳动量的50%～80%，花费的工艺装备费用，平均约占产品成本的10%～15%。

工艺装备对保证产品质量和贯彻工艺规程有如下作用：

①保证产品质量和贯彻工艺规程；

②保证加工表面质量；

③保证零部件互换；

④避免零部件的磕、碰、划伤、

汽车论坛 http://www.qclt.com

1）工艺装备设计

（1）设计工艺装备的依据

工艺装备设计任务书、工艺规程、产品图样及技术条件、与工艺装备设计有关的国家标准、专业标准和企业标准、国内外典型工艺装备图册、设计指导资料和专利等。

（2）设计工艺装备的原则

工艺装备设计必须满足使用要求，结构性能可靠，操作安全、方便，有利于实现优质、高产、低耗和改善劳动条件。要尽量提高工艺装备标准化、通用化、系列化水平。

（3）设计工艺装备的程序

①分析研究

分析研究工装设计任务书，熟悉被加工件图样、工艺方案和工艺规程；调查搜集企业内外有关资料，进行必要的工艺实验。

②确定设计方案

绘制工装结构示意图；主要元件的刚度、强度、精度和受力的分析计算；对工装轮廓尺寸、总质量、承载能力以及设备规格进行校核；对设计方案进行全面的分析、会审，选出最佳方案。

③绘制装配图，进行审核和会签

工装图样应符合国家和行业的有关标准；绘制出被加工零件的外形轮廓、定位、夹紧部位及加工部位和余量；装配图上应注明定位面（点）、夹紧面（点）、主要活动件的尺寸、配合代号以及外形尺寸；注明被加工件在工装中的相关尺寸和主要参数，以及工装总质量等；填写标题栏和零件明细表，进行审核、会签。

④绘制零件图

精密、重大、复杂和特殊的工艺装备应附有设计计算书和使用说明书；专用工装图样、零件图样的标题栏、明细表等。

⑤审核批准

装配图、零件图样和有关资料均需审核；送审的图样和资料必须齐全、完整。

⑥修改

凡需修改的工装图样，需经设计人员或服务人员填写工艺文件修改通知单，经批准后送蓝图发放单位进行更改，并修改底图。

2）工艺装备的验证

（1）工艺装备验证的目的

工艺装备验证的目的是：保证被制产品零部件符合设计质量要求，保证工艺装备满足工艺要求，验证工艺装备的可靠性、合理性和安全性，以保证产品生产的顺利进行。

（2）工艺装备验证的范围

凡属下列情况之一者，均需进行验证：首次设计制造的工艺装备；经重大修改设计的工艺装备；复制的大型复杂、精密工艺装备。

（3）工艺装备验证的依据

验证依据有：产品零部件图样及技术要求；工艺规程；各种工艺装备的标准；工艺装备设计任务书；工艺装备图纸和使用说明书；工艺装备明细表。

（4）工艺装备验证类别

按工艺装备验证场地分为固定场地和现场验证。

固定场地验证是按图纸和工艺要求事先准备产品、零部件，然后在固定的设备上进行模拟验证。一般适用于各种模具的验证。

现场验证是指工艺装备在使用现场进行试验加工。这又分为两种情况：一种是按产品、零部件图纸和工艺要求，预先进行试验加工；另一种是工艺装备验证和工艺验证同时进行。现场验证必须在使用工艺装备的车间进行。

3）工艺装备验证的程序

汽车论坛 http://www.qclt.com

工艺装备验证包括验证计划、验证准备、验证过程、验证判断、验证处理和验证结论等六个步骤。

(1) 验证计划

验证计划由生产部门编制并组织落实，编制计划的依据是：工艺文件中有关工艺装备验证的要求；工艺装备制造情况；产品零件生产进度等。

(2) 验证准备

成立工艺装备验证小组，小组成员由工艺员、施工员、工艺装备设计人员、检验员、使用车间生产人员和工具制造部门有关人员组成。工艺部门提供验证用工艺文件及其有关资料，提出验证所需用的材料及其定额；生产部门负责下达验证计划；供应部门或生产部门负责验证用料计划的准备；工艺装备制造部门负责所需验证工艺装备的准备；验证单位负责领取验证用料和安排验证设备及操作人员；设计部门提供验证用设计图纸及有关技术资料；检验部门负责检查工艺装备的准备。

(3) 验证实施

在大多数情况下，工艺装备的验证是与工艺规程的验证同步进行的。在工艺装备验证过程中，操作人员应严格按照工艺规程所规定的加工程序、加工部位和加工余量等进行操作，按照工艺装备的验证内容逐项进行验证。工艺装备设计人员要详细记录验证情况，操作者在工艺装备验证过程中发现工艺装备有问题，应立即停止操作，并向验证组反映，验证组根据情况，决定工艺装备是否继续验证或采取改进措施。

(4) 验证判断

被验证的工艺装备在工艺工序中按事先规定的试用次数（一般为1～3次）使用后，判断其可靠性、安全性和使用性能等。按规定的件数（一般为1～5件）对产品零部件进行验证，判断其合格率。

(5) 验证处理

工艺装备验证合格后，由验证组填写有关记录。

(6) 验证结论

工艺装备的验证结论分为验证合格、验证基本合格、验证不合格和验证报废四种。验证合格，即完全符合产品设计、工艺文件的要求，工艺装备可以投入使用。验证基本合格，即工艺装备虽然不完全符合产品设计、工艺文件要求，但不影响使用或有待改进，仍允许投产使用。验证不合格，即工艺装备需要返修，再经验证合格后方可投产使用。验证报废，即因设计或制造有问题不能保证产品质量，该工艺装备不得投入使用。

6.2.3.5 工艺评审

工艺评审是由非直接参与工艺设计的专业技术人员参加的，为保证产品符合质量要求而进行的有计划、有组织的活动，它按照设计要求、研制合同、有关标准和规范，对工艺的先进性、经济性、可行性进行详细的分析、审查和评价。

工艺评审体现一次成功、系统管理、预防为主、早期报警的质量管理思想。企业必须建立分级、分阶段的工艺评审制度。

在工艺设计完成后和付诸生产试制之前，组织工艺评审，其作用如下：

①为批准工艺设计提供决策咨询；

②为对工艺设计进行质量跟踪管理提供监控信息；

③发挥集体智慧，集思广益，弥补工艺设计者知识和经验的局限性；

④促使工艺设计者及时总结经验，系统整理资料，加深论证分析。

1) 工艺评审的主要内容

工艺评审应紧紧围绕研制任务书或合同提出的质量目标进行。其主要内容如下：

(1) 工艺方案的工艺评审

工艺方案评审内容应包括：产品性质、精度和特点；工艺方案的先进性、经济性和可行性；工艺方案满足设计精度和保证制造质量稳定要求的状况；关键件、重要件的工艺流程；工艺难点的攻关措施计划；工艺装备系数；工序能力和质量管理点的设置；材料消耗和加工定额；检验、试验和检测能力；工艺文件的正确性、系统性和完整性；工艺标准化程度等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

(2) 关键工序的工艺评审

关键工序包括形成关键特性的工序和加工难度大、产品结构复杂、质量不稳定以及加工产品一旦报废、其经济损失较大的工序。评审的内容包括:关键工序目录,重点控制的工序和部件及其特性的具体要求,工序能力的验证和分析、关键工序工艺攻关项目和攻关措施、关键工序质量控制点的控制手段和方法等。

(3) 特种工艺的评审

特种工艺评审的内容有:采用特种工艺的必要性、可行性;所编制的特种工艺文件是否符合要求;特种工艺的攻关项目和攻关措施;特种工艺参数和环境条件的质量控制要求与方法;特种工艺检测方法和检测设备;特种工艺试验和特种工艺文件的验证;特种工艺操作人员的培训和考核等。

(4) 工序能力和工序控制的评审

工序能力和工序控制的评审内容有:工序能力的分析;影响工序质量的人、机、料、法、测量、环境六大因素的控制;对工序主导因素的分析,关键、重要工序能力的核算和验证;质量控制点的设置满足精度要求和质量稳定情况的分析;工序质量控制方法、手段的可行性和有效性的分析。

2) 工艺评审的步骤和方法

工艺评审要分级、分阶段进行。评审的分级应根据评审内容的重要性来确定,并与批准工艺权限相联系,与工艺管理相协调。

为了使工艺评审切实有效,必须严格按照评审程序进行。

(1) 评审准备

评审准备工作主要有:对工艺方案、关键工艺规程等工艺文件进行复查,整理好准备提交评审的工艺文件和有关资料,申请工艺评审的单位在系统总结原有工作的基础上,编写出工艺评估报告;工艺评估报告和提交评审的工艺文件以及有关资料,一并交工艺负责人审查,确认合格后,写出申请评审报告。

(2) 正式评审

评审会首先由主持人将设计思想、工艺文件和工艺保证措施向与会者作介绍,然后请评审组成员发表意见,最后由主持人进行总结。会后根据评审记录,写出工艺评审报告和结论。

(3) 评审结论处置

工艺部门对评审中提出的意见和建议,要逐项认真研究。凡采纳的项目应制订改进措施,并加以落实,暂时不能采纳或不予采纳的项目,应阐明理由。最后连同评估报告、工艺技术文件和改进措施方案一并呈报技术领导审批。鉴于工艺评审是一项决策咨询性的活动,因而评价结论的处置权限,仍按照技术责任制的规定进行。

6.2.4 采购

汽车产品的生产是由社会化协作方式完成的,每一个整车、总成甚至零部件生产厂都需要采购大量物资以维持自身的生产,采购物资一般包括以下几大类:

①生产设备,例如车床、冲压机床等等;

②工艺装备,例如各类模具、各种工具、量具、夹具等等;

③各种原材料、标准件、配套件等。

由于这些外购物资将直接或间接地转移到本企业的产品中,成为本企业产品的一部分,做好采购物资的质量管理工作对于保证产品质量、降低生产成本具有重要的意义。

6.2.4.1 采购过程中质量管理的几项基本原则

①应将供应方、采购方、顾客和汽车最终使用者的利益做为一个整体进行考虑,最终目的是使各方均受益,并且其中任何一个环节的利益受到损害,都会直接影响到其它各方;

②应该按照满足合同要求的能力选择供应方;

③应根据所采购的物资,确定采购的方式,使用不同的方法选择供应方并对其进行控制;

④采购方与供应方只有在质量、数量、价格、交货期、支付条件和维修服务等方面达成一致后,采购

汽车论坛 http://www.qclt.com

活动才能进行；

⑤采购活动及采购物资应符合国家、行业有关法律、法规、标准的要求。

6.2.4.2 各部门工作人员在采购工作中的质量职责

1）采购部门

①根据企业的质量方针和质量目标，对采购工作进行总体策划；

②制定选择和控制供应方的管理文件；

③根据文件的要求，选择供应方，并对其供货能力进行定期评审；

④与供应方就产品质量、数量、价格、交货期限、交货方式、服务等方面进行沟通；

⑤为企业生产组织货源，保证生产顺利进行；

⑥随时掌握供应方提供产品的质量状况；

⑦出现问题时，与供应方协调解决办法；

⑧有责任就本企业采购产品在品种、质量、成本方面的规划与期望向供应方进行说明；

⑨搜集和处理市场信息，预测市场变化，为正确做出采购决策创造条件。

2）设计、技术部门

①根据产品情况，提供《采购物资清单》；

②确定采购物资的数量以及技术要求；

③对采购物资出现的问题提出处理意见，如材料代用、让步接收等情况。

3）质量部门

①制定采购物资检验文件，包括在检验方法、检验项目、检验依据、检验手段、抽样频次、判定准则、授权放行人员等方面做出规定；

②依据检验文件，对采购物资实施检验；

③建立供应方供货业绩记录。

4）生产部门

①搬运、贮存、使用过程中，对采购物资提供必要的防护，以防止非预期损坏；

②就采购物资使用中的情况，向采购部门进行反馈。

6.2.4.3 采购方式

根据物资种类不同，采购方式一般包括以下几种：

①临时小批量采购，主要针对使用量较小，对产品质量影响不大的物资，例如生产辅料等；

②阶段性合同采购，例如对生产设备、工装设备等产品的采购；

③经常性合同采购，例如对原材料、标准件、配套件等物资的采购等。

物资种类不同，采购方式不同，质量控制的方式也不一样。

6.2.4.4 各种采购方式的质量控制

1）临时小批量采购

对于临时小批量采购的物资，应注意以下几方面的问题：

①采购地点应相对固定并尽量选择规模较大的商店；

②采购物资应为知名企业的产品；

③对采购物资应进行必要的验证，如查验产品出厂合格证等。

2）阶段性合同采购

这种方式采购的物资一般属于价值高、数量少、品种多、使用周期长、对产品质量影响大的生产资料，对于此类物资的采购应注意几方面：

(1) 选择合适的供应方；

对于阶段性合同采购的物资，选择供应方时可采用以下几种方法：

①对供应方的生产能力和质量保证体系进行现场评价，对于供应方的生产状况、技术水平、人员素质进行核实，以决定是否采购其产品；

②对比类似产品的历史情况

对于合作时间较长的供应方，可使用此方法。

③对比其它用户使用类似产品的经验

在可能的情况下，应尽量征集其它用户对某供应方提供的类似产品的使用意见，以此作为企业决策时的参考。

④招标法

对于大型生产设备或系统设施，采用招标法对于保证质量、节约资金往往是非常有效的。

（2）签订采购合同时，应特别注意：

①采购物资的接收准则

一般情况下，在接收时除了按照技术文件进行验收外，还应结合实际生产，制造部分样件，以验证采购物资能否达到预期要求。

②对于人员培训的要求

对于大型复杂设备，应要求供应方对其使用以及保养维护人员提供必要的培训，以保证生产的要求。

③应特别强调服务的要求

对于阶段性采购的物资，往往是单台生产的设备、装备等，一旦出现问题，可能会直接影响到生产的正常进行。因此，对供应方服务质量要求应在签订合同时特别强调。

（3）对于关键设备，应保证随时能够得到备件供应；

（4）对于计量器具的采购，供应方应得到国家的计量许可；

（5）对于专用设备，应要求供应方提供必要的检定校准方面的支持；

（6）计算机系统的相容性等。

3）经常性合同采购

经常性合同采购主要是指用于产品生产的原材料、标准件、配套件等，据统计汽车行业这类物资占产品总成本的比例大约为65%，因此做好这类物资的采购工作，对于保证产品质量、按时完成生产计划，降低产品成本是至关重要的。

（1）供应方的选择

选择合适的供应方，对于顺利完成采购目标具有决定意义。成功地选择一个有能力、守信用的供应方，不仅能为完成本次采购任务提供条件，而且可为企业采购类似产品开辟可靠的供应来源，使生产和质量得到有力保障。

选择供应方考虑的主要因素包括：

①产品质量适宜。既不能低于要求造成质量不足，也不必过分追求质量好而造成质量过剩，增加成本。

②价格低。在达到一定质量标准的前提下，同类产品价格最低。

③费用省。指采购费用、运输费用、储存费用等各项费用综合考虑最小，在可能情况下，一般希望就近选择供应方。

④交货及时。按事先的约定，做到交货数量不多不少，时间不迟不早。

⑤服务好。应有能力提供及时、有效的服务。

此外，供应方的生产能力、技术力量、生产稳定性、管理水平、产品或体系的认证状况等也是选择供应方时应重点考虑的主要内容。

一般情况下，供应方需要从分供方处进行采购，因此，采购方应特别关注供应方对采购质量的控制，包括分供方的产品质量及采购方对分供方选择的方式和监控的程度。

对于供应方的选择，一般可考虑以下几种方法：

①对于供应方的生产能力和质量体系进行现场评价，这是最基本也是最有效的方法。一般可根据经营

汽车论坛 http://www.qclt.com

状况、质量意识、产品质量状况、技术力量和人员素质等编制规范的检查表，评价人员根据检查表的内容进行评价，最终得到定量的结果，以确定是否列入合格供应方名单；

②对产品样品进行评价；

③对比类似产品的历史情况；

④对比类似产品的试验结果；

⑤对比其它用户使用类似产品的经验。

对于供应方的选择，一般应包括以下几个阶段：

①向潜在供应方发放情况调查表，这项工作是采购部门在进行充分的市场调查的基础上进行的，主要是了解供应方基本情况、供货意愿等，为今后的工作提供依据；

②向潜在供应方提供采购计划。主要包括采购产品的品种、形式及规格、质量要求、数量及交货期要求、价格等；

③供应方提供样品。主要是了解采购方对采购计划的理解程度，并进行沟通；

④供应方进行小批量供货。小批量供货应能代表将来成批供货产品的质量水平，因此要求产品的技术条件，所采用的工艺、机械设备、工具、模具、生产人员等都必须与成批生产时完全一致；

⑤对供应方进行现场评价。

(2) 采购订单

对于小批量定货和现场评价均符合要求的供应方，可列入企业“合格供应方名单”，采购方应从进入“合格供应方名单”的供应方采购产品。

采购方可以采购合同或其它方式向供应方发放采购订单，订单的内容应包括：

①拟购产品的名称、品种、型号及规格；

②产品标准和质量指标；

③质量保证要求，即依据适合的质量保证模式标准，向供应方的质量体系提出要求；

④检验规程和检验要求；

⑤验证地点和交付期限；

⑥数量要求和验收方式；

⑦可接受的价格和付款方式；

⑧出现争议如何解决；

⑨服务要求。

(3) 对供应方实施必要的控制

为了使供应方的产品质量和供货能力符合采购方的要求，对合格的供应方应实施必要的监控和分析，一旦发现某个供应方的能力下降时，应及时采取措施，包括减少其供货量，直至取消供货资格。控制的方式和程度取决于产品的类别、供应方供货业绩以及采购产品对成品质量的影响。

应建立合格供应方的档案，档案的内容包括：

①选择该供应方时有关的初始质量记录；

②对供应方定期进行现场评审的质量记录；

③供应方供货业绩记录，包括每次供货的产品质量、交付期限、出现问题时的反应及服务水平等。

应定期对供应方的档案资料进行分析，以便及时掌握发展趋势，为采取进一步行动提供依据。

供应方发生下列情况之一时，应及时向采购方进行通报，并提交有关技术资料及产品样品：

①对供应方来讲，向采购方提供一个新产品，或改型后的产品，或停产后重新恢复生产的产品；

②对质量要求有了改变；

③供应方制造工艺发生改变，如采用新工艺或机器、设备、工具等生产条件发生变化。

(4) 采购方应要求供应方在其生产活动、对分供方的开发及控制过程中始终贯彻以下思想

①持续改进的思想；

②预防为主的思想；

汽车论坛 http://www.qclt.com

③顾客满意的思想。

(5) 一般情况下，同一种产品应有多个合格供应方，每个供应方均应保持足够的生产能力，并不断开发潜在供应方，以保证生产活动的正常进行。

(6) 如果顾客指定了供应方名单，应从该名单上的供应方采购产品，但这并不免除采购方确保产品零件材料和服务质量的责任。

(7) 最后强调一点，所有采购产品均必须满足国家、行业有关法律、强制性标准对环保、安全、节能等的要求。

6.2.5 生产现场

生产现场的质量管理是指实现产品符合性质量过程中所必须进行的一系列质量活动的总和。涉及到生产技术准备、生产过程控制、工序管理、质量检验、物流控制、质量信息的管理等。生产现场质量管理需要从人、机、料、法、环、检测等几个因素实施控制。生产现场质量管理的目标是实现和提高符合性质量。即设计所规定的质量目标。一般情况下，汽车产品属于专业化大批量的生产，专业化程度高、工作重复性大，单调、使用专用工装、生产规范性强，要求均衡、有节奏地进行生产。

6.2.5.1 生产现场管理的突出特点

1) 严格工艺规程和工艺纪律

①科学地制定一整套工艺标准、操作规程和检验标准，并严格执行；

②加强工艺监督，制定执行工艺纪律情况的检查，考核和奖惩制度；

③工艺文件的修改要通过严格的审批程序，确保工艺文件的严肃性和权威性。

2) 重点抓好工序管理

①对于重点、关键以及有特殊要求的工艺建立工序质量控制点，实施重点控制；

②制定以工序质量为核心的工序管理大纲，对工序质量因素如人、机、料、法、环等进行综合控制；

3) 强化工序质量检验

①明确检验标准，编制检验指导书；

②贯彻“三检”制，即自检、专检和终检；

③做好质量检验记录和质量信息反馈工作；

④坚持“四不”原则。即不合格材料不投产、不合格半成品不转序、不合格零件不装配，不合格产品不出厂。

4) 加强工装管理

①坚持系统管理原则，即对工装的制造、使用、维修、保管以及更新等环节都必须制定相应的管理细则；

②对关键的工装实行重点管理，责任到人；

③定期对工装精度校准。

5) 坚持对操作人员进行质量教育

①操作技能、质量管理方法的教育；

②质量意识和质量责任心教育；

③实行质量责任制，保证质量可追可查性。

6) 确保作业环境质量

①控制生产节奏，做好均衡生产；

②推行定置管理，实行文明、安全生产；

③监测影响作业环境的因素，如噪声、振动、照明、温度、湿度等，确保人身安全和产品质量。

7) 运用统计方法控制工序质量

①确定统计工具，保持工序质量稳定；

②对过程能力进行不间断监控，保证产品质量；

汽车论坛 http://www.qclt.com

③注重实效，避免走过场。

6.2.5.2 GB/T19004－ISO9004的生产过程控制要求

根据GB/T19004－ISO9004的要求，提出了生产过程控制的7个要点。

1）物资控制、可追溯性和标识

（1）物资控制

对投产前、制造过程、流转和贮存等各个环节的质量和数量进行控制。

（2）可追溯性

在整个生产环境中从接收、所有生产阶段、交付到安装，都应保持其相应的标识；

（3）标识

物资的标志和标签符合规范要求，在生产过程中应保证清晰、牢固耐久，并具有唯一性。

2）设备控制和维护

所有设备，包括机器、夹具，工具、样板、模具和测量器具等，使用前验证其准确度。

设备在两次使用间应合理存放防护，定期验证和再校准。应制定预防性维护保养计划，以确保持续的过程能力，对重点设备性能要特别加以注意。

3）过程控制管理

对产品质量起重要作用的过程进行计划、认可、监视和控制，应以适当频次对过程、对数据进行监视、控制和验证以确保：

①所用设备的准确度及变异性；

②操作人员的技能、能力和知识；

③用于控制过程的测量结果和数据的准确度；

④过程环境和其它影响质量的因素，如时间、温度、压力等；

⑤过程参数、设备和人员有适宜的文件。

4）文件

按照质量体系的规定对文件进行控制。

5）过程更改的控制

明确规定过程批准的职责、权限及信息接口，每次更改后应对更改的效果进行评定。

6）验证状态的控制

应对过程的输出验证状态做出标识。

7）不合格产品的控制

应规定对所有不合格产品和材料进行隔离和控制的办法，防止不合格产品非预期使用和装配。

6.2.5.3 生产现场质量控制

控制生产现场质量，主要是从人、机、料、法、环境测量等几个因素入手。

1）人的因素的控制

从对产品质量影响来看，人的因素包括3个方面：个体人、人—机配合及人际关系。

（1）应通过多方面的培训，提高人员素质

应防止使用未经培训或培训不足的人员来执行对质量有影响的工作，培训的内容包括专业培训和提高质量意识的培训，根据确定岗位的上岗条件并提出培训要求。如企业内部无法满足培训的要求，可采取外委的方式进行，对于从事特殊工作的人员除应按要求进行相应的培训外，还要对此类人员进行资格考核，通过考核认可后方可上岗，它们包括：

①有关法规明确规定涉及人身、设备安全必须经过培训考核才能上岗的人员，如电工、锅炉工、天车工等。

②有关法规要求必须具备一定专业知识和操作技能并通过考核才能上岗的人员，如计量检定人员，某

些试验人员等。

③对质量有重要影响的关键工作岗位上的人员。

(2) 搞好人—机配合

人—机配合状况对产品质量产生重要影响，现代质量管理应从人—机系统的质量及运行状态上来分析影响和效果。

(3) 改善人际关系

人际关系的状态不仅影响个人能力的发挥，甚至影响整个组织的功能，必然要影响产品质量，因而应给予足够的重视。

2) 设备质量控制

设备质量控制包括：设备自身精度和设备运行状态质量控制。

(1) 设备的采购及验收

应确定设备的用途、所需精度，然后进行调研，根据本企业及其它用户的使用经验，从性能、价格、服务等几个方面综合考虑，确定购置的设备。设备购入后应进行初步验收，主要内容包括：

①随机文件资料是否完整；

②各类备件是否齐全；

③水、电、油、气等是否正常。

设备初步验收合格后，进入安装调试阶段，然后进行正式验收。验收的主要内容是设备的各项性能能否达到使用说明书的要求，设备的精度、生产率能够达到保证产品质量的使用要求。

(2) 设备使用技术状态的检查

设备的日常点检和专职管理人员的巡检、定检相结合的“三检制”是设备质量控制的基础。

①点检

通过设备操作者的感官，依据《设备日点检记录卡》所规定的部位和要求，进行定点检查。

②巡回检查

由专职设备管理人员在点检的基础上，对设备的技术状态，再行复检，也是对点检情况的复查。检查的项目、时间、频次完全由设备管理人员视设备运行情况而定。

③定期检查

每隔一段时间对设备技术状态进行检查，依据的文件是设备定期检查卡。

(3) 采用“三、二、五”使用、维护保养制度

所谓“三、二、五”就是“三定”使用，“二级”保养，“五定”润滑制度。

“三定”使用制，即实行“定人、定机、定操作规程”的管理制度。对于“关键、大型、精密”的设备，应制定详细的操作规程，还要实行岗位资格认证制，颁发操作许可证。

“二级”保养制，即指“例行保养、一级及二级保养”所组成的保养制。例行保养由操作人员进行，一级和二级保养以专职维修人员为主，应制定详细的保养规程和验收准则。

“五定”润滑责任制是指“定点、定质、定量、定期、定人”进行保养。

(4) 建立预防性维护的体系

对生产过程有重要影响的关键设备，应建立有效的、有计划的预防性维护的管理体系，内容至少包括：

①预防性维护的规程；

②预防性维护的方法；

③设备使用、维修状况的记录；

④能够及时得到关键设备的关键部件。

3) 物料质量的管理

物料管理的任务是在物料的配料、加工、搬运及贮存过程中，确保物料质量符合标准规定的要求，应做好如下工作：

(1) 严格物料的入厂检查

汽车论坛 http://www.qclt.com

依据订货合同规定的质量要求，编制入厂检验指导书，防止不合格的产品流入生产过程。

(2) 坚持首件检验

执行首件检验，可以有效地防止成批不良品的发生。

(3) 编制工序间物流图

按照工艺加工顺序，编制标明物料的流向、流量和流程的物流图。物料管理应程序化、标准化，避免物料混用情况的发生。

(4) 搞好库房管理

应制定库房管理规程，定置存放，先进先出。

物料入库后，应提供适宜的保存环境，妥善保管。

应定期对库房状况进行检查，以避免出现损坏变质或失效的情况。

4) 生产现场文件的控制

生产现场的各类文件是生产活动的依据，这些文件和资料的正确与否直接影响到产品的质量。

文件控制的要点是：

①所有需要制定文件方能保证产品质量的场所，均应制定有关的文件；

②对产品质量有重要作用的场所，应使用相应文件的有效版本；

③所有作废和失效的文件，均应及时从生产现场撤出，避免误用；

④文件和资料的更改应由该文件的原审批部门进行。

5) 生产现场环境的质量控制

生产现场中，与产品质量相关的环境因素很多，包括：物理环境、化学环境、作业环境及心理环境等。

物理环境因素：指温度和湿度、振动和噪声、色彩、照明等。

化学环境因素：指粉尘及有害气体等。

作业环境因素：指文明生产、安全生产、均衡生产等。

心理环境因素：操作者的工作热情、价值取向、责任心及人际关系等。

(1) 物理、化学环境因素的质量控制

①温度和湿度

通常，温度在17～18℃和相对湿度在40%～60%的范围内，人们工作效率最高，疲劳度最小，作业的安全程度也最高。

②振动和噪声

振动和噪声过大，会影响设备的精度和加工质量，损害操作者的身体。

③照明

照明情况对操作者的工作情绪有直接影响，在某些情况下，如外观项的检查，对光线要求非常高。

④粉尘和有害气体

粉尘和有害气体对操作者的身体及产品质量至关重要。

(2) 作业环境因素的质量管理

作业环境因素包括以下几个方面的内容：

①组织和建立文明生产的环境

文明生产包括：文明操作、文明管理、文明环境和文明秩序等。

②实施定置管理，改善工作环境。

③实行均衡生产，保证产品质量稳定。

6.2.6 质量检验

质量检验是企业为保证产品质量不可缺少的手段和管理环节，为了保证检验工作的质量，必须具备以下基本条件：

①有一个严密而有效的质量检验系统和管理制度；

汽车论坛 http://www.qclt.com

②有一支数量足够而素质良好的检验人员队伍；
③有一套完好齐全、能确保检验精度要求的检验和计量设备。

6.2.6.1 检验的含义

检验就是对产品或服务的一种或多种特性进行测量、检查、试验或计量，并将这些特性与规定的标准进行比较，以确定其符合性的活动。即使用某种手段或方法，测量其质量特性，并将测量结果与产品质量的规定要求进行比较，从而判定该产品是否合格；或与产品批的质量判定基准进行比较，以判定该批产品是否合格。

质量检验包括以下各项工作：
①明确产品的质量特性，并对其规格作必要的说明；
②明确质量特性的计量单位和方法；
③明确产品或产品批的比较基准；
④选择适当的测量工具或装置，规定检验的程序；
⑤进行实际的测量，必要时，对测量结果进行换算；
⑥与基准比较后作出是否合格的判断。

6.2.6.2 检验的目的

检验的目的主要有两个方面：一是对用户实行质量保证；另一个是判断工序或生产过程是否正常。具体来说，包括以下几项：
①作出符合性判断，区分合格品与不合格品，或区分合格批与不合格批，检验的方式可以是全检或抽检；
②实行质量控制，判定工序是否正常；
③提供质量信息，为改进工作、经营决策提供依据；
④增强企业全体职工的质量意识，切实树立质量第一的思想。

6.2.6.3 质量检验实施及要点

1）明确检验的职能
企业检验工作的主要职责包括：
(1) 把关的职能
质量把关是检验工作最基本的职能。通过检验，将检验对象区分为“合格”、“不合格”，以便做到：
①不合格的原材料不投产；
②不合格的半成品不转序；
③不合格的零部件不组装；
④不合格的产成品不出厂。
(2) 监督与预防的职能
通过检验对生产过程及产品实施监督，及时发现问题，确保不出现批量不合格的情况，确保产品质量。
(3) 质量信息反馈的职能
通过检验得出的结果和数据，及时了解产品的质量状况及变化趋势，正确评价质量管理水平和经济效益的高低。质量信息主要包括以下几方面的内容：
①原材料、外购件、外协件的入厂检验情况；
②各个车间或主要生产环节、关键零部件、重点工序的各项合格率及质量问题；
③成品出厂检验的合格率、报废率、返修率、降等率及其相应的损失情况；
④不合格品的处理和纠正措施的报告；
⑤质量跟踪情况、用户维修、索赔、投诉和意见反馈的报告；
⑥国家及行业监督机构，销售市场对产品抽查及评价结果的报告。

汽车论坛 http://www.qclt.com

6.2.6.4 质量检验的种类（检验方案）

质量检验按其进行阶段不同，可分为进货、过程和最终检验等几大类。

1）进货检验

由外部采购的原材料、燃料、外购件、外协件的质量，对成品质量是至关重要的，必须做好进货检验工作，应根据产品类型及供货阶段的不同，把握好以下几个环节：

①确定需要检验的特性及检验项目；

②选择经济合理的抽样比例；

③选择适当的检测工具或仪器设备，培训有关人员，制定合适的验收制度，编制必要的记录表格等；

④规定接收准则。

在制定检验规程时，应考虑以下几个方面的因素：

①不同供货阶段，控制的力度应不同。一般来讲，对于首次供货；设计或结构有重大变化；制造工艺有重大变化或停产较长时间后再恢复生产的产品，应加强检验力度，增加抽样比例和检验项目。对长期批量供货的产品，可按正常要求进行检验。

②不同的产品种类，制定不同检验规程。对于产品质量有重要影响的关键部件或涉及到法规、安全和外观的产品，应重点实施控制。

③针对不同的企业，采取不同的检验方法。对于长期供货、质量稳定、供货业绩较好的企业，为了降低检验成本，可适当减少抽样比例，对于经常出现质量问题的企业，则应加强控制力度。

一般情况下，进货检验应注意以下几点：

①对于采购入厂产品，应要求供货方进行出厂检验，并提交合格证明；

②应制定详细的“入厂检查指导书”或“入库检验细则”，对检验程序、方法、测量工具、验收准则做出明确规定；

③入厂检验后，对合格品，应填写入库通知单，检验记录单上应签名。对检验后不合格的产品，应注明不合格原因，在实物上加以明显标识并隔离。

2）过程检验

过程检验是指企业内部生产过程中各工序生产产品时的检验。过程检验包括以下3类：

（1）首件检验

首件检验的目的是验证生产准备是否完成的一项措施。首检合格，方能进行正常生产。下面几种情况应进行首件检验：

①工序新投产一批产品时；

②工序的生产设备进行了重大调整或工艺方法有了重大变化时；

③轮班开始或操作工人变更时；

④毛坯种类或材料变更时。

（2）巡回检验

巡回检验就是生产加工过程中，由生产工人或专检人员按规定的时间间隔和巡回路线，在工作现场对工人加工出来的产品进行抽查，以防止生产状态发生变化而发生大批不合格品。

巡回检验可与控制图结合使用，对生产过程进行控制。

（3）末件检验

对于依靠模具或装置保证产品质量的生产过程，适于建立末件检验制度，形成“首检—巡检—末检”以及“自检—专检”相结合的质量控制体系。

末件检验就是当一批产品在一个工序加工完成后，全面检查最后一个或几个产品，如果发现不合格，应立即对已加工的产品进行全面复查，并找出不合格的原因，采取纠正措施，防止再投产时发生类似问题。

3）最终检验

最终检验是产品完成全部工序后对产品进行的检验。最终检验是全面考核产品质量是否符合规定要求

汽车论坛 http://www.qclt.com

的重要环节，是向顾客提供产品符合规定要求的重要证据之一。最终检验完成后，应等到所有过程检验均已完成，且结果符合规定要求，才能签发合格证并发运。

6.2.6.5 质量检验抽样方法

质量检验根据情况可以全数检验和抽样检验。

1）全数检验

全数检验，就是逐件对产品进行100%检验。全数检验能对一批产品的质量作出可靠的结论，获得更加全面的质量信息。

全数检验适用于下述情况：

①一旦出现不合格品，可能造成重大损失；

②对下道工序影响较大，如零件作为安装定位基准等重要部位的加工；

③质量不够稳定的工序；

④可运用自动检查设备进行检验，效率高，并且检验费用与产品价格相比足够低廉的情况；

⑤用户规定有全检要求的产品。

2）抽样检验

抽样检验是按照统计方法从每一批产品中，抽取适当数量的产品作为样本，对样本中的每一个样品进行检验，通过这样的检验来判别整个一批产品是否符合规定要求和能否接收。

抽样检验一般适用于以下几种情况：

①检验是破坏性的；

②产品数量较大；

③检验项目多，检验过程复杂；

④希望检验费用少。

对于生产批量较大的汽车产品，抽样检验是最常用的检验方法，因此选择适宜的抽样方法，对于最大限度地减小风险，具有至关重要的作用。

抽样检验按其性质可分为计数抽样检验和计量抽样检验两类型。

（1）计数抽样检验

计数检验可分为两类，一类为计件检验即只区分合格品与不合格品；另一类为计点检验，即只按缺陷数进行检验。

一般情况下，产品结构比较简单、产品较大，能方便地使用目视检验，或可采用通规/止规进行检验，迅速方便地区分合格品和不合格品时，采用计数检验比较方便。计量检验则需要精确地测量出质量特性值。这种方法比较麻烦，但可以得到更加充分的质量信息，采用计量型抽样方案，一个重要前提是，质量特性值必须服从正态分布。

（2）计量检验与计数检验比较如表6-2-2。

表6-2-2 计数抽样检验和计量抽样检验的比较和选择

	计量抽样检验	计数抽样检验	
		合格品，不合格品	缺陷数
质量特性值	计量值	计件值	计点值
检验特点	·要求检验技术熟练 ·检测设备复杂 ·统计计算较复杂 ·由于对每个特性要分别判定特性项目多时，不能保证批的综合不合格品率 ·检查时间较长 ·检查记录较复杂	·对检验熟练程度无特殊要求 ·检测设备较简单 ·统计计算简单方便 ·即使质量特性项较多时，也能综合判断 ·检查需要时间较短，效率高 ·检查记录较简单	

续上表

	计量抽样检验	计数抽样检验	
		合格品，不合格品	缺陷数
理论上的适用性限制	·要求实行随机抽样 ·特性值只限于正态分布	·要求随机抽样 ·特性值不受分布类型限制	
优质批和劣质批的判别能力与样本容量关系	·为获同样判别力，样本容量增大；样本容量相同时，判别能力则下降	·为获得同样判别力，样本容量可以缩小；样本容量相同时，判别力可以提高	
检查记录的可利用程度	·检查记录可用于其它目的的程度较高	·检查记录可用于其他目的的程度较低	
有利的适用场合	·产品价格比检查费用高时 ·在检查中需要较多的时间、设备、人工时 ·需分别按各特性项目保证批的质量时 ·批的平均质量比起各个不合格品或缺陷更重要时	·检查费用比产品价格便宜时 ·检查中不太耗费时间、设备、人工时 ·检查项目较多，需综合保证批的质量 ·不合格品需全部更换为合格品，或需校正或消除缺陷而成为合格品时	

6.2.6.6 抽样检验标准体系

我国目前发布的抽样标准体系，如图 6-2-4 所示。

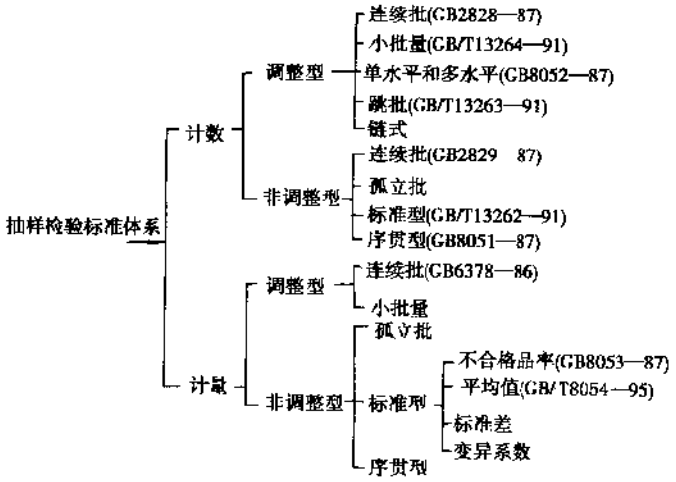


图 6-2-4 抽样标准体系

6.2.7 服务

服务环节质量职能主要有：

①为实现产品质量（使用价值），向顾客提供必要的技术服务；

②为维护和恢复产品质量，向用户提供必要的技术服务和开展各项维修工作；

③在技术服务和维修的过程中，了解顾客的需求和产品的质量信息为持续改进提供依据。

汽车论坛 http://www.qclt.com

服务工作展开为以下工作项目：

——编写并及时提供产品说明书；

——培训相关人员；

——提供技术咨询；

——组织各种形式的维修服务；

——供应备品和配件等。

为了做好技术服务和维修工作，企业应设置专门的机构或将各项质量职能分配给各有关部门。

6.2.7.1 编写产品说明书

产品说明书包括产品简介、产品使用说明书、产品维修手册等。

1）产品简介

（1）使用对象和作用

产品简介的主要使用对象是经销单位和使用单位的采购人员、工程技术人员和有关领导。产品简介的作用是直观、形象地向顾客介绍产品，作为宣传、推销产品的手段。

（2）内容和编写要求

在产品简介中，对产品的用途、主要技术性能、规格、应用范围、使用特点、注意事项等，要作出简要的文字说明，并配之以图片。还可以就企业的生产规模、技术优势、质量保证能力等基本情况作一介绍，使用户对企业概貌也有所了解，增进用户对生产企业及其产品的信任感。

2）产品使用说明书

（1）使用对象和作用

产品使用说明书的使用对象是消费者个人或主机厂的操作人员，它的作用在于使用户能够正确使用或操作，充分发挥产品的功能。同时，它还要使用户了解安全使用、防止意外伤害的要领。因此，编写简明、直观、形象的使用说明书，是技术服务中一项十分重要的工作内容。

（2）内容

产品使用说明书的主要内容可包括：

①规格　主要是技术参数、性能；

②安装　指产品启封后使用前的装配、连接方法；

③操作键　产品上各种可操作的开关、旋钮、按键名称，以及指示灯、数码管、蜂鸣器、显示屏等显示、报警装置的位置和作用。

④工作程序　指为实现产品各种功能必须遵守的使用、操作方法和程序；

⑤维护要求　在产品使用过程中应采取的清洁、润滑、维护方法；

⑥故障排除方法　主要是常见的一般故障的排除方法；

⑦特别注意事项　根据产品特点提出的维修保养，防止错误操作，避免人身伤害等的安全要求；

⑧维修点　介绍工厂维修服务部门或特约维修点的地址、电话号码和邮政编码；

⑨信息反馈要求　如附加的征询用户意见的质量信息反馈单等。

3）产品维修手册

（1）使用对象

维修手册的使用对象主要是专业维修人员。

（2）内容

维修手册在介绍产品基本工作原理的基础上，应该侧重于讲解维修方法，而且应具有很强的可操作性。维修手册或资料应强调以下内容：

①区别于同类产品的特点，包括单元电路的作用原理，机械结构和拆卸、装配方法；

②新型零配件的性能、特点、互换性可代用品；

③产品与通用或专用仪器、仪表的连接和检查测试方法；

汽车论坛 http://www.qclt.com

④专用检测点的相关参数标准和专用工具的应用；

⑤查找各类故障原因的程序和方法

6.2.7.2 培训相关人员

1）对用户的培训

对个人用户的培训的目的，主要是介绍产品的特点和使用方法，尤其是要讲清新产品的技术性能、使用范围和注意事项，以提高用户对产品的认识，掌握使用要领。

2）对维修人员的培训

为了保证专业维修单位的维修质量，生产企业有必要定期对各特约维修点的维修人员进行培训。

6.2.7.3 质量保证期

汽车质量保证期是指汽车制造企业对所售产品实施质量担保的期限。它规定了自汽车出售给用户之日起，在规定的时间和行驶里程内（二条件以先达到者为准），对确因原材料、制造加工和装配不当等自身质量问题而引起的产品损坏和缺陷，生产厂家所承担的质量责任。适当延长汽车产品质量保证期，可以促使企业提高产品质量，提高用户的信心。

原机械部根据我国汽车行业现状制定了“九五”期间国产汽车、摩托车质量保证期方案（表 6-2-3），各企业可参照执行。

表 6-2-3 “九五”期间国产汽车、摩托车质量保证期方案

实施日期			1997年1月1日				1999年1月1日				
质量保证主要范围			汽车摩托车（易损件由企业另定）		汽车重要部件、安全件、环保件		汽车摩托车（易损件由企业另定）		汽车重要部件、安全件、环保件		车身耐锈蚀（穿孔）
车辆类别	货车按总质量（Q）分类 客车按车长（L）分类 轿车、摩托车按发动机排气量（V）分类		质量保证期		质量保证期		质量保证期		质量保证期		质量保证期
			时间（年）	里程（万·km）	时间（年）	里程（万·km）	时间（年）	里程（万·km）	时间（年）	里程（万·km）	时间（年）
车辆类别	客车与货车	微型：$Q\leqslant1.8$t，$L\leqslant3.5$m	1.0	2.0	2.0	4.0	2.0	3.0	2.5	6.0	–
		轻型：1.8t$<Q\leqslant$6.0t；3.5m$<L\leqslant$7.0m	1.5	3.0	2.5	6.0	2.0	4.0	3.0	8.0	–
		大（重）中型：$Q>$6t；$L>$7m	1.5	4.0	2.5	8.0	2.0	5.0	3.0	10.0	
	轿车	微型：$V\leqslant$1.0L	1.0	2.0	2.0	4.0	2.0	4.0	3.0	8.0	3.0
		普通：1.0L$<V\leqslant$1.6L	2.0	3.0	3.0	6.0	3.0	5.0	4.0	10.0	5.0
		中、高级：$V>$1.6L	2.0	4.0	3.0	8.0	3.0	6.0	5.0	10.0	5.0
	摩托车	$V\leqslant$50mL	1.0	0.6	·		1.0	0.8	·	·	–
		50mL$<V<$250mL	1.0	0.8			1.0	1.0		–	–
		$V\geqslant$250mL	1.0	0.8			1.0	1.5	–	–	–

6.2.7.4 产品维修

维修是售后服务的一项基本内容，维修服务主要有以下几种形式：

1）门市维修

门市维修的服务对象，主要是当地的用户，应该尽量缩短维修时间，体现及时性，并严格保证维修质量。

2）上门维修

为了做好上门维修工作，应该注意以下几点：

(1) 要制订好上门维修的规章制度；

(2) 要组织好上门维修的人员队伍；

(3) 要提供必要的维修手段

3) 特约维修点

按一定标准和手续在各省、市、自治区，地区或县属经销单位，建立门市修理部和特约维修点，并对其进行定期的监督、考核。

6.2.7.5 零配件的供应

生产企业在组织生产时，就应考虑到产品投入市场后的维修服务工作。与此同时，还应考虑到维修所必需的备品或零配件的生产与供应。由于缺乏零配件而不能及时维修，是造成用户投诉的主要因素之一。所以，组织好维修用备品或零配件的生产和供应，是产品后勤保障工作中不可忽视的内容。

基本要求：

向用户或经销单位提供足够的维修用备品或零配件，是生产企业认真执行“三包”、“三保”的一项重要内容。为保证做好此项工作，有以下基本要求：

1) 树立正确的指导思想

真正为用户着想甚至要贯彻“先满足维修需要，后考虑生产配套”的原则，这是取得良好的用户信誉和社会影响的重要环节。

2) 安排好零配件的生产计划；

3) 落实零配件供应渠道，包括：

①门市供应；

②函购供应；

③配额供应特约维修单位与生产企业按各地销售量签定协议，配额供应；

④订购供应商业系统的经销单位或其它维修单位按需要向生产企业采购、订货。（撰稿人：于洪涛）

6.3 当代质量管理活动

6.3.1 基准确定

6.3.1.1 基本概念

1) 定义

基准确定，是指通过调查分析弄清楚竞争对手及世界级水平企业的性能、质量等影响企业竞争力的基本情况，找出本企业与竞争对手及世界级企业水平的差距，以确定本企业改进目标与策略的一种活动与方法。

2) 比较的内容

供基准确定用的比较内容，应选择影响竞争力的重要项目，为了便于比较，要使比较内容尽可能的数量化并具有代表性。例如：

(1) 产品质量

①每百万件产品不合格数，PPM（进厂件、生产过程及出厂后）；

②可靠性水平；

③顾客抱怨率与投诉率。

(2) 服务

①及时供货能力（对零部件供应商）；

②订单反应时间；

汽车论坛 http://www.qclt.com

③保修期；
④售后服务质量；
⑤备件供应能力。
(3) 成本
①劳动生产率；
②生产规模；
③生产能力利用率；
④平均库存；
⑤年平均库存周转次数；
⑥单元成本；
⑦单元价格；
⑧利润率。
(4) 技术
①产品技术年代；
②产品更新能力（更新率、更新周期）；
③制造自动化程度；
④产品品种。
(5) 其它重要因素
①质量体系的建立与运行有效性；
②人员状况（如职工结构、年龄构成、教育培训情况）；
③精益生产方式的应用；
④订单生产的百分率；
⑤横向小组的数量；
⑥供应商网络的建立与运行水平；
⑦改进活动数量。
3) 调查研究的组织方式
基准确定的组织方式可以由供方单独进行，也可由供方或顾客委托的机构或行业协会组织进行。
4) 改进目标的制订
(1) 世界级水平企业的确定
所谓世界级水平的企业是指在产品质量、成本、技术等方面处于世界领先水平的企业。例如：同时具有很高的劳动生产率、很高的质量水平和很有竞争能力的成本。这必须对足够数量的世界范围的同类产品企业的调查分析之后确定。
(2) 改进目标
在数据调查分析之后，可以确定本企业的主要竞争对手的状况及本企业的差距，消除这些差距需要措施与时间，而在此同时，竞争对手也在做改进。因此，确定改进目标时还要考虑竞争对手的发展，如图 6-3-1 所示。

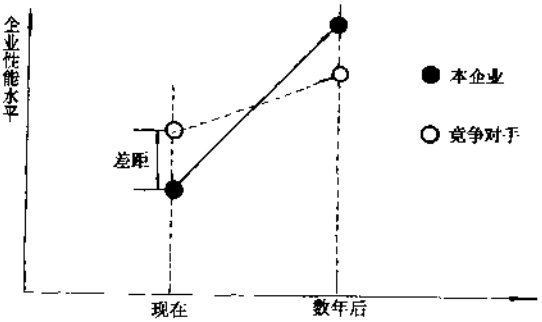


图 6-3-1 改进目标确定

6.3.1.2 基准确定的步骤

基准确定大致可以分以下几个步骤，见图 6-3-2。
1) 策划与数据收集分析阶段
首先要确定收集哪些数据，这些数据要足以反映企业竞争力，同时要确定数量化的方法与标准，

以便于数据的分析与应用。

选择的调查分析之企业要有足够的数量与代表性，包括世界级水平和竞争对手的企业在内。

2）数据信息集成与分析

确定数据的收集方法与渠道，数据除包括比较数据体系外，还应包括对主要特征的描述、成功经验、失败教训等对数据分析有意义的信息。

3）确定与竞争对手及世界级水平的差距，制订改进目标计划与措施。

4）实施改进，检查改进效果，并重新进行基准确定。

6.3.1.3 基准确定举例

表 6-3-1 所举的数据是参考一些研究报告编撰的，仅供参考。

1）世界级水平企业的确定

根据同时在劳动生产率和产品质量处于世界领先水平来确定，如图 6-3-3，A、B、C、D、E、F 六工厂可以认为处于世界级水平。

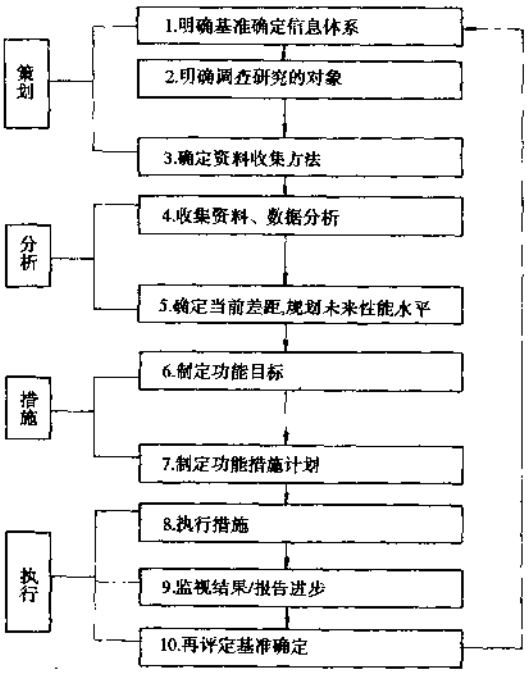


图 6-3-2 基准确定步骤

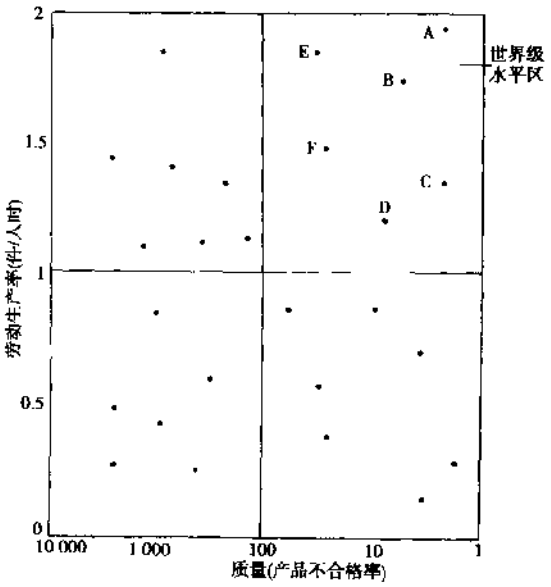


图 6-3-3 世界级水平的确定

2）比较项目及数据表（表 6-3-1）

表 6-3-1 基准确定数据比较举例

比较项目		世界级	竞争对手	本企业
主要性能	劳动生产率（件/人时）	1.5	0.6	0.3
	质量（缺陷 ppm）	200	2000	3000

汽车论坛 http://www.qclt.com

续上表

比较项目		世界级	竞争对手	本企业
生产特性	年产量（件）	30万	15万	15万
	能力利用率	90%	80%	70%
技术水平	装配线自动化率	50%	30%	35%
供应网过程控制	进货质量（缺陷 ppm）	300	3000	3000
	内部首检不合格率	2%	3%	3%
	顾客抱怨率（ppm）	10	1000	2000
	供应网总库存（h）	50	100	80
	装配线库存（h）	24	40	40
	进货频率（时/次）	10	20	24
	交货频率（时/次）	5	20	24
	生产启动时间（h）	0.5	7	8
精益生产方式	运送至顾客时间（h）	10	30	40
	拉动系统比例	80%	50%	30%
	收到定单至实际发货时间（h）	36	72	96
	时间表变差	5%	10%	20%
	职能小组数（个/百名职工）	1	0.2	0.1
	职工合理化建议数目（个/人年）	10	2	1
	改进活动项目数（个/100人年）	8	2	0.5
人员素质	职工平均年龄	36	32	33
	职工平均工龄	10	6	8
	职工培训率	99%	80%	50%
	平均教育程度（年）	13	9	10
	专业技术人员比例	30%	20%	25%

6.3.2 质量功能展开

6.3.2.1 基本概念和意义

质量功能展开（Quality Function Deployment－QFD）是一种结构化的方法，用这种方法把顾客的要求转化为产品每一个阶段（产品研究与开发、工艺设计、制造控制、市场开发、销售等）适当的技术要求，将产品的需求、功能、质量和成本有机结合起来，确保顾客的需求不会消失在产品开发和制造过程之中，这种方法可以通过比较、评价顾客各种要求的相对重要性，确定出最重要或最敏感的技术特性，在开发和制造过程中予以重视。

QFD通常由一个小组来完成，小组成员由设计、制造、工程、技术、质量、可靠性、销售、采购、顾客代表（必要时）等方面人员组成。

QFD不仅与质量有关，还是达到以下目标的一种方法：缩短开发周期、满足顾客要求、降低成本、生产出第一次就能正常工作的产品。

QFD可以在产品的不同层次上进行，这些层次包括产品、系统、子系统、部件/材料。

6.3.2.2 QFD方法－质量屋

QFD又称为“质量屋”，这是因为QFD中的矩阵组合在一起就变成了屋子形状（图6-3-4）。完整的QFD过程可能需要利用几个“质量屋”形成一个系列（图6-3-5），逐步把顾客的要求转化为具体的加工工序和详细工艺过程要求，最简单的过程只需要一个“质量屋”。下面介绍“质量屋”的基本组成。

1）中心（或关系）矩阵

中心矩阵位于质量屋的中心，这是把“需什么?”与“如何做?”进行匹配的地方。第一项顾客要求

汽车论坛 http://www.qclt.com

(需什么?)要与每一技术特性或设计特性(相关、不相关、互斥、如何做?)进行系统地比较。在这个矩阵中心以适当的符号标明这种关系的性质(相关、不相关、互斥)。实施QFD的小组可以自己制定一些符号。例如,用数字表示这种关系相对的程度,或简单地打一个勾也满足要求。对于发动机来说,顾客要求可靠性高与设计要求材料好和装调质量高的关系是相关的。这种匹配工作是由该小组根据他们的经验来判断。其目的是要清楚地确定用哪些手段(如何做?)能满足哪些要求(需什么?)。同时也可检查是否所有的要求事实上都能满足(技术特性是否充分?),是否某些技术特性明显地不起任何作用(多余!)。

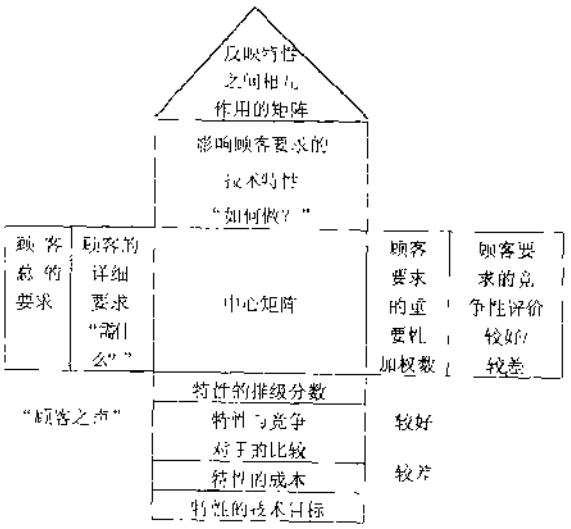


图 6-3-4 质量屋图

2)顾客要求

进行QFD的起点就是确定顾客的要求是什么,或者说就是要了解"顾客之声"。这些要求是填写在中心矩阵左边的栏目中。有关顾客要求的各种信息可以从各种渠道获得,QFD本身也可以是一种主要方式。顾客可以是现在的或将来的,内部的或外部的,主要的或次要的。顾客可以包括所有者,使用者和维护者。他们都有各自的要求。对收集到的所有顾客要求应进行归纳,然后分析这些要求,并确定各类要求的层次(如关键、重要、主要、安全、一般等)。在最左边一栏中填写总体要求,第二栏填写详细的要求条目(需什么?)。

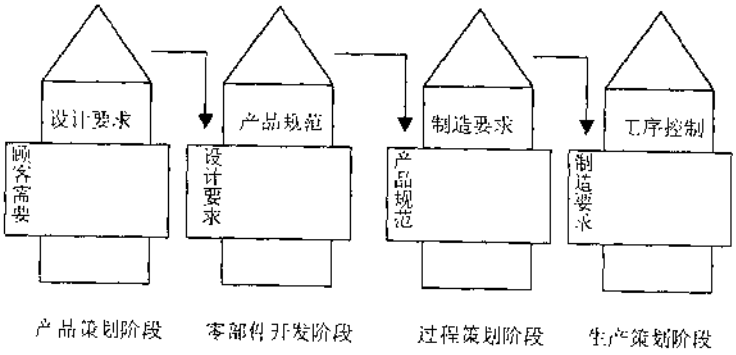


图 6-3-5 利用质量屋展开

来自市场营销的组员有责任归纳顾客的要求信息。他可以开始就把调查结果传阅一下或简单介绍一下。小组应将这些信息收集起来。该小组的成员应积极思考("头脑风暴法")提出顾客的要求(而不是技术特性!)。就发动机来说,顾客的主要要求可能是可靠性,详细一点就是没有三漏现象,不容易出故障等。

在实际研究中一些顾客要求的项目可能很多,可以通过分类的方式来缩减(可以参考使用亲和关系图和树状图进行)。但重要的是要合理地保留"顾客之声"的本意。小组一定不要试图去估计猜测或凭想象认为哪些是顾客最需要的。

3)顾客要求的相对重要性和排级

当把顾客的要求集中填入质量屋左边的矩阵时,要对每一要求给定一个加权数,以此标明其重要性,加权数是根据市场研究或焦点问题分类来确定的。若不能如此确定,则该小组可以采用所谓"成对比较"的技术来确定加权数(在成对比较中,每项要求之间都要两两作对比,两项要求中较重要的获得1分,把

汽车论坛 http://www.qclt.com

所有的分数加起来确定最后排级。），加权数可填入紧挨关系矩阵右边的一列中。

4）顾客要求的竞争性评价

根据顾客的主观评价，可以对每一项顾客要求进行检查。要求一组顾客来逐项说明他们对公司产品的现有性能相对于竞争对手产品性能的主观评价。这个过程目的是要清楚地确定竞争对手产品相对于自己产品的几项指标（即：优势，弱点，机会，威胁——SWOT）。例如，顾客可能了解发动机制造厂的产品是很可靠的，但其经济性差。如果经济性排级数高，这就提供一个机会，用中心矩阵来说明哪些技术特性可以用来弥补这个不足之处。竞争性评价是填在顾客要求加权数右边一栏。

5）技术特性和相关的排级数

在质量屋上，从左到右填上顾客的要求、加权数和竞争性评价，自上而下填写技术特性（或设计特性）、排级分数和竞争性评价。就在中心矩阵的上边列出该产品的技术特性。对于这些技术特性的说明应该用可能对顾客要求有影响的术语来表达。对于发动机来说，这可能包括额定功率、转矩、转速、排气污染物、燃油消耗率和噪声，等等。把这些信息再一次分组汇总，以形成各个层次。在这里该小组应依靠自己的专业技能来完成。

就在关系矩阵的下方，有一排或更多排空格用来填写诸如成本或技术难度或开发时间的排级分数。给定这些排级分数要取决于该产品的要求。这样做使得小组能够判断各种技术措施的有效性。第一排是利用顾客的加权数和中心矩阵来导出相对技术特性的排级分数。可以参阅其它书籍有关矩阵分析的例子来进行。

在中心关系矩阵下面的一排或更多排的空格是用来评价竞争性的。在这里，如果可能的话，尽量用“硬”指标数据来比较本公司产品和竞争对手产品的实际物理特性或设计特性。以发动机为例，这就包括额定功率、转矩、转速、排气污染物、燃油消耗率和噪声，等等。目标特性就是这个过程的最终输出（产物）。但许多人会认为QFD中真正的益处是进行信息汇总、排级和小组讨论，使得内部职能部门增进相互了解。

6）质量屋屋顶

质量屋屋顶就是技术特性相互作用的关系矩阵。斜着排列的方式可利于每项技术特性相互对照。这可以简单地反映出可能存在的技术权衡或选择。以发动机为例，转速和噪声这两个技术特性的关系是互斥的。提高转速可以提高功率，但也提高了不希望的噪声。利用小组的技术和经验，应把这些因素的相互作用说明清楚。

7）使用质量屋作为决策工具

在汇总了顾客的要求，顾客要求的加权数，竞争性评价，技术特性和技术竞争措施之后，就开始填写主关系矩阵和技术关系矩阵。全组都应参与，因为这是重要的学习阶段。要仔细考虑主矩阵中每一个空格的内容。问题是技术特性能满足顾客要求到何种程度。如果满足则在该空格中填写一个记号。可以用不同的记号来表示相对的程度。如果没有什么影响，则不填什么标记。待所有的空格都填完了，再检查一下主矩阵。空着的一排则表明此项顾客要求没有得到满足。空着一列则表明该项技术特性是多余的。从主矩阵上就可得知哪些技术特性是设计上要给予重视的。底下一排就是这些要求的成本。如果成本很重要则可能要改变优先顺序。然后要查看技术因素的权衡或选择情况。对于一个特殊的顾客要求，常会有不止一种技术方法。可能会有一种替代的技术方法会对另一项顾客要求有不利的影响。用质量屋的屋顶可以发现这一点。最后，小组通过讨论要达成共识。做这项工作当然要花一定的时间。但经验表明随着实际设计、生产准备和制造过程的进行，这些时间和成本会得到几倍的补偿。

矩阵的底下一排就是“特性的技术目标”。现在可以把这一组数据填入另一个质量屋。上一次“特性的技术目标”就变成了“顾客要求”或“需什么?”，而竖列（“如何做?”）也许就是工艺、装配、材料或布置。这样把该过程如此“展开下去”，直到小组成员都认为已经考虑得足够详细，包括了把该产品推向市场的过程中所有协调工作时为止。

注意：为了把顾客要求一直展开到各个阶段或最终制造过程，可以在几个阶段中分别应用QFD。这里，前一个QFD矩阵的结果（如技术规格）就是变为下一矩阵的输入，而下一个矩阵的目的就是要分析制造该产品过程的技术要求。

汽车论坛 http://www.qclt.com

6.3.3 潜在的失效模式及后果分析（FMEA）

6.3.3.1 概念

①潜在的失效模式及后果分析，是在产品的设计阶段或过程（工艺）设计阶段，对构成产品的子系统（总成、分总成）、零件，对构成过程的各个工序逐一进行分析，发现并评价所有潜在失效模式并分析其可能的后果，找到能够避免或减少这些潜在失效发生的措施，以提高产品/过程的质量和可靠性的一种系统化的活动。

②1994年，由美国汽车工程师学会颁布了SAEJ-1739——潜在失效模式及后果分析标准。美国三大汽车公司及德国大众公司均将FMEA做为对供方进行质量控制的重要工具。

③FMEA是一种"事前行为"，不是"事后行为"。是通过预防性措施来大量减少投产后再进行纠正的风险和造成的严重损失。

④FMEA不是由专门人员完成的，而是由掌握FMEA方法的设计主管工程师负责，但强调应有设计、制造、供应、材料、质量、服务及相关部门的代表参与，因此FMEA是集体的智慧与经验的结晶，也为今后的设计提供重要的参考。

6.3.3.2 FMEA的步骤与方法

①设计FMEA建立所要分析系统/子系统/零部件的逻辑框图，这种框图说明了分析中包括的各项目之间的主要关系，并建立了分析的逻辑顺序，其复制件应伴随FMEA全过程。

过程FMEA建立过程流程图/风险评定，流程图应确定与每个过程有关的产品/过程特性参数，并评定每一过程步骤的风险程度，要依据风险程度确定需要FMEA的过程步骤。

②列出产品/过程所有潜在的失效模式，所谓失效模式就是失效的表现形式，即我们直接描述的失效现象，如：变形、断裂、渗漏等。

③分析各种失效模式的后果，即对完成系统功能的影响，（注意不是对零件本身的影响。FMEA与FTA（失效树分析）的不同之处在于FMEA是分析零件子系统对系统的影响，FTA是从系统失效开始分析其子系统零件），需要特别强调的是与政府法规以及产品重要性能有关的不符合及顾客的不满意等。

将后果按严重程度划分为10级，分别给出1～10分，称之为严重度数（S）（参照美国汽车工程师学会的推荐方法）。

④分析失效模式可能的原因与机理及其出现的概率。

原因与机理可能与设计计算、材料选择、误操作、工艺装备性能、测量系统、技术条件、环境等方面的问题有关。根据经验，尤其是与以往的设计对比，估计这些原因与机理出现的可能性大小，并评定其可能性等级，称为频度数（O）。

⑤分析现行的设计控制方法对防止这些原因与机理导致失效出现的有关性，并把现有设计控制方法的这种有效性称作可探测性，用"不易探测度数"（D）表示。

设计控制方法有三个层次：第一，防止失效的原因与机理的出现或有效控制其发生的概率，这是优先应用的控制方法；第二，发现、找出失效的起因与机理，从而制定纠正措施；第三，查出失效模式。不易探测度数主要是评价第二、第三两种方法的有效性，第一种方法不易探测度数为1。

设计控制方法可以包括设计评审、设计验证（道路试验、台架试验、设计验算、使用试验）、防错技术、统计过程控制、产品检验、筛选等。

⑥针对风险制定纠正措施。

SAEJ-1739标准给出了风险顺序数RPN的概念：

$$RPN = S \times O \times D$$

式中：S——严重系数；

O——频度数；

汽车论坛 http://www.qclt.com

D——不易探测度数。

按照 RPN 值的大小制定相应的改进措施与计划，要求是：

a. 针对 RPN 值较大的失效原因与机理(如 RPN 值大于 64)；

b. 只要严重度数高，就应加以注意。

对每一项计划，都要明确责任人及进度要求。

7)实施改进计划、评价改进措施效果。

确定新的设计控制方法，计算新的 RPN 值，直到 RPN 低于规定值为止，表 6-3-2～表 6-3-5 是美国三大汽车公司 QS-9000 标准推荐的评价准则与 FMEA 表格形式，供参考。

表 6-3-2 严重度(S)评价准则

后果	评定准则：后果的严重度	严重度
无警告的严重危害	这是一种非常严重的失效形式，它是在没有任何预兆的情况下影响到行车安全或违反了政府的有关章程	10
有警告的严重危害	这是一种非常严重的失效形式，是在具有失效预兆的前提下所发生的，并影响到行车安全或违反了政府的有关章程	9
很高	车辆(或系统)不能运行，丧失基本功能	8
高	车辆(或系统)能运行，但性能下降，顾客不满意	7
中等	车辆(或系统)能运行，但舒适性或方便性部件不能工作，顾客感觉不舒服	6
低	车辆(或系统)能运行，但舒适性或方便性项目性能下降，顾客感觉有些不舒服	5
很低	配合、外观或尖响、卡嗒响等项目不符合要求，大多数顾客发现有缺陷	4
轻微	配合、外观或尖响、卡嗒响等项目不符合要求，有一半顾客发现有缺陷	3
很轻微	配合、外观或尖响、卡嗒响等项目不符合要求，但很少有顾客发现有缺陷	2
无	无影响	1

表 6-3-3 频度数(O)评价准则

失效发生可能性	可能的失效率	频度数
很高：失效几乎是不可避免的	≥1/2	10
	1/3	9
高：反复发生的失效	1/8	8
	1/20	7
中等：偶尔发生的失效	1/80	6
	1/400	5
	1/2 000	4
低：相对很少发生的失效	1/15 000	3
	1/150 000	2
极低：失效不太可能发生	≤1/1 500 000	1

表 6-3-4 不易探测度(D)评价准则

探测性	评价准则：由设计控制可探测的可能性	不易探测度数
绝对不肯定	设计控制将不能和/或不可能找出潜在的原因/机理及后续的失效模式，或根本没有设计控制	10
很极少	设计控制只有很极少的机会能找出潜在原因/机理及后续的失效模式	9
极少	设计控制只有极少的机会能找出潜在原因/机理及后续的失效模式	8
很少	设计控制有很少的机会能找出潜在原因/机理及后续的失效模式	7
少	设计控制有较少的机会能找出潜在原因/机理及后续的失效模式	6
中等	设计控制有中等机会能找出潜在原因/机理及后续的失效模式	5
中上	设计控制有中上多的机会能找出潜在原因/机理及后续的失效模式	4
多	设计控制有较多的机会能找出潜在原因/机理及后续的失效模式	3
很多	设计控制有很多机会能够找出潜在原因/机理及后续的失效模式	2
几乎肯定	设计控制几乎能够找出潜在原因/机理及后续的失效模式	1

汽车论坛 http://www.qclt.com

表 6-3-5　潜在失效模式及后果分析

（设计 FMEA）

_____系统

_____子系统：_____

_____零部件

年型/车辆类型：_____

设计责任：_____

关键日期：_____

FMEA 编号：_____

页码：第_____页　共_____页

编制人：_____

FMEA 日期（编制）：_____（修订）_____

主要参加人：_____

项目/功能	潜在的失效模式	潜在的失效后果	严重度数(S)	级别	潜在的失效起因/机理	频度数(O)	现行设计控制	不易探测度数(D)	风险顺序数 RPN	建议措施	责任和目标完成日期	措施结果				
												采取的措施	严重度数(S)	频度数(O)	不易探测度数(D)	RPN

汽车论坛 http://www.qclt.com

6.3.4 价值流图析技术

6.3.4.1 基本概念

所谓价值流是指提供一个具体的产品(或服务,或两者的结合)所需的所有具体活动,这些活动包含在三大管理过程之中,即:从概念到生产、从订货到交货、从原材料到顾客手中产品的过程。价值流中存在七种浪费现象(见表 6-3-6 中左边一栏),如何来识别这些浪费现象,并采取措施消除,就需要一些方法或手段。表列七种图析工具(Mapping)就是其中一部分。所谓图析工具是指为了采取正确的对策或解决问题的措施,把各种过程中主要因素的相互关系用各种图表的形式展现出来并分析找出其中主要矛盾的方法。这七种图析工具的类型是根据七种浪费来叙述的。各种工具和浪费的对应关系如表 6-3-6 所示。本节只重点介绍质量过滤图。

表 6-3-6 图析工具和浪费类型/工业结构的关系

浪费类型/工业结构	图析工具						
	过程活动图	供应链响应矩阵图	生产类型漏头图	质量过滤图	需求放大图	决策点分析图	组织结构图(a)数量结构(b)成本结构
过量生产	L	M		L	M	M	
等 待	H	H	L		M	M	
运 输	H					L	
不适当的加工	H		M	L		L	
不必要的库存	M	H	M		H	M	L
不必要的运动	H	L					
缺 陷	L			H			
总体工业结构	L	L	M	L	H	M	H

注:H——高相关性和实用性
M——中相关性和实用性
L——低相关性和实用性

6.3.4.2 质量过滤图

质量过滤图是用来识别供应链中质量问题出在何处。供应链中质量问题包括三种不同类型的质量缺陷。

——第一种质量缺陷就是产品缺陷。这时定义产品缺陷是指生产线上或生产线终端没检查到的,而已到了顾客手中的产品的缺陷。

——第二种质量缺陷可以称为服务缺陷。服务缺陷是指给顾客造成的问题,与产品本身没有直接关系。这些服务缺陷中最重要的就是交货不准时(迟了或早了),单据或文件不正确。换句话说,这样的缺陷是指顾客经历到的并与生产缺陷毫不相干的任何问题。

——第三种质量缺陷就是内部废品是指公司内生产的缺陷,这些已在生产中或生产线的终端检验中发现了。在线检验有多种多样,包括传统的检验,统计过程控制或通过自动检错装置控制。

图 6-3-6 是以汽车工业为例的质量过滤图,沿着供应链画出了对应三种质量缺陷的三条曲线。这个供应链包括分销商,装配厂,第一层供应商,第二层供应商,第三层供应商和原材料供应商。由图可以明确

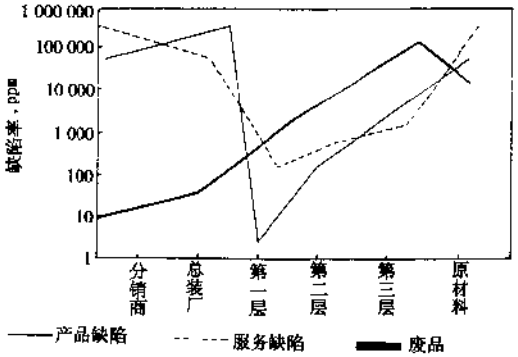


图 6-3-6 质量过滤图(以汽车工业为例)

知道各种质量缺陷正在什么地方出现。这就是这种方法的显著优点。因此用来识别问题所在、低效率和无实际意义的工作，然后就可以把这些信息用于后续的改进活动中。

6.3.5 持续改进

6.3.5.1 持续改进

持续改进是企业中有目标、有计划开展的、旨在不断提高产品、服务质量，消除浪费、降低成本，使顾客更加满意的、持续渐进的、群众性的改进活动。

改进的概念不同于改革和改造，见表 6-3-7。

表 6-3-7 改进与改革的关系

	改革	改进
特点	突破性	渐进性
范围	全局性	局部性
人员	领导层为主的行为	获得领导层支持与指导的群众性活动
资金需要	需要大的投资	小投资，甚至不需投资
举例	新产品、新项目	降低变差、减少库存、节约人力

改进的概念首先由日本汽车企业引入质量管理中，目前也已为欧美汽车行业所接受。在 QS9000 中“持续改进”已列为质量体系要素之一。

6.3.5.2 改进的意义

改进活动有以下重要意义：

①用小投入或不投入获得提高质量、降低成本的效果；

②不依赖于或较少依赖于高技术，主要靠合理调整影响过程的各种因素而达到目标；

③持续改进能达到不断消除各种浪费的目的，这些浪费有时是十分惊人的；

④改进活动能够把生产过程的最大潜能挖掘出来，不断提高劳动生产率；

⑤持续改进能够使企业长期保持竞争能力，使企业不致于落后；

⑥持续改进活动尊重职工积极性与创造性，使工作更具有挑战性，增强职工主人翁感；

⑦持续改进活动依靠小组的集体努力，发扬团队精神，有利于企业的精神文明建设；

⑧改进的思想与方法对企业的所有活动领域具有普遍意义。

6.3.5.3 改进活动的目的

改进活动的主要目的有：

①提高产品/服务的质量；

②消除浪费，降低成本；

③最终使顾客满意。

6.3.5.4 改进的逻辑步骤

应用戴明的 PDCA 循环，形成改进活动的循环。改进的逻辑（解决问题循环）如图 6-3-7 所示。

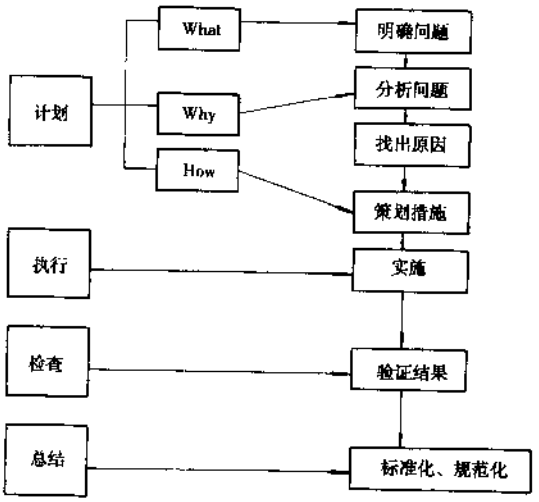


图 6-3-7 改进的步骤

6.3.5.5 改进活动中常用方法与工具

改进活动的常用方法按其主要应用目的分类列于表 6-3 8。这种分类只是相对的，在实际工作中，应灵活应用

表 6-3-8 持续改进技术方法

用途	常见方法
发现问题 明确问题	3Mu 检查表、基准确定、过程研究、信息反馈系统、FMEA、排列图(Pareto 图)、关连图、矩阵图、直方图、亲和图、调查表、设计评审
寻找原因	FTA(故障树分析)、因果图(鱼刺图)、试验设计、流程图、价值流时间表、SPC(统计过程控制)、SMA(测量系统分析)、相关图
策划措施 解决问题	PDCA 循环、5S(整理、整顿、清理、清洁、纪律)、质量功能展开(QFD)、建立质量体系、可靠性工程计划(REP)、质量先期策划(APQP)、关键特性识别系统(KCDS)、质量控制计划、横向职能小组、矩阵表、改进小组活动、合理化建议奖励制度、岗位培训、三次设计(田口方法)、平面布置图、实体仿真、价值工程、准时供货(JIT)、一个流、生产平顺化、寿命周期费用、名义小组技术(NGT)、PDPC 法、箭条图

6.3.5.6 改进活动的 3Mu 检查表

在改进活动中人们创造出许多改进活动用的检查表，用来帮助现场人员与管理人员发现需要进行改进的领域与问题。

3Mu 检查表是得到广泛应用的一种检查表格。所谓 3Mu 是由 3 个词头发音均为 Mu 的日语词而来，即：浪费(Muda)、紧张(Muri)和差异(Mura)。检查表的内容如表 6-3-9。

表 6-3-9 3Mu 检查表

浪费 (Muda)		紧张 (Muri)		差异 (Mura)		浪费 (Muda)		紧张 (Muri)		差异 (Mura)	
1	人力	1	人力	1	人力	7	材料	7	材料	7	材料
2	技术	2	技术	2	技术	8	产量	8	产量	8	产量
3	方法	3	方法	3	方法	9	库存	9	库存	9	库存
4	时间	4	时间	4	时间	10	面积	10	面积	10	面积
5	设备	5	设备	5	设备	11	思维方法	11	思维方法	11	思维方法
6	工具夹	6	工具夹	6	工具夹						

6.3.6 质量成本

6.3.6.1 基本概念

1)定义

GB/6583 1994 中规定了质量成本的定义：为了确保和保证满意的质量而发生的费用以及没有达到满意的质量所造成的损失。

通常，质量成本分为运行质量成本和外部质量保证成本两大类。外部质量保证成本是应顾客要求，提供作为客观证据的演示和证明所支付的费用，包括特殊的和附加的质量保证措施、程序、数据、证实试验和评定的费用(如独立机构所做的某种特定安全试验的费用)。这里我们所说的质量成本是指运行质量成本，它包

括以下4种：

——预防成本：即为了预防缺陷的发生而支付的费用，它包括培训、改进、管理等。

——鉴定成本：为了评定产品是否达到和保持在规定质量水平上所进行的试验、检查和检验所支付的费用

——内部损失成本：在交货前发现产品未达到规定质量要求所发生的费用，如返工、复验、报废、停工等损失。

——外部损失成本：交货后发现产品未满足规定质量要求所发生的费用，如保修、退货、索赔、降价处理等。

以上4种成本中，预防成本与鉴定成本被称为一致性价格，内部与外部损失成本被称为不一致性价格。简单地讲，预防成本和鉴定成本可统称预防成本，内部与外部损失成本则可统称损失成本，参见表6-3-10.

表6-3-10 一些国家机械工业企业质量成本项目对比表

	中国机械企业	美国	瑞典	法国	日本
预防费用	1. 培训费 2. 质量工作费 3. 产品评审费 4. 质量奖励费 5. 工资及附加费 6. 质量改进措施	1. 质量计划工作费用 2. 新产品评审费用 3. 培训费用 4. 工序控制费用 5. 搜集和分析质量数据的费用 6. 汇报质量的费用 7. 质量改进计划执行费用	1. 质量方面的行政管理费 2. 新产品评审费 3. 质量管理培训费 4. 工序控制费 5. 数据搜集分析费 6. 推进质量管理费 7. 供应商评价费	预防成本： 1. 审查设计 2. 计划和质量管理 3. 质量管理教育 4. 质量调查 5. 采购质量计划	预防成本： 1. 质量管理计划 2. 质量管理技术 3. 质量管理教育 4. 质量管理事务
鉴定费用	1. 检测试验费 2. 零件工序检验费 3. 特殊检验费 4. 成本检验费 5. 目标鉴定费 6. 检测设备评检费 7. 工资费用	1. 来料检验 2. 检验和试验费用 3. 保证试验设备精确性的费用 4. 耗用的材料和劳务 5. 存货估价费用	1. 来料检验 2. 工序检验 3. 检测手段维护标准费 4. 成品检验费 5. 质量审核费 6. 特殊检验费	检验成本： 1. 进货检验 2. 制造过程中的检验和试验 3. 维护和校准 4. 确定试制产品的合格性	鉴定成本： 1. 验收检查 2. 工序检查 3. 产品检查 4. 试验 5. 再审 6. PM(维护保养)
内部损失费用	1. 返修复检费 2. 废品损失 3. 车间二包损失 4. 产品降级损失 5. 工作失误损失 6. 停工损失 7. 事故分析处理	1. 废品损失 2. 返工损失 3. 复试损失 4. 停工损失 5. 产量损失 6. 处理费用	1. 废品损失 2. 返工费用 3. 复检费用 4. 降级损失 5. 减产损失 6. 处理费用 7. 废品分析费用	损失成本： 1. 废品 2. 处理 3. 保证 4. 拒收进货 5. 不合格品的处理	损失成本： 1. 出厂前的不良品（报废、修整外协中不良设计变更） 2. 无偿服务 3. 不良品对策
外部损失费用	1. 索赔损失 2. 退货损失 3. 折价损失 4. 保修损失 5. 用户建议费	1. 申诉管理费 2. 退货损失 3. 保修费用 4. 折让费用	1. 受理顾客申诉费 2. 退货 3. 保修费用 4. 折扣损失		

汽车论坛 http://www.qclt.com

2)质量成本项目设置

质量成本定义明确后,在运用质量成本概念进行管理前,要确定(设置)质量成本项目,这里介绍国内外质量成本项目设置的几类典型情况。

有一点需要说明,构成生产的必备条件不应计入质量成本,而应计入产品成本或有关专项成本,如房屋修理费、设备大修费、企业改造费、新产品试制费、生产准备费等。当组织与顾客订有质量保证要求的合同时,还应建立外部质量保证成本的项目。

6.3.6.2 质量成本分析方法

质量成本分析是质量成本管理的关键环节,分析的目的一是验证质量成本管理的有效性,二是找出损失的主要原因作为质量改进的依据。

1)质量成本特性曲线

传统质量成本特性曲线见图 6-3-8。

从图 6-3-8 可以看出,随产品缺陷或不合格品的减少,损失成本几乎呈直线下降,但预防成本在不断增加,特别是当缺陷接近 0%(完美的质量)时,预防成本将明显的增加。

TQM 的质量成本特性曲线见图 6-3-9。

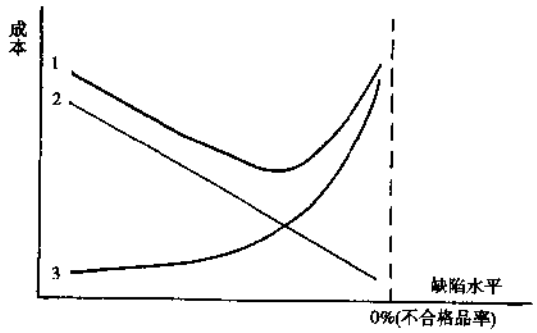


图 6-3-8 传统质量成本特性曲线

1-质量成本;2-损失成本(内部+外部);3-预防成本

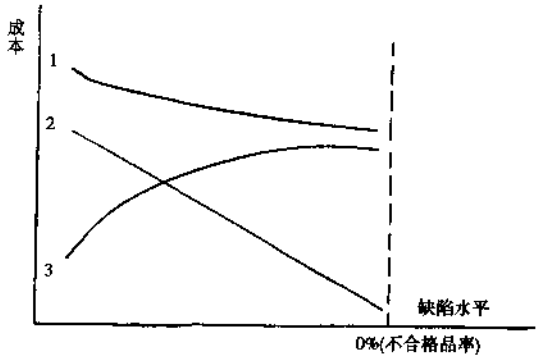


图 6-3-9 TQM 质量成本特性曲线

1-质量成本;2-损失成本(内部+外部);3-预防成本(预防+鉴定)

持全面质量管理观点的人认为,在全员全过程的参予下,随着产品缺陷或不合格品的减少,预防成本会缓慢上升并最终稳定在一特定水平,这样,质量成本将不断的衰减,这是一种理想的曲线。

从以上两种图中可以看出,质量成本特性曲线的分析就是要分析预防成本的损失成本在质量成本中的比例;以便采取合适的管理对策。美国质量管理专家朱兰博士提出的各项费用在质量成本中的比例范围如下(占质量成本的百分比):

①内部损失:25%~40%;

②外部损失:25%~40%;

③鉴定费用:10%~50%;

④预防费用:1%~10%。

行业不同、时期不同,以上数字也会有变化。

2)质量成本排列图

从图 6-3-10 两图可以看出,用排列图的方法可以分析出哪个部门,哪个环节的质量成本高,进而可以针对某个部门的特定环节开展质量改进活动,达到降低质量成本的目的。

排列图追踪分析法见图 6-3-11。

3)质量成本变动趋势

质量成本变动趋势分析是为了掌握质量或质量成本项目、各种单项指标在一段时期内的变化规律或

汽车论坛 http://www.qclt.com

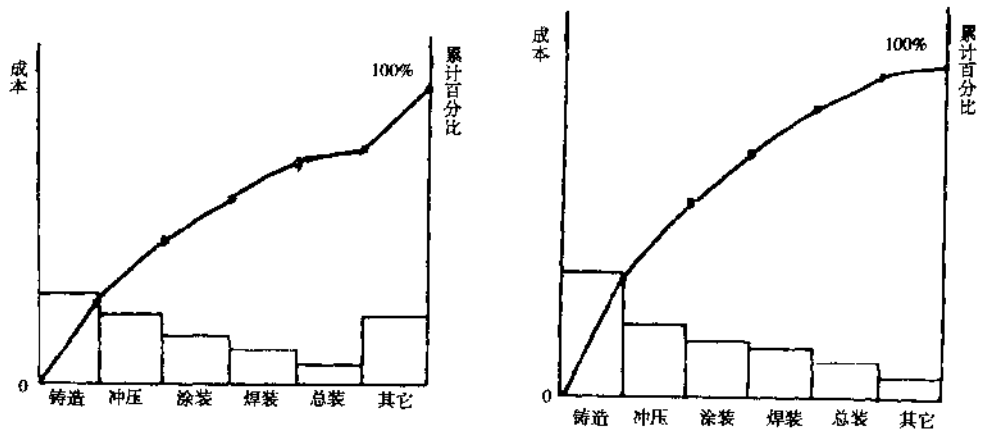


图 6-3-10 质量成本排列图

特征。

质量成本趋势分析是短期的(如一年),也可以是较长期的(如三年)。图 6-3-12 是一示例。

质量成本分析还可以应用其他方法如投资效益分析、灵敏度分析等。

质量成本管理需要一套完整的制度,它与组织的财务系统是有关联的,一个有效的质量成本管理系统包含很多内容,还需要应用先进的工具,可能需要一个软件系统,对质量成本的控制包含几个基本步骤,他们是:质量成本预测与计划、质量成本分析、质量成本报告、质量成本考核等。 (撰稿人:向兴球)

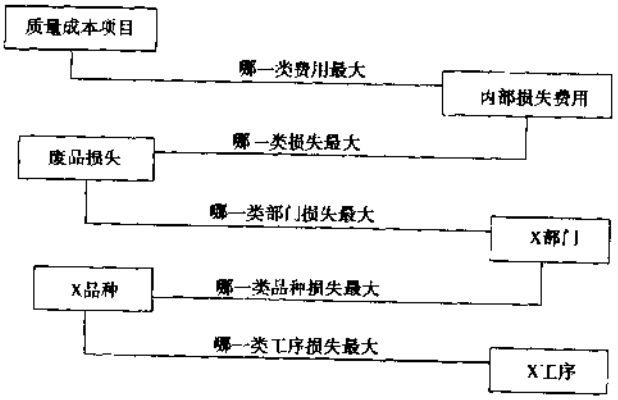


图 6-3-11 追踪分析法

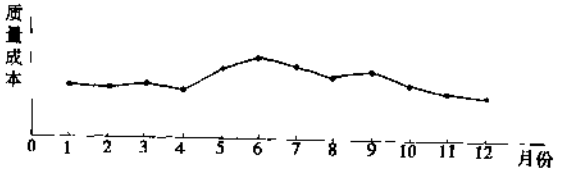


图 6-3-12 质量成本变化曲线

参 考 文 献

1. 《中国质量管理全书》编委会. 中国质量管理全书. 北京:中国经济出版社,1989.
2. 王秉刚. 现代质量工程方法参考手册. 天津:中国汽车技术研究中心,1991.
3. 徐鹏航. 质量管理指南. 北京:中国财政经济出版社,1992.
4. 中国汽车技术研究中心. 潜在失效模式及后果分析. 天津:中国汽车技术研究中心,1993.
5. 萨尔文迪. 现代管理工程手册.《现代管理工程手册》编译组译. 北京:机械工业出版社,1993.
6. 翁史烈. 工业工程与管理. 上海交通大学出版社,1994.

汽车论坛 http://www.qclt.com

7．质量管理和质量保证国家标准，GB/T19000～19004—1994.
8．朱兰．质量管理．杨文生译．北京：企业管理出版社，1995.
9．刘光庭．质量检验．北京：北京理工大学出版社，1996.
10．程赐胜．工业企业采购管理．北京：机械工业出版社，1997.

汽车论坛 http://www.qclt.com

7 可 靠 性

7.1 可靠性概述

7.1.1 可靠性的概念

可靠性的定义是：产品在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力。

可靠性包含4个因素：产品、条件、时间和功能。

对汽车产品而言，汽车的可靠性是汽车产品（包括整车、部件和零件）在其市场的使用条件下，在其设计寿命内，完成其规定功能的能力。

所谓市场的使用条件，既包括气温、气压、雨、雪、冰、沙、腐蚀介质、日照强度等自然条件；又包括道路、交通条件，如高速公路、一般公路、山区公路、城市交通状况、路面质量等；也包括驾驶员的驾驶水平、驾驶习惯、装载情况、维修人员的水平、维修零件的质量、运输及维修管理水平等因素。

可靠性与一般质量指标的区别在于它是一种时间质量指标。一般质量指标在产品出厂时可以考核。而可靠性要经过一定的工作时间后才能评定。所谓"规定的时间"，即企业根据顾客的需要、市场竞争的需要，成本及效益、政府的规定等因素确定的产品的寿命指标。保用期，第一次大修里程，使用寿命（报废周期）等都是重要的设计寿命时的特征时间指标。

规定的功能是指汽车设计任务书、使用说明书、订货合同以及国家标准规定的各种功能与性能要求

从广义上讲，可靠性包括：

①耐久性：不易出毛病，耐用。

②维修性：出了问题容易修理，易恢复。维修性的定义是：产品在规定的条件下，在规定的时间内，完成维修的能力。

①和②构成了产品的有效性，即产品是否可靠既取决于其工作过程的耐久性，又取决于其维修过程的维修性。

③使用方便性：使用简单、操作方便。

由此，可以把汽车产品质量的含义表示如下：

$$\text{质量}\begin{cases}\text{出厂质量}\ (t=0)\\ \text{可靠性}\ (t>0)\begin{cases}\left.\begin{array}{l}\text{耐久性}\\ \text{维修性}\end{array}\right\}\text{有效性}\\ \text{操作方便性}\end{cases}\end{cases}$$

可靠性工程发展迅速，主要源于：

①随着系统、产品的复杂化、多样化以及产品产量的规模化，发生故障的机会越来越多；

②系统、产品的开发周期越来越短，对性能的要求越来越高，有计划的质量保证工作必不可少；

③随着新技术、新材料、新产品的不断涌现，对其安全性、寿命等的合理评价是十分必要的；

④与人们生活紧密相关的系统、产品，其发生的缺陷、故障将对人们的生活和社会带来重大的影响和损失；

⑤以电子化为代表，系统、产品越来越复杂，产量也越来越大，相应的维修、保养服务，人员的培训、技能等必须适应产品发展的需要；

⑥随着消费主义热潮的出现，企业愈加重视产品的安全、公害问题。如何从技术上预防此类问题的出

汽车论坛 http://www.qclt.com

现，受到企业的高度重视；

⑦人们不仅注重购买时的价格，对整个产品寿命周期内的费用也越来越重视；

⑧除了产品初期质量，人们对产品长期的质量提出了更高的要求。

对汽车工业而言，除了上述的理由外，如何解决汽车的安全性、污染控制、节能等这些关系整个社会的技术问题，如何提高整个系统的可靠性，变得越来越重要。

7.1.2 可靠性管理与质量保证

7.1.2.1 可靠性管理的基本出发点

汽车是由很多零件、部件、总成等构成的一种复杂产品，其使用环境千差万别，要求其经久耐用。因此，除了要不断提高汽车的基本性能和功能外，还要不断提高汽车产品的可靠性。这就要求在汽车产品的策划、设计、生产以及售后服务等阶段，实施必要的可靠性管理，并把各阶段实施的可靠性管理活动有机地结合起来，互为补充，以实现产品在整个寿命周期内的高可靠性。

1）策划、设计阶段

这个阶段对产品的可靠性有决定性的影响。调查并明确市场的需要，掌握市场使用环境特性是产品设计的前提；设计过程中应综合考虑国家标准法规、用户的需要、工艺、成本等各方面的因素，采用FMEA、FTA、设计评审等先进方法，并要通过快速有效的可靠性试验验证，确保产品的固有可靠性。

2）生产阶段

必须在生产阶段对材料的质量，生产过程控制，生产、检验设备，人员培训等进行严格管理，从而避免在策划、设计阶段确定的产品固有可靠性下降。

3）售后服务

对售后发生的故障、维修时间及费用等信息必须及时跟踪、调查、反馈；

对维修服务人员应定期培训；维修、诊断设备、工具应完备；用户信息反馈系统应及时、准确。

7.1.2.2 可靠性管理与质量保证的关系

一般的质量控制是管理产品出厂时（$t=0$时）的质量。即以过程控制为中心，控制产品的制造、装配、调整等质量，使之达到技术规范的规定。但仅控制 $t=0$ 时的质量，而不控制出厂后（$t>0$时）的质量是不能满足顾客需要的。

日本质量专家田口玄一认为："所谓质量，就是产品出厂后给社会带来的损失，但不包括机能本身给社会造成的损失"。突出强调了 $t>0$ 时的质量。

在全面质量管理（TQC）基础上发展起来的质量保证（QA）也强调了全过程的质量管理。一般可理解为：质量＝狭义的质量（$t=0$时）＋可靠性（$t>0$时）。质量保证的主要任务是：①满足顾客要求的质量特性；②预防不合格品的产生，防止不合格品出厂；③保证产品的寿命和可靠性；④预防故障发生的对策等。

可靠性管理，是通过可靠性大纲（program）的制定、实施及其管理，实现质量保证的一种手段。可靠性管理已成为质量保证的重要组成部分。

7.2 基本可靠性工程方法

7.2.1 可靠性的度量

7.2.1.1 故障及其分类

1）故障的模式

故障或失效的定义是：产品在规定的条件下，规定的时间内，不能完成规定功能的现象。“失效”多用在不可修产品，“故障”则习惯用于可修产品。（关于可修与不可修的概念见7.2.1.2），汽车属于可修产品，更多使用“故障”这一名词。

所谓故障模式即故障的表现形式。由于汽车是一种非常复杂的系统，任何一个零部件的故障都可能导致系统的故障。一个具体的故障常常是由某一个局部环节出现问题，如局部的缺陷、裂纹、松动、磨损、老化等现象的逐渐发展而成的。从故障的定义出发，当这些局部的变化尚未发展到影响功能时，不能说故障已经发生，一般情况下，若不经专门检查，使用者多半也不会发现。所以，故障的模式一般按已发生故障时的现象来描述。

汽车故障的发生不但同使用环境和汽车本身的原因有关，有时也同使用者是否正确地操作有关。我们把主要因为汽车本身的毛病而发生的故障称为自身故障，把主要因为人的误操作而引起的故障称为非自身故障。在汽车质量考核评定中，仅讨论自身故障。但从用户的角度出发，在汽车可靠性设计中，必须重视如何防止非自身故障的发生。即在容易因误操作而产生故障的结构中，应采取防止误操作的设计，以减少汽车的非自身故障。

从故障的性质划分，汽车故障的类型可分为：

①不安全类（如制动、转向、乘员保护系统、灯光、轮胎等的故障）；

②超出政府法规类（如排放、噪声超标等）；

③不能工作类（如不能起动、中途停机、发动机、传动系等的故障）；

④性能下降类（如动力下降、油耗增高、车内设备功能下降等）；

⑤特性衰退类（如舒适性下降、腐蚀、褪色、老化、漏水、异响等）。

汽车常见的故障模式类型有：

①损坏型故障模式，如断裂、碎裂、开裂、裂纹、点蚀、烧蚀、击穿、变形、拉伤、龟裂、压痕等；

②退化型故障模式，如老化、变质、剥落、异常磨损等；

③松脱型故障模式，如松动、脱落等；

④失调型故障模式，如压力过高或过低，行程失调、间隙过大或过小、干涉、卡滞等；

⑤堵塞与渗漏型故障模式，如堵塞、气阻、漏油、漏水、漏气、渗油等；

⑥性能衰退或功能失效型故障模式，如功能失效、性能衰退、公害超标、异响、过热等。

2）故障的分级

根据故障危害程度进行分级的办法大体有两种，即定性分级和定量分级。

故障危害是一个既具体又模糊的概念，很难用一个具体的量来衡量。目前在各个行业大多采用3～4级的定性的分级办法。汽车行业采用的分级办法见表7-2-1。

表7-2-1 故 障 分 级

故障级别		分级原则
1	致命故障	涉及人身安全，可能导致人身伤亡；引起主要总成报废，造成重大经济损失；不符合制动、排放、噪声等法规要求
2	严重故障	导致整车主要性能显著下降；造成主要零部件损坏，且不能不用随车工具和易损备件在短时间（约30min）内修复
3	一般故障	造成停驶，但不会导致主要零部件损坏，并可用随车工具和易损备件或价值很低的零件在短时间（约30min）内修复；虽未造成停驶，但已影响正常使用，需调整和修复
4	轻微故障	不会导致停驶，尚不影响正常使用，亦不需要更换零部件，可用随车工具在短时间（约5min）内轻易排除

汽车论坛 http://www.qclt.com

四级分级办法在实际应用中基本上可满足设计与评价的需要。尤其是 QC/T900—1997《汽车整车产品质量检验评定方法》标准中，在原评定方法（"蓝皮书"）的基础上补充、修改后，把汽车常见的故障近5000例，做了描述，并给出了级别，便于行业参照应用。

7.2.1.2 不可修零部件可靠性的度量

1）可修与不可修的概念

在可靠性工程中，可以把产品分为可修产品与不可修产品两种类型。

产品在使用中发生失效，其寿命即告终结的，称为不可修产品。主要指实际上没有修理价值或修理后不能完全恢复功能的零部件，如汽车的灯泡、皮带、弹簧、齿轮、油封、轴承等。

产品发生故障后，可以通过维修的方式恢复其规定功能的，称之为可修产品。一般较复杂昂贵的产品，设计为可维修的，可以通过更换其中个别的零部件、重新调整等方法，恢复原来的功能。如汽车、发动机、变速器等。

可修产品和不可修产品在可靠性评价理论和方法上有显著的差别。例如，不可修产品是通过其寿命的统计对其可靠性进行评价；而可修产品是用两次故障之间的间隔时间的随机变化情况，以及维修过程的统计量对其可靠性进行评价。

2）不可修零部件的寿命统计

试举例介绍不可修产品的可靠性度量。

从某工厂生产的一批汽车灯泡中，随机抽取80个进行寿命试验，得出一组数据，以此得到直方图数据，见表7-2-2；直方图见图7-2-1。

直方图提供了一些有关这组数据的直观信息，如：寿命均值的估计值、寿命的离散程度、寿命的范围、大致的分布等。

3）累计失效率与残存率曲线

用灯泡寿命试验的例子，制作累计失效率与残存率曲线，步骤如下：

①计算累计个体数 Σn_i。

③计算累计失效率，累计失效率是指到某一时刻 t 累计失效的个体数 Σn_i 与样本容量 n 之比，即 $F_i = \Sigma n_i / n$。

③残存率是指到某时止仍未失效的个体数与样本容量之比，显然残存率 $R_i = 1 - F_i$。

各计算结果列于表7-2-2。

④图7-2-2为累计失效率与残存率曲线。

表7-2-2 直方图数据分组表

区间（寿命 h）	个体数 n_i	累计个体数 Σn_i	累计失效率 F_i（%）	残存率 R_i（%）
0～100	1	1	1.25	98.75
100～200	4	5	6.25	93.75
200～300	8	13	16.25	83.75
300～400	10	23	28.75	71.25
400～500	16	39	48.75	51.25
500～600	17	56	70.00	30.00
600～700	12	68	85.00	15.00
700～800	6	74	92.50	7.50
800～900	4	78	97.50	2.50
900～1000	2	80	100.00	0.00

4）可靠度函数

当样本容量 n 不断增大、计算区间 Δt 不断缩小时，图 7-2-2 中的残存率曲线就会趋向一条光滑的曲线，我们称之为可靠度函数曲线 $R(t)$。现提出如下可靠度的定义：产品在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的概率，称为可靠度。

由于产品是否失效是一种随机现象，因此用概率来度量产品在某一时刻的可靠性。可靠度是时间 t 的函数，取值 0 与 1 之间。

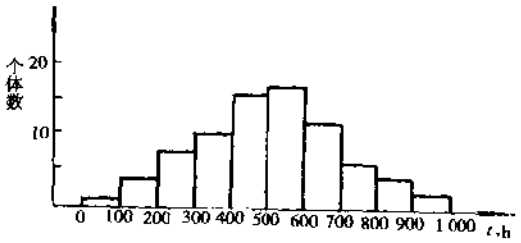


图 7-2-1 直方图

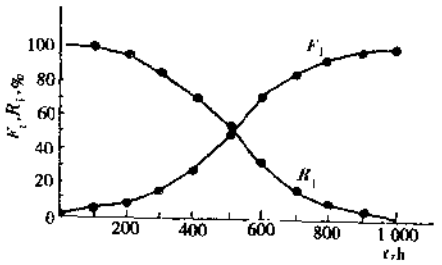


图 7-2-2 累计失效率 F_1 与残存率 R_1 曲线

相应地得到累计失效概率分布函数 $F(t)$，也称不可靠度函数，它是由累计失效率曲线演变而来，它与可靠度函数 $R(t)$ 的关系是：

$$R(t) + F(t) = 1 \tag{7-2-1}$$

由概率论的基本知识，又可以导出失效概率密度函数 $f(t)$，它是 $F(t)$ 对于 t 的微分，即：

$$f(t) = \frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} \tag{7-2-2}$$

可以看出 $f(t)$ 也可以由图 7-2-1 的直方图演变而来。

还可从上述函数中导出所谓的失效率函数 $\lambda(t)$，即：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{7-2-3}$$

失效率函数 $\lambda(t)$ 的物理意义是：在某一时刻仍然完好的产品中，下一瞬间发生失效的比率。

$R(t)$ 与 $F(t)$ 是无量纲量，$f(t)$ 与 $\lambda(t)$ 是有量纲量，其单位为 1/时间（广义的时间单位，如小时、公里、次数等）。

图 7-2-3 给出一组相关的 $R(t)$、$F(t)$、$f(t)$ 与 $\lambda(t)$ 曲线。

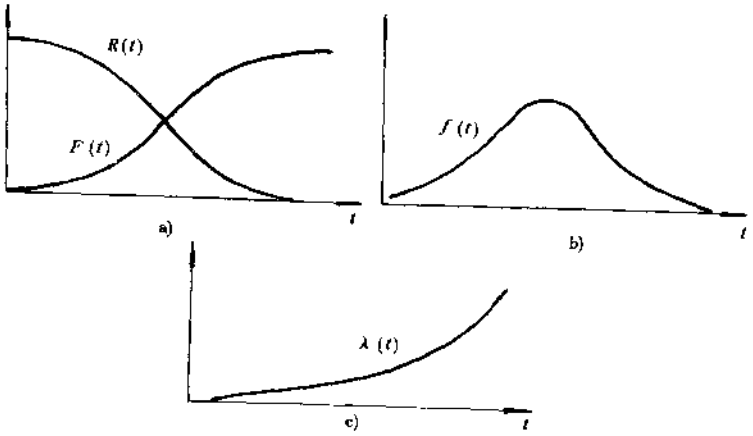


图 7-2-3 各种函数曲线图

汽车论坛 http://www.qclt.com

5）不可修产品“浴盆曲线”

图 7-2-4 所示的是著名的浴盆状失效率函数曲线，简称“浴盆曲线”。复杂产品的失效率曲线多呈此种形状。

从浴盆曲线可将失效分为 3 个时期：早期失效期、偶然失效期和耗损失效期。在早期失效期，由于设计、制造上的缺欠，以及不适应使用环境等因素，使得产品的失效率高。但随时间推移，不合格品被淘汰，失效率逐渐下降，即失效率曲线呈递减型。我们可以利用这一特点，来判断是否属于早期失效。提高产品早期可靠性，可以采取加强生产过程质量管理、提高装配质量、对零部件进行筛选，减少不合格品通过等措施。

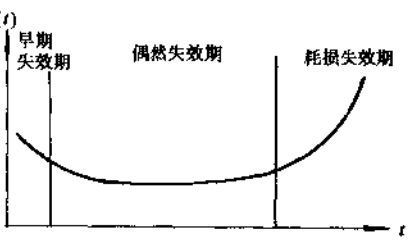


图 7-2-4 浴盆状失效率函数曲线

偶然失效期是产品的耐用寿命期，失效率低且稳定。这期间，失效是偶然发生的，何时发生无法预测，采取提前更换的办法不能提高可靠性。

产品进入耗损失效期，失效率随时间而增长，曲线呈递增型，说明产品已到了设计寿命。如能在进入耗损期之前，更换零件进行预防性维修，将会提高系统的可靠性。

7.2.1.3 可修系统的可靠性度量

1）累计故障数曲线 N（t）

汽车、发动机等可修系统的运行过程如图 7-2-5 所示。系统在 t_1，t_2，t_3，……时刻发生了故障，并在维修后继续运行。两次故障间的运行时间称为故障间隔时间 x_1，x_2，x_3，…，它是表示系统可靠性水平的随机变量。

需要注意的是 x_1，x_2，x_3，…并不一定服从同一分布。随着汽车运行时间 t 的增长，系统的可靠水平随着变动、随机变量 x 可能逐渐增长，也可能逐渐缩小，也可能在某一水平附近波动。而这种变化过程是随机的，称为随机过程。

为了观察故障间隔时间 x_i 随行驶里程变化的情况，可采用绘制累计故障数 N（t）曲线的办法。N（t）表示行驶里程为 t 时，某样本（可以是汽车整车、发动机或其它可修总成）发生的平均故障总数。N（t）的统计方法有两种，当故障总数不大的情况下，采用故障总时间法；故障总数较大的情况下，采用将行驶时间等间隔划分，统计落于每个区间的故障数后进行累计。

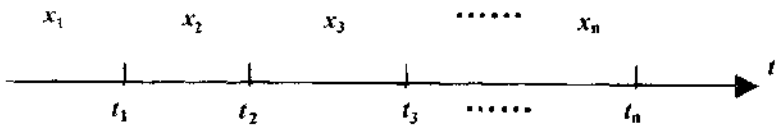


图 7-2-5 可修系统的故障过程

2）汽车运行过程的可靠性评价指标

（1）平均故障间隔里程 MTBF（Mean Time Between Failure）

由于汽车故障随机过程一般情况下是一个平稳过程，其故障间隔里程服从指数分布，因此可以使用指数分布的唯一参数——故障率常数 λ，或 λ 的倒数——平均故障间隔里程 MTBF，来评价汽车运行过程的可靠性。

MTBF 的点估计值为：

$$\hat{M}TBF = \frac{T}{r} \tag{7-2-4}$$

式中：T ——试验总时间；

r ——致命、严重和一般故障的总次数（原来考虑轻微故障一般不影响行车，即基本上不造成停车。因此，在计算 MTBF 时，规定不把轻微故障计算在内。但这样规定容易造成企业忽视轻微故障，因此，在 QC/T900 标准中明确规定从 2000 年开始，r 为致命、严重、一般和轻微故障的总次数）。

MTBF 的区间估计值，计算可得：

$$MTBF_L = MTBF \cdot \frac{2r}{\chi^2_{2r+2,\alpha}} \tag{7-2-5}$$

式中：$\chi^2_{2r+2,\alpha}$——自由度为 $2r+2$、危险度为 α 的卡埃平方分布值，通常取 $\alpha=0.1$。

（2）平均首次故障里程 MTTFF（Mean Time To First Failure）

MTTFF 就是首次故障里程的平均值。严格地说，要用 7.2.1.2 中介绍的不可修产品的寿命统计分析方法，但实际检验、试验中，一般样车数只有 2～3 台，可以采取简单求数学平均值的办法。当样车数超过 5 台时，如都有首次故障里程（也暂不统计轻微故障），可以用威布尔概率纸进行统计分析（见有关参考文献）。

（3）当量故障率

在计算 MTBF 和 MTTFF 时，并没有区分出致命故障、严重故障、一般故障。而在实际评价汽车可靠性时，需要考虑不同级别故障发生的次数。在故障总数相同的情况下，级别低的故障的数量多的，可靠性相对要好。

轻微故障一般情况下虽不影响行车，但仍需维修，“大病不患，小病不断”，也是令人厌烦的。在可靠性评价中，也不能置轻微故障于不顾。

基于上述原因，引出“当量故障数”和“当量故障率”的概念。

按照 7.2.1.1 中所介绍的故障危害度定性评定分级的概念，将一般故障的危害度系数定为 1，据此大致定出其它级别故障的危害度系数。表 7-2-3 列出了通用的危害度系数及 QC/T900 标准中规定的扣分数。

表 7-2-3 危 害 度 系 数

故障级别		危害度系数	QC/T900 标准中规定的每发生一次故障的扣分数
1	致命故障	100	10 000
2	严重故障	10	1 000
3	一般故障	1	100
4	轻微故障	0.2	20

把按危害度系数，将其他各级故障次数折算到一般故障的次数，称为当量故障数。例如，某车发生了 2 次严重故障、4 次一般故障和 10 次轻微故障，则该车的当量故障数累计为：$2\times10+4\times1+10\times0.2=26$（次）。

把平均每 1 000km、每辆车的当量故障数称为当量故障率 D。

$$D = 1000 \times \frac{\sum_{i=1}^{4} \varepsilon_i r_i}{nt} \tag{7-2-6}$$

式中：n——样车数；

t——试验终止里程，km；

ε_i——第 i 级故障危害度系数；

r_i——第 i 级故障发生的累计次数。

汽车论坛 http://www.qclt.com

7.2.1.4 维修性的度量

汽车是一个可维修系统，总是处于完好状态与故障状态中的一种。完好状态下发生了故障，使进入故障状态，故障经过维修后，便进入完好状态。

维修性是广义可靠性的重要组成部分，因此，把维修性的度量纳入可靠性度量之中。

所谓维修，是指为保持或恢复产品完成规定功能的能力而采取的技术与管理措施。维修按其性质可分为故障后维修，预防维修和视情维修等。系统的维修性可以用时间指标和费用指标来度量。

1）时间指标

与产品的可靠度的定义相对应，产品维修度的定义是：产品在规定的维修条件下，在规定的时间内，恢复规定功能的概率。它是维修时间 t 的函数，称为维修度函数

维修时间一般可分为技术维修时间和行政维修时间。技术维修时间包括诊断、拆装、修理、调试等，它与故障维修的难度、维修人员的技术熟练程度、工具设备的适应程度、备件材料的质量等有关，很大程度上与汽车的维修性有关。行政维修时间包括办理出入厂手续，准备工作时间，等待备件、场地、设备与技工的时间等。影响行政维修时间的因素很复杂，它与工厂的售后服务、备件的供应、修理部门的能力和管理水平等都有关系，而与产品本身的维修性关系不大。在实际统计维修时间时，应该把技术维修时间与行政维修时间分开，即总维修时间=技术维修时间+行政维修时间。

具体评价产品维修性的时间指标有平均维修时间 MTTR（Mean Time To Repair）和维修时间率 T_M

（1）MTTR

MTTR 是指对同一产品的同一故障的故障后维修时间或同一级别的预防维修时间的均值，主要用来评价单项作业的维修性。

$$\mathrm{MTTR}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_{mi} \tag{7-2-7}$$

式中：t_{mi}——第 i 次维修的修复时间；

n——统计的样本容量（维修次数）

（2）T_M

T_M 是各次维修时间的总和与行驶总时间或总里程之比，它与故障率有关，也与单项维修时间有关，还与预防维修周期是否适合有关。它是综合评定系统维修性的指标。

$$T_M=\frac{\text{故障后维修总时间}+\text{预防维修总时间}}{\text{总行驶里程(时间)}} \tag{7-2-8}$$

或

$$T_M=\frac{\text{技术维修总时间}+\text{行政维修总时间}}{\text{总行驶里程（时间）}} \tag{7-2-9}$$

维修时间的单位为小时；行驶里程的单位为千公里（10^3km）。

2）费用指标

维修费用是度量维修性的另一个指标。主要有：

①单项维修费，某一单项故障后维修平均费用或某一级预防维修一次平均维修费用；

②按时间（里程）平均的单位运行时间（里程）维修费，可按下式计算：

$$\text{千公里维修费}=\frac{\text{故障后维修与预防维修总费用}}{\text{总行驶里程}}\times 1\,000 \tag{7-2-10}$$

维修费一般包括：

①材料费：包括更换的备件、消耗的材料及其它修理用材料等的费用；

②工时费：包括技术工人与辅助工人的工时费；

③设备工具费：包括设备工具折旧、损耗、维修费和消耗的动能（水、电、气等）的费用；

④管理费：包括管理人员的工资、场地、厂房费用、备件、油料、工具设备等的管理费用。

汽车论坛 http://www.qclt.com

7.2.1.5 广义可靠性的度量——有效度

有效度是用来度量产品广义可靠性的指标，它是指产品处于完好状态的概率。

汽车的有效度可按两种含义来计算：

1）技术有效度 A_1

不考虑行政维修时间的有效度，

$$A_1 = \frac{\text{运行总时间}}{\text{运行总时间} + \text{技术维修总时间}} \tag{7-2-11}$$

2）有效度 A

考虑技术与行政维修时间的有效度，

$$A = \frac{\text{运行总时间}}{\text{运行总时间} + \text{维修总时间}} \tag{7-2-12}$$

或者：

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \tag{7-2-13}$$

7.2.1.6 经济尺度

产品的可靠性与成本有内在的联系。一般而言，产品的可靠性越高，需要投入的成本也越高，售价也较贵，但其在使用过程的维修保养费用要少。如何保证可靠性与费用的平衡，是企业需要认真研究的课题。

从这个角度出发，用经济尺度来综合评价产品的可靠性，既直观，也比较简单。一般可用下列指标：

1）费用比（Cost Ratio）：年维修保养费/购入费；

2）MTBF 与总费用（购入费＋维修保养费）之比。

7.2.2 系统可靠性的分配与预测

可靠性分配是为了达到系统（整车、整机等）的可靠性目标，将系统的可靠性指标科学合理地分配到各子系统和零部件的过程。

而可靠性分配的逆过程，即根据各子系统的可靠性水平，预测系统可靠性的过程，称为可靠性预测。

7.2.2.1 可靠性模型

由于系统的可靠性只有在一定时间的使用之后，才能评价、确定，因此，必须尽可能地把故障发生的机理、相互影响等，用一定的模型来描述。为了进行系统的可靠性分配和预测以及可靠性分析，也需要建立描述各子系统、零部件与系统之间的逻辑关系，即可靠性模型。

1）串联、并联模型

最基本的可靠性模型是串联模型与并联模型两种，此外还有旁联模型等。各种不同类型的模型还可组合成复合型模型。

图 7-2-6 所示的是最简单的串联与并联模型框图。

所谓的“串联”、“并联”，不是指具体结构或线路的连接，而是指在完成系统功能中这些子系统的逻辑关系。

在串联系统中，任意一个子系统失效，系统便失效。其系统的可靠度 R_S 为各个系统可靠度 R_i 的连乘积，即

$$R_S = \prod R_i \tag{7-2-14}$$

对于可维修系统，当故障间隔时间服从指数分布时，串联系统的故障率 λ_S 为各子系统故障率 λ_i 之

汽车论坛 http://www.qclt.com

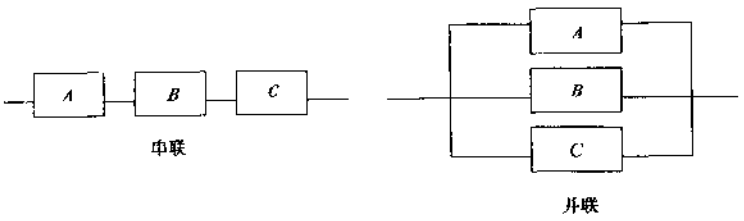


图 7-2-6 基本可靠性模型

和，即

$$\lambda_S = \Sigma\lambda_i \tag{7-2-15}$$

式（7-2-14）和式（7-2-15）是设计中常用的可靠度计算通则。从这两个公式中可知，串联系统的可靠度不可能高于可靠度最低的子系统的可靠度；而系统的故障率不可能低于故障率最高的子系统的故障率，即

$$R_S \leqslant \{R_i\}_{min} \tag{7-2-16}$$

$$\lambda_S \leqslant \{\lambda_i\}_{max} \tag{7-2-17}$$

图 7-2-6 的串联模型，如 $R_A=0.95$，$R_B=0.98$、$R_C=0.99$，则 $R_S=R_A\times R_B\times R_C=0.922<0.95$。而且，组成串联系统的单元越多，即使每个单元的可靠度都很高，系统的可靠度也越低。

在并联系统中，只要有一个子系统工作，系统便能工作。例如汽车的双管路制动，一个管路失效，另一个管路仍能保证汽车的制动。

并联系统的可靠度关系式为：

$$R_c = 1 - \prod(1 - R_i) \tag{7-2-18}$$

或者：

$$F_c = \prod F_i \tag{7-2-19}$$

例如，图 7-2-6 的并联模型中，如 $R_A=R_B=R_C=0.50$，则 $R_S=0.875$。系统的可靠度比各单元的可靠度明显增大。利用并联系统的这个特性，可应用可靠度不高的单元，组成可靠度较高的系统。当然这种情况下必须考虑成本，重量增加等负面的影响。

2）应力—强度模型

在传统的汽车零部件的强度、寿命设计中，通常采用安全系数的方法。就是根据以往的设计经验，简单地给（平均强度/最大应力）一个大于 1 的系数，即安全系数，并且认为设计是可靠的，有一定的保险系数。但从可靠性理论来看，这种方法没有把实际上存在的应力和强度的分布考虑进去，实际上零件的应力和强度都是服从某种分布的随机变量。

从可靠性的概念考虑，在零件的强度大于作用在其上的应力时，零件是安全、可靠的，而当应力大于强度时，零件将会不安全，发生故障。由于实际上强度、应力都是服从某种分布的随机变量，而且还会随着时间的推移，条件的变化而变化，因此，即使初始设计时留有很大的安全系数，也会发生强度的分布与应力的分布重合的情况，即应力大于强度，发生故障，见图 7-2-7。这就是所谓的强度—应力模型。

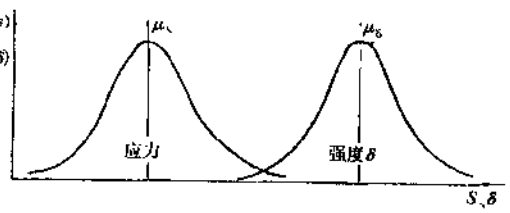


图 7-2-7 应力、强度的分布与干涉

上述情形可用下式来描述：

$$R = P[\delta \geqslant S] \tag{7-2-20}$$

或者：

$$R = P[(\delta - S) \geqslant 0] \tag{7-2-21}$$

式中：R——零件的可靠度；

δ——强度随机变量；

S——应力随机变量。

假如零件的强度 δ 服从 $(\mu_\delta, \sigma_\delta^2)$ 的正态分布，应力 S 服从 (μ_S, σ_S^2) 的正态分布，则由式（7-2-21）并根据正态分布的性质，$(\delta - S)$ 服从均值为 $(\mu_\delta - \mu_S)$，方差为 $(\sigma_\delta^2 + \sigma_S^2)$ 的正态分布，零件的可靠度可用标准正态分布表达为：

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{(\mu_\delta - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_\delta^2 + \sigma_S^2}}}^{\infty} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \tag{7-2-22}$$

式中：μ_δ——强度的均值；

σ_δ^2——强度的方差；

μ_S——应力的均值；

σ_S^2——应力的方差。

这样，我们就可以由 $-\frac{(\mu_\delta - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_\delta^2 + \sigma_S^2}}$ 查标准正态分布表来预测零件的可靠度。当然前提是要掌握强度和应力的分布及其参数，这需要大量的试验、数据的积累和经验的总结。目前，已有许多数据可供参考使用。

3）累积损伤模型

汽车的零部件承受的载荷（应力）不是固定不变的，而是随着道路条件、载荷大小及种类等因素的变化而变化。在这种交变的载荷（应力）情况下，如何估算零件的疲劳寿命，常用的方法是 Miner 法则。

假如对于每一个应力水平 S_i，统计出现的次数为 n_i。同时，在该零件的 $S—N$ 曲线上可查出对应于每一个 S 的疲劳损坏的循环次数 N_i，根据 Miner 法则，累积疲劳损伤程度为 $\Sigma (n_i/N_i)$，当它等于 1 时，零件将发生疲劳破坏（小于疲劳极限 S_{-1} 的应力被认为对疲劳寿命无影响，可不计算）。

利用这一原理，在掌握零件 $S—N$ 曲线的前提下，就可进行疲劳寿命估算。同时，也可用于制定试验规范和估计快速试验系数。

在统计分析随机载荷的方法中，由于对疲劳强度而言，最主要的因素是幅值的变化，所以常应用雨流计数法。

7.2.2.2 可靠性的分配

1）为什么要进行可靠性分配

汽车是一个十分复杂的产品，系统的可靠性目标的实现，必须依靠所有子系统、零部件的可靠性来保证。没有子系统、零部件的可靠性目标为基础，系统的可靠性目标定得再好，也只是一纸空文。

可靠性分配中要把用户最关心的问题放在首位，要认真研究竞争对手的资料，要考虑到同其它性能要求的配合，还要考虑到费用、技术能力、时间等因素。分配的过程是综合这些因素的协调过程。它为实施设计阶段的可靠性管理提供了科学的依据。

把可靠性定量指标，如同性能指标、重量指标、成本指标一样，作为设计工作中必须达到的技术要求，在设计评审中要进行审核，要通过子系统、零部件的试验进行验证。这样就迫使设计人员采取各种可靠性设计与分析技术，去实现所分配到的指标值。为了使零部件试验能够正确有效地反映可靠性目标值，迫使试验人员去制定更为科学合理有效的试验规范，开发新的试验技术。这样必将促进整个产品开发工作的技术进步。

可靠性设计是保证产品可靠性的根本，而可靠性分配是可靠性设计的重要前提。

2）可靠性分配方法

将系统的可靠性指标（可靠度、故障率等）分配到各个子系统的方法有很多，如等分配法、ARINC 法、AGREE 法、最小努力算法、条件极值法、动态规划法等。

这里介绍两种方法，供汽车行业参考使用。

汽车论坛 http://www.qclt.com

(1) 按子系统的重要度分配可靠性指标

对系统可靠性影响愈大、该子系统的重要度愈高，就分配愈高的可靠度，这种方法就是按子系统重要度分配的方法。

例如，一个由 n 个子系统以串联模型构成的系统，其原有的系统故障率及各子系统的故障率分别为 λ_s，λ_1，λ_2，…λ_n，$\lambda_s=\Sigma\lambda_i$。现在要求系统的故障率目标值为 λ_s^*（$MTBF_s^*=1/\lambda_s^*$），如何将需要降低的故障率 $\Delta\lambda_s=\lambda_s-\lambda_s^*$ 分配到各子系统去呢？

我们用权因子表示各子系统可靠性的重要度。权因子为 ω_1，ω_2，…ω_n，则

$$\omega_1+\omega_2+\omega_3+\cdots\cdots+\omega_n=1 \tag{7-2-23}$$

则有：

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_1&=\omega_1\Delta\lambda_s\\ \Delta\lambda_2&=\omega_2\Delta\lambda_s\\ &\cdots\cdots\\ \Delta\lambda_n&=\omega_n\Delta\lambda_s\end{aligned} \tag{7-2-24}$$

式中：$\Delta\lambda_1$，$\Delta\lambda_2$，…，$\Delta\lambda_n$——分配给各子系统要求的故障率的降低值。

现在的问题是如何确定权因子？它可以根据经验来确定，也可以按照下述方法来计算。

当量故障率既反映了故障的频率，又反映了故障的危害度等级，因此，可以通过各子系统的当量故障率 D_1，D_2，…，D_n 的大小来说明各子系统对系统可靠性影响的大小，当量故障率高的子系统应该作为可靠性改进的重点。系统的当量故障率 $D_S=\sum_{i=1}^{n}D_i$。则：

$$\begin{aligned}\omega_1&=D_1/D_S\\ \omega_2&=D_2/D_s\\ &\cdots\cdots\\ \omega_n&=D_n/D_S\end{aligned} \tag{7-2-25}$$

(2) 按最小投入分配可靠性指标

从工厂角度考虑，希望以最小的投入达到预期的系统可靠性要求。这里所指的投入是广义的，可以是为提高可靠性而付出的费用、所需要的时间等；也可以从另一个角度考虑，希望最大程度地减少工厂与社会的损失。

为改进可靠性，可能采取的方案是多种多样的。对每个子系统来说，可以列出数个可能采取的方案，每个方案都可相应地预测出其对子系统可靠性提高的效果及其需要的投入。因此，必须从系统最优的角度考虑选择各子系统的改进方案的组合。

7.2.2.3 FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

FMEA，即失效模式及后果分析，是在产品/过程/服务等的策划设计阶段，对构成产品的子系统、零部件，或对构成过程、服务的各个程序逐一进行分析，找出潜在的失效模式，分析其可能的后果，评估其风险，从而预先采取措施，减少失效模式的严重程度，降低其可能发生的概率，以有效地提高质量与可靠性，确保在客满意的系统化活动。FMEA 按其应用的领域可分为：系统 FMEA（SFMEA）、产品 FMEA（DFMEA）、过程 FMEA（PFMEA）、应用 FMEA（AFMEA）、服务 FMEA（SFMEA）等等。有关 FMEA 的详细介绍，见本篇第 6 章。

7.2.2.4 FTA (Fault Tree Analysis)

FTA，即故障树分析，在产品/过程/服务等设计、策划过程中，对可能造成系统失效的各种因素（包括硬件、软件、环境、人）进行分析，画出逻辑框图，从而确定系统失效原因的各种可能组合方式或其发生概率，以便计算系统失效概率，并采取相应的纠正措施，以提高系统质量与可靠性的一种设计分析方法。

与 FMEA 相反（FMEA 是一种以寻找潜在失效模式，从而预先采取措施为目的的“由下至上”的分析方法），FTA 是把系统的失效（故障）作为分析目标，分析系统中的各个层次、各种因素的影响，是一

汽车论坛 http://www.qclt.com

种以寻找失效（故障）发生的可能原因为目的的、“由上至下”的分析方法。

FTA除了在设计分析中应用外，还可以应用于系统发生故障或事故时的原因调查分析，或者作为排除故障的良好的工具。对于一个复杂的系统来说，寻找某一故障发生的原因有时是相当困难和费时的，而借助于FTA所建立起来的逻辑图，就可以有条不紊地进行。

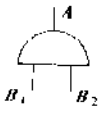
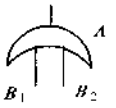
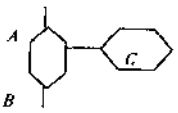
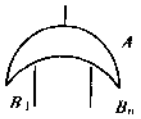
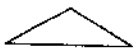
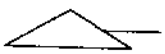
FTA的制做步骤是：

①明确所要分析的对象（系统）的构成、功能、各组成部分的相互关系以及操作方式等；

②选定要分析的顶事件（即系统故障）；

③列举所有与顶事件直接相关的第1层次的原因（事件），列于顶事件之下，并用能够正确表达它们之间的关系的逻辑符号（表7-2-4）连接起来；

表7-2-4 故障树常用符号

类别	符号	名称	意义
事件符号		矩形事件	顶事件或中间事件
		圆形事件	基本事件或底事件
		菱形事件	不发展事件；还可表示环境影响或人员差错
		房形事件	正常事件；有时用来表示条件事件
逻辑门符号		与门（AND门）	B_1、B_2同时发生，A发生
		或门（OR门）	B_1、B_2有一发生，A发生
		禁门（INH门）	C存在时，B的发生，A发生
		n取K门（K/n门）	n个输入事件B_1、B_2、…B_n中的任意K个事件同时发生，A发生
转移符号		转入符号	转入子树
		转出符号	转出子树

汽车论坛 http://www.qclt.com

④在第1层次的各原因下，列举第2层次的原因，并用相应的逻辑符号连接起来；

⑤同第④步一样，把第3层，第4层，……，第 n 层次的原因，逐层次一一列举出来，并用正确的逻辑符号逐层次地连接起来，这样就完成了故障树图（图7-2-8示意了一个简单的故障树）；

⑥分析、计算、确定各层次因素发生的概率；

⑦根据各层次的逻辑关系，计算顶事件发生的概率；

⑧如顶事件的发生概率（可靠度）确定，则可明确以下各层次原因（事件）的可靠度要求，并通过分析，采取必要的措施，以达到相应的可靠性要求。

FTA实施中，应注意以下两点：

①不同的人、不同的技术水平、经验，所完成的同一项事件的故障树图（FT图），可能不同；

②应像FMEA一样，制定制做FT图的统一技术标准。

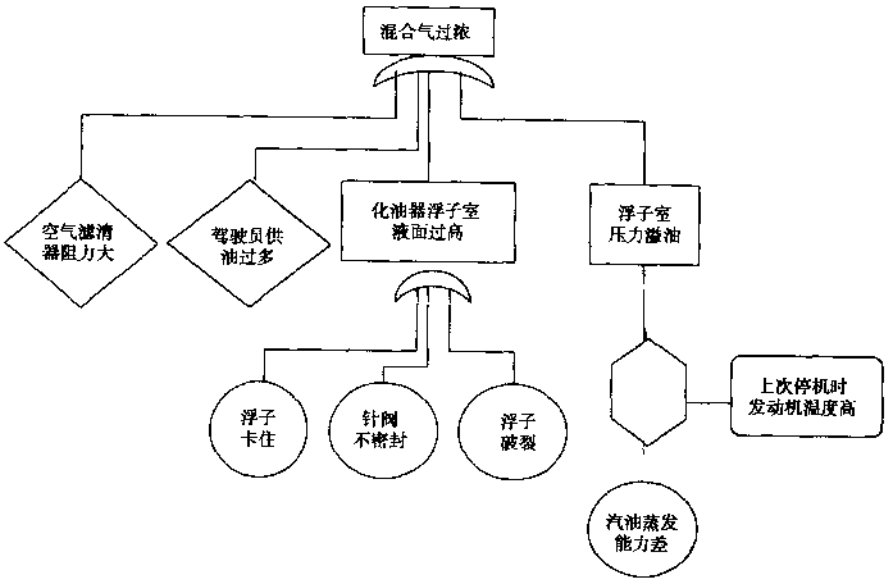


图7-2-8 “混合气过浓”故障树

7.3 可靠性管理及方法在产品寿命周期各阶段的应用

要想使自己的产品可靠，让用户满意，在市场上有竞争力，就必须把可靠性管理及方法贯穿于产品寿命周期的每一个阶段/过程，即策划、设计、试验验证、制造/装配过程、销售及售后服务、回收等，并把这个过程作为一种循环往复，持续改进的过程，使产品质量不断向新水平迈进。

7.3.1 策划阶段——制定可靠性战略、目标与实施计划

汽车产品能否满足顾客的需要，能否被社会接受，其产品策划的好坏是关键。对产品策划，首先要准确把握市场动向，明确顾客的需要；并在此基础上，研究现有产品的可靠性数据、信息；分析竞争对手和最佳水平企业产品的可靠性数据；制定产品的可靠性目标及切实可行的实施计划。产品策划的重要性，在于它能够为后续的产品设计、试验验证、制造/装配过程、销售及售后服务、回收等环节采取适当的措施，提供依据。

7.3.1.1 市场调查

调查、分析并掌握市场需求的变化，顾客喜好的变化，社会要求以及法律、法规、标准的发展动向、

趋势等是十分必要的。特别要着重把握与质量有关的要求。要下工夫进行市场调查，尽可能不放过任何来自顾客的直接或间接的对质量的要求，而且，要尽可能把这些信息系统地、定量化地加以整理和分析。从而明确市场（顾客）的需要。

7.3.1.2 可靠性数据、信息的分析

汽车各系统和零部件具备的可靠性水平，是经过长期的积累，通过多次换型和改良，逐步确立起来的。在设定可靠性目标时，首先应考虑确保达到与原车相当的可靠度水平，同时应以市场动态信息为依据，分析现有产品的可靠性数据，综合考虑产品的寿命周期、索赔信息、企业的经营战略和吸引顾客的特色等来设定可靠性目标。特别是对新采用的装置和改良的零部件，应以原来的可靠性水平为基础，分析目前的索赔情况、市场要求的质量，明确需要提高哪一部分的可靠性，在规划、设计、试验等部门充分研究之后再决定。

①产品的寿命周期成本（Life Cycle Cost）。从购置一辆车到报废有一个支出的费用总额。在此总费用中分为购置费用和使用成本。在研究可靠性目标时，必须考虑既降低使用成本所占的比例，又使其相对于成本的可靠性最大化。

②掌握索赔信息是比较容易的。对企业来说这是直接损失成本，同时，也是间接评价用户负担的一个指标。根据目前的索赔状况，在设定可靠性目标时必须充分考虑在下次开发的车辆上如何防止再次发生或减少其发生的概率。

7.3.1.3 分析竞争对手和最佳水平企业产品的可靠性数据

在设定可靠性目标时，应以市场（顾客）要求的质量为基础，在强化其要求的同时，还应与目前竞争对手和最佳水平企业产品的质量进行比较分析，结合企业自身的策略和优势等，来增加各项目的质量，按照各项目，分别设定可靠性的目标水平。

另外，准确地把市场要求及可靠性目标传达给设计、试验、制造、销售、服务等部门是非常困难的，在策划、开发过程中各部门的负责人定期进行磋商、紧密协作是非常重要的。

7.3.1.4 可行性分析与企业的经营战略

可靠性目标的确定，是非常复杂的工作，既要从“需要”（即顾客的需要、社会的需要、国家的需要、竞争的需要、企业的效益与信誉的需要等）的角度来考虑，又要从“可能”（即可能投入的资金、技术、管理能力和允许的时间，可能提供的材料、协作产品、维修保障能力等）的方面进行可行性分析。

可靠性工程要考虑效益原则。图 7-3-1 表示了可靠性与效益的一般关系。在 B 阶段，随着可靠性的增长，社会损失明显减少，工厂的投入与损失也逐渐减少，产品具有较好的竞争能力，工厂的经济效益良好，这是较理想的状况。

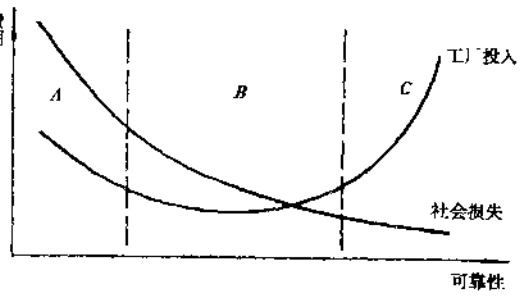


图 7-3-1 可靠性与效益

当然可靠性目标的确定，与企业的经营战略的定位也是密不可分的。是“费用最低”原则，还是“社会损失最小”战略，将决定不同的可靠性目标的定位。

7.3.1.5 制订可靠性实施计划

可靠性是一项系统工程，涉及多部门，贯穿整个汽车产品寿命周期全过程。这就要求必须制定科学、周密的实施计划，并以此来指导各有关部门的可靠性工作，确保可靠性目标的实现。否则，任何一个环节的疏忽，都可能导致整个工作与总体目标的失败。

汽车论坛 http://www.qclt.com

7.3.2 设计阶段

可靠性设计，即“以赋予产品可靠性为目的的设计技术”，在可靠性工程中占有相当重要的地位，汽车产品的固有可靠性主要取决于设计，一般来说，制造过程（材料、加工、装配等）产生的可靠性问题常表现为局部性的、短期性的，它影响一部分产品或一个时期的产品质量。而设计（指产品设计与过程设计）所造成的产品可靠性问题则表现为全局性的、长期性的，而且是“先天性”的，一般不可能通过加强制造/装配过程的管理来解决。

7.3.2.1 可靠性设计的主要内容

汽车产品设计中，要综合满足顾客对各种使用性能（动力性、燃油经济性、舒适性等）的要求；满足国家有关标准、法规（安全、环保、节能等）的要求；满足顾客对可靠性、维修性、使用方便性的要求；还要考虑到过程、制造、成本、时间等。设计过程是以上各个方面的综合平衡，哪一方面都不能忽视。从广义可靠性的含义出发，可靠性设计至少应包括以下主要内容。

1）制定产品的可靠性目标值

根据策划阶段的结果，研究提出可靠性的具体目标值。而且必须像其它性能指标一样，把可靠性目标数量化，明确写在设计任务书上。这些目标值主要包括：

①可靠度，故障率；

②MTBF，MTTFF，当量故障率；

③MTTR，维修时间率，维修费，有效度；

④保用期，B_{10}寿命，使用寿命。

2）可靠性指标的分配

汽车整车的可靠性是由个总成、零部件的可靠性集成而来的。在制定了具体的可靠性目标值后，还必须把整个产品的可靠性目标，按照系统、子系统、总成及其组成的各种装置、零部件分配可靠性目标值。这些目标值同样必须用具体的可靠度、故障率、使用寿命、MTBF 等来表达。具体方法参见“7.2.3.2 可靠性的分配”。

需要补充的是，为了确定零部件的可靠性目标，应该考虑其重要性和修理时间、修理费用等，但一般来说可根据零部件的重要度按下列方式把部零件分成几类，分别设定标准化的可靠性目标值：

（1）重要安全部件

涉及安全的零部件，如其发生故障的话会危及人们的生命，所以需要有很高水平的可靠度。有时，不仅要充分考虑疲劳破坏，而且还必须考虑虽然发生的概率极小，但产生的极限应力很大时的安全余量。这类零部件包括制动系统的零部件，转向系中的大部分零部件，悬挂系和传动系统中的部分零部件，以及燃料系中的部分零部件。

（2）主要功能部件

虽然发生故障后不会直接影响安全，但从完成功能上是极为重要的部件，因此也应具备适当的可靠性。这种部件主要包括发动机及传动系部件，悬挂系的大部分零部件，车身（含内装饰）的相关部件。

（3）易耗、易损件

从确保市场要求的水平、利用率来确定可靠度。主要有制动衬片、火花塞等。

3）产品设计潜在失效模式及后果分析（DFMEA）及可靠性预测

由于设计阶段的疏忽，分析不足，措施不够，经验欠缺，会造成产品投产后严重程度不同的失效，给顾客带来损失。因此，事先花必要的时间进行 DFMEA，能够大大减少事后产生失效而带来的风险与损失。具体进行 DFMEA 的方法、步骤，详见本篇第 6 章。

预测可靠性的目的在于确认设计阶段是否满足了目标要求，确定采用什么设计方法，以及找出提高可靠性的难点。具体有①以取得整个系统的平衡，作为设定目标；②设计方式的比较，替代方案的研究；③可靠性分配；④在设计阶段发现不可靠的原因；⑤通过把在实际使用时的故障数据与预测值进行比较，来

汽车论坛 http://www.qclt.com

发现产生异常的原因和应采取的对策；⑤为可靠性试验的方案策划、分析方法等提供依据等

可靠性预测方法分为前述的FMEA、FTA及主要用于偶发故障的故障率或MTBF预测等。

a. FMEA主要是通过定性的、相对的评价来发现问题，所以，对没有充分的定量数据的新系统的可靠性预测是有效的。特别是在开发的初期阶段，找出可预测的问题，研究相对于重要故障模式的子系统和零部件的构成并修改设计规格，反馈到设计任务书和图纸上，同时确认试验的计划和分析方法。另外，由于FMEA的故障模式是以单一的故障源作为出发点，有漏掉复合故障的危险，所以如果与FTA法结合使用的话，则更加有效。

b. 如前所述，FTA是一种从理论上分解以整个系统故障为目标的，“由上至下”的分析方法，具有在表现复杂的场合，能够较容易弄清因果（理论）关系的优点。在实际应用时，对于新开发的系统，对严重程度高的重要故障应进行FTA分析，从而研究出应提高哪些部件的可靠性，系统的哪些部分可以采用冗余设计或安全装置等。另外，对在市场上或在开发过程中发生的新的重要故障，应进行充分的调查，进行再现试验，弄清故障机理，使用FTA法总结故障的起因，以防止同样故障的再次发生。

4）过程设计潜在失效模式及后果分析（PFMEA）

在过程（工艺）设计中应充分考虑保证可靠性的措施，包括工序能力设计、检测工艺设计、防止误装、误加工的设计与检验等。对DFMEA提出的制造性、装配性的特殊要求（特殊特性），应充分考虑并体现在过程设计中。

同时，必须进行PFMEA，对过程中潜在的失效模式进行分析，找出薄弱环节，制定改进方案，避免事后修改带来的损失。详见本篇第6章。

5）维修性设计

构成一个产品维修性的三要素是：产品、人与条件。

首先，产品要具有良好的维修性，在设计上要充分考虑易于维修，节省维修费用。

其次，是从事维修工作人员的技术水平与熟练程度，要求加强维修人员的培训。

必要的维修条件包括：备件材料、润滑材料的供应保障，随车工具，维修装备、维修手册、维修备件图册等的适应性。

维修性设计中应考虑以下几个方面：

（1）可达性原则

所谓可达性，是指在进行汽车维修工作中，便于维修人员接近维修部位并进行作业的性能。

（2）互换性、通用性原则

互换性与通用性对提高维修性，增加备件的来源是非常重要的，在设计中应充分加以考虑。

（3）防差错措施

防止拆装维修过程错装、漏装等情况发生而造成的故障。在设计中，应从结构上考虑防止差错，或设置明显的永久性标志。

（4）保证维修安全性

在设计时，要充分考虑维修人员在进行维修作业时不受伤害，不致过度疲乏费力。还要防止零部件受损。

（5）便于检测

凡需要在维修中进行检测的项目（如间隙、压力等），必须考虑使用检测器具的方便性，以便于迅速准确地进行检测工作。

（6）良好的维修指导文件

维修文件包括使用维修手册、维修手册、备件图册等。这些文件应能指导使用维修人员正确进行使用维修操作，减少失误。故障发生时能正确判断、排除与修理。维修文件力求简明易懂，能用图表示的尽量用图表示。

（7）制定好预防维修制度

预防维修仍然是现代汽车采用的重要维修方式。在制定预防维修制度中，应考虑尽可能减少维修工作

汽车论坛 http://www.qclt.com

量，延长维修周期和降低维修费用的原则。

6）耐特殊环境设计

明确汽车可能工作的最严重的环境，如热、振动、温度、湿度、灰尘、光照、电波等。针对这些环境条件进行必要的可靠性和维修性设计，进行特殊环境试验（包括零部件与整车）。

7）运输、贮存、包装的可靠性设计

产品设计与过程设计中，要考虑运输、贮存、包装过程中防止汽车产品刮伤、损坏、腐蚀等影响产品可靠性的措施。

8）顾客使用中可靠性信息的收集与可靠性改进

根据销售、服务部门反馈的信息，了解产品的可靠性状况与问题，进行失效分析，凡属于设计的问题，及时加以改进。

9）设计评审（DR）与产品/过程设计的验证确认

所谓设计评审是指在产品/过程设计过程的某些时期，有计划安排的，有严格组织的，按一定程序对设计方案、图纸、技术条件等的评议审定工作。

在设计阶段的可靠性管理中，为了达到可靠性目标，为了有效地验证、确认设计规格，在各个阶段都要实施设计评审，进行无漏洞的、高水平的决策。汽车设计阶段的DR实施时期大致可分为：①设计构想阶段；②设计阶段；③试验阶段。在各阶段，在阶段性研究结果出来的情况下实施DR，就设计规格的确定，相关课题的对策等进行评审决定。

在设计构想阶段，可就实现预期目标质量的基本方案、规格等进行多种探讨。一般来说质量目标与成本的相互对比关系，经常要反复讨论多次才能决定。

在设计阶段，对可靠性有重要影响的零件、总成，应事先实施FMEA等分析，把结果作为资料，评审前发给各委员讨论。

在试验阶段，在进行试制样车或试制零部件的评价之前，对试验计划、方案进行评审；当然还应对试验数据、数据处理、试验结论等进行审查讨论。

设计评审的通用原则如下：

（1）评审小组或委员会应由与质量密切相关的规划、设计、试制、试验、制造、质量管理、采购、销售、服务维修等各部门的代表或可能的最高级别的专家构成。

（2）评审应按照事先确定的标准、程序进行，参加人员应在评审会之前作好准备，事先就评审内容及相关资料进行充分的调查，以便在会议上提出具有建设性的意见。

（3）在评审过程中发现的问题必须全部做记录，并将责任落实到个人。是否更改设计的最终决定应由设计负责人来决定。评审小组虽然可以对设计等内容提出意见和建议，但满足这些要求的设计的最终责任则属于设计负责人/小组。

7.3.2.2 可靠性的设计原则

总结以往产品设计中成功的经验和失败的教训，提出以下几条可靠性设计原则：

1）确保可靠性原则

任何设计都必须确保达到预定的可靠性目标。采用任何新的结构、选用新的外购件，都必须以保证可靠性为前提。如果某种新结构虽然会带来性能上的好处，但同时也会带来可靠性下降的坏处，在原则上这种新结构不能采用。也就是说，当性能改善（不包括标准、法规内容）与可靠性冲突时，首先要保证可靠性。

2）一切通过试验原则

任何新结构的采用或老结构的改进，都必须通过严格的试验。这些试验必须有足够的有效性，即试验的标准合理，试验的方法正确，确保产品投放市场后的可靠性要求，决不容许未经试验通过就投入生产。外购件要进行严格的选型、可靠性试验与入厂检验。

3）简单化、标准化、通用化原则

汽车论坛 http://www.qclt.com

在性能满足要求的情况下，尽量采用简单的结构，不要盲目追求局部的新颖与复杂。最大限度的采用标准化的零件、组件，采用市场上通用可互换的并经使用证明可靠的零部件。

4）可靠性增长原则

尽可能采用成熟的具有良好的可靠性的结构，使新的设计保持原有结构的可靠性优势，消除老结构不可靠的部分，使新结构的可靠性较老结构有所增长，而不是下降。在新产品研制过程与过程设计过程中，采取边设计、边试验、边改进的“滚动”办法，不断消除可靠性方面存在的问题，使系统的可靠性不断增长。避免在改进过程中轻易推翻设计方案，使可靠性从“零”开始的现象发生。

7.3.3 可靠性试验

7.3.3.1 可靠性试验的种类

可靠性试验是可靠性工程中重要的内容，表 7-3-1 所示为按不同分类方法列举的可靠性试验种类。

表 7-3-1 可靠性试验分类

分类方法	可 靠 性 试 验 种 类
按试验地点	①用户可靠性试验；②试验场可靠性试验；③特殊地区可靠性试验；④室内可靠性试验
按试验对象	①整车可靠性试验；②总成可靠性试验；③零件可靠性试验；④材料可靠性试验
按试验性质	①可靠性试验；②维修性试验；③耐久性试验；④综合可靠性试验
按试验方法	①常规可靠性试验；②快速可靠性试验；③可靠性抽样试验；④环境试验；⑤极限可靠性试验；⑥可靠性增长试验；⑦使用可靠性试验；⑧腐蚀试验
按加载方式	①恒定加载；②阶梯加载；③随机加载
按抽样方式	①全数抽样；② 一次抽样；③多次抽样；④序贯抽样
按可靠性工程阶段	①产品开发可靠性试验；②外购件选型可靠性试验；③产品定型可靠性试验；④生产鉴定可靠性试验；⑤质量检查可靠性试验；⑥外购件验收可靠性试验；⑦国家质量监督检验可靠性试验

7.3.3.2 可靠性试验应注意的问题

1）制定科学完善的可靠性试验规范体系

可靠性试验的依据是试验规范。从可靠性工程需要考虑，各企业应该编制自己的可靠性试验规范体系。制定试验规范应在目标市场中实际测试采集有关参数的样本，并用概率统计的方法进行分析处理，再结合目标市场顾客调查的统计分析结果，确定出满足 90%顾客要求的各参数的数值，并以此作为设计以及编制试验规范的依据。图 7-3-2 列出了该体系表的一般构成，可供参考。

特别是，可靠性试验方法与指标限值规定得是否科学，合理的检验标准是，按这种方法得出的结论是否符合用户的结论，是否满足预期的对整车可靠性的要求。为了这一点，选定正确的试验载荷（包括加载大小、方向、性质、方式、循环次数等）是最为重要的。载荷定得过低，台架试验通过了，但整车使用却表现出很低的可靠性。如目前汽车行业中采用的减振器、灯泡等台架寿命试验方法，其中载荷要求太低，台架试验是通过了，可是在顾客中反映仍很差。这样的规范不但不起好的作用，反而成为生产厂保持低标准的根据，妨碍技术进步。当然，载荷也不能定得过高，过高会使设计过于保守，增加费用。

试验载荷规范要通过实际测定来确定，还要通过可靠性试验结果来验证。一般来说，试验场模拟顾客使用条件，台架试验模拟试验场。

在确定载荷规范时，要注意零部件的受力状况和环境条件，不能轻易在台架试验中进行简化。例如，不能简单地把后桥的受力简化为只受上下垂直方向的载荷，把斜向安装的减振器的侧向惯性载荷忽略，忽略转向球头销磨损试验中的泥沙影响等。

汽车论坛 http://www.qclt.com

在进行可靠性试验时还应考虑环境条件和试验时间。在进行寿命试验时，作为缩短试验时间的方法，一般采用加速寿命试验。加速寿命试验的加载方法分为用比市场上要求的水平更严的载荷和只选用对寿命有影响的载荷进行加载的方法，及使两者复合的加载方法。台架加速寿命试验如果用载荷的加载方法来分类的话，也可分为三类，一是简单重复一定振幅的载荷，二是按照事先规定的程序反复变动振幅和与其相对应的循环次数的方法，以及用随机的振幅进行试验的方法。另外，必须选择对故障机理最为有效的应力及其水平。

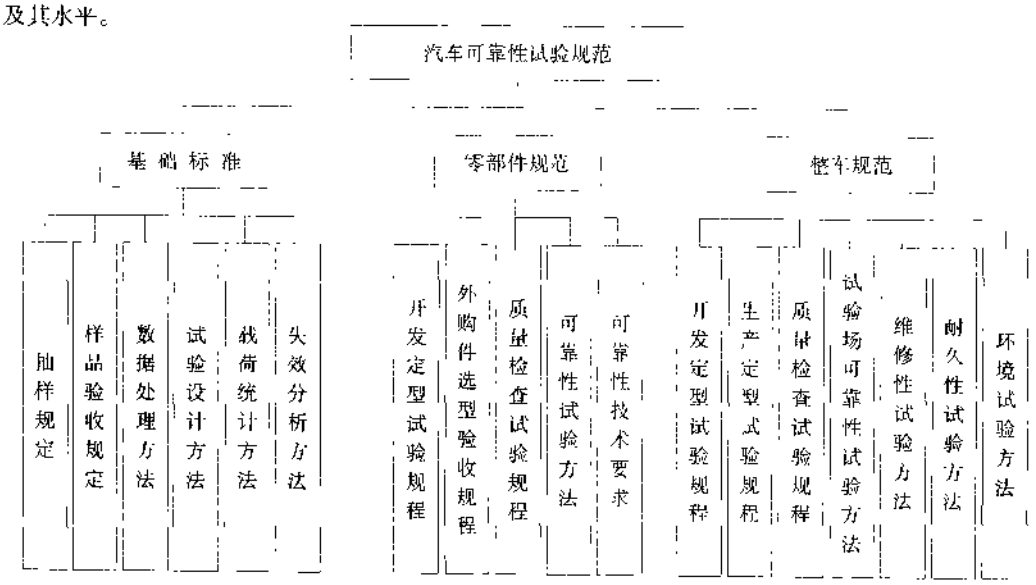


图 7-3-2 可靠性试验规范体系的构成

实车行驶加速寿命试验大多在试验场进行，在开发的初期阶段尽早进行加速寿命试验，可早期检测出问题的所在。然后为了再现一般市场条件，普遍采用与多种路面、行驶方法相组合的试验。此时的加速系数不可能取比较大的值，通常为 2～5 倍。

环境条件对可靠性来说也是一极其重要的要素，必须确定温度、湿度、雾、尘土、盐水、有机气体、臭氧、电波等各种可预料的环境水平。这种观查环境应力故障效果的试验叫做环境试验，有时应力为单一条件，但经常采用复合试验或循环试验。

可靠性试验一般要花费很长的时间，作为缩短试验时间的方法一般可分为上述加大负荷水平的方法和选出会产生较大影响的载荷，缩短 1 次试验所需时间的试验方法，以及为了缩短整个试验所需时间按照标准在试件未全都出现故障之中结束试验，以推定可靠度的中途结尾寿命试验，具体方法分为定时结尾和定数结尾试验二种。

2）区分试验对象是可维修的还是不可维修的

不可维修零部件主要通过其寿命分布进行评价，可维修系统除了试验其可靠性外，还要对其维修性与耐久性进行试验评价。

3）零部件可靠性试验是汽车整车可靠性试验的基础

零部件试验比整车试验时间短，费用少，试验条件容易控制，样本容量也可大些，因此，它被广泛采用。难以想象，许多未经台架试验验证的零部件一起装到样车上进行整车可靠性试验，并企图用整车的试验结果来验证零部件是否符合要求，会有什么结果。经验教训告诉我们，这样做是欲速则不达。

4）试验样品的质量检查十分重要

可靠性试验的样品必须符合质量要求。这主要是针对开发时期而言。如果样品未经过逐道工序仔细检查，就投入试验，待试验中发现了故障，查出来是因零部件没有按图纸要求进行加工，时间和经费都已损失。不符合图纸要求的样品，原则上不应该送去做试验，这是一条既简单，而又常常被忽视的道理。

汽车论坛 http://www.qclt.com

5）数据的完整与准确

可靠性试验往往要花费较长时间，伴随着试验人员繁重而枯燥的工作，因此，特别要注意实行严格、仔细的试验情况监测办法，使失效现象能够及时发现并记录下来。数据的遗漏会造成评价的错误。在寿命试验台上要应用近代监测技术发现失效现象并及时停机。在试验场试验中，试验人员要自觉严格按试验规范要求驾驶汽车并运用自己的经验及时判断故障。不正确的数据会导出不正确的结论，用不正确的结论去指导设计与生产，贻害无穷。

6）对试验结果进行失效分析与可靠性分析

对试验中发现的故障（或失效）要按正确的方法进行可靠性分析与失效分析。

整车可靠性试验之后，至少要进行下列统计分析：

①可靠性、维修性评价；

②故障数分析；

③累积故障数分析；

④故障的危害度分析，按危害度进行故障排序。

7）注意试验安全

汽车整车、发动机及零部件试验都带有相当的危险性。必须制定严格的安全制度并贯彻实施，才能保证试验中人与机件的安全。例如，高速跑道要制定专门的交通规则，驾驶员进场之前要经过专门训练考试取得准驾证，还要设置保证安全、防止事故、及事故后及时处理的保护设施，以及通讯、监测、报警、防火、灭火、急救等系统。

7.3.4 制造/装配过程控制

7.3.4.1 制造/装配前的准备

在设计开发阶段，无论进行了如何高水平的可靠性设计，如果在制造过程中技术和管理跟不上的话，要完全达到设计的可靠性也是非常困难的。也就是说制造过程/工艺、操作人员的技能、制造/装配中的质量管理、检验及测试、纠正措施和过程改进等的好坏，最终会对市场上产品的可靠性产生巨大影响。特别是在制造工序产生的质量变差以及作业或管理上的错误有时会增加出现重大质量缺陷的危险性。从这种意义上讲，在制造/装配准备阶段确定充分考虑了产品预期可靠性的过程控制计划和管理标准是非常必要的。

1）过程控制计划

在制订过程控制计划时，为了更好地理解设计意图、新产品的特点、质量标准，应充分与设计部门进行信息交换，以确保制造出符合设计要求的可靠性的产品。对于各工序预计的设备、工装、夹具，其过程能力是否满足设计公差的要求，应按照“统计过程控制”（SPC）的原理和方法（详见本篇第6章）进行评价，并充分探讨过程能力不足时的对策。另外，还要注意如何防止在制造/装配过程中，因运转、传送、操作不当、长期保存等出现的划伤、尘土、生锈、变质等缺陷。

2）设备管理

产品的质量也与设备、夹具的可靠性有密切关系。因此，制定检查设备、夹具及测量器具是否满足过程能力要求、精度要求、环境要求，制定防止设备老化和突然失效的标准，并按计划实施是非常重要的。另外，自动化设备虽然具有提高产品的质量及可靠性的优点，但反过来，也存在难以检测出故障的问题。因此，保证其安全运转的技术必须非常高。

7.3.4.2 采购/外协件的控制

在整个汽车的构成部件之中，外购件比率极高，有时可达到70%～80%。其质量的好坏当然会对整车的可靠性产生直接影响。随着大批量生产、产品功能的复杂化，外购件的范围逐步扩大，甚至已经涉及到技术水平很高的零件、装置。一般而言，在市场上虽然是因外协件的质量问题发生的故障，本为购买者的汽车整车生产厂家是不能推卸责任的。因此，作为整车生产厂调查、指导供方的质量管理和可靠性管理

汽车论坛 http://www.qclt.com

状况，并进行产品质量的试验评价来确保可靠性是很必要的。关于供方的质量管理，作为采购合同的一部分由双方商定写进合同里面，而且通常还应把日常质量确认顺序等详细地写在里面。一般要求具有下列事项：

①检验标准的提出、认可。在供货前，先提交检验标准，管理工艺图等，并获得认可。在改变规格时，也要有同样的程序。

②重要工序变更的认可。材料及制造/过程的重要变更应事先通知，并取得认可。必要时可到当地进行现场监查。

③新产品管理。对于变更了设计及过程/工艺后的首批产品，必须在供货前在提供试验、检验数据的同时，提交样品，获得认可。

④批量管理的实施。与重要特性相关的外协件，应进行批量管理。为了以后能追踪质量问题，应打上标识（如批量号等）之后再供货。

⑤质量管理记录的管理。试验、检验结果、批量管理记录、试验、检验装置的计量、精度管理记录，不合格品及预防纠正措施等记录应按需要提交，并按规定期限保存。

但是，对技术性高的新部件等的可靠性管理，有时不一定能确定公式化的程序。此时，在从设计构想阶段到开始生产的初期阶段，由零件厂家、整车厂家共同推进质量保证活动是很必要的。应特别重视的项目有①明确包括可靠性在内的技术要求；②分析过去索赔案件等在内的有关情况；③调查与要求质量相对应的过程/工艺能力；④过程/工艺管理标准的制定和认可；⑤生产试制产品的质量验证、确认等。这些活动应在供方和顾客的设计部门及质保部门之间的合作下进行，而整体的过程管理应由采购部门提供支援。

7.3.4.3 制造/装配过程的控制

在制造/装配阶段通过生产过程控制计划来保证设定的过程能力，确保产品质量水平的管理活动是必要的。为此，重要的是使包括加工、装配在内的所有作业都达到标准化。应大力推广 SPC 的原理及方法的运用，通过各种测量系统、统计图表的有效运用，使制造/装配过程既稳定且受控，并实施持续改进。这样，能保证产品质量的稳定、提高，减少不合格品带来的损失和浪费。

另外，为了确保可靠性而需要注意的问题是操作者的错误，特别是复杂的系统，一个小小的错误就有可能造成无法预期的事故。

按照 J.M.Juran 的理论，操作者的错误大致可分成以下几类：

①技能不足造成的错误，这在操作者之间有明显的差异，只要制定标准作业指导书，把优秀操作者的技巧和经验传授给其他操作者就能够改善。

②意识性错误，以种种理由下意识地不遵守标准。其对策是使其理解质量标准的重要性，增强操作者保证质量的意识。

③完全不注意造成的错误，即使以最大的注意力也会犯下错误，而自己却全然不知，装配人员的错误率大约为 0.1%～0.003%。

为了解决这些问题，可以利用在重要操作工序设立表示板，图示出操作要点；或对操作人员执行通过培训后持证上岗制，或者用技能认定和资格认定等方法来解决。

但是操作错误难以预测，所以完全杜绝是非常困难的。作为改善这些个人错误的方法，可以在发生操作错误的场合，设定安装不使其流入下一道工序的“流出防止装置”或使用可靠性较高的自动化装配设备。

其次是作业环境问题，首先应尽最大可能排除故障直接原因的尘土、垃圾、温度、湿度等影响，另外尽量减轻因亮度、室温、作业姿势、劳力等可造成作业者负担的影响。这些都是提高制造可靠性的重要因素。

7.3.4.4 检验

在进行过程可靠性管理活动的同时，在制造/装配阶段又一重要的活动为可靠性评价，即所谓的检验。

进行检验的必要性在于：①外购件的质量控制；②鉴别、剔除在制造/装配过程中产生的缺陷；③成品的可靠性评价；④进行整车评价的场合。

下面详细加以说明：

1）外购件的入库

外购件的进厂（进货）可靠性检验、试验大部分为破坏性试验，所以一般采用抽检，抽检的种类分为一次、多次和每次抽样等方式。另外，由于如果所有样件的试验一直持续到出现故障为止，需要很长时间，所以经常采用定时或定数结尾方式。而为了缩短时间可采用加速寿命试验方法。

2）鉴别在制造/装配过程中产生的缺陷

为了清除在制造/装配过程中产生的不合格品和潜在的缺陷，经常在电子件上采用在现场将湿度和振动进行多种组合，并施以相当严格的应力对所有产品进行鉴别试验。机械类零件也采用类似方法，总成或整车则对所有产品采用缩短时间的磨合运转的方式，通过官能检查检测初期不合格品。

3）成品的可靠性评价

设计更改时，根据其更改程度，对试制的成品通常进行综合可靠性试验。这种试验的重点在于进行产品初期使用上的性能、可靠性的检查，在开始生产前去掉制造/装配过程和产品上的缺陷。另外，对于零部件，则要在正常生产中抽样，在规定的时间进行可靠性试验之后，再拆解检查零部件和在装配时出现的问题。

4）整车评价

工厂下线时进行的成品检查，从顾客的立场出发评价车辆（Audit 评审），与提高制造质量相结合的活动越来越盛行。其方法是每天或每周抽取数台车辆，由数人组成的评价组在规定时间内综合评价。评价按一定的标准进行，通过结果的统计，用来定量把握质量情况，确认新型车的装配质量，比较各工厂之间的产品质量水平。车辆评价结果必定对提高产品的质量有很大作用。所以评审人员的选定和培养是极其重要的。评价标准应与设计目标和工厂其它的检验目标协调一致，评价结果应直接与质量改进活动相关。

7.3.5 销售及售后服务的可靠性

为了使销售出去的汽车让顾客满意地使用，必须使在设计、制造阶段的原有的可靠性，确保在使用阶段能维持原样，让顾客一直安全舒适地使用。为此，在汽车从工厂到交到顾客手里这一段时间必须保证质量，也就是说在运输、储存时必须进行充分的管理。其次让顾客按照使用说明书和贴在产品上的各种标签进行日常及定期预防维修也是非常重要的。另外，在定期检查和故障修理时，需要有与售后服务紧密相关的、便捷的保修设施、技术和人员。服务部门的作用是确保使用过程中的可靠性，同时向设计和制造部门迅速提供、反馈可靠性信息。

7.3.5.1 运输、保管

汽车是一种不用特别包装、打包运输，以原有状态进行运输、保管的特殊商品。因此，如果运输和保管不好的话，就会出现划痕或受煤烟、粉尘、雨水等影响发生锈蚀等问题。特别是对需要海运的车辆，由于长期放置在船仓内，在各港口进行装卸，有时会因保管和装卸处理不当造成损伤，所以必须进行充分细致的管理。

7.3.5.2 维修设施与技术

维修设施是一个范围相当广的问题。例如①维修用零配件的供给；②修理用工具的完善；③故障检测或诊断装置设施的建设；④测量及检查用仪器的完善；⑤整个维修服务网络与功能的充实等。在维修时，由于不大熟悉而进行的调整、修理，反而会引起功能不稳定或造成新的故障，因此必须重视通过教育培训来提高维修人员的技术水平，并制定通用易懂的修理手册。应推行汽车维修人员的资格认定制度。此外，各企业还应设立专门的培训机构，强化培训维修、保养技术。

汽车论坛 http://www.qclt.com

7.3.6 可靠性信息的收集及反馈

为了确保产品在市场上的安全性和可靠性，在收集设计开发时的试验数据的基础上，再广泛收集市场上的使用数据，进行综合分析是非常必要的。特别是市场数据具有真实反映顾客的需求及抱怨的特点，把它作为分析实际使用过程中的故障、使用环境、维修状况、服务要求等的基本信息来源是非常重要的，而且是非常宝贵的资料。在收集市场数据时，要在事先明确目的基础上充分计划好收集数据的项目、收集方法、分析及报告的系统等，同时必须进行严格的整体运营管理。另外，关于报告形式，为了能够定量地把握可靠度，应确定必需的项目，正确的记录方式，而且为了能够集中统计处理，各项目应进行编码。

市场信息一般分成如下几类：

7.3.6.1 索赔账单

由经销商处理的在保修期内的顾客向汽车厂家索赔的文件。

7.3.6.2 质量报告

与请求赔偿的索赔账单不同，这是一种由经销商负责的，送交给生产厂家销售、服务部门的报告，其中要详细记载重要的故障现象，检查、修理方法，原因推断等。作为补充内容，大多还要求附上照片、胶片或故障零件。

7.3.6.3 从市场上回收的不合格品

除了在质量报告中所附带的故障零件之外，从处理索赔时更换的零件中可按照一定的比率回收。另外，应技术部门的要求，有时也会让经销商回收一些指定的零件，这些零件对探明分析故障原因机理是非常宝贵的。同时，对汽车厂家和协作配套厂家之间如何确定索赔补偿分担比率也会起到重要的作用。

7.3.6.4 现场调查

在市场中发生质量问题时，当有必要直接观察故障现象和环境条件时，可由设计等有关技术人员到当地进行现场调查。另外，为了把握经销商的维修、预防维修状况，在特定地区的使用环境等也会进行现场调查。

7.3.6.5 持续跟踪调查

为了获得在使用过程中经常发生的故障或质量问题的状况，以及维修、预防维修，相关的运行费用等情报信息，有时会从顾客中选择监督员进行持续的跟踪调查。一般是通过经销商收集报告，但有时也会根据需要由技术人员同时进行定期的跟踪调查。

7.3.7 可靠性过程的循环

如图 7-3-3 所示，可靠性工作应该是一个“计划→实施→研究→总结”这样一个循环往复的过程。而每经过一个循环，可靠性过程中的每一个阶段的工作，即策划、设计试验验证、过程控制、销售、服务、信息反馈等，都应前进一步，使企业的质量工作及其产品的可靠性不断向新水平迈进。 （撰稿人：蒋 涛）

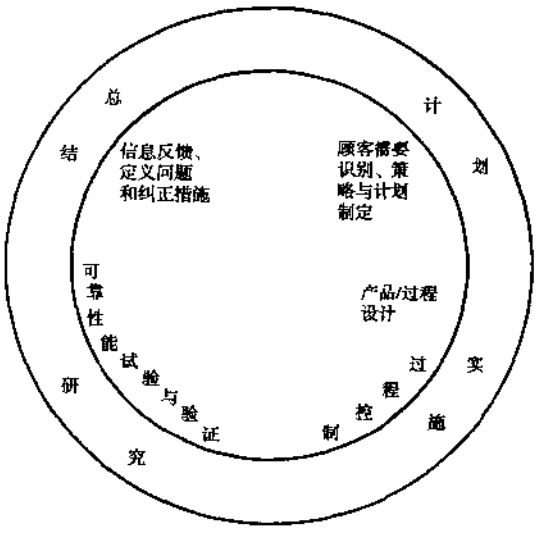


图 7-3-3 可靠性过程的循环

参 考 文 献

1．王秉刚．汽车可靠性工程方法．北京：机械工业出版社，1991．

2．浙江大学数学系高等数学教研组．概率论与数理统计．北京：人民教育出版社，1979．

3．杨万凯、刘承胤．汽车可靠性理论．北京：人民交通出版社，1986．

4．徐灏．疲劳强度设计．北京：机械工业出版社，1985．

5．徐灏．机械强度的可靠性设计．北京：机械工业出版社，1985．

6．克莱斯勒汽车公司，福特汽车公司，通用汽车公司．统计过程控制（SPC）．中国汽车技术研究中心编译，1997．

7．克莱斯勒汽车公司、福特汽车公司、通用汽车公司．潜在的失效模式及后果分析（FMEA）．中国汽车技术研究中心编译，1997．

8．中华人民共和国汽车行业标准．QC/T 900—1997 汽车整车产品质量检验评定方法．1997．

9．车致忠．机械零件可靠性设计．北京：机械工业出版社，1988．

10．真壁肇、质量保证与可靠性．孙惠琴译．北京：机械工业出版社，1987．

11．市田嵩等．可靠性试验—环境、设备．北京：机械工业出版社，1986．

汽车论坛 http://www.qclt.com

汽车论坛 http://www.qclt.com