

普通高等教育“十五”国家级规划教材
(高职高专教育)

工程材料与材料成形工艺

(第二版)

王纪安 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，在获国家教材奖
料成形工艺》

用性、技能型人才的要求，以机械制造生产第一线需要的知识、技能培养为目标，将原金工理论教学、金工实验实训进行整合，三位一体，精简提炼，注重实用，形成强化应用和技能培养的具有新时期高等职业教育特点的教材体系。本书面向新世纪制造业的发展需要，重视综合性、应用性与实践性，重视新材料、新工艺、新技术的引入并安排了成形工艺基础实训

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人院校及本科院校举办的职业技术学院、继续教育学院和民办高校机械类专业的教材，并可同时应用于课堂教学、实训与实验等教学环节，也可供有关工程技术人员、企业管理人员参考或作为培训教材。

图书在版编目(CIP)

工程材料与材料成形工艺/王纪安主编. —2版.

北京:高等教育出版社, 2004.12

ISBN 7 - 04 - 015670 - 9

.工... .王... . 工程材料 - 高等学校:
技术学校 - 教材 工程材料 - 成型 - 高等学校:技术
学校 - 教材 . TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字

策划编辑 赵 亮 责任编辑 陈大力 封面设计 于 涛 责任绘图 尹文军
版式设计 张 岚 责任校对 俞声佳 责任印制

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100011

总 机 010 - 58581000

购书热线 010 - 64054588

免费咨询 800 - 810 - 0598

网 址 [http: www.hep.edu.cn](http://www.hep.edu.cn)

经 销 新华书店北京发行所

印 刷

版 次 2000年8月第1版

年 月第2版

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 17.25

印 次 年 月第 次印刷

字 数 420 000

定 价 20.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号：15670 - 00

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作，2000年教育部高等教育司颁发了《专教育教材建设的若干意见》

版500本左右高职高专教育规划教材”的目标，并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施：先用2至3年时间，在继承原有教材建设成果的基础上，充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验，解决好高职高专教育教材的有无问题；然后，再用2至3年的时间，在实施《教学内容体系改革与建设项目计划》

专教育教材。根据这一精神，有关院校和出版社从2000年秋季开始，积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的

案)

部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题，将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略，抓好重点规划”为指导方针，重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设，特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材；同时还要扩大教材品种，实现教材系列配套，并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系，在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材
校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

第二版前言

——写给读者的几句话

您可能是正在高职高专院校就读的未来的应用型高技能人才，也可能是正在工业企业第一线工作的工程技术人员或管理人员，本书是您学习和工作的重要知识基础和能力基础。

您可能学习或工作在机械制造、维修及其自动化的工作岗位，您使用的各种工具——简单到手工工具，复杂到加工中心，都是由各种材料制作的；您利用工具从事的加工对象——零件如轴和齿轮，成品如汽车和飞机，也都是由各种材料并通过一系列成形方法制作的。工程材料的应用与各种成形工艺技术是制造之母。您在日常生活和工作中会接触到钢铁、铝合金和铜合金，您也会接触到诸如塑料、橡胶等很多非金属材料，此外还有很多神奇的新型材料，神舟五号载人飞船的成功壮举就与新材料的开发密不可分。材料为什么具有很多不同的性能呢？如何去选择和用好材料呢？本书将会给出答案。您可能也接触过一些这样的名词，比如机械加工、铸造、锻压和焊接，这些都属于材料成形技术，不论多么复杂的机械都是由一种或几种成形工艺加工出来的。现在，这些广泛应用的技术正在焕发新的活力，数控加工已广泛采用，铸造过程计算机数值模拟、高速高能锻压成形、等离子及激光焊接等新工艺、新技术都在工业生产中发挥着重要的作用。

您可能学习或工作在材料成形和控制技术岗位，您可能学习或工作在汽车制造与维修岗位，您可能学习或工作在热能工程、化学工程、工业设计、电工电子等不同的岗位，本书都将使您获益。

本书的每一章之初都设了“问一问，想一想”栏目，希望引起您的兴趣和思考。“学习目标”提出了本章学习的基本内容、重点和应掌握的基本技能。

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，在教育部高职高专规划教材王纪安主编

第一版曾获全国高等学校优秀二等奖。本次修改紧密结合高等职业教育技能型人才培养目标，做了相应的修改和补充，较大幅度删减了原理性描述

增加了必要的实训操作指导内容和实训安全要求，增加了一些最新的技术与工艺介绍，如纳米材料、快速成形技术等。对章节也进行了调整，分解取消了原第7章(制)

该章单列后有利于成形工艺实训的学习指导。修改后全书仍为13章，第1章从宏观把握本课程，第2~6章介绍工程材料，第7~12章介绍成形技术，第13章综合应用。相信本书第二版会更加适应和方便您的使用。

本书修改稿全部由王纪安完成，北京市机械局职工大学陈则钧教授担任主审。

编者

2004年11月

第一版前言

本书是根据教育部制定的
合高职高专教学改革的实践经验，以适应 21 世纪培养高等技术应用性人才的要求编写的，是
高职高专教育机械类专业的通用教材。本书可同时应用于课堂教学、实训与实验
金工实验)

全书共 13 章，1~4 章讲述工程材料的性能、结构与凝固、强化与处理，5~7 章讲述金属
材料、非金属材料、新型材料与材料的质量控制，8~12 章讲述铸造、锻压、焊接和胶接、钳
工和机械加工、非金属材料的成形工艺，13 章为材料与成形工艺选择，每章都安排了习题与
思考题，并附有综合性实验指导。

本书编写具备如下特点：

合，三位一体，形成强化应用的具有高职高专特点的新的教材体系。

技术及其他正在发展的成形技术的介绍等。

强调培养学生的技术应用能力。

可持续发展的观点。

参加本书编写的有承德石油高等专科学校丁德全
章、第 6 章、第 7 章、第 9 章、第 11 章)

大学沈兴东

校杨慧智教授主审。书中金相图片由大连理工大学徐卫平提供。

正值世纪之交、高职高专教育迅速发展并发生着深刻变革，课程体系与教学内容的改革也
正处于积极研究和探索之中。本书的编写力求适应教育的改革和发展，但由于水平有限，书中
不足之处在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

本书编写得到了全国有关院校专家、老师的大力支持，并参考了大量有关文献资料，在此
一并表示衷心的感谢。

编者
2000 年 5 月

目 录

第 1 章 工程材料与机械制造过程	1	3.3.1 陶瓷材料的结构特点	25
1.1 材料及其成形工艺的 简要发展过程	1	3.3.2 高分子材料的结构特点	25
1.2 工程材料的分类及发展趋势	2	3.4 材料的凝固与结晶	27
1.3 机械制造过程及材料成形 技术发展趋势	5	3.4.1 金属的结晶特点	28
1.3.1 机械制造工艺流程	5	3.4.2 非晶态凝固的特点	29
1.3.2 材料成形工艺的技术进展	6	3.5 铁碳合金相图	29
1.4 课程总体目标和任务	7	3.5.1 铁碳合金的基本组元与基本相	29
思考题与习题	7	3.5.2 Fe-Fe ₃ C 相图分析	31
第 2 章 工程材料的性能	9	3.5.3 典型合金的结晶过程及组织	32
2.1 材料的力学性能	9	3.5.4 含碳量与铁碳合金组织及 性能的关系	35
2.1.1 强度和塑性	9	3.5.5 铁碳合金相图的应用	36
2.1.2 硬度	11	思考题与习题	37
2.1.3 冲击韧度	13	第 4 章 材料的强化与处理	39
2.1.4 疲劳极限	14	4.1 金属材料的热处理	39
2.2 材料的物理性能	15	4.1.1 钢在加热时的转变	39
2.3 材料的化学性能	16	4.1.2 钢在冷却时的转变	40
2.3.1 金属腐蚀的基本过程	17	4.1.3 钢的普通热处理	43
2.3.2 防止金属腐蚀的途径	17	4.1.4 钢的表面热处理	47
2.4 材料的工艺性能	17	4.1.5 热处理新技术简介	48
2.5 材料的经济性能	17	4.1.6 热处理工艺的应用	48
思考题与习题	18	4.2 聚合物材料的改性强化的	52
第 3 章 材料的结构与凝固	19	4.3 工程材料的表面处理方法的	53
3.1 材料的结合方式	19	4.3.1 气相沉积	53
3.1.1 结合键	19	4.3.2 化学转化膜技术	55
3.1.2 晶体与非晶体	20	4.3.3 电镀和化学镀	55
3.2 金属材料的结构特点	20	4.3.4 涂料和涂装工艺	56
3.2.1 晶体结构的基本概念	20	思考题与习题	56
3.2.2 三种典型的金属晶体结构	21	第 5 章 金属材料	58
3.2.3 实际金属的晶体结构	22	5.1 概述	58
3.2.4 合金的晶体结构	23	5.1.1 金属材料的分类	58
3.3 非金属材料的结构特点	25	5.1.2 合金元素在钢中的作用	60
		5.2 非合金钢	62

目 录

5.2.1 碳素结构钢	62	6.4.1 高温材料	109
5.2.2 优质碳素结构钢	63	6.4.2 形状记忆材料	110
5.2.3 碳素工具钢	64	6.4.3 非晶态材料	110
5.2.4 易切削结构钢	65	6.4.4 超导材料	111
5.2.5 工程用铸造碳钢	65	6.4.5 纳米材料	112
5.3 合金钢	66	思考题与习题	112
5.3.1 低合金钢	67	第7章 铸造成形工艺	114
5.3.2 机械结构用合金钢	68	7.1 铸造工艺基础	114
5.3.3 合金工具钢和高速工具钢	71	7.1.1 概述	114
5.3.4 特殊性能钢	74	7.1.2 合金的铸造性能	114
5.4 铸铁	77	7.2 砂型铸造	116
5.4.1 铸铁的石墨化	77	7.2.1 型砂与芯砂	116
5.4.2 常用铸铁	77	7.2.2 手工砂型造型	117
5.4.3 特殊性能铸铁	83	7.2.3 机器造型	121
5.5 非铁金属材料	84	7.2.4 型芯制造	122
5.5.1 铝及其合金	84	7.2.5 合型	124
5.5.2 铜及其合金	87	7.2.6 浇注	125
5.5.3 滑动轴承合金	90	7.2.7 落砂和清理	125
5.5.4 粉末冶金材料	91	7.3 铸造工艺	126
思考题与习题	92	7.3.1 浇注位置与分型面的选择	126
第6章 非金属材料与新型材料	94	7.3.2 工艺参数的选择	127
6.1 高分子材料	94	7.3.3 浇注系统	128
6.1.1 高聚物的人工合成	95	7.3.4 冒口	130
6.1.2 有机高分子材料的 组成及性能特点	95	7.3.5 铸造工艺图	130
6.1.3 工程塑料	96	7.4 铸件的结构工艺性	131
6.1.4 合成橡胶	100	7.4.1 铸件质量对铸件结构的要求	132
6.1.5 胶粘剂	101	7.4.2 铸造工艺对零件结构的要求	133
6.2 陶瓷材料	105	7.4.3 不同铸造合金对铸件结构的要求	134
6.2.1 陶瓷的分类	105	7.5 铸件质量与成本分析	135
6.2.2 陶瓷材料的性能特点	105	7.5.1 铸件的主要缺陷及其产生原因	135
6.2.3 常用工程结构陶瓷的种类、 性能和用途	106	7.5.2 铸件成本分析	137
6.3 复合材料	107	7.6 特种铸造与铸造新技术简介	139
6.3.1 复合材料的种类	107	7.6.1 熔模铸造	139
6.3.2 复合材料的性能特点	108	7.6.2 金属型铸造	139
6.3.3 复合材料的应用	108	7.6.3 压力铸造	140
6.4 其它新型材料	109	7.6.4 低压铸造	140
		7.6.5 离心铸造	140
		7.6.6 铸造过程计算机数值模拟技术	141

目 录

7.6.7 快速成形技术	141	9.2.6 电阻焊	182
思考题与习题	142	9.2.7 钎焊	183
第8章 锻压成形工艺	145	9.3 常用金属材料的焊接	183
8.1 锻压工艺基础	145	9.3.1 金属焊接性	183
8.1.1 锻压的基本生产方式	145	9.3.2 钢铁材料的焊接	184
8.1.2 金属的锻造性能	147	9.3.3 非铁金属材料的焊接	184
8.1.3 坯料的加热和锻件的冷却	149	9.4 焊接结构工艺性	185
8.2 自由锻	150	9.4.1 焊接结构材料的选择	185
8.2.1 自由锻设备	150	9.4.2 焊缝布置	185
8.2.2 自由锻的基本工序	151	9.5 焊接质量与成本分析	186
8.2.3 自由锻工艺规程的制定	153	9.5.1 焊接质量分析	186
8.2.4 自由锻锻件结构工艺性	156	9.5.2 焊接质量检验过程	188
8.3 模锻	157	9.5.3 焊接生产成本分析	190
8.3.1 锤上模锻	157	9.6 胶接成形	191
8.3.2 胎模锻	159	9.6.1 胶接的特点与应用	191
8.3.3 压力机上的模锻	159	9.6.2 胶接工艺	192
8.4 板料冲压	160	9.7 焊接与胶接新技术简介	193
8.4.1 冲压设备	160	9.7.1 等离子弧焊接和切割	193
8.4.2 冲压模具	160	9.7.2 真空电子束焊接	194
8.4.3 板料冲压的基本工序	161	9.7.3 激光焊接与切割	194
8.5 锻压件质量与成本分析	162	9.7.4 胶接新技术	195
8.5.1 锻件质量分析	162	思考题与习题	196
8.5.2 锻件成本分析	164	第10章 钳工成形工艺	199
8.6 锻压新技术简介	164	10.1 划线	200
8.6.1 高速高能成形	164	10.1.1 划线工具	200
8.6.2 液态成形	166	10.1.2 划线基准	201
8.6.3 超塑性成形	166	10.1.3 划线操作注意事项	202
思考题与习题	167	10.2 锯切	202
第9章 焊接及胶接成形工艺	168	10.2.1 锯条	202
9.1 焊接工艺基础	168	10.2.2 锯切方法	202
9.1.1 概述	168	10.3 锉削	203
9.1.2 焊接接头的组织和性能	169	10.3.1 锉刀	203
9.2 常用焊接方法	171	10.3.2 锉削方法	203
9.2.1 焊条电弧焊	171	10.3.3 锉削操作注意事项	204
9.2.2 气焊与气割	175	10.4 钻孔	205
9.2.3 埋弧自动焊	179	10.4.1 钻床	205
9.2.4 气体保护焊	180	10.4.2 钻头	205
9.2.5 电渣焊	181	10.4.3 钻孔方法	206

目 录

10.4.4 钻孔操作注意事项	206	12.1.3 压制成形	233
10.5 攻螺纹与套螺纹	206	12.1.4 浇铸成形	233
10.5.1 攻螺纹	206	12.1.5 吹塑成形	234
10.5.2 套螺纹	207	12.1.6 回转成形	234
10.6 刮削	207	12.2 橡胶成形	235
10.6.1 刮刀及其用法	208	12.3 陶瓷成形	235
10.6.2 刮削质量检验	208	12.3.1 压制成形	236
10.6.3 平面刮削步骤	208	12.3.2 注浆成形	236
10.7 装配工艺	208	12.3.3 注射成形	237
10.7.1 典型零件的装配	209	12.4 复合材料成形	237
10.7.2 拆装工艺方法	210	12.4.1 手糊成形	237
思考题与习题	211	12.4.2 层压成形	237
第 11 章 机械加工成形工艺	212	12.4.3 喷射成形	238
11.1 切削加工基本知识	212	12.4.4 缠绕成形	238
11.1.1 切削加工运动	212	思考题与习题	238
11.1.2 金属切削刀具	213	第 13 章 材料与成形工艺选择及产品	
11.1.3 切削液	215	质量控制	240
11.1.4 工件材料的切削加工性	215	13.1 机械零件的失效形式	240
11.1.5 零件的加工质量	216	13.1.1 零件失效原因	240
11.2 车削加工	216	13.1.2 零件失效形式	241
11.2.1 车床	216	13.2 材料及成形工艺选择原则	243
11.2.2 车刀	217	13.2.1 使用性原则	243
11.2.3 工件的安装方法及附件	218	13.2.2 工艺性原则	243
11.2.4 基本车削工艺	220	13.2.3 经济性原则	244
11.2.5 典型零件加工	221	13.3 材料及成形工艺选择的方法	246
11.2.6 机械加工安全技术	223	13.3.1 材料及其成形工艺选择的步骤	246
11.3 铣削、刨削与磨削加工	223	13.3.2 材料及成形工艺选择方法及依据	247
11.3.1 铣削加工	223	13.4 典型零件的选材实例分析	250
11.3.2 刨削加工	225	13.4.1 轴类零件的选材	250
11.3.3 磨削加工	227	13.4.2 齿轮类零件的选材	252
11.4 数控加工与特种加工	228	13.4.3 用手丝锥的选材	254
11.4.1 数控加工	228	13.4.4 机架、箱体类零件	254
11.4.2 特种加工	229	13.5 材料的质量检验	255
思考题与习题	230	13.5.1 成分分析	255
第 12 章 非金属材料成形工艺	232	13.5.2 组织分析	256
12.1 塑料成形	232	13.5.3 无损探伤	257
12.1.1 挤出成形	232	思考题与习题	258
12.1.2 注射成形	233	附录 综合性实验指导	260
		主要参考文献	262

第 1 章 工程材料与机械制造过程

问一问，想一想：找一个生活中您熟悉的某种制品或零件认为它是什么材料制作的，为什么用这种材料？是用什么方法做出来的，为什么采用这种成形方法？



学习目标

为避免“只见树木，不见森林”，本章希望读者从宏观上对材料与成形工艺，及其与机械制造过程的关系有个全面而简单的了解。

1. 了解工程材料与成形工艺的概念与分类及其在机械制造过程中的地位和作用；
2. 简要了解工程材料与成形工艺技术的过去、现在和未来；
3. 了解学习本课程的目标、任务。

工程材料与成形工艺基础课程包含各种工程材料及其毛坯零件成形工艺两大部分内容。工程材料是构成机械设备的基础，也是各种机械加工的对象，包括金属材料、非金属材料 and 复合材料等。材料成形工艺包括各种材料的铸造、锻压、焊接、聚合、烧结和钳工、机械加工等加工技术。材料应用和成形工艺技术是机械制造过程的重要组成部分，机械制造生产过程就是将各种原材料经过成形、改性、连接等工艺转变为机器的过程

1.1 材料及其成形工艺的简要发展过程

材料是人类文明生活的物质基础。综观人类利用材料的历史，可以清楚地看到每一类重要新材料的发现和运用，都会引起生产技术的革命，并大大加速社会文明发展的进程。人类社会所谓石器时代、青铜器时代和铁器时代就是按生产活动中起主要作用的材料划分的。材料与你和你的工作密不可分。

在远古时代，人类的祖先是石器为主要工具的。他们在不断改进石器和寻找石料的过程中发现了天然铜块和铜矿石，并在用火烧制陶器的生产中发现了冶铜术，后来又发现把锡矿石加到红铜里一起熔炼，制成的物品更加坚韧耐磨，这就是青铜。公元前 5000 年人类进入青铜器时代。公元前 1200 年左右人类进入铁器时代，开始使用的是铸铁，后来制钢工业迅速发展，成为 18 世纪产业革命的重要内容和物质基础。所以也有人将 18—19 世纪称为“钢铁时代”。进入 20 世纪后半叶，新材料研制日新月异，出现了所谓“高分子时代”、“半导体时代”、“先进陶瓷时代”和“复合材料时代”等提法，材料发展进入了丰富多彩的新时期。

中华民族在材料生产及其成形加工工艺技术方面取得了辉煌的成就。我国原始社会后期开

始有陶器，早在仰韶文化和龙山文化时期，制陶技术已经很成熟。我国的青铜冶炼开始于夏代，到了距现在3 000多年前的殷商、西周时期，技术已达当时世界高峰，用青铜制造的工具、食具、兵器和车马饰，得到普遍应用。河南安阳发掘出来的商代“司母戊”大方鼎重达875 kg，在大鼎的四周有蟠龙等组成的精致花纹，充分反映出我国古代青铜冶炼和铸造成形的高超技艺。湖北江陵楚墓中发现的埋藏2 000多年仍金光闪闪的越王勾践宝剑，陕西临潼秦皇陵陪葬坑发现的工艺复杂、制作精美的铜车马等，都显示了当时制作工艺的精细。春秋战国时期的

关系。春秋战国时期，我国开始大量使用铁器，白口铸铁、可锻铸铁相继出现。1953年从河北兴隆地区发掘出来的战国铁器遗址中，就有浇铸农具用的铁模子，说明当时已掌握铁模铸造技术。随后出现了炼钢、锻造、钎焊和退火、淬火、正火、渗碳等热处理技术。用现代技术对古代宝剑进行检验，揭开了宝剑在阴暗潮湿的地下埋藏2 000多年仍保持通体光亮锋利异常的奥妙，越王剑经过了硫化处理，秦皇陶俑剑采用了钝化处理技术，这些表面处理技术在现代仍是重要的防护方法。我国的金属切削加工工艺发展可追溯到青铜器时代，越王剑的刃口磨得非常精细，可与目前精密磨床得到的产品相媲美。在湖南衡阳出土的相当精致的东汉人字齿轮，说明在汉朝就有了金属机件。明朝出现了简单的切削加工设备。清初

6.6 m的嵌齿铣刀，用牲畜带动旋转，用来铣削天文仪上的铜环。明朝宋应星所著《物

》
锻造、淬火等各种金属加工的方法，其中记述关于铣刀的制造、翻修和热处理工艺与今日相差无几。上述事实，生动地说明了中华民族在材料及其加工方面对世界文明和人类进步作出的卓越贡献。21世纪初叶，我国的现代工程材料与成形技术又有了可喜的发展，2003年我国钢铁材料年产量超过2亿吨，已成为世界上最大的钢铁生产和消费国家。

18世纪20年代初先后在欧美发生的产业革命极大地促进了钢铁工业、煤化学工业和石油化学工业的快速发展。各类新材料不断涌现，材料对科学技术的发展发挥着关键性作用。以航空工业为例，1903年世界上第一架飞机所用的主要结构材料是木材和帆布，飞行速度每小时仅16 km。1911年硬铝合金研制成功，金属结构取代木布结构，使飞机性能和速度获得一个飞跃；喷气式飞机超过音速，高温合金材料对制造涡轮发动机起到重要作用；当飞机速度在2~3倍音速时，飞机表面温度会升到300℃，飞机材料只能采用不锈钢或钛合金；至于航天飞机机体表面温度会高达1 000℃以上，只能采用高温合金材料及防氧化涂层。目前，玻璃纤维增强塑料、碳纤维高温陶瓷复合材料、陶瓷纤维增强塑料等复合材料在飞机、航天飞行器上已获得广泛应用。

1.2 工程材料的分类及发展趋势

在生活、生产和科技各个领域，用于制造结构、机器、工具和功能器件的各类材料统称为工程材料。工程材料按其组成特点可分为金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料及复合材料四大类。若按材料的使用性能可分为结构材料与功能材料两大类。结构材料是作为承力结构使用的材料，其使用性能主要是力学性能；功能材料的使用性能主要是光、电、磁、热、声等特殊功能性能。按应用领域材料又可分为信息材料、能源材料、建筑材料、机械工程材料、生物材料、航空航天材料等多种类别。

材料、能源和信息技术是现代文明的三大支柱。从现代科学技术发展史中可以看到，每一次重大的新技术发现，往往都有赖于新材料的发展。所谓新材料，主要是指最近发展或正在发展的具有比传统材料更优异性能的一类材料。目前世界上传统材料已有几十万种，同时新材料的品种正以每年大约 5% 的速度增长。工程材料的新发展给社会生产和人们生活带来巨大的变化。

金属材料的分类如表 1.2.1 所示。由于金属材料工业已形成了庞大的生产能力，并且质量稳定，性能价格比具有一定的优势，所以金属材料仍占据材料工业的主导地位。目前，金属材料不断推陈出新，许多新兴金属材料应运而生。例如，传统的钢铁材料正在不断提高质量、降低成本、扩大品种规格，在冶炼、浇铸、加工和热处理等工艺上不断革新；在非铁金属及合金方面出现了高纯高韧铝合金，先进的镍基高温合金等。此外，还涌现了其它许多新型高性能金属材料，如快速凝固金属非晶和微晶材料、纳米金属材料、超导材料和单晶合金等。新型金属功能材料，如形状记忆合金、超细金属隐身材料及活性生物医用材料等也正在向着高功能化和多功能化发展。

表 1.2.1 金属材料分类

		灰铸铁
	一般性能铸铁	球墨铸铁
		可锻铸铁
	铸铁	蠕墨铸铁
		耐磨铸铁
	特殊性能铸铁	耐热铸铁
		耐蚀铸铁
		普通质量碳素结构钢
钢铁		优质碳素结构钢
材料	非合金钢	碳素工具钢
		易切削碳素结构钢
		低合金高强度结构钢
	低合金钢	低合金耐候钢
	钢	各类低合金专业用钢
		合金结构钢
		合金弹簧钢
		滚动轴承钢
合金	合金钢	超高强度钢
		合金工具钢
		高速工具钢
		特殊性能钢
	铜及铜合金	
	铝及铝合金	
非铁	钛及钛合金	
金属	锌及锌合金	
材料	轴承合金	
	其它金属及合金	

无机非金属材料分类如表 1.2.2 所示。由于制备技术的进步，开发出了一批先进陶瓷材料，包括氮化硅、氧化铝等新结构陶瓷材料，其强度和断裂韧度大大优于普通的硅酸盐陶瓷材料，用作高温结构件、耐磨耐腐蚀部件、切削刀具等替代金属材料有明显优点。功能陶瓷是一类利用材料的电、磁、声、光、热、弹性等效应以实现某种功能的陶瓷，是现代信息、自动化等工业的基础材料。从传统的硅酸盐陶瓷到先进陶瓷是陶瓷材料发展史上的重大飞跃。

表 1.2.2 无机非金属材料的分类

		普通陶瓷	
		水泥和混凝土	
	硅酸盐材料	搪瓷、玻璃	
无机非金属材料		硅质砖	
		耐火材料	
		结构陶瓷	
	先进陶瓷材料		功能陶瓷
			陶瓷刀具
			生物陶瓷
		晶体材料	

有机高分子材料包括塑料、橡胶、合成纤维、胶粘剂、液晶、木材、油脂和涂料等。人们将那些力学性能好，可以代替金属材料使用的塑料称为工程塑料。由于石油化学工业大规模合成技术的迅速发展，高分子合成材料包括合成纤维、合成橡胶和塑料成为国家建设和人民生活中必不可少的重要材料。近十年来，随着高压聚合工艺的进步，高分子材料的合成，高性能的合成纤维和工程塑料已进入实用阶段。另一方面，人们还可以通过各种手段，使高分子化合物作为物理功能高分子材料、化学功能高分子材料或生物功能高分子材料，如导电高分子、光功能高分子、液晶高分子、信息高分子材料，人工骨材料等。

金属、陶瓷和有机高分子材料各有其固有的优点和缺点，而复合材料是由几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料，它既能保留原组成材料的主要特色，又能通过复合效应获得原组分所不具备的性能，还可以通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联，从而获得新的优越性能。结构复合材料由能承受载荷的增强体与能连接增强体为整体材料的基体构成，由不同的增强体和不同的基体即可构成名目繁多的结构复合材料，如高聚物(如玻璃钢)

重要趋势。复合材料的分类如表 1.2.3 所示。

表 1.2.3 复合材料的分类

		高聚物
		金属基复合材料
	结构复合材料	陶瓷基复合材料
		碳/碳复合材料
		水泥基复合材料
	
复合材料		导电功能复合材料
		导磁功能复合材料
	功能复合材料	换能功能复合材料
		阻尼功能复合材料
		屏蔽功能复合材料
	

1.3 机械制造过程及材料成形技术发展趋势

1.3.1 机械制造工艺流程

机械制造工艺是指将各种原材料、半成品加工成为产品的方法和过程。机械生产过程按其功能不同主要分为两类。一类是直接改变工件的形状、尺寸、性能，以及决定零件相互位置关系的加工过程，如毛坯制造、机械加工、热处理、表面保护、装配等，以材料成形工艺技术为主，它们直接创造附加价值；另一类是搬运、贮存、检验、包装等辅助生产过程，它们间接创造附加价值。机械制造工艺流程如图 1.3.1 所示。

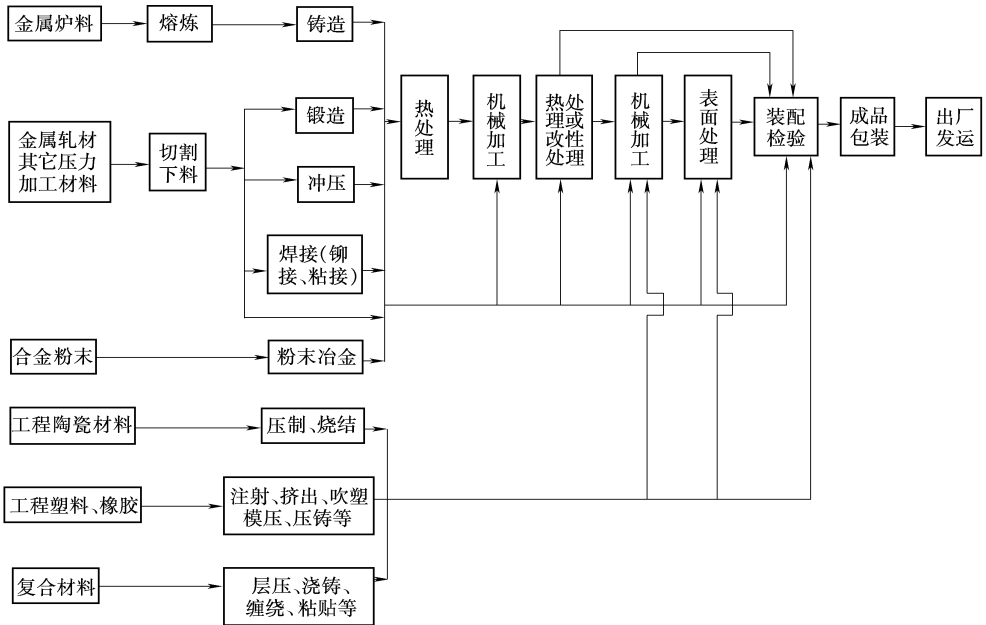


图 1.3.1 机械制造工艺流程图

机械工业生产的原材料主要是以钢铁为主的金属结构材料，包括由冶金工厂直接供应的棒、板、管、线材、型材，供进行切割、焊接、冲压、锻造或下料后直接进行机械加工；也包括生铁、废钢、铝锭、电解铜板等材料，进行二次熔化和加工。随着工程材料结构的不断调整，各种特种合金、金属粉末、工程塑料、复合材料和工程陶瓷材料的应用比例也不断扩大。

金属毛坯和零件的成形一般有铸造、锻造、冲压、焊接和轧材下料等五种常用方法（下料又常用作锻压和焊接的准备工序）的特殊成形方法。

零件的机械加工指采用切削、磨削和特种加工等方法，逐步改变毛坯的形状、尺寸及表面质量，使其成为合格零件的过程。根据加工余量的大小及所能达到的精度，一般分粗加工和精加工两种。

金属材料的热处理可分为预备热处理和最终热处理。前者一般在毛坯成形后粗加工前进行；后者一般在粗加工后精加工前进行。部分热处理工艺为表面保护的具体措施。

材料电镀、转化膜、气相沉积、热喷涂、涂装等表面处理工艺，一般在零件精加工后装配前进行，用以改变零件表面的力学性能及物理化学性能，使其具有符合要求的强韧性、耐磨性、耐蚀性及其它特种性能。

在加工工艺过程中，有大量主体工序

(型原砂、焊条、切削液等)

在机械制造生产过程中，各种物料

运和贮存，材料产品和工艺过程的检测和质量监控，生产过程中各种信息的传递和控制都是贯穿于整个机械制造工艺过程的，是保证生产工艺过程的正确实施、提高产品质量稳定性和提高经济效益的重要环节。

1.3.2 材料成形工艺的技术进展

铸造、锻压、焊接、热处理、机械加工等常规成形工艺至今仍是量大面广、经济适用的技术，因而常规工艺的不断改进、提高具有很大的技术经济意义。通过改进工艺设备、采用新型工艺材料、完善检测控制系统、改善工艺条件、优化工艺及其参数等途径，实现高效化、精密化、强化化、轻量化，以形成优质、高效、低耗等先进适用工艺。如以气体保护自动焊或埋弧自动焊取代手工焊条焊接，以涂层刀具、超硬刀具、机夹刀具代替普通刀具，以数控加工代替普通机床加工等。常规工艺经过优化后，能够扩展原有的工艺效果，使得诸如下料和加工、毛坯制造和零件加工、粗加工和精加工、冷加工和热加工、成形与改性等工艺，在界限上趋于淡化，在功能上趋于交叉。如精密冲裁、精密切割的功能不止限于下料，一直扩展至粗加工甚至部分精加工领域。无余量精密制造、接近最终形状的精密塑性成形等基本可取代粗加工，甚至可以做到直接装配。常规工艺的不断优化，取得了非常明显的技术经济效果。

近些年来，机械产品更新换代的速度不断加快，对制造工艺提出了更高更新的要求；新能源、新材料、微电子、计算机等高新技术的不断引入，为新型加工方法的出现提供了技术储备。因此，机械制造新型成形加工方法不断出现和发展。新型材料的出现使传统的铸、锻、焊、热、切削加工工艺的技术构成逐渐发生变化。新型材料的应用也导致某些崭新加工技术的产生，如加工超塑性材料的超塑成形、加工陶瓷材料的热等静压、沉积 TiN、人造金刚石等超硬薄膜用的气相沉积。激光、电子束、离子束、等离子体、超声波、高压水射流等新能源或能源载体的引入，形成了多种崭新的特种加工及高密度能切割、焊接、熔炼、锻压、热处理、表面保护等加工工艺。激光、等离子、高压水射流切割技术与数控技术相结合使加工精度、切口质量和生产效率大幅度提高。

随着机械加工精度不断提高，出现了精密加工和超精密加工，其主要方式有超精密切削，

超精密磨削与磨料加工。制造超大规模集成电路、光电器件等的基本加工工艺是微细加工，它不仅加工精度极高，而且加工尺寸十分微小。微细加工的发展还导致一门崭新的学科——微机械的产生。应用微机械技术可制造出显微量级尺寸的机械器件，如微型传感器、静电驱动的微型马达、微型齿轮、微型轴承、微型机械手、微型机器人等。

将两种以上加工方法复合应用

削、液态模锻
方法。

计算机数值模拟技术和计算机辅助工艺设计

始得到广泛应用。材料成形及处理各生产环节采用高效专用设备和先进工艺，普遍实现了工艺专业化和机械生产自动化。微电子、计算机、自动化技术与工艺及设备相结合，形成了从单机到系统、从刚性到柔性、从简单到复杂等不同档次的多种自动控制加工技术，使传统工艺面貌发生显著、本质的变化。应用新型传感器、无损检测等工艺过程自动监控技术及可编程控制器、微机等新型控制装置实现系统的自适应控制和自动化控制。适应产品更新换代周期短、品种规格多样化的需要，高效柔性加工系统获得较快发展。计算机集成制造系统
计算机技术，将产品设计、制造工艺
机整体，实现机械制造过程高度自动化，极大地提高了劳动生产率和社会经济效益。

1.4 课程总体目标和任务

工程材料与成形工艺基础是研究与应用机械零件常用材料和材料成形工艺方法的一门综合性技术基础课。从事工业工程第一线的生产、技术、管理等工作的人员，尤其是机械类专业人员必须具备与此相关的知识与能力。本课程理论与实训、实验相互融合，强调学生技术应用能力的培养，是高等职业院校机械类专业必修的课程。

通过本课程的学习使学生获得常用工程材料及其成形工艺方法的基础知识，建立对材料成分、组织结构、性能、加工使用相互之间关系与规律的认识，掌握常用工程材料的种类、成分、组织、性能、改性方法和用途，具有选用常用工程材料和改变材料性能方法的初步能力；掌握常用材料成形工艺方法与工艺操作的基本知识，建立质量与经济观念，通过实训具有简单零件成形加工的实践操作能力；具有综合运用工艺知识，选择毛坯种类、成形方法及工艺分析的初步能力，为学习其它有关课程和从事工业工程第一线生产、技术及管理工作奠定必要的基础。

本课程具有覆盖知识面宽、综合性强、技术含量高、实用性强等特点。学习中要注意归纳、总结，要注意理论联系实际，结合实验、实训和生产实践，开拓思路，增长能力。

通过本书的学习，相信您会对本章前面提出的问题获得正确、内行的回答。

思考题与习题

1.1 查找资料，了解

么不同的铜锡配比会反映出截然不同的性能？

- 1.2 试举出一个你所了解的反映我国在材料或成形工艺技术方面成就的例子。
- 1.3 为什么说钢铁材料是机械制造业的支柱？
- 1.4 请举出你身边 10 个不同种类工程材料的应用实例。
- 1.5 以自行车大链轮为例，试分析其加工工艺过程。
- 1.6 说明工程材料与材料成形工艺技术在机械制造过程中的地位和作用。

第2章 工程材料的性能

问一问，想一想：如果选择能够做铁锤的材料，您可能选择较硬的金属，而如果选择绑扎物件的一般铁丝，您就可能选择较软的金属。材料性能是选择材料的基本依据。那么如何科学地评价材料性能呢？

学习目标

1. 重点了解工程材料的常用力学性能；
2. 了解工程材料的物理、化学及工艺性能并建立材料性能的技术经济概念。

各种材料，按其性能的不同，可以用于结构、机件、工具或物理功能器件等。工程技术人员选用材料时首先要掌握材料的使用性能，同时要考虑材料的工艺性能和经济性。使用性能是材料在使用过程中表现出来的性能，主要有力学性能、物理性能与化学性能。工艺性能是指材料在各种加工过程中表现出来的性能，比如铸造、锻造、焊接、热处理和切削加工等性能。当然还要关注经济性能，要力求材料选用的总成本为最低。在机械行业选用材料时，一般以力学性能作为主要依据。

2.1 材料的力学性能

材料常用的力学性能指标有强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳极限等。

2.1.1 强度和塑性

材料的强度与塑性是极为重要的力学性能指标，采用拉伸试验方法测定。所谓拉伸试验是指用静拉伸力对标准拉伸试样进行缓慢的轴向拉伸，直至拉断的一种试验方法。在拉伸试验中和拉伸试验后可测量力的变化与相应的伸长，从而测出材料的强度与塑性。

试验前，将材料制成一定形状和尺寸的标准拉伸试样
的圆形标准拉伸试样，试样的直径为 d_0 ，标距的长度为 L_0 。将试样装夹在拉伸试验机上，缓慢增加试验力，试样标距的长度将逐渐增加，直至拉断。若将试样从开始加载直到断裂前所受的拉力 F ，与其所对应的试样标距长度 L_0 的伸长量 L 绘成曲线，便得到拉伸曲线。图 2.1.2 为退火低碳钢的拉伸曲线。用试样原始截面积 S_0 去除拉力 F 得到应力 σ ，以试样原始标距 L_0 去

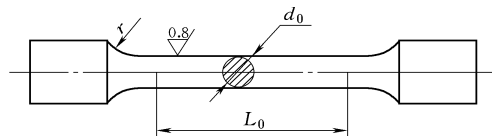


图 2.1.1 标准拉伸试样

除绝对伸长 L 得到应变 ϵ ，即 $\epsilon = F/S_0$ ， $\epsilon = L/L_0$ ，则力 - 伸长($F - L$)力应变 -)曲线。

曲线表示了这样一个变形过程。曲线的 Oe 段近乎一条直线，表示受力不大时试样处于弹性变形阶段，若卸除试验力，试样能完全恢复到原来的形状和尺寸，其中在 O_p 阶段应力与应变呈正比关系即符合胡克定律。当拉伸力继续增加时，试样将产生塑性变形，并且在 s 点附近曲线上出现平台或锯齿状线段，这时应力不增加或只有微小增加，试样却继续伸长，称为屈服。屈服后曲线又呈上升趋势，表示试样恢复了抵抗拉伸力的能力。 b 点表示试样抵抗拉伸力的最大能力。这时试样上的某处截面积开始减小，形成缩颈。随后，试样承受拉伸力的能力迅速减小，直至断裂 k 点)

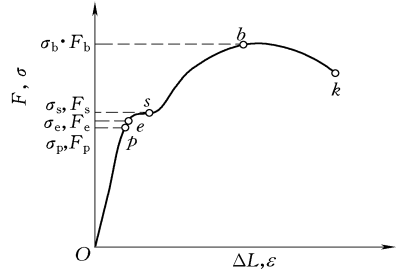


图 2.1.2 低碳钢的拉伸曲线

1. 强度

强度是材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。工程上常用的静拉伸强度判据有弹性极限、屈服点和抗拉强度等。

在弹性阶段内，卸力后而不产生塑性变形的最大应力为材料的弹性伸长应力，通常称为弹性极限，以 σ_e 表示：

$$\sigma_e = F_e / S_0$$

式中： F_e 为试样产生完全弹性变形时的最大拉伸力，N； S_0 为试样原始横截面积， mm^2 。

应力的单位通常用 MPa 表示， $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$ 。

材料在弹性范围内应力与应变成正比，其比值 $E = \sigma / \epsilon$ ，称为弹性模量，标志着材料抵抗弹性变形的能力，用以表示材料的刚度。由于难以用试验直接测定弹性极限和比例极限(胡克定律的最大应力)代之。

在拉伸过程中力不增加(曾称屈服极限) σ_s 表示：

$$\sigma_s = F_s / S_0$$

式中： F_s 为材料屈服时的最小拉伸力，N。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。由于大多数合金没有明显的屈服现象，因此提出“规定残余伸长应力”作为相应的强度指标。国家标准规定：当试样卸除拉伸力后，其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分比时的应力，作为规定残余伸长应力 $\sigma_{0.2}$ 表示规定残余伸长率为 0.2% 时的应力。

拉伸过程中最大力 F_b 所对应的应力称为抗拉强度

$$\sigma_b = F_b / S_0$$

抗拉强度表征材料对最大均匀变形的抗力，是材料在拉伸条件下所能承受最大力的应力值，它是设计和选材的主要依据之一。

2. 塑性

断裂前材料发生不可逆永久变形的能力叫塑性。常用的塑性判据是材料断裂时的最大相对塑性变形，如拉伸时的断后伸长率和断面收缩率。

试样拉断后，标距的伸长量与原始标距的百分比称为断后伸长率，以 δ 表示：

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中： L_1 为试样拉断后的标距，mm； L_0 为试样原始标距，mm。

试样拉断后，缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率，以 ψ 表示。其数值按下式计算：

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中： S_0 为试样的原始截面积， mm^2 ； S_1 为试样断裂后缩颈处的最小横截面积， mm^2 。

或 数值越大，则材料的塑性越好。

2.1.2 硬度

硬度是指金属表面一个小的或很小的体积内抵抗弹性变形、塑性变形或抵抗破裂的一种能力，在一定程度上反映了材料的综合力学性能指标。硬度能够反映出金属材料在化学成分、金相组织和热处理状态上的差异，是检验产品质量、确定合理的加工工艺所不可缺少的检测性能之一。同时硬度试验也是金属力学性能试验中最简便、最迅速的一种方法。

硬度试验方法很多，机械制造生产中应用最广泛的方法是布氏硬度试验法和洛氏硬度试验法。

1. 布氏硬度

布氏硬度的测定原理如图 2.1.3 所示。它是用一定大小的试验力 F (N) 的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面，保持规定时间后卸除试验力，测出压痕平均直径 d (mm)

从已备好的布氏硬度表中查出 HB 值。

$$HBS(HBW) = 0.102 \frac{F}{Dh} = 0.102 \frac{2F}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}$$

由于金属材料有硬有软，被测工件有厚有薄，有大有小，如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D ，就会出现对某些材料和工件不适应的现象。对同一种材料采用不同的 F 和 D 进行试验时，能否得到相同的布氏硬度值，关键在于压痕几何形状的相似性，即应建立 F 和 D 的某种选配关系，以保证布

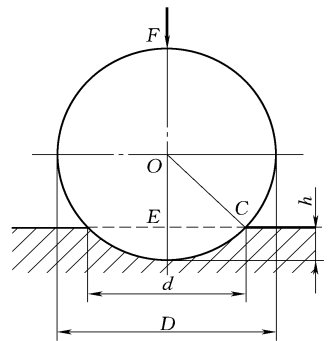


图 2.1.3 布氏硬度试验原理示意图

氏硬度的不变性。

国家标准

F/D^2 的比值为 30、10、2.5 三

种。根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同，按照表 2.1.1 的规范选择试验压头直径 D 、试验力 F 及保持时间。

表 2.1.1 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度使用范围	球直径 D/mm	$0.102 F/D^2$ 值	试验力 F/N	试验力保持时间/s	注
钢、铸铁	140 HBS	10	30	29 420	10	试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍 中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍。 少应为压痕深度的 10 倍。试验后，试样支撑面应无可见变形痕迹
		5		7 355		
		2.5		1 839		
	< 140 HBS	10	10	9 807	10~15	
		5		2 452		
		2.5		613		
非铁金属材料	130 HBS	10	30	29 420	30	
		5		7 355		
		2.5		1 839		
	35~130 HBS	10	10	9 807	30	
		5		2 452		
		2.5		613		
	< 35 HBS	10	2.5	2 452	60	
		5		613		
		2.5		153		

淬火钢球作压头测得的硬度值以符号 HBS 表示，用硬质合金球作压头测得的硬度值以符号 HBW 表示。符号 HBS 和 HBW 之前的数字为硬度值，符号后面依次用相应数值注明压头球体直径

表示用直径 5 mm 硬质合金球在 7 355 N 试验力作用下保持 10~15 s 测得的布氏硬度值为 500；120 HBS10/1 000/30 表示用直径 10 mm 的钢球压头在 9 807 N 试验力作用下保持 30 s 测得的布氏硬度值为 120。

目前，布氏硬度试验法主要用于铸铁、非铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材的硬度测定。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的性能试验方法，它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。

洛氏硬度试验原理如图 2.1.4 所示。它是用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588 mm 作压头，先施加初试验力 F_1 (98 N) 其总试验力为 $F = F_1 + F_2$ 。图中 0—0 为压头没有与试样接

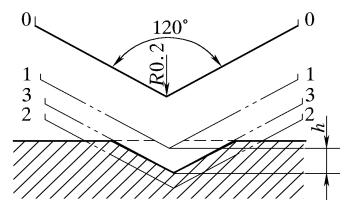


图 2.1.4 洛氏硬度实验原理示意图

触时的位置；1—1 为压头受到初试验力 F_1 后压入试样的位置；2—2 为压头受到总试验力 F 后压入试样的位置；经规定的保持时间，卸除主试验力 F_2 ，仍保留初试验力 F_1 ，试样弹性变形的恢复使压头上升到 3—3 的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为 h ，即 1—1 位置至 3—3 位置的距离。金属越硬， h 值越小。一般洛氏硬度机不需直接测量压痕深度，硬度值可由刻度盘上的指针指示出来。

为了能用一种硬度计测定从软到硬的材料硬度，采用了不同的压头和总负荷组成几种不同的洛氏硬度标度，每一个标度用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后加以注明。我国常用的是 HRA、HRB、HRC 三种，试验条件为硬度符号前面注明硬度数值，例如 52 HRC、70 HRA 等。

表 2.1.2 常用的三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总试验力 F/kN	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	0.588 4	70 ~ 85 HRA	硬质合金，表面淬硬层，渗碳层
HRB	1.588 mm 钢球	0.980 7	25 ~ 100 HRB	非铁金属，退火、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥体	1.471 1	20 ~ 67 HRC	淬火钢，调质钢等

注：总试验力 = 初始试验力 + 主试验力；初始试验力全为 98 N。

洛氏硬度 HRC 可以用于硬度很高的材料，操作简便迅速，而且压痕很小，几乎不损伤工件表面，故在钢件热处理质量检查中应用最多。但由于压痕小，硬度值代表性差些。如果材料有偏析或组织不均匀的情况，则所测硬度值的重复性较低，故需在试样不同部位测定三点，取其算术平均值。

2.1.3 冲击韧度

机械零部件在使用过程中不仅受到静载荷或变动载荷作用，而且还会受到不同程度的冲击载荷作用，如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计 and 制造受冲击载荷的零件和工具时，还必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧度。

目前最常用的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验，其试验原理如图 2.1.5 所示。

将待测定的材料先加工成标准试样，然后放在试验机的机架上，试样缺口背向摆锤冲击方向

W 的摆锤举至一定高度 H_1 ，使其具有势能 WH_1)

下冲击试样；试样断裂后摆锤上摆到 H_2 高度，在忽略摩擦和阻尼等条件下，摆锤冲断试样所做的功，称为冲击吸收功，以 A_k 表示，则有

$$A_k = WH_1 - WH_2 = W(H_1 - H_2)$$

用试样的断口处截面积 S_N 去除 A_k 即得到冲击韧度，用 a_k 表示，单位为 J/cm^2

$$a_k = \frac{A_k}{S_N}$$

对一般常用钢材来说，所测冲击吸收功 A_k 越大，材料的韧性越好。试验还表明，冲击韧度值 a_k 随温度的降低而减小，在某一温度范围时材料的 a_k 值急剧下降。材料由韧性状态向脆性状态转变的温度称为韧脆转变温度。

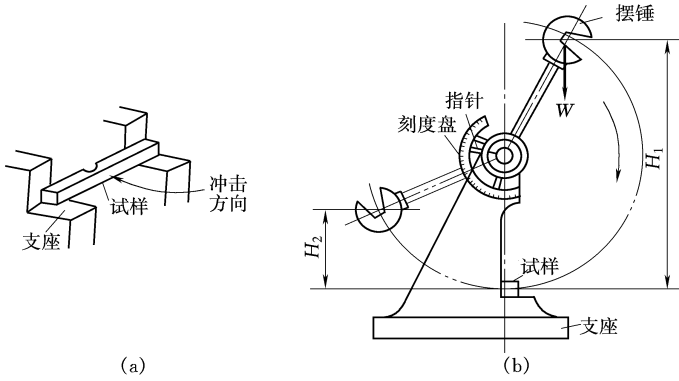


图 2.1.5 冲击试验原理图

2.1.4 疲劳极限

许多机械零件

时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。材料在循环应力和应变作用下，在一处或几处产生局部永久性累积损伤，经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程称为材料的疲劳。

疲劳失效与静载荷下的失效不同，断裂前没有明显的塑性变形，发生断裂也较突然。这种断裂具有很大的危险性，常常造成严重的事故。据统计，大部分机械零件的失效是由金属疲劳造成的。

在交变载荷下，金属材料承受的交变应力（裂时应力循环次数 N ）

2.1.6 所示。金属材料承受的最大交变应力 越大，则断裂时应力循环的次数 N 越小，反之， 越小则 N 越大。当应力低于某值时，应力循环到无数次也不会发生疲劳断裂，此应力值称为材料的疲劳极限。常用钢铁材料的疲劳曲线

上没有水平部分，在这种情况下，规定某一循环次数 N_0 断裂时所对应的应力作为疲劳极限。

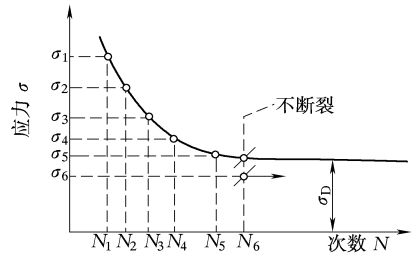


图 2.1.6 疲劳曲线示意图

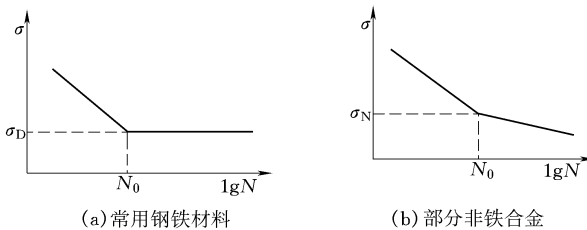


图 2.1.7 两种类型疲劳曲线

通常材料疲劳性能的测定是在旋转弯曲疲劳实验机上进行的，对称弯曲疲劳极限用 σ_{-1} 表示。

除正常条件下的疲劳问题以外，特殊条件下的疲劳问题，如腐蚀疲劳、接触疲劳、高温疲劳、热疲劳等也值得高度重视。疲劳断裂通常在机件最薄弱的部位或缺陷所造成的应力集中处发生。为了提高机件的疲劳抗力，防止疲劳断裂事故的发生，在进行机件设计和成形加工时，应选择合理的结构形状，防止表面损伤，避免应力集中。

2.2 材料的物理性能

材料的物理性能表示的是材料固有的一些属性，如密度、熔点、热膨胀性、磁性、导电性与导热性等。

1. 密度

材料的密度是指单位体积中材料的质量。不同材料的密度各不相同，如钢为 7.8 g/cm^3 左右；陶瓷的密度为 $2.2 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ ；各种塑料的密度更小。材料的密度直接关系到产品的重量和效能。如发动机的活塞，常采用密度小的铝合金制造。常用金属材料的密度见表 2.2.1。一般将密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为轻金属，密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为重金属。

表 2.2.1 常用金属的物理性能

金属名称	符号	密度 / (kg/m^3) ³ (20)	熔点/ ()	热导率 / W/ ()	线胀系数 α_l / (0~100) $\text{K}^{-1} \times 10^{-6}$	电阻率 / ($\cdot\text{m}$) ⁻⁸ (0)
银	Ag	10.49	960.8	418.6	19.7	1.5
铝	Al	2.698 4	660.1	221.9	23.6	2.655
铜	Cu	8.96	1 083	398.5	17.0	1.67~1.68
铬	Cr	7.19	1 903	67	6.2	12.9
铁	Fe	7.84	1 538	75.4	11.76	9.7
镁	Mg	1.74	650	153.7	24.3	4.47
锰	Mn	7.43	1 244	4.98	37	185
镍	Ni	8.90	1 453	92.1	13.4	6.84
钛	Ti	4.508	1 677	15.1	8.2	42.1~47.8
锡	Sn	7.298	231.91	62.8	2.3	11.5
钨	W	19.3	3 380	166.2	4.6	5.1

抗拉强度 σ_b 与密度 ρ 之比称为比强度；弹性模量 E 与密度 ρ 之比称为比弹性模量。这两者也是考虑某些零件材料性能的重要指标。

2. 熔点

熔点是指材料的熔化温度。金属都有固定的熔点，常用金属的熔点见表 2.2.1。陶瓷的熔点一般都显著高于金属及合金的熔点，而高分子材料一般不是完全晶体，所以没有固定的熔点。合金的熔点决定于它的化学成分，其对于金属与合金的冶炼、铸造和焊接等是一个重要的工艺参数。熔点高的金属称为难熔金属。

机、航空航天等领域有广泛的应用。熔点低的金属称为易熔金属保险丝、防火安全阀等零件。

3. 热膨胀性

材料的热膨胀性通常用线胀系数表示。常用金属的线胀系数见表 2.2.1。对精密仪器或机器的零件，线胀系数是一个非常重要的性能指标。在异种金属焊接中，常因材料的热膨胀性相差过大而使焊件变形或破坏。一般地，陶瓷的线胀系数最低，金属次之，高分子材料最高。

4. 磁性

材料能导磁的性能叫磁性。磁性材料中又分为容易磁化、导磁性良好，但外磁场去掉后磁性基本消失的软磁性材料

硬磁性材料

许多金属

5. 导热性

材料的导热性用热导率 来表示。材料的热导率越大，说明导热性越好。一般来说，金属越纯，其导热能力越强，金属的导热能力以银为最好，铜、铝次之。常用金属的热导率见表 2.2.1。金属及合金的热导率远高于非金属材料。导热性是金属材料的重要性能之一。导热性好的材料其散热性也好，可用来制造热交换器等传热设备的零部件。在制订各类热加工工艺时，也必须考虑材料的导热性，以防止材料在加热或冷却过程中，由于表面和内部产生温差，膨胀不同形成过大的内应力，引起材料变形或开裂。

6. 导电性

材料的导电性一般用电阻率 表示。通常金属的电阻率随温度升高而增加，而非金属材料则与此相反。金属一般具有良好的导电性，银的导电性最好，铜、铝次之。导电性与导热性一样，是随合金成分的复杂化而降低的，因而纯金属的导电性总比合金要好。常用金属的电阻率见表 2.2.1。高分子材料都是绝缘体，但有的高分子复合材料也有良好的导电性。陶瓷材料虽然也是良好的绝缘体，但某些特殊成分的陶瓷却是有一定导电性的半导体。

2.3 材料的化学性能

材料在机械制造中，不但要满足力学性能、物理性能的要求，同时也要求具有一定的化学性能。尤其是要求耐腐蚀、耐高温的机械零件，更应重视其化学性能。

材料的化学性能是指材料在室温或高温下抵抗各种化学介质作用的能力，一般包括耐腐蚀性与高温抗氧化性等。所谓高温抗氧化并不是指高温下材料完全不被氧化，而是指材料在迅速氧化后，能在表面形成一层连续、致密并与基体结合牢固的钝化膜，从而阻止了材料的进一步氧化。总的来说，非金属材料的耐腐蚀性远高于金属材料。

在当前的机械行业中，金属材料仍占主导地位，金属的腐蚀既容易造成一些隐蔽性和突发性的严重事故，也损失了大量的金属材料。据有关资料介绍，全世界每年由于腐蚀而报废的金属设备和材料，约相当于全年金属产量的 1/3。除此之外，因腐蚀而需要进行检修的费用，采取各种防腐措施的费用以及设备因腐蚀而停工减产的损失等就更为可观。因此，充分重视并认真研究金属腐蚀问题，采取合理有效的措施防止或减少腐蚀的发生，具有重要的实际意义。

2.3.1 金属腐蚀的基本过程

根据金属腐蚀过程的不同特点，金属腐蚀可分为化学腐蚀和电化学腐蚀两类。

1. 化学腐蚀

金属与周围介质

在干燥的气体或不导电的流体

等相接触时，在金属表面上生成相应的化合物，如氧化物、硫化物、氯化物等，从而使金属零件因腐蚀而损坏。氧化是最常见的化学腐蚀，形成的氧化膜通过扩散逐渐加厚。温度越高，高温下加热时间越长，氧化损耗越严重。如果能形成致密的氧化膜防护作用，能有效地阻止氧化继续向金属内部发展。在实际生产中，单纯地由化学腐蚀引起的金属损耗较少，更多的是电化学腐蚀。

H_2S 、 SO_2

2. 电化学腐蚀

金属与电解质溶液

电极电位低的部分遭到腐蚀，并伴随电流的产生。如金属在海水中发生的腐蚀、地下金属管道在土壤中的腐蚀等均属于电化学腐蚀。金属的腐蚀绝大多数是由电化学腐蚀引起的，电化学腐蚀比化学腐蚀快得多，危害性也更大。引起电化学腐蚀的因素很多，诸如元素的化学性质、合金的化学成分、合金的组织、金属的温度与应力等都直接影响其抵抗电化学腐蚀的能力。

2.3.2 防止金属腐蚀的途径

为了提高金属的耐腐蚀能力，有以下主要途径：一是形成有保护作用的钝化膜；二是尽可能使金属保持均匀的单相组织，即无电极电位差；三是尽量减少两极之间的电极电位差，并提高阴极的电极电位，以减缓腐蚀速度；四是尽量不与电解质溶液接触，减小甚至隔绝腐蚀电流。

工程上经常采用的防腐蚀方法主要有

盖法防腐蚀，如电镀、热镀、喷镀或采用油漆、搪瓷、涂料、合成树脂等防护；环境，如干燥气体封存；

2.4 材料的工艺性能

工艺性能是指材料在制造机械零件和工具的过程中，采用某种加工方法制成成品的难易程度，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性能等。材料工艺性能的好坏，会直接影响制造零件的工艺方法、质量以及制造成本。

比如切削加工性能就是指材料在切削加工时的难易程度。它与材料种类、成分、硬度、韧性、导热性及内部组织状态等许多因素有关。切削加工性好的材料切削容易，对刀具的磨损小，加工表面也比较光洁。从材料种类而言，铸铁、铜合金、铝合金及一般碳钢的切削加工性较好。

2.5 材料的经济性能

作为一名现代的生产、技术或管理人员仅仅关注材料的力学性能等还是远远不够的，必须

建立材料性能的技术经济概念，力求材料选用的总成本为最低。据有关资料统计，在一般的工业部门中，材料价格要占产品价格的 30% ~ 70%。所以在能满足使用要求的前提下，应尽可能采用廉价的材料并充分考虑材料的可得性，把产品的总成本降至最低，以取得最大的经济效益，使产品在市场上具有较强的竞争力。零件的总成本通常包括材料本身的价格和与生产有关的其它一切费用。

思考题与习题

- 2.1 什么叫做应力？什么叫做应变？低碳钢拉伸应力 - 应变曲线可分为哪几个变形阶段？这些阶段各具有什么明显特征？
- 2.2 由拉伸试验可以得出哪些力学性能指标？在工程上这些指标是怎样定义的？
- 2.3 有一 $d_0 = 10.0 \text{ mm}$ 、 $L_0 = 50 \text{ mm}$ 的低碳钢试样，拉伸试验时测得 $F_s = 20.5 \text{ kN}$ ， $F_b = 31.5 \text{ kN}$ ， $d_1 = 6.25 \text{ mm}$ ， $L_1 = 66 \text{ mm}$ ，试确定此钢材的 σ_s 、 σ_b 、 δ 、 ψ 。
- 2.4 在生产中，冲击试验有何重要作用？什么叫韧脆转变温度？
- 2.5 什么叫疲劳极限？为什么表面强化处理能有效地提高疲劳极限？
- 2.6 结合物理和化学性能，请举出两个例子说明考虑该项性能指标的意义。
- 2.7 产生电化学腐蚀的原因是什么？为什么电化学腐蚀的危害性很大？
- 2.8 结合身边的例子，说明材料选用如何综合考虑材料的各方面性能？

第3章 材料的结构与凝固

问一问，想一想：为什么不同的材料有不同的性能表现呢？其取决于什么？材料的内部组织结构是怎样的？在机械工业中使用最为广泛的铁碳合金成分、组织、性能和用途构成怎样的关系链？

学习目标

1. 了解材料的晶体结构与非晶体结构的结构特点；
2. 了解金属的结晶过程与非金属的形成特点；
3. 重点掌握铁碳相图及其应用，掌握铁碳合金成分、组织、性能、用途之间的关系及变化规律。

工程材料的各种性能，尤其是力学性能，与其微观结构关系密切。物质都是由原子组成的，原子的排列方式和空间分布称为结构。物质由液态转变为固态的过程称为凝固。大多数材料的使用状态是固态，因此，深入地分析和了解材料的固态结构与其形成过程是十分必要的。

固体物质根据其原子排列情况分为两种形式：晶体与非晶体。物质的结构可以通过外界条件加以改变，这种改变为改善材料的性能提供了可能。

3.1 材料的结合方式

3.1.1 结合键

组成物质的质点

为键。结合键对物质的性能有重大影响。通常结合键分为结合力较强的离子键、共价键、金属键和结合力较弱的分子键与氢键。

绝大多数金属元素是以金属键结合的。金属原子结构的特点是外层电子少，容易失去。当金属原子相互靠近时，这些外层电子就脱离原子，成为自由电子，为整个金属所共有，它们在整个金属内部运动，形成电子气。这种由金属正离子和自由电子之间相互作用而结合的方式称金属键。图 3.1.1 是金属键的模型。

根据金属键的结合特点可以解释金属晶体的一般性能。由于自由电子的存在，容易形成电流，显示出良好的导电性；

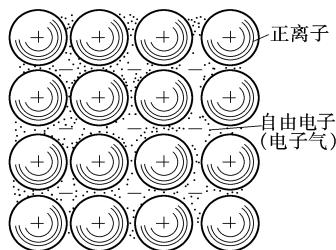


图 3.1.1 金属键模型

自由电子的易动性也使金属有良好的导热性；由于金属原子移动一定位置以后仍然保持金属键，所以具有很好的变形能力；自由电子可以吸收光的能量，因而金属不透明；而所吸收的能量在电子回复到原来状态时产生辐射，使金属具有光泽。

工程上使用的材料有的是单纯一种键，更多的是几种键的结合。金属材料的结合键主要是金属键，也有共价键和离子键

大部分材料以离子键为主。所以陶瓷材料有高的熔点和很高的硬度，但脆性较大。高分子材料又称聚合物，它的结合键是共价键和分子键。由于高分子材料的分子很大，所以分子间的作用力也就很大，因而也具有一定的力学性能。

3.1.2 晶体与非晶体

原子或分子通过结合键结合在一起时，依键性的不同以及原子或分子的大小可在空间组成不同的排列，即形成不同的结构。化学键相同而结构不同时，性能可以有很大差别。原子或分子在空间有秩序地排列形成晶体，无序排列就是非晶体。

1. 晶体

几乎所有的金属、大部分陶瓷以及一些聚合物在其凝固时都要发生结晶，形成原子本身在三维空间按一定几何规律重复排列的有序结构，这种结构称为晶体。晶体具有固定熔点和各向异性等特性。

2. 非晶体

某些工程上常用的材料，包括玻璃、绝大多数的塑料和少数从液态快速冷却下来的金属，还包括人们所熟悉的松香、沥青等，其内部原子无规则地堆垛在一起，这种结构为非晶体。非晶体材料的共同特点是：

3. 晶体与非晶体的转化

非晶体结构从整体上看是无序的，但在有限的小范围内观察，还具有一定的规律性，即是近程有序的；而晶体尽管从整体上看是有序的，但由于有缺陷，在很小的尺寸范围内也存在着无序性。所以两者之间尚有共同特点且可互相转化。物质在不同条件下，既可形成晶体结构，又可形成非晶体结构。如金属液体在高速冷却下可以得到非晶态金属，玻璃经适当热处理可形成晶体玻璃。有些物质，可看成是有序和无序的中间状态，如塑料、液晶等。

3.2 金属材料的结构特点

3.2.1 晶体结构的基本概念

实际晶体中的各类质点(包括离子、电子等)

晶体结构时，常把构成晶体的原子看成是一个个固定的小球，这些原子小球按一定的几何形式在空间紧密堆积，如图3.2.1a所示。

为了便于描述晶体内部原子排列的规律，将每个原子视为一个几何质点，并用一些假想的几何线条将各质点连接起来，便形成一个空间几何格架。这种抽象的用于描述原子在晶体中排

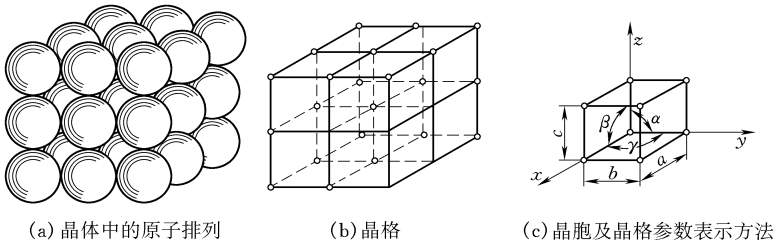


图 3.2.1 简单立方晶格与晶胞示意图

列方式的空间几何格架称为晶格

在晶格内取一个能代表晶格特征的，由最少数目的原子构成的最小结构单元来表示晶格，称为晶胞 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示晶胞的几何形状及尺寸。不难看出，晶格可以由晶胞不断重复堆砌而成。通过对晶胞的研究可找出该种晶体中原子在空间的排列规律。晶格类型不同，就呈现出不同的力学和物理、化学性能。

3.2.2 三种典型的金属晶体结构

在金属晶体中，约有 90% 属于以下三种常见的晶格类型：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

体心立方晶格的晶胞是一个立方体，在立方体的八个角上和晶胞中心各有一个原子，如图 3.2.2 所示。属于这种晶格类型的金属有 Fe 、 Cr 、 W 、 Mo 、 V 、 Nb 等。

图 3.2.2 体心立方晶胞示意图

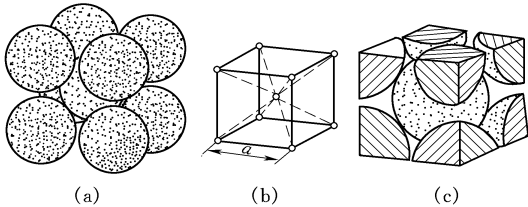


图 3.2.2 体心立方晶胞示意图

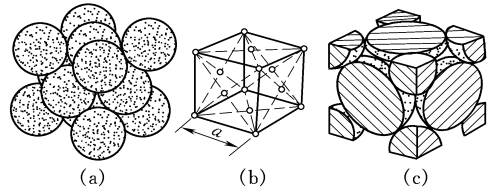


图 3.2.3 面心立方晶胞示意图

面心立方晶格和密排六方晶格示意图如图 3.2.3 和图 3.2.4 所示，属于面心立方晶格类型的金属有 Fe 、 Cu 、 Al 、 Ni 、 Ag 、 Pb 等；属于密排六方晶格类型的金属有 Mg 、 Zn 、 Be 等。

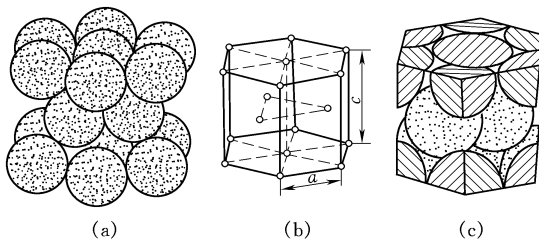


图 3.2.4 密排六方晶胞示意图

3.2.3 实际金属的晶体结构

1. 单晶体和多晶体

如果一块金属晶体，其内部的晶格位向完全一致，称为单晶体。金属的单晶体只能靠特殊的方法制得。实际使用的金属材料都是由许多晶格位向不同的微小晶体组成的，称为多晶体，如图 3.2.5 所示。每个小晶体都相当于一个单晶体，内部的晶格位向是一致的，而小晶体之间的位向却不相同。这种外形呈多面体颗粒状的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。在晶粒内部，实际上也不是理想的规则排列，而是由于结晶或其它加工等条件的影响，存在着大量的晶体缺陷，它们对性能有很大的影响。

2. 晶体缺陷

根据晶体缺陷存在形式的几何特点，通常将它们分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。

点缺陷是指在空间三个方向尺寸都很小的缺陷。最常见的点缺陷是晶格空位和间隙原子。晶格中某个原子脱离了平衡位置，形成了空结点，称为空位。某个晶格间隙中挤进了原子，称为间隙原子，如图 3.2.6 所示。缺陷的出现，破坏了原子间的平衡状态，使晶格发生扭曲，称为晶格畸变。晶格畸变将使晶体性能发生改变，如强度、硬度和电阻增加。

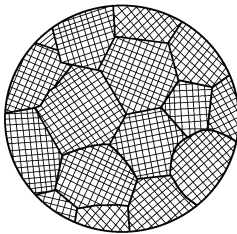


图 3.2.5 多晶体的晶粒与晶界示意图

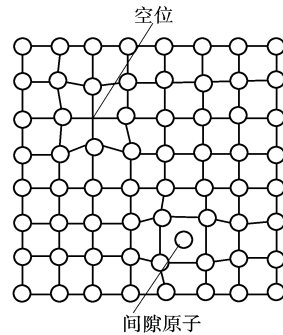


图 3.2.6 晶格点缺陷示意图

此外，空位和间隙原子的运动也是晶体中原子扩散的主要方式之一，这对金属热处理过程是极其重要的。

线缺陷的特征是在晶体空间两个方向上尺寸很小，而第三个方向的尺寸很大。属于这一类的主要是各种类型的位错。

位错是一种很重要的晶体缺陷。它是晶体中一列或数列原子发生有规律错排的现象。图 3.2.7 所示为简单立方晶体中的刃型位错几何模型，在晶体的 ABC 平面以上，多出一个垂直半原子面，这个多余半原子面像刀刃一样垂直切入晶体，使晶体中刃部周围上下的原子产生了错排现象。多余半原子面底边 EF 线)

近，畸变越严重。

123.tif

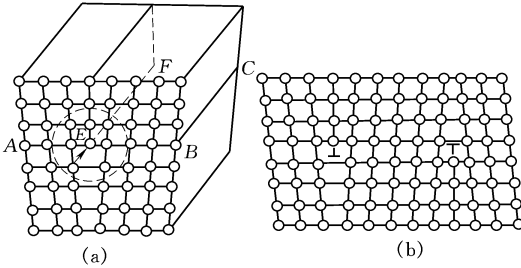


图 3.2.7 刃型位错几何模型

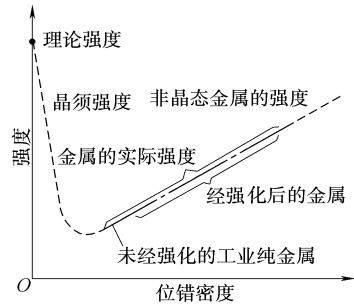


图 3.2.8 金属强度与位错密度的关系

晶体中的位错不是固定不变的。晶体中的原子发生热运动或晶体受外力作用而发生塑性变形时，位错在晶体中能够进行不同形式的运动，致使位错密度及组态发生变化。位错的存在及其密度的变化对金属很多性能会产生重大影响。图 3.2.8 定性表达了金属强度与位错密度之间的关系。图中的理论强度是根据原子结合力计算出的理想晶体的强度值。如果用特殊方法制成几乎不含位错的晶须，其强度接近理论计算值。一般金属的强度由于位错的存在较理论值约低两个数量级，此时金属易于进行塑性变形。但随着位错密度的增加，位错之间的相互作用和制约使位错运动变得困难起来，金属的强度会逐步提高。当缺陷增至趋近百分之百时，金属将失去规则排列的特征，而成为非晶态金属，这时金属也显示出很高的强度。可见，增加或降低位错密度都能有效提高金属的强度。目前生产中一般是采用增加位错密度的方法

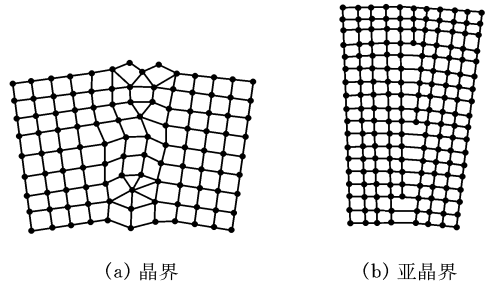


图 3.2.9 面缺陷示意图

面缺陷特征是在一个方向上尺寸很小，而另两个方向上尺寸很大，主要指晶界和亚晶界。

晶界处的原子排列与晶内是不同的，要同时受到其两侧晶粒不同位向的综合影响，所以晶界处原子排列是不规则的，是从一种取向到另一种取向的过渡状态部，还可能存在许多更细小的晶块，它们之间晶格位向差很小，通常小于 $2^\circ \sim 3^\circ$ ，这些小晶块称为亚晶。亚晶粒之间的界面称为亚晶界

由于晶界处原子排列不规则，偏离平衡位置，因而使晶界处能量较晶粒内部要高，引起晶界的性能与晶粒内部不同。例如，晶界比晶内易受腐蚀、熔点低，晶界对塑性变形有阻碍作用等。在常温下，晶界处不易产生塑性变形，故晶界处硬度和强度均较晶内高。晶粒越细小，晶界亦越多，则金属的强度和硬度亦越高。

3.2.4 合金的晶体结构

由于纯金属的力学性能较低，所以工程上应用最广泛的是各种合金。合金是由两种或两种

以上的金属元素，或金属和非金属元素组成的具有金属性质的物质。如黄铜是铜和锌的合金，钢是铁和碳等的合金。对合金而言，其结构及影响性能的因素更为复杂。下面以合金中的基本相为重点介绍合金的结构。

组成合金的最基本的独立物质称为组元。组元可以是金属元素、非金属元素和稳定的化合物。根据组元数的多少，可分为二元合金、三元合金等。

所谓相是金属或合金中具有相同成分、相同结构并以界面相互分开的各个均匀组成部分。若合金是由成分、结构都相同的同一种晶粒构成的，则各晶粒虽有界面分开，却属于同一种相；若合金是由成分、结构互不相同的几种晶粒所构成，它们将属于不同的几种相。金属与合金的一种相在一定条件下可以变为另一种相，叫做相变。例如纯铜在熔点温度以上或以下，分别为液相或固相，而在熔点温度时则为液、固两相共存。

用金相观察方法，在金属及合金内部看到的组成相的种类、大小、形状、数量、分布及相间结合状态称为组织。只有一种相组成的组织为单相组织；由两种或两种以上相组成的组织为多相组织。

合金的基本相结构可分为固溶体和金属化合物两大类。

1. 固溶体

溶质原子溶入溶剂晶格中而仍保持溶剂晶格

类型的合金相称为固溶体。根据溶质原子在溶剂晶格中占据的位置，可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。如图 3.2.10 所示。

由于溶质原子的溶入，会引起固溶体晶格发生畸变，使合金的强度、硬度提高。这种通过溶入原子，使合金强度和硬度提高的方法叫固溶强化。固溶强化是提高材料力学性能的重要强化方法之一。

2. 金属化合物

金属化合物是合金元素间发生相互作用而生成的具有金属性质的一种新相，其晶格类型和性能不同于合金中的任一组成元素，一般可用分子式来表示。金属化合物一般具有复杂的晶体结构，熔点高，硬而脆。当合金中出现金属化合物时，通常能提高合金的强度、硬度和耐磨性，但会降低塑性和韧性。以金属化合物作为强化相强化金属材料的方法，称为第二相强化。金属化合物是各种合金钢、硬质合金及许多非铁金属的重要组成相。金属化合物也可以溶入其它元素的原子，形成以金属化合物为基的固溶体。 Fe_3C 是铁与碳相互作用形成的一种金属化合物，称为渗碳体。图 3.2.11 是渗碳体的晶体结构，碳质量分数 $w_{\text{C}} = 6.69\%$ 。

合金组织可以是单相的固溶体组织，但由于其强度不高，应用受到了一定的限制。因此，多数合金是由固溶体和

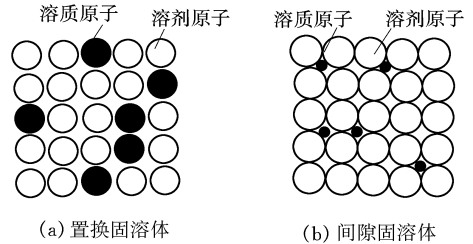


图 3.2.10 固溶体结构示意图

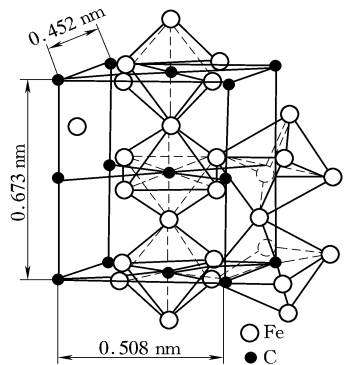


图 3.2.11 渗碳体的晶体结构

结构。

1. 大分子链的结构

大分子链的几何形状有线型、支链型和体型等三类。

整个分子呈细长线条状，通常卷曲成不规则的线团，如图 3.3.2a 所示。这种结构十分柔软，易于加工，并可反复使用，具有良好的弹性和热塑性。

在大分子主链节上有一些或长或短的小支链，整个分子呈枝状，如图 3.3.2b 所示。支链的出现一般会使聚合物的粘度增加，性能得以强化。

大分子链之间通过支链或化学键连接成一体的交联结构，在空间呈网状，如图 3.3.2c 所示。这种结构非常稳定，既不能溶解，也不能熔融，尺寸稳定性好，但弹性很低。

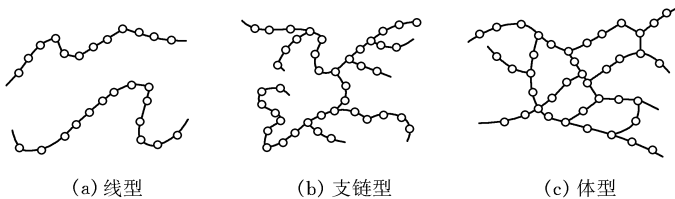


图 3.3.2 大分子链的几何形状示意图

大分子链结构的另一个特点是每个主链上的单键可以任意旋转，由其引起的原子在空间占据不同位置所构成的分子链的各种形象，称为大分子链的构象。大分子链的空间形象变化频繁，构象多，就像一团随便卷在一起的细钢丝一样，对外力有很大的适应性，即受力时可以表现出很大的伸缩能力。大分子这种由构象变化获得不同卷曲程度的特性称为大分子链的柔顺性。

2. 大分子的聚集态结构

按大分子几何排列的特点，固态高聚物的结构分无定形和晶态两种。

线型大分子链很长，当高聚物固化时，由于粘度增大，很难进行有规则的排列，而多呈无序状态，形成无定形结构，如图 3.3.3 所示。体型高分子结构由于分子链间存在大量交联，不可能作有序排列，所以一般都具有无定形结构。

线型、支链型和交联少的网状高分子聚合物固化时可以结晶，但由于分子链运动较困难，不可能进行完全的结晶，如图 3.3.4 所示。其中晶区中大分子作有规则的紧密排列，非晶区中大分子间排列松散且混乱。由于晶区和非晶区的尺寸远比分子链的长度小，所以每个大分子链往往要穿过许多

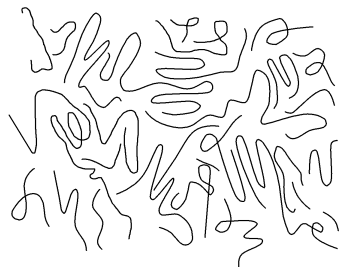


图 3.3.3 无定形高聚物结构示意图

晶区和非晶区，并因此使晶区和非晶区紧密相连，不形成明确的分界线。

晶态及无定形高聚物的大分子结构是一样的，但因为晶态高聚物的分子的排列规整有序，致密度大，分子间的作用力较大，使晶态高聚物的强度、硬度和刚度较高，熔点较高，耐热性和耐蚀性较好，而弹性、塑性和韧性较低。

3. 高聚物的力学状态

高聚物的结构、形态不同，在不同的温度下就会有不同的链间结合状态，在外载荷作用下就会呈现出不同的变形规律和力学性能，即有不同的宏观力学状态。图 3.3.5 为线型无定形高聚物的温度 - 变形曲线。由图可见，随温度不同，线型无定形高聚物呈现玻璃态、高弹态与粘流态等三种力学状态。



图 3.3.4 晶态高聚物结构示意图

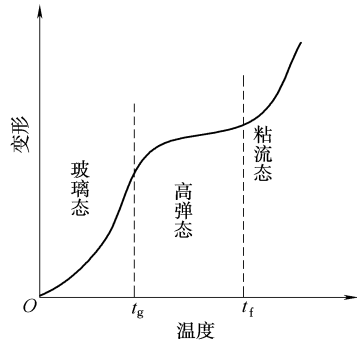


图 3.3.5 线型无定形高聚物的温度 - 变形曲线

在温度低于 t_g 时，高聚物处于玻璃态， t_g 称为玻璃化温度。在玻璃态时，高聚物的大分子链热运动处于停止状态。玻璃态下表现出的力学性能与低分子材料相似，具有一定刚度，是塑料的应用状态。

当温度处于玻璃化温度 t_g 和粘流化温度 t_f 之间时，高聚物处于高弹态。这时高聚物的分子链动能增加。处于高弹态的高聚物在受外力作用时，原卷曲链沿受力方向伸展，产生很大的弹性变形。高弹态是橡胶的应用状态。

当温度升到粘流化温度 t_f 时，大分子链可自由运动，高聚物呈流动状态，这种状态称为粘流态。粘流态是高聚物成型加工的工艺状态，在此状态高聚物可以作为胶粘剂胶结各种构件。

3.4 材料的凝固与结晶

凝固的产物可以是晶体，也可以是非晶体，当材料从液体转变为固态晶体时称为结晶。

3.4.1 金属的结晶特点

晶体物质都有一个平衡结晶温度

度时便发生熔化。在平衡结晶温度，液体与晶体同时共存，处于平衡状态。纯金属的实际结晶过程可用冷却曲线来描述。冷却曲线是温度随时间而变化的曲线。从图 3.4.1 冷却曲线看出，液态金属随时间冷却到某一温度时，在曲线上出现一个平台，这个平台所对应的温度就是纯金属的实际结晶温度。因为结晶时放出结晶潜热，补偿了此时向环境散发的热量，使温度保持恒定，结晶完成后，温度继续下降。实验表明，纯金属的实际结晶温度 T_1 总是低于平衡结晶温度 T_0 ，这种现象叫做过冷现象。实际结晶温度 T_1 与平衡结晶温度 T_0 的差值 T 称为过冷度。过冷是金属结晶的必要条件，液体冷却速度越大， T 越大。从理论上说，当冷却速度无限小时， T 趋于 0，即实际结晶温度与平衡结晶温度趋于一致。

1. 结晶的一般过程

实验证明，结晶是晶体在液体中从无到有

在从高温冷却到结晶温度的过程中，液体内部在一些微小体积中原子由不规则排列向晶体结构的规则排列逐渐过渡，即随时都在不断产生许多类似晶体中原子排列的小集团，其特点是尺寸较小、极不稳定、时聚时散；温度越低，尺寸越大，存在的时间越长。这种不稳定的原子排列小集团，是结晶中产生晶核的基础。当液体被过冷到结晶温度以下时，某些尺寸较大的原子小集团变得稳定，能够自发地成长，即成为结晶的晶核。这种只依靠液体本身在一定过冷度条件下形成晶核的过程叫做自发形核。在实际生产中，金属液体内常存在各种固态的杂质微粒。金属结晶时，依附于这些杂质的表面形成晶核比较容易。这种依附于杂质表面形成晶核的过程称为非自发形核。非自发形核在生产中所起的作用更为重要。

对于每一个单独的晶粒而言，其结晶过程在时间上划分必是先形核后长大两个阶段，但对整体而言，形核与长大在整个结晶期间是同时进行的，直至每个晶核长大到互相接触形成晶粒为止。图 3.4.2 示意地反映了金属结晶的整个过程。

2. 结晶后的晶粒大小及其控制

金属结晶后，获得由许多晶粒组成的多晶体组织。晶粒的大小对金属的力学性能、物理性能和化学性能均有很大影响。细晶粒组织的金属不仅强度高，而且塑性和韧性也好。这是因为，晶粒越细，一定体积中的晶粒数目越多，在同样的变形条件下，变形量被分散到更多的晶粒内进行，各晶粒的变形比较均匀而不致产生过分的应力集中现象。此外，晶粒越细，晶界就越多，越曲折，越不利于裂纹的传播，从而使其在断裂前能承受较大的塑性变形，表现出较高的塑性和韧性。所以，在生产实践中，通常采用适当方法提高金属材料的强度。这种强化金属材料的方法称为细晶强化。

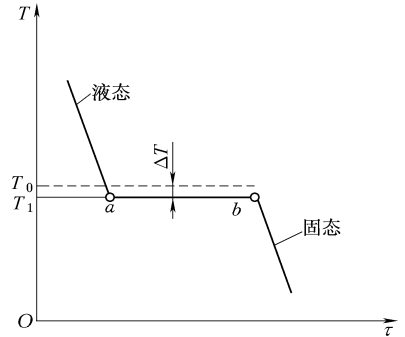


图 3.4.1 纯金属的冷却曲线

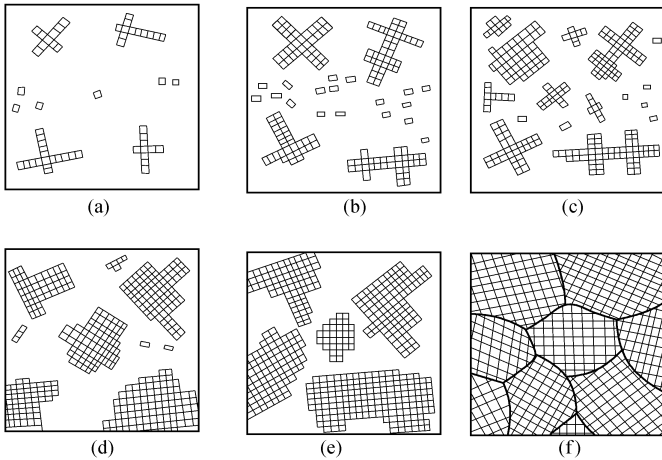


图 3.4.2 金属的结晶过程

3.4.2 非晶态凝固的特点

影响非晶态凝固的因素主要有两个。

1. 熔体的粘度

高粘度的熔体，凝固时易于形成非晶体。而大多数物质结晶时，液体的粘度是很低的。

2. 冷却速度

如果冷却速度很快，晶核不能形成，就会得到非晶体。现在用高速旋转的铜轮来冷却金属液，就可获得带状非晶态合金。

3.5 铁碳合金相图

在目前使用的工程材料中，合金占有十分重要的位置。合金的结晶过程与内部组织远比纯金属复杂。同是一个合金系，合金的组织随化学成分的不同而变化；同一成分的合金，其组织则随温度不同而变化。为了全面了解合金的组织随成分、温度变化的规律，对合金系中不同成分的合金进行实验，测定冷却曲线，观察分析其在缓慢加热、冷却过程中内部组织的变化，然后组合绘制成图。这种表示在平衡条件下合金的成分、温度与其相和组织状态之间关系的图形，称为合金相图

钢铁材料是工业生产和日常生活中应用最广泛的金属材料，钢铁材料的主要组元是铁和碳，故称铁碳合金。铁碳相图是研究在平衡状态下铁碳合金成分、组织和性能之间的关系及其变化规律的重要工具。实用的铁碳相图，实际上是 Fe 和 Fe_3C 两个基本组元组成的 Fe - Fe_3C 相图。掌握铁碳相图对于制定钢铁材料的加工工艺具有重要的指导意义。

3.5.1 铁碳合金的基本组元与基本相

1. 纯铁的同素异构转变

大多数金属在结晶后晶格类型不再发生变化，但少数金属，如铁、钛、钴等在结晶后晶格类型会随温度的变化而发生变化。这种同一种元素在不同条件下具有不同的晶体结构，当温度等外界条件变化时晶格类型发生转变的现象称为同素异构转变。同素异构转变是一种固态转变。图3.5.1是纯铁在常压下的冷却曲线。由图可见，纯铁的熔点为1538℃，在1394℃和912℃出现平台。经分析，纯铁结晶后具有体心立方结构，称为 δ -Fe。当温度下降到1394℃时，体心立方的 δ -Fe转变为面心立方结构，称为 γ -Fe。在912℃时， γ -Fe又转变为体心立方结构，称为 α -Fe。再继续冷却时，晶格类型不再发生变化。由于纯铁具有这种同素异构转变，因而才有可能对钢和铸铁进行各种热处理，以改变其组织和性能。

2. 铁碳合金的基本相及其性能

在液态下，铁和碳可以互溶成均匀的液体。在固态下，碳可有限地溶于铁的各种同素异构体中，形成间隙固溶体。当含碳量超过相应温度固相的溶解度时，则会析出具有复杂晶体结构的金属化合物——渗碳体。现将它们的相结构及性能介绍如下：

成的均匀液体称为液相，常以符号L表示。

隙固溶体称为铁素体，通常以符号F表示。碳在 δ -Fe中的溶解度很低，在727℃时溶解度最大，为0.0218%，室温时几乎为零

相同，其强度和硬度很低，但具有良好的塑

性和韧性。其力学性能大约为： $\sigma_b = 180 \sim 280 \text{ MPa}$ ， $\delta = 30\% \sim 50\%$ ， $\alpha_k = 160 \sim 200 \text{ J/cm}^2$ ，50~80 HBS。工业纯铁($w_c < 0.02\%$)

所示。

δ -Fe中的溶解度也很有限，但比在 δ -Fe中的溶解度大得多，在1148℃时，碳在 δ -Fe中的溶解度最大，可达2.11%。随着温度的降低，溶解度也逐渐下降，在727℃时，奥氏体的含碳量为0.77%。奥氏体的硬度不高，易于塑性变形。

的金属化合物。它的分子式为 Fe_3C ，渗碳体的含碳量为6.69%。在Fe- Fe_3C 相图中，渗碳体既是组元，又是基本相。渗碳体的硬度很高，约800 HBW，而塑性和韧性几乎等于零，是一个硬而脆的相。渗碳体是铁碳合金中主要的强化相，它的形状、大小

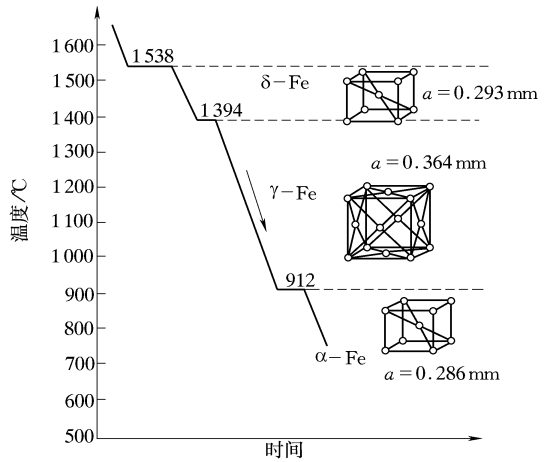


图 3.5.1 纯铁的冷却曲线及晶体结构变化

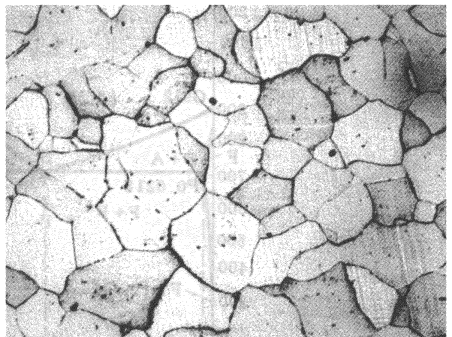


图 3.5.2 铁素体显微组织

与分布对钢的性能有很大影响。

3.5.2 Fe - Fe₃C 相图分析

Fe - Fe₃C 相图如图 3.5.3 所示。图中左上角部分实际应用较少，为了便于研究和分析，将

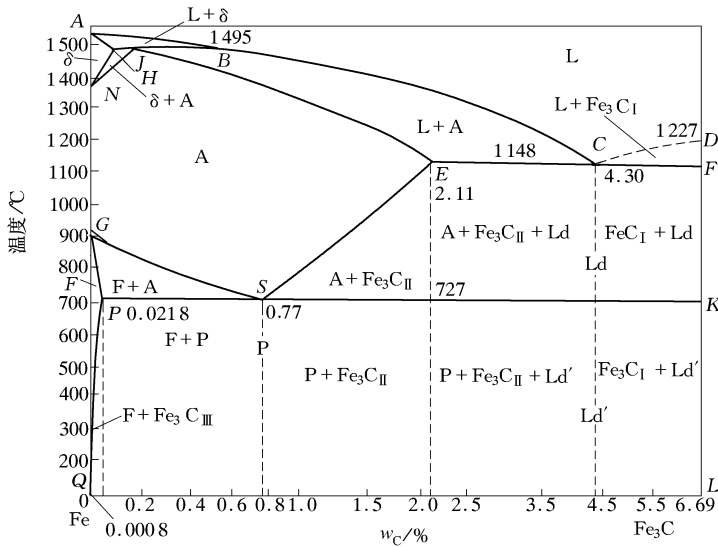


图 3.5.3 Fe - Fe₃C 相图

此部分作以简化。简化的 Fe - Fe₃C 相图如图 3.5.4 所示。简化的 Fe - Fe₃C 相图可视为由两个简单相图组合而成。图中的右上半部分为共晶转变

的转变)

一定条件下,一种固相同时析出两种固相的转变)

1. 主要特点

A点和 D点 A点是铁的熔点

D点是渗碳体的熔点

G点 G点是铁的同素异构转变点, 温度为 912 。铁在该点发生面心立方晶格与体心立方晶格的相互转变。

E点和 P点 E点是碳在 γ -Fe 中的最大溶解度点, $w_C = 2.11\%$, 温度为 1148 ; P点是碳在 δ -Fe 中的最大溶解度点, $w_C = 0.0218\%$, 温度为 727 。

Q点 Q点是室温下碳在 δ -Fe 中的溶解度, $w_C = 0.0008\%$ 。

C点 C点为共晶点, 液相在 1148 同时结晶出奥氏体和渗碳体。此转变称为共晶

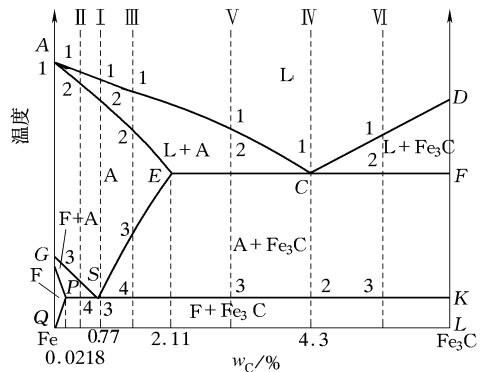


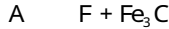
图 3.5.4 简化后的 Fe - Fe₃C 相图

转变。共晶转变的表达式如下：



共晶转变的产物称莱氏体，它是奥氏体和渗碳体组成的机械混合物，用符号 L_d 表示。

S点 S点为共析点，奥氏体在 727 同时析出铁素体和渗碳体。此转变称为共析转变。共析转变的表达式如下：



共析转变的产物称珠光体，它是铁素体和渗碳体组成的机械混合物，用符号 P 表示。

2. 主要特性线

ACD线和 AECF线 ACD线是液相线，该线以上为完全液相；AECF线是固相线，该线以下是完全固相。

ECF线 ECF线是共晶线 $w_C = 2.11\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金都要发生共晶转变。

PSK线 PSK线是共析线 $w_C = 0.0218\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金都要发生共析转变。PSK线又称为 A_1 线。

GS线 GS线是冷却时奥氏体开始析出铁素体，或加热时铁素体全部溶入奥氏体的转变温度线。GS线又称为 A_3 线。

ES线 ES线是碳在奥氏体中的溶解度曲线。随温度的降低，碳在奥氏体中的溶解度沿 ES线从 2.11%变化至 0.77%。由于奥氏体中含碳量的减少，将从奥氏体中沿晶界析出渗碳体，称为二次渗碳体 (Fe_3C) ES线又称为 A_{cm} 线。

PQ线 PQ线是碳在铁素体中的溶解度曲线。随温度的降低，碳在铁素体中的溶解度沿 PQ线从 0.0218%变化至 0.0008%。由于铁素体中含碳量的减少，将从铁素体中沿晶界析出渗碳体，称为三次渗碳体 (Fe_3C) 析出。

由于生成条件的不同，渗碳体可以分为 Fe_3C 、 Fe_3C 、 Fe_3C 、共晶 Fe_3C 和共析 Fe_3C 五种。其中 Fe_3C 是含碳量大于 4.3%的液相缓冷到液相线 (CD线)

碳体。尽管它们是同一相，但由于形态与分布不同，对铁碳合金的性能有着不同的影响。

3. 相区

$Fe-Fe_3C$ 相图中有 F、A、L 和 Fe_3C 四个单相区。

$Fe-Fe_3C$ 相图中有五个两相区，即 L + A 两相区、L + Fe_3C 两相区、A + Fe_3C 两相区、A + F 两相区和 F + Fe_3C 两相区。

3.5.3 典型合金的结晶过程及组织

铁碳合金由于成分的不同，室温下将得到不同的组织。根据铁碳合金的含碳量及组织的不同，可将铁碳合金分为工业纯铁、钢及白口铸铁三类：

工业纯铁 ($w_C < 0.0218\%$)

钢 ($w_C < 2.11\%$)

$w_C < 0.77\%$) ($w_C = 0.77\%$)

($w_C < 2.11\%$)

白口铸铁 ($w_C < 6.69\%$)

铸铁 ($w_C < 4.3\%$) $w_C = 4.3\%$ $w_C < 6.69\%$

为了深入了解铁碳合金组织形成的规律，下面以六种典型铁碳合金为例，分析它们的结晶过程和室温下的平衡组织。六种合金在相图中的位置如图 3.5.4 所示。

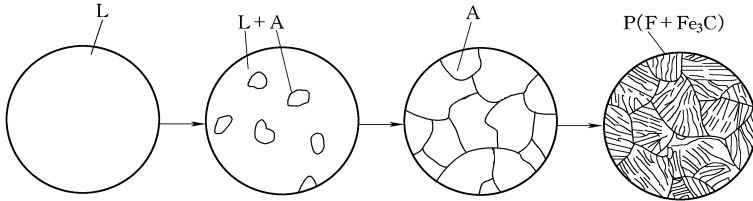


图 3.5.5 共析钢结晶过程组织转变示意图

1. 共析钢的结晶过程分析

共析钢的冷却过程如图 3.5.4 中 $1-3$ 线所示。当合金由液态缓冷到液相线 1 点温度时，从液相中开始结晶出奥氏体。随温度的降低，不断结晶出奥氏体。冷却到 2 点温度时，液相全部结晶为奥氏体。从 2 至 3 点温度范围内为单相奥氏体的冷却。冷至 3 点温度

成珠光体。图 3.5.5 是冷却过程中共析钢组织转变过程示意图。图 3.5.6 是共析钢的显微组织。

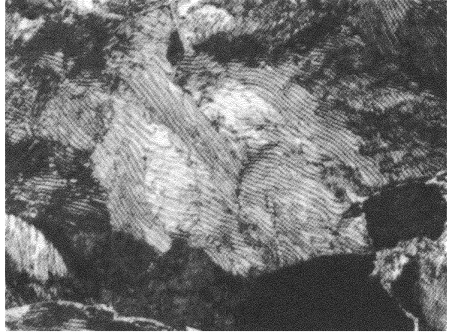


图 3.5.6 共析钢的显微组织

2. 亚共析钢的结晶过程分析

亚共析钢的冷却过程如图 3.5.4 中 $1-4$ 线所示。液态合金结晶过程与共析钢相同，结晶结束得到奥氏体。当合金冷至 GS 线上的 3 点温度时，开始从奥氏体中析出铁素体，称为先析出铁素体。冷至 4 点温度

成珠光体。图 3.5.7 为亚共析钢结晶过程组织转变示意图。图 3.5.8 为亚共析钢的显微组织。

所有亚共析钢的结晶过程均相似，其室温下的平衡组织都是由铁素体和珠光体组成的。它们的差别是组织中的珠光体量随钢的含碳量的增加而逐渐增加。

3. 过共析钢的结晶过程分析

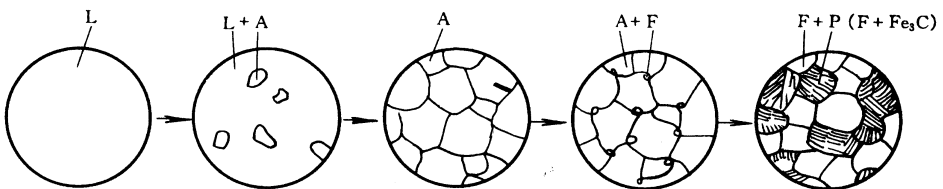


图 3.5.7 $w_C = 0.5\%$ 的亚共析钢结晶过程组织转变示意图

过共析钢的冷却过程如图 3.5.4 中 线所示。在 3 点温度以上的结晶过程也与共析钢相同。当合金冷至 ES 线上 3 点温度时，奥氏体中的含碳量达到饱和而开始析出二次渗碳体。随着温度的下降，二次渗碳体不断析出。当冷却到 4 点温度时，奥氏体发生共析转变，生成珠光体。图 3.5.9 为过共析钢结晶过程组织转变示意图。

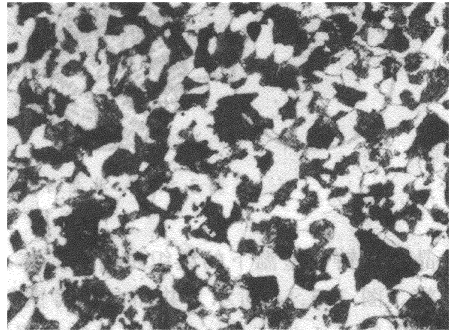


图 3.5.8 亚共析钢的显微组织

过共析钢室温下的平衡组织为二次渗碳体和珠光体，二次渗碳体一般沿奥氏体晶界析出而呈网状分布，如图 3.5.10 所示。网状的二次渗碳体对钢的力学性能会产生不良的影响。

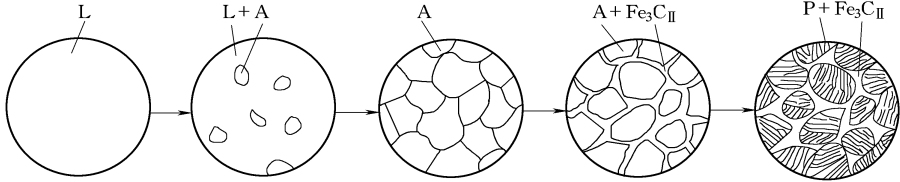


图 3.5.9 过共析钢结晶过程组织转变示意图

4. 白口铸铁的结晶过程分析

以共晶白口铸铁为例，其冷却过程如图 3.5.4 中 线所示。当液态合金冷至 1 点温度 (1 148) 时，将发生共晶转变，生成莱氏体。莱氏体由共晶奥氏体和共晶渗碳体组成。由 1 点温度继续冷却，莱氏体中的奥氏体将不断析出二次渗碳体。当温度降到 2 点 珠光体。图 3.5.11 为共晶白口铸铁组织转变的示意图。

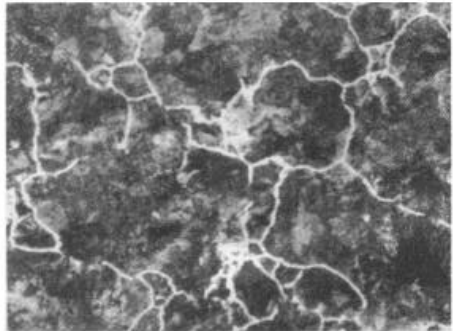


图 3.5.10 过共析钢的显微组织

共晶白口铸铁室温下的组织是由珠光体、二次渗碳体和共晶渗碳体组成的，但这两种渗碳体难以分辨。图 3.5.12 为共晶白口铸铁的显微组织。这种组织称为低温莱氏体，以符号 Ld 表示。低温莱氏体仍保留了共晶转变后的形态特征。

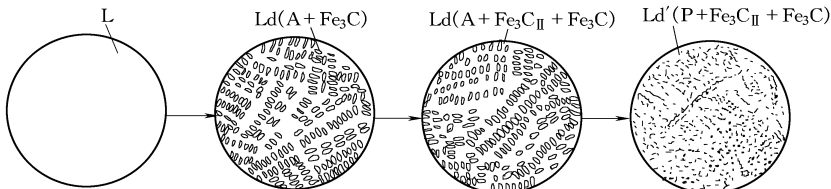


图 3.5.11 共晶白口铸铁结晶过程组织转变示意图

亚共晶白口铸铁的结晶过程如图 3.5.4 中 线所示。室温下亚共晶白口铸铁的组织由珠光体、二次渗碳体和低温莱氏体构成，如图 3.5.13 所示。图中呈树枝状分布的黑色块是由初生奥氏体转变成的珠光体，珠光体周围白色网状物为二次渗碳体，其余部分为低温莱氏体。

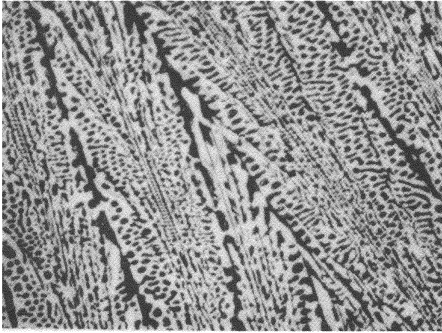


图 3.5.12 共晶白口铸铁的显微组织

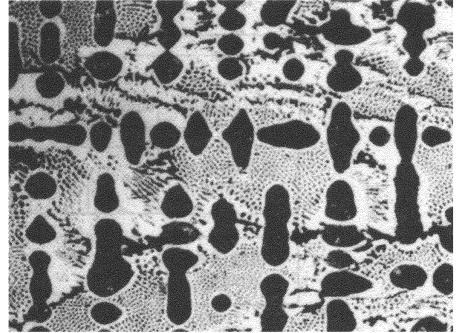


图 3.5.13 亚共晶白口铸铁显微组织

过共晶白口铸铁的冷却过程如图 3.5.4 中 线所示。过共晶白口铸铁的室温平衡组织为一次渗碳体和低温莱氏体，如图 3.5.14 所示。图中白色条片状的是一次渗碳体，其余部分为低温莱氏体。

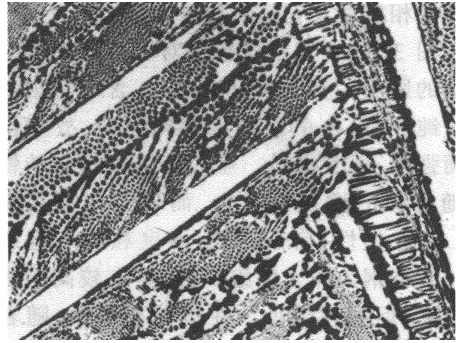


图 3.5.14 过共晶白口铸铁的显微组织

3.5.4 含碳量与铁碳合金组织及性能的关系

铁碳合金室温组织虽然都是由铁素体和渗碳体两相组成，但是含碳量不同时，组织中两个相的相对数量、分布及形态不同，因而不同成分的铁碳合金具有不同的性能。

1. 铁碳合金含碳量与组织的关系

根据对铁碳合金结晶过程中组织转变的分析，已经了解了在不同含碳量情况下铁碳合金的组织构成。图 3.5.15 表示了室温下铁碳合金中含碳量与平衡组织组成物及相组成物间的定量关系。

从图 3.5.15 中可以清楚地看出铁碳合金组织变化的基本规律：随含碳量的增加，铁素体相逐渐减少，渗碳体相逐渐增多；组织构成也在发生变化，如亚共析钢中的铁素体量减少，而珠光体量在增多，到共析钢就变为完全的珠光体了。这些必将极大地影响铁碳合金的力学性能。

2. 铁碳合金含碳量与力学性能的关系

在铁碳合金中，碳的含量和存在形式对合金的力学性能有直接的影响。铁碳合金组织中的铁素体是软韧相，渗碳体是硬脆相。因此，铁碳合金的力学性能，决定于铁素体与渗碳体的相对量及它们的相对分布。

图 3.5.16 表示含碳量对缓冷状态钢力学性能的影响。从图中可以看出，含碳量很低的工业纯铁，是由单相铁素体构成的，故塑性很好而强度、硬度很低。亚共析钢组织中的铁素体随

项目	工业纯铁	钢		白口铸铁	
		亚共析钢	过共析钢	亚共晶白口铁	过共晶白口铁
w_C	0.021	0.021 ~ 0.77%	0.77% ~ 2.11%	2.11% ~ 4.3%	4.3% ~ 6.69%
组织特征		高温固态组织为单相固溶体		组织中有共晶莱氏体	
组织组成物相对量		F, P		Ld', Fe ₃ C _I	
相组成物相对量		F		Fe ₃ C	

图 3.5.15 室温下铁碳合金的含碳量与相和组织的关系

含碳量的增多而减少，而珠光体量相应增加。因此塑性、韧性降低，强度和硬度直线上升。共析钢为珠光体组织，其具有较高的强度和硬度，但塑性较低。在过共析钢中，随着含碳量增加，开始时强度和硬度继续增加，当 $w_C = 0.9\%$ 时，抗拉强度出现峰值，随后不仅塑性韧性继续下降，强度也显著降低。这是由于二次渗碳体量逐渐增加形成了连续的网状，从而使钢的脆性增加。硬度则是始终直线上升的。如果能设法控制二次渗碳体的形态，不使其形成网状，则强度不会明显下降。由此可知，强度是一个对组织形态很敏感的性能。

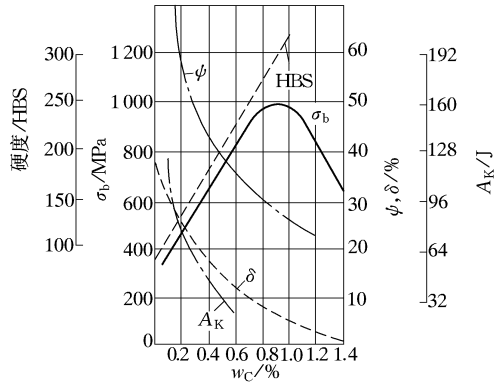


图 3.5.16 含碳量对缓冷钢力学性能的影响

白口铸铁中都存在莱氏体组织，具有很高的硬度和脆性，既难以切削加工，也不能进行锻造。因此，白口铸铁的应用受到限制。但是由于白口铸铁具有很高的抗磨损能力，对于表面要求高硬度和耐磨的零件，如犁铧、冷轧辊等，常用白口铸铁制造。

必须指出，以上所述是铁碳合金平衡组织的性能，随冷却条件和其它处理条件的不同，铁碳合金的组织、性能会大不相同。这将在后续章节中讨论。

3.5.5 铁碳合金相图的应用

铁碳合金相图对生产实践具有重要意义。除了作为材料选用的参考外，还可作为制定铸造、锻造、焊接及热处理等热加工工艺的重要依据。

1. 在选材方面的应用

铁碳相图总结了铁碳合金组织和性能随成分的变化规律。这样，就可以根据零件的服役条件和性能要求来选择合适的材料。例如，若需要塑性好、韧性高的材料，可选用低碳钢；若需要强度、硬度、塑性等都好的材料，可选用中碳钢；若需要硬度高、耐磨性好的材料可选用高

碳钢；若需要耐磨性高，不受冲击的工件用材料，可选用白口铸铁。

2. 在铸造方面的应用

由相图可见，共晶成分的铁碳合金熔点最低，结晶温度范围最小，具有良好的铸造性能。在铸造生产中，经常选用接近共晶成分的铸铁。根据相图中液相线的位置，可确定各种铸钢和铸铁的浇注温度。定铸造工艺提供依据。与铸铁相比，钢的熔化温度和浇注温度要高得多，其铸造性能较差，易产生收缩，因而钢的铸造工艺比较复杂。

3. 在压力加工方面的应用

奥氏体的强度较低，塑性较好，便于塑性变形。因此，钢材的锻造、轧制均选择在单相奥氏体区适当温度范围进行

4. 在焊接方面的应用

焊接时由焊缝到母材各区域的温度是不同的，由 Fe - Fe₃C 相图可知，受不同加热温度的各区域在随后的冷却中可能会出现不同的组织与性能。这就需要在焊接后采用热处理方法加以改善。

Fe - Fe₃C 相图对制定热处理工艺有着特别重要的意义。这将在后续章节中详细介绍。

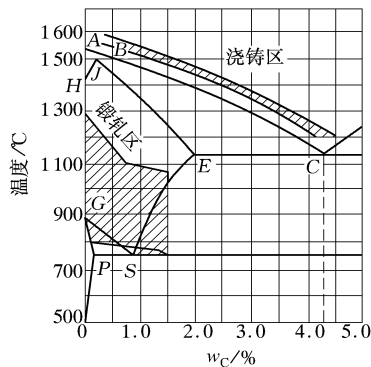


图 3.5.17 铁碳相图与铸锻工艺的关系

思考题与习题

- 3.1 从原子结合的观点看，金属、陶瓷和高分子材料有何主要区别？在性能上有何表现？
- 3.2 为什么单晶体具有各向异性，而多晶体一般不显示各向异性？
- 3.3 晶体缺陷有哪些？其对金属材料的力学性能有什么影响？
- 3.4 合金的结构与纯金属的结构有什么不同？合金的力学性能为什么优于纯金属？
- 3.5 简述高聚物分子链的结构和形态，它们对有机高分子材料的性能有何影响？
- 3.6 细晶粒组织为什么具有较好的综合力学性能？细化晶粒的基本途径有哪几条？
- 3.7 强化金属材料的基本途径有哪几条？强化方法与金属的晶体结构、显微组织有什么联系？
- 3.8 说明铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体和莱氏体等基本组织的显微特征及其性能，分析一次渗碳体、二次渗碳体、三次渗碳体、共晶渗碳体、共析渗碳体的异同之处。
- 3.9 默画简化的 Fe - Fe₃C 相图，说明图中主要点、线的意义，填出各相区的相和组织组成物。
- 3.10 对应简化的 Fe - Fe₃C 相图绘出碳的质量分数分别为 0.45%、0.77%、1.2% 的三种钢的冷却曲线、组织示意图，并指出组织与性能的关系。
- 3.11 根据 Fe - Fe₃C 相图，解释下列现象：

$w_C = 0.8\%$ 的碳钢比 $w_C = 0.4\%$ 碳钢硬度高，比 $w_C = 1.2\%$ 的碳钢强度高；

等制成)

$w_C = 0.4\%$ 的钢能进行锻造，而 $w_C = 4.0\%$ 的铸铁不能进行锻造；

w_C 分别为 0.8% 、 1.0% 、 1.2%)

w_C 分别为 0.1% 、 0.2%)

第4章 材料的强化与处理

问一问，想一想：改变成分可以改变材料的性能，那么还有没有其它手段改变材料的性能呢？一把含碳量为1.2%的高碳钢锉刀能不能不经过处理就直接使用？

学习目标

1. 重点掌握钢铁材料的热处理特点；简单了解热处理过程中的组织转变及转变产物的形态与性能；了解常见热处理缺陷、产生原因及预防措施；初步具备正确选用常规热处理工艺、安排其工序位置并进行热处理操作的能力。
2. 了解工程材料的其它主要强化方式、改性与表面处理技术。

材料的强化与处理是工程材料应用的重要问题之一。通过各类强化与处理手段，既可以提高材料的力学性能，充分发挥材料的潜力又可以获得一些特殊要求的性能，以满足各种各样使用条件下对材料的要求。

材料的强化与处理主要包括金属材料的热处理、高分子聚合物的改性强化和正在迅速发展的表面处理技术。

4.1 金属材料的热处理

金属材料的热处理主要是对钢铁材料的热处理。所谓钢的热处理是将钢在固态下以适当的方式进行加热、保温和冷却，以获得所需组织和性能的工艺。热处理是强化金属材料、提高产品质量和寿命的主要途径之一。绝大部分重要的机械零件，在制造过程中都必须进行热处理。

热处理工艺的种类很多，通常根据其加热、冷却方法的不同及钢组织和性能的变化特点分为普通热处理（正火、淬火及回火等）和表面热处理等。

尽管热处理种类繁多，但其基本过程都由加热、保温和冷却三个阶段组成。图4.1.1所示为最基本的热处理工艺曲线形式。改变加热温度、保温时间、冷却速度等参数，会在一定程度上发生相应的预期组织转变，从而改变材料的性能。

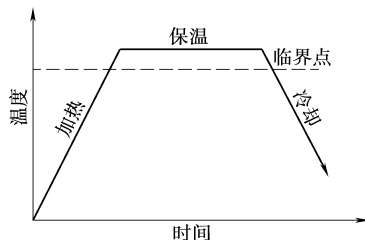


图 4.1.1 钢的热处理工艺曲线

4.1.1 钢在加热时的转变

加热是热处理的第一道工序。大多数热处理工艺首先要将钢加热到相变点

上，目的是获得奥氏体。共析钢、亚共析钢和过共析钢分别被加热到 PSK (A_1)、 GS (A_3) 和 ES (A_{cm})。 A_1 、 A_3 和 A_{cm} 都是平衡相变点。但在实际热处理时，加热和冷却都不可能是非常缓慢的，因此组织转变都要偏离平衡相变点，即加热时偏向高温，冷却时偏向低温。为了区别于平衡相变点，通常将加热时的相变点用 Ac_1 、 Ac_3 和 A_{cm} 表示，冷却时的相变点用 Ar_1 、 Ar_3 和 Ar_{cm} 表示。图 4.1.2 为 Fe-Fe₃C 相图上的位置示意。钢的相变点是制定热处理工艺参数的重要依据，各种钢的相变点可在热处理手册中查到。

任何成分的钢加热到 A_1 线以上时，都要发生珠光体向奥氏体的转变过程。奥氏体化过程包括铁素体、珠光体、渗碳体等组织的转变。图 4.1.3 所示。

奥氏体晶粒的大小对冷却转变后钢的性能有很大影响。热处理加热时，若获得细小、均匀的奥氏体，则冷却后钢的力学性能就好。因此，奥氏体晶粒的大小是评定热处理加热质量的主要指标之一。

在高温下，奥氏体晶粒长大是一个自发过程。奥氏体化温度越高，保温时间越长，奥氏体晶粒长大越明显。随着钢中奥氏体含碳量的增加，奥氏体晶粒长大的倾向也增大。但当 $w_C > 1.2\%$ 时，奥氏体晶界上存在未溶的渗碳体，能阻碍晶粒的长大。钢中加入能生成稳定碳化物的元素，如 Nb、Ti、V 等，能阻碍晶粒的长大。

为了控制奥氏体晶粒长大应采取以下措施：热处理加热时要合理选择并严格控制加热温度和保温时间，合理选择钢的原始组织及选用含有一定量合金元素的钢材等。

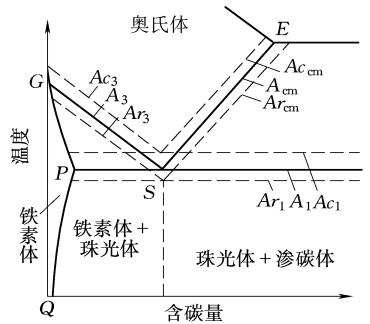


图 4.1.2 加热和冷却时 Fe - Fe₃C 相图上各相变点的位置

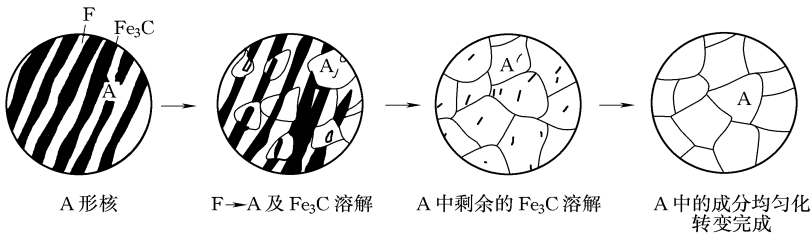


图 4.1.3 共析钢中奥氏体形成过程示意图

4.1.2 钢在冷却时的转变

钢经加热奥氏体化后，可以通过采用不同的冷却条件，获得需要的组织和性能。由表 4.1.1 可以看出，45 钢由于冷却速度不同，其力学性能有明显差别。

表 4.1.1 45 钢经 840 加热后, 不同条件冷却后的力学性能

冷却方法	σ_b /MPa	σ_s /MPa	ψ /%	α /%	HRC
随炉冷却	519	272	32.5	49	15~18
空气冷却	657~706	333	15~18	45~50	18~24
油中冷却	882	608	18~20	48	40~50
水中冷却	1 078	706	7~8	12~14	52~60

在热处理生产中, 常用的冷却方式有两种, 即等温冷却和连续冷却, 如图 4.1.4 所示。钢在连续冷却或等温冷却条件下, 由于冷却速度较快, 其组织的转变均不能用 Fe - Fe₃C 平衡相图分析, 而是测定了过冷奥氏体等温转变图

来分析过冷奥氏体在不同冷却条件下组织转变的规律。所谓“过冷奥氏体”是指在相变温度 A_1 以下, 未发生转变而处于不稳定状态的奥氏体。过冷奥氏体总是要自发地转变为稳定的新相, 在 A_1 温度以下不同温度范围内, 可发生三种不同类型的转变: 高温的珠光体型转变; 中温的贝氏体型转变和低温的马氏体型转变。

1. 珠光体转变

珠光体转变发生在 $A_1 \sim 550$ 的温度范围内。在转变过程中铁、碳原子都进行扩散, 故珠光体转变是扩散型转变, 奥氏体等温分解为层片状的珠光体组织。珠光体层间距随过冷度的增大而减小。按其层间距的大小, 可分为珠光体、索氏体种。这三种组织没有本质区别, 也没有严格的界限, 它们的表示符号、形成温度和性能如表 4.1.2 所示。可以看出, 它们的硬度随层片间距的减小而增高。

表 4.1.2 珠光体型组织的形成温度和硬度

组织名称	表示符号	形成温度/	分辨片层的放大倍数	硬度/HRC
珠光体	P	$A_1 \sim 650$	放大 400 以上	< 20
索氏体	S	650 ~ 600	放大 1 000 倍以上	22 ~ 35
托氏体	T	600 ~ 550	放大几千倍以上	35 ~ 42

2. 贝氏体型转变

贝氏体转变发生在 $550 \sim M_s$ 温度范围内。由于贝氏体的转变温度较低, 铁原子扩散困难, 因此贝氏体

一般可分为上贝氏体和下贝氏体两种。与上贝氏体比较, 下贝氏体不仅强度、硬度较高 (HRC)

贝氏体组织。下贝氏体是在 $350 \sim M_s$ 点温度范围内形成的, 其显微组织特征是黑色针叶状, 它是由针叶状铁素体和分布在针叶内的细小渗碳体粒子组成的, 如图 4.1.5 所示。

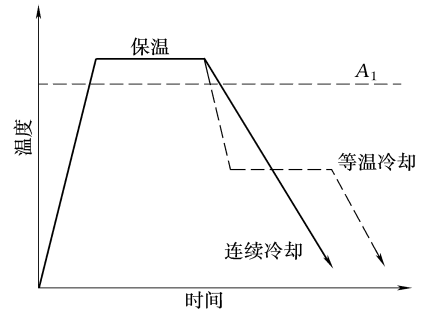


图 4.1.4 两种冷却方式示意图

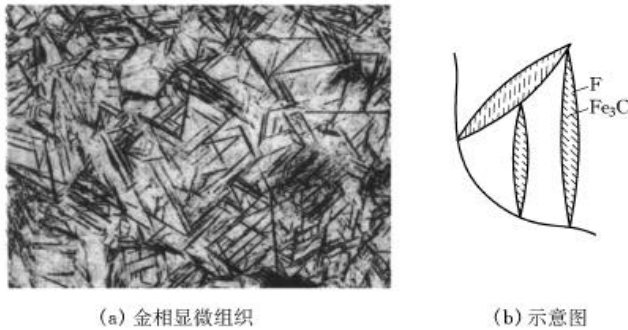


图4.1.5 下贝氏体组织

3. 马氏体转变

当奥氏体被迅速过冷至马氏体点 M_s 以下时则发生马氏体转变。与前两种转变不同，马氏体转变是在一定温度范围内 $M_s \sim M_f$ 之间) M_s 和 M_f 分别是马氏体转变的开始温度和终了温度。由于过冷度很大，奥氏体向马氏体转变时难以进行铁、碳原子的扩散，只发生 γ -Fe 向 α -Fe 的晶格改组。固溶在奥氏体中的碳全部保留在 α -Fe 晶格中

α -Fe 中的过饱和固溶体，称其为马氏体，以符号 M 表示。由于过饱和的碳原子被强制固溶在晶格中，致使晶格严重畸变。马氏体含碳量越高，则晶格畸变越严重，且体积增长越大，这将引起淬火工件产生相变内应力，容易导致工件变形和开裂。

马氏体转变速度极快且马氏体量随温度的不断降低而增多，但一般总有一小部分奥氏体未能转变而残留下来，这部分奥氏体称为残余奥氏体。钢中残余奥氏体量随 M_s 点的降低而增加。残余奥氏体的存在，不仅降低淬火钢的硬度和耐磨性，而且在工件长期使用过程中，由于残余奥氏体会继续变成马氏体，使工件尺寸发生变化。因此，生产中对一些高精度工件常采用冷处理的方法，将淬火钢件冷却至低于 0℃ 某一温度，以减少残余奥氏体量。

由于奥氏体含碳量的不同，马氏体的形态有板条状和片状两种。含碳量较低的钢淬火时几乎全部得到板条状马氏体组织，而含碳量高的钢得到片状马氏体组织，含碳量介于中间的钢则是两种马氏体的混合组织。图 4.1.6 和图 4.1.7 是两种马氏体的显微组织。马氏体的硬度主要

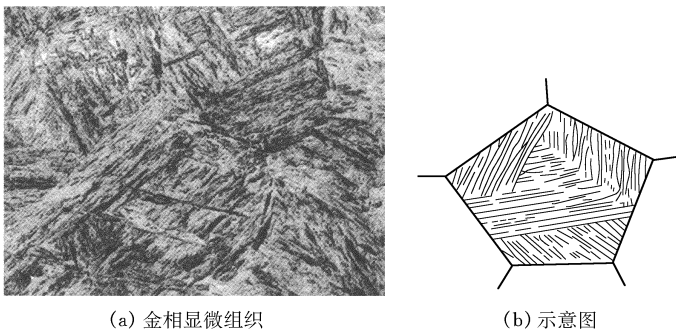


图4.1.6 板条状马氏体的组织

决定于含碳量。板条状马氏体不仅具有较高的强度和硬度，而且还具有较好的塑性和韧性。片状马氏体的硬度很高，但塑性和韧性很差。

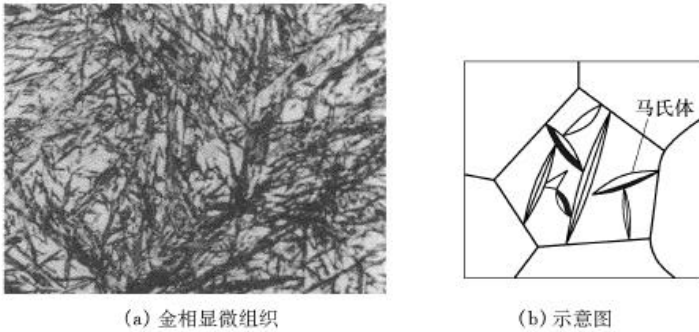


图 4.1.7 片状马氏体的组织

4.1.3 钢的普通热处理

钢的最基本的热处理工艺有退火、正火、淬火和回火等。

1. 钢的退火

退火是将钢加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。退火主要用于铸、锻、焊毛坯或半成品零件，为预备热处理。退火后获得珠光体型组织。退火的主要目的是：软化钢材以利于切削加工；消除内应力以防止工件变形；细化晶粒，改善组织，为零件的最终热处理做好准备。

根据钢的成分和退火目的不同，常用的退火方法有完全退火、等温退火、球化退火、均匀化退火、去应力退火和再结晶退火等。

完全退火是把钢加热到 A_c 以上 $30 \sim 50$ ，保温一定时间，随炉冷至 600 以下，出炉空冷。完全退火可获得接近平衡状态的组织，主要用于亚共析钢的铸、锻件，有时也用于焊接结构。完全退火的目的在于细化晶粒，消除过热组织，降低硬度和改善切削加工性能。过共析钢不宜采用完全退火，以避免二次渗碳体以网状形式沿奥氏体晶界析出，给切削加工和以后的热处理带来不利影响。

完全退火很费时，生产中常采用等温退火来代替。等温退火与完全退火加热温度完全相同，只是冷却方式有差别。等温退火是以较快速度冷却到 A_1 以下某一温度，等温一定时间使奥氏体转变为珠光体组织，然后空冷。对某些奥氏体比较稳定的合金钢，采用等温退火可大大缩短退火周期。

球化退火是将钢加热到 A_c 以上 $20 \sim 40$ ，充分保温后，随炉冷却到 600 以下出炉空冷。球化退火主要用于过共析钢，其目的是使钢中的渗碳体球状化，以降低钢的硬度，改善切削加工性，并为以后的热处理工序做好组织准备。若钢的原始组织中有严重的渗碳体网，则在

球化退火前应进行正火消除，以保证球化退火效果。

去应力退火又称低温退火，是将钢加热到 A_1 以下某一温度保温一定时间，然后随炉冷却。去应力退火过程中不发生组织的转变，目的是为了消除铸、锻、焊件和冷冲压件的残余应力。

2. 钢的正火

将钢加热到 A_3 (或 A_{cm})

工艺称正火。正火主要有以下几方面的应用：

和韧性。

与退火相比，正火的生产周期短，节约能量，而且操作简便，冷却速度较快，得到的组织比较细小，强度和硬度也稍高一些。生产中常优先采用正火工艺。常用退火和正火的加热温度范围及工艺曲线示于图 4.1.8。

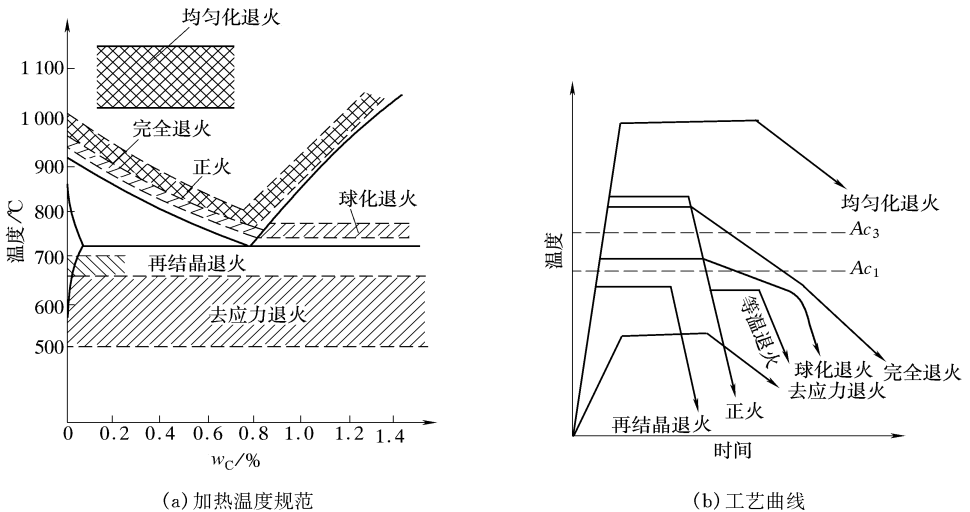


图 4.1.8 碳钢的各种退火、正火加热温度范围及工艺曲线

3. 钢的淬火

将钢加热到 A_3 或 A_{cm} 以上，保温一定时间，冷却后获得马氏体和理工艺称为淬火。淬火是钢的最经济、最有效的强化手段之一。

钢的淬火加热温度主要根据其相变点来确定。图 4.1.9 为碳钢的淬火加热温度范围。

亚共析钢一般采用完全奥氏体化淬火，淬火加热温度为 $A_3 +$ 选择在 $A_1 \sim A_3$ 之间，则在淬火组织中将有先析出铁素体存在，使钢的强度降低。

共析钢和过共析钢的淬火加热温度为 $A_{C_1} + 50$) 共析钢加热温度选择在 $A_{C_1} \sim A_{C_m}$ 之间, 是为了淬火冷却后获得细小片状马氏体和细小球状渗碳体的混合组织, 以提高钢的耐磨性。如果加热到 A_{C_m} 以上进行完全奥氏体化淬火, 奥氏体晶粒粗化, 淬火后的马氏体粗大, 使钢的脆性增加。此外, 由于渗碳体过多的溶解, 使马氏体中碳的过饱和度过大, 增大了淬火应力和变形与开裂的倾向, 同时使钢中的残余奥氏体量增多, 降低了钢的硬度和耐磨性。

应当指出, 确定具体零件热处理温度时, 需全面考虑各种因素

热温度的选择, 还应考虑合金碳化物的溶解和合金元素均

匀化等问题。淬火加热与保温时间的确定, 需综合考虑钢的成分、原始组织、工件形状和尺寸、加热介质、装炉量等因素的影响, 生产中常用有关经验公式估算。

理想的冷却应是既保证工件淬火后得到马氏体量, 减小淬火应力和变形与开裂的倾向

火方法就很重要。常用的冷却介质有水、盐或碱的水溶液和油等。常用的淬火方法有以下几种:

a. 单液淬火 将加热至淬火温度的工件, 投入单一一种淬火介质中连续冷却至室温。例如, 碳钢在水中淬火、合金钢在油中淬火等。单液淬火操作简便, 易于实现机械化和自动化。但也有不足之处, 即易产生淬火缺陷。水中淬火易产生变形和裂纹, 油中淬火易产生硬度不足或硬度不均匀等现象。

b. 双介质淬火 将加热的工件先投入一种冷却能力强的介质中冷却, 然后在 M_s 点区域转入冷却能力小的另一种介质中冷却。例如, 形状复杂的非合金钢工件采用水淬油冷法; 合金钢工件采用油淬空冷法等。双介质淬火可使低温转变时的内应力减小, 从而有效防止工件的变形与开裂。

c. 马氏体分级淬火 将加热的工件先放入温度在 M_s 点附近中, 稍加停留

火可更为有效地避免变形和裂纹的产生, 而且比双介质淬火易于操作, 一般适用于形状较复杂、尺寸较小的工件。

d. 贝氏体等温淬火 在稍高于 M_s 点温度的盐浴或碱浴中, 保温足够的时间, 使其发生下贝氏体转变后出炉空冷。等温淬火的内应力很小, 工件不易变形与开裂, 而且具有良好的综合力学性能。等温淬火常用于处理形状复杂, 尺寸要求精确, 并且硬度和韧性都要求较高的工件, 如各种冷、热冲模, 成型刀具和弹簧等。

e. 局部淬火 有些工件按其工件条件只是局部要求高硬度, 则可进行局部加热淬火, 以避免工件其他部分产生变形与裂纹。

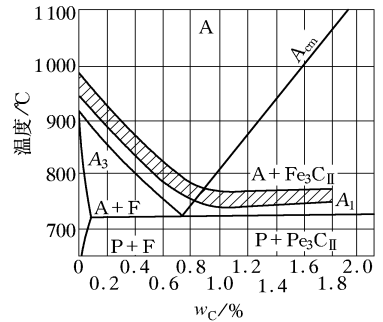


图 4.1.9 碳钢淬火加热温度范围

钢的淬透性是钢在淬火冷却时，获得马氏体组织深度的能力，是钢的一种重要的热处理工艺性能，其高低以钢在规定的标准淬火条件下能够获得的有效淬硬深度来表示。用不同钢种制造的不同形状和尺寸的工件，在同样条件下淬火，有效淬硬深度深的钢淬透性好。钢的淬透性是机械设计制造过程中，合理选材和正确制定热处理工艺的重要依据。

钢的化学成分等是影响淬透性的主要因素。含碳量为 0.77% 的共析钢在碳钢中淬透性最好，能溶入奥氏体的绝大多数合金元素都有利于提高淬透性。

淬透性对钢件热处理后的力学性能影响很大，如图 4.1.10 所示。若整个工件淬透，经高温回火后，其力学性能沿截面是均匀一致的；若工件未淬透，高温回火后，虽然截面上硬度基本一致，但未淬透部分的屈服点和冲击韧度却显著降低。机械制造中许多在重载荷、动载荷下工作的重要零件以及承受拉压应力的重要零件，常要求工件表面和心部的力学性能一致，此时应选用能全部淬透的钢；而对于应力主要集中在工件表面，心部应力不大零件，则可考虑选用淬透性低的钢。焊接件一般不选用淬透性高的钢，否则易在焊缝及热影响区出现淬火组织，造成焊件变形和开裂。

4. 回火

回火是将淬火钢加热到 A_c 以下某一温度，保温一定时间，然后冷却至室温的热处理工艺。回火是淬火的后续工序。回火的主要目的是减少或消除淬火应力，防止工件变形与开裂，稳定工件尺寸及获得工件所需的组织和性能。

淬火后钢的组织是不稳定的，具有向稳定组织转变的自发倾向。加热回火加速了这个自发转变的过程。淬火钢在回火时，随着温度的升高，淬火马氏体和残余奥氏体依次分解，如马氏体中过饱和碳原子以碳化物形式析出，甚至在较高温度时形成块状铁素体和球状渗碳体的混合组织。由于回火温度不同，发生的转变及程度不同，组织依次为回火马氏体、回火托氏体和回火索氏体，这些都是多相混合组织。

由于回火温度从低到高组织转变不同，性能也随之发生变化，如淬火内应力下降，韧性逐步改善，硬度不断降低等，不同回火温度可以满足不同的性能要求。

实际生产中，根据钢件的性能要求，按钢淬火后的回火温度范围，可以分为以下三类：

和耐磨性，钢的内应力和脆性有所降低。低温回火主要用于各种工具、滚动轴承、渗碳件和表面淬火件。

屈服强度，具有一定的韧性和硬度。中温回火主要用于各种弹簧和模具等。

好的综合力学性能。高温回火广泛用于汽车、拖拉机、机床等机械中的重要结构零件，如各种轴、齿轮、连杆、高强度螺栓等。通常将淬火和高温回火相结合的热处理称为调质处理。

应当指出，工件回火后的硬度主要与回火温度和回火时间有关，而回火后的冷却速度对硬度影响不大。实际生产中，回火件出炉后通常采用空冷。

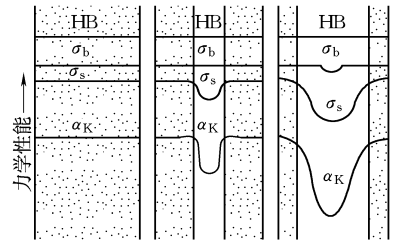


图 4.1.10 淬硬层深度和力学性能的关系

4.1.4 钢的表面热处理

某些在冲击载荷、交变载荷及摩擦条件下工作的机械零件，如曲轴、凸轮轴、齿轮、主轴等，其表层和心部受力不同。由于表层承受较高的应力，因此要求工件表层具有高的强度、硬度、耐磨性及疲劳强度，而心部要具有足够的塑性和韧性。为了达到上述的性能要求，生产中广泛应用表面热处理和化学热处理。

1. 表面淬火

表面热处理是仅对工件表层进行热处理以改变其组织和性能的工艺，其中最常用的是表面淬火。表面淬火是对钢的表面快速加热至淬火温度，并立即冷却，使表层获得马氏体强化的热处理。表面淬火不改变钢表层的成分，仅改变表层的组织，且心部组织不发生变化。

常用的感应加热表面淬火的基本原理如图 4.1.11 所示。将工件放在铜管绕制的感应圈内，当感应圈通以一定频率的电流时，感应圈内部和周围产生同频率的交变磁场，于是工件中相应产生了自成回路的感应电流。由于集肤效应，感应电流主要集中在工件表层，使工件表面迅速加热到淬火温度。随即喷水冷却，使工件表层淬硬。根据所用电流频率的不同，感应加热可分为高频

也越薄，淬硬层深度越小。

感应加热表面淬火零件宜选用中碳钢和中碳低合金结构钢。目前应用最广泛的是汽车、拖拉机、机床和工程机械中的齿轮、轴类等，也可运用于高碳钢、低合金钢制造的工具和量具，以及铸铁冷轧辊等。经感应加热表面淬火的工件，表面不易氧化、脱碳，变形小，淬火层深度易于控制。该热处理方法生产效率高，易于实现生产机械化，多用于大批量生产的形状较简单的零件。

2. 化学热处理

钢的化学热处理是将工件置于一定的活性介质中保温，使一种或几种元素渗入工件表层，以改变其化学成分，从而使工件获得所需组织和性能的热处理工艺。其目的主要是为了表面强化和改善工件表面的物理化学性能，即提高工件的表面硬度、耐磨性、疲劳强度、热硬性和耐腐蚀性。化学热处理的种类很多，一般以渗入的元素来命名。化学热处理有渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗铬、渗铝及多元共渗等。

渗碳是将工件置于富碳的介质中，加热到高温

其目的是使增碳的表面层经淬火和低温回火后，获得高的硬度、耐磨性和疲劳强度，适用于低碳非合金钢和低碳合金钢，常用于汽车齿轮、活塞销、套筒等零件。生产中广泛采用的气体渗碳是将工件置于密封的渗碳炉中

气、石油液化气、丙烷等)

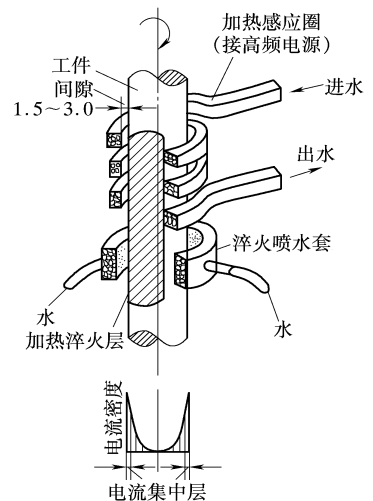


图 4.1.11 感应加热表面淬火示意图

出活性碳原子，活性碳原子渗入高温奥氏体中，并通过扩散形成一定厚度的渗碳层。渗碳的时间主要由渗碳层的深度决定。工件渗碳后必须进行淬火和低温回火。

一般低碳非合金钢经渗碳淬火后表层硬度可达 60~64 HRC，心部为 30~40 HRC。气体渗碳的渗碳层质量高，渗碳过程易于控制，生产率高，劳动条件好，易于实现机械化和自动化，适于成批或大量生产。

4.1.5 热处理新技术简介

随着工业及科学技术的发展，热处理工艺在不断改进，近 20 多年发展了一些新的热处理工艺，如真空热处理、可控气氛热处理、形变热处理和新的表面热处理技术，计算机技术也已越来越多地应用于热处理工艺控制。

1. 可控气氛热处理

在炉气成分可控制在预定范围内的热处理炉中进行的热处理称为可控气氛热处理。其目的是为了有效地控制渗碳时的表面碳浓度，或防止工件在加热时的氧化和脱碳，还可用于实现低碳钢的光亮退火及中、高碳钢的光亮淬火。

2. 真空热处理

在真空中进行的热处理称为真空热处理。真空热处理可以减少工件变形，使钢脱氧、脱氢和净化表面，使工件表面无氧化、不脱碳，表面光洁，可显著提高耐磨性和疲劳极限。真空热处理的工艺操作条件好，有利于实现机械化和自动化，而且节约能源，减少污染，因而真空热处理目前发展较快。

3. 形变热处理

形变热处理是将塑性变形同热处理有机结合在一起，获得形变强化和相变强化综合效果的工艺方法。这种工艺方法不仅可提高钢的强韧性，还可以大大简化金属材料或工件的生产流程。形变热处理的方法很多，有低温形变热处理、高温形变热处理、等温形变淬火、形变时效和形变化学热处理等。

4. 激光热处理和电子束表面淬火

激光热处理是利用专门的激光器发生能量密度极高的激光，以极快速度加热工件表面，自冷淬火后使工件表面强化的热处理。电子束淬火是利用电子枪发射成束电子，轰击工件表面，使之急速加热，而后自冷淬火。其能量利用率大大高于激光热处理。这两种表面热处理工艺不受钢材种类限制，淬火质量高，基体性能不变，是很有发展前途的新工艺。

4.1.6 热处理工艺的应用

热处理在机械制造过程中应用相当广泛，它穿插在机械零件制造过程的各个冷、热加工工序之间，正确合理地安排热处理的工序位置是一个重要问题。再者，机械零件类型很多，形状结构复杂，工作时承受各种应力，其选用的材料及要求的性能各异。因此，热处理技术条件的提出、热处理工艺规范的正确制定和实施等是一个相当重要的问题。

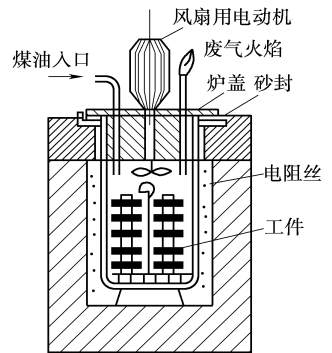


图 4.1.12 气体渗碳示意图

1. 热处理的技术条件

设计者根据零件的工作条件、所选用的材料及性能要求提出热处理技术条件，并标注在零件图上。其内容包括热处理的方法及热处理后应达到的力学性能。一般零件需标出硬度值，重要的零件还应标出强度、塑性、韧性指标或金相组织要求。对于化学热处理零件，还应标注渗层部位和渗层的深度。应采用“金属热处理工艺分类及代号”

处理工艺，见表 4.1.3 所示。

热处理工艺代号标记规定如下：

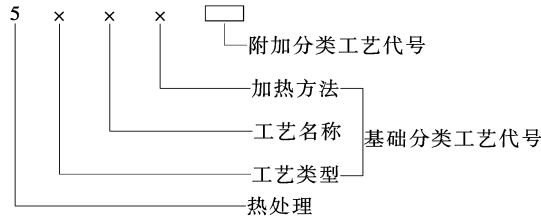


表 4.1.3 热处理工艺分类及代号

工艺总称	代号	工艺类型	代号	工艺名称	代号	加热方法	代号
热处理	5	整体热处理	1	退火	1	加热炉	1
				正火	2		
				淬火	3		
				淬火回火	4	感应	2
				调质	5		
				稳定化处理	6	火焰	3
				固溶化处理	7		
				固溶化处理和时效	8		
	表面热处理	2	2	表面淬火和回火	1	电阻	4
				物理气相沉积	2		
				化学气相沉积	3		
				等离子化学气相沉积	4		
	化学热处理	3	3	渗碳	1	激光	5
				碳氮共渗	2		
				渗氮	3		
				氮碳共渗	4	电子束	6
渗其它非金属				5			
渗金属				6			
多元共渗				7			
溶渗				8	等离子体	7	
其他	8						

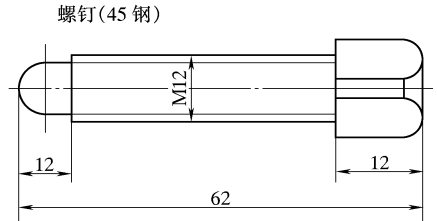
热处理后应达到的技术要求可按相应规定加以标注。如图 4.1.13 中所示：5151 表示对螺钉施以整体调质，热处理后布氏硬度应达到 230~250 HBS。其尾部要进行表面火焰淬火和回火，故代号为 5213，硬度应为 42~48 HRC。

2. 热处理工序位置的确定

热处理工序一般安排在铸、锻、焊等热加工和切削加工的各个工序之间。根据热处理的目的和工序位置的不同，可将其分为预先热处理和最终热处理两大类。

车床主轴是传递力的重要零件，它承受一般载荷，轴颈处要求耐磨。一般车床主轴选用中碳结构钢

硬度 220~250 HBS；轴颈及锥孔表面淬火，硬度 50~52 HRC。它的制造工艺过程是：锻造 正火 机加工



热处理技术条件：5151，
235 HBS；尾 5213，45 HRC

图 4.1.13 热处理技术条件标注示例

其中热处理各工序的作用是：正火作为预先热处理，目的是消除锻件内应力，细化晶粒，改善切削加工性。调质是获得回火索氏体，使主轴整体具有较好的综合力学性能，为表面淬火做好组织准备。高频表面淬火+低温回火作为最终热处理，使轴颈及锥孔表面得到高硬度、高耐磨性和高的疲劳强度，并回火消除应力，防止磨削时产生裂纹。

预备热处理包括退火、正火、调质等。其工序位置一般安排在毛坯生产之后，切削加工之前；或粗加工之后，精加工之前。正火和退火的作用是消除热加工毛坯的内应力、细化晶粒、调整组织、改善切削加工性，为后面的热处理工序做好组织准备。调质是为了提高零件的综合力学性能，为最终热处理做组织准备。对于一般性能要求不高的零件，调质也可作为最终热处理。

最终热处理包括各种淬火+回火及化学热处理。零件经这类热处理后硬度较高，除可以磨削加工外，一般不适宜其它切削加工，故其工序位置一般均安排在半精加工之后，磨削加工

在生产过程中，由于零件选用的毛坯和工艺过程不同，热处理工序会有所增减。因此工序位置的安排必须根据具体情况灵活运用。例如要求精度高的零件，在切削加工之后，为了消除加工引起的残余应力，以减小零件变形，在粗加工后可穿插去应力退火。

3. 常见热处理缺陷及其预防

在热处理生产中，由于加热过程控制不良，淬火操作不当或其它原因，会出现一些缺陷。有些缺陷是可以挽救的，有些严重缺陷将使零件报废。因此，了解常见热处理缺陷及其预防是很重要的。

a. 欠热 又称加热不足。欠热会在亚共析钢淬火组织中出现铁素体，造成硬度不足；在过共析钢组织中会存在过多的未溶渗碳体。

b. 过热 加热温度偏高而使奥氏体晶粒粗大，淬火后得到粗大的马氏体，导致零件性能

变脆。

欠热与不严重的过热可通过退火或正火来矫正。

c. 过烧 加热温度过高，使钢的晶界氧化或局部熔化，致使零件报废。过烧是无法挽救的缺陷。

d. 氧化 钢的表面在氧化性介质中加热时与氧原子形成氧化铁的现象叫氧化。氧化会使工件尺寸变小，表面变得粗糙并影响淬火时的冷却速度，从而使工件硬度下降。

e. 脱碳 钢表层的碳被氧化而导致表层的含碳量降低的现象叫脱碳。加热温度越高，工件的脱碳现象越严重。脱碳会造成钢淬火后表层硬度不足，疲劳强度下降，并易造成表面淬火裂纹。

一般来说，工件在盐浴炉中加热可减轻钢的氧化和脱碳。另外可采用保护气氛加热、真空加热及工件表面涂层保护的办来减小这类缺陷的发生。

a. 淬火变形 淬火变形是零件在淬火时由于热应力与组织应力的综合作用引起的尺寸和形状的偏差。

b. 淬火裂纹 淬火裂纹的产生原因主要为冷却速度过快，另外零件结构设计不合理等因素也会引起此类缺陷。淬火裂纹应绝对避免，否则零件只能报废。

防止变形与开裂的措施主要有：正确选材，对形状复杂，要求变形小的精密零件，应选

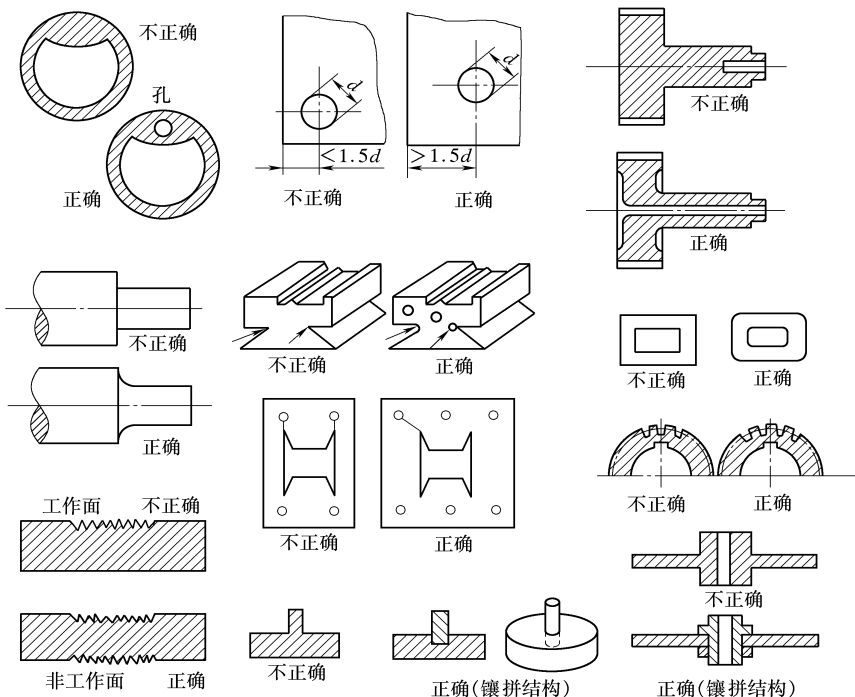


图 4.1.14 零件结构设计改进示意图

用高淬透性钢。合理进行零件的结构设计。选择或制定合理的淬火工艺，如淬火加热尽量采用下限温度，尽可能选择冷却缓慢的淬火介质或采用双介质淬火等。

4. 热处理零件结构的工艺性

在热处理生产中，影响零件热处理质量的因素比较复杂，热处理工艺制订及控制不当，材料本身存在冶金或加工缺陷，材质选择不当及零件结构工艺性不合理等都可能造成热处理缺陷。这里仅说明在设计热处理零件的结构形状时应考虑的热处理结构工艺性。

零件截面尺寸的变化，直接影响到淬火后的有效淬硬深度，影响到淬火应力在工件中的分布，从而对变形等将产生很大影响；零件几何形状对淬火变形与开裂的影响更为显著，应注意以下几点：

对称结构。

及应该如何正确设计的示意图。但是当改进零件的结构形状后仍难以达到热处理要求时，就应采取其他各种措施防止和减小变形开裂等热处理缺陷。例如合理安排工艺路线；修改工件热处理技术条件；按照热处理变形规律，做到冷热加工配合，调整公差；预留一定加工余量；更换材料及改进热处理操作工艺方法等。

4.2 聚合物材料的改性强化

高分子聚合物已成为工农业生产和人民生活的一类重要材料。随着现代科技的迅速发展，对聚合物材料提出了更高的要求，例如，希望聚合物既易于加工成形，又具有良好的韧性和较高的硬度，而且价格低廉。这样的要求对于单一的均聚物是难以满足要求的。于是，科学家们开始研究聚合物的改性强化。所谓改性强化就是通过改变高分子聚合物的结构进而改变原聚合物的力学性能或形成具有崭新性能的聚合物的工艺过程。

目前，高分子聚合物的改性强化方式主要有同种聚合物改性强化和不同种类聚合物共混改性强化。其中，聚合物的“共混改性”已成为高分子材料科学和工程领域的“热点”。一些工程聚合物共混物的力学性能可与铝合金媲美。

聚合物共混物的类型很多，一般是指塑料与塑料的共混物以及在塑料中掺混橡胶。在塑料中掺混少量橡胶的共混体系，由于其冲击性能有很大提高，故称为橡胶增韧塑料。近年来，又有工程聚合物共混物和功能型聚合物共混物出现。前者是指以工程塑料为基体或具有工程塑料特性的聚合物共混物；后者则是指除通用性能之外，还具有某种特殊功能（性、离子交换性等）

聚合物共混改性的效果主要有：

理想的聚合物材料。

降低原材料的成本。

4.3 工程材料的表面处理方法

工程材料的表面处理是利用各种表面涂镀层及表面改性技术，赋予基体材料本身所不具备的特殊力学、物理和化学性能，从而满足工程上对材料及其制品提出的以下要求：

收、电磁性、可焊接性、可胶接性等及制造特殊新型表面材料及复层金属板材；

常见表面处理方法分为以下三个大类：

1. 表面强化处理

表面强化处理是材料表面处理的重要领域。它是通过材料表层的相变、改变表层的化学成分、改变表层的应力状态以及提高表层的冶金质量等途径来改变性能，从而达到强化表面的目的。常用的表面强化方法有：

涂层等)

劳强度的工艺方法。喷丸

丸等)

可使工件表面变形强化，提高疲劳强度和产生符合要求的表面粗糙度。滚压或挤压是靠碾压力使工件表面形成一定量的变形层，以达到表面强化和提高表面质量等目的。

火

以发挥各自优点的处理方法。如渗氮后进行高频感应表面淬火，镀覆后进行热扩散等。

2. 表面防腐与保护处理

表面防腐、保护处理是在材料表面施以覆盖层，以达到防腐蚀的目的。常用的有电镀、化学镀、热浸镀、化学氧化、磷化、涂料涂装等处理技术。

3. 表面装饰加工

表面装饰加工是通过表面抛光、金属着色、光亮镀层和美术装饰漆膜等方法达到表面装饰的目的。

4.3.1 气相沉积

气相沉积是利用气相中发生的物理、化学过程，改变工件表面成分，在表面形成具有特殊性能的金属或化合物涂层。按照过程的本质可将气相沉积分为化学气相沉积和物理气相沉积两

大类。

1. 化学气相沉积

化学气相沉积

上面生成固态沉积膜的过程。CVD法所用的设备简图如图4.3.1所示。

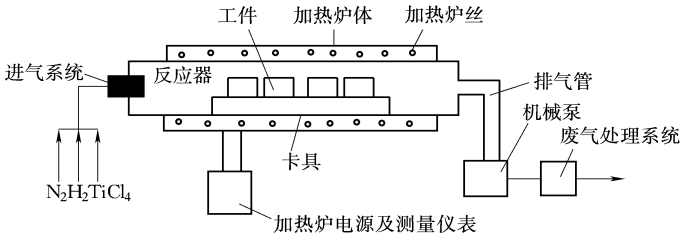


图 4.3.1 CVD 装置示意图

如钢件要涂覆 TiC 层，则将钛以挥发性氯化物

物一起进入反应室内，用氢作为载体和稀释剂，即会在反应室内的钢件表面上发生反应，生成 TiC，沉积在钢件的表面。钢件经沉积后，还需进行热处理，可以在同一反应室内进行。化学气相沉积反应室需获得真空并加热到 900 ~ 1100 。

常用作 CVD 涂层的材料为碳化物、氮化物、氧化物、硼化物、金属及非金属，如 TiC、TiN、TiCN 等，它们具有很高的硬度、较低的摩擦系数、优异的耐磨性和良好的抗粘着能力。CVD 涂层厚度较为均匀，具有相当优越的耐腐蚀性。目前，CVD 硬质合金涂层刀具 (Al_2O_3 、TiC - Al_2O_3)

3 ~ 10 倍。

2. 物理气相沉积

物理气相沉积

面，形成金属涂层或与气体反应形成化合物涂层。物理气相沉积是相对于化学气相沉积而言的，但并不意味着 PVD 完全没有化学反应。PVD 法的重要特点是沉积温度低于 600 ，沉积速度比 CVD 快。PVD 法可适用于钢铁材料、非铁金属材料、陶瓷、玻璃、塑料等各种材料。PVD 法有真空镀、真空溅射和离子镀三大类。真空蒸镀法是在高真空度的反应室中，将镀层材料加热变成蒸发原子，蒸发原子在真空条件下撞击工件表面而形成沉积层。图 4.3.2 为真空蒸镀原理示意图。

PVD 处理可以用于表面装饰，其可获得表面光泽度极好的镀层，不论是金属还是非金属，如陶瓷、石膏、玻璃都可以采用适当的 PVD 处理，为工艺美术品提供了一种极有发展前途的处理手段。PVD 硬质镀层目前用得十分普遍，工艺上最成熟的是 TiC、TiN 涂层，这类涂层在一些切削刀具和模具上应用已收到良好的效果。表 4.3.1 为采用活性反应蒸镀法沉积 TiC、TiN 镀层的一些实用例子。

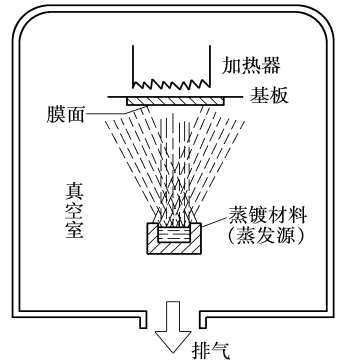


图 4.3.2 真空蒸镀原理示意图

表 4.3.1 TiC、TiN 镀层应用效果

基体材料	高速钢	高速钢	高速钢	高速钢	模具钢	Cr13 不锈钢	Cr12MoV
零件	切削工具	丝锥	齿轮滚刀	螺钉冲头	冲孔冲头	纤维切刀	拉深模
镀层	TiC, TiN	TiC	TiN	TiN	TiC, TiN	TiC	TiN
寿命	5~10	5	3	3	3~5	3~10	75

4.3.2 化学转化膜技术

化学转化膜技术是通过化学或电化学手段，使金属表面形成稳定的化合物膜层的技术，主要包括氧化膜、磷酸盐膜、铬酸盐膜、阳极氧化膜、草酸盐膜等技术。

1. 钢铁氧化处理

将钢铁工件放入某些氧化性溶液中，使其表面形成厚度约为 0.5~1.5 μm 致密而牢固的 Fe_3O_4 薄膜的工艺方法称为氧化处理，又称发蓝。发蓝不影响零件的精密度，常用于工具、武器、仪器的装饰防护。氧化处理能提高工件表面的抗蚀能力，有利于消除工件的残余应力，减少变形。还能使表面光泽美观。

2. 铝及铝合金的氧化处理

该方法是将工件放入弱碱或弱酸中获得与基体铝结合牢固的氧化膜，主要用于提高工件的抗蚀和耐磨性能，也可作油漆的良好底层，还可着色用于表面装饰膜的装饰膜等)

3. 钢铁的磷化处理

磷化是将钢铁零件放入含有磷酸盐的溶液中，获得一层不溶于水的磷酸盐膜的过程。磷化膜由磷酸铁、锰、锌所组成，呈灰白或灰黑色的结晶。厚度一般为 7~20 μm ，膜与基体金属结合十分牢固，并且有较高的电阻，绝缘性能好，抗蚀能力强。磷化膜在大气、矿物油、动物油、植物油，苯及甲苯等介质中，均有很好的耐蚀能力。但在酸、碱、氨水、海水及水蒸气中耐蚀性差。厚磷化膜主要用于耐蚀防护、冷变形加工的润滑、滑动表面的减摩等，薄磷化膜则主要用于工序间的防护及有机涂料层基底。

4.3.3 电镀和化学镀

电镀是将金属工件浸入要镀金属盐溶液中并作为阴极，通以直流电，在直流电场的作用下，金属盐溶液中的阳离子在工件表面上沉积出牢固镀层的过程。电镀是常用的金属表面处理技术，合金电镀、复合电镀等工艺技术的发展使电镀技术应用范围不断扩大。电镀镀层有以下功用：

铬、镀锌镍耐蚀合金等。

镀镍、镀黄铜

电镀金属中以镀铬最为常用。镀铬层在大气中很稳定，不易变色和失去光泽，硬度高，耐磨性好，耐热性较好，广泛用作装饰性组合镀层的面层。用于表面防护和装饰的镀铬层厚度一般为 $0.25 \sim 2 \mu\text{m}$ ，用于表面耐磨的硬铬层厚度为 $5 \sim 80 \mu\text{m}$ 。塑料经过表面金属化处理后也可用常规电镀的方法进行电镀。

化学镀是利用合适的还原剂，使溶液中的金属离子在经催化活化的表面上还原析出金属镀层的一种化学方法。由于它具有独特的工艺性能和优良的镀层特性，现已发展为具有相当优势的镀覆技术。化学镀可以在金属、非金属、半导体等各种不同的基体上镀覆。

4.3.4 涂料和涂装工艺

机电产品涂料涂装是以适当的工艺手段在产品的被涂表面上，使涂料形成结合良好、连续的保护涂层的工艺过程，是材料保护应用最广泛、最重要的工艺手段之一。

1. 涂料

涂料或称漆，是一种以有机高分子材料为主的混合物，用于保护物体的表面，免受外界

涂料一般由四个部分组成，即成膜物质、颜料、溶剂和助剂。主要成膜物质是各种天然高分子材料

机硅等)

涂料成膜的基础。

常用涂料分清漆和色漆两类。清漆类涂料主要由油料、树脂、溶剂、干燥剂等组成的涂料。清漆可单独使用，也可罩光表面、又能配作其它色漆。色漆与清漆相比，含有颜料。色漆主要有底漆和面漆。底漆有防锈底漆和腻子，主要用于打底，面漆为涂在零件表面上最后所罩的色漆，常用的为调和漆和磁漆。

2. 涂装工艺

涂料涂装的方法很多，经常采用的有：涂刷法、浸涂法、喷涂法、电泳涂装等。在涂装之前，零件表面要经表面预处理

工艺。

利用高压静电场的作用，将油漆涂装到物体表面的方法称静电喷涂。静电喷涂的特点是油漆利用率高，可达 $80\% \sim 90\%$ ，漆膜均匀完整，附着力好，涂装质量好，生产效率高，可实现机械化、自动化流水作业，且漆雾飞散少，改善了劳动条件。

思考题与习题

- 4.1 指出 A_1 、 A_3 和 A_{cm} 各相变点的意义，简述共析钢奥氏体形成的主要特点。
- 4.2 试归纳共析钢过冷奥氏体在 A_1 温度以下不同温度发生转变的产物和性能。
- 4.3 试述马氏体转变的特点。定性说明两种主要类型马氏体的组织形态和性能差异。
- 4.4 将 45 钢

然后在水中冷却，试说明各获得什么组织？性能

4.5 正火和退火的主要区别是什么？生产中应如何选择正火和退火？

4.6 指出下列零件正火的主要目的和正火后的组织。

4.7 简述各种淬火方法及其适用范围。

4.8 为什么淬火钢回火后的性能主要取决于回火温度，而不是冷却速度？

4.9 试分析以下几种说法是否正确？为什么？

的组织主要取决于加热温度；

件比大件的淬透性好；

4.10 指出下列工件的淬火和回火温度，并说明回火后得到的组织和大致硬度。

4.11 用 T10 钢制造形状简单的车刀和用 45 钢制造较重要的螺栓，工艺路线均为：锻造
热处理 机加工 热处理 精加工，对两种工件：

4.12 现有 20 钢和 40 钢制造的齿轮各一个，为提高齿面的硬度和耐磨性，宜采用何种热处理工艺？热处理后在组织和性能上有何不同？

4.13 甲、乙两厂同时生产一种 45 钢零件，硬度要求为 220~250 HBS。甲厂采用正火处理，乙厂采用调质处理，都达到硬度要求。试分析甲、乙两厂产品的组织和性能的差异？

4.14 渗碳后的零件为什么必须淬火和回火？淬火、回火后表层和心部性能有何不同？为什么？

4.15 为什么工件淬火容易产生变形，甚至开裂？减少淬火变形和防止开裂有哪些措施？

4.16 指出材料表面处理方法分类及主要目的。

4.17 比较 CVD 和 PVD 两种气相沉积方法。

4.18 比较钢铁的发蓝与磷化工艺。

4.19 指出生活中常见的建筑设施、家具、电器、工具等所采用的表面处理技术。

第5章 金属材料

问一问，想一想：载重汽车的变速箱齿轮，工作中承受中载和较大的冲击力，应该选用什么材料制作？变速箱壳体用什么材料制作？



学习目标

1. 了解合金元素在钢中的作用；
2. 重点掌握常用碳钢、合金钢种类、牌号、性能与应用；
3. 掌握铸铁和非铁金属材料的种类、牌号、性能与应用。

材料是人类生产和社会发展的重要物质基础。其中，金属材料曾经而且仍在发挥非常重要的作用，尤其是对机械行业更是如此。

5.1 概述

5.1.1 金属材料的分类

传统金属材料主要包括工业用钢、铸铁和非铁金属材料等三大类。

以铁为主要元素，碳的质量分数一般在2%以下，并含有其它元素的材料称为钢。其中非合金钢价格低廉，工艺性能好，力学性能能够满足一般工程和机械制造的使用要求，是工业中用量最大的金属材料。但工业生产不断对钢提出更高的要求，为了提高钢的力学性能，改善钢的工艺性能和得到某些特殊的物理化学性能，有目的的向钢中加入某些合金元素，得到合金钢。与非合金钢相比，合金钢经过合理的加工处理后能够获得较高的力学性能，有的还具有耐热、耐酸、不锈等特殊物理化学性能。但其价格较高，某些加工工艺性能较差，某些专用钢只能应用于特定工作条件。因此应正确选用各类钢材，合理制定其冷、热加工工艺，以达到提高效能、延长寿命、节约材料、降低成本、产生良好经济效益的目的。

工业上常用的铸铁是碳的质量分数 $w_C = 2.0\% \sim 4.0\%$ 的铁、碳、硅多元合金。有时为了提高力学性能或物理、化学性能，还可加入一定量的合金元素，得到合金铸铁。铸铁在机械制造中应用很广。按重量计算，汽车、拖拉机中铸铁零件约占50%~70%，机床中约占60%~90%。常见的机床床身、工作台、箱体、底座等形状复杂或受压力及摩擦作用的零件，大多用铸铁制成。

除去铁及其合金等黑色金属材料以外的金属材料，工业上一般称为非铁金属材料或有色金属材料。与钢铁相比，非铁金属的产量低，价格高，但由于其具有许多优良特性，因而在科技和工程中也占有重要的地位，是一种不可缺少的工程材料。

1. 钢的分类

工业用钢的种类繁多，根据不同需要，可采用不同的分类方法，在有些情况下需将几种不同方法混合使用。

a. 按钢的用途 可分为建筑及工程用钢、机械制造用结构钢、工具钢、特殊性能钢、专业用钢

b. 按钢的品质

c. 按钢中碳的质量分数 可以不太严格地分为低碳钢 ($w_C < 0.25\%$) $w_C = 0.25\% \sim 0.60\%$) 碳钢 ($w_C > 0.60\%$)

d. 合金钢按钢中合金元素的总质量分数 可分为低合金钢 ($w_{Me} < 5\%$) $w_{Me} = 5\% \sim 10\%$) $w_{Me} > 10\%$)

国家标准 GB/T 13304—91

级和主要性能及使用特性，将钢的分类总结归纳如下：

钢	非合金钢	普通质量非合金钢	碳素结构钢、碳素钢筋钢、铁道用一般碳素钢、一般钢板桩型钢等
		优质非合金钢	机械结构用优质碳素钢、工程结构用碳素钢、冲压薄板用低碳结构钢、镀层板带用碳素钢、锅炉和压力容器用碳素钢、造船用碳素钢、铁道用碳素钢、焊条用碳素钢、标准件用钢、冷锻用钢、非合金易切削钢、电工用非合金钢、优质铸造碳素钢等
		特殊质量非合金钢	保证淬透性非合金钢、保证厚度方向性能非合金钢、铁道用特殊非合金钢、航空兵器等用非合金结构钢、核能用非合金钢、特殊焊条用非合金钢、碳素弹簧钢、特殊盘条钢丝、特殊易切削钢、碳素工具钢、电磁纯铁、原料纯铁等
	低合金钢	普通质量低合金钢	一般低合金高强度结构钢、低合金钢筋钢、铁道用一般低合金钢、矿用一般低合金钢等
		优质低合金钢	通用低合金高强度结构钢、锅炉和压力容器用低合金钢、造船用低合金钢、汽车用低合金钢、桥梁用低合金钢、自行车用低合金钢、低合金耐候钢、铁道用低合金钢、矿用优质低合金钢、输油管线用低合金钢等
		特殊质量低合金钢	核能用低合金钢、保证厚度方向性能低合金钢、铁道用特殊低合金钢、低温压力容器用钢、舰船及兵器等专用低合金钢等
	合金钢	优质合金钢	一般工程结构用合金钢、合金钢筋钢、电工用硅用合金钢、地质和石油钻探用合金钢、耐磨钢、硅锰弹簧钢等
特种质量合金钢		压力容器用合金钢、经热处理的合金结构钢、经热处理的地质和石油钻探用合金钢管、合金结构钢 性成形用钢) 具用钢、耐冲击工具用钢、热作模具钢、冷作模具钢、塑料模具钢) 速工具钢、轴承钢、高电阻电热钢、无磁钢、永磁钢、软磁钢等	

2. 铸铁的分类

根据碳在铸铁中存在形态的不同，铸铁可分为下列几种：

体，故普通白口铸铁硬度高、脆性大，工业上极少直接用它制造机械零件，而主要作炼钢原料或可锻铸铁零件的毛坯。

的一种铸铁材料。

中的渗碳体大部分或全部分解成团絮状石墨。这种铸铁并不可锻，但强度和塑性、韧性比灰铸铁好。

用于力学性能要求高的铸件。

间，类似于片状石墨，但片短而厚，头部较圆，形似蠕虫。

灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁是一般工程应用铸铁。为了满足工业生产的各种特殊性能要求，向上述铸铁中加入某些合金元素，可得到具有耐磨、耐热、耐蚀等特性的多种合金铸铁。

3. 非铁金属材料的分类

非铁金属材料的种类很多，工业中常用的非铁金属材料主要有铝及铝合金、铜及铜合金、轴承合金、硬质合金和钛合金、镁合金等。

能，可划分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。前者塑性优良，适于压力加工；后者塑性低，更适于铸造成形。

为黄铜、青铜和白铜三大类。以 Zn 为主要合金元素的为黄铜；以 Ni 为主要合金元素的为白铜；其它铜合金习惯上都称为青铜。

5.1.2 合金元素在钢中的作用

各类元素，尤其是合金元素的加入在金属材料中都会对材料的组织、性能产生各种各样的影响。为一定目的加入到钢中，能起到改善钢的组织 and 获得所需性能的元素，才称为是合金元素。常用的有 Cr、Mn、Si、Ni、Mo、W、V、Co、Ti、Al、Cu、B、N、稀土等。合金元素在钢中的作用，主要表现为合金元素与铁、碳之间的相互作用以及对铁碳相图和热处理相变过程的影响。

实际使用的非合金钢并不是单纯的铁碳合金，由于冶炼时所用原料以及冶炼工艺方法等影响，钢中总不免有少量其它元素存在，如 Si、Mn、S、P 等，这些元素一般作为杂质看待。它们的存在对钢性能也有较大影响。

度，Mn 还可与硫形成 MnS，以消除硫的有害作用。

化合物 FeS 形式存在，其与 Fe 形成低熔点共晶体分布在晶界上。钢加热到 1 000 ~ 1 200 进行锻压或轧制时，易晶界熔化，使钢在晶界开裂，这种现象称为热脆。P 在低温时会使材料塑性和韧性显著降低，这种现象称为冷脆。

1. 合金元素对钢基本相的影响

钢的基本相主要是固溶体

大多数合金元素

使铁素体的强度、硬度升高，塑性、韧性下降，如图 5.1.1 所示。

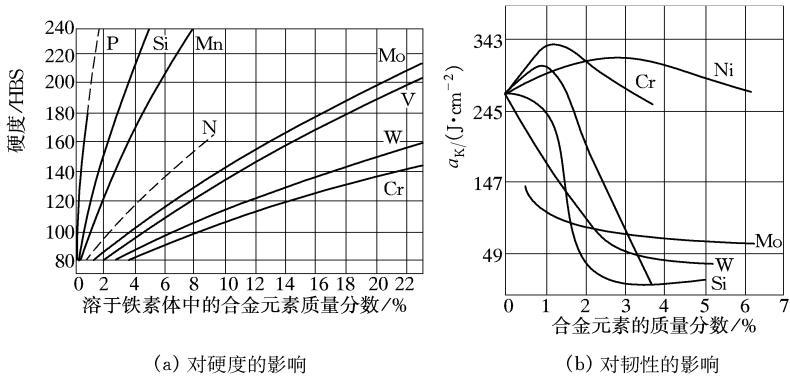


图 5.1.1 合金元素对铁素体力学性能的影响

有些合金元素可与碳作用形成碳化物，这类元素称为碳化物形成元素，有 Fe、Mn、Cr、Mo、W、V、Nb、Zr、Ti 等

就越稳定，硬度就越高。由于与碳的亲合力强弱不同及含量不同，合金元素可以形成不同类型的碳化物：

渗碳体，如 Cr_7C_3 、 Fe_3W_3C 等；

碳化物到特殊碳化物，稳定性及硬度依次升高。碳化物的稳定性越高，高温下就越难溶于奥氏体，也越不易聚集长大。随着碳化物数量的增加，钢的硬度、强度提高，塑性和韧性下降。

非碳化物形成元素 Ni、Si、Al、Co、Cu 等与碳亲和力很弱，不形成碳化物。

2. 合金元素对 Fe - Fe₃C 相图的影响

Fe - Fe₃C 相图是以铁和碳两种元素为基本组元的相图。如果在这两种元素的基础上加入一定量的合金元素，必将使 Fe - Fe₃C 相图的相区和转变点等发生变化。

Ni、Mn 等合金元素使单相奥氏体区扩大，即使 A_1 线、 A_3 线下降。若其含量足够高，可使单相奥氏体区扩大至常温，即可在常温下保持稳定的单相奥氏体组织。利用合金元素扩大奥氏体相区的作用可生产出奥氏体钢。

Cr、Mo、Ti、Si、Al 等合金元素使单相奥氏体区缩小，即使 A_1 线、 A_3 线升高，当其含量足够高时，可使钢在高温与常温均保持铁素体组织，这类钢称为铁素体钢。

S、E 点的影响

合金元素都使 Fe - Fe₃C 相图的 S 点和 E 点向左移，即使钢的共析含碳量和奥氏体对碳的最大固溶度降低。若合金元素含量足够高，可以在 $w_C = 0.4\%$ 的钢中产生过共析组织，在 $w_C = 1.0\%$ 的钢中产生莱氏体。例如，在高速钢 ($w_C = 0.7\% \sim 0.8\%$)

体，故可称之为莱氏体钢。

3. 合金元素对钢热处理的影响

我们原来了解的热处理原理和工艺主要是针对铁碳合金的，如果加入了合金元素，则热处理的加热、冷却和回火转变都会原来的基础上发生一定的变化。

合金钢的奥氏体形成过程基本上与非合金钢相同，但合金钢的奥氏体化比非合金钢需要的温度更高，保温时间更长。由于高熔点的合金碳化物、特殊碳化物(化物)易过热。

除 Co 外，大多数合金元素

稳定性提高，从而使钢的淬透性提高。因此，一方面有利于大截面零件的淬透，另一方面可采用较缓和的冷却介质淬火，有利于降低淬火应力，减少变形、开裂。有的钢中提高淬透性元素的含量大，则其过冷奥氏体非常稳定，甚至在空气中冷却也能形成马氏体组织，故可称其为马氏体钢。除 Co、Al 以外，大多数合金元素都使 M_s 点下降，并增加残余奥氏体量。

由于淬火时溶入马氏体的合金元素阻碍马氏体的分解，所以合金钢回火到相同的硬度，需要比非合金钢更高的加热温度，这说明合金元素提高了钢的耐回火性(性)降的能力。

在高合金钢中，W、Mo、V 等强碳化物形成元素在 500~600 回火时，会形成细小弥散的特殊碳化物，使钢回火后硬度有所升高；同时淬火后残余的奥氏体在回火冷却过程中部分转变为马氏体，使钢回火后硬度显著提高；这两种现象都称为“二次硬化”，如图 5.1.2 所示。高的耐回火性和二次硬化使合金钢在较高温度度

刀具及热变形模具等非常重要。合金元素对淬火钢回火后力学性能的不利方面主要是回火脆性。这种脆性主要在含 Cr、Ni、Mn、Si 的调质钢中出现，而 Mo 和 W 可降低这种回火脆性。

5.2 非合金钢

5.2.1 碳素结构钢

碳素结构钢是建筑及工程用非合金结构钢，价格低廉，工艺性能

工字钢、钢筋等)

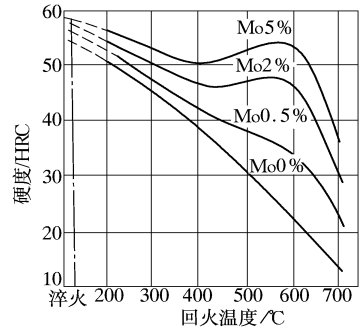


图 5.1.2 $w_c = 0.35\%$ Mo 钢的回火温度与硬度关系曲线

牌号、化学成分及用途。

表 5.2.1 碳素结构钢牌号、化学成分及用途

牌号	等级	化学成分					脱氧方法	相当 GB 700—79 牌号	应用举例
		C	Mn	Si	S	P			
Q195	—	0.06 ~ 0.12	0.25 ~ 0.50	0.30	0.050	0.045	F、b、Z	A1、B1	用于制作钉子、 铆钉、垫块及轻载 荷的冲压件
Q215	A B	0.09 ~ 0.15	0.25 ~ 0.55	0.30	0.050 0.045	0.045	F、b、Z	A2 B2	
Q235	A	0.14 ~ 0.22	0.30 ~ 0.65	0.30	0.050	0.045	F、b、Z	A3 C3	用于制作小轴、 拉杆、连杆、螺栓、 螺母、法兰等不太 重要的零件
	B	0.12 ~ 0.20	0.30 ~ 0.70		0.045				
	C	0.18	0.35 ~ 0.80	0.30	0.040	0.040	Z	—	
	D	0.17			0.035	0.035	TZ	—	
Q255	A B	0.18 ~ 0.28	0.40 ~ 0.70	0.30	0.050 0.045	0.045	Z	A4 C4	用于制作拉杆、 连杆、转轴、心轴、 齿轮和键等
Q275	—	0.28 ~ 0.38	0.50 ~ 0.80	0.35	0.050	0.045	Z	C5	

碳素结构钢的牌号由代表屈服点的汉语拼音首位字母 Q、屈服点数值、质量等级符号、脱氧方法符号等部分按顺序组成。其中，质量等级用 A、B、C、D、E 表示 S、P 含量不同，脱氧方法用 F

可以省略。例如 Q235AF 代表屈服点 $\sigma_s = 235$ MPa、质量为 A 级的沸腾碳素结构钢。

5.2.2 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢是用于制造重要机械结构零件的非合金结构钢，在机械制造中应用极为广泛，一般是经过热处理以后使用，以充分发挥其性能潜力。优质碳素结构钢的牌号用两位数字表示，表示钢中平均碳的质量分数为万分之几。若钢中 Mn 的含量较高时，在数字后面附化学元素符号 Mn。优质碳素结构钢的牌号和用途如表 5.2.2 所示。

表 5.2.2 优质碳素结构钢的用途举例

牌号	用途举例
05F	主要用作冶炼不锈、耐酸、耐热、不起皮钢的炉料，也可代替工业纯铁使用，还用于制造薄板、冷轧钢带等
08 08F	用来制成薄板，制造深冲制品、油桶、高级搪瓷制品，也可用于制成管子、垫片及心部强度要求不高的渗碳和碳氮共渗零件，电焊条等
10 10F	用来制造锅炉管、油桶顶盖、钢带、钢丝、钢板和型材，也可制作机械零件
15 15F	用于制造机械上的渗碳零件、紧固零件、冲锻模件及不需热处理的低负荷零件，如螺栓、螺钉、拉条、法兰盘及化工机械用贮器、蒸汽锅炉等

续表

牌号	用途举例
20 20F	用于不经受很大应力而要求韧性的各种机械零件,如拉杆、轴套、螺钉、起重钩等;也用于制造在 5.884 MPa、450 以下非腐蚀介质中使用的管子、导管等;还可以用于心部强度不大的渗碳与碳氮共渗零件,如轴套、链条的滚子、轴以及不重要的齿轮、链轮等
25	用作热锻和热冲压的机械零件,机床上的渗碳及碳氮共渗零件,以及重型和中型机械制造中负荷不大的轴、辊子、连接器、垫圈、螺栓、螺母等,还可用作铸钢件
30	用作热锻和热冲压的机械零件、冷拉丝、重型和一般机械用的轴、拉杆、套环,以及机械上用的铸件,如气缸、汽轮机机架、轧钢机架和零件、机床机架、飞轮等
35	用作热锻和热冲压的机械零件,冷拉和冷顶锻钢材,无缝钢管,机械制造中的零件,如转轴、曲轴、轴销、杠杆、连杆、横梁、星轮、套筒、轮圈、钩环、垫圈、螺栓、螺母等;还可用来铸造汽轮机机身,轧钢机身、飞轮、均衡器等
40	用来制造机器的运动零件,如辊子、轴、曲柄销、传动轴、活塞杆、连杆、圆盘等,以及火车的车轴
45	用来制造蒸汽轮机、压缩机、泵的运动零件,还可以用来代替渗碳钢制造齿轮、轴、活塞销等零件,但零件需经高频或火焰表面淬火,并可用作铸件
50	用于耐磨性要求高、动载荷及冲击作用不大的零件,如铸造齿轮、拉杆、轧辊、轴摩擦盘、次要的弹簧、农机上的掘土犁铧、重负荷的心轴与轴等
55	用于制造齿轮、连杆、轮圈、轮缘、扁弹簧及轧辊等,也作铸件
60	用于制造轧辊、轴、偏心轴、弹簧圈、各种垫圈、离合器、凸轮、钢丝绳等
65	用于制造气门弹簧、弹簧圈、轴、轧辊、各种垫圈、凸轮及钢丝绳等
70 80	用于制造弹簧
15Mn 20Mn	用于制造中心部分的力学性能要求较高且需渗碳的零件
30Mn	用于制造螺栓、螺母、螺钉、杠杆、刹车踏板;还可以制造在高应力下工作的细小零件,如农机上的钩、环、链等

为适应某些专业的特殊用途,对优质碳素结构钢的成分和工艺作一些调整,并对性能作出补充规定,可派生出锅炉与压力容器、船舶、桥梁、汽车、农机、纺织机械、焊条等一系列专业用钢,并已制定了相应的国家标准。

5.2.3 碳素工具钢

碳素工具钢

常温下使用的工具、模具、量具等。各种牌号的碳素工具钢淬火后的硬度相差不大,但随含碳量增加,未溶的二次渗碳体增多,钢的耐磨性提高,韧性降低。因此,不同牌号的工具钢适用于不同用途的工具。碳素工具钢的牌号是在 T

示钢的平均碳的质量分数为千分之几。例如 T9 表示平均 $w_c = 0.9\%$ 的碳素工具钢。碳素工具钢都是优质钢,若钢号末尾标 A,表示该钢是高级优质钢。常用碳素工具钢的牌号、成分、硬度和用途如表 5.2.3 所示。本标准中的全部钢号均属于特殊质量非合金钢。

表 5.2.3 碳素工具钢的牌号、成分、硬度和用途

牌号	化学成分 $w_{Me}/\%$			硬 度			用 途 举 例
	C	Mn	Si	退火状态	试样淬火		
				/HBS 不大于	淬火温度/ 和淬火介质	/HRC	
T7	0.65 ~ 0.74	0.40	0.35	187	800 ~ 820、水	62	用于承受振动、冲击、硬度适中 有较好韧性的工具，如凿子、冲头、 木工工具、大锤等
T8	0.75 ~ 0.84	0.40	0.35	187	780 ~ 800、水	62	有较高硬度和耐磨性的工具，如 冲头、木工工具、剪切金属用剪刀 等
T8Mn	0.80 ~ 0.90	0.40 ~ 0.60	0.35	187	780 ~ 800、水	62	与 T8 钢相似，但淬透性高，可制 造截面较大的工具
T9	0.85 ~ 0.94	0.40	0.35	192	760 ~ 780、水	62	一定硬度和韧性的工具，如冲模、 冲头、凿岩石用凿子
T10	0.95 ~ 1.04	0.40	0.35	197	760 ~ 780、水	62	耐磨性要求较高，不受剧烈振动， 具有一定韧性及锋利刃口的各种工 具，如刨刀、车刀、钻头、丝锥、 手锯锯条、拉丝模、冷冲模等
T11	1.05 ~ 1.14	0.40	0.35	207	760 ~ 780、水	62	
T12	1.15 ~ 1.24	0.40	0.35	207	760 ~ 780、水	62	不受冲击、高硬度的各种工具， 如丝锥、锉刀、刮刀、铰刀、板牙、 量具等
T13	1.25 ~ 1.35	0.40	0.35	217	760 ~ 780、水	62	不受振动、要求极高硬度的各种 工具，如剃刀、刮刀、刻字刀具等

5.2.4 易切削结构钢

易切削钢是钢中加入一种或几种元素，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，来改善钢材的切削加工性。目前常用元素是 S、P、Pb、Ca 等。易切削结构钢的牌号是在同类结构钢牌号前冠以“Y”，以区别其它结构用钢。例如 Y15Pb 中 $w_S = 0.05\% \sim 0.10\%$ ， $w_P = 0.23\% \sim 0.33\%$ ， $w_{Pb} = 0.15\% \sim 0.35\%$ 。采用高效专用自动机床加工的零件，大多用低碳易切削钢。Y12、Y15 是硫磷复合低碳易切钢，用来制造螺栓、螺母、管接头等不重要的标准件；Y45Ca 钢适合于高速切削加工，比用 45 钢提高生产效率一倍以上，用来制造重要的零件如机床的齿轮轴、花键轴等热处理零件。

5.2.5 工程用铸造碳钢

在机械制造业中，许多形状复杂，用锻造方法难以生产，力学性能要求比铸铁高的零件，可用碳钢铸造生产。铸造碳钢广泛用于制造重型机械、矿山机械、冶金机械、机车车辆的某些零件、构件。铸造碳钢的铸造性能比铸铁差。工程用铸造碳钢的牌号前面是 ZG

汉语拼音字首)

牌号、成分和力学性能和用途如表 5.2.4 所示。

表 5.2.4 工程用铸造碳钢的牌号、成分和用途

牌 号	主要化学成分 $w_{Me}/\%$				室温力学性能					用 途 举 例
	C	Si	Mn	PS	$\sigma_s^{(0.2)}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	A_{KV} /J	
ZG200 - 400	0.20	0.50	0.80	0.04	200	400	25	40	30	良好的塑性、韧性和焊接性，用于受力不大的机械零件，如机座、变速箱壳等
ZG230 - 450	0.30	0.50	0.90	0.04	230	450	22	32	25	一定的强度和好的塑性、韧性，焊接性良好。用于受力不大、韧性好的机械零件，如砧座、外壳、轴承盖、阀体、犁柱等
ZG270 - 500	0.40	0.50	0.90	0.04	270	500	18	25	22	较高的强度和较好的塑性、铸造性良好，焊接性尚好，切削性好。用于轧钢机机架、轴承座、连杆、箱体、曲轴、缸体等
ZG310 - 570	0.50	0.60	0.90	0.04	310	570	15	21	15	强度和切削性良好，塑性、韧性较低。用于载荷较高的大齿轮、缸体、制动轮、辘子等
ZG340 - 640	0.60	0.60	0.90	0.04	340	640	10	18	10	有高的强度和耐磨性，切削性好，焊接性较差，流动性好，裂纹敏感性较大。用作齿轮、棘轮等

5.3 合金钢

合金钢的编号是按照合金钢中的含碳量及所含合金元素的种类(元素符号)

的。一般，钢号的首部是表示碳的平均质量分数的数字，表示方法与优质碳素钢的编号是一致的。对于结构钢，以万分之几计，对于工具钢以千分之几计。当钢中某合金元素的平均质量分数 $w_{Me} < 1.5$ 时，钢号中只标出元素符号，不标明含量；当 $w_{Me} = 1.5 \sim 2.5$ 、 $2.5 \sim 3.5$ 、... 时，在该元素后面相应地用整数 2、3、... 注出其近似含量。

$w_C = 0.6\%$ 、 $w_{Si} > 1.5\%$ 、 $w_{Mn} < 1.5\%$ 的合金结构钢；09Mn2 表示平均 $w_C = 0.09\%$ 、 $w_{Mn} > 1.5\%$ 的合金结构钢。钢中 V、Ti、Al、B、稀土 RE 表示)

轴承钢有自己独特的牌号。牌号前面以“G”

千分之几表示，其余与合金结构钢牌号规定相同，例如 GCr15SiMn 钢。

$w_C < 1.0\%$ 时，如前所述，牌号前以千分之几

$w_C = 1\%$ 时，为了避免与结构钢相混淆，牌号前不标数字。例如 9Mn2V 表示平均 $w_C = 0.9\%$ 、 $w_{Mn} = 2\%$ 、含少量 V 的合金工具钢；CrWMn 钢号前面没有数字，表示钢中平均 $w_C > 1.0\%$ 。高速工具钢牌号中则不标出含碳量。

$w_C = 0.08\%$ 及 $w_C = 0.03\%$

时，在牌号前面分别冠以“0”及“00”，例如 0Cr19Ni9、0Cr13Al 等。

5.3.1 低合金钢

低合金钢是一类可焊接的低碳低合金工程结构用钢，主要用于房屋、桥梁、船舶、车辆、铁道、高压容器及大型军事工程等工程结构件。这些构件的特点是尺寸大，需冷弯及焊接成形，形状复杂，大多在热轧或正火条件下使用，且可能长期处于低温或暴露于一定环境介质中。因而要求钢材必须具有：

接性；

1. 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢的主要合金元素有 Mn、V、Ti、Nb、Al、Cr、Ni 等。Mn 有固溶强化铁素体、增加并细化珠光体的作用；V、Ti、Nb 等主要作用是细化晶粒；Cr、Ni 可提高钢的冲击韧度，改善钢的热处理性能，提高钢的强度，并且 Al、Cr、Ni 均可提高对大气的抗蚀能力。为改善钢的性能，高性能级别钢可加入 Mo、稀土等元素。钢的牌号用途以及新、旧标准对比等见表 5.3.1。

表 5.3.1 新旧低合金高强度钢标准牌号对照及用途举例

新标准	旧标准	用途举例
Q295	09MnV, 09MnNb, 09Mn2, 12Mn	车辆的冲压件、冷弯型钢、螺旋焊管、拖拉机轮圈、低压锅炉气包、中低压化工容器、输油管道、储油罐、油船等
Q345	12MnV, 14MnNb, 16Mn, 18Nb, 16MnRE	船舶、铁路车辆、桥梁、管道、锅炉、压力容器、石油储罐、起重及矿山机械、电站设备、厂房钢架等
Q390	15MnTi, 16MnNb, 10MnPNbRE, 15MnV	中高压锅炉汽包、中高压石油化工容器、大型船舶、桥梁、车辆、起重机及其它较高载荷的焊接结构件等
Q420	15MnVN, 14MnVTiRE	大型船舶、桥梁、电站设备、起重机械、机车车辆、中压或高压锅炉及容器及其大型焊接结构件等
Q460		可淬火加回火后用于大型挖掘机、起重运输机械、钻井平台等

2. 低合金专业用钢

为了适应某些专业的特殊需要，对低合金高强度结构钢的成分、工艺及性能作相应的调整和补充规定，从而发展了门类众多的低合金专业用钢。例如锅炉、各种压力容器、船舶、桥梁、汽车、农机、自行车、矿山、建筑钢筋等，许多已纳入国家标准。

汽车用低合金钢是一类用量极大的专业用钢，广泛用于汽车大梁、托架及车壳等结构件。主要包括冲压性能良好的低强度钢（梁等）

5.3.2 机械结构用合金钢

机械结构用合金钢主要用于制造各种机械零件，其质量等级都属于特殊质量等级，大多须经热处理后才能使用，按其用途、热处理特点可分为渗碳钢、调质钢、弹簧钢、滚动轴承钢、超高强度钢等。

1. 合金渗碳钢

合金渗碳钢通常是指经渗碳淬火、低温回火后使用的合金钢。合金渗碳钢主要用于制造承受强烈冲击载荷和摩擦磨损的机械零件。如汽车、拖拉机中的变速齿轮，内燃机上的凸轮轴、活塞销等。工作表面具有高硬度、高耐磨性，心部具有良好的塑性和韧性。

20CrMnTi 是应用最广泛的合金渗碳钢，用于制造汽车拖拉机的变速齿轮、轴等零件。合金渗碳钢的热处理一般是渗碳后淬火加上低温回火。热处理使表层获得高碳回火马氏体加碳化物，硬度一般为 58~64 HRC；而心部组织则视钢的淬透性高低及零件尺寸的大小而定，可得到低碳回火马氏体或珠光体加铁素体组织。表 5.3.2 列出了常用合金渗碳钢的牌号、热处理、力学性能与用途。

表 5.3.2 常用合金渗碳钢的牌号、热处理、力学性能与用途

牌 号	热处理工艺			力学性能				用 途 举 例
	第一次 淬火/ 油	第二次 淬火/ 油	回火 / 空	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	A_{kv} /J	
20Cr	880 水、油	800 水、油	200 水、空	835	540	10	47	截面在 30 mm 以下载荷不大的零件，如机床及小汽车齿轮、活塞销等
20CrMnTi	880 油	870 油	200 水、空	1 080	835	10	55	汽车、拖拉机截面在 30 mm 以下，承受高速、中或重载荷以及受冲击、摩擦的重要渗碳件，如齿轮、轴、齿轮轴、爪形离合器、蜗杆等
20MnVB	860 油		200 水、空	1 080	885	10	55	模数较大、载荷较重的中小渗碳件，如重型机床齿轮、轴，汽车后桥主动、被动齿轮等淬透性件

续表

牌 号	热处理工艺			力学性能				用 途 举 例
	第一次 淬火/	第二次 淬火/	回火 /	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	A_{kv} /J	
12Cr2Ni4	860 油	780 油	200 水、空	1 080	835	10	71	大截面、载荷较高、缺口敏感性低的重要零件，如重型载重车、坦克的齿轮等
18Cr2Ni4WA	950 空	850 空	200 水、空	1 175	835	10	78	截面更大、性能要求更高的零件，如大截面的齿轮、传动轴、精密机床上控制进刀的蜗轮等

2. 合金调质钢

合金调质钢是指经调质后使用的钢。合金调质钢主要用于制造在重载荷下同时又受冲击载荷作用的一些重要零件，如汽车、拖拉机、机床等上的齿轮、轴类件、连杆、高强度螺栓等。它是机械结构用钢的主体，要求零件具有高强度、高韧性相结合的良好综合力学性能。

最典型的钢种是 40Cr，用于制造一般尺寸的重要零件。调质钢的最终热处理为淬火后高温回火。表面有良好耐磨性的，则可在调质后进行表面淬火或氮化处理。表 5.3.3 列出了常用合金调质钢的牌号、热处理、力学性能与用途。

表 5.3.3 常用合金调质钢的牌号、热处理、力学性能及用途

牌 号	热 处 理		力 学 性 能					用 途 举 例
	淬火/	回火/	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	δ /%	A_{kv} /J	
40Cr	850 油	520 水、油	980	785	9	45	47	汽车后半轴、机床齿轮、轴、花键轴、顶尖套等
40MnB	850 油	500 水、油	980	785	10	45	47	代替 40Cr 钢制造中、小截面重要调质件等
35CrMo	850 油	550 水、油	980	835	12	45	63	受冲击、振动、弯曲、扭转载荷的机件，如主轴、大电机轴、曲轴、锤杆等
38CrMoA1	940 油	640 水、油	980	835	14	50	71	制作磨床主轴、精密丝杆、精密齿轮、高压阀门、压缩机活塞杆等
40CrNiMoA	850 油	600 水、油	980	835	12	55	78	韧性好、强度高及大尺寸重要调质件，如重型机械中高载荷轴类、直径大于 250 mm 汽轮机轴、叶片、曲轴

3. 合金弹簧钢

合金弹簧钢是专用结构钢，主要用于制造弹簧等弹性元件。弹簧类零件应有高的弹性极限和屈强比 (σ_s/σ_b)

60Si2Mn 钢是典型的合金弹簧钢。弹簧钢热处理一般是淬火后中温回火，获得回火托氏体组织。表 5.3.4 列出了常用合金弹簧钢的牌号、热处理、力学性能及用途。

表 5.3.4 常用合金弹簧钢的牌号、热处理、力学性能与用途

牌 号	热处理		力学性能			用 途 举 例
	淬火/	回火/	σ_b /MPa	σ_s /MPa	σ_s/σ_b /%	
55Si2Mn	870 油	480	1 274	1 176	30	用途广，汽车、拖拉机、机车上的减振板簧和螺旋弹簧，气缸安全阀簧等
60Si2CrA	870 油	420	1 764	1 568	20	用作承受高应力及 300 ~ 350 MPa 以下的弹簧，如汽轮机汽封弹簧、破碎机用弹簧等
50CrVA	850 油	500	1 274	1 127	40	用作高载荷重要弹簧及工作温度 < 300℃ 的阀门弹簧、活塞弹簧、安全阀弹簧等
30W4Cr2VA	1 050 ~ 1 100 油	600	1 470	1 323	40	用作工作温度 500℃ 的耐热弹簧，如锅炉主安全阀弹簧、汽轮机汽封弹簧等

4. 滚动轴承钢

滚动轴承钢主要用于制造滚动轴承的内、外套圈以及滚动体，此外还可用于制造某些工具，例如模具、量具等。滚动轴承在工作时承受很大的交变载荷和极大的接触应力，受到严重的摩擦磨损，并受到冲击载荷、大气和润滑介质腐蚀的作用。这就要求轴承钢必须具有高而均匀的硬度和耐磨性、高的接触疲劳强度、足够的韧性和对大气等的耐蚀能力。

我国目前以 G 轴承钢应用最广。最有代表性的是 GCr15。滚动轴承的最终热处理是淬火并低温回火，组织为极细的回火马氏体、均匀分布的细粒状碳化物及微量的残余奥氏体，硬度为 61 ~ 65 HRC。表 5.3.5 列出了常用滚动轴承钢的牌号、化学成分、热处理及用途。

表 5.3.5 常用滚动轴承钢的牌号、化学成分、热处理及用途

牌 号	化学成分 w_{Me} /%						热处理			用 途 举 例
	C	Si	Mn	Cr	P	S	淬火/	回火/	回火/HRC	
GCr9	1.00 ~ 1.10	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	0.90 ~ 1.20		0.025	810 ~ 830	150 ~ 170	62 ~ 66	一般工作条件下小尺寸的滚动体和内、外套圈

续表

牌 号	化学成分 $w_{Me}/\%$						热处理			用 途 举 例
	C	Si	Mn	Cr	P	S	淬火/	回火/	回火/HRC	
GCr15	0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	1.40 ~ 1.65		0.025	825 ~ 845	150 ~ 170	62 ~ 66	广泛用于汽车、拖拉机、内燃机、机床及其它工业设备上的轴承
GCr15SiMn	0.95 ~ 1.05	0.45 ~ 0.75	0.95 ~ 1.25	1.40 ~ 1.65		0.025	825 ~ 845	150 ~ 180	> 62	大型轴承或特大轴承 (mm) 外套圈

5.3.3 合金工具钢和高速工具钢

合金工具钢与碳素工具钢相比，主要是合金元素提高了钢的淬透性、热硬性和强韧性。合金工具钢通常按用途分类，有量具刀具钢、耐冲击工具钢、冷作模具钢、热作模具钢、无磁工具钢和塑料模具钢。高速工具钢

1. 合金工具钢

a. 用途与性能特点

主要用于制造形状较复杂、截面尺寸较大的低速切削刀具，如铰刀、丝锥、成形刀、钻头等金属切削刀具。也用于制造如卡尺、千分尺、块规、样板等在机械制造过程中控制加工精度的测量工具。刀具切削时受切削力作用且切削发热，还要承受一定的冲击与振动，因此刀具钢要具有高强度、高硬度、高耐磨性、高的热硬性和足够的塑性与韧性。而量具在使用过程中主要受磨损，因此量具应该有较高的硬度和耐磨性，高的尺寸稳定性以及一定的韧性。

b. 常用钢种及热处理特点

常用量具刀具钢的牌号、成分、热处理和用途列于表 5.3.6。对简单量具如卡尺、样板、直尺、量规等也多用 T10A 等碳素工具钢制造，一些模具钢和滚动轴承钢也可用来制造量具。刀具的最终热处理为淬火并低温回火。对量具在淬火后还应立即进行 - 80 ~ - 70 的冷处理，使残余奥氏体尽可能地转变为马氏体，以保证量具尺寸的稳定性。

表 5.3.6 常用量具刀具钢的牌号、成分、热处理和用途

牌 号	化学成分 $w_{Me}/\%$						热处理		用 途 举 例
	C	Si	Mn	Cr	P	S	淬火/	淬火后 /HRC	
					不大于				
9SiCr	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.95 ~ 1.25		0.03	820 ~ 860 油	62	板牙、丝锥、钻头、铰刀、齿轮铣刀、拉刀等，还可作冷冲模、冷轧辊等

续表

牌号	化学成分 $w_e/\%$						热处理		用途举例
	C	Si	Mn	Cr	P	S	淬火/ 水	淬火后 /HRC	
					不大于				
Cr06	1.30 ~ 1.45	0.40	0.40	0.50 ~ 0.70	0.03		780 ~ 810 水	64	作剃刀、刀片、手术刀具以及刮刀、刻刀等
Cr2	0.95 ~ 1.10	0.40	0.40	1.30 ~ 1.65	0.03		830 ~ 860 油	62	用作加工材料不很硬的低速切削刀具, 可作样板、量规、冷轧辊等
9Cr2	0.80 ~ 0.95	0.40	0.40	1.30 ~ 1.70	0.03		820 ~ 850 油	62	主要用作冷轧辊、钢印、冲孔凿、冷冲模、冲头量具及木工工具等

制造模具的材料很多, 非合金工具钢、高速钢、轴承钢、耐热钢等都可制作各类模具, 用得最多的是合金工具钢。根据用途模具用钢可分为冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢。

a. 用途与性能特点

冷作模具钢用于制作使金属冷塑性变形的模具, 如冷冲模、冷镦模、冷挤压模等, 工作温度不超过 200 ~ 300 。热作模具钢用于制作使金属在高温下塑变成形的模具, 如热锻模、热挤压模、压铸模等, 工作时型腔表面温度可达 600 以上。塑料模具钢主要用作塑料成形的模具。冷作模具在工作时承受较大的弯曲应力、压力、冲击及摩擦。因此冷作模具钢应具有高硬度、高耐磨性和足够的强度、韧性。这与对刀具钢的性能要求较为相似。热作模具的工作条件与冷作模具有很大不同。其在工作时承受很大的压力和冲击, 并反复受热和冷却, 因此要求热作模具钢在高温下具有足够的强度、硬度、耐磨性和韧性, 以及良好的耐热疲劳性, 即在反复的受热、冷却循环中, 表面不易热疲劳

b. 常用钢种及热处理特点

尺寸较小的冷作模具可选用 9Mn2V、CrWMn 等, 承受重载荷、形状复杂、要求淬火变形小、耐磨性高的大型模具, 则必须选用淬透性大的高铬、高碳的 Cr12 型冷作模具钢或高速钢。常用的热作模具钢有 5CrNiMo 等。冷作模具钢的最终热处理一般是淬火后低温回火, 硬度可达到 62 ~ 64 HRC。热作模具钢的最终热处理为淬火后高温

常用的冷作模具钢牌号、化学成分、热处理及用途列于表 5.3.7 中。常用的热作模具钢的牌号、化学成分、热处理及用途列于表 5.3.8 中。部分塑料模具钢见表 5.3.9。

表 5.3.7 常用冷作模具钢的牌号、化学成分、热处理及用途

牌号	化学成分 $w_e/\%$							热处理		用途举例
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	淬火/ 油	/HRC	
Cr12	2.00 ~ 2.30	0.40	0.40	11.50 ~ 13.00				950 ~ 1 000 油	60	冷冲模、冲头、钻套、量规、螺纹滚丝模、拉丝模等

续表

牌号	化学成分 $w_{Me}/\%$							热处理		用途举例
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	淬火/ 油	/HRC	
Cr12MoV	1.45 ~1.70	0.40	0.40	11.00 ~12.50		0.40 ~0.60	0.15 ~0.30	950~1000 油	58	截面较大、形状复杂、工作条件繁重的各种冷作模具等
9Mn2V	0.85 ~0.95	0.40	1.70 ~2.00				0.10 ~0.25	780~810 油	62	要求变形小、耐磨性高的量规、块规、磨床主轴等
CrWMn	0.90 ~1.05	0.40	0.80 ~1.10	0.90 ~1.20	1.20 ~1.60			800~830 油	62	淬火变形很小、长而形状复杂的切削刀具及形状复杂、高精度的冷冲模

表 5.3.8 常用热作模具钢的牌号、化学成分、热处理及用途

牌号	化学成分 $w_{Me}/\%$							交货状态 (退火)	热处理 淬火/ 油	用途举例
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V			
5CrMnMo	0.50 ~0.60	0.25 ~0.60	1.20 ~1.60	0.60 ~0.90		0.15 ~0.30		197~241	820 ~850, 油	中小型锤锻模 (300~400 mm) 铸模
5CrNiMo	0.50 ~0.60	0.40	0.50 ~0.80	0.50 ~0.80		0.15 ~0.30		197~241	830 ~860, 油	形状复杂、冲击载荷大的各种大、中型锤锻模
3Cr2W8V	0.30 ~0.40	0.40	0.40	2.20 ~2.70	7.50 ~9.00		0.20 ~0.50	207~255	1075 ~1125, 油	压铸模、平锻机凸模和凹模、镶块、热挤压模等
4Cr5W2VSi	0.32 ~0.42	0.80 ~1.20	0.40	4.50 ~5.50	1.60 ~2.40		0.60 ~1.00	229	1030 ~1050 油或空冷	高速锤用模具与冲头、热挤压用模具、有色金属压铸模等

表 5.3.9 常用塑料模具及其用钢

模具类型及工作条件	推荐用钢
中小模具、精度不高、受力不大、生产规模小的模具	45 40Cr T10 10 20 20Cr
受磨损较大、受较大动载荷、生产批量大的模具	20Cr 12CrNi3 20Cr2Ni4 20CrMnTi
大型复杂的注射成形模或挤压成形模	4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 4Cr3Mo3SiV 5CrNiMnMoVSCa
热固性成形模，高耐磨高强度的模具	9MnV CrWMn GCr15 Cr12 G-12MoV 7CrSiMnMoV
耐腐蚀、高精度模具	2Cr13 4Cr13 9Cr18 Cr18MoV 3Cr2Mo G-14Mo4V 8Cr2MnWMoVS 3G-17Mo
无磁模具	7Mn15Cr2Al3V2WMo

2. 高速工具钢

高速工具钢要求具有高强度、高硬度、高耐磨性以及足够的塑性和韧性。由于在高速切削时，其温度可高达 600℃，因此要求此时其硬度仍无明显下降，要具有良好的热硬性。

通用型高速钢代表钢种有表 5.3.10 所示两种，在此基础上改变基本成分或添加 Co、Al、RE 等，派生出许多新钢种。近年又研制超硬型高速钢、粉末冶金高速钢及其它新的钢号，使用效果良好。高速钢的热处理特点主要是淬火加热温度高

表 5.3.10 常用高速工具钢的牌号、化学成分、热处理及硬度

牌 号	化学成分 $w_{Me}/\%$						热 处 理				
	C	Mn	Cr	V	W	Mo	预热 温度/	淬火温度/		回火 温度/	/HRC
								盐浴炉	箱式炉		
W18Cr4V	0.70	0.10	3.80	1.00	17.50	0.30	820 ~ 870	1 270~	1 270~	550 ~ 570	63
	~ 0.80	~ 0.40	~ 4.40	~ 1.40	~ 19.00			1 285, 油	1 285, 油		
W6Mo5Cr4V2	0.80	0.15	3.80	1.75	5.50	4.50 ~ 5.50	730~ 840	1 210~	1 210~	540 ~ 560	63 64
	~ 0.90	~ 0.40	~ 4.40	~ 2.20	~ 6.75			1 230, 油	1 230, 油		

5.3.4 特殊性能钢

特殊性能钢指具有某些特殊的物理、化学、力学性能，因而能在特殊的环境、工作条件下使用的钢。工程中常用的特殊性能钢有不锈钢、耐热钢、耐磨钢等。

1. 不锈钢

不锈钢通常是不锈钢和耐酸钢的统称。能够抵抗空气、蒸汽和水等弱腐蚀性介质腐蚀的钢为不锈钢；在酸、碱、盐等强腐蚀性介质中能够抵抗腐蚀的钢为耐酸钢。不锈钢主要用来制造在各种腐蚀介质中工作的零件或构件，例如化工装置中的各种管道、阀门和泵，医疗手术器械，防锈刀具和量具等。对不锈钢性能的要求，最重要的是耐蚀性能，还要有合适的力学性能，良好的冷、热加工和焊接工艺性能。不锈钢的耐蚀性要求愈高，碳含量应愈低。加入 Cr、Ni 等合金元素可提高钢的耐蚀性。

铬不锈钢包括马氏体不锈钢和铁素体不锈钢两种类型。其中 Cr13 型不锈钢属马氏体不锈钢，可淬火获得马氏体组织，热处理是淬火和回火。当含 Cr 量较高时，铬不锈钢的组织为单相铁素体，如 1Cr17 钢，其耐蚀性优于马氏体不锈钢，通常在退火状态下使用。铬镍不锈钢经 1 100℃ 水淬固溶处理，在常温下呈单相奥氏体组织，故又称奥氏体不锈钢。奥氏体不锈钢无磁性，耐蚀性优良，塑性、韧性、焊接性优于别的不锈钢，是应用最为广泛的一类不锈钢。由于奥氏体不锈钢固态下无相变，所以不能热处理强化。冷变形强化是有效的强化方法。常用不锈钢的牌号、成分、性能及主要用途见表 5.3.11。

表 5.3.11 常用不锈钢的牌号、成分、性能及主要用途

类别	钢号	化学成分			热处理		力学性能				用途举例
		w_C / %	w_{Cr} / %	其它 w_{Me}	淬火 /	回火 /	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ / %	硬度	
马氏体钢	1Cr13 (GB 1221—84)	0.15	12~14	—	1 000 ~ 1 050 水、油	700 ~ 790	420	600	20	187 HB	汽轮机叶片、水压机阀、螺栓、螺母等耐弱腐蚀介质并承受冲击的零件
	2Cr13	0.16 ~ 0.25	12~14	—	1 000 ~ 1 050 水、油	660 ~ 770	450	600	16	197 HB	
	3Cr13	0.25 ~ 0.40	12~14	—	1 000 ~ 1 050 油	200 ~ 300	—	—	—	48 HRC	做耐磨的零件, 如加油泵轴、阀门零件、轴承、弹簧以及医疗器械
	4Cr13 (GB 1220—75)	0.35 ~ 0.45	12~14	—	1 050 ~ 1 100 油	200 ~ 300	—	—	—	50 HRC	
铁素体钢	0Cr13	0.08	12~14	—	1 000 ~ 1 050 水、油	700 ~ 790	350	500	24	—	耐水蒸气及热含硫石油腐蚀的设备
	1Cr17	0.12	16~18	—	—	750 ~ 800	250	400	20	—	硝酸工厂、食品工厂的设备
	1Cr28	0.15	27~30	—	—	700 ~ 800	300	450	20	—	制浓硝酸的设备
	1Cr17Ti	0.12	16~18	Ti : 5 × C % ~ 0.8 %	—	700 ~ 800	300	450	20	—	同 1Cr17, 但晶间腐蚀抗力较高
奥氏体钢	0Cr19Ni9	0.08	18~20	Ni : 8 % ~ 10.5 %	固溶处理 1 050 ~ 1 100 水	—	180	490	40	—	深冲零件、焊 NiCr 钢的焊芯
	1Cr19Ni9	0.04 ~ 0.10	18~20	Ni : 8 % ~ 11 %	固溶处理 1 100 ~ 1 150 水	—	200	550	45	—	耐硝酸、有机酸、盐、碱溶液腐蚀的设备
	1Cr18Ni9Ti	0.12	17~19	Ni : 8 % ~ 11 % Ti : 0.8 % ~ 5 % (C % ~ 0.02 %)	固溶处理 1 000 ~ 1 100 水	—	200	550	40	—	做焊芯、抗磁仪表、医疗器械、耐酸容器、输送管道

注：奥氏体不锈钢中 $w_{Si} < 1\%$ 、 $w_{Mn} < 2\%$ ，其余钢中 Si、Mn 的质量分数一般不大于 0.8%。

2. 耐热钢

耐热钢主要用于热工动力机械

加热炉等高温条件工作的构件。对这类钢主要要求其耐热性要好。钢的耐热性是指高温抗氧化性和高温强度的综合性能。此外还应有适当的物理性能，如热膨胀系数小和良好的导热性，以及较好的加工工艺性能等。

耐热钢按性能和用途可分为抗氧化钢和热强钢两类。抗氧化钢主要用于长期在燃烧环境中工作、有一定强度的零件，如各种加热炉底板、辊道、渗碳箱、燃气轮机燃烧室等。热强钢的特点是在高温下不仅有良好的抗氧化能力，而且有较高的高温强度及较高的高温强度保持能力。例如汽轮机、燃气轮机的转子和叶片、内燃机的排气阀等零件。长期在高温下承载工作，即使所受应力小于材料的屈服极限，也会缓慢而持续的产生塑性变形，这种塑性变形称为蠕变，最终将导致零件断裂或损坏。表 5.3.12 列举了几种常用耐热钢的牌号、使用温度及用途。

表 5.3.12 常用耐热钢的牌号、使用温度及用途

类别	牌 号	使用温度/		用 途 举 例
		抗氧化性	热强性	
抗 氧 化 钢	1Cr13Si13	900		制造各种承受应力不大的炉用构件，如喷嘴、炉罩、托架、吊挂等
	3Cr18Ni25Si2	1 100		制造热处理炉内构件
热 强 钢	15CrMo	350 ~ 600	350 ~ 600	用作动力、石油部门的锅炉及管道材料
	4Cr10Si2Mo	850	650	内燃机气阀，加热炉构件
	4Cr9Si2	850	650	内燃机气阀，加热炉构件
	1Cr18Ni9Ti	850	650	高压锅炉的过热器，化工高压反应釜，喷气发动机尾喷管
	4Cr14Ni14W2Mo	850	750	内燃机排气阀

3. 耐磨钢

耐磨钢主要用于在运转过程中承受严重磨损和强烈冲击的零件，如铁路道岔、坦克履带、挖掘机铲齿等构件。这类零件用钢应具有表面硬度高、耐磨，心部韧性好、强度高的特点。

高锰钢 ZGMn13 是目前最重要的耐磨钢，其成分特点是高锰、高碳，经固溶化处理可获得单相奥氏体组织。当工作中受到强烈的挤压、撞击、摩擦时，钢件表面迅速产生剧烈的加工硬化，获得耐磨层，而心部仍保持原来的组织和高韧性状态。

5.4 铸铁

5.4.1 铸铁的石墨化

铸铁中的碳除极少量固溶于铁素体以外，大部分碳以两种形式存在：一是碳化物状态，如渗碳体 (Fe_3C)

型为简单六方晶格，如图 5.4.1 所示，其基面中的原子结合力较强，而两基面之间的结合力弱，故石墨的基面很容易滑动，其强度、硬度、塑性和韧性极低，常呈片状形态存在。

铸铁组织中石墨的形成过程称之为石墨化过程。铸铁的石墨化可以有两种方式：一种是石墨直接从液态合金和奥氏体中析出，另一种是渗碳体在一定条件下分解出石墨。铸铁的组织取决于石墨化过程进行的程度，而影响石墨化的主要因素是铸铁的化学成分和冷却速度。

碳与硅是强烈促进石墨化的元素。铸铁的碳、硅含量越高，石墨化进行得越充分。硫是强烈阻碍石墨化的元素，并降低铁水的流动性，使铸铁的铸造性能恶化，其含量应尽可能降低。锰也是阻碍石墨化的元素。但它和硫有很大的亲和力，在铸铁中能与硫形成 MnS ，减弱硫对石墨化的有害作用。

冷却速度对铸铁石墨化的影响也很大。冷却越慢，越有利于石墨化的进行。冷却速度受造型材料、铸造方法和铸件壁厚等因素的影响。例如，金属型铸造使铸铁冷却快，砂型铸造冷却较慢；壁薄的铸件冷却快，壁厚的冷却慢。图 5.4.2 表示化学成分

厚) 到灰铸铁组织，应增加铸铁的碳、硅含量。相反，厚大的铸件，为避免得到过多的石墨，应适当减少铸铁的碳、硅含量。

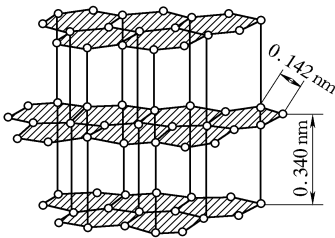


图 5.4.1 石墨的晶体结构

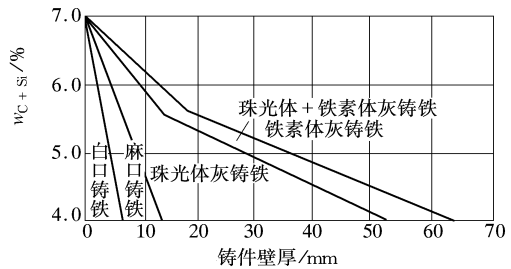


图 5.4.2 铸铁的成分和冷却速度对铸铁组织的影响

5.4.2 常用铸铁

常用铸铁有灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和蠕墨铸铁，它们的组织形态都是由某种基体组织加上不同形态的石墨构成的。铸铁中不同形态的石墨组织如图 5.4.3 所示。

1. 灰铸铁

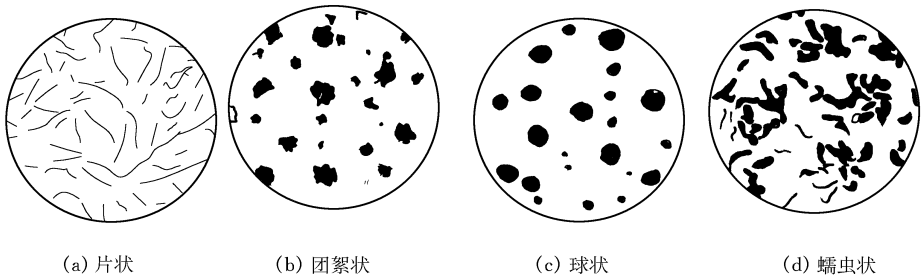


图 5.4.3 铸铁中石墨形态示意图

目前生产中，灰铸铁的化学成分范围一般为： $w_C = 2.5\% \sim 3.6\%$ ， $w_{Si} = 1.0\% \sim 2.5\%$ ， $w_P = 0.3\%$ ， $w_{Mn} = 0.5\% \sim 1.3\%$ ， $w_S = 0.15\%$ 。灰铸铁的性能取决于基体组织和石墨的数量、形状、大小及分布状态。

根据灰铸铁石墨化的程度，可有三种不同的基体组织：铁素体、铁素体 + 珠光体、珠光体



(a) 铁素体灰铸铁



(b) 铁素体 + 珠光体灰铸铁



(c) 珠光体灰铸铁

图 5.4.4 灰铸铁的显微组织

(见图 5.4.4)

基体组织珠光体的量越多，铸铁的强度越高。由此可见，灰铸铁的组织相当于在钢的基体上分布着片状石墨。由于石墨的强度很低，就相当于在钢基体中有许多孔洞和裂纹，破坏了基体的连续性，并且在外力作用下，裂纹尖端处容易引起应力集中，而产生破坏。因此灰铸铁的抗拉强度、疲劳强度都很差，塑性、冲击韧度几乎为零。当基体组织相同时，其石墨越多、片越粗大、分布越不均匀，铸铁的抗拉强度和塑性越低。由于片状石墨对灰铸铁性能的决定性影响，即使基体的组织从珠光体改变为铁素体，也只会降低强度而不会增加塑性和韧性。因此珠光体灰铸铁得到广泛应用。

石墨虽然降低了铸铁的力学性能，但却使铸铁获得了许多钢所不及的优良性能。例如，由于石墨本身的润滑作用，以及它从铸铁表面脱落后留下的孔洞具有储存润滑油的能力，故铸铁又有良好的减摩性；由于石墨组织松软，能够吸收振动，因而铸铁也有良好的减振性。另外石墨相当于零件上的许多小缺口，使工件加工形成的切口作用相对减弱，故铸铁的缺口敏感性低。铸铁在切削加工时，石墨的润滑和断屑作用使灰铸铁有良好的切削加工性；灰铸铁的熔点比钢低，流动性好，凝固过程中析出了比容较大的石墨，减小了收缩率，故具有良好的铸造工艺性，能够铸造形状复杂的零件。

灰铸铁的牌号以“HT”和其后的一组数字表示。其中“HT”表示灰铁二字的汉语拼音字首，其后一组数字表示直径 30 mm 试棒的最小抗拉强度值。灰铸铁的牌号、力学性能及用途如表 5.4.1 所示。

表 5.4.1 灰铸铁牌号、不同壁厚铸件的力学性能和用途

铸 铁 类 别	牌 号	铸件壁厚 /mm	力 学 性 能		用 途 举 例
			σ_b /MPa	/HBS	
铁素体 灰铸铁	HT100	2.5 ~ 10	130	110 ~ 166	适用于载荷小、对摩擦和磨损无特殊要求的不重要零件，如防护罩、盖、油盘、手轮、支架、底板、重锤、小手柄、镶导轨的机床底座等
		10 ~ 20	100	93 ~ 140	
		20 ~ 30	90	87 ~ 131	
		30 ~ 50	80	82 ~ 122	
铁素体 + 珠光体 灰铸铁	HT150	2.5 ~ 10	175	137 ~ 205	承受中等载荷的零件，如机座、支架、箱体、刀架、床身、轴承座、工作台、带轮、法兰、泵体、阀体、管路、附件 (压力不大)
		10 ~ 20	145	119 ~ 179	
		20 ~ 30	130	110 ~ 166	
		30 ~ 50	120	105 ~ 157	
珠光体 灰铸铁	HT200	2.5 ~ 10	220	157 ~ 236	承受较大载荷和要求一定的气密封性或耐腐蚀性等较重要零件，如气缸、齿轮、机座、飞轮、床身、活塞、齿轮箱、刹车轮、联轴器盘、中等压力 泵体、液压缸、阀门等
		10 ~ 20	195	148 ~ 222	
		20 ~ 30	170	134 ~ 200	
		30 ~ 50	160	129 ~ 192	
	HT250	4.0 ~ 10	270	175 ~ 262	
		10 ~ 20	240	164 ~ 247	
		20 ~ 30	220	157 ~ 236	
		30 ~ 50	200	150 ~ 225	

续表

铸铁类别	牌 号	铸件壁厚 /mm	力 学 性 能		用 途 举 例
			σ_b /MPa	/HBS	
孕育铸铁	HT300	10 ~ 20	290	182 ~ 272	承受高载荷、耐磨和高气密性重要零件，如重型机床、剪床、压力机、自动机床的床身、机座、机架、高压液压件、活塞环、齿轮、凸轮、车床卡盘、衬套，大型发动机的气缸体、缸套、气缸盖等
		20 ~ 30	250	168 ~ 251	
		30 ~ 50	230	161 ~ 241	
	HT350	10 ~ 20	340	199 ~ 298	
		20 ~ 30	290	182 ~ 272	
		30 ~ 50	260	171 ~ 257	

为了改善灰铸铁的组织 and 力学性能，生产中常采用孕育处理，即在浇注前向铁水中加入少量孕育剂

细小的珠光体组织。经孕育处理后的灰铸铁称为孕育铸铁。孕育铸铁的强度有较大的提高，塑性和韧性也有改善，一般用于制造力学性能要求较高、截面尺寸变化较大的大型铸件。

由于热处理只能改变灰铸铁的基体组织，不能改变石墨的形状、大小和分布，故灰铸铁的热处理一般只用于消除铸件内应力和白口组织、稳定尺寸、提高工件表面的硬度和耐磨性等。消除应力退火是将铸铁缓慢加热到 500 ~ 600 °C，保温一段时间，随炉降至 200 °C 后出炉空冷。消除白口组织的退火是将铸件加热到 850 ~ 950 °C，保温 2 ~ 5 h，然后随炉冷却到 400 ~ 500 °C，出炉空冷，使渗碳体在高温和缓慢冷却中分解，用以消除白口，降低硬度，改善切削加工性。为了提高某些铸件的表面耐磨性，常采用表面淬火等方法，使工作面体基体 + 石墨组织。

2. 球墨铸铁

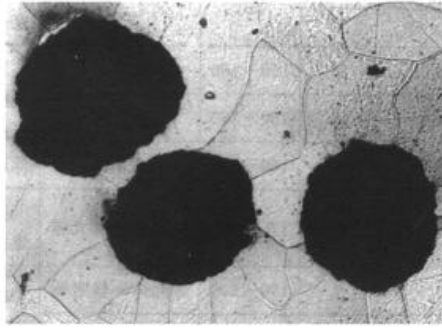
球墨铸铁是将铁水经过球化处理而得到的。球墨铸铁的基体组织上分布着球状石墨，由于球状石墨对基体组织的割裂作用和应力集中作用很小，所以球墨铸铁力学性能远高于灰铸铁，而且石墨球越圆整、细小、均匀则力学性能越高，在某些性能方面甚至可与碳钢相媲美。球墨铸铁同时还具有灰铸铁的减振性、耐磨性和低的缺口敏感性等一系列优点。

在生产中经退火、正火、调质处理、等温淬火等不同的热处理，球墨铸铁可获得不同的基体组织：铁素体、铁素体 + 珠光体、珠光体和贝氏体

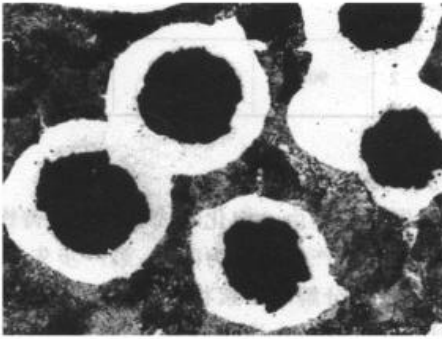
球墨铸铁的牌号用“QT”及其后的两组数字表示。其中“QT”表示球铁二字的汉语拼音字首，后面的两组数字分别表示最低抗拉强度和最低断后伸长率。各种球墨铸铁的牌号、力学性能和用途如表 5.4.2 所示。

3. 可锻铸铁

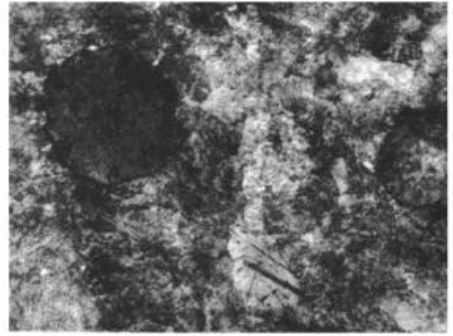
可锻铸铁是由一定化学成分的白口铸铁通过可锻化退火而获得的具有团絮状石墨的铸铁。可锻铸铁的生产过程分为两步，第一步先铸成白口铸铁件，第二步再经高温长时间的可锻化退火，使渗碳体分解出团絮状石墨。可锻铸铁可分为黑心种类型



(a) 铁素体球墨铸铁

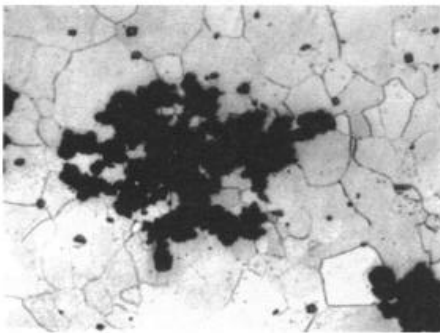


(b) 铁素体 + 珠光体球墨铸铁

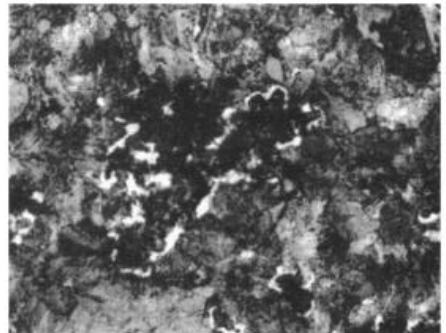


(c) 珠光体球墨铸铁

图 5.4.5 球墨铸铁的显微组织



(a) 铁素体可锻铸铁



(b) 珠光体可锻铸铁

图 5.4.6 可锻铸铁的显微组织

大、成本较高。近年来，不少可锻铸铁件已被球墨铸铁件代替。但可锻铸铁韧性和耐蚀性好，适宜制造形状复杂、承受冲击的薄壁铸件及在潮湿环境中工作的零件，与球墨铸铁相比具有质量稳定、铁水处理简易、易于组织流水线生产等优点。

可锻铸铁的牌号用“KTH”、“KTZ”和后面的两组数字表示。其中“KT”是“可铁”两字的汉语拼音字首，两组数字分别表示最低抗拉强度和最低断后伸长率。常用可锻铸铁的牌号、性能及用途如表 5.4.3 所示。

表 5.4.2 球墨铸铁的牌号、力学性能和用途

牌 号	力 学 性 能				基体组织类型	用 途 举 例
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	/HBS		
	不 大 于					
QT400 - 18	400	250	18	130 ~ 180	铁素体	承受冲击、振动的零件，如汽车、拖拉机轮毂、差速器壳、拨叉、农机具零件、中低压阀门、上下水及输气管道、压缩机高低压气缸、电动机壳、齿轮箱、飞轮壳等
QT400 - 15	400	250	15	130 ~ 180	铁素体	
QT450 - 10	450	310	10	160 ~ 210	铁素体	
QT500 - 7	500	320	7	170 ~ 230	铁素体 + 珠光体	机器座架、传动轴飞轮、电动机架、内燃机的机油泵齿轮、铁路机车车轴瓦等
QT600 - 3	600	370	3	190 ~ 270	珠光体 + 铁素体	
QT700 - 2	700	420	2	225 ~ 305	珠光体	载荷大、受力复杂的零件，如汽车、拖拉机、曲轴、连杆、凸轮轴，部分磨床、铣床、车床的主轴，机床蜗杆、蜗轮，轧钢机轧辊，大齿轮，气缸体，桥式起重机大小滚轮等
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	高强度齿轮，如汽车后桥螺旋锥齿轮，大减速器齿轮，内燃机曲轴、凸轮轴等

表 5.4.3 黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁的牌号、性能及用途

种类	牌 号	试样直径/mm	力 学 性 能				/HBS	用 途 举 例
			σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%			
			不 大 于					
黑心可锻铸铁	KTH300 - 06	12 或	300		6	150	制作弯头、三通管件、中低压阀门等	
	KTH330 - 08*		330		8			制作机床扳手、犁刀、犁柱、车轮壳、钢丝绳轧头等
	KTH350 - 10		350	200	10		汽车、拖拉机前后轮壳、后桥壳、减速器壳、转向节壳、制动器、铁道零件等	
	KTH370 - 12*		370		12			
珠光体可锻铸铁	KTZ450 - 06	15	450	270	6	150 ~ 200	载荷较高和耐磨损零件，如曲轴、凸轮轴、连杆、齿轮、活塞环、摇臂、轴套、耙片、万向接头、棘轮、扳手、传动链条、犁刀、矿车轮等	
	KTZ550 - 04		550	340	4	180 ~ 250		
	KTZ650 - 02		650	430	2	210 ~ 260		
	KTZ700 - 02		700	530	2	240 ~ 290		

注：1. 试样直径 12mm 只适用于主要壁厚小于 10mm 的铸件；

2. 带 * 号为过渡牌号。

4. 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是近十几年来发展起来的新型铸铁。它是在一定成分的铁水中加入适量的蠕化剂，获得石墨形态介于片状与球状之间，形似蠕虫状石墨的铸铁

号用“RuT”加抗拉强度数值，例如 RuT340。各牌号蠕墨铸铁的主要区别在于基体组织。

蠕墨铸铁的力学性能介于相同基体组织的灰铸铁和球墨铸铁之间，其铸造性能和热传导性、耐疲劳性及减振性与灰铸铁相近。蠕墨铸铁已在工业中广泛应用，主要用来制造大功率柴油机气缸盖、气缸套、电动机外壳、机座、机床床身、阀体、玻璃模具、起重机卷筒、纺织机零件、钢锭模等铸件。

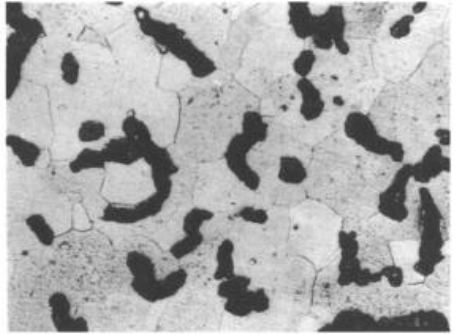


图 5.4.7 铁素体蠕墨铸铁的显微组织

5.4.3 特殊性能铸铁

在灰铸铁、白口铸铁或球墨铸铁中加入一定量的合金元素，可以使铸铁具有某些特殊性能（热、耐酸、耐磨等）

铸铁与在相似条件下使用的合金钢相比有熔炼简

便、成本较低、使用性能良好的优点，但力学性能比合金钢低，脆性较大。

1. 耐磨铸铁

一般耐磨铸铁按其工作条件大致可分为两大类：一类是在无润滑、干摩擦或磨料磨损条件下工作的耐磨铸铁，其具有均匀的高硬度组织和必要的韧性。包括高铬白口铸铁、低合金白口铸铁、中锰球墨铸铁和冷硬铸铁等，可作轧辊、犁铧、破碎机和球磨机零件等。另一类是在润滑条件下工作的减摩铸铁，其具有较低的摩擦系数和能够很好地保持连续油膜的能力，最适宜的组织形式应是在软的基体上分布着坚硬的骨架，以便使基体磨损后，形成保持润滑剂的“沟槽”，坚硬突出的骨架承受压力。常用的减摩铸铁有高磷铸铁和钒钛铸铁，常用于机床导轨、汽缸套和活塞环等。

2. 耐热铸铁

耐热铸铁具有抗高温氧化等性能，能够在高温下承受一定载荷。在铸铁中加入 Al、Si、Cr 等合金元素，可以在铸铁表面形成致密的保护性氧化膜，使铸铁在高温下具有抗氧化的能力，同时能够使铸铁的基体变为单相铁素体。加入 Ni、Mo 能增加在高温下的强度和韧性，从而提高铸铁的耐热性。常用的耐热铸铁有中硅铸铁、高铬铸铁、镍铬硅铸铁、镍铬球墨铸铁、中硅球墨铸铁等，主要用于制造加热炉附件，如炉底板、加热炉传送链构件、换热器、渗碳坩埚等。

3. 耐蚀铸铁

耐蚀铸铁主要有高硅、高铝、高铬、高镍等系列。铸铁中加入一定量的 Si、Al、Cr、Ni、Cu 等元素，可使铸件表面生成致密的氧化膜，从而提高耐蚀性。高硅铸铁是最常用的耐蚀铸铁，为了提高对盐酸腐蚀的抵抗力可加入 Cr 和 Mo 等合金元素。高硅铸铁广泛用于化工、石油、化纤、冶金等工业所用设备，如泵、管道、阀门、储罐的出口等。

5.5 非铁金属材料

5.5.1 铝及其合金

1. 纯铝

纯铝为面心立方晶体结构，塑性好，强度、硬度低，一般不宜作结构材料使用。但由于其密度低，基本无磁性，导电导热性优良，抗大气腐蚀能力强，可主要用于制作电线、电缆、电气元件及换热器件。纯铝的导电导热性随其纯度降低而变差，所以纯度是纯铝材料的重要指标。其牌号中数字表示纯度高。例如工业纯铝，旧牌号有 L1、L2、L3……。符号 L 表示铝，后面的数字越大纯度越低。对应新牌号为 1070、1060、1050……。

2. 铝合金的分类

铝中加入 Si、Cu、Mg、Zn、Mn 等元素制成合金，强度提高，还可以通过变形、热处理等方法进一步强化。所以铝合金可以制造某些结构零件。依据其成分和工艺性能，铝合金可划分为变形铝合金和铸造铝合金两大类，前者塑性优良，适于压力加工；后者塑性低，更适宜于铸造成型。铝合金一般都具有图 5.5.1 所示类型的相图。凡位于 D 左边的铝合金，在加热时都能形成单相固溶体组织，这类合金塑性较高，属变形铝合金。位于 D 右边的铝合金都具有低熔点共晶组织，流动性好，属铸造铝合金。变形铝合金还可进一步划分成可热处理强化变形铝合金 (b 段成分合金)

铸造铝合金牌号由 Z 和基体金属元素的化学符号、主要合金元素化学符号以及表明合金化元素百分含量的数字组成，优质合金在牌号后面标注 A。在合金牌号前面冠以字母“YZ”表示为压铸合金。

变形铝及铝合金采用国际四位数字牌号命名方法。牌号第一位数字表示铝及铝合金的组别， $1 \times \times \times$ ， $2 \times \times \times$ ， $3 \times \times \times$ ，……， $9 \times \times \times$ ，分别按顺序代表纯铝、以铜为主要合金元素的铝合金、以锰、以硅、以镁、以镁和硅、以锌、以其它合金元素为主要合金元素的铝合金及备用合金组；牌号第二位数字或字母表示改型情况，最后两位数字用以标识同一组中不同的铝合金。

3. 铝合金的强化途径

不可热处理强化的变形铝合金在固态范围内加热、冷却无相变，因而不能热处理强化，其常用的强化方法是冷变形，如冷轧、压延等工艺。

可热处理强化变形铝合金不但可变形强化，还能够通过热处理进一步强化，其工艺是先固溶处理

不同的，其强度、硬度并无显著提高，若将其在常温下放置一段时间

硬度上升，塑性、韧性下降的效果才逐步产生，这种合金的性能随时间而变化的现象称为时

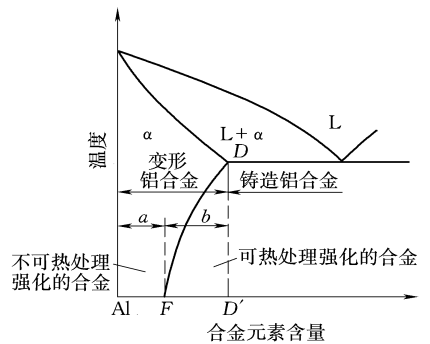


图 5.5.1 铝合金相图的一般类型

效。合金工件经固溶处理后，在室温进行的时效处理称为自然时效处理。若要缩短时效时间，可以在加热条件进行人工时效处理。

铸造铝合金组织中有一定比例的共晶体，熔点低，故流动性好，可制造形状复杂的零件，但共晶体往往比较粗大且韧性差，这是铸造铝合金强度低，塑性、韧性差的主要原因。若采用变质处理就能使共晶体细化，并在一定程度上使铸造铝合金强化、韧化。

4. 变形铝合金

变形铝合金可分为防锈铝合金

类。常用变形铝合金的牌号、力学性能及用途列于表 5.5.1 中。

表 5.5.1 常用变形铝合金的牌号、性能和用途

类别	原代号	新牌号	半成品种类	状态	力学性能		用途举例	
					σ_b /MPa	δ /%		
防锈铝合金	LF2	5A02	冷轧板材	0	167 ~ 226	16 ~ 18	在液体下工作的中等强度的焊接件、冷冲压件和容器、骨架零件等	
			热轧板材	H112	117 ~ 157	7 ~ 6		
			挤压板材	0	226	10		
	LF21	3A21	冷轧板材	0	98 ~ 147	18 ~ 20		要求高的可塑性和良好的焊接件、在液体或气体介质中工作的低载荷零件，如油箱、油管、液体容器、饮料罐
热轧板材			H112	108 ~ 118	15 ~ 12			
挤制厚壁管材			H112	167	—			
硬铝合金	LY11	2A11	冷轧板材	0	226 ~ 235	12	用作各种要求中等强度的零件和构件，冲压的连接部件，空气螺旋桨叶片，局部铆粗的零件	
			挤压棒材	T4	353 ~ 373	10 ~ 12		
			拉挤制管材	0	245	10		
	LY12	2A12	冷轧板材	T4	407 ~ 427	10 ~ 13		用量最大，用作各种要求高载荷的零件和构件 飞机上的骨架零件、蒙皮、翼梁、铆钉等 150 以下工作的零件
			挤压棒材	T4	255 ~ 275	8 ~ 12		
			拉挤制管材	0	245	10		
LY8	2B11	铆钉线材	T4	J25	—	主要用作铆钉材料		
超硬铝	LC3	7A03	铆钉线材	T6	J284	—	受力结构的铆钉	
	LC4 LC9	7A04 7A09	挤压棒材	T6	490 ~ 510	5 ~ 7	用作承力构件和高载荷零件，如飞机上的大梁、桁条、加强框、蒙皮、翼肋、起落架零件等，通常多用以取代 2A12	
			冷轧板材	0	245	10		
			热轧板材	T6	490	3 ~ 6		
锻铝合金	LD5	2A50	挤压棒材	T6	353	12		形状复杂和中等强度的锻件和冲压件，内燃机活塞、压气机叶片、叶轮、圆盘以及其他在高温下工作的复杂锻件。2A70 耐热性好
	LD7	2A70	挤压棒材	T6	353	8		
	LD8	2A80	挤压棒材	T6	441 ~ 432	8 ~ 10		
	LD10	2A14	热轧板材	T6	432	5	高负荷和形状简单的锻件和模锻件	

状态符号采用 GB/T 16475—1996 规定代号：0 为退火，T4 为固溶 + 自然时效，T6 为固溶 + 人工时效，H112 为热加工。

防锈铝合金属于不能热处理强化的铝合金，常采用冷变形方法强化。这类铝合金具有适中的强度，优良的塑性和良好的焊接性，并有很好的抗蚀性，常用于制造油罐、各式容器、防锈

蒙皮等。其它三类变形铝合金都属于能热处理强化的铝合金。其中硬铝合金属于 Al - Cu - Mg 系，超硬铝合金属于 Al - Cu - Mg - Zn 系，锻铝合金属于 Al - Mg - Si - Cu 系。铝中加入 Cu、Mg、Zn 是为了得到热处理强化所必需的溶质组元和第二相。经固溶、时效后这些合金的强度较高，其中超硬铝合金的强化效果最突出。

5. 铸造铝合金

铸造铝合金可分为 Al - Si 系、Al - Cu 系、Al - Mg 系和 Al - Zn 系四类，其典型合金牌号

表 5.5.2 典型铸造铝合金的牌号(代号)

类别	牌号	主要特点	典型应用
铝硅合金	ZAlSi12 YZAlSi2 (YL102)	铸造性能好，有集中缩孔，吸气性大，需变质处理，耐腐蚀性、焊接性好，可切削性差，不能热处理强化，强度不高，耐热性较低	适用铸造形状复杂，耐腐蚀性和气密性高，承受较低载荷，200 的薄壁零件，如仪表壳罩、盖，船舶零件等
	ZAlSi5Cu1Mg (ZL105)	铸造工艺性能和气密性良好，无热裂倾向，熔炼工艺简单，不需变质处理，可热处理强化，强度高，塑性、韧性低，焊接性能和切削性能良好，耐热性、耐蚀性能一般	在航空工业中应用广泛，铸造形状复杂，承受较高静载荷，<225 的零件，如气缸体、盖，发动机曲轴箱等
	ZAlSi12Cu2Mg1 (ZL108) YZAlSi12Cu2	密度小，热膨胀系数小，热导率高，耐热性好，铸造工艺性能优良，气密性高，线收缩小，可得到尺寸精确铸件，无热裂倾向，强度高，耐磨性好，需变质处理	常用的活塞铝合金，用于铸造汽车、拖拉机的活塞和其他工作温度低于 250 的零件
铝铜合金	ZAlCu5Mn (ZL201)	铸造性能不好，热裂、缩孔倾向大，气密性低，可热处理强化，室温强度高，韧性好，耐热性能高，焊接快、切削性能好，耐蚀性能差	工作温度在 300 以下承受中等负载，中等复杂程度的飞机受力铸件，亦可用于低温承力件，用途广泛
	ZAlCu4 (ZL203)	典型 Al - Cu 二元合金，铸造工艺性能差，热裂倾向大，不需变质处理，可热处理强化，有较高的强度和塑性，切削性好，耐热性一般，人工时效状态耐蚀性差	形状简单，中等静载荷或冲击载荷，工作温度低于 200 的小零件，如支架、曲轴等
	ZAlRE5Cu3Si2 (ZL207)	含有 4.4% ~ 5.0% 混合稀土，实质上是 Al - RE - Cu 系合金，耐热性高，可在 300 ~ 400 下长期工作，为目前耐热性最好的铸造铝合金。结晶范围小，充填能力好，热裂倾向小，气密性高，不能热处理强化，室温力学性能较低，焊接性能好，耐蚀能力低于 Al - Si，Al - Mg 系，而优于 Al - Cu 系合金	铸造形状复杂，在 300 ~ 400 长期工作，承受气压和液压的零件

续表

类别	牌号	主要特点	典型应用
铝 镁 合金	ZAlMg10 (ZL301)	典型 Al - Mg 二元合金, 铸造性能差, 气密性低, 熔炼工艺复杂, 可热处理强化, 耐热性不高, 有应力腐蚀倾向, 焊接性差, 可切削性能好, 其最大优点是耐大气和海水腐蚀	承受高静载荷或冲击载荷, 工作温度低于 200、长期在大气或海水中工作的零件, 如水上飞机, 船舶零件
	ZAlMg5Si1 (ZL303)	铸造性能较 ZL301 好, 耐蚀性能良好, 可切削性为铸造铝合金中最佳者, 焊接性能好, 热处理不能明显强化, 室温力学性能较低, 耐热性一般	低于 200 承受中等载荷的耐蚀零件, 如海轮配件, 航空或内燃机车零件
铝 锌 合金	ZAlZn11Si7 (ZL401)	铸造性能优良, 需进行变质处理, 在铸态下具有自然时效能力, 不经热处理可达到高的强度, 耐热, 焊接性和切削性优良, 耐蚀性低, 可采用阳极化处理以提高耐蚀性能	适于大型、形状复杂、承受高静载荷、工作温度不超过 200 的铸件, 如汽车零件, 仪表零件, 医疗器械、日用品等
	ZAlZn6Mg (ZL402)	铸造性能良好, 铸造后有自然时效能力, 较高的力学性能, 耐蚀性能良好, 耐热性能低, 焊接性一般, 可加工性能良好	高静载荷或冲击载荷、不能进行热处理的铸件, 如空气压缩机活塞, 精密仪表零件等

5.5.2 铜及其合金

铜是人类历史上应用最早的金属, 至今也是应用最广的非金属材料之一, 主要用作具有导电、导热、耐磨、抗磁、防爆等性能并兼有耐蚀性的器件。

1. 纯铜

纯铜的晶体结构是面心立方晶格, 导电、导热性能优良, 塑性好、易于进行冷、热加工, 但强度、硬度低。工业纯铜按杂质含量可分为 T1、T2、T3、T4 四个牌号, 序号越大纯度越低。纯铜一般不作结构材料使用, 主要用于制造电线、电缆、电子元件及导热器件。

2. 黄铜

黄铜对海水和大气有优良的耐蚀性, 力学性能与含锌量有关。当 $w_{Zn} < 39\%$ 时, 锌能完全溶解在铜内, 形成面心立方晶格的固溶体, 塑性好, 随含锌量增加其强度和塑性都上升。当 $w_{Zn} > 39\%$ 以后, 黄铜的组织由固溶体和相组成, 相在 470 以下塑性极差, 但少量的相对强度没有影响, 因此强度仍较高。但 $w_{Zn} > 45\%$ 以后铜合金组织全部是相和别的脆性相, 致使强度和塑性均急剧下降, 如图 5.5.2 所示。

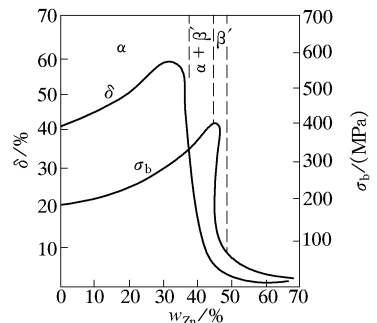
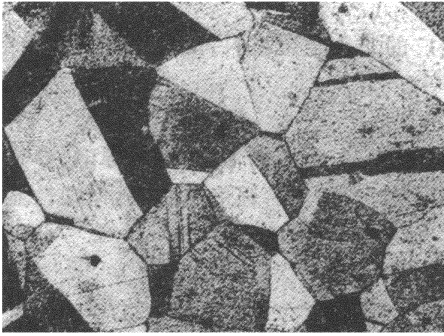
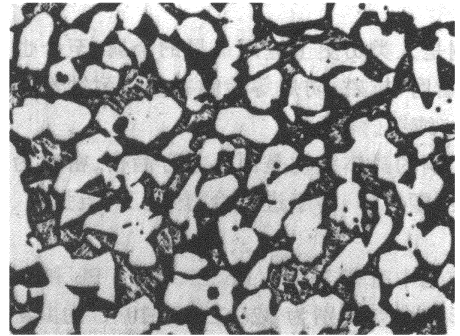


图 5.5.2 锌对普通黄铜力学性能的影响

为改善黄铜的性能加入少量 Al、Mn、Sn、Si、Pb、Ni 等元素就得到特殊黄铜，如铅黄铜、锡黄铜、铝黄铜、锰黄铜、铁黄铜、硅黄铜等。普通黄铜的牌号用黄字的汉语拼音首“H”加数字表示，数字表示平均 Cu 的质量分数。特殊黄铜代号由 H、合金元素符号、铜含量、合金元素含量组成。常用的单相黄铜有 H80、H70 等，常用的 + 双相黄铜有 H62、H59 等。图 5.5.3a、b 分别为单相黄铜和双相黄铜的显微组织照片。表 5.5.3 列出部分常用典型黄铜的牌号



(a) 单相黄铜



(b) 双相黄铜

图 5.5.3 黄铜的显微组织

表 5.5.3 常用典型黄铜的牌号、性能及用途

类别	代号或牌号	制品种类	力学性能		主要特征	用途举例
			σ_b /MPa	δ /%		
普通加工黄铜	H80	板、带、管、棒	640	5	在大气、淡水及海水中有较高的耐蚀性，加工性能优良	造纸网、薄壁管、皱纹管、建筑装饰用品、镀层等
	H68	板、带、棒、线、箔、管	660	3	有较高强度，塑性为黄铜中最佳者，在黄铜中应用最广泛，有应力腐蚀开裂倾向	复杂冷冲件和深冲件，如子弹壳、散热器外壳、导管、雷管等
	H62		600	3	有较高的强度，热加工性能好，可加工性能好，易焊接。有应力腐蚀开裂倾向，价格较便宜，应用较广泛	一般机器零件、铆钉、垫圈、螺钉、螺帽、导管、散热器、筛网等
铅黄铜	HPb59-1	板、管、棒、线	550	5	可加工性能好，可冷、热加工，易焊接，耐蚀性一般。有应力腐蚀开裂倾向，应用广泛	热冲压和切削加工制作的零件，如螺钉、垫片、衬套、喷嘴等
锰黄铜	HMn58-2	板、带、棒、线	700	10	在海水、过热蒸汽、氯化物中有高的耐蚀性。但有应力腐蚀开裂倾向，导热导电性能低	应用较广的黄铜品种，主要用于船舶制造和精密电器制造工业

续表

类别	代号或牌号	制品种类	力学性能		主要特征	用途举例
			σ_b /MPa	δ /%		
铸造黄铜	ZCuZn38	砂型金属型	295 295	30 30	良好的铸造性能和可加工性能；力学性能较高，可焊接，有应力腐蚀开裂倾向	一般结构件，如螺杆、螺母、法兰、阀座、日用五金等
铸铝黄铜	ZCuZn31Al2 YZCuZn30Al3	砂型金属型	295 390	12 15	铸造性能良好，在空气、淡水、海水中耐蚀性较好，易切削，可以焊接	适于压力铸造，如电机、仪表压铸件及造船和机械制造业的耐蚀件
铸锰黄铜	ZCuZn40Mn2	砂型金属型	345 390	20 25	有较高的强度和耐蚀性，铸造性能好，受热时组织稳定	在水、蒸汽、液体燃料中的耐蚀件，需镀锡或浇注巴氏合金的零件
铸硅黄铜	ZCuZn16Si4	砂型金属型	345 390	15 20	具有较高的强度和良好的耐蚀性，铸造性能好、流动性高，铸件组织致密，气密性好	接触海水的管配件、水泵、叶轮，在空气、淡水、油、燃料及压力4.5 MPa和<250蒸汽中工作的铸件

3. 青铜

青铜种类较多，有锡青铜、铅青铜、硅青铜、铍青铜、钛青铜等。锡青铜是以锡为主要元素的铜合金，其力学性能取决于锡的含量。锡青铜耐磨性、耐蚀性和弹性等较好。常用青铜的代号、牌号、主要性能及用途见表5.5.4。

表5.5.4 常用青铜的代号、牌号、主要性能及用途

类别	牌号(代号)	制品种类	力学性能		主要特征	用途举例
			σ_b /MPa	δ /%		
压力加工锡青铜	(QSn4-3)	板、带、棒、线	350	40	有高的耐磨性和弹性，抗磁性良好，能很好地承受冷、热压力加工；在硬态下，切削性好，易焊接，在大气、淡水和海水中耐蚀性好	制作弹簧及其他弹性元件，化工设备上的耐蚀零件以及耐磨零件、抗磁零件、造纸工业用的刮刀
	(QSn6.5-0.4)	板、带、棒、线	750	9	锡磷青铜，性能用途和QSn6.5-0.1相似。因含磷量较高，其抗疲劳强度较高，弹性和耐磨性较好，但在热加工时有热脆性	除用作弹簧和耐磨零件外，主要用于造纸工业制作耐磨的铜网和载荷<980 MPa，圆周速度<3 m/s的零件
	(QSn4-4-2.5)	板、带	650	3	含锌、铅，高的减磨性和良好的易切削性，易于焊接，在大气、淡水中具有良好的耐蚀性	轴承、卷边轴套、衬套、圆盘以及衬套的内垫等

续表

类别	牌号 (代号)	制品 种类	力学性能		主要特征	用途举例
			σ_b /MPa	δ /%		
铸造锡青铜	ZCuSn10Zn2	砂型	240	12	耐蚀性、耐磨性和切削加工性能好, 铸造性能好, 铸件致密性较高, 气密性较好	在中等及较高载荷和小滑动速度下工作的重要管配件及阀、旋塞、泵体、齿轮、叶轮和蜗轮等
		金属型	245	6		
	ZCuSn10Pb1	砂型	200	3	硬度高、耐磨性极好, 不易产生咬死现象, 有较好的铸造性能和切削加工性能, 在大气和淡水中有良好的耐蚀性	可用于高载荷和高滑动速度下工作的耐磨零件, 如连杆衬套、轴瓦、齿轮、蜗轮等
		金属型	310	2		
		离心	330	4		
特殊青铜 (无锡青铜)	(QBe2)	板、带、棒、线	500	3	含有少量镍, 是力学、物理、化学综合性能良好的一种合金。经淬火时效后, 具有高的强度, 硬度、弹性、耐磨性、疲劳极限和耐热性, 同时还具有高的导电性、导热性和耐寒性, 无磁性, 碰击时无火花, 易于焊接, 在大气、淡水和海水中抗蚀性极好	各种精密仪表、仪器中的弹簧和弹性元件, 各种耐磨零件以及在高速、高压下工作的轴承、衬套, 矿山和炼油厂用的冲击不生火花的工具以及各种深冲零件
	ZCuPb30	金属型	—	—	有良好的自润滑性, 易切削, 铸造性能差, 易产生比重偏析	要求高滑动速度的双金属轴瓦、减磨零件等
	ZCuAl10Fe3	砂型	490	13	高的强度, 耐磨性和耐蚀性能好, 可以焊接, 但不易钎焊, 大型铸件自 700 °C 空冷可防止变脆	强度高、耐磨、耐蚀的重型铸件, 如轴
金属型		540	15	以下管配件		

5.5.3 滑动轴承合金

制造滑动轴承的轴瓦及其内衬的合金叫轴承合金。轴瓦是包围在轴颈外面的套圈, 它直接与轴颈接触。当轴旋转时, 轴瓦除了承受轴颈传递给它的静载荷以外, 还要承受交变载荷和冲击, 并与轴颈发生强烈的摩擦。轴承合金组织通常是由软基体上均匀分布一定数量和大小的硬质点组成。当轴运转时, 轴瓦的软基体易磨损而凹陷, 能容纳润滑油, 硬质点则相对凸起支撑着轴颈, 如图 5.5.4 所示。这就减小了轴颈和轴瓦之间的接触面积, 降低了摩擦系数。此外软基体可承受冲击和振动, 并使轴颈和轴

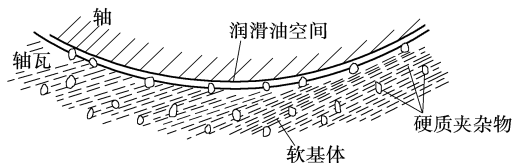


图 5.5.4 轴承合金组织示意图

瓦之间能很好的磨合，并且偶然进入的外来硬质点能嵌入基体中。

常用锡基轴承合金是以锡为基础，加入锑、铜等元素组成的合金，此外还有铅基轴承合金、铜基轴承合金和铝基轴承合金等。常用轴承合金的代号、性能特点及用途如表 5.5.5 所示。

表 5.5.5 部分锡基、铅基轴承合金代号、性能特点及用途

牌 号	熔化温度/ °C	力学性能			特 点	用 途 举 例
		σ_b /MPa	δ /%	HBS		
ZSnSb12Pb10Cu4	185			29	软而韧，耐压，硬度较高，热强度较低，浇注性能差	一般中速、中压发动机的轴承，不适用于高温
ZrSb11Cu6	241	90	6.0	27	应用较广，不含 Pb，硬度适中，减摩性和抗磨性较好，膨胀系数比其他巴氏合金都小，优良的导热性和耐蚀性，疲劳强度低，不宜浇注很薄且振动载荷大的轴承	重载、高速、< 110 的重要轴承如 750 kW 以上电机，890 kW 以上快速行程柴油机，高速机床主轴的轴承和轴瓦
ZSnSb4Cu4	225	80	7.0	20	韧性为巴氏合金中最高者，与 ZSnSb11Cu6 相比强度硬度较低	韧性高，浇注层较薄的重载高速轴承，如涡轮内燃机高速轴承
ZPbSb16Sn16Cu2	240	78	0.2	30	与 ZrSb11Cu6 相比，摩擦系数较大，耐磨性和使用寿命不低，但冲击韧度低，不能承受冲击载荷，价格便宜	工作温度 < 120 °C，无显著冲击载荷，重载高速轴承及轴衬
ZPbSb15Sn10	240	60	1.8	24	冲击韧性比上一合金高，摩擦系数大，但磨合性好，经退火处理，其塑性、韧性、强度和减摩性均大大提高，硬度有所下降	承受中等冲击载荷，中速机械的轴承，如汽车、拖拉机的曲轴和连杆轴承
ZPbSb15Sn6	248		0.2	20	与锡基 ZrSb11Cu6 相比，耐压强度相当，塑性和导热性较差，在 100 冲击载荷较低条件下，其使用寿命相近，属性能较好的铅基低锡轴承合金	低速、轻压力条件下的机械轴承，如矿山水泵轴承、汽轮机、中等功率电机、空压机的轴承和轴衬

5.5.4 粉末冶金材料

将金属粉末与金属或非金属粉末(或纤维)

件或材料的工艺方法称为“粉末冶金”。用粉末冶金法可以制造如各种衬套和轴套、齿轮、凸轮、含油轴承、摩擦片等机械零件。与一般零件生产方法相比，粉末冶金法具有少切削或无切削、材料利用率高、生产率高、成本低等优点。用粉末冶金法还可以制造一些具有特殊成分或具有特殊性能的制品。如硬质合金、难溶金属及其合金、金属陶瓷等。

硬质合金是将一些难熔的金属化合物粉末和粘结剂粉末混合加压成型，再经烧结而成的一种粉末冶金产品。由于切削速度的不断提高以及高硬度或高韧性材料的切削加工，不少刀具的刃部工作温度已超过 700℃，需要材料热硬性更高的硬质合金。硬质合金种类很多，目前常用的有金属陶瓷硬质合金和钢结硬质合金。

1. 金属陶瓷硬质合金

金属陶瓷硬质合金是将一些难熔的金属碳化物粉末

硬而耐磨的作用；Co 和 Ni 仅起粘结作用，使合金具有一定的韧性。硬质合金在室温下的硬度很高，可达 69~81 HRC，热硬性可高达 1000℃左右，耐磨性优良。由于其硬度太高，性脆，不能进行切削加工，因而经常是先制成一定规格的刀片，再将其镶焊在刀体上使用。金属陶瓷硬质合金分为三类：钨钴类硬质合金、钛钨钴类硬质合金和万能硬质合金。

2. 钢结硬质合金

其性能介于硬质合金与合金工具钢之间。这种硬质合金是以 TiC、WC、VC 粉末等为硬质相，以铁粉加少量的合金元素为粘结剂，用一般的粉末冶金法制造。它具有钢材的加工性，经退火后可进行切削加工，也可进行锻造和焊接，经淬火与回火后，具有相当于硬质合金的高硬度和高的耐磨性，适用于制造各种形状复杂的刀具，如麻花钻、铣刀等，也可以用作在较高温度下工作的模具和耐磨零件。

思考题与习题

5.1 碳素结构钢、优质碳素结构钢、碳素工具钢各自有何性能特点？非合金钢共同的性能不足是什么？

5.2 指出下列元素哪些是强碳化物形成元素，哪些是弱碳化物形成元素，哪些是非碳化物形成元素？它们对奥氏体的形成及晶粒长大起何作用？对钢的热处理有何影响？

Ni Si Al Co Mn Cr Mo W V Ti

5.3 合金元素提高钢的耐回火性，使钢在使用性能方面有何益处？

5.4 说明下列钢中锰的作用：

Q215 Q345 20CrMnTi CrWMn ZGMn13

5.5 说明下列钢中铬的作用：

20Cr GCr15 1Cr13 4Cr9Si2

5.6 为什么合金渗碳钢一般采用低碳，合金调质钢采用中碳，而合金工具钢采用高碳成分？

5.7 指出下列每个牌号钢的类别、含碳量、热处理工艺和主要用途：

T8 Q345 20Cr 40Cr 20CrMnTi 2Cr13 GCr15 60Si2Mn 9SiCr Cr12 CrWMn

0Cr19Ni9Ti 4Cr9Si2 W18Cr4V ZGMn13

5.8 为什么汽车变速齿轮常采用 20CrMnTi 钢制造，而机床上同样是变速齿轮却采用 45 钢或 40Cr 钢制造？

5.9 试为下列机械零件或用品选择适用的钢种及牌号：

地脚螺栓 仪表箱壳 小柴油机曲轴 木工锯条 油气储罐 汽车齿轮 机床主轴 汽车发动机连杆 汽车发动机螺栓 汽车板簧 拖拉机轴承 板牙 高精度塞规 麻花钻头 大型冷冲模 胎模锻模 镜面塑料模具 硝酸槽 手术刀 内燃机气阀 大型粉碎机颚板

5.10 化学成分和冷却速度对铸铁石墨化有何影响？阻碍石墨化的元素主要有哪些？

5.11 为什么一般机器的支架、机床床身常用灰铸铁制造？

5.12 白口铸铁、灰铸铁和钢，这三者的成分、组织和性能有何主要区别？

5.13 灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁在组织上的根本区别是什么？试述石墨对铸铁性能特点的影响

5.14 球墨铸铁和可锻铸铁，哪种适宜制造薄壁铸件？为什么？

5.15 灰铸铁为什么不能进行改变基体的热处理，而球墨铸铁可以进行这种热处理？

5.16 下列铸件宜选用何种铸铁制造？在灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁中选择适用的牌号。

低压暖气片 机床齿轮箱 刹车轮 大型内燃机缸体 水管三通 汽车减速器壳 柴油机曲轴 钢锭模 精密机床床身 轧辊 矿车轮 高温加热炉底版 硝酸盛贮槽

5.17 铝合金分为几类？各类铝合金各自有何强化方法？铝合金淬火与钢的淬火有何异同？

5.18 铝硅合金为什么进行变质处理，其主要用途有哪些？

5.19 铜合金分为几类？举例说明各类铜合金的牌号、性能特点和用途。

5.20 黄铜分为几类？合金元素在铜中的作用是什么？为什么工业黄铜的含锌量不超过 45%？

5.21 轴承合金必须具备哪些特性？其组织有何特点？常用滑动轴承合金有哪些？

5.22 硬质合金在组成、性能和制造工艺方面有何特点？

5.23 指出下列代号、牌号合金的类别、主要合金元素及主要性能特征。

LF11 LC4 ZL102 ZL203 H68 HPb59 - 1 ZCuZn16Si4 YZCuZn30Al3 QSn4 - 3 QBe2
ZCuSn10Pb1 ZSnSb11Cu6

第 6 章 非金属材料与新型材料

问一问，想一想：在您的学习、生活周围哪些材料是非金属材料？是什么非金属材料？您也可以分析一下，在机械制造领域非金属材料都有哪些应用？



学习目标

1. 重点了解常用高分子材料的种类、性能与应用；
2. 了解陶瓷材料的种类、性能与应用；
3. 了解复合材料的种类、性能与应用；
4. 了解正在迅速发展的新型材料。

非金属材料指除金属以外的其它一切材料。这类材料发展迅速，种类繁多，已在各工业领域中广泛应用。在机械制造中使用的非金属材料主要包括有机高分子材料（合成纤维、胶粘剂、涂料及液晶等材料等）

人类进入 21 世纪，随着科学技术的迅速发展，在传统金属材料与非金属材料仍在大量应用的同时，各种适应高科技发展的新型材料不断涌现，为新技术取得突破创造了条件。所谓新型材料是指那些新近发展或正在发展中的，采用高新技术制取的，具有优异性能和特殊性能的材料。新型材料是相对于传统材料而言的，二者之间并没有截然的分界。新型材料的发展往往以传统材料为基础，传统材料的进一步发展也可以成为新型材料。材料，尤其是新型材料是 21 世纪知识经济时代的重要基础和支柱之一，它将对经济、科技、国防等事业的发展起到至关重要的推动作用，对机械制造业则更是如此。

目前，各种新型材料的开发正在加速，其特点是高性能化、功能化、复合化。传统的金属材料、有机材料、无机材料的界限正在消失，因此，新型材料的分类变得困难起来，一些原来可以比较容易区分的材料的属性也变得模糊起来。例如传统上认为导电性是金属固有的，而如今有机、无机材料也均可出现导电性。而复合材料的出现，更使它融多种材料性能于一体，甚至出现一些与原来截然不同的性能。

6.1 高分子材料

高分子化合物包括有机高分子化合物和无机高分子化合物两大类，有机高分子有合成的和天然的。工程中使用的有机高分子材料主要是人工合成的高分子聚合物，简称高聚物。

6.1.1 高聚物的人工合成

高聚物是通过聚合反应以低分子化合物结合形成的。聚合反应有加聚反应和缩聚反应两种。

1. 加聚反应

加聚反应是由一种或多种单体相互加成而形成聚合物的反应。这种反应没有低分子副产物生成。其中，单体为一种的叫均加聚，例如乙烯加聚成聚乙烯；单体为两种或两种以上的则称为共加聚，ABS 工程塑料就是由丙烯腈、丁二烯和苯乙烯三种单体共聚合成的。在生产人造橡胶时广泛采用共聚反应。均聚物的产量很大，应用广泛。但由于其结构的限制，性能存在一些不足。而共聚物则可以通过改变单体，进而改进聚合物的性能。组成共聚物的单体不同，单体的排列方式不同及各种单体所占比例的不同都将使共聚物的性能发生很大的变化，这是对均聚物实行改性，制造新品种高聚物的重要途径。

2. 缩聚反应

缩聚反应是由一种或多种单体相互作用而形成高聚物，同时析出新的低分子副产物的反应，其单体是含有两种或两种以上活泼官能团的低分子化合物。按照参加反应的单体不同，缩聚反应分为均缩聚和共缩聚两种。酚醛树脂反应产物。缩聚反应比加聚反应复杂。

6.1.2 有机高分子材料的组成及性能特点

1. 有机高分子材料的组成

有机高分子材料以高聚物为主要组分，再添加各种辅助组分而成。前者称为基料，例如合成高聚物剂、防老化剂、润滑剂、发泡剂、着色剂等。

基料是主要组分，对高分子材料起决定性能的作用；添加剂是辅助组分，对材料起改善性能、补充性能的作用。

2. 有机高分子材料的性能特点

a. 比强度高 高聚物的抗拉强度平均为 100 MPa 左右，远远低于金属，但由于其密度低，故其比强度并不低于金属。玻璃钢的强度比合金结构钢高，而其重量却轻得多。

b. 高弹性和低弹性模量 其实质就是弹性变形量大而弹性变形抗力小，这是高聚物特有的性能。不管是线型还是体型的高分子化合物都有一定的弹性。

c. 高耐磨性和低硬度 高聚物硬度远低于金属，但耐磨性优于金属。有些高聚物摩擦系数小，且本身就具有润滑性能，例如聚四氟乙烯、尼龙等。

a. 电绝缘性优良 高聚物中原子一般是以共价键相结合，因而不易电离，导电能力低，绝缘性能好。

b. 耐热性差 耐热性指材料在高温下长期使用保持性能不变的能力。由于高聚物链段间的分子间力较弱，在同时受热、受力时易发生链间滑脱和位移而导致材料软化、熔化。

c. 导热性低 高分子材料的线膨胀系数约为金属的 3~4 倍。在机械中会因膨胀变形过量

而引起开裂、脱落、松动等。

强，如聚四氟乙烯在沸腾的王水中仍很稳定。但某些高聚物在某些特定的溶剂和油中会发生软化、熔胀等现象。

高聚物在长期使用或存放过程中，由于外界物理、化学及生物因素的影响（氧和臭氧、酸碱、微生物的作用等）

时间延长逐渐恶化，直至丧失使用功能，这个过程称为老化。发生老化时，橡胶主要为龟裂或变软、变粘；塑料主要是脱色、失去光泽、开裂等。这些现象均是不可逆的。因此，老化是高聚物的一大弱点。造成高聚物老化的原因主要有两点，一是分子链产生交联或支化，使性能变硬、变脆；二是大分子发生断链或裂解，使分子量降低

粘，力学性能劣化。一般可通过表面防护、加入抗老化剂等手段提高高聚物的抗老化能力。

6.1.3 工程塑料

1. 塑料的组成

塑料一般以合成树脂(高聚物)

合成树脂即人工合成线型高聚物，是塑料的主要组分起着决定性作用，故绝大多数塑料以树脂的名称命名。合成树脂受热时呈软化或熔融状态，因而塑料具有良好的成形能力。

添加剂是为改善塑料的使用性能或成形工艺性能而加入的辅助组分。

a. 填料

对光的反射能力和防老化；加入二硫化钼可提高自润滑性；加入云母粉可提高电绝缘性；加入石棉粉可提高耐热性等。另外，有一些填料比树脂便宜，加入后可降低塑料成本。

b. 增塑剂 为提高塑料的柔软性和可成形性而加入的物质，主要是一些低熔点的低分子有机化合物。合成树脂中加入增塑剂后，大分子链间距离增大，降低了分子链间作用力，增加了大分子链的柔顺性，因而使塑料的弹性、韧性、塑性提高，强度、刚度、硬度、耐热性降低。加入增塑剂的聚氯乙烯比较柔软，而未加入增塑剂的聚氯乙烯则比较刚硬。

c. 固化剂

成体型结构，固化成刚硬的塑料。

d. 稳定剂

此外，还有为防止塑料在成型过程中粘在模具上，并使塑料表面光亮美观而加入的润滑剂；为使塑料具有美丽的色彩加入的有机染料或无机颜料等着色剂；以及发泡剂、阻燃剂、抗静电剂等。总之，根据不同的塑料品种和性能要求，可加入不同的添加剂。

2. 塑料的分类

a. 热塑性塑料 这类塑料为线型结构分子链，加热时会软化、熔融，冷却时会凝固、变

硬，此过程可以反复进行。典型的品种有聚乙烯、聚氯乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚酰胺

(龙)

基丙烯酸甲酯)

耐热性与刚性较差。

b. 热固性塑料 这类塑料为密网型结构分子链，其形成是固化反应的结果。具有线型结构的合成树脂，初加热时软化、熔融，进一步加热、加压或加入固化剂，通过共价交联而固化。固化后再加热，则不再软化、熔融。品种有酚醛塑料、氨基塑料、环氧树脂、不饱和聚酯树脂、有机硅树脂等构成的塑料。这类塑料具有较高的耐热性与刚性，但脆性大，不能反复成型与再生使用。

a. 通用塑料 主要指产量大、用途广、价格低廉的聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、酚醛塑料等几大品种，它们约占塑料总产量的75%以上，广泛用于工业、农业和日常生活各个方面，但其强度较低。

b. 工程塑料 主要指用于制作工程结构、机器零件、工业容器和设备的塑料。最重要的有聚甲醛、聚酰胺

的强度，弹性模量、韧性、耐磨性、耐蚀和耐热性较好。目前工程塑料发展十分迅速。

c. 其它塑料 例如耐热塑料，一般塑料的工作温度不超过100℃，耐热塑料可在100~200℃，甚至更高的温度下工作，如聚四氟乙烯

等。随着塑料性能的改善和提高，新塑料品种的不断出现，通用塑料、工程塑料和耐热塑料之间也就没有明显的界限了。

3. 常用工程塑料的性能和用途

工程塑料相对金属来说，具有密度小、比强度高、耐腐蚀、电绝缘性好、耐磨和自润滑性好，还有透光、隔热、消音、吸震等优点，也有强度低、耐热性差、容易蠕变和老化的缺点。而不同类别的塑料也有着各自不同的性能特点。表6.1.1和表6.1.2分别列出了工业上常用的热塑性塑料和热固性塑料的性能特点和用途。除此之外，还有以两种或两种之上的聚合物，用物理或化学方法共混而成的共混聚合物，这在塑料工业中称塑料合金。这使可供选用的工程塑料的性能范围更加广泛。

表 6.1.1 常用热塑性塑料的性能特点和用途

名称	主要性能特点	用途举例
聚氯乙烯 (PVC)	硬质聚氯乙烯强度较高，电绝缘性优良，对酸、碱的抵抗力强，化学稳定性好，可在 - 15 ~ 60℃ 使用，良好的热成形性能，密度小	化工耐蚀的结构材料，如输油管、容器、离心泵、阀门管件，用途很广
	软质聚氯乙烯强度不如硬质，但伸长率较大，有良好的电绝缘性，可在 - 15 ~ 60℃ 使用	电线、电缆的绝缘包皮，农用薄膜，工业包装。但因有毒，故不适于包装食品
	泡沫聚氯乙烯质轻、隔热、隔音、防震	泡沫聚氯乙烯衬垫、包装材料

续表

名称	主要性能特点	用途举例
聚乙烯 (PE)	低压聚乙烯质地坚硬,有良好的耐磨性、耐蚀性和电绝缘性能,而耐热性差,在沸水中变软;高压聚乙烯是聚乙烯中最轻的一种,其化学稳定性高,有良好的高频绝缘性、柔软性,耐冲击性和透明性;超高分子量聚乙烯冲击强度高,耐疲劳,耐磨,需冷压浇铸成形	低压聚乙烯用于制造塑料板、塑料绳,承受小载荷的齿轮、轴承等;高压聚乙烯最适宜吹塑成薄膜、软管,塑料瓶等用于食品和药品包装的制品,超高分子量聚乙烯可作减摩、耐磨件及传动件,还可制作电线及电缆包皮等
聚丙烯 (PP)	密度小,是常用塑料中最轻的一种。强度、硬度、刚性和耐热性均优于低压聚乙烯,可在 100~120 长期使用;几乎不吸水,并有较好的化学稳定性,优良的高频绝缘性,且不受温度影响。但低温脆性大,不耐磨,易老化	制作一般机械零件,如齿轮、管道、接头等耐蚀件,如泵叶轮、化工管道、容器、绝缘件;制作电视机、收音机、电扇、电机罩等
聚酰胺 (通称尼龙) (PA)	无味、无毒;有较高强度和良好韧性;有一定耐热性,可在 100 下使用。优良的耐磨性和自润滑性,摩擦系数小,良好的消声性和耐油性,能耐水、油、一般溶剂;耐蚀性较好;抗霉菌;成形性好。但蠕变值较大,导热性较差 1/100)	常用的有尼龙 6、尼龙 66、尼龙 610、尼龙 1010 等。用于制造要求耐磨、耐蚀的某些承载和传动零件,如轴承、齿轮、滑轮、螺钉、螺母及一些小型零件;还可作高压耐油密封圈,喷涂金属表面作防腐耐磨涂层
聚甲基丙烯酸 甲酯 (俗称有机玻璃) (PMMA)	透光性好,可透过 99% 以上太阳光;着色性好,有一定强度,耐紫外线及大气老化,耐腐蚀,优良的电绝缘性能,可在 -60~100 使用。但质较脆,易溶于有机溶剂中,表面硬度不高,易擦伤	制作航空、仪器、仪表、汽车和无线电工业中的透明件与装饰件,如飞机座窗、灯罩、电视、雷达的屏幕,油标、油杯、设备标牌,仪表零件等
苯乙烯-丁二烯- 丙烯腈共聚体 (ABS)	性能可通过改变三种单体的含量来调整。有高的冲击韧性和较高的强度,优良的耐油、耐水性和化学稳定性,好的电绝缘性和耐寒性,高的尺寸稳定性和一定的耐磨性。表面可以镀饰金属,易于加工成形,但长期使用易起层	制作电话机、扩音机、电视机、电机、仪表的壳体,齿轮,泵叶轮,轴承,把手,管道,贮槽内衬,仪表盘,轿车车身,汽车扶手等
聚甲醛 (POM)	优良的综合力学性能,耐磨性好,吸水性小,尺寸稳定性高,着色性好,良好的减摩性和抗老化性,优良的电绝缘性和化学稳定性,可在 -40~100 范围内长期使用。但加热易分解,成形收缩率大	制作减摩、耐磨传动件,如轴承、滚轮、齿轮、电气绝缘件、耐蚀件及化工容器等

续表

名称	主要性能特点	用途举例
聚四氟乙烯 (也称塑料王) (F-4)	几乎能耐所有化学药品的腐蚀；良好的耐老化性及电绝缘性，不吸水；优异的耐高、低温性，在 -195 ~ 250 可长期使用；摩擦系数很小，有自润滑性。但其高温下不流动，不能热塑成形，只能用类似粉末冶金的冷压、烧结成形工艺，高温时会分解出对人体有害气体，价格较高	制作耐蚀件、减摩耐磨件、密封件、绝缘件，如高频电缆、电容线圈架以及化工用的反应器、管道等
聚砜 (PSF)	双酚 A 型：优良的耐热、耐寒、耐候性，抗蠕变及尺寸稳定性，强度高，优良的电绝缘性，化学稳定性高，可在 -100 ~ 150 长期使用。但耐紫外线较差，成型温度高	制作高强度、耐热件、绝缘件、减摩耐磨件、传动件，如精密齿轮、凸轮、真空泵叶片、仪表壳体和罩，耐热或绝缘的仪表零件，汽车护板、仪表盘、衬垫和垫圈、计算机零件、电镀金属制成集成电子印刷电路板
	非双酚 A 型：耐热、耐寒，在 -240 ~ 260 长期工作，硬度高、能自熄、耐老化、耐辐射、力学性能及电绝缘性都好、化学稳定性高。但不耐极性溶剂	
氯化聚醚 (或称聚氯醚)	极高的耐化学腐蚀性，易于加工，可在 120 下长期使用，良好的力学性能和电绝缘性，吸水性很低，尺寸稳定性好，但耐低温性较差	制作在腐蚀介质中的减摩、耐磨传动件，精密机械零件，化工设备的衬里和涂层等
聚碳酸酯 (PC)	透明度高达 86% ~ 92%，使用温度 -100 ~ 130，韧性好、耐冲击、硬度高、抗蠕变、耐热、耐寒、耐疲劳、吸水性好、电性能好。有应力开裂倾向	飞机座舱罩，防护面盔，防弹玻璃及机械电子、仪表的零部件

表 6.1.2 常用热固性塑料的性能特点和用途

名称	主要性能特点	用途举例
聚氨酯塑料 (PUR)	耐磨性优越，韧性好，承载能力高，低温时硬而不脆裂，耐氧、臭氧，耐候，耐许多化学药品和油，抗辐射，易燃；软质泡沫塑料吸音和减震优良，吸水性强；硬质泡沫高低温隔热性能优良	密封件，传动带，隔热、隔音及防震材料，齿轮，电气绝缘件，实心轮胎，电线电缆护套，汽车零件
酚醛塑料 (俗称电木) (PF)	高的强度、硬度及耐热性，工作温度一般在 100 以上，在水润滑条件下具有极小的摩擦系数，优异的电绝缘性，耐腐蚀性好 但质较脆、耐光性差、色泽深暗，加工性差，只能模压	制作一般机械零件，水润滑轴承，电绝缘件，耐化学腐蚀的结构材料和衬里材料等，如仪表壳体、电器绝缘板、绝缘齿轮、整流罩、耐酸泵、刹车片等

续表

名称	主要性能特点	用途举例
环氧塑料 (EP)	强度较高, 韧性较好, 电绝缘性优良, 防水、防潮、防霉、耐热、耐寒, 可在 -80 ~ 200 范围内长期使用, 化学稳定性较好, 固化成形后收缩率小, 对许多材料的粘结力强, 成形工艺简便, 成本较低	塑料模具、精密量具、机械仪表和电气结构零件, 电气、电子元件及线圈的灌注、涂覆和包封以及修复机件等
有机硅塑料	耐热性高, 可在 180 ~ 200 下长期使用, 电绝缘性优良, 高压电弧, 高频绝缘性好, 防潮性好, 有一定的耐化学腐蚀性, 耐辐射、耐火焰, 耐臭氧, 也耐低温。但价格较贵	高频绝缘件, 湿热带地区电机、电器绝缘件, 电气、电子元件及线圈的灌注与固定, 耐热件等
聚对-羟基苯甲酸酯塑料	是一种新型的耐热性热固性工程塑料。具有突出的耐热性, 可在 315 下长期使用, 短期使用温度范围为 371 ~ 427 , 导热系数极高, 比一般塑料高出 3 ~ 5 倍, 很好的耐磨性和自润滑性, 优良的电绝缘性、耐溶剂性和自熄性	耐磨、耐蚀及尺寸稳定的自润滑轴承, 高压密封圈, 汽车发动机零件, 电子和电气元件以及特殊用途的纤维和薄膜等

6.1.4 合成橡胶

1. 橡胶的特性和应用

橡胶是在室温下处于高弹态的高分子材料, 最大的特性是高弹性, 其弹性模量很低, 只有 1 ~ 10 MPa; 弹性变形量很大, 可达 100% ~ 1 000%; 具有优良的伸缩性和积贮能量的能力; 此外, 还有良好的耐磨性, 隔音性、阻尼性和绝缘性。

橡胶在工业上应用相当广泛, 可用于制作轮胎、动静态密封件(件)

运输胶带和管道、电线、电缆和电工绝缘材料、制动件等。

2. 橡胶的组成

橡胶制品是以生胶为基础加入适量的配合剂组成的。

满足日益增长的需要, 而且也不能满足某些特殊性能要求。因此合成橡胶获得了迅速发展。

很多, 其中主要是硫化剂, 其作用类似于热固性塑料中的固化剂, 它使橡胶分子链间形成横链, 适当交联, 成为网状结构, 从而提高橡胶的力学性能和物理性能。常用的硫化剂是硫磺和硫化物。为提高橡胶的力学性能, 如强度、硬度、耐磨性和刚性等, 还需加入填料, 使用最普遍的是炭黑, 以及作为骨架材料的织品、纤维、甚至金属丝或金属编织物。填料的加入还可减少生胶用量, 降低成本。其它配合剂还有为加速硫化过程, 提高硫化效果而加入的硫化促进

剂；用以增加橡胶塑性，改善成形工艺性能的增塑剂；以及防止橡胶老化加入的防老化剂（氧化剂）

3. 常用橡胶

橡胶按原料来源分为天然橡胶与合成橡胶，按用途分为通用橡胶和特种橡胶。天然橡胶属通用橡胶，广泛用于制造轮胎、胶布、胶管等。常用合成橡胶的性能与用途列于表 6.1.3。其中，产量最大的是丁苯橡胶，占橡胶总产量的 60%~70%，发展最快的是顺丁橡胶。特种橡胶价格较贵，主要用于要求耐热、耐寒、耐蚀的特殊环境。

表 6.1.3 橡胶的种类、性能和用途

性能	通用橡胶							特种橡胶			
	天然橡胶 NR	丁苯橡胶 SBR	顺丁橡胶 BR	丁基橡胶 HR	氯丁橡胶 CR	丁腈橡胶 NBR	乙丙橡胶 EPDM	聚氨酯 PUR	氟橡胶 FPM	硅橡胶	聚硫橡胶
抗拉强度 /MPa	25~30	15~21	18~25	17~21	25~27	15~30	10~25	20~35	20~22	4~10	9~15
伸长率/%	650~900	500~800	450~800	650~800	800~1000	300~800	400~800	300~800	100~500	50~500	100~700
抗撕性	好	中	中	中	好	中	好	中	中	差	差
使用温度上限/°C	<100	80~120	120	120~170	120~150	120~170	150	80	300	-100~300	80~130
耐磨性	中	好	好	中	中	中	中	好	中	差	差
回弹性	好	中	好	中	中	中	中	中	中	差	差
耐油性	—	—	—	中	好	好	—	好	好	—	好
耐碱性	—	—	—	好	好	—	—	差	好	—	好
耐老化	—	—	—	好	—	—	好	—	好	—	好
成本		高			高				高	高	
使用性能	高强、绝缘、防振	耐磨	耐磨、耐寒	耐酸、耐碱、耐燃	耐油、耐水、气密	耐水、绝缘			碱、耐热、真空		酸碱
工业应用举例	通用制品、轮胎	通用制品、胶布、胶板、轮胎、胶管	轮胎、耐寒输送带、V带减振器	内胎、水胎、化工衬里、防振品	油罐衬、管道、胶布、电缆皮、门窗嵌条	耐油垫圈、油管、油槽衬	汽车配件、散热器、管、电绝缘件、耐热运输带	实心轮胎、胶衬里、耐密封件、特种垫圈	化工衬里、高级密封件、真空胶件	耐高温件、绝緣件、管道接头	丁腈改性用

6.1.5 胶粘剂

胶粘剂是一种能将同种或不同种材料粘合在一起，并在胶接面有足够强度的物质，它能起

粘接、固定、密封、浸渗、补漏和修复的作用。

1. 胶粘剂的组成

胶粘剂以富有粘性的物质为基础，并以固化剂或增塑剂、增韧剂、填料等改性剂为辅料。

酸盐类、磷酸盐类、陶瓷类等。

剂需加胺、酸酐或咪唑等固化剂。

稳定剂、分散剂、偶联剂、触变剂、阻燃剂、抗老化剂、发泡剂、消泡剂、着色剂和防腐剂等，有助于胶粘剂的配制、储存、加工工艺及性能等方面的改进。

2. 胶粘剂的分类原则及表示方法

通常将胶粘剂按应用性能分为以下几类：

等，以及具有特殊的固化反应，如厌氧性、热熔性、光敏性、压敏性等。

GB/T 13553—1996 规定了胶粘剂按主要粘料、物理形态、硬化方法和被粘物材质的分类方法及其代号的编写方法。用三段式的代号来表示一种胶粘剂产品。第一段用三位数字分别代表胶粘剂主要粘料的大类、小类和组别

胶粘剂的物理形态，右边部分用小写英文字母代表胶粘剂的硬化方法；第三段用不多于三个大写的英文字母代表被粘物。

被粘物材质
 胶粘剂的硬化方法
 胶粘剂的物理形态
 胶粘剂的主要粘料

表 6.1.4 胶粘剂主要粘料的大类及部分小类、组别

序号	大类	部分小类、组别
1	动物胶	血液胶
2	植物胶	羧甲基纤维素
3	无机物及矿物胶	硅酸钠 石油沥青
4	合成弹性体	丁苯橡胶 硅橡胶

续表

序 号	大 类	部分小类、组别
5	合成热塑性材料	聚乙酸乙烯酯 酸酯聚合物
6	合成热固性材料	环氧树脂类
7	热固性、热塑性材料与弹性体复合	酚醛-丁腈型 醛-缩醛型 复合型结构胶粘剂

3. 常用胶粘剂

常用的结构胶粘剂主要有3大类：改性环氧胶粘剂、改性酚醛树脂胶粘剂、无机胶粘剂，目前应用的结构胶粘剂大都为混合型。酚醛树脂胶粘剂是发展最早、价格最廉的合成胶粘剂，主要用于胶接木材生产胶合板。后来加入橡胶或热塑性树脂进行改性，制成韧性好、耐热、耐油水、耐老化、强度大的结构胶粘剂，广泛用于飞机制造、尖端技术和各生产领域。其中以酚醛—缩醛胶和酚醛—丁腈胶最为重要。

非

烯酸酯胶、有机硅胶粘剂、橡胶胶粘剂、热熔胶粘剂、厌氧胶粘剂等。丙烯酸酯胶粘剂的特点是不需称量和混合，使用方便，固化迅速，强度较高，适用于胶接多种材料；其品种很多，性能各异，主要有工业常用的502胶、501胶等。

密封胶粘剂

机械接合部位，防止渗漏、机械松动或冲击损伤等，起到密封作用。密封胶可分为非粘结型与粘结型两类，可用于汽车、机床及各类机械设备的零部件，如法兰、轴承、管道、油泵等的密封，螺纹铆接、镶嵌、接插处缝隙的密封，以及电子元件的灌封、绝缘密封等。

表6.1.5介绍了部分常用胶粘剂的特点和用途。

表6.1.5 部分常用胶粘剂的特点和用途

品 种	主 要 成 分	特 点	固 化 条 件	用 途 举 例
环氧-尼龙胶	环氧或改性环氧、尼龙、固化剂	强度高，但耐潮湿和耐老化性较差，双组分	高温	一般金属结构件的胶接
环氧-聚砜胶	环氧、聚砜、固化剂	强度高，耐湿热老化，耐碱性好，单组分或双组分	高温或中温	金属结构件的胶接，高载荷接头、耐碱零件的胶接
环氧-酚醛胶	环氧、酚醛	耐热性好，可达200℃，单组分、双组分或胶膜	高温	耐150~200℃金属工件的胶接

续表

品 种	主要成分	特 点	固 化 条 件	用 途 举 例
环氧 - 聚氨酯胶	环氧、聚酯、异氰酸酯、固化剂	韧性好,耐超低温好,可在 - 196 下使用,双组分	室温或中温	金属工件的胶接,超低温工件的胶接,低温密封
环氧 - 聚硫胶	环氧、聚硫橡胶、固化剂	韧性好,双组分	室温或中温	金属、塑料、陶瓷、玻璃钢的胶接
环氧 - 丁腈胶	环氧、丁腈橡胶固化剂	韧性好,双组分	室温或中温	100 下使用的受冲击金属件的胶接
环氧 - 丁腈胶	改性环氧、丁腈橡胶、增塑剂、填料、潜性固化剂、促进剂	200 ~ 250 、5 min 内即可固化,耐冲击,单组分	中温或高温	金属、非金属结构件的胶接,“粘接磁钢”的制造,电机磁性槽楔引拔成形,玻璃布与铁丝的胶接
酚醛 - 缩醛胶	酚醛、聚乙烯醇缩醛	强度高、耐老化,能在 150 下长期使用	高温	金属、陶瓷、塑料、玻璃钢等的胶接
酚醛 - 丁腈胶	酚醛、丁腈橡胶	韧性好,耐热、耐老化性较好	高温	250 以下使用的金属工件的胶接
氧化铜磷酸盐无机胶	氧化铜磷酸、氢氧化铝	耐热在 600 以上,配胶、施工较易,适用于槽接、套接	室温或中温	金属、陶瓷、刀具、工模具等的胶接和修补
硅酸盐无机胶	硅酸铝、磷酸铝、或少量氧化锆或氧化硅、硅酸钠	耐热性高,可达 1 000 ~ 1 300 ,质较脆,固化工艺不便,适于槽接,套接	室温到高温	金属、陶瓷高温零部件的胶接
预聚体型聚氨酯胶	二异氰酸酯与多羟基树脂预聚体、多羟基树脂,如聚醚、聚酯、环氧等	胶接强度高,耐低温性 接多种材料	室温或中温	金属、塑料、玻璃、皮革、陶瓷、纸张、织物、木材等的胶接,低温零件的胶接、修补
反应型(第二代)丙烯酸酯胶	甲基丙烯酸甲酯、甲基丙烯酸、弹性体、促进剂、引发剂	双组分,不需称量和混合,固化快,润湿性强,对金属、塑料的胶接强度高,耐油性好,耐老化	室温	金属、ABS、有机玻璃、塑料的胶接,商标纸的压敏胶接
- 氰基丙烯酸酯胶	- 氰基丙烯酸甲酯或乙酯、丁酯单体、增塑剂	瞬间快速固化、使用方便,质脆、耐水、耐湿性较差,单组分	室温几分钟	金属、陶瓷、玻璃、橡胶、塑料(乙烯、有机玻璃等)接,一般要求和小面积仪表零件的胶接和固定
树脂改性氯丁(橡胶)	氯丁橡胶、酚醛、硫化体系	韧性好,初粘力高,可在 - 60 ~ 100 下使用	室温	橡胶、皮革、塑料、木材、金属的胶接

续表

品 种	主要成分	特 点	固 化 条 件	用 途 举 例
聚氨酯 厌氧胶	聚氨酯丙烯酸双 酯、促进剂、催化 剂、填料	韧性好，胶接强度较 高，适用范围较广	隔氧，室温 10 min固化	螺栓、柱锁固定，防 水、防油、防漏，金属、 塑料的胶接和临时固定、 密封

6.2 陶瓷材料

陶瓷是由金属和非金属元素组成的无机化合物材料，性能硬而脆，比金属材料 and 工程塑料更能抵抗高温和环境的作用，已成为现代工程材料的三大支柱之一。

6.2.1 陶瓷的分类

陶瓷种类繁多，工业陶瓷大致可分为普通陶瓷和特种陶瓷两大类。如果按性能和应用的不同，陶瓷也可分为工程陶瓷和功能陶瓷两大类。

1. 普通陶瓷

除陶、瓷器之外，玻璃、水泥、石灰、砖瓦、搪瓷、耐火材料都属于陶瓷材料。一般人们所说陶瓷常指日用陶瓷、建筑瓷、卫生瓷、电工瓷、化工瓷等。普通陶瓷以天然硅酸盐矿物如粘土

土 $2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

2. 特种陶瓷

采用纯度较高的人工合成原料，如氧化物、氮化物、硅化物、硼化物、氟化物等制成的，它们具有各种特殊力学、物理、化学性能。

3. 工程陶瓷

在工程结构上使用的陶瓷称为工程陶瓷。现代工程陶瓷主要在高温下使用，故也称高温结构陶瓷。这些陶瓷具有在高温下优越的力学、物理和化学性能，在某些科技场合和工作环境往往是唯一可用的材料。工程陶瓷有许多种，目前应用广泛和有发展前途的有氧化铝、氮化硅、碳化硅和增韧氧化物等材料。

4. 功能陶瓷

利用陶瓷特有的物理性能可制造出种类繁多用途各异的功能陶瓷材料。例如导电陶瓷、半导体陶瓷、压电陶瓷、绝缘陶瓷、磁性陶瓷、光学陶瓷精密陶瓷对声、光、电、热、磁、力、湿度、射线及各种气氛等信息显示的敏感特性而制得的各种陶瓷传感器材料。

6.2.2 陶瓷材料的性能特点

1. 力学性能

和金属材料相比较，大多数陶瓷的硬度高，弹性模量大，脆性大，几乎没有塑性，抗拉强

度低，抗压强度高。

2. 热性能

陶瓷材料熔点高，抗蠕变能力强，热硬性可达 1 000 。但陶瓷热膨胀系数和导热系数小，承受温度快速变化的能力差，在温度剧变时会开裂。

3. 化学性能

陶瓷的化学性能最突出的特点是化学稳定性很高，有良好的抗氧化能力，在强腐蚀介质、高温共同作用下有良好的抗蚀性能。

4. 其它物理性能

大多数陶瓷是电绝缘体，功能陶瓷材料具有光、电、磁、声等特殊性能。

6.2.3 常用工程结构陶瓷的种类、性能和用途

常用工程结构陶瓷的种类、性能和应用如表 6.2.1 所示。

表 6.2.1 常用工程结构陶瓷的种类、性能和应用

名 称		密度 / (g·cm ⁻³)	抗弯强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	线胀系数 / (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	应用 举 例
普通 陶瓷	普通工业陶瓷	2.3~2.4	65~85	26~36	460~680	3~6	绝缘子，绝缘的机械支撑件，静电纺织导纱器
	化工陶瓷	2.1~2.3	30~60	7~12	80~140	4.5~6	受力不大、工作温度低的酸碱容器、反应塔、管道
特 种 陶 瓷	氧化铝瓷	3.2~3.9	250~450	140~250	120~2 500	5~6.7	内燃机火花塞，轴承，化工泵的密封环，导弹导流罩，坩埚热电偶套管，刀具，拉丝模等
	氮化硅瓷 反应烧结 热压烧结	2.4~2.6 3.10~3.13	166~206 490~590	141 150~275	1 200 —	2.99 3.28	耐磨、耐腐蚀、耐高温零件，如石油、化工泵的密封环，电磁泵管道、阀门，热电偶套管，转子发动机刮片，高温轴承，刀具等
	氮化硼瓷	2.15~2.2	53~109	25 (1 000)	233~315	1.5~3	坩埚、绝缘零件、高温轴承、玻璃制品成型模等
	氧化镁瓷	3.0~3.6	160~280	60~80	780	13.5	熔炼 Fe、Cu、Mo、Mg 等金属的坩埚及熔化高纯度 U
	氧化铍瓷	2.9	150~200	97~130	800~1 620	9.5	高温绝缘电子元件，核反应堆中子减速剂和反射材料，高频电炉坩埚等
	氧化锆瓷	5.5~6.0	1 000~500	140~500	144~2 100	4.5~11	熔炼 Pt

6.3 复合材料

工程技术和科学的发展对材料的要求越来越高,这种要求是综合性的,有时是相互矛盾的。例如,有时既要求导电性优良,又要求绝热;有时既要求强度高于钢,又要求弹性类似橡胶。显然仅靠开发单一的新材料难以满足上述要求,而将不同性能的材料复合成一体,实现性能上的互补,则是一条有效的途径。

所谓复合材料是指由两种或多种不同性能的材料用某种工艺方法合成的多相材料。复合材料既保持组成材料各自的特性,又具有复合后的新特性,其性能往往超过组成材料的性能之和或平均值。例如:玻璃纤维的断裂能仅有 $75 \times 10^{-5} \text{ J}$,常用树脂亦只有 $22.6 \times 10^{-3} \text{ J}$,而由两者复合成的玻璃钢的断裂能高达 17.6 J 。由此可见“复合”是开发新材料的重要途径。组成材料的种类、性能、比例、形态不同,复合方法不同,会得到不同的强化效果。例如粒子复合强化,纤维复合强化,叠层复合强化等。

6.3.1 复合材料的种类

复合材料种类较多,目前较常见的是以高分子材料、陶瓷材料、金属材料为基体,以粒子、纤维和片状为增强体组成的各种复合材料,如表 6.3.1 所示。

表 6.3.1 复合材料的种类

增强体		基体							
		金属	无机非金属				有机材料		
			陶瓷	玻璃	水泥	碳素	木材	塑料	橡胶
金属		金属基复合材料	陶瓷基复合材料	金属网嵌玻璃	钢筋水泥	无	无	金属丝增强塑料	金属丝增强橡胶
无机非金属	陶瓷纤维粒料	金属基超硬合金	增强陶瓷	陶瓷增强玻璃	增强水泥	无	无	陶瓷纤维增强塑料	陶瓷纤维增强橡胶
	碳素纤维粒料	碳纤维增强金属	增强陶瓷	陶瓷增强玻璃	增强水泥	碳纤增强碳合金材料	无	碳纤维增强塑料	碳纤炭黑增强橡胶
	玻璃纤维粒料	无	无	无	增强水泥	无	无	玻璃纤维增强塑料	玻璃纤维增强橡胶
有机材料	木材	无	无	无	水泥木丝板	无	无	纤维板	无
	高聚物纤维	无	无	无	增强水泥	无	塑料合板	高聚物纤维增强塑料	高聚物纤维增强橡胶
	橡胶胶粒	无	无	无	无	无	橡胶合板	高聚物合金	高聚物合金

按基体材料的不同可将复合材料分为两类:非金属基复合材料(金属基复合材料、陶瓷基复合材料等)

按照增强材料的不同可将复合材料分为三类:纤维增强材料,例如纤维增强橡胶轮胎、传动皮带)

弥散硬化合金等； 叠层复合材料，如双层金属

6.3.2 复合材料的性能特点

1. 比模量高、比强度大

比模量是弹性模量与密度之比；比强度是抗拉强度与密度之比。其实是单位质量所提供的变形抗力和承载能力，这对要求自重小、运转速度高的结构零件很重要。各类材料的强度性能比较见表 6.3.2。

表 6.3.2 各类材料强度性能比较

材 料	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 σ_b (MPa)	弹性模量 E (GPa)	比强度 σ_b/ρ (N/cm^2)	比模量 E/ρ (N/cm^2)
钢	7.8	1 010	206	129	26
铝	2.8	460	74	165	26
玻璃钢	2.0	1 040	39	520	20
碳纤维/环氧树脂	1.45	1 472	137	1 015	95
硼纤维/环氧树脂	2.1	1 344	206	640	98
硼纤维/铝	2.65	981	196	370	74

2. 良好的抗疲劳和破断安全性

这是由于纤维增强复合材料对缺口、应力集中敏感性小，纤维 - 基体界面能阻止疲劳裂纹扩展，使裂纹扩展改变方向。试验测定表明，碳纤维复合材料的疲劳极限可达抗拉强度的 70% ~ 80%，而金属的疲劳极限只有其抗拉强度的一半左右。纤维增强复合材料中有大量独立的纤维，平均每平方厘米面积上有几千到几万根，当少数纤维断裂后载荷就会重新分配到其它未破断的纤维上使构件不致发生突然破坏，故破断安全性好。

3. 优良的高温性能

大多数增强纤维在高温下仍保持高的强度，用其增强金属和树脂时能显著提高高温性能。例如铝合金在 400℃ 时弹性模量大幅度下降，强度也显著降低，而用碳纤维增强后，在此温度下弹性模量可基本保持不变。

6.3.3 复合材料的应用

在三类增强材料中，纤维增强复合材料发展最快、应用最广。常用的纤维增强复合材料有以下几种：

1. 玻璃纤维 - 树脂复合材料

以玻璃纤维和热塑性树脂复合的玻璃纤维增强材料比普通塑料具有更高的强度和冲击韧度。其增强效果因树脂的不同而有差异，以尼龙、聚乙烯和聚丙烯的增强效果也较好。玻璃纤维与塑料基体组成的复合材料通常叫做玻璃钢。按所用基体可分为热固性玻璃钢（酚醛树脂等）和热塑性玻璃钢（聚乙烯、聚丙烯等）。

1/5。因此它的比强度不但高于铜合金或铝合金，甚至还高于某些合金钢。此外，它还有良好的耐蚀性。玻璃钢是目前应用最广泛的一种新型工程材料。在石油化工行业，玻璃钢可用于制造各种罐、管道、泵、阀门等。在交通运输业内，可用于制造各种轿车、载重汽车的车身和各种配件，玻璃钢也可以用于制作铁路运输用大型罐车和各类船体及部件。玻璃钢在机械工业中的应用正日益扩大。从简单的防护罩类制品到较复杂的结构件

采用玻璃钢制造。利用玻璃钢的优良电绝缘性能，可以制造如印刷电路、开关装置等各种电工器材和结构。随着其弹性模量的改善以及耐高温与抗老化性能的改进，它在各个领域的应用将会有有一个更大的发展。

2. 碳纤维 - 树脂复合材料

碳纤维通常和环氧树脂、酚醛树脂、聚四氟乙烯等组成复合材料。它在保持了玻璃钢许多性能优点的基础上，还有一些优异的性能。它的强度和弹性模量都高于铝合金，接近高强度钢；它的密度比玻璃钢还小，因此比强度和比模量在现有复合材料中居第一位。此外，它还有优良的耐磨、减摩及自润滑、耐蚀、耐热等优点。在机械工业中，碳纤维复合材料可用作承载零件和耐磨零件，如齿轮、连杆、活塞和轴承等。它也用作耐蚀化工机械零件，如容器、管道、泵等。

6.4 其它新型材料

6.4.1 高温材料

所谓高温材料一般是指在 600 以上，甚至在 1 000 以上能满足工作要求的材料，这种材料在高温下能承受较高的应力并具有相应的使用寿命。常见的高温材料是高温合金，它出现于 20 世纪 30 年代，其发展和使用温度的提高与航空航天技术紧密相关。现在高温材料的应用范围越来越广，从锅炉、蒸汽机、内燃机到石油、化工用各种高温物理化学反应装置、原子反应堆的热交换器、喷气涡轮发动机和航天飞机的多种部件都有广泛的使用。这些高技术领域对高温材料的使用性能要求，促使高温材料的种类不断增多，使用温度不断提高，性能不断改善。反过来，高温材料的性能提高，又扩大了其应用领域。

目前开发使用的高温材料主要有铁基高温合金、镍基高温合金和高温陶瓷材料等。镍基高温合金以 Ni 为基体，Ni 含量超过 50%，使用温度可达 1 000 。高温强度、抗氧化性和抗腐蚀性都较铁基的更好。现代喷气发动机中，涡轮叶片几乎全部采用镍基合金制造。镍基高温合金按其生产方式可分为变形合金与铸造合金两大类。为适应现代工业更高的要求，高温合金的研究开发尽管难度极大，也在不断取得进展。现在已经使用或正在研制的新型高温合金有定向凝固高温合金、单晶高温合金、粉末冶金高温合金、快速凝固高温合金、金属间化合物高温合金和其它难熔金属高温合金等等。单晶高温合金的工作温度要比普通铸造高温合金高约 100 。对涡轮叶片而言，每提高 25 ，就相当于提高叶片寿命 3 倍，发动机的推力就将会有较大幅度的增加。因此单晶高温合金等新型高温合金的问世极大地促进了航空航天等工业的发展。

6.4.2 形状记忆材料

形状记忆是指某些材料在一定条件下，虽经变形而仍然能够恢复到变形前原始形状的能力。最初具有形状记忆功能的材料是一些合金材料，如 Ni - Ti 合金。目前高分子形状记忆材料因其优异的综合性能也已成为重要的研究与应用对象。

材料的形状记忆现象是由美国海军军械实验室的科学家布勒合金时发现的。著名的形状记忆合金的应用例子是制造月面天线。半球形的月面天线直径达数米，用登月舱难以运载进入太空。科学家们利用 Ni - Ti 合金的形状记忆效应，首先将处于一定状态下的 Ni - Ti 合金丝制成半球形的天线，然后压成小团，用阿波罗火箭送上月球，放置在月面上。小团被阳光晒热后恢复成原状，即可成功地用于通讯。形状记忆效应是热弹性马氏体相变产生的低温相在加热时向高温相进行可逆转变的结果。材料在高温下制成某种形状，在低温下将其任意变形，若将其加热到高温时，材料恢复高温下的形状，但重新冷却时材料不能恢复低温时的形状，这是单程记忆效应；若低温下材料仍能恢复低温下的形状，就是双程记忆效应。

目前形状记忆合金主要分为 Ni - Ti 系、Cu 系和 Fe 系合金等。Ni - Ti 系形状记忆合金是最具有实用化前景的形状记忆材料。铜系形状记忆合金主要是 Cu - Zn - Al 合金和 Cu - Ni - Al 合金，与 Ni - Ti 合金相比，其加工制造较为容易，价格便宜，记忆性能也比较好。除形状记忆合金外还有形状记忆高聚物，如聚乙烯类结晶性聚合物等。

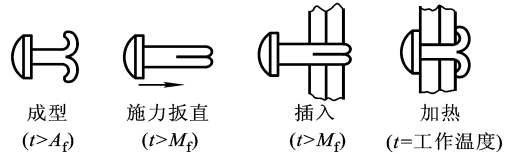


图 6.4.1 铆钉的应用

形状记忆材料可用于各种管接头、电路的连接、自控系统的驱动器以及热机能量转换材料等。图 6.4.1 为铆钉的应用实例。大量使用形状记忆材料的是各种管接头。因为形状恢复力很大，故连接很严密，至今未见报道有漏油、脱落等事故发生。形状记忆材料还可用于各种温度控制仪器，如温室窗户的自动开闭装置，防止发动机过热用的风扇离合器等。由于形状记忆材料具有感知和驱动的双重功能，因此其可能成为未来微型机械手和机器人的理想材料。

6.4.3 非晶态材料

非晶态材料是相对晶态而言的，此时的原子是混乱排列的状态。非晶态材料的种类很多，如传统的硅酸盐玻璃、非晶态聚合物以及非晶态半导体、非晶态超导体、非晶态离子导体等。这里则主要介绍非晶合金。由于非晶合金在结构上与玻璃相似，故亦称为金属玻璃。金属玻璃可采用液相急冷法、气相沉积法、注入法等制备。1959 年，杜威兹

106 /s 的急冷速度将 Al - Si 合金熔体制成非晶态箔片，这种液态淬火制备金属玻璃的方法，大大促进了非晶态金属的发展。

非晶合金在力学、电学、磁学及化学性能诸方面均有独特之处。其具有很高的强度和硬度。非晶合金 $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ 抗拉强度达 3 630 MPa。而晶态超高强度钢的抗拉强度仅为 1 800 ~ 2 000 MPa。非晶态铝合金的抗拉强度是超硬铝的两倍

性，许多淬火态的金属玻璃薄带可以反复弯曲，即使弯曲到 180°也不会断裂。因此既可冷轧弯曲加工，也可编织成各种网状物。

表 6.4.1 铝基非晶态合金与其它合金的强度比较

材料类型	抗拉强度 σ_b /MPa	比强度 (σ_b/ρ) ($\times 10^2$)
非晶态合金	1 140	3.8×10^2
超硬铝	520	1.9×10^2
马氏体钢	1 890	2.4×10^2
铁合金	1 100	2.4×10^2

6.4.4 超导材料

超导材料是近年发展最快的功能材料之一。超导体是指在一定温度下材料电阻为零，物质内部失去磁通成为完全抗磁性的物质。

超导现象是荷兰物理学家昂内斯

发现，温度低于 4.2 K 时电阻突然消失。这种零电阻现象称为超导现象，出现零电阻的温度称为临界温度 T_c 。 T_c 是物质常数，同一种材料在相同条件下有确定值。 T_c 的高低是超导材料能否实际应用的关键。1933 年，迈斯纳

超导状态时，它能将通过其内部的磁力线排出体外，称为迈斯纳效应。零电阻和完全抗磁性是超导材料的两个最基本的宏观特性。 T_c 值愈高，超导体的使用价值愈大。由于大多数超导材料的 T_c 值都太低，必须用液氮才能降到所需温度，这样不仅费用昂贵而且操作不便，因而许多科学家都致力于提高 T_c 值的研究工作。到 20 世纪 80 年代中期，超导材料研究取得突破性进展。中国、美国、日本等先后获得 T_c 高达 90 K 以上的 Y - Ca - Cu - O 高温超导材料，而后再研制出 T_c 超过 120 K 的高温超导材料。这些结果已成为技术发展史上的重要里程碑，使在液氮温度下使用的超导材料变为现实，其必将对许多科学技术领域产生难以估计的深远影响。至今，对高温超导的研究仍方兴未艾。

超导材料一般分为超导合金

1986 年超导陶瓷的出现，使超导体的 T_c 获得重大突破。 T_c 高于 120 K 的铌钡钙铜氧材料就属于超导陶瓷材料。

超导材料在工业中有重大应用价值：

1. 在电力系统方面

超导电力储存是目前效率最高的储存方式。利用超导输电可大大降低目前高达 7% 左右的输电损耗。超导磁体用于发电机，可大大提高电机中的磁感应强度，提高发电机的输出功率。利用超导磁体实现磁流体发电，可直接将热能转换为电能，使发电效率提高 50% ~ 60%。

2. 在运输方面

超导磁悬浮列车是在车底部安装许多小型超导磁体，在轨道两旁埋设一系列闭合的铝环。列车运行时，超导磁体产生的磁场相对于铝环运动，铝环内产生的感应电流与超导磁体相互作用，产生的浮力使列车浮起。列车速度愈高，浮力愈大。磁悬浮列车时速可达 500 km。

3. 在其它方面

超导材料可用于制作各种高灵敏度的器件，利用超导材料的隧道效应可制造运算速度极快的超导计算机等。

6.4.5 纳米材料

纳米材料是指纳米颗粒和由它们构成的纳米薄膜和固体，是一种结构尺寸在 $1 \sim 100 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

自从 20 世纪 80 年代纳米技术诞生以来，对纳米材料的制备、性能和应用等方面的研究引起世界各国的广泛重视，其已成为新世纪最有发展前景的新材料和新技术之一。

由于纳米粒子的超细化，其晶体结构和表面电子结构发生了一系列变化，产生了一般宏观物体所不具备的量子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应和宏观量子隧道效应。从而使由纳米超微粒组成的纳米材料和常规材料相比，在电、磁、光、力、热和化学等方面具有了一系列奇异的性能。例如，纳米粉末外观呈黑色，可强烈吸收电磁波，是物理学上的理想黑体。因此可作为吸收红外线、雷达波的隐身材料，在现代隐身战机上有重要作用；纳米粉末熔点普遍比大块金属低得多，烧结温度可大为降低，许多纳米微粒在极低温度下几乎无热阻，导热性能好；一些纳米微粒导电性能好，超导转变温度较高；铁磁性金属的纳米粉末具有很强的磁性，磁矫顽力很高，制成的磁记录材料其信噪比和稳定性很高。此外，纳米材料比表面积大，敏感度高，可作为高效催化剂和高灵敏度的传感器；由于其极小的线度尺寸，可用于医学和生物工程方面疾病的检查，提高药物疗效和细胞分离等。由纳米粒子凝聚而成的块体或薄膜等纳米结构材料使人们设计新型材料成为可能，如将金属纳米颗粒放入常规陶瓷中可大大改善材料的力学性能。

除以上几种金属和非金属新型材料外，现在还有新型超硬材料、超塑性材料、磁性材料、电子信息材料和压电陶瓷等新型功能材料等。新型材料正在取得日新月异的发展。

思考题与习题

6.1 有机高分子材料的化学成分与金属材料的化学成分主要有什么不同？它们的宏观性能有什么明显区别？

6.2 高聚物的加聚反应和缩聚反应区别何在？

6.3 导致高聚物老化的因素有哪些？观察生活中塑料和橡胶制品老化的现象。

6.4 塑料、橡胶和胶粘剂的主要组成物各是什么？

6.5 试为下列塑料零件选材

6.6 在使用和保存橡胶制品时，应注意哪些问题？

-
- 6.7 简述工程结构陶瓷材料的性能特点。
 - 6.8 用氮化硅和尼龙材料都可制造滑动轴承，试比较两者的特点。
 - 6.9 为什么复合材料的抗疲劳性能好？
 - 6.10 玻璃钢、有机玻璃、无机玻璃、金属玻璃分别属于哪类材料？各举出一个可能的应用例子。
 - 6.11 了解最近的新型材料发展动态，举出一至两个例子。
 - 6.12 你设想新型材料的研究和应用会有哪些突破？

第7章 铸造成形工艺

问一问，想一想：铸造是一项古老的成形工艺，在信息时代是不是用的很少了？请您观察一下汽车和机床中有哪些部分是采用铸造方法成形的。



学习目标

1. 了解合金的铸造性能及其对铸件质量的影响；了解铸造新工艺、新技术及其发展趋势；
2. 重点掌握砂型铸造的工艺流程、特点及应用；掌握手工两箱造型及浇注的操作技能和铸造生产安全技术；
3. 具有绘制典型铸件的铸造工艺简图、合理选择典型铸件的铸造方法、分析零件铸造结构工艺性的初步能力；具有铸件质量与成本分析的初步能力。

7.1 铸造工艺基础

7.1.1 概述

将液体金属浇注到具有与零件形状相适应的铸型空腔中，待其冷却凝固后，以获得零件或毛坯的方法称为铸造。在一般机械设备中，铸件约占整个机械设备重量的45%~90%。其中汽车铸件重量约占40%~60%，拖拉机的铸件重量约占70%，金属切削机床的铸件重量约占70%~80%等等。在国民经济其它各个部门中，也广泛采用各种各样的铸件。

铸件之所以被广泛应用，是因为铸造与其它金属加工方法相比具有一些鲜明的特点。其能够制造各种尺寸和形状复杂的铸件，如设备的箱体、机座等。铸件的轮廓尺寸可小至几毫米，大至十几米；重量可小至几克，大至数百吨。铸件的形状和尺寸与零件很接近，因而节省了金属材料 and 加工的工时。精密铸件可省去切削加工，直接用于装配。各种合金都可以用铸造方法制成铸件，特别是有些塑性差的材料，只能用铸造方法制造毛坯，如铸铁等。铸造设备的投资少，所用的原材料来源广泛而且价格较低，因此铸件的成本低廉。

铸造的生产方法很多，主要可分为砂型铸造和特种铸造两大类。其中砂型铸造为铸造生产中的最基本方法，砂型铸造的生产工序主要包括：制模、配砂、造型、造芯、合型、熔炼、浇注、落砂、清理和检验。例如，套筒铸件的生产过程如图7.1.1。

7.1.2 合金的铸造性能

铸造生产中很少采用纯金属，而是使用各种合金。铸造合金除应具有符合要求的机械性能

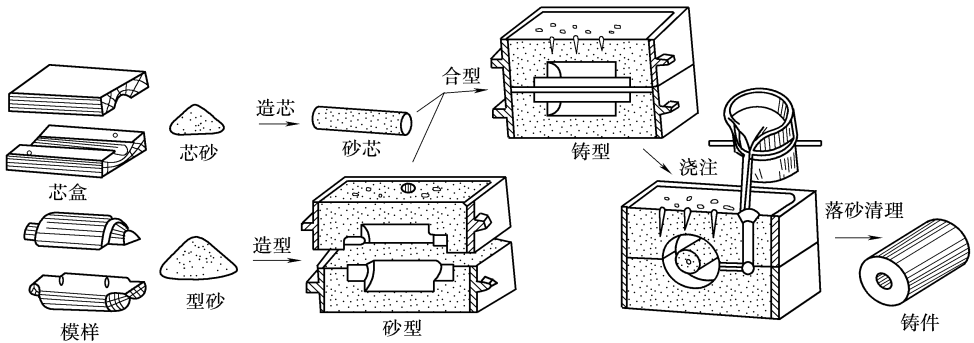


图 7.1.1 套筒的砂型铸造过程

和物理、化学性能外，还必须考虑其铸造性能。合金的铸造性能主要有流动性和收缩性等，这些性能对于是否容易获得优质铸件是至关重要的。

1. 合金的流动性

液态金属本身的流动能力，称为流动性。它与金属的成分、温度、杂质含量及其物理性质有关。金属的流动性对补缩、防裂，获得优质铸件有较大影响。良好的流动性，能使铸件在凝固期间产生的缩孔得到金属的补缩，以及铸件在凝固末期受阻而出现的裂纹得到液态金属的充填而弥合。因此，良好的流动性，有利于防止这些缺陷的出现。流动性也是液态金属充满铸型型腔，获得形状完整、轮廓清晰铸件的基本条件，是合金重要的铸造性能之一。流动性好的铸造合金，充型能力强；流动性差的合金，充型能力差。但是，可以通过改善外界条件来提高其充型能力。在不利的情况下，如果金属的流动性不足，则会在金属液还未充满铸型前就停止了流动，使铸件产生浇不足或冷隔的缺陷。

影响合金流动性的因素有以下几个方面：

量增加，其结晶间隔减小，凝固区域缩短，流动性提高。越接近共晶成分，越容易铸造。铸铁的其它元素

水的流动性降低。

动方向所受的充型压力越大，流动性就越好。例如增加直浇口高度，利用人工加压方法如压铸、低压铸造等。浇注系统的结构越复杂，流动的阻力就越大，流动性就越低。

动性好；型砂中水分过多其流动性差等。

液的流动困难。

以上是影响液态金属流动性的主要因素，由于影响因素较多，在实际生产中它们又是错综复杂的，必须根据具体情况具体分析，找出其中的主要矛盾，采取措施，才能有效地提高金属液的充型能力。

2. 合金的收缩

合金从液态冷却至常温过程中，所发生的体积缩小现象称为收缩。收缩是铸件中许多缺陷，如缩孔、缩松、热裂、应力、变形和冷裂等产生的基本原因。

影响收缩的因素有：化学成分、浇注温度、铸件结构和铸型条件等。不同成分的铁碳合金收缩率也不同。铸钢收缩大而灰铸铁的收缩小。灰铸铁收缩小是由于其中大部分碳是以石墨状态存在的，石墨的比容大，在结晶过程中，析出石墨所产生的体积膨胀，抵消了部分收缩。故含碳量越高，灰铸铁的收缩越小。

7.2 砂型铸造

7.2.1 型砂与芯砂

用来制造砂型和砂芯的材料统称为造型材料。用于制造砂型的材料称为型砂；用于制造型芯的材料称为芯砂。型砂和夹砂等缺陷。由于型

1. 对型砂、芯砂性能的要求

根据铸造工艺要求，型

搬运、翻转、合箱及浇注金属时，有足够的强度才会保证不破坏、蹋落和胀大。若型、芯砂的强度不好，铸件易产生砂眼、夹砂等缺陷。

液接触，水分气化、有机物燃烧及液态金属冷却析出气体，必须通过铸型排出，否则将在铸件内产生气孔或使铸件浇不足。

氧化硅的含量，若耐火度不够，就会在铸件表面或内腔形成一层粘砂层，不但清理困难、影响外观，而且为机械加工增加了困难。

性。型、芯砂退让性不足，会使铸件收缩时受到阻碍，产生内应力、变形和裂纹等缺陷。

型

除了以上性能的要求外，还有溃散性、发气性、吸湿性等的性能要求。型

能，有时是相互矛盾的，如强度高、塑性好，透气性就可能下降，因此应根据铸造合金的种类，铸件大小、批量、结构等，具体决定型

2. 型砂与芯砂的组成

型砂与芯砂相比，由于砂芯的表面被高温金属液所包围，受到的冲刷和烘烤较厉害，因而芯砂的性能要比型砂的性能要求高。就其基本组成来说，都由原砂、粘结剂、水和附加物组成。

2 含量越高，其耐火度越高。铸造用砂根据铸件特点，对原砂的颗粒度、形状和含泥量等有着不同的要求。砂粒越粗，则耐火度和透气性越

高；较多角形和尖角形的硅砂透气性好；含泥量越少透气性越好等。

类。粘土是配制型、芯砂的主要粘结剂，常用粘土分膨润土和普通粘土。湿型砂普遍采用粘性能较好的膨润土，而干型砂多用普通粘土。常用的特殊粘结剂包括：桐油、水玻璃、树脂等。芯砂常选用这些特殊的粘结剂。

铸件表面、内腔的粗糙度；加入木屑以提高型

型)

粘土配成的涂料；湿型撒石墨粉作扑料。铸钢件用石英粉作涂料。

3. 型砂与芯砂的配制

铸造时，根据合金种类、铸件大小、形状等不同，选择不同的型、芯砂配比。如铸钢件浇注温度高，要求高的耐火度，选用较粗的 SiO_2 含量较高的石英砂；而铸造铝合金、铜合金时，可以选用颗粒较细的普通原砂。对于芯砂，为了保证足够的强度和透气性，其粘土、新砂加入量要比型砂高。

配制过程是在混砂机中进行的。型

干混，约 2~3 min 后，再加入水和液体粘结剂，湿混约 10 min，即可打开砂口出砂。

配好的型

试验仪检验，最简单的检验方法是：用手抓一把型

团不松散也不粘手，手印清楚，掰断时断面不粉碎，则可认为砂中粘土与水分含量适宜。

7.2.2 手工砂型造型

1. 手工造型常用的砂箱及工具

(

砂箱的作用是牢固的固紧所捣实的型砂，以便于铸型的搬运及在浇注时承受液体金属的压力。砂箱可以用木料、铸铁、钢、铝合金制成。通常上箱和下箱组成一对砂箱，彼此之间有销子及销孔进行配合。如图 7.2.1 所示。

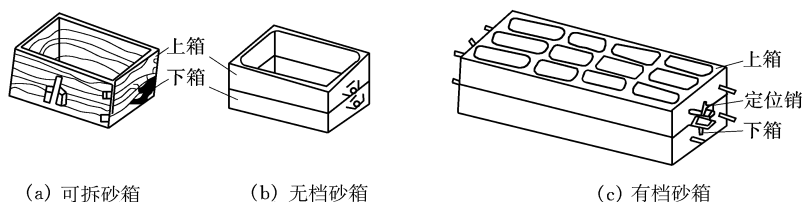


图 7.2.1 常用砂箱示意图

2. 砂型组成

图 7.2.3 为合箱后的砂型。型砂被舂紧在上、下砂箱中，连同砂箱一起，分别称为上砂型

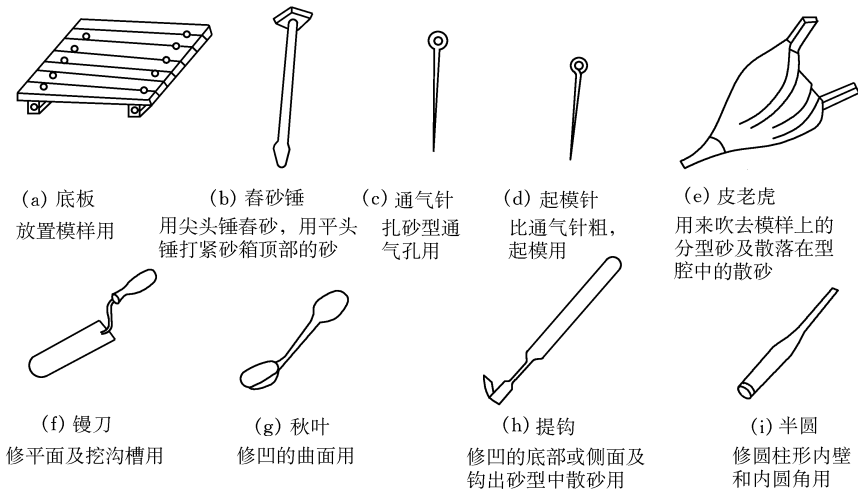


图 7.2.2 造型工具

和下砂型。砂型中取出木模后留下的空腔称为型腔。上、下砂型分界面称为分型面。图中在型腔中有阴影线的部分表示型芯, 型芯是为了形成铸件的孔。型芯上的延伸部分, 称为芯头, 用以安放和固定型芯。型芯头落在砂型的型芯座上。金属液从浇口盆浇入, 经直浇道、横浇道和内浇道而流入型腔。型腔的上方开有出气口, 以排出型腔中的气体。被高温金属液包围后, 型芯中产生的气体则由型芯通气孔排出。另外砂型中还扎有通气孔。

3. 手工造型常用方法

按造型的手段, 造型分手工造型和机器造型两大类。手工造型, 操作灵活, 工艺装备简单, 但生产效率低, 劳动强度大, 仅适用于单件小批量生产。手工造型的方法很多, 可根据铸件的形状、大小和批量选择。常用的手工造型方法介绍如下:

一端且是平面; 分型面多为平面, 操作造型简单, 适用于形状简单的铸件, 如盘、盖类。其造型过程如图 7.2.4 所示。

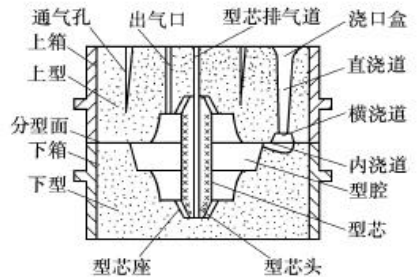


图 7.2.3 砂型组成

与整模基本相似, 不同的是在造上型时, 必须在下箱的模样上, 靠定位销放正上半模样。图 7.2.5 为套筒的分模造型过程。分模造型适用于形状较复杂的铸件, 特别是用于有孔的铸件, 如套筒、阀体、管子等。

模的部分, 如图 7.2.6 的小凸台, 做成活动的。活块与模样用销子或燕尾连接。起模时, 先将模样主体取出, 再将留在铸型内的活块单独取出。其过程见图 7.2.6 所示。活块造型, 要求造型特别细心, 操作技术水平高, 生产率低, 质量也难以保证。

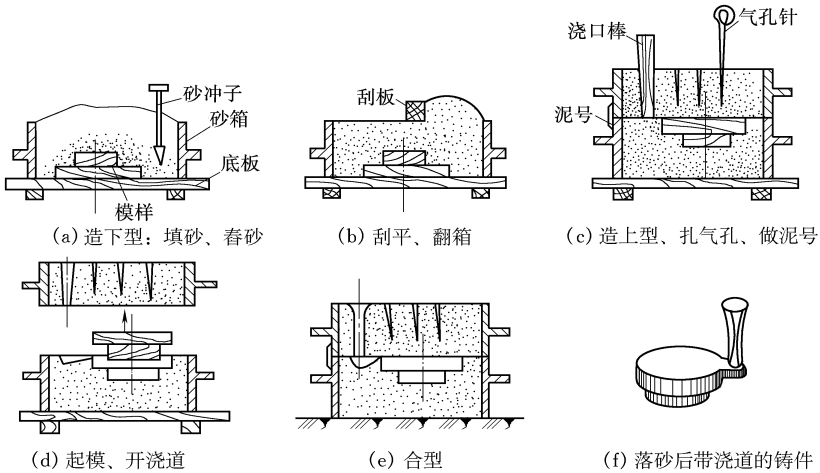


图 7.2.4 整模造型过程

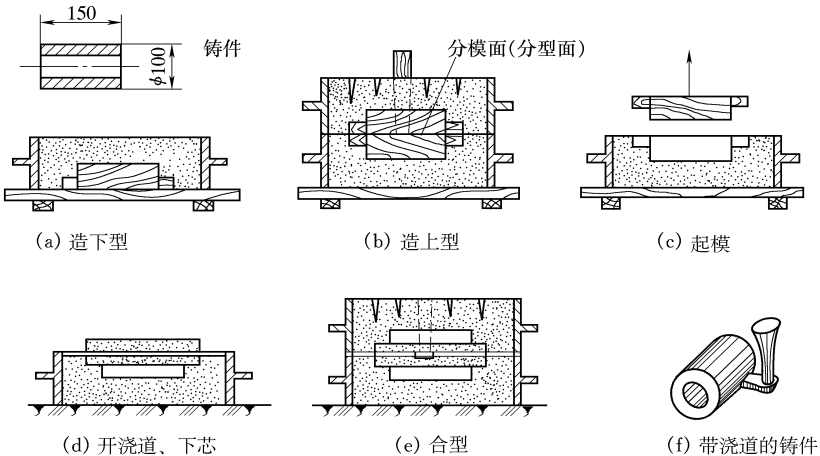


图 7.2.5 套筒的分模造型过程

限，模型不便分成两半时，常采用挖砂造型。如图 7.2.7 为手轮的挖砂造型过程。挖砂造型时，每造一型需挖砂一次，操作麻烦，生产率低，要求操作技术水平高。挖砂时应注意，必须要挖到模型的最大截面，位置要恰当，否则就会在分型面产生毛刺，影响铸件的外形和尺寸精度。此方法仅用于形状较复杂铸件的单件生产。

型。其过程如图 7.2.8。先预制好一半型，其上承托模样，用其造下型，然后在此下型上再造上型。开始预制的半型不用来浇注，故称假箱。假箱一般是用强度较高的型砂制成，舂得比铸

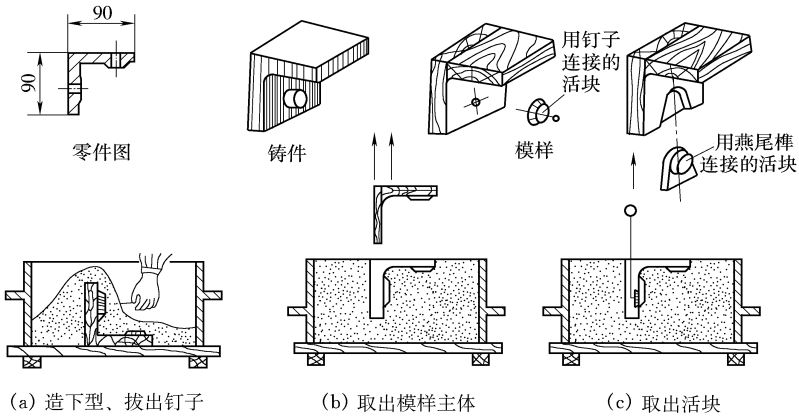


图 7.2.6 活块造型

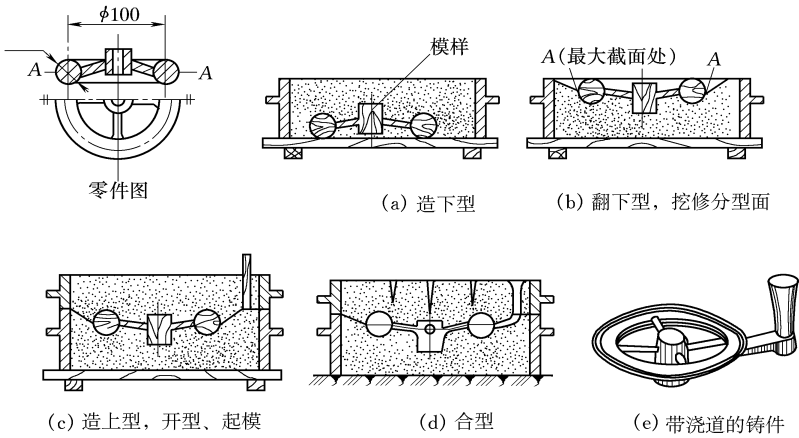


图 7.2.7 手轮的挖砂造型过程

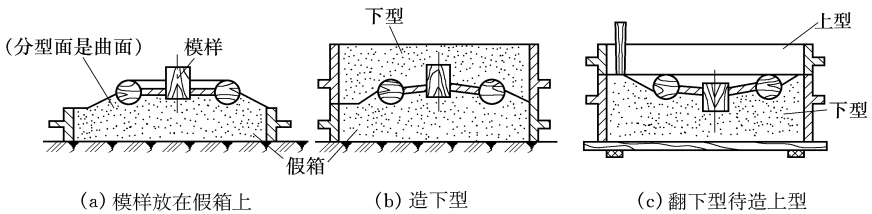


图 7.2.8 假箱造型

型硬。假箱造型可免去挖砂操作，提高造型效率。当数量较大时，可用木料制成成型底板代替假箱。

截面，这时其最大截面为两个，造型时，为了方便起模，必须有两个分型面。见图 7.2.9。其特点是：中型的上、下两面都是分型面，且中箱高度与中型的模样高度相近。此方法操作较复杂，生产率较低，适用于两头大、中间小的、形状复杂且不能用两箱造型的铸件。

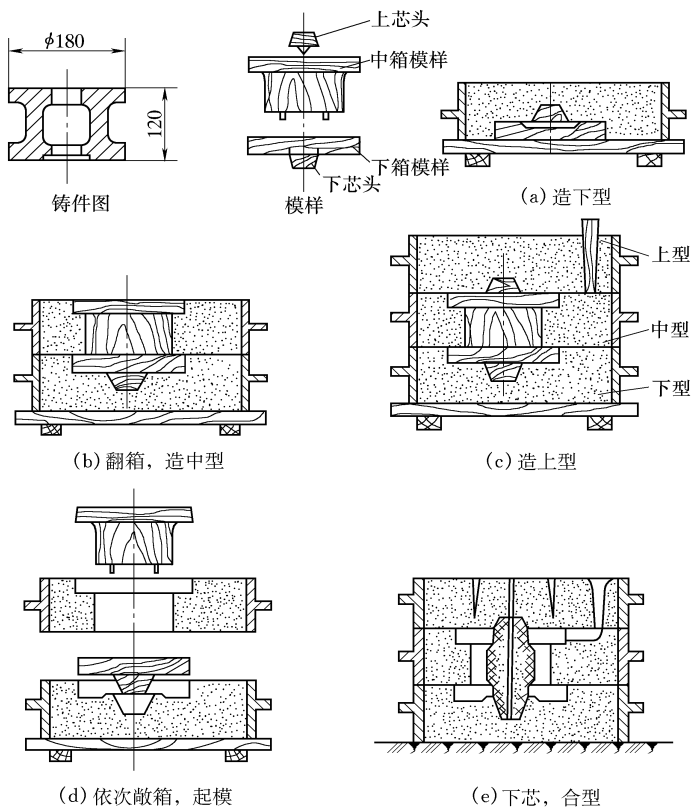


图 7.2.9 带轮的三箱造型过程

为了节省模样费用，缩短模样制造时间，可以采用刮板造型。刮板是一块和铸件截面形状相适应的木板。图 7.2.10 为带轮刮板造型过程。先将型砂填入下箱，然后将装在刮板上的旋转小轴插入下箱底面上已事先装好的轴芯中，刮板上部的另一小轴，用同样方法插入刮板支架上，使刮板能绕小轴旋转。这样，旋转刮板即可将下箱刮出。将刮板翻转 180° ，同样的方法可刮制上箱。刮板造型模样简单，节省制模材料和工时，但操作复杂，生产率很低，仅用于大、中型旋转体铸件的单件、小批生产。

7.2.3 机器造型

在成批、大量生产时，应采用机器造型，将紧砂和起模过程机械化。与手工造型相比，机

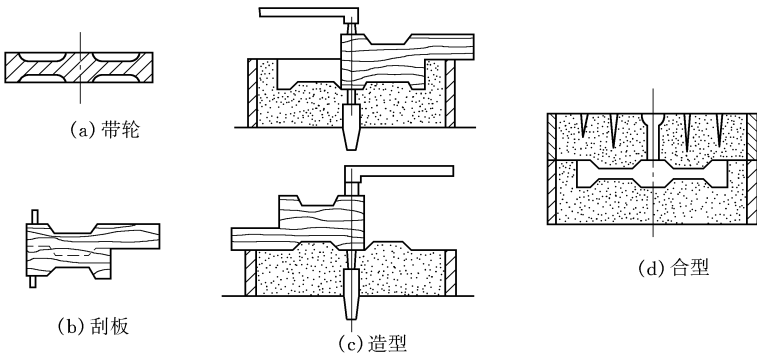


图 7.2.10 带轮刮板造型

器造型生产效率高，铸件尺寸精度高，表面粗糙度低。但设备及工艺装备费用高，生产准备时间长。机器造型按紧实方式分震压式造型、高压造型、空气冲击造型等。图 7.2.11 为水管接头机器造型的示意图。

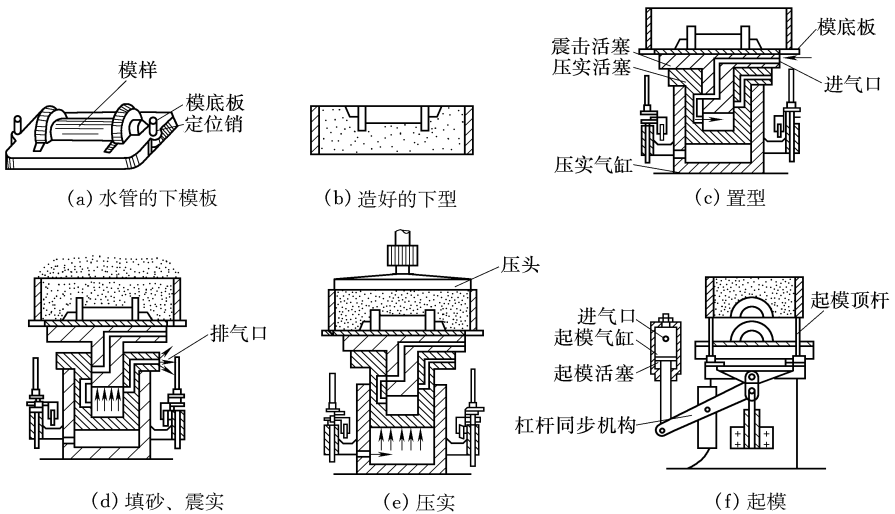


图 7.2.11 水管接头机器造型过程

机器造型的特点是：

位孔配合。模板用螺钉紧固在造型机工作台上，可随造型机上下震动。

7.2.4 型芯制造

型芯的主要作用是形成铸件的内腔，有时也形成铸件局部外形。由于砂芯的表面被高温金

属液所包围，受到的冲刷及烘烤比砂型厉害，因此要求砂芯要有更高的强度、透气性、耐火度和退让性等。为了满足以上性能，生产中常采用以下措施。

1. 放芯骨

砂芯中放入芯骨，以提高强度。小芯骨常用铁丝、铁钉，大、中型的芯骨则用铸铁浇注成骨架，如图 7.2.12 所示。为了砂芯的搬运和吊装，芯骨上常作出吊环。

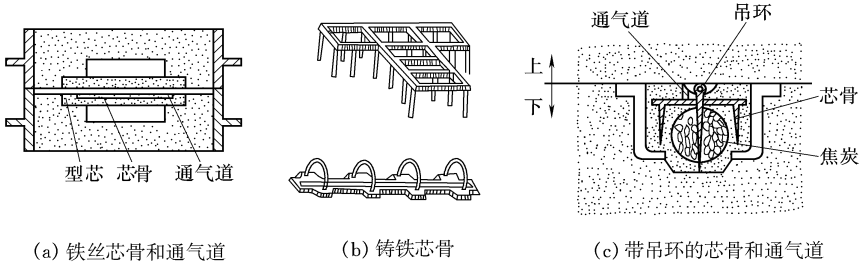


图 7.2.12 芯骨和排气道

2. 开排气道

砂芯中必须作出贯通的排气道，以提高砂芯的透气性。砂芯的通气孔一定要与砂型的出气孔相通，以便将气体排出型外。较大的型芯，可在型芯里放置焦炭或炉渣，以提高型芯的透气性。

3. 刷涂料

大部分的砂芯表面要刷一层涂料，以提高耐高温性能，防止铸件粘砂。对铸铁件多用石墨粉涂料，铸钢件多用硅粉涂料。

4. 烘干

砂芯烘干后，强度和透气性均能提高。粘土砂芯烘干温度为 250 ~ 350 ，油砂芯为 180 ~ 240 。

型芯可用手工和机器制造；可用芯盒制造，也可用刮板制造。其中手工型芯盒制芯是最常用的方法。根据芯盒结构，手工制芯方法可分为下列三种。

图 7.2.13。

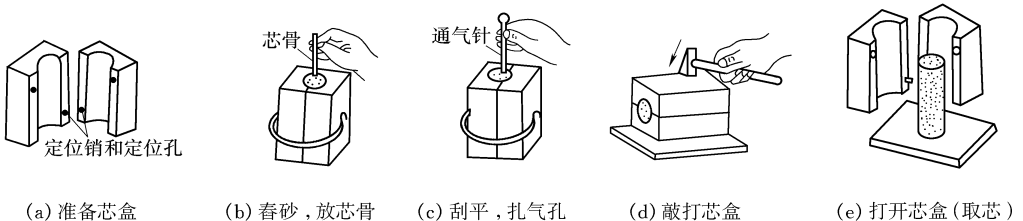


图 7.2.13 对开式芯盒制芯

成可拆的几块，制芯完毕后，拆去相应部位，将型芯顺利取出。如图 7.2.15 所示。

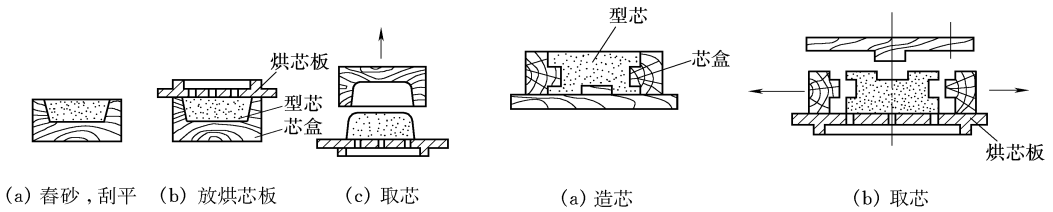


图 7.2.14 整体式芯盒制芯

图 7.2.15 可拆式芯盒制芯

7.2.5 合型

将上型、下型、砂芯、浇口等组合成一个完整铸型的操作过程称为合型，又称合箱。合型是浇注前的最后一道工序，若合型操作不当，会使铸件产生错箱、偏芯、跑火及夹砂等缺陷。合型工作包括：

1. 铸型的检验

包括检验型腔、浇注系统及表面有无浮砂，排气道是否通畅。

2. 下芯

将型芯的芯头准确放在砂型的芯座上。注意芯头间隙、芯子排气孔及定位等。

3. 合上下型

合型时应注意使上型保持水平下降，并应对准合型线。上、下型的定位，对于批量生产，是靠砂箱上的销子定位；对于单件、小批量生产，常采用划泥号定位。

4. 铸型的紧固

浇注时，金属液充满整个型腔，上型将受到金属液的浮力，并通过芯头作用到上型。这两个力使上型抬起，使铸件产生跑火缺陷。因此合型后，要将铸型紧固，常用的方法见图 7.2.16。

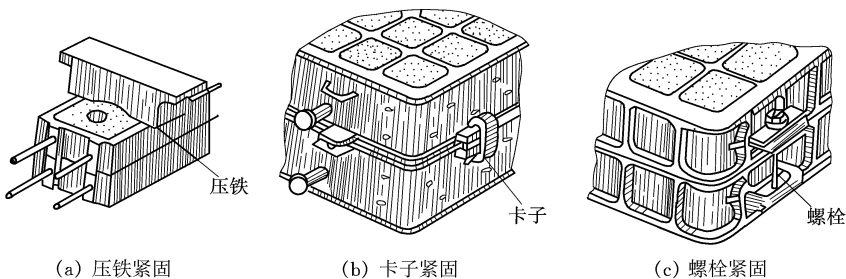


图 7.2.16 砂型紧固方法

7.2.6 浇注

把液体金属浇入铸型的操作称为浇注。浇注不当，会引起浇不足、冷隔、跑火、夹渣和缩孔等铸造缺陷。

1. 浇注前的准备工作

用吊包，容量在 100 kg 以上。对使用过的浇包要及时清理、修补，特别是保证包嘴光滑平整。

干净，不应有杂物等。

液烫伤。

2. 浇注过程注意事项

注温度过高时，铁水的收缩量增加，易产生缩孔、裂纹及粘砂等缺陷。合适的浇注温度应根据合金种类、铸件的大小及形状等来确定。若金属液的出炉温度太高，常在包内放一段时间，然后再进行浇注。对于铸铁件，形状复杂薄壁件浇注温度为 1 350 ~ 1 400 ，形状简单厚壁件，浇注温度为 1 260 ~ 1 350 。

陷。浇注速度太快，会使型腔中的气体来不及跑出而产生气孔；同时，由于金属液流速快，易产生冲砂、抬箱、跑火等缺陷。浇注速度依具体情况而定，一般用浇注时间表示。

草灰和珍珠岩等。浇注过程不要断流。

7.2.7 落砂和清理

1. 落砂

从砂型中取出铸件的工作称为落砂。落砂时要注意开箱的时间，过早，铸件未凝固或温度很高，会造成跑火、变形、表面硬皮等缺陷，并且铸件会形成内应力、裂纹等缺陷；过晚，将过长占用生产场地及工装，使生产率降低。落砂的时间和合金的种类、铸件的形状和大小有关。形状简单，小于 10 kg 的铸铁件，可在浇后 20 ~ 40 min 落砂；10 ~ 30 kg 的铸铁件，可在浇后 30 ~ 60 min 左右落砂。落砂分手工落砂和机器落砂两种。前者用于单件小批生产，后者用于大批量生产中。

2. 清理

落砂后的铸件必须经过清理工序，才能使铸件外表面达到要求。清理工作主要包括下列内容：

锯割切除。

鑿子、风铲等手工工具进行。对于批量生产，常选用清理机械来进行，广泛采用的有滚筒清理、喷丸清理。

7.3 铸造工艺

铸造工艺概括地说明了铸件生产的基本过程和方法，它包括的内容和范围很广。其中重点是浇注位置与分型面和工艺参数的选择。

确定合理而先进的铸造工艺方案，对获得优质铸件，简化工艺过程，提高生产率，降低铸件成本等起着决定性的作用。砂型铸造是传统的铸造方法，一般不受零件形状、大小以及复杂程度的限制，本节就砂型铸造工艺进行介绍。

7.3.1 浇注位置与分型面的选择

浇注位置是指浇注时铸件所处的位置。分型面是指两个半型相互接触的表面。一般先从保证铸件的质量出发来确定浇注位置，然后从工艺操作方便出发确定分型面。

1. 浇注位置的确定原则

铸件浇注位置要符合于铸件的凝固方式，保证铸型的充填，注意以下几个原则：

主要受力使用面等要求较高的部位放到下面，若有困难则可放到侧面或斜面。例如锥齿轮，因为牙齿部分要求高，所以应将其放到下面，如图 7.3.1 所示。

的平面放到下面或侧立、倾斜，以防止出现浇不足或冷隔等缺陷。图 7.3.2 是电机端盖的浇注位置。

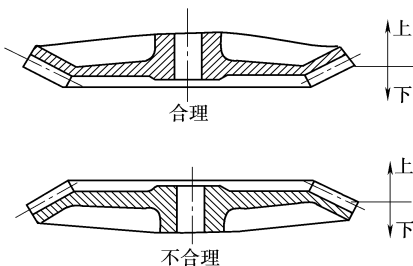


图 7.3.1 锥齿轮浇注位置

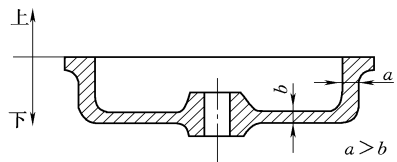


图 7.3.2 电机端盖的浇注位置

铁。

2. 分型面的确定原则

过高。图 7.3.3 若采用

能放在下型，以便保证铸件尺寸的精确。

目。如图 7.3.4 所示采用砂芯使三箱造型变为两箱造型。

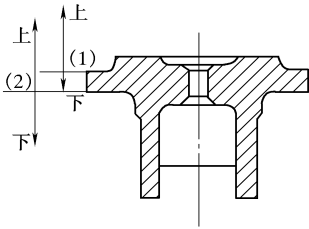


图 7.3.3 减小模样在下箱高度的方案

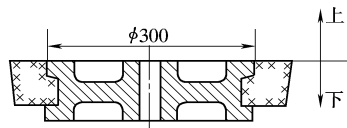


图 7.3.4 绳轮的两箱造型方案

上述诸原则，对于某个具体铸件来说很难全面满足，有时甚至互相矛盾。因此，必须抓住主要矛盾，全面考虑，根据现场情况对比分析，选出最优的方案。

7.3.2 工艺参数的选择

铸造工艺参数通常是指铸型工艺设计时需要确定的某些工艺数据，这些工艺参数一般都与模样及芯盒尺寸有关，即与铸件的精度有关，同时也与造型、制芯、下芯及合箱的工艺过程有联系。铸造工艺参数包括铸造收缩率、机械加工余量、起模斜度、最小铸出孔的尺寸、型芯头尺寸等。工艺参数选择得正确合适，不仅使铸件的尺寸、形状精确，而且造型、制芯、下芯、合型都大为简便，有利于提高生产率，降低成本。

1. 铸造收缩率

由于合金的线收缩，铸件冷却后的尺寸将比型腔尺寸略为缩小，为保证铸件的应有尺寸，模型尺寸必须比铸件放大一个该合金的收缩量。

2. 机械加工余量

在铸件加工表面上留出的准备切去的金属层厚度，称为机械加工余量。加工余量过大，浪费金属和机械加工工时；加工余量过小，工件会因残留黑皮而报废，或因表层的粘砂及黑皮硬度高而使刀具磨损快。机械加工余量的大小，要根据铸件的合金种类、生产方法、尺寸大小和复杂程度，以及加工面的要求和所处的浇注位置等因素来确定。一般铸钢件的加工余量比铸铁件要大些；机器造型比手工造型生产的铸件精度高，故加工余量要小些；尺寸大、结构复杂、精度不易保证的铸件，比尺寸小、形状简单的铸件加工余量要大些；铸件加工面在浇注时的位置，一般上面比下面和侧面的加工余量要大些。

3. 起模斜度

为了方便起模，在模样、芯盒的出模方向留有一定斜度，以免损坏砂芯。这个在铸造工艺

设计时所规定的斜度，称为起模斜度，如图 7.3.5 所示。起模斜度的大小应根据模样的高度，模样的尺寸和表面光洁度以及造型方法来确定，通常为 $15 \sim 3^\circ$ 。立壁越高，起模斜度越小；机器造型应比手工造型的斜度小。

4. 最小铸出孔

机械零件上往往有许多孔，一般来说，应尽可能在铸造时铸出，这样即可节约金属，减少机械加工的工作量，又可使铸件壁厚比较均匀，减少形成缩孔、缩松等铸造缺陷的倾向。但是，当铸件上的孔尺寸太小，而铸件的壁厚又较厚时，反而会使铸件产生粘砂。有的孔为了铸出，必须采用复杂而且难度较大的工艺措施，而实现这些措施还不如机械加工的方法制

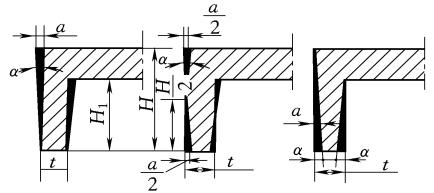


图 7.3.5 起模斜度

出更为方便和经济；有时由于孔距要求很精确，铸孔很难保证质量。因此在确定零件上的孔是否铸出时，必须考虑铸出这些孔的可能性和必要性、经济性。最小铸出孔和铸件的生产批量、合金种类、铸件大小、孔的长度及孔的直径等有关。表 7.3.1 为最小铸出孔的数值，供参考。

表 7.3.1 铸件的最小铸出孔

生产批量	最小铸出孔直径/mm	
	灰铸铁件	铸钢件
大量生产	12 ~ 15	
成批生产	15 ~ 30	30 ~ 50
单件小批生产	30 ~ 50	50

注：1. 若是加工孔，则孔的直径应为加上加工余量后的数值；

2. 有特殊要求的铸件例外。

5. 型芯头

芯头是指伸出铸件以外不与金属接触的砂芯部分。其功用是定位、支撑和排气。为了承受砂芯本身重力及浇注时液体金属对砂芯的浮力，芯头的尺寸应足够大才不致破坏；浇注后，砂芯所产生的气体，应能通过芯头排至铸型以外。在设计芯头时，除了要满足上面的要求外，还应做到下芯、合箱方便，应留有适当斜度，芯头与芯座之间要留有间隙。图 7.3.6 所示为芯头与芯座之间间隙的形成。

7.3.3 浇注系统

为了将金属液导入型腔，而在铸型中所开出的通道称为浇注系统。浇注系统主要起下列作用：

选择合理的浇注系统，包括形状、尺寸和位置，可以有效提高铸件质量，减少出现冲砂、

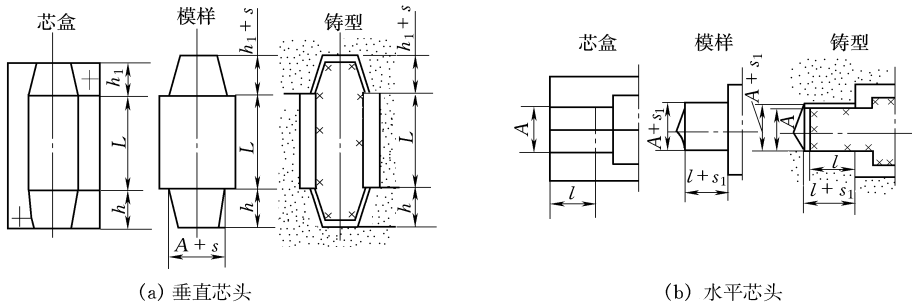


图 7.3.6 芯头与芯座之间的间隙

夹砂、缩孔、气孔等缺陷的可能性。

浇注系统通常由四部分组成，如图 7.3.7 所示，包括浇口盆、直浇道、横浇道和内浇道。

1. 浇口盆

又称浇口杯，它的作用是承接从浇包中倒出来的液态金属，减轻金属液流对铸型的冲击，使金属液平稳流入直浇口。其形状分漏斗形和池形两种。

2. 直浇道

垂直的通道，断面多为圆形，利用直浇道的高度产生一定的静压力，使金属液产生充填压力。直浇道越高，产生的冲填力越大。一般直浇道要高出型腔最高处 100~200 mm。

3. 横浇道

水平通道，可将液体金属导入内浇道。简单小铸件有时可省去不用。横浇道的截面形状多为梯形，其作用是分配金属流入内浇道，阻止熔渣进入型腔内。为了挡渣，横浇道必须开在内浇道上面。

4. 内浇道

金属液直接流入型腔的通道，它与铸件直接相连，可以控制金属液流入型腔的速度和方向。它影响铸件内部的温度分布，对铸件质量有较大影响。内浇道的断面多为扁梯形或三角形。对于壁厚相差不大的铸件，内浇道多开在铸件薄壁处，以达到铸件各处冷却均匀；对于壁厚差别大，特别是收缩大的铸件，内浇道多开在铸件厚处，以保证金属液对铸件的补缩。

浇注系统按内浇道的注入位置分为顶注式浇注系统、底注式浇注系统、中间注入式浇注系统和阶梯式浇注系统。如图 7.3.8。

1. 顶注式浇注系统

金属液从型腔顶部注入，金属液容易充满，补缩作用好，金属消耗少。但对铸型底部冲击力大，金属液与空气接触面积大，金属液会产生激溅、氧化，易造成砂眼、铁豆、气孔、夹渣等缺陷。

2. 底注式浇注系统

内浇道位于铸件底部，金属液从型腔下底注入。其充型平稳，不会产生激溅、铁豆，型腔

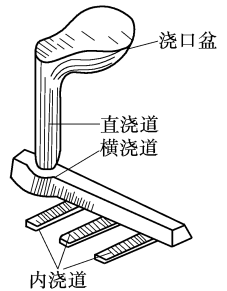


图 7.3.7 浇注系统

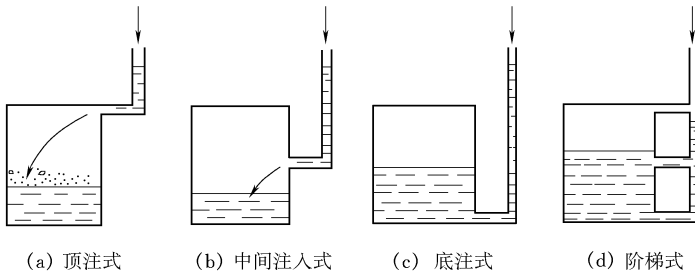


图 7.3.8 金属注入的型腔的几种形式

内的气体易于排除，金属氧化少。底注式浇注系统主要用于高度不大、结构复杂的铸件。铸钢件及易氧化的铝镁合金、黄铜等多采用此系统。

3. 中间注入式浇注系统

两箱造型中，大部分铸件都分布在上下两箱中，在分型面上开设横浇道、内浇道，从铸件中间的某一部位上引入金属液。中间注入式浇注系统对于铸件在分型面以下的部分是顶浇，对上部分则是底浇，故兼有顶注式和底注式的优点和缺点。此系统也适用于高度不大的铸件。

4. 阶梯式浇注系统

对于高大的铸件，特别是材质液态体收缩较大的铸件，常采用阶梯式浇注系统，使金属液从底部开始逐层地由下而上进入型腔。

7.3.4 冒口

从金属液浇入铸型到获得铸件，发生的体积收缩若留在铸件中，就产生了缩孔、缩松铸造缺陷。铸造生产中，防止缩孔、缩松缺陷的有效措施是放置冒口。冒口的主要作用是补缩，此外，还有出气和集渣的作用。


确定冒口放置位置一般应遵守以下原则：

7.3.5 铸造工艺图

铸造工艺包括选择和确定铸型分型面、砂芯结构、浇注系统及铸造工艺参数等内容。铸造工艺一经确定，模样、芯盒和铸型的结构就随之确定下来。铸造工艺的合理与否，直接影响铸件质量和生产率。

铸造工艺图是表示分型面、砂芯的结构尺寸、浇冒口系统和各项工艺参数的图形，如图 7.3.9b 所示。单件小批量生产时，铸造工艺图是用红、蓝色线条按 JB 2435—78 规定的符号和文字画在零件图上。

1. 标出分型面

分型面的位置，在图上用红色线条加箭头表示 , 并注明上箱和下箱。

2. 确定加工余量

加工余量在工艺图中用红色线条标出，剖面用红色全部涂上。

3. 标出起模斜度

在垂直于分型面的模样表面上应绘制起模斜度。起模斜度用红色线条表示。

4. 铸造圆角

为了便于造型和避免产生铸造缺陷，在零件图上两壁相交之处做成圆角，称铸造圆角。在铸造工艺图上用红线表示。

5. 绘出型芯头及型芯座

型芯头及型芯座用蓝色线条绘出。此时应注意，型芯座应比型芯头稍大，二者之差即为下型芯时所需要的间隙。

6. 不铸出的孔

零件上较小的孔、槽，铸造中不易铸出时，在铸造工艺图上将相应的孔位置用红线打叉。

7. 标注收缩率

用红字标注在零件图的右下方。

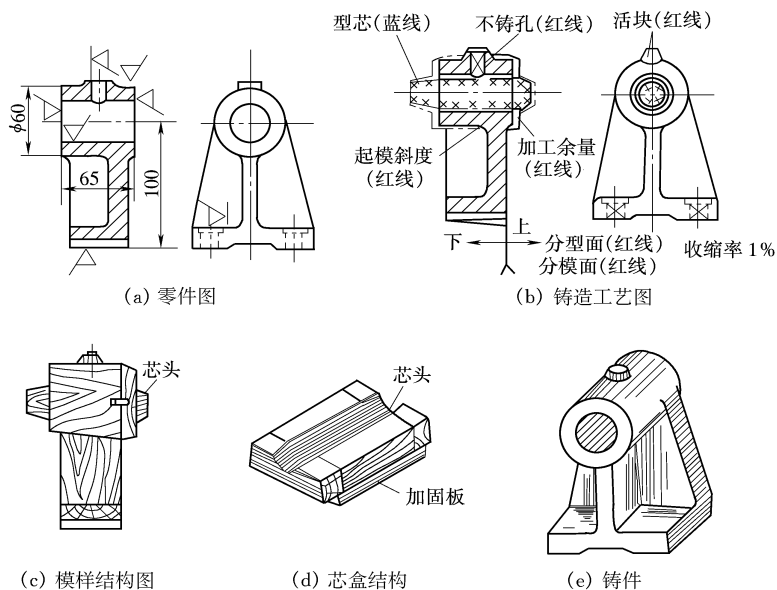


图 7.3.9 滑动轴承的铸造工艺图和模样结构图

7.4 铸件的结构工艺性

进行铸件设计时，不仅要保证其工作性能和机械性能要求，还要使铸件结构本身符合铸造

生产的要求。这种对于铸造工艺过程来说，铸件结构的合理性，称为铸件的“结构工艺性”。铸件的结构是否合理，和铸造合金的种类，产量的多少，铸造方法和生产条件等有密切的关系。下面从保证铸件质量，简化铸造工艺和根据铸造合金特点等几个方面来说明对铸件结构的要求。

7.4.1 铸件质量对铸件结构的要求

某些铸造缺陷的产生，往往是由于铸件结构设计不合理而造成的。当然，铸造时可以采取相应的工艺措施来消除这些缺陷，但有时由于铸件设计得不合理，使得消除缺陷的措施非常复杂和昂贵，这就会大大增加生产的成本和降低劳动生产率。相反，在同样满足使用要求的情况下，采取合理的铸件结构，常可简便地消除许多缺陷。

1. 铸件的壁厚应合理

每种铸造合金，采用某种铸造方法，要求铸件有其合适的壁厚范围。为了避免浇不足、冷隔等缺陷，铸件应有一定的厚度。表 7.4.1 列出了几种常用的铸造合金在砂型铸造条件下的铸件最小允许壁厚。

表 7.4.1 砂型铸造时铸件的最小允许壁厚

铸件尺寸	铸 钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铝合金	铜合金	镁合金
200 × 200 以下	6~8	5~6	6	4~5	3	3~5	3
200 × 200 ~ 500 × 500	10~12	6~10	12	5~8	4	6~8	
500 × 500 以上	18~25	15~20			5~7		

注：1. 如有特殊需要，在改善铸造条件的情况下，灰铸铁最小允许壁厚可 3 mm，其它合金最小壁厚亦可减小；

2. 铸件结构复杂，铸造合金的流动性差，应取上限值。

但在设计时，不应单纯以增加铸件的壁厚作为提高强度的唯一办法。从合金的结晶特点可知，随着铸件壁厚的增加，中心部分的晶粒变粗大，机械强度并不随着铸件壁厚的增加而成比例增加。因此，在设计铸件时，应选择合理的截面形状，采用较薄的断面或带有加强筋的薄壁铸件，如图 7.4.1 所示。这样，即保证了强度和减轻了重量，又可减少产生缩孔、缩松等缺陷的倾向。

2. 铸件壁的连接和圆角

铸件的壁厚应力求均匀，如果因结构所需，不能达到厚薄均匀，则铸件各部分不同壁厚的连接应采用逐渐过渡。壁厚的过渡形式见图 7.4.2。

3. 壁厚力求均匀

金属过多地聚集在一起，使铸件冷却不均匀，形成较大的内应力，而且易形成缩孔、缩松及裂纹。因此应取消不必要的厚大部分，减小、减少热节。如图 7.4.3 所示。

4. 应防止产生变形

某些壁厚均匀的细长铸件，较大面积的平板铸件，以及壁厚不均匀的长形箱体都会由于应力而产生翘曲变形。可采用合理的结构设计予以解决。如图 7.4.4 所示。

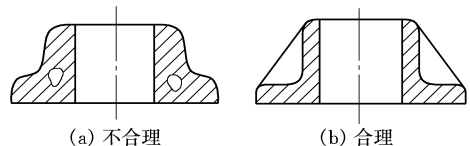


图 7.4.1 采用加强筋减小铸件壁厚

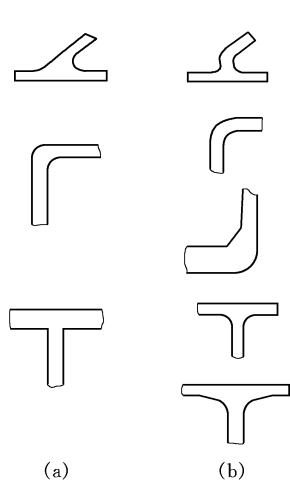


图 7.4.2 壁连接的几种形式

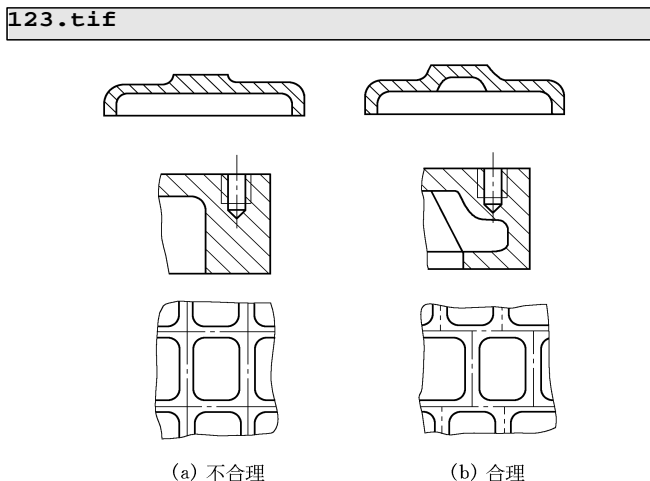


图 7.4.3 壁厚力求均匀的类型

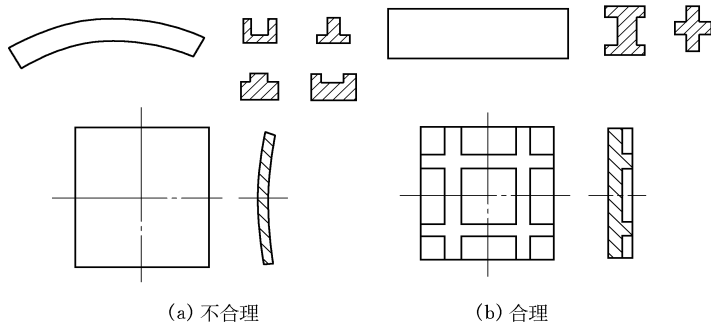


图 7.4.4 防止变形的铸件结构

5. 避免水平方向出现较大的平面

在浇注时，如果型内有较大的水平型腔存在，当液体金属上升到该位置时，由于断面突然扩大，上升速度缓慢，高温液体较长时间烘烤顶部型面，极易造成夹砂、浇不足等缺陷，同时也不利于金属夹杂物和气体的排出。因此，应尽量设计成倾斜壁，如图 7.4.5 所示。

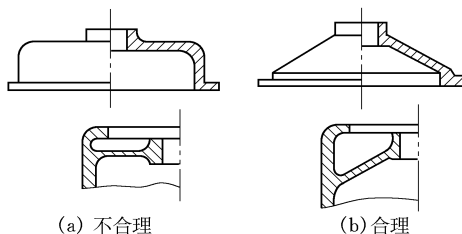


图 7.4.5 避免大水平面的铸件结构

7.4.2 铸造工艺对零件结构的要求

铸件的结构不仅应有利于保证铸件的质量，而且应考虑到造型、制芯和清理等操作的方便，以利于简化铸造工艺过程，稳定质量，提高生产率和降低成本。应主要注意以下几个方面：

1. 改进妨碍起模的凸台、凸缘、筋板的结构
2. 尽量取消铸件外表侧凹
3. 减少和简化分型面
4. 有利于砂芯的固定和排气
5. 去除不必要的圆角

7.4.3 不同铸造合金对铸件结构的要求

不同的铸造合金具有不同的铸造性能，在铸件设计及产品零件结构工艺性分析时，应充分注意到各种不同铸造合金的特点并采取相应的合理结构和工艺措施。表 7.4.2 列出了常用铸造合金的性能及结构特点。

表 7.4.2 常用铸造合金的性能及结构特点

合金种类	性能特点	结构特点
灰铸铁件	流动性好，体收缩和线收缩小，缺口敏感性小。综合力学性能低，抗压强度比抗拉强度高 3~4 倍。吸震性好，比钢约大 10 倍。弹性模量较低	因流动性好，可铸造壁较薄、形状复杂的铸件，铸件残余应力小，吸震性好 常用来做机床床身、发动机机体、机座等铸件
铸钢件	流动性差，体收缩和线收缩都较大，综合力学性能高，抗压和抗拉强度相等；吸震性差，缺口敏感性大	铸件允许最小壁厚比灰铸铁要厚，不易铸出复杂件。铸件内应力大，易挠曲变形。结构应尽量减少热节点，并创造顺序凝固的条件。壁的连接圆角与壁之间的过渡段要比灰铸铁大些
球墨铸铁件	流动性和线收缩与灰铸铁相近，体收缩及形成内应力倾向比灰铸铁大，易产生缩孔、缩松和裂纹。强度、塑性、弹性模量均比灰铸铁高，抗磨性好，吸震性比灰铸铁差	一般都设计成均匀壁厚，尽量避免厚大断面。对某些厚大断面的球墨铸铁件可采用空心结构，如大型的球铁曲轴等
可锻铸铁件	流动性比灰铸铁差，体收缩大。退火前很脆，毛坯易损坏；退火后，线收缩小，综合力学性能稍次于球墨铸铁，冲击韧度比灰铸铁高 3~4 倍	由于铸态要求白口，故一般适宜做均匀壁厚的小件。最合适的壁厚 5~16 mm。壁厚应尽量均匀。为增加刚性，截面形状多设计成 T 字形或工字形，避免十字形截面。零件的突出部分应该用肋条加固
锡青铜和磷青铜件	铸造性能类似灰铸铁，但结晶间隔大，易产生缩松。高温性能差，发脆。强度随截面增加显著下降。耐磨性好	壁不得太厚，零件的突出部分应用较薄的加强肋加固，以免热裂。铸件形状不易太复杂
无锡青铜和黄铜件	收缩较大，结晶范围小，易产生集中缩孔。流动性好，耐磨，耐腐蚀性好	结构特点类似铸钢件
铝合金件	铸造性能类似铸钢，但相对强度随壁厚增加而降低得更为显著	壁不能太厚，其余结构特点类似铸钢件

7.5 铸件质量与成本分析

7.5.1 铸件的主要缺陷及其产生原因

清理完的铸件要进行质量检验。对于发生的废品及铸件上产生的缺陷要进行分析，以便找出主要原因，采取措施，在以后的生产中防止再发生。

1. 铸件缺陷分类

根据铸件缺陷严重程度，将铸件缺陷分为：

按铸件缺陷性质分：

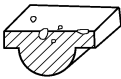

尺寸不合格等。

不合格。



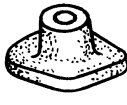
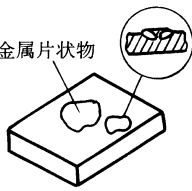
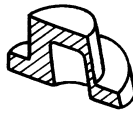
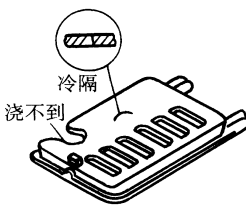
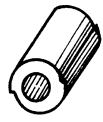

2. 铸件的常见缺陷及产生原因

由于铸造工序繁多，因此每一缺陷的产生原因也很复杂，对于某一铸件，可能同时出现多种不同原因引起的缺陷；或者同一原因在生产条件不同时，会引起多种缺陷的发生。表 7.5.1 介绍了一些常见铸件缺陷的特征及缺陷产生的主要原因。

表 7.5.1 常见铸件缺陷的特征及产生的主要原因

类别	缺陷名称和特征	简 图	主要原因分析
孔 洞	气孔 铸件内部出现的孔洞，常为梨形、圆形，孔的内壁较光滑		
	缩孔 铸件厚截面处出现的形状极不规则的孔洞，孔的内壁粗糙 缩松 铸件截面上细小而分散的缩孔		补缩或补缩不足 补缩 C、Si 含量少、合金元素多时易出现缩松

续表

类别	缺陷名称和特征	简 图	主要原因分析
孔 洞	砂眼 铸件内部或表面带有砂粒的孔洞		
	渣气孔 铸件浇注时的上表面充满熔渣的孔洞，常与气孔并存，大小不一，成群集结		
表面缺陷	机械粘砂 铸件表面粘附着一层砂粒和金属的机械混合物，使表面粗糙		
	夹砂 铸件表面产生的疤片状金属突起物。表面粗糙，边缘锐利，在金属片和铸件之间夹有一层型砂		膨胀后易鼓起或开裂 水分烘干后易出现脱皮 厉害
	偏芯 铸件内腔和局部形状位置偏错		
形状尺寸不合格	浇不到，铸件残缺，或形状完整但边角圆滑光亮，其浇注系统是充满的 冷隔 铸件上有未完全融合的缝隙，边缘呈圆角		气体阻碍
	错型 铸件的一部分与另一部分在分型面处相互错开		
裂 纹	热裂 铸件开裂，裂纹断面严重氧化，呈暗蓝色，外形曲折而不规则 冷裂 裂纹断面不氧化并发亮，有时轻微氧化。呈连续直线状		而引起过大的内应力

3. 铸件缺陷的修补方法

有些铸件缺陷可以修补，修补后达到技术要求可作合格品使用。常用修补方法有：

确保焊补质量，焊补前应将缺陷处粘砂、氧化皮等除净，以防未焊透。

压入铸件缝隙，硬化后可将缝隙堵死。

填满。

7.5.2 铸件成本分析

铸件的成本主要包括各种原材料费用和燃料的消耗、工模具费用、管理费用、工时消耗和铸件废品率等项目。生产中要在保证质量的前提下，努力采取有力措施降低成本，提高经济效益。影响上述成本的主要因素有铸件设计、铸造工艺以及生产技术管理水平等。

1. 铸件设计与成本的关系

铸件设计主要包括铸件材料选择及结构尺寸的确定。良好的铸件设计不仅可以降低生产成本，也有利于提高铸件质量。

铸件材料对成本的影响是明显的。表 7.5.2 列出了各类铸件的相对价格。显然，灰铸铁件的相对价格最低。因此，在保证使用性能的前提下应尽量选用灰铸铁。

表 7.5.2 各类铸件的相对价格

材料类别	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	碳钢	低锰钢	含铬钢	铝硅合金	黄铜	锡青铜
相对价格	0.6	0.8	1.0	1.0	1.2	1.4	6.0	5.0	8.0

铸件的结构工艺性对铸件成本也有很大影响。铸件的轮廓形状、壁厚、截面形状、壁间连接、加强筋的布置等都必须考虑合金铸造性能的要求，否则会产生各种铸造缺陷，导致铸件废品率的增加。另外，铸件的外形与内腔、铸造圆角、结构斜度、铸孔、加工面等，也必须有利于选择平直的分型面，有利于确定合理的浇注位置，有利于简化造型、造芯、合型、落砂、清理等操作工艺规程，以提高生产效率，降低生产成本。

2. 铸造工艺与成本的关系

各种铸造工艺方法都有其优、缺点，各适用于一定的范围。因此，在选择时，应根据具体情况进行全面分析比较，才能正确地选择出铸造方法。包括合金的种类、生产批量、铸件的形状和大小、质量要求及现有设备情况等，从技术、经济、生产条件三个方面综合分析比较。

表 7.5.3 列出了几种铸造方法的综合比较。可以看出，砂型铸造尽管有着许多缺点，但其适应性强，因此，在铸造方法的选择中应优先考虑。而特种铸造，仅在相应的条件下才能显示其优越性。

表 7.5.3 几种铸造方法的比较

比较项目	砂型铸造	熔模铸造	金属型铸造	压力铸造	低压铸造	离心铸造
适用合金范围	各种合金	非合金钢、合金钢、有色金属	各种合金，以有色金属为主	有色合金	有色合金	铸钢、铸铁、铜合金
适用铸件大小及重量范围	不受限制	一般 < 25 kg	中、小铸件为主	中、小铸件，一般 < 10 kg	中、小铸件，有时达数百 kg	不受限制
铸件最小壁厚/mm	铝合金 > 3 铸铁 > 3~4 铸钢 > 5	0.5~0.7 孔 1.5~2.0	铸铝 > 3 铸铁 > 5	铝合金 0.5 锌合金 0.3 铜合金 2	2	优于同类铸型的常压铸造
表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	50~12.5	12.5~1.6	12.5~6.3	3.2~0.8	12.5~3.2	决定于铸型材料
铸件尺寸公差/mm	100 ± 1.0	100 ± 0.3	100 ± 0.4	100 ± 0.3	100 ± 0.4	同上
金属收得率	30~50	60	40~50	60	50~60	85~95
毛坯利用率	70	90	70	95	80	70~90
投产的最小批量	单件	1 000	700~1 000	1 000	1 000	100~1 000
生产率(程度)	低中	低中	中高	最高	中	中高
应用举例	机床床身、支座，轴承盖，曲轴，汽缸盖，汽缸体，水轮机转子等	刀具、叶片、自行车零件、机床零件、刀杆、风动工具等	铝活塞、水暖器材、水轮机叶片、一般有色合金铸件等	汽车化油器、缸体、仪表和照相机壳及支架等	发动机缸体、缸盖、壳体、箱体、船用螺旋桨、纺织机零件等	铁管、套筒、环、辊、叶轮、滑动轴承等

注：金属收得率 = $\frac{\text{铸件重}}{\text{铸件重} + \text{浇冒口重}} \times 100\%$ ；毛坯利用率 = $\frac{\text{零件重}}{\text{铸件重}} \times 100\%$ 。

砂型铸造工艺既要保证铸件的质量要求，同时也要充分考虑如何以最少的材料消耗、最少的工时和工模具费用，生产出最多的合格铸件。例如，在单件生产条件下，刮板造型和挖砂造型可以优先选用。虽然这两种造型方法操作比较麻烦，但是增加的工时消耗费用可以通过降低模型制造费用和缩短生产周期的效益中得到超额补偿。当生产数量较大时，采用整模或分模造型、假箱造型等则是更为合适的。虽然此时模样、模具等的制造费用增加，但这些费用分摊到每个铸件上则是很小的数值，而由于操作简化所导致生产效率的提高所带来的经济效益却是很显著的。

3. 生产技术管理对成本的影响

科学的生产管理，严格的质量控制是现代企业提高生产效率与经济效益的重要内容，铸造生产也是如此。以铸件废品率为例。铸件废品率高，既可能有工艺设计不合理、操作不正确的

原因,也可能有原材料不符合要求、测试手段不完善、设备有故障、工模具有缺陷等原因,这种情况的出现有技术方面的问题,更多的可能是管理方面的问题。加强企业的生产技术管理对加强成本控制的效果已被大量企业实践所证明。

7.6 特种铸造与铸造新技术简介

砂型铸造虽然是应用最普遍的一种铸造方法,但由于其铸造尺寸精度低,表面粗糙度差,铸件内部质量差,生产过程不易实现机械化等弱点,对于一些特殊要求的零件,例如极薄壁件、管子等,常常不用砂铸方法铸出。因此,形成了与砂型铸造不同的一系列铸造方法,即特种铸造,如熔模铸造、离心铸造、壳型铸造、压力铸造、低压铸造、金属型铸造、陶瓷型铸造、磁型铸造和真空吸铸等。每种特种铸造方法,在提高铸件精度和表面质量、改善合金性能、提高劳动生产率、改善劳动条件和降低铸造成本等方面,各有其优越之处。

7.6.1 熔模铸造

熔模铸造是用易熔材料制成模样,然后在模样上涂耐火材料,经硬化之后,再将模样熔化,排出型外,获得无分型面的铸型,浇注即可获得铸件。这种方法也称失蜡铸造。它是发展较快的一种精密铸造方法。

熔模铸造有以下优点:

时,铸型在热态浇注,可以生产出形状复杂的薄壁铸件。

削加工合金,更显出其独特的优越性。

熔模铸造的主要缺点是材料昂贵、工序多、生产周期长,不宜生产大件等。

熔模铸造广泛应用于电器仪表、刀具、航空等制造部门。例如,汽轮机和涡轮发动机的叶片,汽车、拖拉机上的小型零件等,已成为少或无切削加工中最重要的工艺方法。

7.6.2 金属型铸造

将液体金属浇注到用金属材料制成的铸型中,获得铸件的铸造方法称为金属型铸造。

金属型铸造具有许多优点。如可承受多次浇铸,实现了“一型多铸”,便于实现机械化和自动化生产,从而大大提高了生产率;同时,铸件精度和表面质量比砂型铸造显著提高,从而节省金属和减少切削加工工作量;由于结晶组织致密,铸件的机械性能得到提高,如铸铝件的屈服强度平均提高20%。此外,节省许多工序,铸型不用砂,使铸造车间面貌改观,改善了劳动条件,提高了劳动生产率,降低了造型的劳动强度。其主要适用于有色合金铸件的大批量生产。

主要缺点是金属型制造成本高,周期长,铸造工艺要求严格,此外,金属型铸造适用的铸件形状和尺寸有着一定的限制。

7.6.3 压力铸造

压力铸造简称压铸，它是在高压作用下使液态或半液态金属以较高的速度充填铸型型腔，并在压力作用下凝固而获得铸件的方法。

压力铸造具有以下优点：

工，即可使用。

是由于压铸型精密，在高压下浇注，极大地提高了合金充型能力所致。

冷却速度快，又在高压下结晶凝固，其组织密度大，晶粒细。

次/h。

而且较易实现生产过程的自动化。

压铸的主要缺点是：

削加工和进行热处理，以防孔洞外露和加热时铸件内气体膨胀而起泡。

命很低。

目前，压铸已在汽车、拖拉机、仪表、兵器行业得到了广泛的应用。

7.6.4 低压铸造

低压铸造是用较低压力(一般为 0.02 ~ 0.06 MPa)

下凝固，以获得铸件的方法。与压力铸造相比，所用的压力较低，故称为低压铸造。

低压铸造具有以下优点：

孔、夹渣等缺陷较少。

金的铸件。

善，易于实现机械化和自动化。

低压铸造目前主要用来生产质量要求高的铝、镁合金铸件，如气缸、缸盖、纺织机零件等。

7.6.5 离心铸造

离心铸造是将液体金属浇入高速旋转的铸型中，使其在离心力作用下成形并凝固的铸造方法。离心铸造主要用于生产圆筒形铸件。离心铸造必须在离心铸造机上进行，根据铸型旋转轴

空间位置不同，可分为立式和卧式两大类。如图 7.6.1 所示。

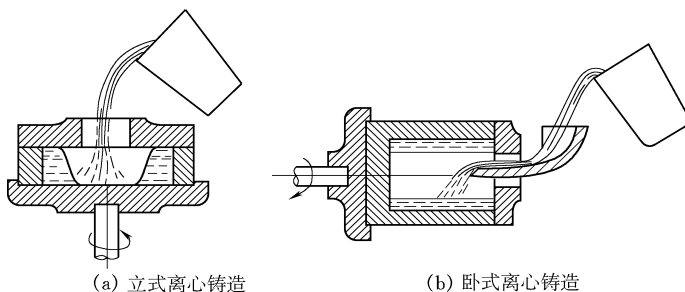


图 7.6.1 圆筒件的离心铸造

离心铸造的优点是：

作用下，金属中的气体、熔渣等夹杂物因密度小，均集中在内表面，铸件从外向内顺序凝固，补缩条件好。

壁铸件，如蜗轮、叶轮等。

离心铸造的缺点是铸件易产生偏折，内孔不准确，内表面较粗糙。

7.6.6 铸造过程计算机数值模拟技术

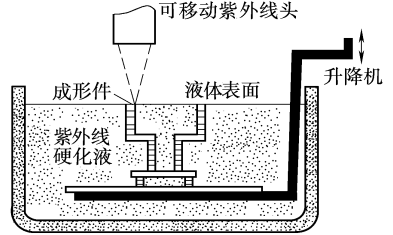
铸造过程计算机数值模拟技术是利用数值分析技术、数据库技术、可视化技术并结合经典传热、流动及凝固理论对铸件成形过程进行仿真，以模拟出铸件充型、凝固及冷却中的各种物理场，并据此对铸件进行质量预报的技术。实际生产中，铸造工艺的制订主要依靠经验，评价一个工艺是否可行则要靠实际浇注进行验证。对一个铸件来说，一个满意工艺的最后获得，常要通过多次的修改，多次工艺方案的实际浇注验证及相应工艺装备的修改。通过采用计算机数值模拟技术，可以在制造铸造工艺装备及浇注铸件之前，综合评价各种铸造工艺方案与铸件质量的关系，并在计算机屏幕上显示出铸造全过程、预测铸造缺陷。这就使得铸造工艺人员能够根据所存在的问题及时修改方案，从而确保获得合格铸件。

7.6.7 快速成形技术

快速成形技术是 20 世纪 80 年代后期发展起来的集计算机技术、激光技术、自动控制技术、信息技术和材料科学于一身的先进制造技术。与传统制造方法相比，快速成形技术极大地缩短了产品开发时间，可实现零件的少、无切削，产品制造成本低；整个零件制造过程都是数字化控制，零件可大可小，可完成各种组合件的一次成形；可预先模拟成形，可以快速优化设计，使误差降到最低。快速成形技术近几年发展迅猛。

快速成形方法有很多种。图 7.6.2 是立体平板印刷法的成形原理图，其工序如下：

1. 用 CAD 系统在计算机上进行零件的三维立体造型，建立实体模型；
2. 选择合适的摆放位置，必要时设计支撑；
3. 将三维实体模型转换格式传送给造型机控制系统，利用分层软件选择参数将模型分层，得到每一薄层的平面图形及相关数据；
4. 造型机的三维数控机构根据分层参数控制激光束扫描液池中的树脂液体，液面固化并黏附在已固化的下面一层树脂上面；升降台下降一个层厚，按照下一层平面形状数据，完成以上一个固化过程，直至完成整体造型；

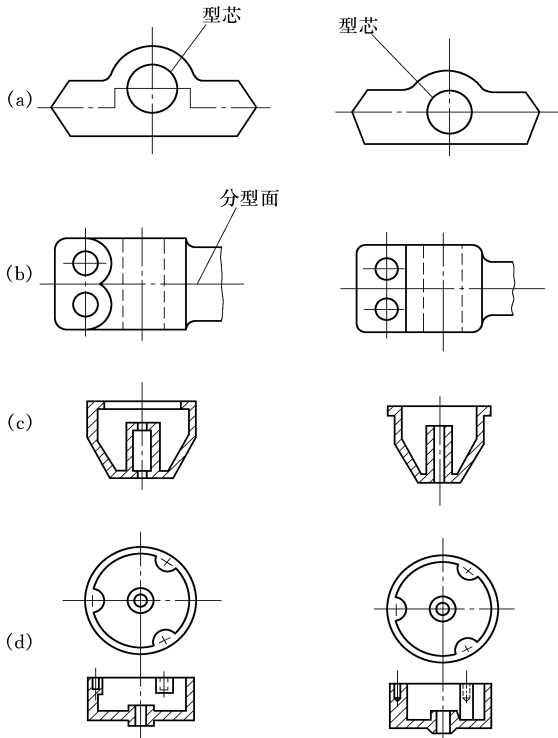


5. 升降台升出液面，取下并检验模样；造型结束后用强紫外线照射模样使之完全硬化；去除模样层与层间的台阶，必要时可进行喷砂处理。

图 7.6.2 立体平板印刷法成形原理图

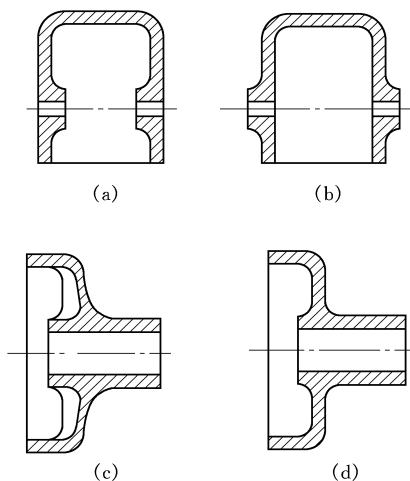
思考题与习题

- 7.1 简述影响充型能力的因素有哪些？
- 7.2 如何配制型

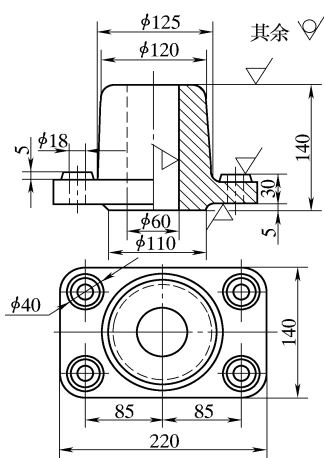


题 7.10 图

- 7.3 常用的手工造型方法有哪些？手工造型和机器造型各自的应用范围是什么？
- 7.4 简述分型面的确定原则。
- 7.5 铸造工艺参数主要包括哪些内容？
- 7.6 浇注系统由几部分组成？浇注系统的作用是什么？
- 7.7 冒口的作用是什么？冒口的放置原则是什么？画出常用的冒口形状。
- 7.8 简述铸件质量对铸件结构有什么要求？
- 7.9 简述铸造工艺对零件结构有什么要求？
- 7.10 题 7.10 图铸件的两种结构应选哪一种？为什么？
- 7.11 题 7.11 图所示两种零件的两种结构设计，哪种合理？为什么？

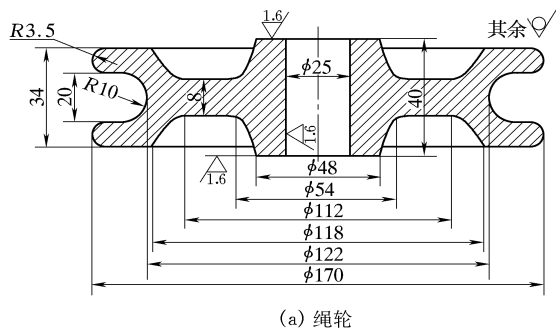


题 7.11 图

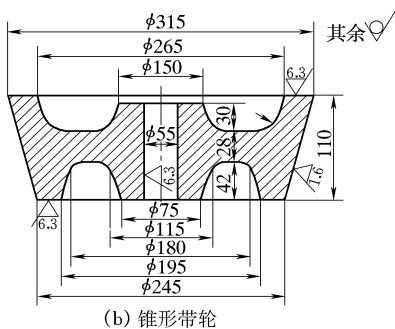


题 7.12 图

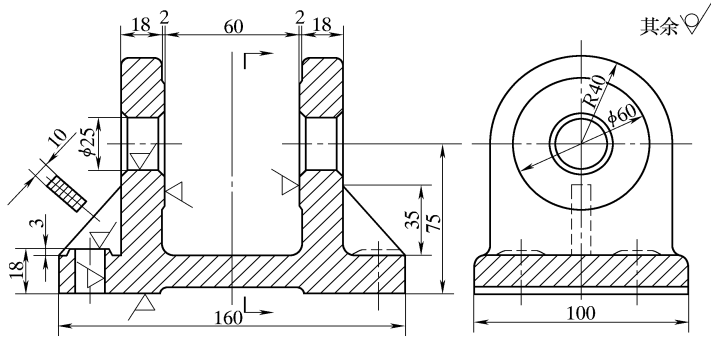
- 7.12 题 7.12 图所示轴承铸件存在哪几个分型方案？试进行分析和比较。
- 7.13 绘制题 7.13 图所示铸件的铸造工艺图。



(a) 绳轮



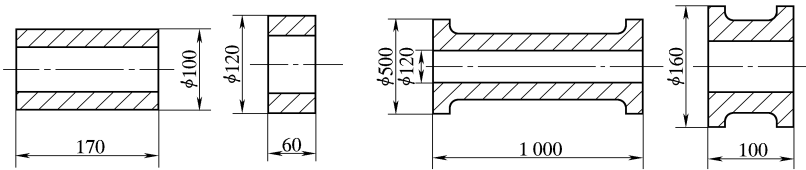
(b) 锥形带轮



(c) 支座

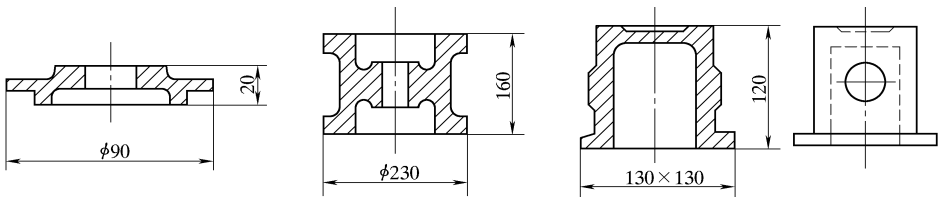
题 7.13 图

7.14 下列套筒类铸件



题 7.14 图

7.15 下列铸件



(a) 轴承盖

(b) 带轮

(c) 箱体

题 7.15 图

第 8 章 锻压成形工艺

问一问，想一想：汽油发动机的曲轴、连杆和凸轮轴可采用珠光体球墨铸铁材料，采用砂型或机器造型铸造工艺制造。当力学性能要求更高、受冲击负荷较大时，可选用 45 钢材料制造，那么能不能选择一根尺寸合适的 45 钢棒料直接经过切削加工制成？



学习目标

1. 了解锻压的基本生产方式、金属的锻造性能及其影响因素；
2. 重点掌握自由锻的设备、工艺过程、特点及应用；掌握简单自由锻锻件的操作技能和锻压生产安全技术；
3. 了解模锻、板料冲压的设备、模具、工艺过程、特点及应用；了解锻压新工艺、新技术及其发展趋势；
4. 具有绘制简单锻件图、合理选择典型锻压件的锻压方法、分析零件锻造与冲压结构工艺性的初步能力；具有锻压件质量与成本分析的初步能力。

8.1 锻压工艺基础

锻压是对坯料施加外力，使其产生塑性变形，改变尺寸、形状并改善性能，用以制造机械零件、工件或毛坯的成形加工方法，它是锻造和冲压的总称。大多数金属材料在冷态或热态下都具有一定的塑性，因此它们可以在室温或高温下进行各种锻压加工。常见的锻压方法有自由锻造、模型锻造、板料冲压、轧制、挤压和拉拔等。

金属锻压加工在机械制造、汽车、拖拉机、仪表、造船、冶金工程及国防工业中有着广泛的应用。如汽车上 80% 的零件均是由锻压加工方法制造的。

金属锻压加工主要有以下的特点：

合理控制金属纤维方向，以使纤维方向与应力方向一致，提高零件的性能。

金属材料 and 加工工时。

8.1.1 锻压的基本生产方式

1. 轧制

材料在旋转轧辊的压力作用下，产生连续塑性变形，获得要求的截面形状并改变其性能的加工方法称为轧制

的原材料，如钢板、各种型材、无缝管材等，也可以直接轧制出毛坯或零件。

2. 挤压

坯料在压应力作用下从模具的孔口或缝隙挤出，使之横截面积减小、长度增加，成为所需制品的加工方法称为挤压

金属和低碳钢等金属材料。

3. 拉拔

坯料在牵引力作用下通过模孔拉出，使之横截面积减小，长度增加的加工方法称为拉拔

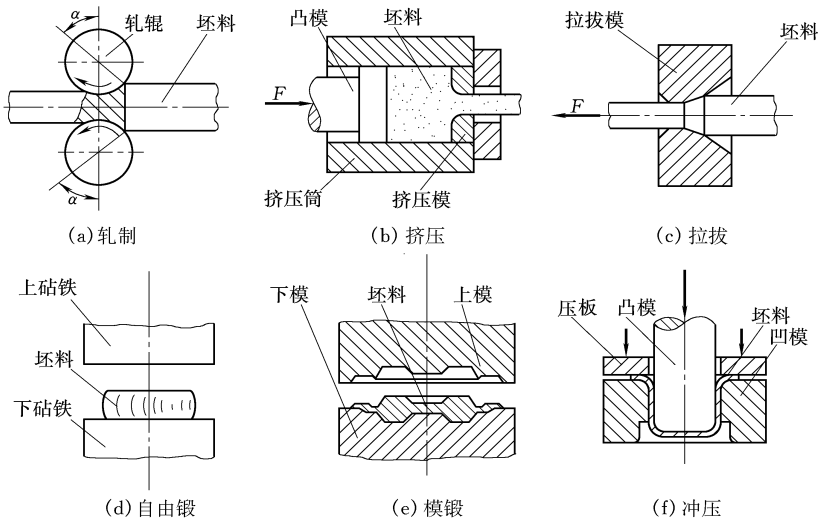


图 8.1.1 锻压基本生产方式示意图

4. 自由锻

只用简单的通用性工具或在锻造设备的上下砧间直接使坯料变形而获得所需的几何形状及内部质量的锻件，这种加工方法称为自由锻

5. 模锻

在模锻设备上利用锻模使坯料变形而获得锻件的锻造方法称为模锻

6. 冲压

使板料经分离或成形而得到制品的工艺称为冲压

常温下进行的，所以又称为冷冲压。

常见的金属型材、板材、管材、线材等原材料，大都是通过轧制挤压等方法制成的。自由锻造、模锻和板料冲压则是一般机械厂常用的生产方法。凡承受重载荷、工作条件恶劣的机器零件，如汽轮发电机转子、主轴、叶轮、重要齿轮、连杆等，通常均需采用锻件毛坯，再经切削加工制成。

8.1.2 金属的锻造性能

金属的锻造性能是指金属材料在经受压力加工时获得优质零件的难易程度，又称为可锻性。金属的可锻性好，表明容易进行锻压加工变形，可锻性差，表明该金属不宜选用锻压加工方法变形。金属的可锻性常用塑性和变形抗力来综合衡量。

1. 金属的塑性变形与回复和再结晶

金属在常温下经塑性变形，会出现晶粒被压扁或拉长，甚至被破碎成许多小晶块等的组织变化，并伴随内应力的产生。随着金属冷变形程度的增加，金属材料的性能也在发生变化，强度和硬度提高，而塑性、韧性等指标有所下降，这种现象通常称为冷变形强化或加工硬化。冷变形强化是强化金属的重要途径之一。特别是对那些不产生相变，不易通过热处理强化的金属材料，如非铁金属及其合金、奥氏体合金钢等。另外，冷变形强化现象也常常在零件短时过载时提供一定程度的安全保证。但是，冷变形强化会给金属的进一步冷变形和以后的切削加工带来困难。为了消除冷变形强化带来的不良影响，可通过热处理予以消除。

对变形金属进行的热处理可有回复、再结晶、晶粒长大三个阶段的变化。见图 8.1.2 所示。

变化。强度、硬度略有下降，塑性、韧性有所回升，内应力明显减小，这种变化过程称为回复。将弹簧钢丝冷绕成形后常进行低温回火，就是利用了回复基本保持冷拔钢丝的高强度，又消除了冷卷弹簧时产生的内应力，以稳定弹簧的形状与尺寸。

变化。破碎的及被拉长的晶粒转变成均匀细小的等轴晶粒，力学性能得到恢复。冷变形金属的加工硬化组织将重新变成等轴晶粒组织，这个过程称为再结晶。冷变形金属经再结晶，将恢复锻造性能。金属开始产生再结晶现象的最低温度，通常称为再结晶温度。

的再结晶组织将产生晶粒长大现象，最终转变成粗晶粒组织。

粗晶粒组织的性能不好，将导致锻造性能恶化。因此，在生产中，再结晶退火的加热温度和保温时间都必须有严格的控制。

以再结晶温度为界限，一般将在再结晶温度以下进行的塑性变形加工称为冷变形；在再结晶温度以上进行的塑性变形加工称为热变形。在热变形过程中，金属的再结晶过程能抵消其加工硬化过程。热变形与冷变形相比，其优点是塑性良好，变形抗力小，容易加工变形，但高温条件下，金属容易产生氧化皮，所以制件的尺寸精度差，表面粗糙，而且劳动条件不好，还需要配备专门的加热设备。金属经塑性变形及再结晶，可使原来存在的不均匀、晶粒粗大的组织得以改善，或将铸锭组织中的气孔、缩松等压合，得到更致密的再结晶组织，提高金属的力学性能。

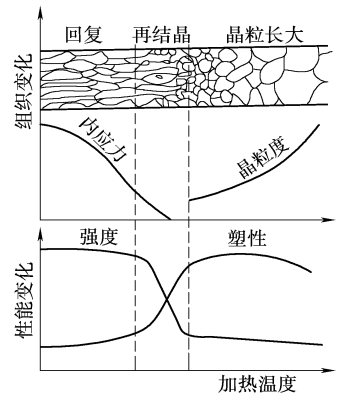


图 8.1.2 冷变形金属加热时的组织和性能的变化

2. 锻造流线与锻造比

在锻造时，金属的脆性杂质被打碎，顺着金属主要伸长方向呈碎粒状或链状分布；塑性杂质随着金属变形沿主要变形方向呈带状分布，这样热锻后的金属组织就具有一定的方向性，通常称为锻造流线。锻造流线使金属性能呈现异向性。沿着流线方向

直于流线方向
流线组织连续分布并且与其受力方向一致，则会显著提高零件的承载能力。例如，吊钩采用弯曲工序成形时，就能使流线方向与吊钩受力方向一致

荷的能力。图 8.1.3b 所示锻压成形的曲轴中，其流线的分布是合理的。图 8.1.3c 是切削成形的曲轴，由于流线不连续，所以流线分布不合理。

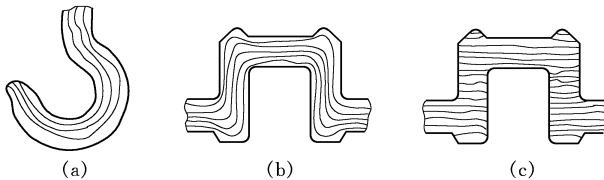


图 8.1.3 吊钩、曲轴中的流线分布

锻造比是锻造时金属变形程度的一种表示方法，通常用变形前后的截面比、长度比或高度比 Y 来表示。例如：

拔长时的锻造比为

$$Y_{拔} = F_0 / F = L / L_0$$

墩粗时的锻造比为

$$Y_{墩} = H_0 / H = F / F_0$$

式中， H_0 、 L_0 、 F_0 ——坯料变形前的高度、长度和横截面积；

H 、 L 、 F ——坯料变形后的高度、长度和横截面积。

锻造钢锭时，选择合适的锻造比是十分重要的。对于非合金结构钢，可以取 $Y=3\sim 4$ 。锻造某些高合金工具钢和特殊性能钢时，为了促进合金元素均匀化，并使碳化物细化和分散，必须采用较大的锻造比。例如高速钢 $Y=5\sim 12$ ；不锈钢 $Y=4\sim 6$ 。钢材在轧制过程已经经过很大的变形，内部组织和力学性能都已得到了改善，因此用钢材锻造锻件时，一般取 $Y=1.1\sim 1.3$ 。

3. 影响金属锻造性能的因素

不同化学成分的金属塑性不同，所以可锻性也不同。纯铁的塑性就比碳钢好，变形抗力也较小；低碳钢的可锻性又比高碳钢好。当钢中含有较多的碳化物形成元素 Cr、Mo、W、V 时，可锻性显著下降。

金属内部的组织结构不同，其可锻性有很大差别。固溶体（如渗碳体）

偏析以及其它缺陷时，可锻性较差。

此外，变形温度、变形速度和应力状态等也影响金属的锻造性能。金属的可锻性既取决于金属的本质，又取决于变形条件，在锻压生产中要力求创造有利的变形条件，充分发挥金属的塑性，降低变形抗力，使功耗最少，变形进行得充分，用最经济的方法达到加工的目的。

8.1.3 坯料的加热和锻件的冷却

用于锻压的材料，应具有良好的塑性，以便在锻压加工时能产生较大的塑性变形而不破坏。常用金属材料中，铸铁塑性很差，不能锻压；钢、铝、铜等塑性良好，可以锻压。但即使是塑性良好的金属材料，如果在常温下锻造成形，也只能得到有限的变形量，而且变形抗力很大，很难达到预期的成形要求，甚至开裂。因此，坯料在锻打前需要先在加热炉中加热，以提高坯料的塑性，降低其变形抗力，可以用较小的锻造力而产生较大的塑性变形，且锻后可获得良好的组织和性能。

1. 加热设备

锻造加热炉的种类很多。按所用热源的不同，锻造加热炉可分为火焰加热炉和电加热炉。火焰炉按所用燃料不同，又有煤炉、油炉和煤气炉之分。

图 8.1.4 为以煤为燃料的火焰加热反射炉，主要由燃料室、加热室、鼓风装置、换热器及烟道、烟囱等部分组成。煤在燃料室内燃烧，火焰和高温炉气通过火墙从炉子拱顶反射到加热室内加热坯料。加热室的温度一般可达 1350 左右。燃烧所需空气经过换热器后送入燃烧室来提高炉子的热效率，废气经过烟道、烟囱排出。

操作时应当注意：装取坯料要穿戴护具，先关风门，后开炉门，防止烫伤或烧伤；坯料装炉要依次排列，顺序取出，防止碰撞炉壁和炉底；炉口至锻锤间应保持通道畅通，工件在传送途中要贴近地面，防止碰人，不准抛掷传送。

2. 锻造温度范围的确定

锻造温度范围是指材料适于锻造的最高温度（称始锻温度）
锻温度）

确定锻造温度范围的原则是：保证金属在锻造过程中具有良好的锻造性能，即塑性好、变形抗力小以及在锻后能获得良好的内部组织。同时锻造温度范围要尽可能宽一些，以便有较充裕的时间进行锻造成形，从而减少加热次数，降低材料消耗，提高生产率。

坯料加热后塑性提高。但是加热温度过高，坯料会产生许多加热缺陷，甚至成为废品。一般碳钢的始锻温度应低于其熔点 100~200 。终锻温度的确定主要应保证金属在锻前具有足够的塑性，且停锻后能获得细小的晶粒组织。如果在终锻温度下继续锻造，不仅变形困难，而且易造成坯料开裂或模具、设备的损坏。

常用金属材料的锻造温度范围见表 8.1.1。

3. 锻件的冷却方法

锻件的冷却是保证锻件质量的重要环节。其冷却方法主要有三种：空冷。在无风的空气中，放在干燥的地面上冷却。坑冷。在充填有石棉灰、砂子或炉灰等绝热材料的坑中冷却。

炉冷。在 500~800 的加热炉中，随炉缓慢冷却。一般来说，锻件中含碳量、合金元素含量越高，锻件体积越大、形状越复杂，冷却速度就应越缓慢，以防止出现硬化、变形甚至

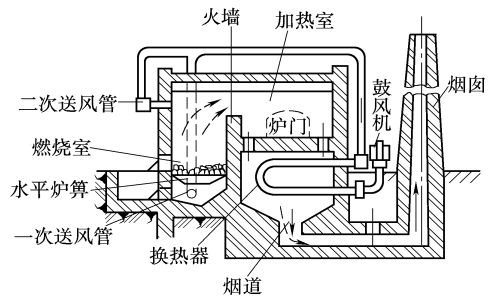


图 8.1.4 反射炉结构示意图

裂纹。

表 8.1.1 常用金属材料的锻造温度范围

材料种类	始锻温度/	终锻温度/
低碳钢	1 200 ~ 1 250	800
中碳钢	1 150 ~ 1 200	800
低合金结构钢	1 100 ~ 1 180	850
铝合金	450 ~ 500	350 ~ 380
铜合金	800 ~ 900	650 ~ 700

8.2 自由锻

自由锻分为手工锻造和机器锻造两种。手工锻造只能生产小型锻件，生产率也较低。机器锻造则是自由锻的主要生产方法。锻件形状和尺寸主要由锻工的操作技术来保证。

由于自由锻所用的工具简单，并具有较强的通用性，因而自由锻的应用较为广泛。生产的锻件质量可以从不到 1 kg 的小件到 200 ~ 300 t 的大件。对于特大型锻件如水轮机主轴、多拐曲轴、大型连杆等，自由锻造是唯一可行的加工方法。所以，自由锻在重型机械制造中具有特别重要的地位。自由锻的不足之处是锻件精度低，生产率低，劳动条件相对较差。

8.2.1 自由锻设备

自由锻所用设备根据它对坯料作用力的性质，分为锻锤和液压机两大类。锻锤产生冲击力使金属坯料变形；液压机则以静压力使金属变形。

生产中使用的锻锤是空气锤和蒸汽 - 空气锤。空气锤的吨位

小型锻件的锻造。蒸汽 - 空气锤的吨位较大，是中小型锻件普遍使用的设备。生产中使用的液压机主要是水压机，它的吨位

金属变形的过程中没有震动，并能很容易达到较大的锻造深度，所以水压机是巨型锻件的唯一成形设备。

空气锤是生产小型锻件的常用设备，其性能和工作原理如图 8.2.1 所示。

空气锤有压缩缸和工作缸。电动机通过曲柄连杆带动压缩缸内活塞运动，将压缩空气经旋阀送入工作缸的下腔或上腔，驱使上抵铁或锤头上

下运动进行打击。通过脚踏杆操纵控制阀门可使锻锤空转、锤头上悬、锤头下压、连续打击和

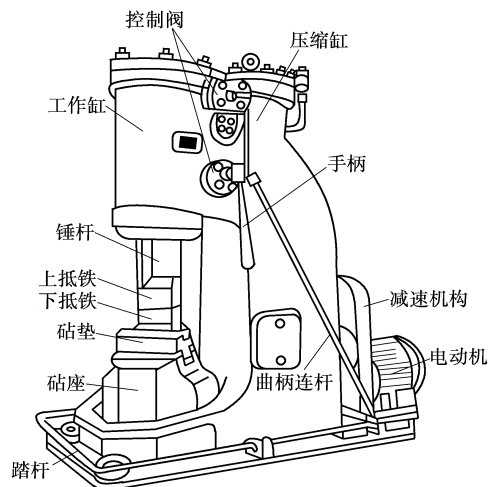


图 8.2.1 空气锤结构图

单次锻打等多种动作，满足锻造的各种需要。空气锤工作时，震动大、噪音大。

空气锤的规格用落下部分的质量来表示。空气锤的落下部分包括工作活塞、锤杆和上抵铁三部分。常用规格从 650 N 到 8 500 N。而锻锤产生的打击力量一般是落下部分的 1 000 倍左右。

8.2.2 自由锻的基本工序

自由锻的工序可分为基本工序、辅助工序和修整工序三大类。常用的基本工序有镦粗、拔长、冲孔、弯曲、扭转、错移和切割。

1. 镦粗

使坯料高度减小、横截面增大的锻造工序叫镦粗，多用来制造盘类锻件，如齿轮坯、圆盘、凸缘等。在锻造环、套筒等空心锻件时，镦粗是冲孔前的预备工序。

镦粗有整体镦粗和局部镦粗两种基本方法，如图 8.2.2 所示。

2. 拔长

使坯料横截面积减小、长度增加的锻造工序叫拔长。多用来制造具有长轴线的锻件，如光轴、台阶轴、曲轴、拉杆和连杆等。

拔长操作的工艺要点如下：

镦另一面。图 8.2.3 为拔长时坯料的翻转方法。

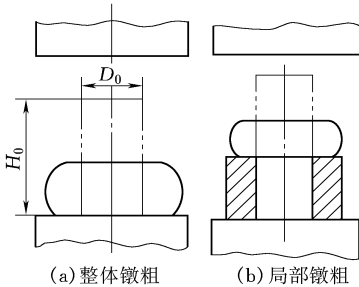


图 8.2.2 镦粗

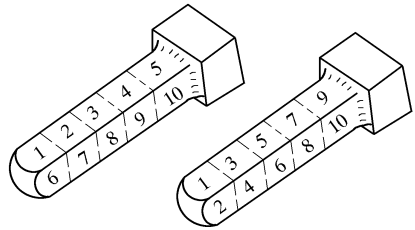


图 8.2.3 拔长时坯料翻转方法

动，延长小，拔长效率低；送进量小，则容易出现折叠夹层。

3. 冲孔

用冲头在坯料上冲出通孔或不通孔的锻造工序叫冲孔。主要用于锻造空心锻件，如齿轮、圆环、套筒等。图 8.2.4 为双面冲孔及单面冲孔示意图。

冲孔操作的工艺要点如下：

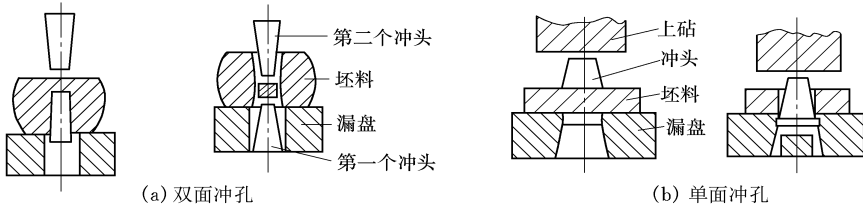


图 8.2.4 冲孔过程示意图

修改。

4. 弯曲

使用一定的工具将坯料弯成一定角度和形状的工序叫弯曲。弯曲工艺常用来生产吊钩、弯板、链环等。图 8.2.5 为弯曲方法示意图。

5. 扭转

使坯料的一部分相对于另一部分旋转一定角度的工序叫扭转。扭转工序可用来制造多拐曲轴和连杆等。图 8.2.6 为扭转方法图。

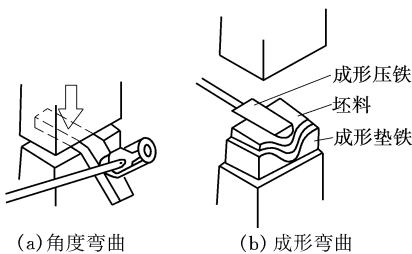


图 8.2.5 弯曲方法图

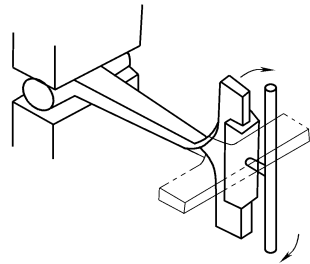


图 8.2.6 扭转方法图

6. 错移

使坯料的一部分相对于另一部分错开，但两部分的轴线仍保持平行的工序叫错移。错移工序可用于曲轴等的制造。图 8.2.7 为错移过程示意图。

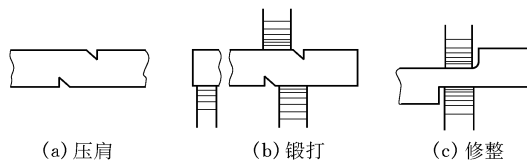


图 8.2.7 错移过程示意图

7. 切割

将坯料分割开的工序叫切割。切割的工具叫剃刀。切割常用于下料和切除锻件的余料。辅助工序是为基本工序操作方便而进行的预先变形工序。如压钳口、压痕、钢锭倒棱等。

修整工序是用以减少锻件表面缺陷而进行的工序。如校正、滚圆、平整等。

锤上自由锻的安全规则如下：

1. 工作前必须进行设备及工具检查，如上、下抵铁的楔铁有无松动，火钳、垫铁、冲子等有无开裂及铆钉松动的现象。
2. 选择火钳必须使钳口与锻件的截面形状相适应，以保持夹持牢固。
3. 握钳时应握紧火钳的尾部，并将钳把置于体侧。严禁把钳把等工具尾部对准身体正面，或将手指放入钳股之间。
4. 锻打时，锻件应放在下抵铁的中部，锻件及垫铁等工具必须放正、放平，以防飞出伤人。
5. 踩锻锤踏杆时，脚跟不许悬空，以保证操纵的稳定和准确。非锤击时，应随即将脚离开踏杆，以防误踏失事。
6. 两人和多人配合操作时，必须听从掌钳者的统一指挥，冲孔及剁料时，司锤者应听从拿剁刀及冲子者的指挥。
7. 严禁用锤头空击下抵铁，也不许锻打过烧或已冷的锻件。
8. 放置及取出工件、清除氧化皮时，必须使用火钳、扫帚等工具，不许将手伸入上、下抵铁之间。

8.2.3 自由锻工艺规程的制定

制定工艺规程、编写工艺卡片是进行自由锻生产必不可少的技术准备工作，是组织生产过程、规定操作规范、控制和检查产品质量的依据。

1. 制定工艺规程的主要步骤：

2. 绘制锻件图

锻件图是工艺规程中的核心内容。它是以零件图为基础结合自由锻工艺特点绘制而成的。绘制锻件图要考虑以下几个因素：

于锻造，而暂时增加的那一部分金属称为余块，如图 8.2.8 所示。余块一般根据经验来确定，也可以参考有关资料。

成品零件。所以，应在零件的加工表面上增加供切削加工用的金属，该金属层称为锻件加工余量。

寸很难正好达到锻件基本尺寸的要求，允许有一定限度的偏差；锻件最大尺寸与锻件基本尺寸

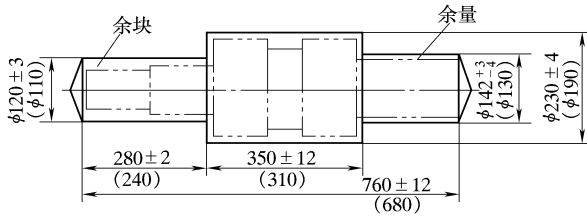


图 8.2.8 典型锻件图

之差称为上偏差，锻件最小尺寸与锻件基本尺寸之差称为下偏差，锻件上偏差与下偏差之差称为锻件公差。锻件公差的大小应根据锻件的形状、尺寸并结合生产的具体情况，根据国家标准加以确定。通常为加工余量的 1/4 ~ 1/3。

典型锻件如图 8.2.8 所示。为了使操作者了解零件的形状和尺寸，在锻件图上用双点划线画出零件主要轮廓形状，并在锻件尺寸下面用括弧注上零件的尺寸。

3. 计算坯料质量与尺寸

坯料质量可按下式计算：

$$m_{\text{坯}} = m_{\text{锻}} + m_{\text{烧}} + m_{\text{芯}} + m_{\text{切}}$$

式中， $m_{\text{坯}}$ ——坯料的质量；

$m_{\text{锻}}$ ——锻件的质量；

$m_{\text{烧}}$ ——加热时坯料表面氧化而烧损的质量；

$m_{\text{芯}}$ ——冲孔时芯料的质量；

$m_{\text{切}}$ ——在锻造过程中修切端部产生的料头金属的质量。

锻件的质量 $m_{\text{锻}}$ 为锻件的体积与金属密度之乘积，锻件体积按锻件基本尺寸计算。锻件加热时烧损的质量 $m_{\text{烧}}$ ，第一次加热时取被加热金属质量的 2% ~ 3%，以后各次加热取 1.5% ~ 2.0%。当锻造大型锻件采用钢锭作坯料时，锻件切头的质量 $m_{\text{切}}$ 还要考虑切掉的钢锭头部和尾部的质量。

根据计算所得的坯料质量、锻造比和截面大小，即可确定坯料长度尺寸或选择适当尺寸的钢锭。

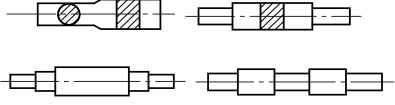
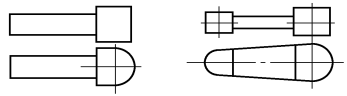
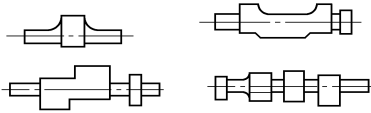
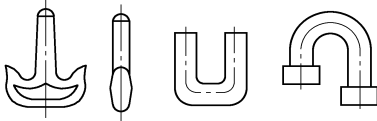
4. 选择锻造工序

自由锻造工序的选择是根据锻造工序的特点及锻件形状来确定的。一般锻件的大致分类及所采用的工序如表 8.2.1 所示。

表 8.2.1 自由锻锻件分类及锻造工序

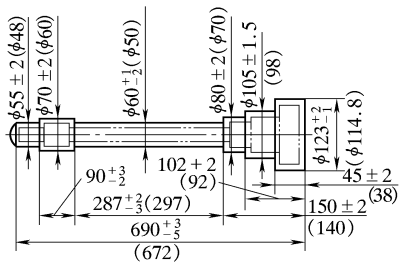
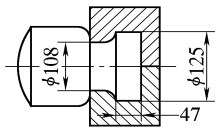
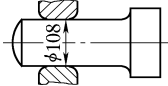
锻件类别	图 例	锻造工序	实 例
盘类圆环类锻件		锻粗、冲孔、马杠扩孔、定径	齿圈、法兰、套筒、圆环等
筒类零件		锻粗、冲孔、芯棒拔长、滚圆	圆筒、套筒等

续表

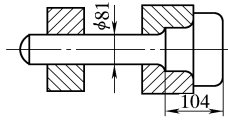
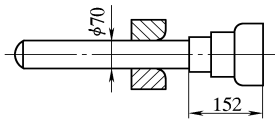
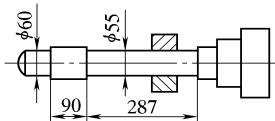
锻件类别	图 例	锻造工序	实 例
轴类零件		拔长、压肩、滚圆	主轴、传动轴等
杆类零件		拔长、压肩、修整、冲孔	连杆等
曲轴类零件		拔长、错移、压肩、扭转、滚圆	曲轴、偏心轴等
弯曲类锻件		拔长、弯曲	吊钩、轴瓦盖、弯杆

工艺规程的内容还包括：确定所用工夹具、加热设备、加热规范、加热火次、冷却规范、锻造设备和锻后热处理规范等。表 8.2.2 为一个典型的自由锻件

表 8.2.2 半轴自由锻工艺卡

锻件名称	半 轴	锻 件 图
坯料质量	25 kg	
坯料尺寸	130 mm x 240 mm	
材料	18CrMnTi	
火 次	工 序	图 例
	锻出头部	
	拔长	

续表

火 次	工 序	图 例
	拔长及修整台阶	
	拔长并留出台阶	
	锻出凹档及拔出端部并修整	

8.2.4 自由锻锻件结构工艺性

设计自由锻件结构和形状时,除满足使用性能要求外,还必须考虑自由锻设备、工具和工艺特点,使零件具有良好的结构工艺性,以便达到结构合理、锻造方便、减少材料与工时的消耗和提高生产率的目的。其一般原则是:

1. 自由锻件最好采用平直、对称、简单的形状,尽可能由平面和圆柱面组成。一些难以锻出的形状,如小于 25 mm 的孔、轴类锻件上窄的凹槽,则可用添加余块的办法简化锻件形状,使锻造方便

机械加工任务量增加过多,则机加工工时增加,并且多消耗了材料,设计时应综合考虑。

2. 锻件上应避免带楔形、曲线形、锥形的表面,如图 8.2.9 b 所示。椭圆型或工字形表面也应避免,否则会給锻造带来困难。

3. 为便于切削加工和装配而设计的小凸台用沉头孔代替。

4. 锻件上不允许有加强筋,如图 8.2.9 d 所示。为了增加强度,可适当增加薄壁筒的外径,或待薄壁筒锻好后再将加强筋焊上去。

5. 不允许采用圆柱体与圆柱体相贯的锻件结构,如图 8.2.9 e 所示。这种复杂的相贯线是无法锻出的。改为圆柱体端面与截柱体的平面相交,则便于锻制。或将各圆柱体锻出后再焊成整体。实际上,如果锻件的横截面积有急剧变化或形状较复杂时,均可将其设计成几个简单件构成的组合体,每个简单件锻制成形后,再用焊接或机械连接方式构成整体零件。

自由锻造是获得大型锻件的主要方法,但自由锻件的形状受到很大限制,且精度不高,生产率也很低,主要应用于单件小批生产或修理工作中锻制形状简单的锻件。对一些形状复杂的锻

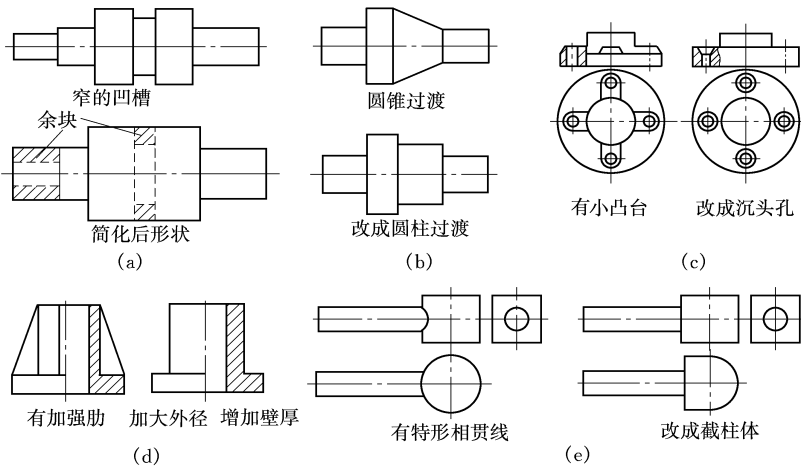


图 8.2.9 锻件结构工艺性举例

件,在成批大量生产中则采用模型锻造来制造。

8.3 模锻

模锻是在高强度金属锻模上预先制出与锻件形状一致的模膛,使坯料在模膛内受压变形。在变形过程中由于模膛对金属坯料流动的限制,因而锻造终了时能得到和模膛形状相符的锻件。

与自由锻相比,模锻的优点是:锻件的形状和尺寸比较精确,机械加工余量较小,节省加工工时,材料利用率高;可以锻制形状较为复杂的锻件;生产率较高;操作简单,劳动强度低,对工人技术水平要求不高,易于实现机械化;锻件内流线分布更为合理,力学性能高。但是,由于模锻是整体变形,变形抗力较大,受模锻吨位的限制,模锻件的质量一般在 150 kg 以下。又由于制造锻模成本很高,所以模锻不适合于单件小批生产,而适合于中小型锻件的大批大量生产。模锻适应现代化大生产的要求,在飞机、汽车、拖拉机等国防工业和机械制造业中,模锻件数量很大,约占这些行业锻件总重量的 80% 左右。

模锻按使用设备的不同可分为:锤上模锻、胎模锻、压力机上模锻。

8.3.1 锤上模锻

锤上模锻使用的设备有蒸汽-空气模锻锤、无砧底锤、高速锤等。一般工厂企业中主要使用蒸汽-空气模锻锤,其工作原理与蒸汽-空气自由锻锤基本相同。

1. 锻模

模锻工作示意图见图 8.3.1 所示。锻模由上、下模组成。上模和下模分别安装在锤头下端和模座上的燕尾槽内,用楔铁紧固。上、下模合在一起其中部形成完整的模膛。根据模膛功用不同,可分为模锻模膛和制坯模膛两大类。

模锻模膛又分为终锻模膛和预锻模膛两种。

形状应和锻件的形状相同。但因锻件冷却时要收缩，终锻模膛的尺寸应比锻件尺寸放大一个收缩量。钢件的收缩量取 1.5%。沿模膛四周有飞边槽。锻造时部分金属先压入飞边槽内形成毛边，毛边很薄最先冷却，可以阻碍金属从模膛内流出，以促使金属充满模膛，同时容纳多余的金属。对于具有通孔的锻件，由于不可能靠上、下模的凸起部分把金属完全挤压掉，故终锻后在孔内留下一薄层金属，称为冲孔连皮。把冲孔连皮和飞边冲掉后，才能得到有通孔的模锻件。

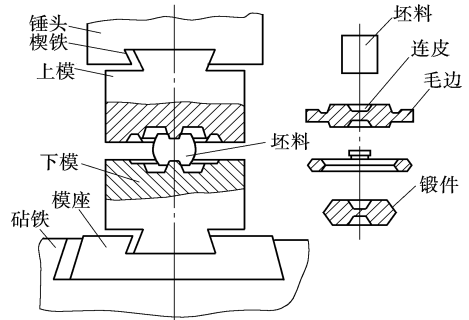


图 8.3.1 模锻工作示意图

形到接近于锻件的形状和尺寸，再进行终锻时，金属容易充满终锻模膛，同时减少了终锻模膛的磨损，延长了锻模的使用寿命。预锻模膛的形状和尺寸与终锻模膛相近似，只是模锻斜度和圆角半径稍大，没有飞边槽。对于形状简单或批量不大的模锻件可不设置飞边槽。

对于形状复杂的模锻件，原始坯料进入模锻模膛前，先放在制坯模膛制坯，按锻件最终形状作一初步变形，使金属能合理分布和很好地充满模膛。

2. 模锻工艺规程的制定

模锻生产的工艺规程包括制订锻件图、计算坯料尺寸、确定模锻工步、选择设备及安排修整工序等。

锻件图是根据零件图按模锻工艺特点制定的。它是设计和制造锻模、计算坯料以及检查锻件的依据。制定模锻锻件图时应综合考虑分模面、余量、公差、余块、模锻斜度和圆角半径等问题。

模锻工步主要是根据锻件的形状和尺寸来确定的。如锻造弯曲连杆模锻件料经过拔长、滚压、弯曲等三个工步，形状接近于锻件，然后经过预锻和终锻两个模膛制成带有毛边的锻件。

坯料在锻模内制成模锻件后，尚需经过一系列修整工序，以保证和提高锻件质量。

将它们切除。切边和冲孔根据不同情况可在热态或冷态下进行。

的校正模内进行校正。

善锻件组织和切削加工性，提高锻件的力学性能。一般采用正火或退火。

面清理，用喷砂法、酸洗法等去除锻件表面的氧化皮、污垢及其它表面缺陷

精压。

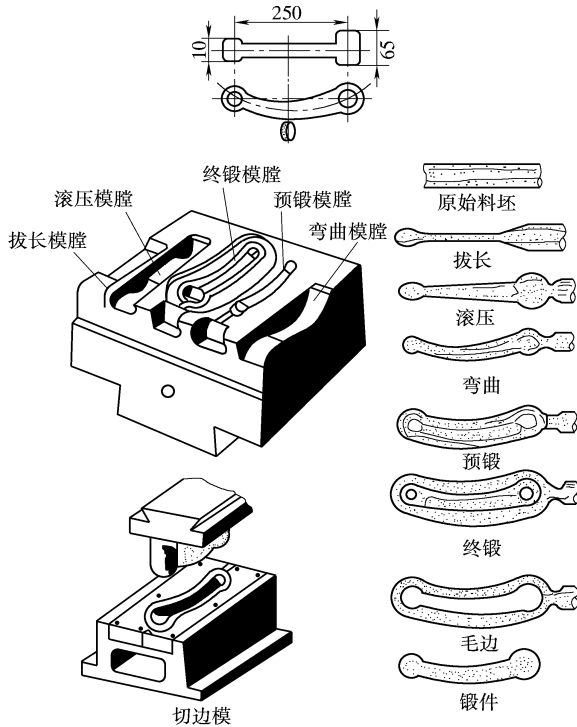


图 8.3.2 弯曲连杆模锻过程

8.3.2 胎模锻

胎模锻是在自由锻设备上使用可移动模具生产模锻件的一种锻造方法。所用模具称为胎模。它结构简单，形式多种多样，但不固定在上下砧块上。一般选用自由锻方法制坯，然后在胎模中终锻成形。胎模锻是介于自由锻和模锻之间的一种工艺，与自由锻和模锻相比有如下特点：

省了金属和机加工工时。

胎模锻的缺点是工人劳动强度较大，胎模容易损坏，生产率与模锻相比还不够高。胎模锻造适合于中小批量的锻件生产。

8.3.3 压力机上的模锻

锤上模锻具有工艺适应性广的特点，目前在锻压生产中有广泛的应用。但是，模锻锤在工

作中存在震动和噪音大、劳动条件差、蒸汽效率低、能源消耗多等难以克服的缺点。因此近年来大吨位模锻锤有逐步被压力机所取代的趋势。

用于模锻生产的压力机有摩擦压力机、曲柄压力机和平锻机等。

8.4 板料冲压

板料冲压工艺在工业生产中有着十分广泛的应用，特别是在汽车、拖拉机、航空、电器、仪表及国防等工业中占有极其重要的地位。

板料冲压具有下列特点：

求高；因此这种工艺方法用于大批量生产时才能使冲压产品成本降低。

板料冲压所用的原材料通常是塑性较好的低碳非合金钢、塑性高的合金钢、铜合金、铝合金等的薄板料、条带料。

8.4.1 冲压设备

冲压常用设备有剪床和冲床。剪床供冲压所用。

冲床是冲压加工的基本设备。常用小型冲床的结构如图 8.4.1 所示。接通电源后，电动机通过减速机构带动飞轮旋转，踩下踏板使离合器闭合，通过曲轴和连杆使原处于最高极限位置的滑块沿导轨向下运动，进行冲压。若踩下踏板后立即抬起，使离合器脱开，则在制动器的作用下，使滑块停止在最高位置上，完成一个单次冲压；如果不抬起踏板，则可进行连续冲压。

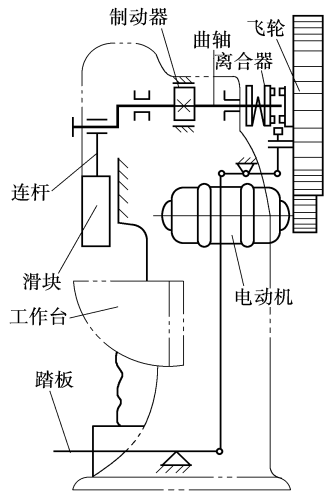


图 8.4.1 冲床的基本结构

8.4.2 冲压模具

冲模是使板料分离或变形的工具。可分为简单模、连续模及复合模三种。

1. 简单模

简单模是在压力机的一次行程中只完成一道工序的模具。如图 8.4.2 所示为落料用的简单模。凹模用压板固定在下模板上，下模板用螺栓固定在冲床的工作台上。凸模用压板固定在上模板上，上模板则通过模柄与冲床的滑块连接，凸模可随滑块作上下运动。为了使凸模向下运动时能对准凹模孔，并在凹模孔之间保持均匀间隙，通常用导柱和套筒来保证。条料在凹模上沿两个导板之间送进，碰到定位销为止。凸模向下冲压时，冲下部分进入凹模孔，而条料则

夹住凸模一起回程向上运动。条料碰到卸料板时被推下，这样，条料继续在导板间送进。重复上述动作，即可连续冲压。

2. 连续模

连续模是把两个或两个以上的简单模安装在一个模板上，在压力机一次行程内在模具不同部位上同时完成两个以上冲压工序。此种模具生产效率高，易于实现自动化。但要求定位精度高，制造比较麻烦，成本也较高。

3. 复合模

复合模是利用压力机的一次行程，在模具的同一位置完成数道工序的模具。适用于产量大、精度高的冲压件。

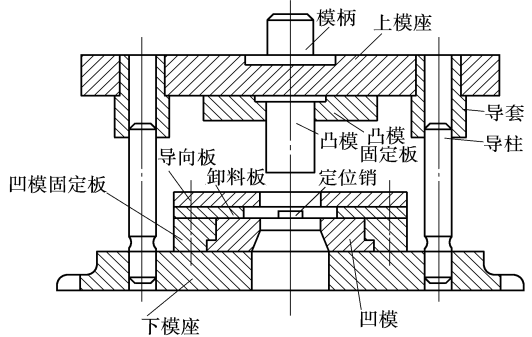


图 8.4.2 简单模

8.4.3 板料冲压的基本工序

板料冲压的基本工序可分为分离工序和变形工序两大类。

1. 分离工序

分离工序是将坯料的一部分和另一部分分开的工序。如落料、冲孔、修整、剪切等。

与坯料变形过程都是一样的，只是用途不同。落料是被分离的部分为成品或坯料，周边是废料；冲孔则是冲落的部分为废料，而周边是带孔的成品。

排样是落料工作中的重要工艺问题。合理的排样可减少废料、节省金属材料。如图 8.4.3 所示。无接边的排样法可最大限度地减少金属废料，但冲裁件的质量不高。通常都采用接边的排样法。

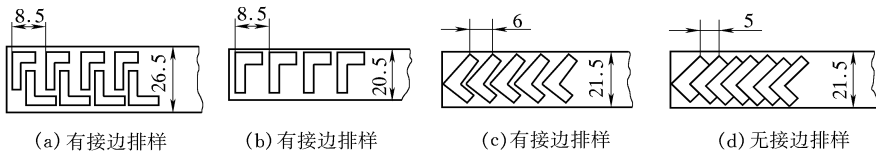


图 8.4.3 落料的排样工艺

缘或内孔刮削一层薄薄的切屑或切掉冲孔或落料时在冲裁件断面上存留的剪裂带和毛刺，从而提高冲裁件的尺寸精度和降低表面粗糙度。

2. 变形工序

变形工序是使坯料的一部分相对于另一部分产生塑性变形而不破裂的工序，如弯曲、拉深、翻边、成型等。

曲变形过程简图。

坯料断裂，拉深模的凸模和凹模边缘都不能是锋利的刃口，而应做成圆角。

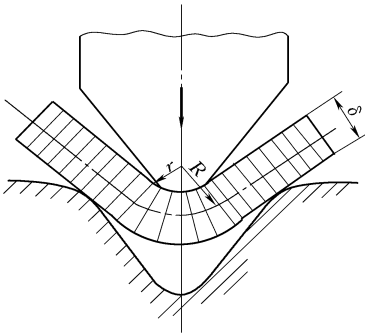


图 8.4.4 弯曲时金属变形简图

冲压的安全规则如下：

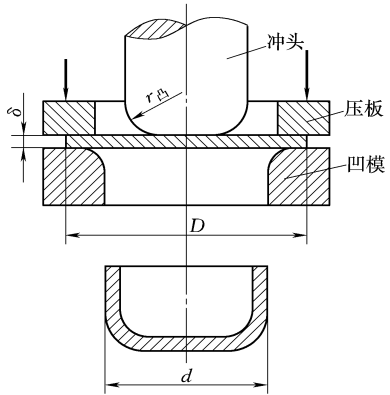


图 8.4.5 拉深过程简图

事故；

8.5 锻压件质量与成本分析

8.5.1 锻件质量分析

1. 锻件质量检查项目

(

杂的模锻件可用划线方法进行精确的检测。

裂纹很小，折叠处不知深浅，可经清铲后再观察，必要时也可用探伤法检查。

镜检查锻件断面上的宏观组织。生产中常用的方法是酸蚀检验。即在锻件需要检查的部位切取试样，用酸液浸蚀后即可清晰地显示断面上宏观组织和缺陷的情况，如锻造流线分布、裂纹和

夹杂物等。

化物分布、晶粒度和脱碳深度等项目。

要求，还可作冷弯试验、疲劳试验等。

以上质量检查项目，可根据设计要求和生产实际情况分别采用，有时要逐件检查，有时则按每批锻件抽检。通过质量检查，便可评定锻件是否合格。对于有缺陷的锻件，应分析产生缺陷的原因，提出预防缺陷的措施。

2. 锻件缺陷分析

a. 氧化 金属坯料一般在加热时均与炉中氧化性气体发生反应生成氧化物，这种现象称为氧化。其结果是形成氧化皮。氧化不但会使材料烧损，而且严重时危害锻件质量。加热温度愈高、时间愈长，氧化愈严重。严格控制炉温、快速加热、向炉内送入还原性气体₂₎采用真空中加热是减少氧化的有力措施。

b. 脱碳 加热时坯料表层的碳与氧等介质发生化学反应造成表层碳元素降低叫脱碳。脱碳会使表层硬度降低，耐磨性降低。如脱碳层厚度小于机械加工余量，对锻件不会造成危害；反之则会影响锻件质量。采用快速加热、在坯料表层涂保护涂料、在中性介质或还原性介质中加热都会减缓脱碳。

c. 过热 金属坯料加热温度超过始锻温度并在此温度下保持时间过长，而引起晶粒迅速长大现象叫过热。过热会使坯料塑性下降，锻件机械性能降低。严格控制加热温度，尽可能缩短高温阶段的保温时间可防止过热。

d. 过烧 坯料加热温度接近金属的固相线温度，并在此温度长时间停留，金属晶粒边界出现氧化及形成易溶氧化物的现象叫过烧。过烧后，材料的强度严重降低、塑性很差，一经锻打即破碎成废料，是无法挽救的。因此锻造过程中要严格防止出现过烧现象。

e. 裂纹 大型锻件加热时，如果装炉温度过高或加热速度过快，锻件心部与表层温度差过大，造成内应力过大，从而导致内部裂纹产生。因此对于大型锻件的加热，要防止装炉温度过高和加热速度过快，一般应采取预热措施。

a. 外形翘曲 锻件过程中如果冷却速度较快等因素，造成内应力过大，会使锻件的轴心线产生弯曲，锻件即产生翘曲变形。对于一般的翘曲变形是可以矫正过来的，但要增加一道修整工序。

b. 冷却裂纹 锻后快速冷却时应力增大，且金属坯料正从高塑性趋向低塑性，如果应力过大，会在锻件表面产生向内延伸的裂纹。深度较浅的裂纹是可以清除掉的，但若裂纹的深度超过加工余量时，锻件便成为废品。

此外，不恰当的冷却还会使锻件的表面硬化，给切削加工带来困难。

除以上两种缺陷外，还会在锻造过程中产生一些缺陷。如胎模锻时由于合模定位不准等原因，造成沿分模面的上半部相对于下半部的“错差”现象等。通过必要的质量检查和缺陷分析，就可以找到减少或防止锻件缺陷、提高锻件质量的途径。

8.5.2 锻件成本分析

1. 影响锻件成本的主要因素

锻件单件成本一般包括材料费、模具费、燃料动力费、人工费、管理费等多项费用。以某厂生产的柴油机连杆及连杆盖为例，其下料重量、锻件重量、零件重量和材料利用率如表 8.5.1 所示。其中，锻件材料利用率等于 $2.35/3.49$ 为 68%；零件材料利用率等于 $1.63/2.35$ 为 69%；总材料利用率等于 $1.63/3.49$ 为 47%。采用模锻时，其材料费和模具费共占模锻件总成本的 85%；当采用自由锻时，则材料费约占自由锻锻件总成本的 85%~90%。

表 8.5.1 连杆及连杆盖的材料重量

名称 \ 分类	下料重量	锻件重量	零件重量
连 杆	2.55	1.70	1.15
连 杆 盖	0.94	0.65	0.48
合 计	3.49	2.35	1.63

2. 降低锻件成本的途径

(

锻造过程中的下料损失、废料

加工余量的损失。材料利用率低不但浪费宝贵的金属材料，还要消耗大量的切削加工工时。锻件精密化是降低锻件成本的主要途径。

件的生产数量有关。当生产数量不大时，采用昂贵的专用设备和模具，必然导致生产成本的提高；当生产批量很大时，若仍用简单的自由锻设备，必然导致材料利用率和劳动生产率的降低，同样会引起生产成本的提高。工艺的先进与落后，应视具体生产条件

论，最终还是应以经济效益来评价工艺方案的优劣。例如，对于中、小批量生产来说，胎模锻将是一种比较合理的锻造方法，只有当生产批量相当大时，采用模锻才是比较合理的。而当锻件需要量只有几件、十几件时，自由锻应当是优先选用的锻造方法。

8.6 锻压新技术简介

随着工业的不断发展，对锻压加工提出了越来越高的要求，出现了许多先进的锻压工艺方法。其主要特点是尽量使锻压件形状接近零件的形状，以便达到少切削或无切削的目的，提高尺寸精度和表面质量，提高锻压件力学性能，节省金属材料，降低生产成本，改善劳动条件，大大提高生产率并能满足一些特殊工作要求。

8.6.1 高速高能成形

高速高能成形有多种加工形式，其共同特点是在极短的时间内，将化学能、电能、电磁能和机械能传递给被加工的金属材料，使之迅速成形。

高速高能成形分为：利用炸药的爆炸成形，利用放电的放电成形，利用电磁力的电磁成形和利用压缩气体的高速锤成形等。高速高能成形的速度高，可以加工难加工材料，加工精度高、加工时间短，设备费用也较低。

1. 高速锤成形

高速锤成形是利用 14 MPa 的高压气体的短时间突然膨胀，推动锤头和框架系统作高速相对运动而产生悬空打击，使金属坯料在高速冲击下成形。

在高速锤上可以锻打强度高、塑性低的材料。可以锻打的材料有铝、镁、铜、钛合金，高强度钢、耐热钢、工具钢、高熔点合金等。在高速锤上可以锻出叶片、涡轮、壳体、接头、齿轮等数百种锻件。

高速锤成形的主要特点是：

属变形时间极短，约为 0.001 ~ 0.002 s，热效应高，金属成形性能好，适于锻造形状复杂、薄壁高筋的锻件。

速上升，降低了变形抗力，锻件具有细晶组织和较高的力学性能，尤其是冲击韧度和疲劳强度提高较多。

多，所以材料利用率高。

2. 爆炸成形

爆炸成形是利用炸药爆炸的化学能使金属材料变形的的方法。在模膛内置入炸药，其爆炸时产生大量高温高压气体，使周围介质使坯料成形。这种成形方法变形速度高，投资少，工艺装备简单，适用于多品种小批量生产，尤其适合于一些难加工金属材料，如钛合金、不锈钢的成形及大件的成形。

3. 放电成形

放电成形是通过放电回路中产生强大的冲击电流，使电极附近的水汽化膨胀，从而产生很强的冲击压力使坯料成形。与爆炸成形相比，放电成形时能量的控制与调整简单，成形过程稳定，使用安全、噪音小，可在车间内使用，生产率高。但是放电成形受到设备容量的限制，不适于大件成形，特别适于管子的胀形加工。

4. 电磁成形

电磁成形是利用电磁力来加压成形的。成形线圈中的脉冲电流可在极短的时间内迅速增长和衰减，并在周围空间形成一个强大的变化磁场。毛坯置于成形线圈内部，在此变化磁场作用下，毛坯内产生感应电流，毛坯内感应电流形成的磁场和成形线圈磁场相互作用的结果，使毛坯在电磁力的作用下产生塑性变形。电磁成形不需要水和油之类的介质，工具也几乎不消耗，装置清洁、生产率高，产品质量稳定，但由于受到设备容量的限制，只适于加工厚度不大的小零件、板材或管材。

8.6.2 液态成形

液态模锻是一种介于铸造和模锻之间的加工方法。它是将定量的金属直接浇入金属模内然后在一定时间内以一定压力作用于液态或半液态金属上使之成型，并在此压力下结晶和塑性流动。由于结晶过程是在压力下进行的，所以改变了常态下结晶的宏观及微观组织，使柱状晶变为细小的等轴晶。

用于液态模锻的金属可以是各种类型的合金，如铝合金、铜合金、灰口铸铁、碳钢，不锈钢等。

与一般模锻相比，液态模锻有以下特点：

1. 液态模锻可以利用金属废料熔炼成液态后直接进行模锻，不象模锻对于下料要求严格，因而减少了工序及设备，节约了材料。
2. 液态模锻工件的强度指标可以接近或达到模锻件的水平。组织致密，性能优良。
3. 液态模锻件外形准确，表面粗糙度值低，有时可不用进行机械加工。
4. 液态模锻可以一次成型，不像一般模锻要多个模膛，从而可提高生产率，减少劳动强度，也节省了大量模具钢。
5. 液态模锻是在封闭的模具内成型，液态金属充满模膛要比一般模锻容易得多，因而所需设备吨位较小，仅为一般模锻设备的 1/5 ~ 1/8。

与压力铸造相比，液态模锻则又具有以下的特点：

1. 液态模锻不像压铸那样由于金属高速流入模型，气体来不及排出，因而容易产生气孔。
2. 液态模锻不像压铸那样快速冷却凝固，它是在充分的压力下结晶成形，晶粒细化，组织均匀。
3. 液态模锻结构简单、紧凑。不象压铸需要浇口、浇道，使模具复杂。
4. 液态模锻不会产生压铸时易出现的液体正面冲击和涡流现象。
5. 液态模锻不需要用专门的压铸机，而采用通用设备。

8.6.3 超塑性成形

超塑性是指金属或合金在特定条件下进行拉伸试验，其伸长率超过 100% 以上的特性。目前常用的超塑性成形材料主要是锌铝合金、铝基合金、钛合金及高温合金。超塑性状态下的金属在变形过程中不产生缩颈现象，变形应力可比常态降低几倍至几十倍。因此此种金属极易成形，可采用多种工艺方法制出复杂零件。

如图 8.6.1 所示的零件直径较小，但很高。选用超塑性材料可以一次拉伸成形，质量很好，零件性能无方向性。图 8.6.1 a 为拉深成形示意图。

超塑性模锻工艺有以下特点：

1. 扩大了可锻金属的种类。如过去认为只能

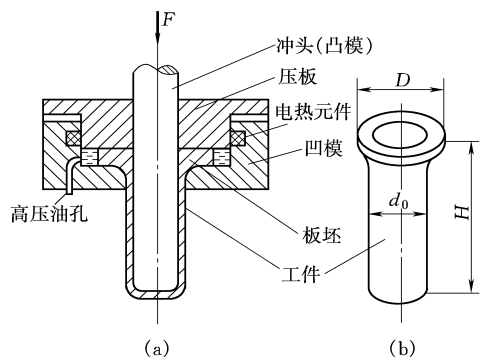


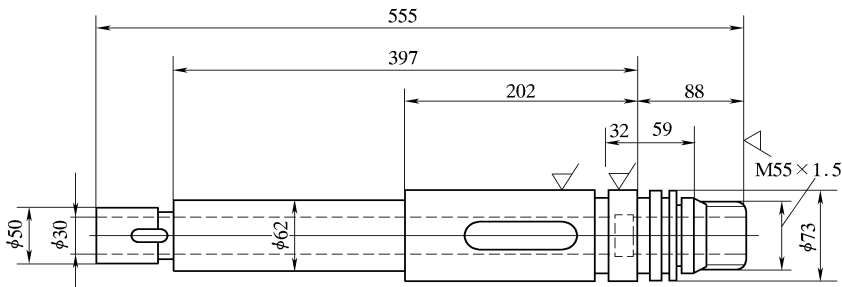
图 8.6.1 超塑性板料拉深

采用铸造成形的某些合金，也可以进行超塑性模锻成形。

2. 金属填充模膛性能好。锻件尺寸精度高，机械加工余量小，甚至可以不再加工。这种成形工艺比普通模锻降低金属消耗 50% 以上，这对很难加工的钛合金和高温合金特别有利。
3. 能获得均匀细小的晶粒组织，零件整体力学性能均匀一致。
4. 金属的变形抗力小，可充分发挥中、小设备的作用。

思考题与习题

- 8.1 何谓金属的可锻性？影响金属可锻性的因素有哪些？
- 8.2 指出自由锻造的生产特点和应用范围。
- 8.3 何谓锻造比？原始坯料长 150 mm，若拔长到 450 mm 时，其锻造比是多少？
- 8.4 根据你在实习中的观察和操作的体会，试总结拔长、镦粗等基本工序的操作要点和必须遵守的一些规则。
- 8.5 试从锻造设备、工模具、锻件精度、生产率和应用范围等方面对自由锻和胎模锻进行分析比较。
- 8.6 叙述绘制下图所示零件的锻造图应考虑的因素。

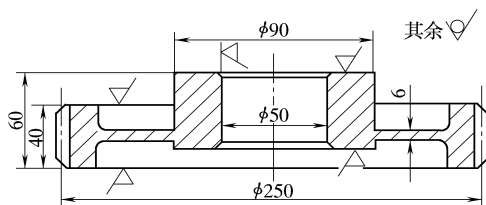


题 8.6 图 C618K 车床主轴零件图

- 8.7 自由锻造的结构工艺性主要表现在哪些方面？
- 8.8 锤上模锻的模膛中，预锻模膛起什么作用，为什么终锻模膛四周要开设飞边槽？
- 8.9 锤上模锻时，如何确定分模面的位置？为什么不能冲出通孔？
- 8.10 试比较自由锻造、锤上模锻、胎模锻造的优缺点。
- 8.11 板料冲压生产有何特点？应用范围如何？

8.12 落料与冲孔的区别何在？凸模与凹模的间隙对冲裁质量和工件尺寸有何影响？

8.13 题 8.13 图所示零件如分别为单件、小批、大批量生产时，应选择哪些锻造方法加工？哪种最为合理？并定性画出锻件图。



题 8.13 图 模锻零件图

第9章 焊接及胶接成形工艺

问一问，想一想：自行车车架采用什么焊接方法？汽车车体的焊接最常用什么焊接方法？

学习目标

1. 了解焊接冶金过程的特点，了解常用金属材料的焊接性能；了解焊接新工艺、新技术及其发展趋势；
2. 重点掌握焊条电弧焊等常用焊接方法的设备、焊接材料、工艺过程特点与应用；掌握焊条电弧焊与气焊的基本操作技能及焊接生产安全技术；
3. 具有合理选用焊接方法及相关焊接材料、分析焊件结构工艺性的初步能力，具有焊件质量与成本分析的初步能力；
4. 了解胶接成形工艺的特点及其应用。

9.1 焊接工艺基础

9.1.1 概述

焊接是通过加热或加压，或两者并用，借助于金属原子扩散和结合，使分离的材料牢固地连接在一起的加工方法。焊接方法的种类很多，按焊接过程特点可分为三大类：

1. 熔焊

这类方法的共同特点是把焊接局部连接处加热至熔化状态，形成熔池，待其冷却结晶后形成焊缝，将两部分材料焊接成一个整体。因两部分材料均被熔化，故称熔焊。

2. 压焊

在焊接过程中需要对焊件施加压力

3. 钎焊

利用熔点比母材低的填充金属

实现连接的一类焊接方法。

主要焊接方法分类如图 9.1.1 所示：

焊接主要用于制造金属结构件，如锅炉、压力容器、船舶、桥梁、管道、车辆、起重机、海洋结构、冶金设备；生产机器零件箱体、轴、齿轮等。与铸造相比，不需要制造木模和砂型，不需要专门冶炼和浇注，生产周期短，而且节省了材料，降低了成本。对于一些单件生产的特大型零件

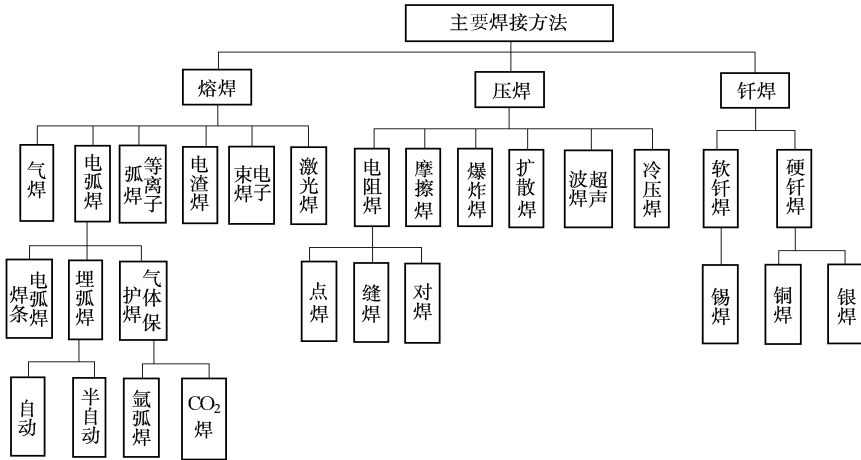


图 9.1.1 主要焊接方法分类框图

小拼大，简化工艺；修补铸、锻件的缺陷和局部损坏的零件，这在生产中具有较强的经济意义。世界上主要工业国家每年生产的焊件结构约占钢产量的 45%。

焊接正是有了连接性能好、省工省料、成本低、重量轻、可简化工艺等优点，才得以广泛应用。但同时也存在一些不足之处，如结构不可拆，更换修理不方便；存在焊接应力，容易产生焊接变形；容易出现焊接缺陷等。有时焊接质量会成为突出问题，焊接接头往往是锅炉压力容器等重要容器的薄弱环节，实际生产中应特别注意。

9.1.2 焊接接头的组织和性能

熔焊按其所用的焊接热源不同分为电弧焊、电渣焊、气焊等多种方法。图 9.1.2 显示了焊条电弧焊的过程。熔焊从母材和焊条被加工熔化，到熔池的形成、停留、结晶，要发生一系列的冶金化学反应，从而影响焊缝的化学成分、组织和性能。由于空气中的氧气等在电弧高温作用下发生分解。氧原子与金属和碳发生反应，会使 Fe、C、Mn、Si 等元素大量烧损，而且由于焊缝金属中含有氧、氮、氢等，会使焊缝机械性能明显下降，尤其使低温冲击韧性急剧下降，引起冷脆等现象。为了保证焊接质量，在焊接过程中，通常采取下列措施：

条药皮、埋弧焊焊剂、气体保护焊保护气体（氩气、氦气等）

前对坡口及两侧的锈、油污等进行清理；焊条、焊剂烘干等，都能有效地防止有害气体进入熔池。

池的有害元素。如焊条药皮中加锰铁合金等，进行脱氧、脱硫、脱磷、去氢、渗合金等，从而保证和调整了焊缝的

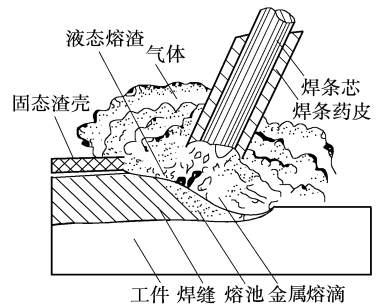


图 9.1.2 焊条电弧焊过程示意图

化学成分。生成的 MnS 等不溶于金属，进入焊渣中，最终被清理掉。

熔焊使焊缝及其附近的母材经历了一个加热和冷却的热过程。由于温度分布不均匀，焊缝受到一次复杂的冶金过程，焊缝附近区域受到一次不同规范的热处理，因此必然引起相应的组织和性能的变化，直接影响焊接质量。离焊缝越近的点，被加热的温度越高；反之，越远的点，被加热的温度越低。

焊接接头由焊缝、熔合区和热影响区组成。焊缝附近的母材组织和性能发生变化的区域称为焊接热影响区。熔焊焊缝和母材的交界线叫熔合线，熔合线两侧有一个很窄的焊缝与热影响区的过渡区，叫熔合区

1. 焊缝的组织 and 性能

焊缝组织是由熔池金属结晶得到的铸造组织。焊缝中的铸态组织晶粒粗大，成分偏析，组织不致密。但由于焊接熔池小，冷却快，焊条药皮、焊剂或焊丝在焊接过程中的冶金处理作用，使得焊缝金属的化学成分优于母材，硫磷含量较低，所以容易保证焊缝金属的性能不低于母材，特别是强度容易达到。

2. 热影响区及熔合区的组织和性能

图 9.1.3 是低碳钢焊接接头的组织变化情况。

图中 a 是焊接接头各点最高加热温度曲线，b 是简化的铁碳相图的一部分。低碳钢的热影响区分为过热区、正火区和部分相变区。

相线温度的区域。由于加热温度高，奥氏体晶粒明显长大，冷却后产生晶粒粗大的加热组织。过热区是热影响区中性能最差的部位。因此，焊接刚度大的结构时，易在此区产生裂纹。

A_3 至 $1\ 100$ 的区域。金属发生重结晶，焊后冷却得到均匀而细小的铁素体和珠光体组织。正火区的性能优于母材。

A_1 至 A_3 温度区域。因为只有部分组织发生转变，部分铁素体来不及转变，故称为部分相变区。冷却后晶粒大小不匀，机械性能较差。

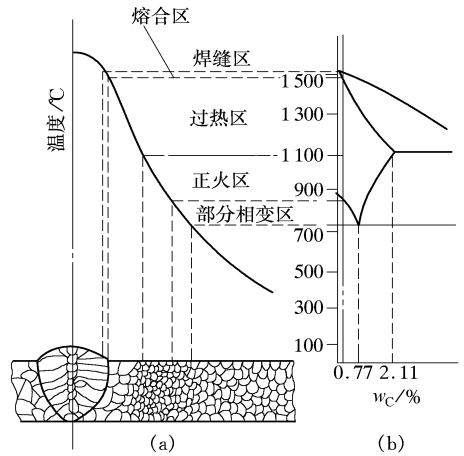


图 9.1.3 低碳钢焊接接头的组织变化

综上所述，熔合区和过热区是焊接接头中的薄弱部分，对焊接质量有严重影响，应尽可能减小。影响焊接接头组织和性能的因素有焊接材料、焊接方法和焊接工艺。其中焊接工艺主要参数如焊接电流、电弧电压、焊接速度等是影响焊接接头热影响区的大小和焊接接头的组织与性能的主要因素。

熔化焊过程中总会产生一定尺寸的热影响区。一般地，低碳钢的焊接结构用手工电弧焊或埋弧自动焊时，热影响区尺寸较小，对焊接产品质量影响较小，焊后可不进行处理；对于合金钢焊接结构或用电渣焊焊接的结构，热影响区尺寸较大，焊后必须进行处理，通常是正火，细化晶粒，均匀组织，改善焊接接头的质量；对于焊后不能进行热处理的结构，只能通过正

确选择焊接方法，合理制定焊接工艺来减小焊接热影响区，以保证焊接质量。

9.2 常用焊接方法

9.2.1 焊条电弧焊

焊条电弧焊简称手弧焊。它是利用焊条与焊件之间产生的电弧热，将焊件和焊条熔化，冷却凝固后获得牢固的焊接接头的一种手工焊接方法。

1. 焊接过程

手弧焊的焊接过程如图 9.2.1 所示。将工件和焊钳分别接到电焊机的两个电极上，并用焊钳夹持焊条。焊接时，先将焊条与工件瞬时接触，然后将焊条提到一定的距离是在焊条端部与工件之间便产生了明亮的电弧。电弧热将工件接头处和焊条熔化形成熔池。随着焊条的向前移动，新的熔池不断产生，旧熔池不断冷却凝固，从而形成连续的焊缝，使工件牢固地连接在一起。

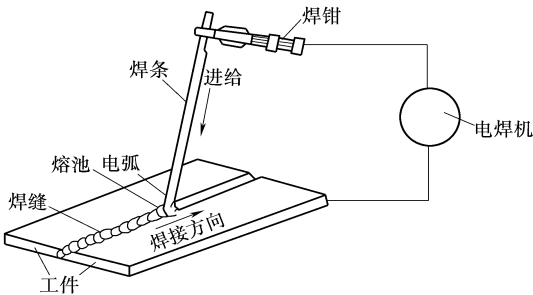


图 9.2.1 焊条电弧焊

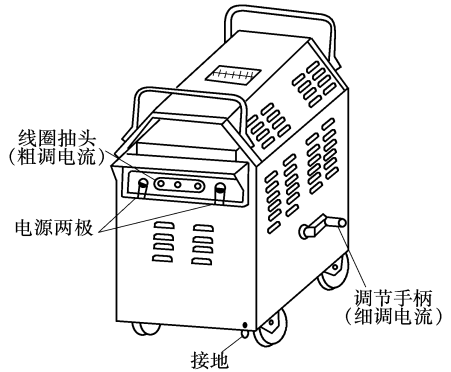


图 9.2.2 弧焊变压器

2. 电焊机

焊条电弧焊的主要设备是电焊机，它实际上是一种弧焊电源。按产生电流的种类不同，这种电源可分为弧焊变压器

380 V 的电源电压降到 60 ~ 80 V

动下降到电弧正常工作时所需的工作电压 20 ~ 30 V。输出电流是从几十安培到几百安培的交流电，可根据焊接的需要调节电流的大小。电流的调节分为粗调和细调。粗调是通过改变输出抽头的接法来实现的，调节范围大；细调是旋转调节手柄，将电流调节到所需要的数值。弧焊变压器结构简单，价格便宜，工作噪音小，使用可靠，维修方便，应用很广。缺点是焊接电弧不够稳定。

通过整流器把交流电转变为直流电，既弥补了交流电焊机电弧稳定性不好的缺点，又比一般直

流电焊机结构简单，维修容易，噪音小。

用直流电焊机焊接时，由于正极和负极上的热量不同，所以有正接和反接两种接线方法，如图 9.2.3 所示。把焊件接正极，焊条接负极，称为正接法；反之，称为反接法。焊接厚板时一般采用直流正接，这时电弧中的热量大部分集中在焊件上，有利于加快焊件熔化，保证足够的熔深。焊接薄板时，为防止烧穿，常采用反接。但在使用碱性焊条时，均采用直流反接。

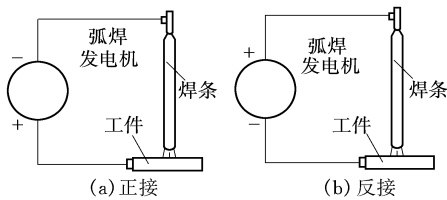


图 9.2.3 直流电焊机的接线法

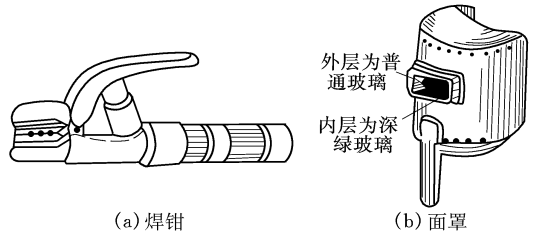


图 9.2.4 焊钳和面罩

弧光灼伤，其结构如图 9.2.4 所示。

3. 电焊条

焊条电弧焊使用的焊条由焊芯和药皮组成，如图 9.2.5 所示。

焊芯是焊接专用的金属丝，是组成焊缝金属的主要材料。焊接时焊芯的作用有二：一是导电，产生电弧；二是熔化后作为填充金属，与熔化的母材一起形成焊缝。为了保证焊缝质量，对焊芯金属的化学成分有较严格的要求。因此，焊芯都是专门冶炼的，碳、硅含量较



图 9.2.5 电焊条

低，硫、磷含量极少。我国目前常用的碳素结构钢焊芯牌号有 H08、H08A、H08MnA。焊条的直径是用焊芯的直径来表示的，常用的直径为 3.2~6 mm，长度 350~450 mm。

焊条药皮由矿石粉和铁合金粉等原料按一定比例配制而成。药皮的主要作用是保证焊接电弧的稳定燃烧，防止空气进入焊接熔池，添加合金元素，保证焊缝具有良好的力学性能。

按用途的不同，电焊条有结构钢焊条、不锈钢焊条、铸铁焊条等，其中结构钢焊条应用最广。我国生产的结构钢焊条主要用于焊接低碳钢和低合金结构钢，其牌号是汉字拼音字首加上三位数字表示的。例如 J422

的抗拉强度不低于 420 MPa，第三位数字表示药皮类型为钛钙型，适用交直流电源。国家标准 GB 5117—85 中规定了碳素钢焊条的型号，用“E”加四位数字表示，即 E××××。“E”表示焊条，前两位数字表示焊缝金属的最低抗拉强度值，第三位数字表示焊接位置，第三、四位数字组合表示焊接电流种类和药皮类型。如 E4315，“43”表示焊缝金属的 σ_b 420 MPa；“1”表示适用于立、平、横、仰位置焊接；“15”表示焊条药皮为低氢钠型，电流类型为直流反接。

根据焊条药皮性质的不同，结构钢焊条可以分为酸性焊条和碱性焊条两大类。药皮中含有大量酸性氧化物（ SiO_2 等）

$J \times 5$ 。药皮中含有多量碱性氧化物的焊条称为碱性焊条，如 $J \times 6$ 、 $J \times 7$ 。酸性焊条能交直流两用，焊接工艺性能较好，但焊缝的力学性能，特别是冲击韧度较差，适用于一般低碳钢和强度较低的低合金结构钢的焊接，是应用最广的焊条。碱性焊条脱硫、脱磷能力强，药皮有去氢作用。焊接接头中含氢量很低，故又称低氢型焊条。碱性焊条的焊缝具有良好的抗裂性和力学性能，但工艺性能较差，一般用直流电源，主要用于重要结构

4. 焊接工艺

根据 GB/T 3375—1994 规定，焊接碳钢和低合金钢的基本接头型式有对接、搭接、角接和 T 形接四种。接头型式的选择是根据结构的形状，强度要求，工件厚度，焊接材料消耗量及其它焊接工艺而决定的。

根据 GB 985—88 规定手工电弧焊常采用的基本坡口型式有 I 形坡口、V 形坡口、X 形坡口、U 形坡口等四种，如图 9.2.6、图 9.2.7、图 9.2.8 所示。

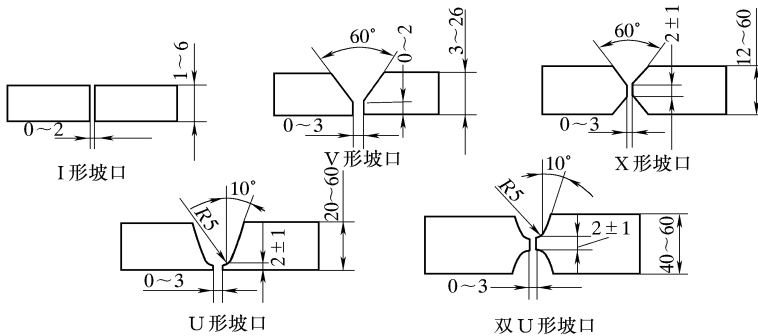


图 9.2.6 对接接头坡口型式

坡口型式的选择主要根据板厚，目的是为了保证焊透，又能提高生产率和降低成本。在板厚相等的情况下，X 形坡口比 V 形坡口需要的填充金属少。因此，X 形坡口焊接所消耗的焊条少，所需焊接工时也少，并且焊后角变形小。当然，X 形坡口需要双面焊。U 形坡口根部较宽，允许焊条深入与运条，容易焊透。同时，比 V 形坡口省焊条，省工时，焊接变形也较小。但因 U 形坡口形状复杂，需用切削加工准备坡口，成本较高，一般只在重要的受动载的厚板焊接结构中采用。

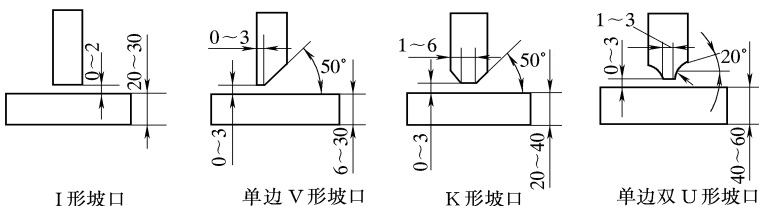


图 9.2.7 T 形接头坡口型式

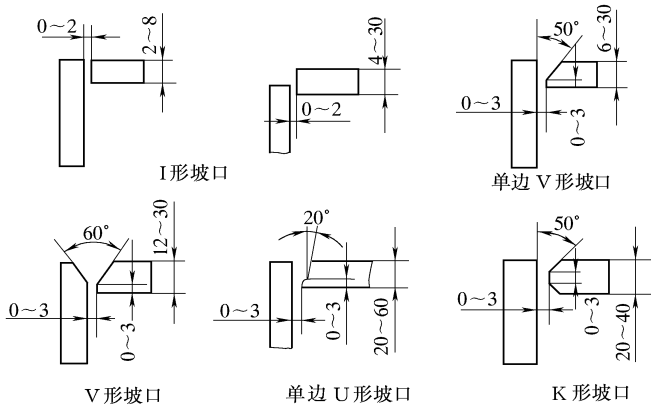


图 9.2.8 角接头坡口型式

一般来说,要求焊透的受力焊缝,在焊接工艺可行的情况下,能双面焊的都采用双面焊。这样,容易保证焊接质量,容易全部焊透,焊接变形也小。坡口的加工方法主要有气割、切削加工

按焊缝在空间位置的不同,可分为平焊、立焊、横焊和仰焊四种,如图 9.2.9 所示。平焊操作方便,易于保证焊缝质量,应尽可能采用。立焊、横焊和仰焊由于熔池中液体金属有滴落趋势而造成施焊的困难,应尽量避免。若确需采用这些焊接位置时,则应选用小直径的焊条,较小的电流、短弧操作等工艺措施。

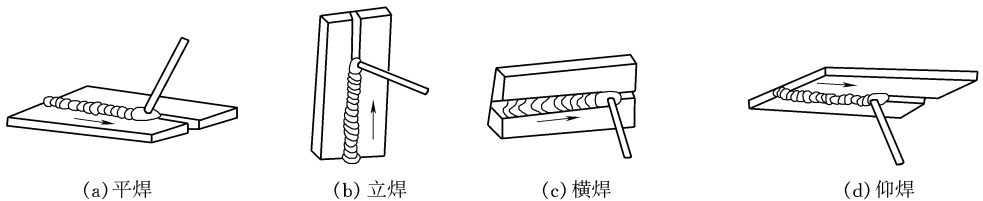


图 9.2.9 焊缝的空间位置

为了保证焊接质量和提高生产率,必须正确选择焊接参数。焊条电弧焊的焊接参数包括选择焊条直径、焊接电流及焊接速度等。

焊条直径主要根据焊件厚度来选择。焊接厚板时应选较粗的焊条。平焊低碳钢时,焊条直径可按表 9.2.1 选取。

表 9.2.1 焊条直径的选择

焊件厚度/mm	2	3	4~5	6~12	> 12
焊条直径/mm	2	3.2	3.2~4	4~5	5~6

焊接电流主要根据焊条直径选取。焊接电流是影响焊接接头质量和生产率的主要因素。电流过大，金属熔化快，熔深大，金属飞溅大，同时易产生烧穿、咬边等缺陷；电流过小，易产生未焊透、夹渣等缺陷，而且生产率低。

焊接速度是指焊条沿焊缝长度方向移动的速度，它对焊接质量影响很大。焊速过快，易产生焊缝的熔深浅、焊缝宽度小及未焊透等缺陷；焊速过慢，焊缝熔深、焊缝宽度增加，特别是薄件易烧穿。手弧焊的焊接速度由焊工凭经验掌握，一般在保证焊透且焊缝成形良好的前提下，应尽可能快速施焊。

5. 操作技术

形成短路，然后迅速将焊条向上提起 2~4 mm 的距离，电弧即引燃。引弧方法有敲击法和划擦法两种，如图 9.2.10 所示。

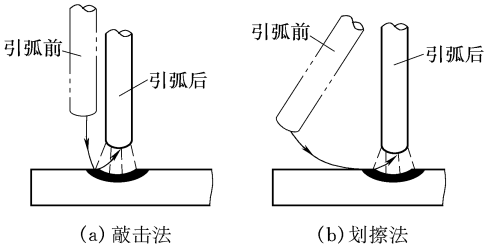


图 9.2.10 引弧方法

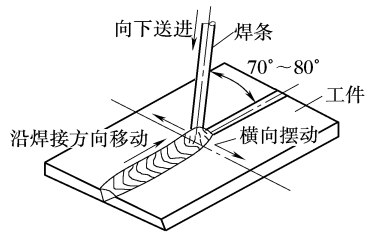


图 9.2.11 焊条的运动

运动，如图 9.2.11 所示。焊条向下均匀地送进，以保证弧长不变；焊条沿焊接方向逐渐向前移动；焊条作横向摆动，以获得适当的焊缝宽度。

法或反复断弧收尾法或回焊收尾法自下而上慢慢地拉断电弧，以保证焊缝尾部成形良好。

9.2.2 气焊与气割

1. 气焊

气焊是利用气体火焰来熔化母材和填充金属的一种焊接方法。最常用的是氧-乙炔焰，乙炔 (C_2H_2)

气为助燃气体。乙炔和氧气在焊炬中混合均匀后从焊嘴喷出燃烧，将焊件和焊丝熔化形成熔池，冷却凝固后形成焊缝，如图 9.2.12 所示。气焊时气体燃烧，产生大量 CO_2 、 CO 、 H_2 气体笼罩熔池，起到保护作用。气焊使用不带药皮的光焊丝作填充金属。

气焊设备简单、操作灵活方便、不需电源。但气焊火焰温度较低

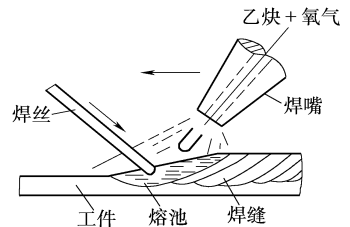


图 9.2.12 气焊示意图

件变形大，所以应用不如电弧焊广泛。主要用于焊接厚度在 3 mm 以下的薄钢板，铜、铝等有色金属及其合金，低熔点材料以及铸铁焊补等。

气焊所用的设备及管路系统连接如图 9.2.13 所示。

a. 氧气瓶 氧气瓶是运输和贮存高压氧气的钢瓶。它的容积为 40 L，贮氧最大压力为 14.7 MPa，外表漆成天蓝色，并用黑漆写上“氧气”字样。

b. 乙炔瓶 乙炔瓶是贮存溶解乙炔的钢瓶，如图 9.2.14 所示。瓶内装有浸满丙酮的多孔填充物，丙酮对乙炔有良好的溶解能力，可使乙炔稳定而安全地贮存在瓶中。在乙炔瓶阀下面的填料中心部分放着石棉，作用是帮助乙炔从多孔填料中分解出来。乙炔瓶限压 15.2 MPa，容积为 40 L。乙炔瓶涂成白色，并用红漆写上“乙炔”字样。

c. 减压器 减压器是将高压气体降为低压气体，并保持焊接过程中压力基本稳定的调节装置，如图 9.2.15 所示。减压器使用时先缓慢打开氧气瓶或乙炔瓶的阀门，然后旋转减压器调压手柄，待压力达到所需要时为止，停止工作时，先松开调压螺钉，再关闭氧气瓶或乙炔瓶的阀门。

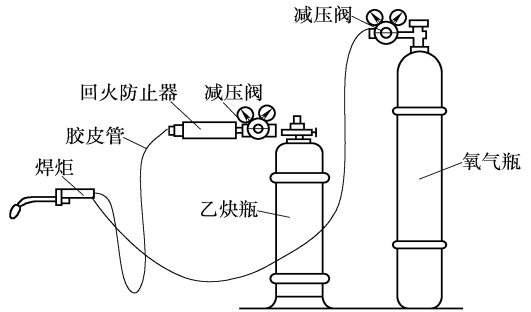


图 9.2.13 气焊设备及其连接

d. 回火保险器 回火保险器是装在燃烧气体系统上的防止向燃气管路或气源回烧的保险装置。

e. 焊炬 焊炬是使乙炔和氧气按一定比例混合并获得气焊火焰的工具，如图 9.2.16 所示。

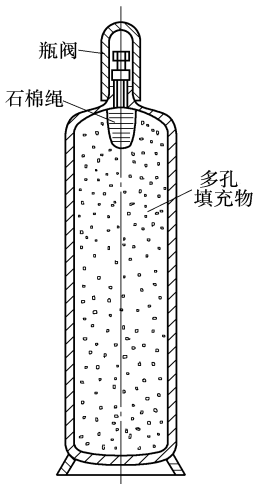


图 9.2.14 乙炔瓶

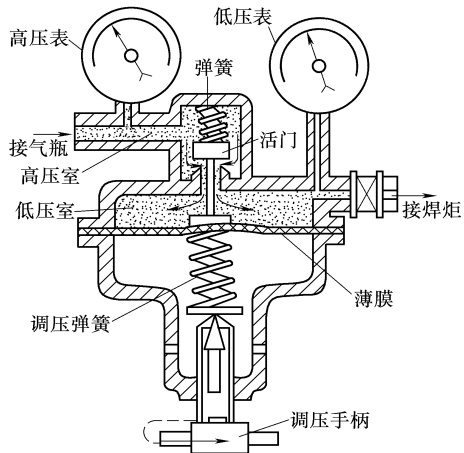


图 9.2.15 减压器

d. 回火保险器 回火保险器是装在燃烧气体系统上的防止向燃气管路或气源回烧的保险装置。

e. 焊炬 焊炬是使乙炔和氧气按一定比例混合并获得气焊火焰的工具，如图 9.2.16 所示。

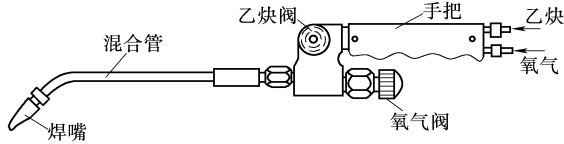


图 9.2.16 焊炬

工作时，先开氧气阀，然后开乙炔阀，两种气体在混合管内均匀混合，从焊嘴喷出点火燃烧。一般焊炬备有 3~5 个大小不同的焊嘴，以便焊接不同厚度的焊件。

气焊时通过调节氧气阀和乙炔阀，可以改变氧气和乙炔的混合比例，从而得到三种不同的气焊火焰：中性焰、碳化焰和氧化焰，如图 9.2.17 所示。

a. 中性焰 氧气和乙炔的混合比为 1~1.2 时燃烧所形成的火焰称为中性焰，又称正常焰。它由焰心、内焰和外焰三部分组成。内焰温度最高，可达 3 000~3 200℃，焊接时应使熔池和焊丝末端处于此最高温度区。中性焰适合焊接碳钢和有色金属，是应用最广的火焰。

b. 碳化焰 氧气和乙炔的混合比小于 1.0 时燃烧所形成的火焰称为碳化焰。碳化焰的火焰比中性焰长，最高温度为 2 700~3 000℃。由于氧气较少，燃烧不完全，火焰中含有游离碳，具有较强的还原作用和一定的渗碳作用。适用于焊接高碳钢、铸铁和硬质合金等。

c. 氧化焰 氧气和乙炔的混合比大于 1.2 时燃烧所形成的火焰称为氧化焰。氧化焰火焰较短，最高温度可达 3 100~3 300℃。由于火焰中有过量的氧，故对熔池有氧化作用，一般很少使用，仅用于焊接黄铜和锡青铜，生成一层氧化物膜覆盖在熔池上，以防止锌、锡在高温下蒸发。

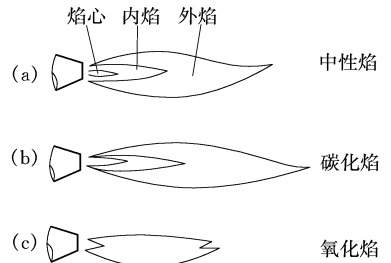


图 9.2.17 气焊火焰

a. 焊丝 在焊接时，气焊的焊丝作为填充金属，与熔化的母材一起形成焊缝，因此，焊丝质量对焊件性能有很大的影响。焊接时常根据焊件材料选择相应的焊丝。

b. 焊剂 焊剂的作用是保护熔池金属，去除焊接过程中形成的氧化物，增加液态金属的流动性。焊接低碳钢时，由于中性焰本身具有相当的保护作用，可不用焊剂。我国气焊焊剂的主要牌号有 CJ101

金) 3BO_3) $2\text{B}_4\text{O}_7$)
 2CO_3)

a. 点火、调节火焰及灭火 点火时，先微开氧气阀门，再开乙炔阀门，用明火点燃火焰。这时火焰为碳化焰，然后逐渐开大氧气阀门调节到所需火焰状态。在点火过程中，若有放炮声或火焰熄灭，应立即减少氧气或放掉不纯的乙炔，再点火。灭火时，应先关乙炔阀门后关氧气

阀门，以免发生回火并减少烟尘。

b. 平焊焊接 平焊时，一般是右手握焊炬，左手捏焊丝，两手互相配合，沿焊缝向左或向右焊接，如图 9.2.18 所示。开始焊接时，为了尽快加热工件形成熔池，焊炬角应大些？达 $80^\circ \sim 90^\circ$)

尾部焊坑，避免烧穿，倾角应当减少

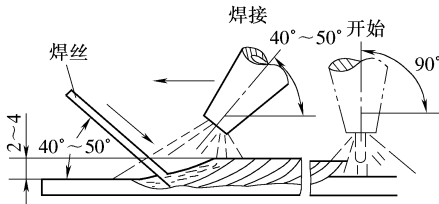


图 9.2.18 焊炬焊丝倾角

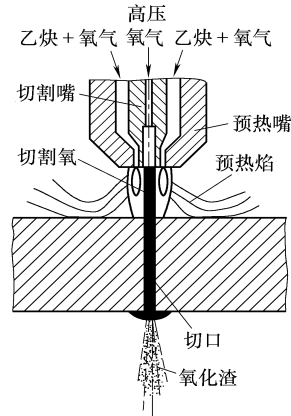


图 9.2.19 气割

2. 气割

气割是利用高温的金属在纯氧中燃烧而将工件分离的加工方法。气割时，先用氧 - 乙炔焰将金属加热到燃点，然后打开切割氧阀门，使高温金属燃烧，金属燃烧所生成的氧化物熔渣被高压氧吹走，形成切口，如图 9.2.19 所示。金属燃烧放出大量的热，又预热了待切割的金属。所以气割过程是预热 燃烧 吹渣形成切口不断重复进行的过程。

气割时用割炬代替焊炬，其余设备与气焊相同，气割用割炬如图 9.2.20 所示。割炬与焊炬相比，多了一个切割高压氧气管和一个切割氧阀门。割嘴的结构与焊嘴也不相同，周围一圈是预热用氧 - 乙炔混合气体出口，中间的通道为切割氧出口，两者互不相通。

金属材料中低、中碳钢和低合金钢易于气割，而高碳钢、铸铁、高合金钢以及铜铝等有色金属及其合金，均难以进行氧气切割。

气割设备简单，操作灵活方便，适应性强。广泛用于型钢下料和铸钢浇铸冒口的切除，有时可代替刨削加工，如厚钢板开坡口等。

焊接实训安全技术：

鞋或站在绝缘垫板上，防止触电；

属和熔渣等易造成烫伤，操作时穿长袖工作服，戴手套面罩和工作帽，特别避免弧光照射眼

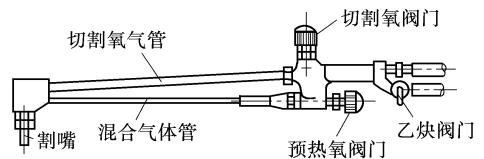


图 9.2.20 割炬

睛；

9.2.3 埋弧自动焊

为了提高焊接质量和生产率，改善劳动条件，使焊接技术向机械化、自动化方向发展，便出现了埋弧自动焊。将手工电弧焊的引弧、焊条送进、电弧移动几个动作由机械自动来完成，称为自动焊。如果部分动作由机械完成，其它动作仍由焊工辅助完成，则称为半自动焊。

1. 埋弧自动焊的焊接过程

埋弧自动焊也称熔剂层下自动焊。它因电弧埋在熔剂下，看不见弧光而得名。埋弧自动焊由焊接电源、焊车和控制箱三部分组成。常用焊机型号有 MZ - 1000 和 MZ1 - 1000 两种。“MZ”表示埋弧焊机，“1000”表示额定电流为 1 000 A。焊接电源可以配交流弧焊电源和整流弧焊电源。

焊接时，自动焊机头将焊丝自动送入电弧区自动引弧并保证一定的弧长，电弧焊在颗粒状熔剂

动均匀向前移动，或焊机头不动，工件匀速运动，熔池金属被电弧气体排挤向后堆积形成焊缝。电弧周围的颗粒状熔剂被熔化成熔渣，部分焊剂被蒸发，生成的气体将电弧周围的气体排开，形成一个封闭的熔渣泡。它有一定的粘度，能承受一定的压力，因此使熔化金属与空气隔离，并防止熔化金属飞溅，既可减少热能损失，又能防止弧光四射。未熔化的焊剂可以回收重新使用。埋弧自动焊焊接过程纵断面如图 9.2.21 所示。

2. 焊接材料

埋弧自动焊焊接材料有焊丝和焊剂。焊丝除了作电极和填充材料外，还可以起到渗合金、脱氧、去硫等冶金处理作用。焊剂的作用相当于焊条药皮。焊丝和焊剂要合理匹配，保证焊缝金属化学成分和性能。

3. 埋弧焊的特点和应用

埋弧自动焊与手工电弧焊相比，有以下特点：

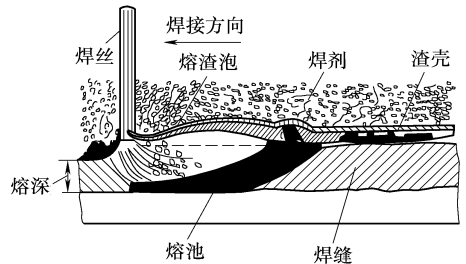


图 9.2.21 埋弧自动焊的纵截面图

高 6~8 倍，不需更换焊条，没有飞溅，生产率比手弧焊高 5~10 倍。同时，由于埋弧焊熔深大，可以不开或少开坡口，节省坡口加工工时，节省焊接材料，焊丝利用率高，焊剂用量少，降低了焊接成本。

艺参数稳定，对操作者技术要求低，焊缝成形美观。

则焊缝。

根据埋弧焊上述特点，适用于成批生产中长直焊缝和较大直径环缝的平焊。对于狭窄位置的焊缝以及薄板焊接，则受到一定限制。因此，埋弧焊被广泛用于大型容器和钢结构焊接生产中。

9.2.4 气体保护焊

1. 氩弧焊

氩弧焊是氩气保护焊的简称。氩气是惰性气体，在高温下不和金属起化学反应，也不溶于金属，可以保护电弧区的熔池、焊缝和电极不受空气的有害作用，是一种较理想的保护气体。

氩弧焊分钨极

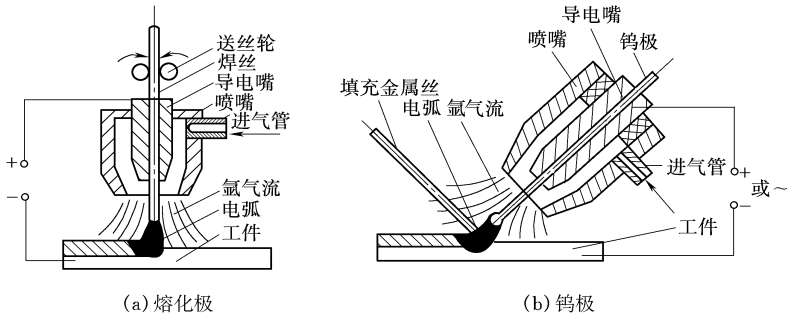


图9.2.22 氩弧焊示意图

钨极氩弧焊焊接时，电极不熔化，只起导电和产生电弧作用。填充金属有的可采用与母材相同的金属，有的需要加一些合金元素，进行冶金处理，以防止气孔等缺陷。

熔化极氩弧焊以连续送进的焊丝作为电极，与埋弧自动焊相似，可用来焊接25 mm以下的工件。

氩弧焊的特点：

机器人，一般采用氩氩弧焊或 CO_2 保护焊。

氩弧焊适用于焊接易氧化的有色金属和合金钢，如铝、钛和不锈钢等。

2. CO_2 气体保护焊

CO_2 气体保护焊是以 CO_2 作为保护气体，以焊丝作电极，以自动或半自动方式进行焊接。目前常用的是半自动焊，即焊丝送进靠机械自动进行并保持弧长，由操作人员手持焊炬进行焊接。 CO_2 气体在电弧高温下能分解，有氧化性，会烧损合金元素。因此，不能用来焊接有色金

属和合金钢。焊接低碳钢和普通低合金钢时，通过含有合金元素的焊丝来脱氧和渗合金。

CO₂ 气体保护焊的特点：

2 气体比较便宜，焊接成本仅是埋弧自动焊和手弧焊的 40% 左右。

有熔渣，不需清渣，比手弧焊提高生产率 1~3 倍。

2 保护焊电弧是明弧，可清楚看到焊接过程。像手弧焊一样灵活，适合全位置焊接。

2 保护焊焊缝含氢量低，采用合金钢焊丝，易于保证焊缝性能。电弧在气流压缩下燃烧，热量集中，热影响区较小，变形和开裂倾向也小。

因此，CO₂ 保护焊适用于低碳钢和强度级别不高的普通低合金钢焊接，主要焊接薄板。单件小批生产和不规则焊缝采用半自动 CO₂ 气体保护焊；大批生产和长直焊缝可用 CO₂ 混合气体保护焊。

9.2.5 电渣焊

电渣焊是利用电流通过液态熔渣产生的电阻热加热熔化母材与电极法。图 9.2.23 是丝极电渣焊过程示意图。

电渣焊一般都是在垂直立焊位置焊接，两工件相距 25~35 mm。引燃电弧熔化焊剂和工件，形成渣池和熔池，待渣池有一定深度时，增加送丝速度，使焊丝插入渣池，电弧便熄灭，转入电渣过程。这时，电流通过熔渣产生电阻热，将工件和电极熔化，形成金属熔池沉在渣池下面。渣池既作为焊接热源，又起机械保护作用。随着熔池和渣池上升，远离渣池的熔池金属便冷却形成焊缝。电渣焊可使很厚的焊件一次焊成，焊接速度慢，过热区大，接头组织粗大，因此，焊后要正火处理。

电渣焊的特点：

的铸造或锻造整体结构，改变了重型机器制造工艺过程，节省了大量的金属材料 and 设备投资。同时，40 mm 以上厚度的工件可不开坡口，节省了加工工时和焊接材料。

杂物和气体容易排出。

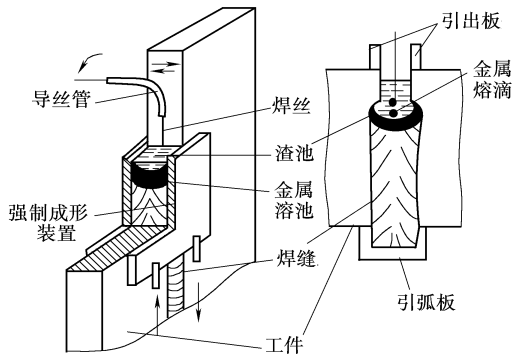


图 9.2.23 丝极电渣焊过程示意图

9.2.6 电阻焊

电阻焊是利用电流通过接触处及焊件产生的电阻热，将焊件加热到塑性或局部熔化状态，再施加压力形成焊接接头的焊接方法。

电阻焊生产率高，焊接变形小，劳动条件好，操作方便，易于实现自动化。所以适合于大批量生产，在自动化生产线上投资大，耗电量大。接头形式和工件厚度受到一定限制。

电阻焊通常分点焊、缝焊、对焊三种，如图 9.2.24 所示。

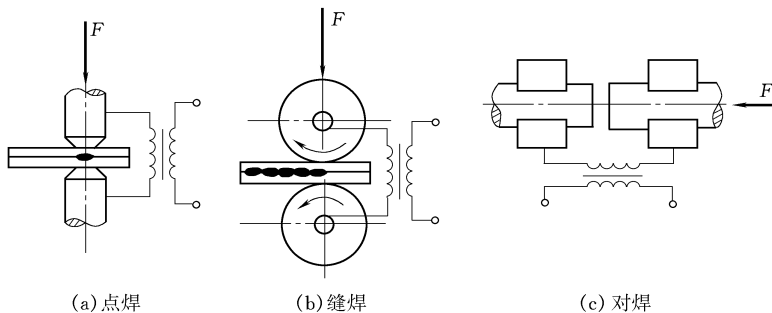


图 9.2.24 电阻焊种类

1. 点焊

点焊是利用柱状电极通电加压在搭接的两焊件间产生电阻热，使焊件局部熔化，将接触面焊成一个焊点的焊接方法。点焊主要用于厚度在 4 mm 以下薄板冲压壳体结构及钢筋焊接，尤其是汽车和飞机制造中大量应用。

2. 缝焊

缝焊过程与点焊相似，都属于搭接电阻焊。缝焊采用滚盘作电极，边焊边滚，相邻两个焊点部分重叠，形成一条密封性的焊缝。一般适合于焊接 3 mm 以下的薄板结构，如油箱、烟道焊接等。

3. 对焊

对焊是对接电阻焊。按焊接工艺不同，分为电阻对焊和闪光对焊。

电阻对焊是将两个工件装夹在对焊机电极钳口内，先加预压使两焊件端面压紧，再通电加热，使被焊处达到塑性温度状态后，再断电加压顶锻，使高温端面产生一定塑性变形而焊合。电阻对焊操作简单，接头比较光滑，但对焊件端面加工和清理要求较高，否则端面加热不均匀，容易产生氧化物夹杂，质量不易保证。因此，电阻对焊一般仅用于断面简单、直径长)

闪光对焊是两焊件不接触，先加电压，再移动焊件使之接触，由于工件表面不平，接触点

少，其电流密度很大，接触点金属迅速达到熔化、蒸发、爆破，有火花从接触处喷射出来，形成“闪光”；经多次闪光加热后，端面达到均匀半熔化状态，同时多次闪光将端面氧化物清理干净，此时断电并迅速对焊件加压顶锻，形成焊接接头。闪光对焊对端面加工要求较低，而且经闪光焊之后端面被清理，因此接头夹渣少，质量较高，常用于焊接重要零件。可以焊接相同的金属材料，也可以焊接异种金属材料。被焊工件可以是直径小到 0.01 mm 的金属丝，也可以是截面积达 20 000 mm² 的金属型材或钢坯。

对焊用于杆状零件对接，如刀具、管子、钢筋、钢轨、车圈、链条等。不论那种对焊，焊接断面要求尽量相同，圆棒直径、方钢边长、管子壁厚之差不应超过 15%。

9.2.7 钎焊

钎焊是利用熔点比母材低的金属作钎料，加热将钎料熔化，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙，并与母材相互扩散实现连接的焊接方法。

钎焊接头的质量在很大程度上取决于钎料。钎料应具有合适的熔点和良好的润湿性。母材接触面要求很干净，焊接时使用钎焊钎剂除氧化膜和油污等杂质，保护接触面，并改善钎料润湿性和毛细流动性。钎焊按钎料熔点分为软钎焊和硬钎焊两大类。

1. 软钎焊

钎料熔点在 450 ℃ 以下的钎焊叫软钎焊。常用钎剂是松香、氯化锌溶液等。软钎焊强度低，工作温度低，主要用于电子线路的焊接。由于钎料常用锡铅合金，故通称锡焊。

2. 硬钎焊

钎料熔点在 450 ℃ 以上，接头强度较高，都在 200 MPa 以上。常用钎料有铜基、银基和镍基钎料等。常用钎剂有硼砂、硼酸、氯化物、氟化物等组成。硬钎焊主要用于受力较大的钢铁和铜合金构件以及刀具的焊接。

钎焊焊接变形小，焊件尺寸精确，生产率高。主要用于精密仪表、电气零部件、异种金属构件、复杂薄板结构及硬质合金刀具的焊接。

9.3 常用金属材料的焊接

9.3.1 金属焊接性

1. 焊接性概念

金属焊接性是指金属在一定的焊接方法、焊接材料、工艺参数及结构型式条件下，获得优质焊接接头的难易程度。它包括两个方面内容：一是工艺性能，即在一定工艺条件下，焊接接头产生工艺缺陷的倾向，尤其是出现裂纹的可能性；二是使用性能，即焊接接头在使用中的可靠性，包括机械性能及耐热、耐蚀等特殊性能。

金属焊接性是金属的一种加工性能。它决定于金属材料的本身性质和加工条件。就目前的焊接技术水平，工业上应用的绝大多数金属材料都是可以焊接的，只是焊接的难易程度不同而已。随着焊接技术的发展，金属的焊接性也在改变。例如，铝在气焊和手工电弧焊条件下，难

以达到较高的焊接质量；而氩弧焊出现以后，用来焊铝却能达到较高的技术要求；化学活泼性极强的钛的焊接也是如此。由于等离子弧、真空电子束、激光等新能源在焊接中的应用，使钨、钼等高熔点金属及其合金的焊接都已成为可能。

2. 金属焊接性的评定

金属焊接性的主要影响因素是化学成分。钢的化学成分不同，其焊接性也不同。钢中的碳和合金元素对钢的焊接性的影响程度是不同的。碳的影响最大，其它合金元素可以换算成碳的相当含量来估算它们对焊接性的影响。换算后的总和称为碳当量。经验证明，碳当量越大，焊接性越差。

9.3.2 钢铁材料的焊接

1. 低碳非合金钢的焊接

低碳钢没有淬硬倾向，冷裂倾向小，焊接性良好。除电渣焊外，焊前一般不需要预热，焊接时不需要采取特殊工艺措施，适合各种方法焊接。只有板厚大于 50 mm，在 0℃ 以下焊接时，需预热 100~150℃。在焊条电弧焊中，一般选用 E4303 结 427)

2. 中碳非合金钢的焊接

中碳钢淬硬倾向和冷裂纹倾向较大，焊缝金属热裂倾向较大。因此，焊前必须预热至 150~250℃。焊接中碳钢常用焊条电弧焊，选用 E5015 电流、开坡口、多层焊，尽量防止含碳量高的母材过多地熔入焊缝。焊后应缓慢冷却，防止冷裂纹的产生。厚件可考虑用电渣焊，提高生产效率，焊后进行相应的热处理。

3. 高碳非合金钢的焊接

高碳钢焊接性较差，其焊接只限于修补工作。

4. 低合金高强度结构钢的焊接

低合金高强度结构钢一般采用焊条电弧焊和埋弧自动焊。强度级别较低的可采用 CO₂ 气体保护焊；较厚件可考虑用电渣焊。Q345 压力容器等重要结构的首选材料。当板厚大于 30 mm 时，或环境温度较低时，焊前应预热，焊后进行消除应力处理。

5. 铸铁的焊补

铸铁含碳量高，且硫、磷杂质含量高，因此，焊接性差，容易出现白口组织、焊接裂纹、气孔等焊接缺陷。对铸铁缺陷进行焊接修补有很大的经济意义。

9.3.3 非铁金属材料的焊接

非铁金属材料焊接主要是铝及铝合金和铜及铜合金的焊接。这类合金的主要特点是极易氧化、易产生气孔、导热系数大，易产生焊接应力和变形，严重时导致开裂。适宜采用氩弧焊、气焊和钎焊等焊接方法进行焊接。氩弧焊是较为理想的焊接方法。用纯度高达 99.9% 的氩气作保护，不用熔剂，以氩气的阴极破碎作用去除氧化膜，焊接质量好，耐腐蚀性较强。一般厚度在 8 mm 以下采用钨极

9.4 焊接结构工艺性

焊接结构的设计，除考虑结构的使用性能要求外，还应考虑结构的工艺性能，以力求生产率高、成本低，满足经济性的要求。焊接结构工艺性一般包括焊接结构材料选择、焊缝布置和焊接接头设计等方面内容。

9.4.1 焊接结构材料的选择

随着焊接技术的发展，工业上常用的金属材料一般均可焊接。但材料的焊接性不同，焊后接头质量差别就很大。因此，应尽可能选择焊接性良好的焊接材料来制造焊接构件。特别是优先选用低碳非合金钢和低合金高强度钢焊接质量。重要焊接结构材料的选择，已在相应标准中作出规定，可查阅有关标准或手册。

9.4.2 焊缝布置

焊缝布置的一般工艺设计原则如下：

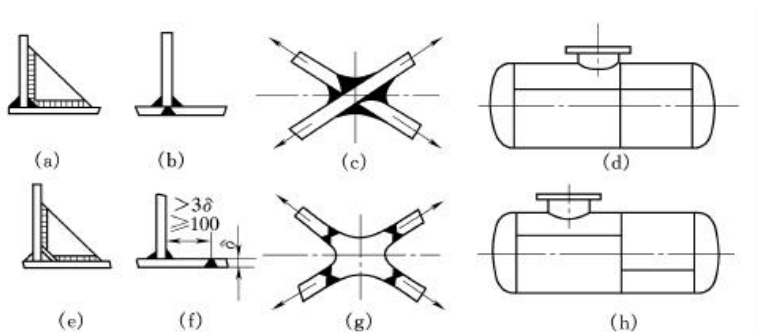


图 9.4.1 焊缝分散布置的设计

(a)

1. 焊缝布置应尽可能分散，避免过分集中和交叉

焊缝密集或交叉，会加大热影响区，使组织恶化，性能下降。如图 9.4.1 所示。

2. 焊缝应避免应力集中部位

焊接接头往往是焊接结构的薄弱环节，存在残余应力和焊接缺陷。因此，焊缝应避免应力较大部位，尤其是应力集中部位。

3. 焊缝布置应尽可能对称

焊缝对称布置可使焊接变形相互抵消。如图 9.4.2a、b 偏于截面重心一侧，焊后会产生较大的弯曲变形。图 9.4.2c、d、e 焊缝对称布置，焊后不会产生明显变形。

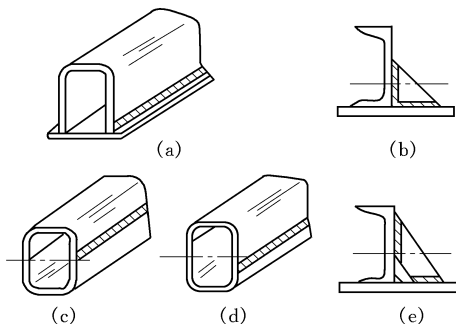


图 9.4.2 焊缝对称布置的设计

4. 焊缝布置应便于焊接操作

焊条电弧焊时，要考虑焊条能到达待焊部位。点焊和缝焊时，应考虑电极能方便进入待焊位置。如图 9.4.3 和图 9.4.4 所示。

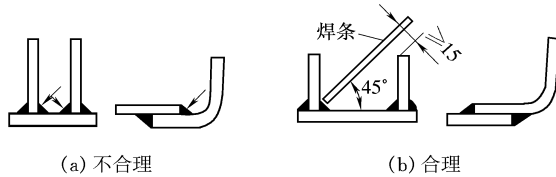


图 9.4.3 焊条电弧焊焊缝设置

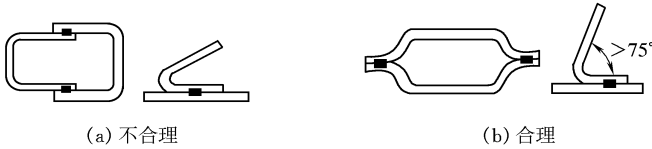


图 9.4.4 点焊或缝焊焊缝设置

5. 尽量减少焊缝长度和数量

减少焊缝长度和数量，可减少焊接加热，减少焊接应力和变形，同时减少焊接材料消耗，降低成本，提高生产率。图 9.4.5 是采用型材和冲压件减少焊缝的设计。

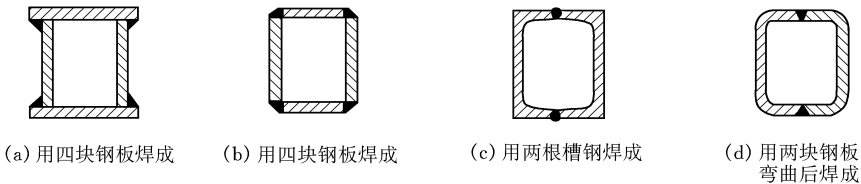


图 9.4.5 减少焊缝数量

6. 焊缝应尽量避免机械加工表面

有些焊接结构需要进行机械加工，为保证加工表面精度不受影响，焊缝应避开这些加工表面。

9.5 焊接质量与成本分析

9.5.1 焊接质量分析

焊接质量问题主要包括焊件的宏观变形与焊接接头可能出现的各种缺陷。

1. 焊接应力与变形

焊接时，焊接接头局部不均匀加热，冷却后产生应力和变形。焊接变形的基本形式有五

种，如图 9.5.1 所示。

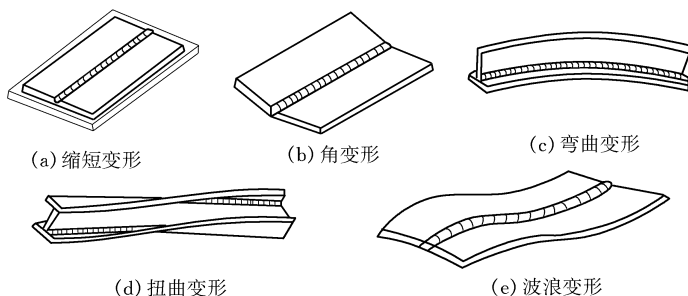


图 9.5.1 常见焊接变形的基本形式

预防焊接变形可采取以下工艺措施：

在相反方向位置上，如图 9.5.2 所示。或预先使焊接工件向相反方向变形，以抵消焊后所发生的变形。

根据经验在工件下料尺寸上加一定裕量，通常为 0.1% ~ 0.2%，以弥补焊后的收缩变形。

当焊件刚性较小时，可利用外加刚性固定以减少焊接变形。这种方法能有效地减少焊接变形，但会产生较大的焊接应力。

对称截面梁焊接次序如图 9.5.3 所示。

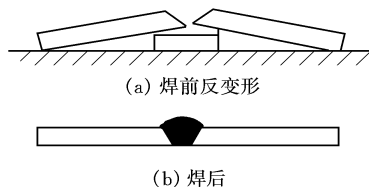


图 9.5.2 平板焊接的反变形

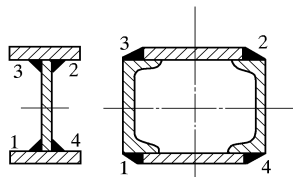


图 9.5.3 对称截面梁的焊接顺序

使焊缝处热量迅速散走，减少金属受热面，以减少焊接变形。

预热可以减少焊件各部分温差，降低焊后冷却速度，减少残余应力。焊后进行去应力退火或用锤子均匀迅速地敲击焊缝，使之得到延伸，均可有效地减少残余应力，从而减少焊接变形。

焊接变形产生后可采用机械力或局部加热的方法予以矫正。

2. 焊接接头缺陷

一个合格的焊接接头应当是无缺陷，力学性能合格，焊缝与母材的表面过渡平滑，弧坑饱

满。但是在实际生产中，有时会产生焊接缺陷。熔化焊常见的缺陷有以下几种：

未焊透是指焊接时接头根部未完全焊透的现象。未熔合指的是焊道与母材之间或焊层与焊层之间，存在未完全熔化结合的现象，如图 9.5.4a 所示。当焊接电流太小，焊接速度太快，坡口角度太小等时，都容易产生未焊透和未熔合缺陷。

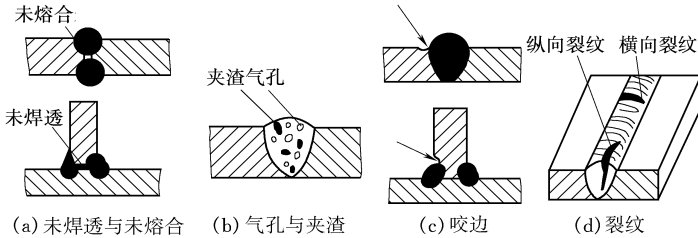


图 9.5.4 常见的焊接缺陷

焊接时，熔池中的气体在凝固时未能逸出而残留下来所形成的空穴，称为气孔。夹渣是指焊后残留在焊缝中的熔渣。焊件表面焊前清理不良，焊条药皮受潮、焊速太快、电流过小等，都是产生气孔和夹渣的原因，如图 9.5.4b 所示。

当焊接电流过大，焊接速度太快，运条方法不当时，焊缝两侧与母材交界处容易形成咬边。咬边减弱了母材的有效承载截面，并且在咬边处形成应力集中，如图 9.5.4c 所示。

焊接裂纹是较为常见且危害最大的缺陷，分为热裂纹和冷裂纹。热裂纹是冷却到固相线附近在高温时产生的裂纹。它的裂纹有氧化色泽，多发生在焊缝，有时也发生在紧临焊缝的热影响区。冷裂纹是焊接接头冷却到 200~300 以下的较低温度形成的裂纹。焊件含碳、硫、磷高，焊缝冷速快，焊接顺序不正确，焊缝过于集中，焊接应力过大等，都容易产生冷裂纹缺陷。

9.5.2 焊接质量检验过程

焊接检验过程贯穿于焊接生产的始终，包括焊前检验、焊接生产过程中的检验和焊后成品检验。焊前检验主要内容有原材料检验、技术文件、焊工资格考核等。焊接过程中的检验主要是检查各生产工序的焊接规范执行情况，以便发现问题及时补救，通常以自检为主。焊后成品检验是检验的关键环节，是焊接质量最后的评定。通常包括无损检验，如 X 光检验、超声波检验等；焊后成品强度试验，如水压试验，气压试验等；致密性检验，如煤油试验、吹气试验等。

焊接检验的主要目的是检查焊接缺陷。焊接缺陷包括外部缺陷（焊瘤、咬边、飞溅等）破坏性检验和非破坏性检验

相组织检验和焊接工艺评定。焊接质量检验重点采用非破坏性检验，主要方法比较见表 9.5.1 所列。

表 9.5.1 几种焊缝内部检验方法的比较

检验方法	能探出的缺陷	可检验的厚度	灵敏度	其它特点	质量判断
磁粉检验	表面及近表面的缺陷 (焊缝、未焊透、气孔等)	表面及近表面，深度不超过 6 mm	与磁场强度大小及磁粉质量有关	被检验表面最好与磁场正交，限于磁性材料	根据磁粉分布情况判定缺陷位置，但深度不能确定
着色检验	表面及近表面的有开口缺陷 (孔、夹渣、夹层等)	表面	与渗透剂性能有关，可检出 0.005 ~ 0.01 mm 的微裂纹，灵敏度高	表面应打磨到 Ra 为 12.5 μm ，环境温度在 15 以上可用于非磁性材料，适于各种位置单面检验	可根据显示剂上的红色条纹，形象地看出缺陷位置，大小
超声波检验	内部缺陷 (未焊透、气孔及夹渣)	焊件厚度的上限几乎不受限制。下限一般应大于 8 ~ 10 mm	能探出直径大于 1 mm 的气孔夹渣，探裂缝较灵敏，对表面及近表面的缺陷不灵敏	检验部位的表面应加工达 Ra 为 6.3 ~ 1.6 μm ，可以单面探测	根据荧光屏上的讯号，可当场判断有无缺陷、位置及其大致大小，但判断缺陷种类较难
X 射线检验	内部缺陷 (未焊透、气孔及夹渣等)	150 kV 的 X 光机可检厚度 25 mm；250 kV 的 X 光机可检厚度 60 mm	能检验出尺寸大于焊缝厚度的 1% ~ 2% 的各种缺陷	焊接接头表面不需加工，但正反两面都必须是可接近的	从底片上能直接形象地判断缺陷种类和分布。对平行于射线方向的平面形缺陷不如超声波检验灵敏
射线检验		镭能源可检 60 ~ 150 mm；钴 60 能源可检 60 ~ 150 mm；铯 137 能源可检 1.0 ~ 65 mm	较 X 射线低，一般约为焊缝厚的 3%		
高能射线检验		9 MV 电子直线加速器可检 60 ~ 300 mm；24 MV 电子感应加速器可检 60 ~ 600 mm	一般小于焊缝厚度的 3%		

9.5.3 焊接生产成本分析

焊接方法的选用应根据各种焊接方法的特点和焊接结构制造要求，综合考虑其质量、经济性和工艺可行性。常用焊接方法比较见表 9.5.2。选用时，应考虑以下几方面：

1. 接头质量和性能要符合结构要求

选择焊接方法要考虑金属的焊接性、焊接方法的特点和结构质量要求。例如，铝容器焊接，质量要求高的应用氩弧焊，质量要求不高的，可用气焊。焊接薄板壳体，变形要求小时，用 CO₂ 气体保护焊或电阻焊，而不用气焊。

2. 考虑经济性，生产率高、成本低

单件小批量生产、短焊缝选用手工焊。成批生产、长直缝选用自动焊。40 mm 以上厚板，采用电渣焊一次焊成，生产率高。

3. 工艺性

焊接方法选用要考虑有没有这种方法的设备和焊接材料，在室外或野外施工有没有电源等条件，焊接工艺能否实现。例如，不能用双面焊，而只能用单面焊又要焊透时，宜用钨极氩弧焊打底，易于保证焊接质量。

上述几方面在实际焊接生产中应综合考虑，统筹安排。

表 9.5.2 常用焊接方法比较

焊接方法	气 焊	焊条电弧焊	埋弧自动焊	氩弧焊	CO ₂ 气体保护焊	电渣焊	电阻焊	钎 焊
特 点	温度易控制，各种焊接位置均易单面焊透 质量较差 变形大 率低 电源，室外野外使用方便 较简单	与气焊相比： 质量好 变形小 率高 与埋弧自动焊相比： 简单 性强，可焊各种位置和短、曲焊缝	与手弧焊相比： 率高，成本低 稳定，成形美观 工操作技术要求低 条件好 性差，只适合平焊 较复杂	质量优良 流时，电弧也很稳定，容易控制背面成形 位置焊 贵，成本高	低，便宜) 率高 密度大) 板时变形小 位置焊 化性 较差，飞溅大 使用、维修不便	与电弧焊相比： 截面一次焊成，生产率高 组织粗大，焊后要正火	与熔焊相比： 率高 变形小 复杂；投资大 量大	与熔焊、压焊相比： 头强度低，工作温度低 形小，尺寸精确 产率高，易机械化 焊异种金属，还可焊异种材料 焊某些复杂的特殊结构，如蜂窝结构

续表

焊接方法	气 焊	焊条电弧焊	埋弧自动焊	氩弧焊	CO ₂ 气体保护焊	电渣焊	电阻焊	钎 焊
应用	1~3 mm 补焊 焊接 施工	小批生产 置焊 曲焊缝 >1 mm (一般 2 mm)	成批生产, 能焊长直缝和环缝, 中厚板平焊	钛合金, 不锈钢等合金钢 焊 焊接	金钢和强度级别不高的低合金结构钢 薄板, 也可焊中板 小批, 短曲焊缝用半自动 CO ₂ 保护焊; 成批生产, 长直缝和环缝用 CO ₂ 保护自动焊	板厚 > 40 mm	大量生产 异种金属 零件用对焊 薄板壳体用点焊, 气密薄壁容器用缝焊	子工业 器仪表及精密机械部件 种金属 杂的难焊的特殊结构

9.6 胶接成形

胶接成形技术在工程中的应用越来越广泛, 已与铆接、焊接并列为三种主要连接工艺。

9.6.1 胶接的特点与应用

1. 胶接的特点

a. 能连接同类或不同类的、软的或硬的, 脆性的或韧性的各种材料, 特别是异种材料连接, 如金属与玻璃、陶瓷、橡胶、织物、塑料之间的连接。

b. 应力分布均匀, 延长结构寿命。由于胶接使应力分布在被胶接物的整个接合面上, 结构受力均匀, 可以避免铆钉孔和焊点周围应力集中所引起的疲劳龟裂。胶接多层板结构能避免或延缓裂纹的扩展。

c. 减轻结构重量。用胶接可以得到刚性好、强度大、重量轻的结构, 例如一架重型轰炸机用胶接代替铆接, 重量可下降 34%。

d. 制造成本低。复杂的结构部件采用胶接可以一次完成, 简化设计结构、工模具, 不需

复杂的设备和装备，生产效率高，使生产成本大幅度降低。

e. 胶接件表面光滑，并防腐蚀。对于高速飞行的飞行器和曲面要求严格的雷达反射面等具有重要意义。

f. 胶接可以获得某些特殊性能如密封、防腐、导电、绝缘、导热、隔热、减振和其它性能。

a. 大多数胶接件在湿热、冷热交变、冲击或复杂环境下的工作寿命不够高。

b. 有机胶粘剂构成的胶接接头耐热性较差，老化是一个较大的问题。

c. 胶接件有较高的剪切强度，拉伸强度，但剥离强度很低。

d. 胶接质量目前尚无可靠的无损检测方法。

e. 使用有机胶粘剂尤其是溶剂型胶粘剂，存在易燃，有毒等安全问题。

2. 胶接的应用

近30年来，国内外胶粘剂和胶接技术发展十分惊人，合成胶粘剂的品种和产量急剧增加。在极薄材料、极硬材料、特种复合材料和夹层结构材料等连接加工中，胶接技术发挥了无法替代的作用。

航空工业使用胶粘剂最早，用于金属结构、金属与橡胶、塑料、蜂窝夹层结构与壁板的胶接，代替铆、螺钉连接、焊接，减轻结构重量。还用于座舱、油箱等处的密封，起到耐油、防水的作用。

在汽车工业上主要用于顶篷、壁板、挡板、衬垫等合成材料的胶接以及油水箱、气缸、门窗、管路螺栓的密封。

胶接在机械工业和电子工业上作用很大，从产品制造到设备维修都可以采用胶接技术。以胶接代替其它连接方法，以导电胶代替锡焊，各种管路密封，铸件浸渗修补，机件磨损修复，标牌粘贴，变压器电机线圈的绝缘固定，电器仪表的装配，工具、量具、模具、夹具的胶接，甚至大型设备机身裂纹修复。

胶接技术在兵器工业、石油化工、建筑、医疗、纺织服装、印刷、文化教育、生活日用品等各个领域得到广泛应用。管道、阀门和容器发生油、气和其它介质的跑、冒、滴、漏是化工、石油、煤气和发电等行业比较普遍存在的问题，近年推广的不停车带压粘堵修复技术较好地解决了这一难题，对确保生产的正常进行发挥了十分显著的作用。

9.6.2 胶接工艺

胶接工艺除接头设计外，主要包括表面处理、配胶、涂胶、晾置、叠合、固化、检查等，这些工艺环节的操作对胶接质量有显著影响。

1. 胶接材料的表面处理

由于胶接主要借助于胶粘剂对胶接材料表面的粘附作用，因此胶接材料的表面处理就可能成为决定胶接接头的强度和耐久性的主要因素。表面处理主要目的有两方面：一是净化表面，除去材料表面妨碍胶接的油污、锈迹、吸附物、灰尘和水分等；二是改变材料表面的物理化学性质，如获得活性的易于胶接的特殊表面或造成特定的粗糙度等。一般塑料、橡胶、玻璃等材料往往采用打磨

料在胶接前应进行更为严格的特殊表面活性处理。

2. 配胶

胶粘剂可有多种不同的状态，其中胶棒、胶条、胶膜、胶带等热熔胶和压敏胶及单液型液体胶可直接使用。

对于双组分或多组分的液态胶，使用前应按规定比例现用现配，根据运用期长短和需用量确定配胶量。配胶要充分搅拌。

3. 涂胶和晾置

胶粘剂按其形态不同可用机械设备或手工喷洒、涂刷、浸渍等涂布方法。涂胶量、涂胶遍数及涂刷操作手法对胶接强度有影响。被粘物双方表面要均匀涂布，全部胶接面要充分湿润。有的胶粘剂在涂胶后需要晾置一定时间，使溶剂部分挥发，达到一定稠度后适合；而502胶等晾置的目的是吸收微量水分，引发聚合，实现固化。

4. 叠合

涂胶后经过适当晾置，被胶接物表面要紧密粘合在一起。橡胶型胶粘剂叠合应一次对准位置，不可错动，用木锤敲打、压平、排除空气；而液体无溶剂胶粘剂叠合后最好来回错动几次，以增加接触，排除空气，调匀胶层。

5. 固化

固化即胶粘剂通过溶剂挥发、熔体冷却、乳液凝聚等物理作用或缩聚、加聚等化学反应，使其变为固态。固化的主要控制因素是温度、压力、时间。不同的胶粘剂，固化条件不同。温度是最重要的参数，适当提高温度，固化时间可以缩短；温度过低不能实现固化；温度过高，胶层变脆。固化常用的加热方法为电烘箱和红外线加热；采用高频、超声波、微波及射线辐射等方法，能加速固化；还有紫外光固化工艺，常用的加压方法有重锤、气囊、真空以及压力机等。

9.7 焊接与胶接新技术简介

随着焊接技术和工艺的迅速发展，很多新的焊接技术已成为普遍应用的焊接方法，如氩弧焊，脉冲焊接等。当前焊接新工艺发展有三个方面的：一是随着原子能，航空航天等技术的发展，新的焊接材料和结构出现，需要新的焊接工艺方法，如真空电子束焊，激光焊，真空扩散焊等；二是改进常用的普通焊接方法的工艺，使焊接质量和生产率大大提高，如脉冲氩弧焊，窄间隙焊，三丝埋弧焊等；三是采用电子计算机控制焊接过程和焊接机器人等。这里仅对部分新的焊接技术作简单介绍。

9.7.1 等离子弧焊接和切割

一般电弧焊所产生的电弧未受到外界约束，称之为自由电弧，电弧区内的气体尚未完全电离，能量也未高度集中。如果利用某种装置使自由电弧的弧柱受到压缩，弧柱中的气体就完全电离，便产生温度比自由电弧高得多的等离子电弧。等离子弧焊接分为大电流等离子弧焊和微束等离子弧焊两类。等离子弧焊除具有氩弧焊优点外，还有以下两方面特点：一是焊接9~12 mm厚度焊件可不开坡口。二是微束等离子弧焊可用以焊很薄的箔材。因此，它日益广泛地

应用于航空航天等尖端技术所用的铜合金、钛合金、合金钢、钼、钴等金属的焊接，如钛合金导弹壳体、波纹管及膜盒、微型继电器、飞机上的薄壁容器等。现在民用工业也开始采用等离子弧焊，如锅炉管子的焊接等。

等离子弧切割原理与氧气切割不同，它是利用能量密度高的高温高速等离子流，将切割金属局部熔化并随即吹去，形成整齐切口。它不仅比氧气切割效率高 1~3 倍，还能切割不锈钢、有色金属及其合金及难熔金属，也可用以切割花岗石、碳化硅、耐火砖、混凝土等非金属材料。

目前我国工业中已经采用水压压缩等离子切割。即在等离子弧喷嘴周围设置环状压缩喷水通路，对称射向等离子流。这种水压压缩等离子弧较一般等离子弧提高切口质量和切割速度，降低成本。并有效地防止切割时产生的金属蒸汽和粉尘等有毒烟尘，改善劳动条件。

9.7.2 真空电子束焊接

随着原子能和航空航天技术的发展，大量应用了锆、钛、钽、铌、钼、铍、镍及其合金。这些稀有的难熔、活性金属，用一般的焊接技术难以得到满意的效果。直到 1956 年真空电子束焊接技术研制成功，才为这些难熔的活性金属的焊接开辟了一条有效途径。

真空电子束焊是把工件放在真空

产生的电子束经聚焦和加速，撞击工件后动能转化为热能的一种熔化焊，如图 9.7.1 所示。

真空电子束焊的特点是：

护效果极佳，焊接质量好，特别适合于焊接化学活性性强、纯度高和极易被大气污染的金属，如铝、钛、不锈钢等。

厚度可达到 200~300 mm，铝合金厚度已超过 300 mm。

如齿轮组合件等。

程控制灵活，适应性强。

用与维护要求技术高。焊件尺寸受真空室限制。

目前，真空电子束焊在原子能、航空航天等尖端技术部门应用日益广泛，从微型电子线路组件、真空膜盒、钼箔蜂窝结构、原子能燃料元件、导弹外壳到核电站锅炉气包等都已采用电子束焊接。此外，熔点、导热性、溶解度相差很大的异种金属构件、真空中使用的器件和内部要求真空的密封器件等，用真空电子束焊也能得到良好的焊接接头。

9.7.3 激光焊接与切割

激光是利用原子受激辐射的原理，使工作物质受激而产生的一种单色性好、方向性强、强度很高的光束。聚焦后的激光束最高能量密度可达 10^{13} W/cm²，在千分之几秒甚至更短时间内，将光能转换成热能，温度可达 10 000 以上，可以用来焊接和切割。

激光焊接示意图如图 9.7.2 所示。焊接中应用的激光器，目前有固体和气体介质两种。固

10^{-4} Pa 以上)

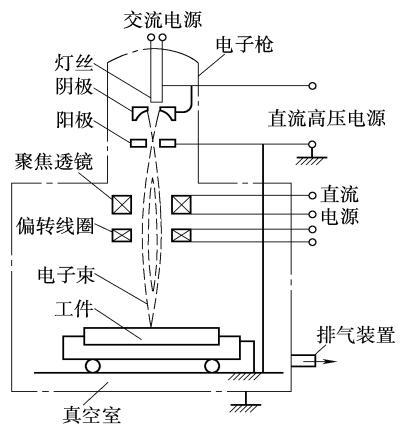


图 9.7.1 真空电子束焊接示意图

体激光器常用的激光材料有红宝石、钕玻璃和掺钕钇铝石榴石，气体激光器所用激光材料是二氧化碳。

激光焊解分脉冲激光焊接和连续激光焊接两大类。脉冲激光焊对电子工业和仪表工业微形件焊接特别适用，可以实现薄片

微米到几十微米)

封缝焊和异种金属、异种材料的焊接，如集成电路外引线和内引线的焊接，微波器件中速调管的钽片和钼片的焊接，零点几毫米不锈钢、铜、镍、钼等金属丝的对接、重叠、十字接、T字接，密封性微型继电器、石英晶体器件外壳和航空仪表零件的焊接等。

连续激光焊接主要使用大功率 CO_2 气体激光器，连续输出功率可达 90 kW，可以进行从薄板精密焊到 50 mm 厚板深穿入焊的各种焊接。

激光焊接的特点：

精密零件，热敏感性材料的加工。被焊材不易氧化，可以在大气中焊接，不需要气体保护或真空环境。

将其在任何方向上弯曲或聚焦，还可用光导纤维将其引到难以接近的部位进行焊接。激光还可以穿过透明材料进行聚焦，因此可以焊接一般方法难以接近的接头或无法安置的接焊点，如真空管中电极的焊接。

焊接在一起。

激光束能切割各种金属材料和非金属材料，如氧气切割难以切割的不锈钢、钛、铝、锆及其合金等金属材料，木材、纸、布、橡胶、塑料、岩石、混凝土等非金属材料。激光切割具有切割质量好，效率高，速度快，成本低等优点。

9.7.4 胶接新技术

在胶接新技术领域新近发展起来一些特种胶粘剂，主要有以下几种。

1. 光学胶粘剂

胶粘剂在光学行业中的应用极其广泛。光学胶粘剂用于光学仪器结构与光学零件的胶接，如金属与光学零件、塑料与光学零件、金属与金属、塑料与塑料零件之间的胶接等。光学胶粘剂对胶的折射率、透明度、膨胀系数、力学性能、耐高温和低温性、化学稳定性等均有很严格的要求。常见的光学胶粘剂有天然冷杉树脂胶粘剂、甲醇胶粘剂、光学环氧胶粘剂和光学光敏胶粘剂等。

2. 应变胶

应变测量技术是通过粘贴在试件上的电阻应变片将非电学的力学量转变成电信号，间接测

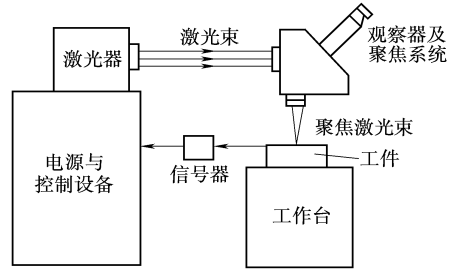


图 9.7.2 激光焊接示意图

得物体应变的一种测量技术。所谓应变胶是指制作应变片基底所用的胶粘剂
种应变片所用的胶粘剂

成橡胶类等十余类；另外，按使用温度分超低温、室温、中温、高温应变胶；按使用环境分水
下、地下、地面、真空、高空、高压、高能辐射等应变胶。

3. 导电胶

导电胶是一种固化或干燥后具有一定导电性的胶粘剂。它可以将各种导电材料连接在一
起，使被连接材料间形成导电回路。自1949年美国开发出一种商品名叫 Markita 的导电材料
后，导电胶在电子仪器设备上使用越来越广。随着电子设备零件的微型化，及使用一些难以焊
接的材料和不耐热的高分子材料，采用一般的焊接方法往往发生连接接头不牢、零件变形、性
能下降、零件破坏或不能焊接等一系列问题。在这种情况下，用导电胶连接便可有效避免上述
问题的发生。导电胶品种繁多，按用途分为一般型导电胶和特种导电胶；按固化工艺分为固化
反应型、热熔型、高温烧结型、溶剂型和压敏型导电胶；按导电粒子的种类分为银系、金系、
铜系和碳系导电胶。导电胶可用于大型集成电路、检波器、传感器、光敏元件等许多电气元件
和部件的同种或异种材料的导电连接。

4. 医用胶

在医疗领域里，从胶接医疗器械、包装材料到胶接人体组织，都广泛使用胶粘剂。理想的
医用胶对性能的要求是：在有水和组织液的条件下应能进行胶接；常温常压下能与组织快速胶
接；在固化的同时能与组织产生较好的结合强度；本身无菌且能抑菌，不显示毒性，不致突
变，不致畸胎，不致癌变；不妨碍生物体组织的自身愈合；可被组织吸收，不作为异物存在
在组织内；价格不能太昂贵。医用胶大致分两大类：一类是软组织医用胶，用于胶接皮肤、脏
器、神经、肌肉、血管、粘膜等。常用的有 A - 氰基丙烯酸酯系胶和纤维蛋白生物型胶；另一
类是硬组织医用胶，用于胶接牙齿、骨骼、关节等。常用的有甲基丙烯酸甲酯、骨水泥、丙烯
酸酯类粘固粉等。

思考题与习题

9.1 焊接时为什么要进行保护？说明各电弧焊方法中的保护方式及保护效果。

9.2 焊芯的作用是什么？其化学成分有何特点？焊条药皮有哪些作用？

9.3 下列焊条牌号的含义是什么？

E4303、E5015、E307 - 15、EZCQ、EZNi、TALS_i、ECuSn - A

9.4 结构钢焊条如何选用？试给下列钢材选用两种不同牌号的焊条，并说明理由。

Q235、20、45、Q345

9.5 什么叫焊接热影响区？低碳钢焊接热影响区的组织与性能怎样？

9.6 焊接接头中机械性能差的薄弱区域在哪里？为什么？

9.7 影响焊接接头性能的因素有哪些？如何影响？

9.8 如何防止焊接变形？矫正焊接变形的的方法有哪几种？

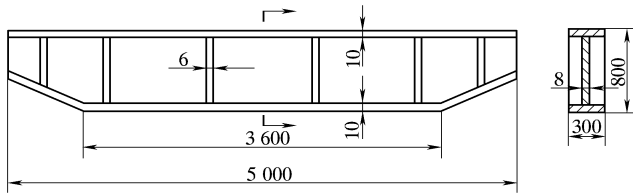
9.9 减少焊接应力的工艺措施有哪些？消除焊接残余应力有什么方法？

9.10 熔焊时常见的焊接缺陷有哪些？焊接缺陷有何危害？

- 9.11 焊接裂纹有哪些种类？是怎样产生的？如何防止？
 9.12 如何选择焊接方法？下列情况应选用什么焊接方法？简述理由。

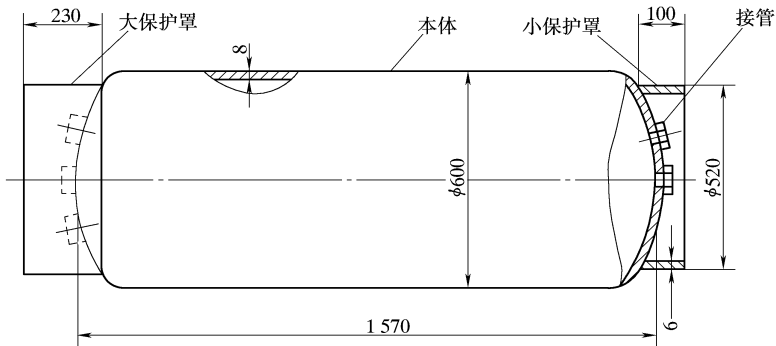
- 9.13 低碳钢焊接有何特点？
 9.14 普通低合金钢焊接的主要问题是什么？焊接时应采取哪些措施？
 9.15 铝、铜及其合金焊接常用哪些方法？哪种方法最好？为什么？

9.16 钢板拼焊工字梁的结构与尺寸如图所示。材料为 Q235 钢，成批生产，现有钢板的最大长度为 2 500 mm。试确定：



题 9.16 图

9.17 钢制压力容器结构如图所示。本体由筒体和封头组成，材料为 Q345，钢板尺寸为 1 200 × 6 000 × 8 mm，大、小保护罩材料为 Q235F，接管材料为 Q235，外径 65 mm，壁厚 9 mm，高约 60 mm。容器工作压力为 20 个大气压，工作温度为 - 40 ~ 60 ，大批生产。要求：



题 9.17 图

- 9.18 你所了解的焊接新技术有哪些？请举例说明它们各自有何应用？
- 9.19 了解市场上销售的胶粘剂，将其按基料成分和主要用途分类并说明其主要用途。

第 10 章 钳工成形工艺

问一问，想一想：无论是简单的加工、还是高精度零件的精密加工，钳工工作在我们的身边经常可以看到、用到，您能举出一些例子吗？

学习目标

1. 了解钳工工作的特点及其在机械制造和维修中的作用；
2. 重点掌握常用钳工基本工艺和主要设备、工具与量具的构造和使用方法，掌握钳工主要工艺的操作技能和钳工安全技术；
3. 了解机械部件装配的基本知识，具有装拆简单部件的操作技能。

钳工是手持工具进行加工、维修、装配和调试等的工艺方法。钳工工具简单，操作灵活，可以完成目前采用机械设备不能加工或不适于机械加工的某些零件的加工，因此钳工的工作范围很广，工作种类繁多，随着生产的发展，钳工工种已有了明显的专业分工，如：普通钳工、划线钳工、模具钳工、装配钳工、修理钳工、工具样板钳工、钣金钳工等。

一般来说，钳工的工作范围如下：

工等。

钳工的大多数操作是在钳工工作台上进行的。台虎钳是夹持工件的主要工具，如图 10.1.1 所示。台虎钳固定在钳工工作台上，另外还配有划线平台、钻床和砂轮机等。

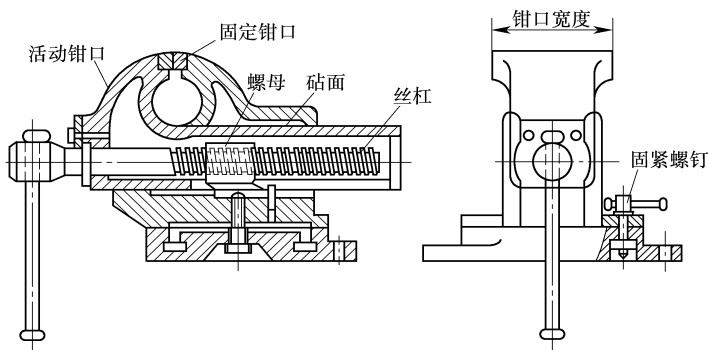


图 10.1.1 台虎钳

使用台虎钳应注意以下事项：

丝杠或螺母。

应在砧面上进行。

钳工是目前机械制造和修理工作中不可缺少的重要工种，其基本工艺包括划线、锯切、锉削、錾削、钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、攻螺纹与套螺纹和刮削等。

10.1 划线

划线是根据图纸要求在工件的毛坯或半成品上划出加工界线的一种操作。划线的作用：一是在毛坯上明确地表示出加工余量、加工位置线，作为加工、安装工件的依据；二是通过划线检查毛坯的形状和尺寸是否符合图纸要求，避免不合格的毛坯投入机械加工而造成浪费；三是合理分配各加工表面的余量，保证不出或少出废品。划线分为平面划线和立体划线两类。在工件的一个平面上划线称为平面划线；在工件的几个表面上，即在长、宽、高方向上划线称为立体划线。如图 10.1.2 所示。

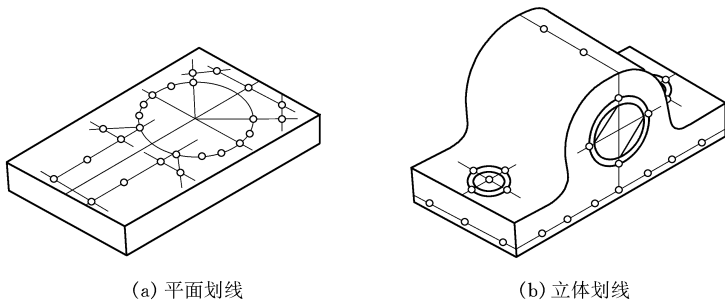


图 10.1.2 平面划线和立体划线

10.1.1 划线工具

划线工具按用途分为三类：基准工具

支承工具

工具主要有：

所示。

工具，如图 10.1.4 所示。

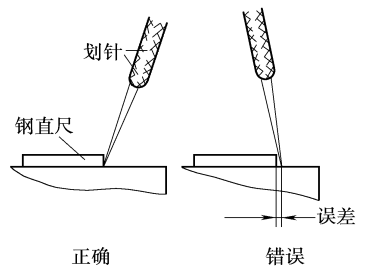


图 10.1.3 划针的使用方法

具，如图 10.1.5 所示。

位置，如图 10.1.7 所示。

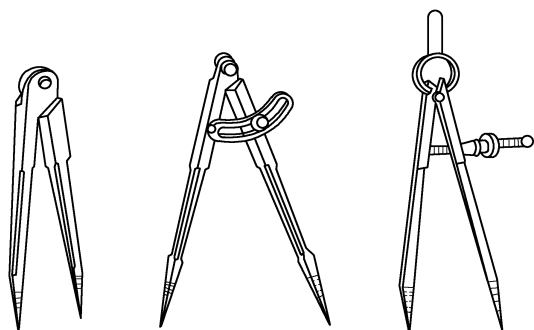


图 10.1.4 划规

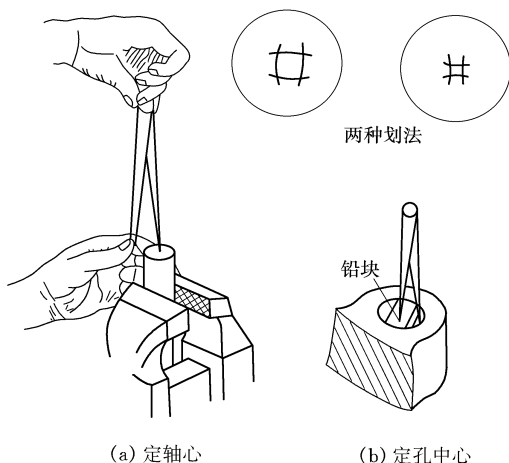


图 10.1.5 划卡及其用法

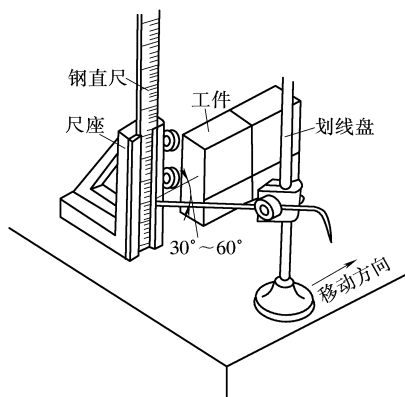


图 10.1.6 用划线盘划线

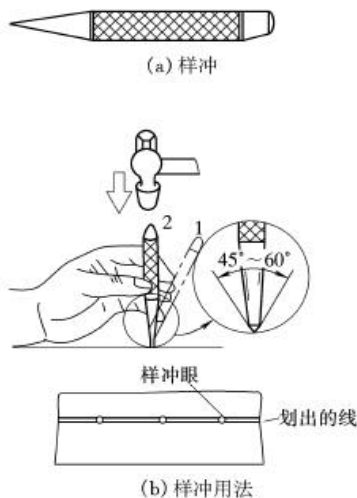


图 10.1.7 样冲及其用法

10.1.2 划线基准

划线时为了正确地划出确定工件的各部分尺寸、几何形状和相对位置的点、线或面，必须选定工件上的某个点、线或面作为划线基准。基准的选择一般遵循以下原则：如工件已有加工

表面，则应以已加工表面为划线基准，这样能保证待加工表面和已加工面的位置和尺寸精度；如工件为毛坯，则应选重要孔的中心线为基准；如毛坯上没有重要孔，则应选较大的平面为划线基准。

10.1.3 划线操作注意事项

10.2 锯切

锯切是用手锯切断金属材料或在工件上切槽的操作。锯切的工作范围包括：分割各种材料或半成品

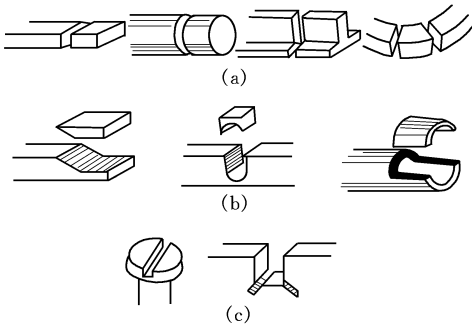


图 10.2.1 锯切的工作范围

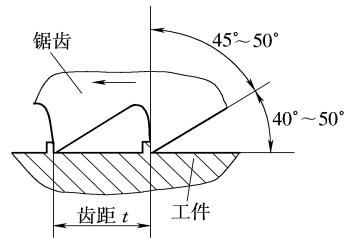


图 10.2.2 锯齿形状

10.2.1 锯条

锯条多用碳素工具钢制成。常用的锯条约长 300 mm，宽 12 mm，厚 0.8 mm。锯条切削部分是由许多锯齿组成的，其形状如图 10.2.2 所示。

锯齿按齿距 t 的大小，可分为粗齿 $t=1.6\text{ mm}$ $t=1.2\text{ mm}$ $t=0.8\text{ mm}$ 种。粗齿锯条适于锯铜、铅等软金属及厚的工件。细齿锯条适用于锯硬钢、板料及薄壁管子等。加工普通钢、铸铁及中等厚度的工件多用中齿锯条。

10.2.2 锯切方法

生颤动。

面轻轻滑过。锯削时不要用力过猛，以防止锯条折断崩出伤人。

断时要用左手扶住工件断开部分，以防落下伤脚。

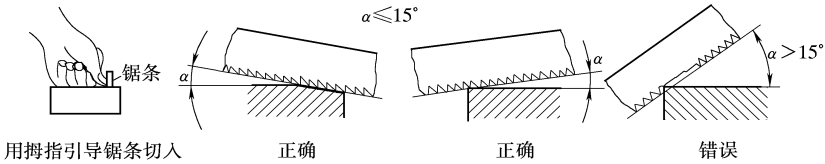


图 10.2.3 起锯

10.3 锉削

锉削是使用锉刀对工件表面进行加工的操作。

10.3.1 锉刀

锉刀是锉削使用的工具，它由碳素工具钢制成，其锉齿多是在剃齿机上剃出，并经淬火、回火处理。锉刀的锉纹多制成双纹，这样锉削时省力，且不易堵塞锉面。锉刀按形状不同，可分为平锉

锉刀按其齿纹的粗细

锉齿的齿数划分)

齿间大，不易堵塞，适于粗加工或锉铜、铝等软

金属；细锉刀

光锉刀

修光表面。

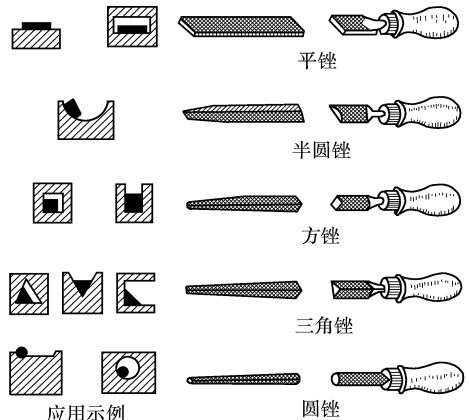


图 10.3.1 锉刀的种类

10.3.2 锉削方法

锉削时应正确掌握锉刀的握法及施力的变化。

使用大的锉刀时，右手握住锉柄，左手压在锉刀前端，使其保持水平

时，因用力较小，可用左手的拇指和食指握住锉刀的前端部，以引导锉刀水平移动，如图 10.3.2b 所示。

锉削时应始终保持锉刀水平移动，因此要特别注意两手施力的变化。开始推进锉刀时，左

手压力大于右手压力；锉刀推到中间位置时，两手的压力相等；再继续推进锉刀，左手的压力逐渐减小，右手的压力逐渐增大。锉刀返回时不加压力，以免磨钝锉齿和损伤已加工表面。

锉平面的方法和步骤是：

和加工余量的大小、工件的表面粗糙度要求等来选择锉刀，加工余量小于 0.2 mm 时，宜用细锉。

并略高于钳口，夹已加工表面时，应在钳口与工件间垫以铜制或铅制垫片。

锉法和滚锉法，前三种用于平面锉削，后一种用于弧面锉削。如图 10.3.3 所示。

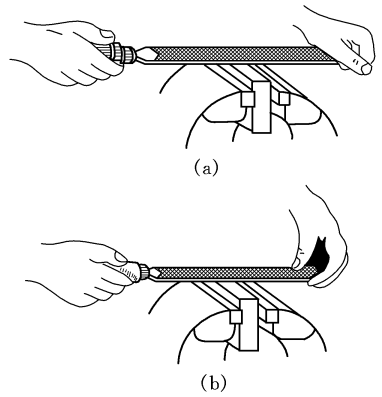


图 10.3.2 锉刀的握法

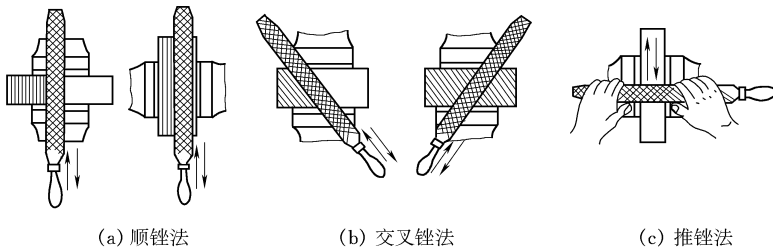


图 10.3.3 锉削方法

粗锉时可用交叉锉法，这样不仅锉的快而且可利用锉痕判断加工部分是否锉到所需尺寸。平面基本锉平后，可用细锉和光锉以推锉法修光。

卡钳

角尺根据是否能透过光线来检查。

10.3.3 锉削操作注意事项

伤手心。

口上，以免磨钝锉刀和损坏钳口。

再锉时打滑。

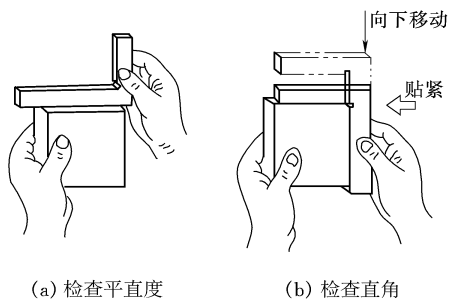


图 10.3.4 检查平直和直角

10.4 钻孔

各种零件上的孔加工，除去一部分由车、镗、铣等机床完成外很大一部分是由钳工利用各种钻床和钻孔工具完成的。钳工加工孔的方法一般是指钻孔、扩孔、铰孔以及铰孔。在钳工中的钻、扩、铰、铰工作，多在钻床上进行。用钻床加工不方便的场合，经常用手电钻进行钻孔、扩孔，用手铰刀进行铰孔。

10.4.1 钻床

常用的钻床有台式钻床、立式钻床、摇臂钻床三种，手电钻也是常用的钻孔工具。台式钻床简称台钻，如图 10.4.1 所示，是一种放在工作台上使用的小型钻床，台钻重量轻，移动方便，转速较高

主轴的转速可用改变三角胶带在带轮上的位置来调节，台钻主轴的进给是手动的。适用于小型零件上直径 13 mm 的小孔。

10.4.2 钻头

麻花钻头是钻孔最常用的刀具，其组成部分如图 10.4.2 所示。麻花钻的前端为切削部分，如图 10.4.3 所示，它有两个对称的主刃，钻头顶部有横刃，横刃的存在使钻削时轴向力增加。麻花钻有两条螺旋槽和两条刃带，螺旋槽的作用是形成切削刃向孔外排屑；刃带的作用是减少钻头与孔壁的摩擦并导向。麻花钻头的结构决定了它的刚性和导向性均比较差。

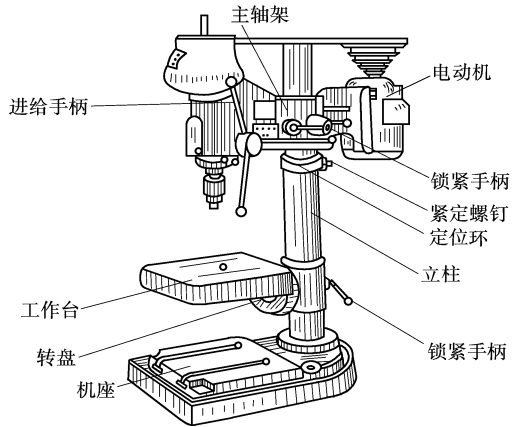


图 10.4.1 台式钻床

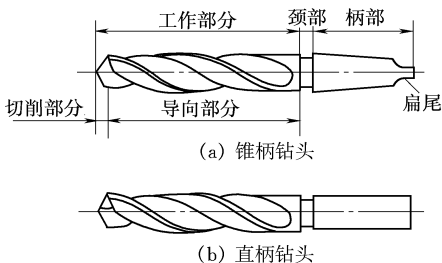


图 10.4.2 麻花钻

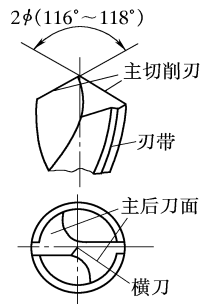


图 10.4.3 麻花钻的切削部分

10.4.3 钻孔方法

按划线钻孔时，一定要使麻花钻的尖头对准孔中心的样冲眼，一般先钻一小孔以判断是否对中。钻削开始时，要用较大的力向下进给，以免钻头在工件表面上来回晃动而不能切入。用麻花钻头钻较深的孔时，要经常退出钻头以排出切屑和进行冷却，否则可能使切屑堵塞在孔内卡断钻头或由于过热而增加钻头的磨损。钻孔时为了降低切削温度提高钻头耐用度，要加冷却润滑液。钻孔临近钻透时，压力应逐渐减小。

直径大于 30 mm 的孔，由于有很大的轴向抗力，很难一次钻出，这时可先钻出一个直径较小的孔

10.4.4 钻孔操作注意事项

10.5 攻螺纹与套螺纹

10.5.1 攻螺纹

攻螺纹(又称攻丝)

1. 丝锥

丝锥是专门用来攻螺纹的刀具，其结构形状如图 10.5.1 所示。丝锥的前端为切削部分，有锋利的刃，起主要的切削作用；中间定径部分，则起修光螺纹和引导丝锥的作用。

手用丝锥从 M3 ~ M20 每种尺寸多为二支一组，称为头锥、二锥。两只丝锥的区别，在于其切削部分的不同：头锥切削部分有 5 ~ 7 个不完整的牙齿，其斜角较小；二锥有 1 ~ 2 个不完整的牙齿，切削部分的斜角较大，攻螺纹时，先用头锥，再用二锥。机用丝锥一般只有一支。

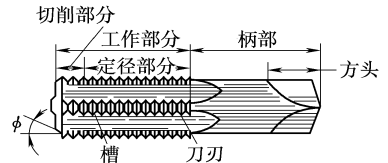


图 10.5.1 丝锥

2. 攻螺纹的操作

底孔的直径可查手册或按下面的经验公式计算：加工钢及塑性材料时，钻头直径 $D = d - p$ (mm)

$D = d - 1.1p$ (mm) d 为螺纹大径 P 为螺距

度可按下式计算：孔的深度 = 要求的螺纹长度 + 0.7 d ， d 为螺纹大径。

开始用头锥攻螺纹时，必须先旋入 1 ~ 2 圈，检查丝锥是否与孔的端面垂直

90°角尺在互相垂直的两个方向检查)

入3~4圈后,即可只转动不加压,每转1~2圈应反转1/4周,以使切屑断落。攻钢料螺纹时,应加润滑油。如图10.5.2所示。

先将丝锥放入孔内,用手旋入几周后,再用铰杠转动。旋转铰杠时不需加压。

10.5.2 套螺纹

套螺纹

1. 板牙和板牙架

板牙有固定的和开缝的

图10.5.3a所示为开缝式板牙,其螺纹孔的大小可作微量调节。孔的两端有60°的锥度部分,起着主要的切削作用。板牙架是用来装夹板牙的,如图10.5.3b所示。

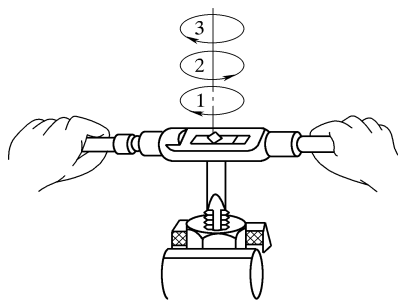


图 10.5.2 攻螺纹

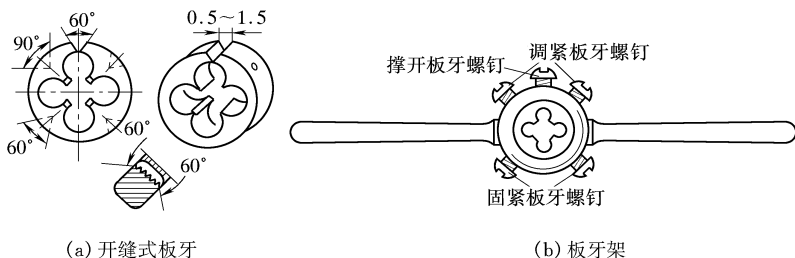


图 10.5.3 开缝式板牙和板牙架

2. 套螺纹的操作

套螺纹前应检查圆杆的直径大小,太大难以套入,太小套出的螺纹牙齿不完整。在钢料套螺纹时,圆杆直径可用经验公式计算:圆杆直径=螺纹大径 $d - 0.13P$ (螺距)要套螺纹的圆杆端部必须有合适的倒角。套螺纹时,板牙端面应与圆杆垂直,如图10.5.4所示。开始转动板牙时,要稍加压力;套入几扣后,即可转动不加压。与攻螺纹一样,为了断屑,需时常反转。在钢件上套螺纹时,应加油润滑。

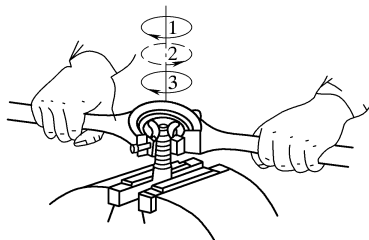


图 10.5.4 套螺纹

10.6 刮削

用刮刀在工件已加工表面上刮去一层薄金属的加工称为刮削。刮削是钳工中的一种精密加工。零件上的配合滑动表面,为了达到配合精度,增加接触面,减少摩擦磨损,提高使用寿命。

命，常需经过刮削，如机床导轨、滑动轴承等。

10.6.1 刮刀及其用法

图 10.6.1 所示为平面刮刀，是用 T10A 等优质碳素工具钢锻制而成，端部需磨出锋利刃口，并用油石磨光。

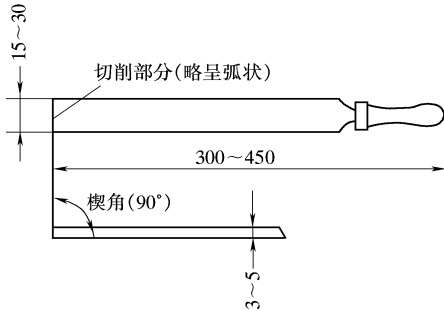


图 10.6.1 平面刮刀

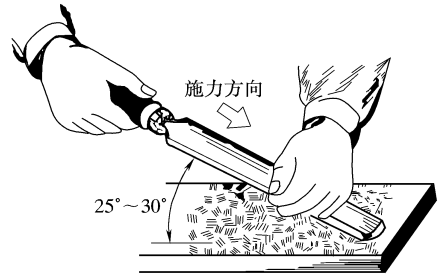


图 10.6.2 刮刀握法

图 10.6.2 所示为刮刀的一种握法，右手握刀柄，推动刮刀前进。左手在接近端部的位置施压并引导刮刀沿刮削方向移动。刮刀与工件间倾斜夹角为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。刮削时用力要均匀，避免划伤工件。

10.6.2 刮削质量检验

刮削后的质量通常用研点法来检验。将刮削后的平面擦净，均匀涂上一层很薄的红丹油，然后与校准工具

亮点

普通机床的导轨面要求 $8 \sim 10$ 点。

10.6.3 平面刮削步骤

平面刮削分为粗刮和细刮。

工件表面粗糙、存有机加工刀痕等时，应先行粗刮，以免研点时划伤平板。粗刮用长刮刀，施加较大的压力，多次刮削交叉进行，直至刀痕等全部消除。刀痕等刮除后可研点检验，并按显示出的亮点逐点刮削，当贴合点增至 4 个点后进行细刮。

细刮采用较短的刮刀，施加较小的压力，经过反复刮削后，使贴合点逐步增多，直至满足要求为止。

10.7 装配工艺

任何一台机器都是由许多零件和部件组成的。按照规定的装配精度和技术要求，将若干个零件和部件进行必要的配合与连接，并经调整、试验，使之成为合格产品的过程，称为装配。

零件是机器最基本的单元。组件则是若干零件组合而成的单元。将若干个零件安装在一个基础零件上而构成组件的装配称为组件装配；将若干零件、组件安装在另一个基础零件上而构成部件的装配称部件装配；将若干个零件、组件、部件安装在一个较大较重的基础零件上而构成产品的装配称为总装配。

10.7.1 典型零件的装配

1. 螺栓螺母的装配

螺纹连接是机器中最常见的一种可拆卸固定连接。它具有装拆简便，调整、更换容易，易于多次拆装等优点。在装配工作中，常遇到大量的螺栓、螺母的装配，在装配中应注意以下各项：

过松在受力后，螺纹易断裂。

为了提高贴合质量和防松，一般应加垫圈。

所示，并且一次不能全拧紧，应按顺序分两次或三次拧紧。

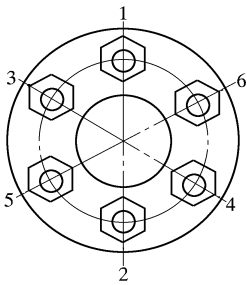


图 10.7.1 螺母的拧紧顺序

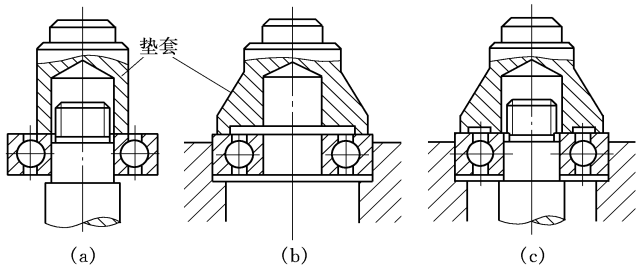


图 10.7.2 用垫套压装滚动轴承

2. 滚动轴承的装配

滚动轴承的装配多数为较小的过盈配合。常用锤子或压力机装配。为了使轴承圈受到均匀压力，采用垫套加压。轴承往轴上压时，应通过垫套施力于轴承内圈端面，如 10.7.2a 所示；轴承压到机体孔中时，则应施力于外圈端面，如图 10.7.2b 所示；若同时将轴承压到轴上和机体孔中，则内外圈端面应同时加压，如图 10.7.2c 所示。若轴承与轴为较大的过盈配合时，最好将轴承挂在 80~90 的热油中加热，然后趁热装入。

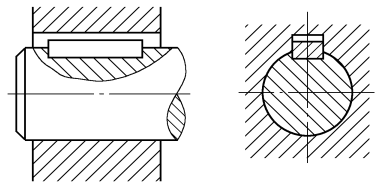


图 10.7.3 普通平键连接

3. 轴与传动轮的装配

传动轮

图 10.7.3 所示。键与轴槽、轴与轮多采用过渡配合，键与轮槽常采用间隙配合或过渡配合。

在单件小批量生产中，轴、键、传动轮的装配要点如下：

良好。

10.7.2 拆装工艺方法

1. 装配

装配前，研究和熟悉装配图的技术条件，了解产品的结构和零件的作用，以及相互连接的关系，确定装配的方法
工艺规程。

装配工艺规程是指导装配生产的主要技术文件，制订装配工艺规程是生产技术准备工作中的一项重要工作，对保证装配质量，提高装配生产效率，缩短装配周期，减轻工人的劳动强度等有重要影响。制订装配工艺规程，最主要的是划分装配单元，确定装配顺序，将产品划分为可进行独立装配的单元是制订装配工艺规程中最重要的一个步骤。依据制订的装配单元系统图按组件装配 k 部件装配 k 总装配的次序进行，并经调整、试验、检验、喷漆、装箱等步骤。

装配要求如下：

等，应注意零件上的各种标记防止错装。

定方向运动。

纵是否灵活，各手柄和运动部件是否在规定位置。

2. 拆卸

机器使用一段时间后，要进行检查和修理，这时要对机器进行拆卸，拆卸要注意如下几项：

猛敲，造成零件的损伤或变形。

卸。在拆卸部件或组件时，应按从外部到内部，从上部到下部的顺序，依次拆卸组件或零件。

各种拉出器、固定扳手、铜锤、铜棒等)

要摆放整齐，防止丢失。

事故。

思考题与习题

- 10.1 什么叫做划线基准？如何选择划线基准？
- 10.2 怎样选择锯条？起锯时应注意哪些问题？
- 10.3 交叉锉、顺向锉、推锉各有何优点？怎样正确使用？
- 10.4 麻花钻的切削部分和导向部分的作用有何不同？
- 10.5 为什么套螺纹前要检查圆杆的直径？其大小怎样决定？为什么要倒角？
- 10.6 装配工作应注意哪些事项？

第 11 章 机械加工成形工艺

问一问，想一想：您知道常用的机床有哪几种？以车床溜板箱中一根传动轴为例，其机械加工工艺流程是怎样的？



学习目标

1. 了解金属切削加工的基本知识；
2. 了解卧式车床的组成、运动、用途及典型零件的装卡方法；
3. 重点掌握基本车削工艺，具有主要车削工艺操作技能和机械加工安全技术；
4. 掌握铣床、刨床及磨床的组成、运动、用途和加工工艺特点；具有铣削、刨削及磨削等加工方法的初步操作技能；
5. 了解数控机床的组成和加工特点，具有数控加工的初步操作技能。

切削加工是利用切削工具和工件之间的相对运动，从毛坯去多余部分材料，以获得所需要的尺寸精度、形状精度、相互位置精度及表面粗糙度的一种加工方法。机械加工是操作机床进行的切削加工。

在现代机械制造中，除少部分零件可以采用精密铸造、精密锻造、粉末冶金及工程塑料通过铸造、锻压等方法直接获得要求的精度外，绝大部分零件都需要切削加工，来保证零件的加工精度与表面粗糙度。因此，切削加工是历史较悠久，应用最广泛的加工方法，切削加工的先进程度直接影响产品的生产率和质量。

11.1 切削加工基本知识

11.1.1 切削加工运动

为了进行切削加工以获得工件所需的各种形状，并达到要求的加工精度和表面粗糙度，刀具和工件必须完成一系列运动。

1. 切削运动

切削时的基本运动是直线运动和回转运动，按切削时工件和刀具相对运动所起的作用不同可分为主运动和进给运动，如图 11.1.1 所示，为在车床上加工外圆表面时的切削运动。

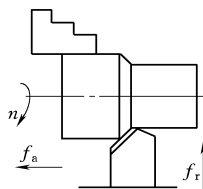


图 11.1.1 车削外圆表面的切削运动

主运动是进行切削时最主要的运动。通常它的速度最高，消耗机床

动力最多。如普通卧式车床的主运动为主轴的旋转运动 v ，镗床主运动是镗杆的旋转运动。

进给运动与主运动配合后，将能保持切削工作连续地进行，从而切除金属层形成已加工表面。如图 11.1.1 所示，在普通卧式车床上加工外圆，刀具沿工件轴线方向的纵向运动 f_s 是进给运动。机床的进给运动可由一个或几个组成，通常消耗功率较小。进给运动可以是连续的，如车床的进给运动；也可以是间歇的，如牛头刨床工作台的进给运动。

在切削加工过程中，工件上形成三种表面，如图 11.1.2 所示。

- a.
- b.
- c.

2. 切削要素

切削用量三要素如图 11.1.2 所示。

v 是主运动的线速度，单位为 m/s 。

f 是进给运动方向上相对工件的位移量。车削时，进给量为主轴每转一转时，工件与刀具相对的位移量，单位为 mm/r 。

a_p 是每次走刀切入的深度。背吃刀量等于待加工表面与已加工表面间的垂直距离

11.1.2 金属切削刀具

金属切削刀具种类繁多，形状也各有不同，但是，不管形状多么复杂的刀具，都是在刀具基本类型的基础上发展起来的，以适应不同条件下的切削加工。现以外圆车刀为例分析如下：

1. 刀具的组成

外圆车刀分为切削部分

示。刀体装在刀架上，刀头装在刀体上

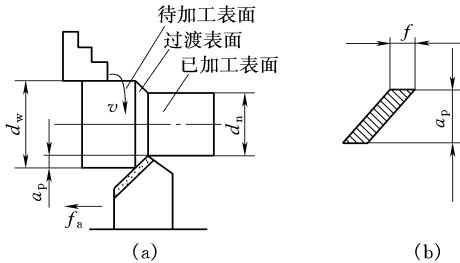


图 11.1.2 车削时的切削要素

切削部分的组成如下：

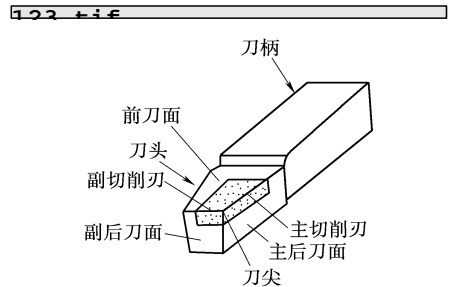


图 11.1.3 车刀的组成

成过渡刀刃。

2. 刀具切削部分角度

车刀的切削部分包括五个主要的基本角度，即前角 α_0 、后角 α'_0 、主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 、刃倾角 λ_s ，见图 11.1.4 所示。

正确选择刀具角度，对保证加工精度、提高劳动生产率有着十分重要的意义。下面对车刀的几个角度的选择提供几个原则。

α_0 的选择

前角大小影响切屑流出的难易程度及刀刃的强度。增大前角，切屑易流出，可使切削力下降，切削时省力，但过大的前角降低刀刃的强度，当加工塑性材料时，工件材料硬度较低或是在精加工时，前角可取大些，如使用硬质合金刀具加工低碳钢时， $\alpha_0 = 25^\circ \sim 30^\circ$ ；加工铝或铜时， $\alpha_0 = 30^\circ \sim 40^\circ$ 。减小前角，可提高刀刃强度，但切屑流出不畅，一般在加工脆性材料，或加工硬度较高的材料及粗加工时往往减少前角，如使用硬质合金刀具加工不锈钢时 $\alpha_0 = 15^\circ \sim 25^\circ$ ，加工高碳钢时 $\alpha_0 = 5^\circ$ 。

α'_0 的选择

增大后角，可以减少刀具后面与工件之间的摩擦。但过大的后角会降低刀刃强度，容易损坏刀具。当加工塑性材料时，后角可以取大些，如采用高速钢车刀加工中、低碳钢或精加工时， $\alpha'_0 = 6^\circ \sim 18^\circ$ 。当强力车削或粗加工时，适当减小后角，以提高刀刃强度，如硬质合金车刀粗车碳钢工件时 $\alpha'_0 = 6^\circ \sim 8^\circ$ ，精车时 $\alpha'_0 = 8^\circ \sim 12^\circ$ 。

κ_r 的选择

在切削深度和进给量不变的条件下，增大主偏角，使轴向切削力增大，径向切削力减小，有利于加工细长轴类零件，减小因径向力引起的工件弯曲变形，提高加工精度，也使振动减小。但是，增大主偏角时，使参加切削工作的主切削刃长度缩短，刀刃单位长度上切削负荷加大，散热性能下降，刀具磨损加快。通常加工细长轴时 $\kappa_r = 75^\circ \sim 93^\circ$ ；加工硬材料时 $\kappa_r = 10^\circ \sim 30^\circ$ ；粗车、强力车削时 $\kappa_r = 60^\circ \sim 70^\circ$ 。

增大刃倾角有利刀具承受冲击。刃倾角为正值时，切屑向待加工表面方向流出；为负值时，切屑向已加工表面方向流出。通常精车时 $\lambda_s = 0^\circ \sim 4^\circ$ ，粗车时 $\lambda_s = 0^\circ \sim -5^\circ$ ，有冲击负荷或断续切削时 $\lambda_s = -15^\circ \sim -5^\circ$ 。

3. 刀具材料

刀具材料性能的优劣是影响表面加工质量、切削效率、刀具寿命的基本因素。正确选择刀

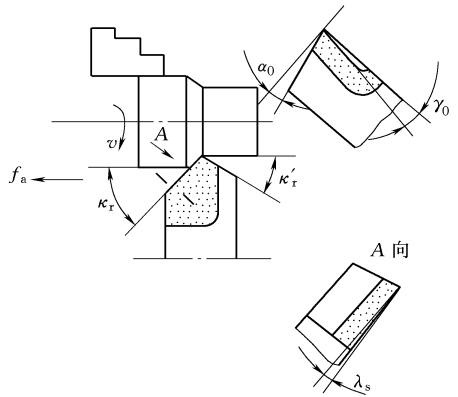


图 11.1.4 车刀的主要角度

具材料是设计和选择刀具的重要内容之一。刀具材料应具备高硬度、高耐磨性、高红硬性和足够的强度和韧性，除此之外，刀具材料还要有良好的工艺性及经济性。常用刀具材料分为工具钢、硬质合金、陶瓷及超硬材料四大类。

4. 刀具的刃磨

刀具用钝后，必须刃磨，以便恢复其合理的形状和角度。刀具两次刃磨之间实际进行切削的时间称为刀具的耐用度。车刀是在砂轮机上刃磨的。磨高速钢车刀时，用氧化铝砂轮为白色)

石加机油将各面修磨光，以使车刀耐用和提高被加工零件的加工精度。刃磨车刀时应注意以下事项：

免挤碎砂轮，造成事故。

砂轮两侧面用力粗磨车刀，以至砂轮受力偏摆、跳动，甚至破碎。

时，应在空气中冷却，不应沾水，以免产生裂纹。

11.1.3 切削液

切削液主要用来减少摩擦和降低切削温度。合理使用切削液，对提高刀具耐用度和保证表面加工质量有着重要意义。切削液有以下作用：

1. 冷却

切削液浇注在切削区域后，通过切削热的传导、对流和汽化，使切屑、刀具和工件上的热量散逸而起到冷却作用。冷却的目的主要是降低前刀面的温度，以提高刀具的耐用度。

2. 润滑

切削液在切削过程中渗透到刀具、切屑和工件之间形成润滑膜而达到润滑目的。

3. 洗涤和排屑

浇注切削液可冲走切削过程中留下的细屑和磨粒

细屑刮伤工件表面和机床导轨表面。在深孔加工时，注入切削液可以起到排屑作用。

4. 防锈

在切削液中加入防锈添加剂，如亚硫酸钠等，使金属产生保护膜，防止机床、工件受到水分、空气和酸介质的腐蚀，起到防腐作用。

常用的切削液有水溶液切削液
(用外还有防锈作用)

11.1.4 工件材料的切削加工性

工件材料的切削加工性是指对某种材料进行切削加工的难易程度。在相同切削条件下，若一定切削速度下刀具的耐用度较长，则该材料切削加工性好，反之较差。切削加工性对加工质量和生产率有很大影响，所以在保证零件使用要求的条件下，应尽可能选择切削加工性好的

材料。

对材料进行适当的热处理是改善切削加工性的重要途径。例如对低碳钢进行正火,可降低塑性,提高硬度,容易断屑,加工面易获得较小的粗糙度值。对高碳钢进行退火,可降低硬度,改善切削加工性。对铸铁件切削加工前退火,可降低表层硬度,有利于切削加工。此外,调整材料的化学成分也可改善切削加工性。例如钢中添加适量的硫、铅等元素,形成易切削钢,可提高刀具耐用度,减小切削力,易断屑,使加工质量和效率得以提高。

11.1.5 零件的加工质量

零件的加工质量直接影响产品的使用性能和寿命,其主要包括加工精度和表面质量。

1. 加工精度

加工精度是指零件加工以后,其尺寸、形状、相互位置等参数的实际数值和它的理想数值相符合的程度。为了保证零件顺利地进行装配并满足机器使用要求,就需要把零件的实际参数控制在一定的误差范围内。零件实际参数的最大允许变动量称为公差。加工精度用尺寸公差、形状公差和位置公差来表示。

尺寸公差有 20 个公差等级,从 IT01 ~ IT18 等级依次降低,公差数值依次增大。形状公差有直线度、平面度等六种。位置公差有平行度、垂直度、同轴度等八种。

2. 表面质量

表面质量常用表面粗糙度来衡量。生产中常用轮廓算术平均偏差 Ra 作为评定表面粗糙度的主要参数。

11.2 车削加工

车工是机械加工中的基本工种,它的技术性很强,主要用车床加工回转表面,所用刀具是车刀,还可用钻头、铰刀、丝锥、滚花刀等刀具。在金属切削机床中,车床所占比例最大,约占金属切削机床总台数的 20% ~ 35%。车床应用范围很广,种类很多。按用途和结构的不同,主要分为卧式车床及落地车床、立式车床和各种专门化车床等。此外,在大批量生产中还有各种各样专用车床。

车床主要用于各种回转表面加工,其应用如图 11.2.1 所示。卧式车床加工尺寸公差等级可达 IT8 ~ IT7,表面粗糙度 Ra 可达 1.6 μm 。

11.2.1 车床

车床种类很多,其中卧式车床是应用最广泛的一种。其组成见图 11.2.2 所示。

由图可知车床的组成部分有:

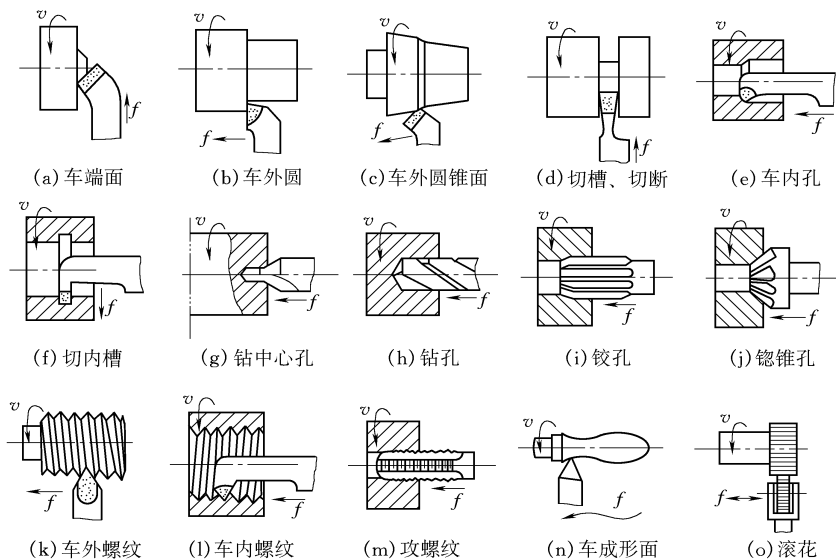


图 11.2.1 车床加工应用示例

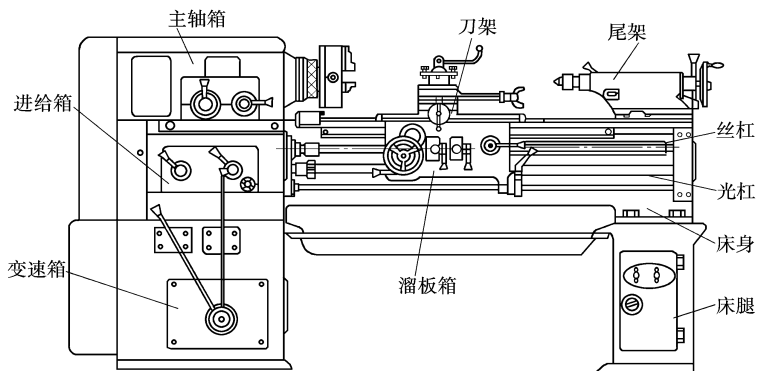


图 11.2.2 C6132 卧式车床

车床的传动路线是指从电动机到机床主轴或刀架之间的运动路线。图 11.2.3 即为其传动框架图。

11.2.2 车刀

常用车刀的结构形式有三种：将刀头焊在刀体上的焊接车刀
 刀体成一整体的整体车刀
 不重磨车刀

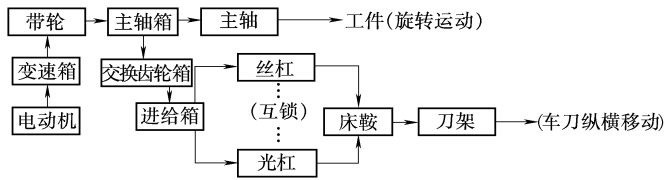


图 11.2.3 C6132 型车床传动框架图

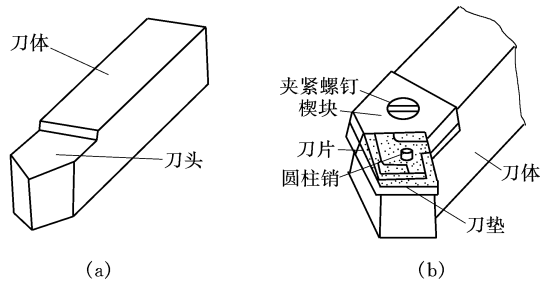


图 11.2.4 车刀的形式

焊接车刀和机夹不重磨车刀切削部分的材料为硬质合金。车削铸铁等脆性材料一般用钨钴类硬质合金；车削碳钢等塑性材料一般用钨钛钴类硬质合金。机夹刀的刀刃磨损后不需要重新刃磨，松开夹紧螺钉，将刀片换一个方向再紧固，即可继续使用。整体车刀的切削部分是靠刃磨而得到的，这类车刀大多用高速钢来制造。

车刀的种类很多，按其用途分有外圆车刀、端面车刀、切断刀、镗孔刀、成形车刀、螺纹车刀等。常用车刀如图 11.2.5 所示。

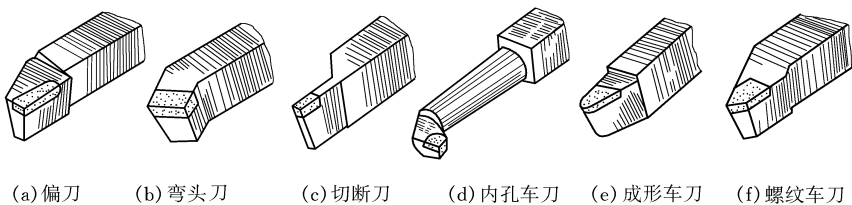


图 11.2.5 车刀的种类

车刀安装在方刀架上，刀尖应与工件轴线等高。一般用安装在车床尾座上的顶尖来校对车刀刀尖的高低，在车刀下面放置垫片进行调整。此外，车刀在方刀架上伸出的长度要合适，通常不超过刀体高度的两倍。车刀与方刀架都要锁紧。车刀的安装如图 11.2.6 所示。

11.2.3 工件的安装方法及附件

工件形状、大小和加工数量等不同时，安装工件的方法也不同。安装工件的主要要求是工件位置准确，装夹牢固，以保证工件的加工质量和必要的生产效率。

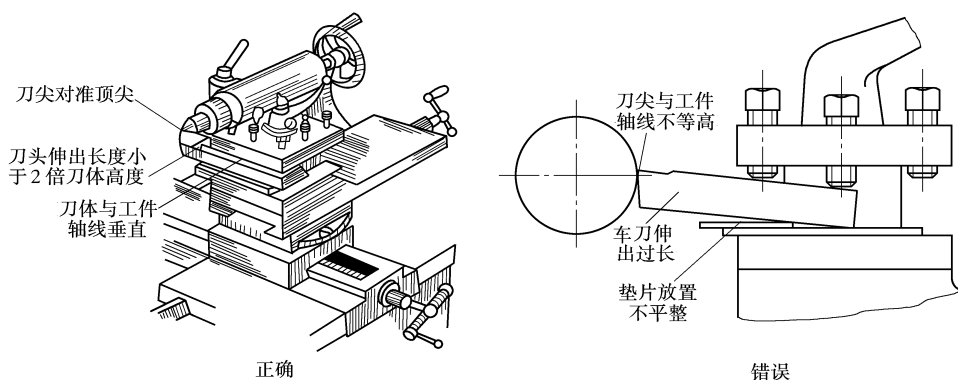


图 11.2.6 车刀的安装

三爪自定心卡盘是车床上应用最广的通用夹具，适合于安装较短的轴类或盘类工件。它的构造如图 11.2.7 所示。

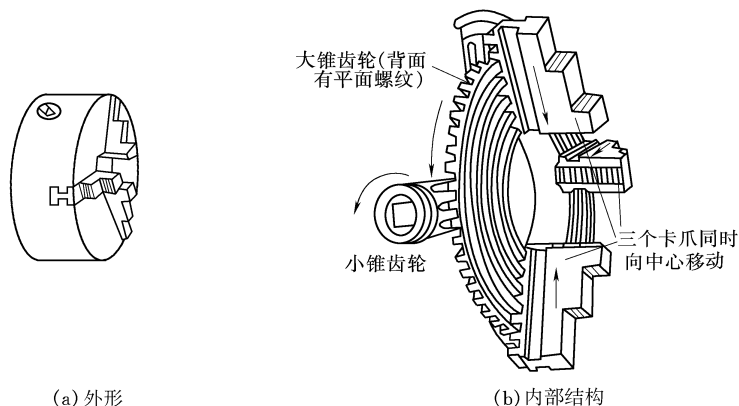


图 11.2.7 三爪自定心卡盘

三爪自定心卡盘体内有三个小锥齿轮，转动其中任何一个小锥齿轮时，可以使与它相啮合的大锥齿轮旋转。大锥齿轮背面的平面螺纹与三个卡爪背面的平面螺纹相啮合。当大锥齿轮旋转时，三个卡爪就在卡盘体上的平面螺纹内同时作向内或向外移动，以夹紧或松开工件。三爪自定心卡盘能自动定心，因此装夹方便。但其定心精度受卡盘本身制造精度和使用后磨损的影响，故工件上同轴度要求较高的表面，应尽可能在一次装夹中车出。此外，三爪自定心卡盘的夹紧力较小，一般仅适用于夹持表面光滑的圆柱形或六角形等工件。

用三爪自定心卡盘安装工件时，可按下列步骤进行：

损坏事故。

正，然后夹紧工件。

卧式车床的其它主要附件还有四爪单动卡盘、顶尖，花盘、心轴、跟刀架和中心架等。

11.2.4 基本车削工艺

1. 车外圆

外圆车削是车削加工中最基本、也是最常见的工作。常见的外圆车刀及车外圆的方法如图 11.2.8 所示。

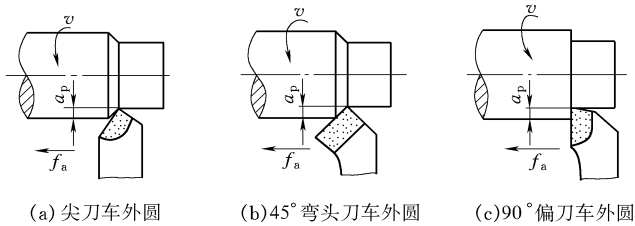


图 11.2.8 外圆车刀

车削外圆时，主轴带动工件作旋转运动，刀具夹持在刀架上切入工件一定深度并作纵向运动，为了准确地确定背吃刀量，保证工件的尺寸精度，通常需进行试切。轴上的台阶面可在车外圆时同时车出。台阶高度在 5 mm 以下时，可一次车出，台阶高度在 5 mm 以上时应分层进行切削。

2. 车端面

车削端面时常用偏刀或弯头刀，如图 11.2.9 所示。车削时可由工件外向中心切削，也可由工件中心向外切削。车刀安装时，刀尖应准确地对准工件中心，以免车出的端面中心留有凸台。

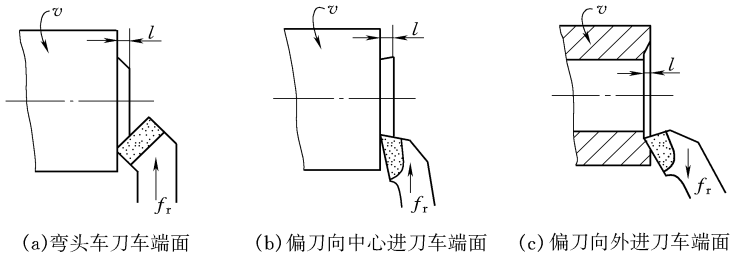


图 11.2.9 车端面

3. 车圆锥面

车削圆锥面常用的方法有四种：小滑板转位法、尾座偏移法、靠模法和宽刀法。

根据工件锥度或锥角，把小滑板下的转盘扳转 $\frac{1}{2}$ 角并锁紧。转动小滑动手柄，刀尖则

沿锥面母线移动，从而加工出所需锥面，如图 11.2.10 所示。此法操作简单，可加工任意锥角的内、外圆锥面。但由于受小滑板行程限制，不能加工较长的锥面，而且操作中只能手动进给，劳动强度大，表面粗糙度较难控制。

根据工件的锥度或锥角，将尾座顶尖横向偏移一定距离后，使工件回转轴线与车床主轴轴线的夹角等于 $\alpha/2$ ，利用车刀纵向进给，即可车出所需锥面，如图 11.2.11 所示。

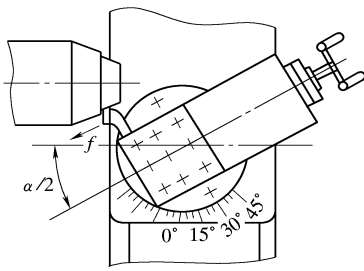


图 11.2.10 转动小滑板车圆锥面

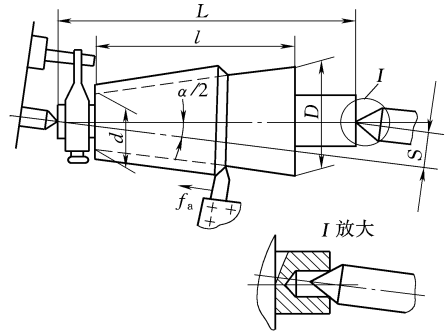


图 11.2.11 尾座偏移法车锥面

4. 螺纹加工

在车床上能加工各种螺纹。车螺纹时，为了获得准确的螺距，必须用丝杠带动刀架进给，使工件每转一周，刀具移动的距离等于工件螺纹的导程。主轴至丝杠的传动路线如图 11.2.12 所示。更换交换齿轮或改变进给手柄位置，即可车出不同螺距的螺纹。

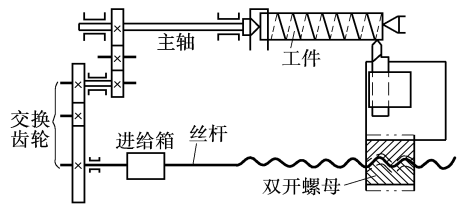


图 11.2.12 车螺纹时传动示意图

11.2.5 典型零件加工

由于零件都是由多个表面组成的，在生产中往往需经过若干个工序才能将坯料加工成成品。零件形状越复杂，加工质量要求越高，需要的加工工序也就越多。加工前，需合理安排加工工艺过程。

编制零件的加工工艺过程，一般要解决以下几方面问题：

图 11.2.13 所示为轴的零件图，其加工工艺过程见表 11.2.1。

该轴尺寸精度要求较高，表面粗糙度 Ra 值较小，工件长度与直径比值较大)

且安装方便可靠，轴类零件一般都采用顶尖安装。

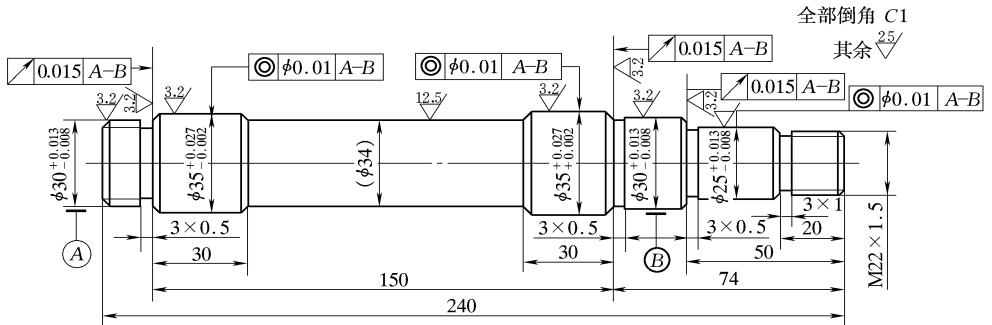


图 11.2.13 轴的零件图

表 11.2.1 轴的车削工艺过程

工序号	加工简图	加工内容	装卡方法	备注
1		下料 40 mm × 243 mm, 5 件		
2		车端面见平; 钻 2.5 mm 中心孔	三爪	
3		调头, 车端面保证总长 240 mm; 粗车外圆 32 mm × 15 mm, 钻 2.5 mm 中心孔	三爪	
4		粗车各台阶, 车 36 mm 外圆全长; 车外圆 31 mm × 74 mm; 车外圆 26 mm × 50 mm; 车外圆 23 mm × 20 mm, 切槽 3 个; 车外圆 34 mm 至尺寸	顶尖卡箍	
5		调头精车, 切槽 1 个; 光小端面保证尺寸 150 mm; 车 $30^{+0.013}_{-0.008}$ mm 至尺寸; 车两外圆 $35^{+0.027}_{-0.002}$ mm 至尺寸; 倒角 $1 \times 45^\circ$ 两个	顶尖卡箍	
6		调头精车, 车外圆 $30^{+0.013}_{-0.008}$ mm 至尺寸; 车外圆 $25^{+0.013}_{-0.008}$ mm 至尺寸; 车螺纹外圆 $22^{+0.1}$ mm 至尺寸; 修光台肩小端面; 倒角 $1 \times 45^\circ$, 4 个; 车螺纹 M22 × 1.5	顶尖卡箍 (垫铁皮)	
7		检验		

11.2.6 机械加工安全技术

(

启动机床；

工作；

尺寸或变速应停车后进行；

过大；

11.3 铣削、刨削与磨削加工

11.3.1 铣削加工

铣削加工是在铣床上利用铣刀的旋转运动和工件的移动来加工工件的，它是切削加工中常用的方法之一。在一般情况下，它的切削运动是刀具作快速的旋转运动，即主运动。工件作缓慢的直线移动，即进给运动。一般工件可有纵向、横向和垂直方向的进给运动。

铣削时，一般情况下可有几个刀齿同时参加切削，且没有空程，并可采用较高的切削速度，所以通常铣削生产率比刨削高。铣削加工精度一般可达 IT9 ~ IT8，表面粗糙度 $Ra = 6.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。

铣床的加工范围很广，在铣床上利用各种铣刀可加工平面槽

铣床上进行，如图 11.3.1 所示。

铣床的种类很多，有升降台式铣床、无升降台式铣床，龙门铣床、特种铣床等，最常用的是卧式铣床和立式铣床，现将万能卧式铣床作一简要介绍。万能卧式铣床的主轴是水平放置的。如图 11.3.2 所示。其主要组成部分及作用如下：

它用来固定和支承铣床上所有的部件。它的内部装有变速机构、主轴并存放润滑油；它的后面装有电动机；前面有燕尾形的垂直导轨，可供升降台上下移动之用，顶面有装横梁用的水

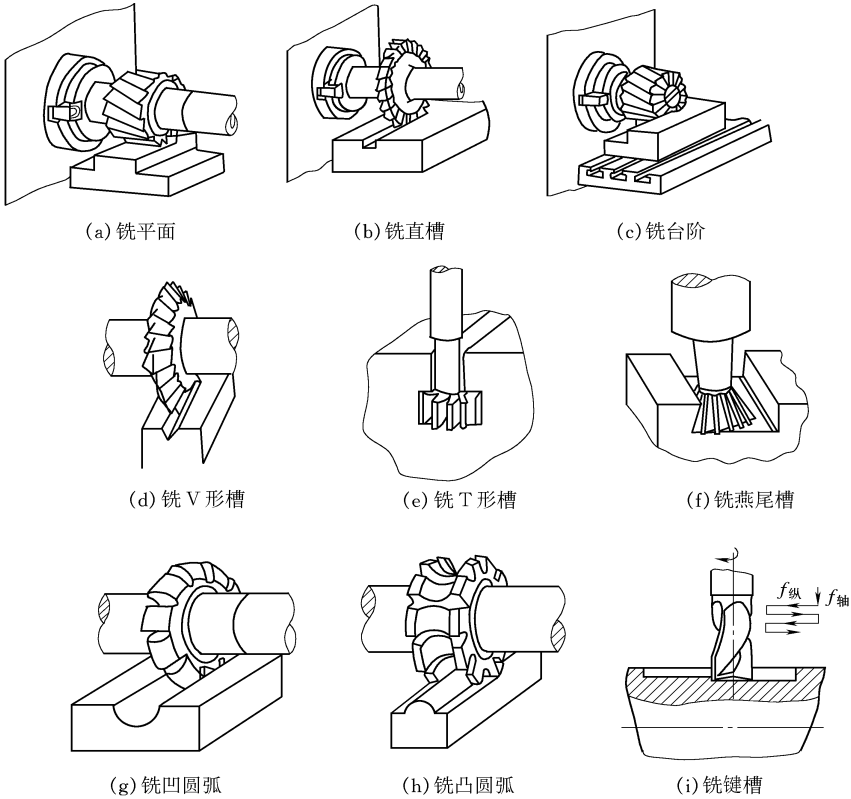


图 11.3.1 铣削加工范围

平导轨。

它安装在床身的上面，其外端可安装吊架，用来支撑铣刀刀杆，以增加刀杆刚度。横梁可沿床身的水平导轨移动，以调整其伸出长度。

主轴是空心的，前端有 7/24 的精密锥孔，其作用是安装铣刀刀杆并带动铣刀旋转。

它用来安装工件或夹具，并可沿转台的导轨作纵向移动。

它位于升降台上的水平导轨上，并可沿导轨作横向运动。

它的作用是能将纵向工作台在水平面内旋转一个角度螺旋槽等工作。

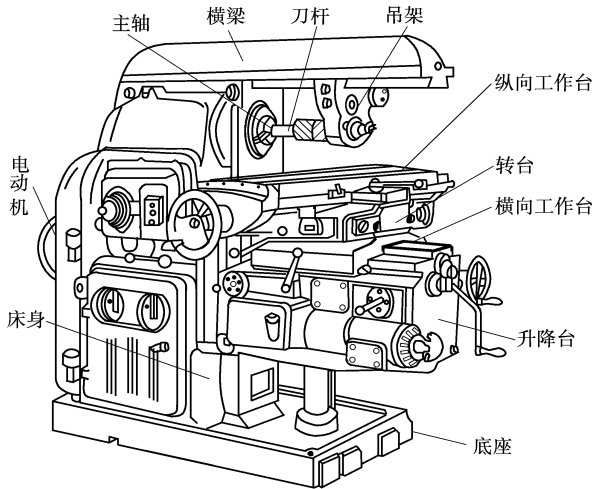


图 11.3.2 万能卧式铣床

它的上面装有横向工作台、转台和纵向工作台，并带动它们一起沿床身前面的垂直导轨作上下移动，以调整台面到铣刀间的距离。

带有转台的卧式铣床，由于其工作台除了能作纵向、横向和垂直方向移动外，还能在水平面内左右旋转 45° ，因此称为万能卧式铣床。

铣刀是一种应用很广泛的多刃刀具，它的种类很多。按铣刀的装卡方式可分为两大类：即带孔铣刀和带柄铣刀。带柄铣刀多用在立式铣床上，带孔铣刀多用在卧式铣床上。带柄铣刀又可分为直柄铣刀和锥柄铣刀。

11.3.2 刨削加工

在刨床上用刨刀加工工件叫做刨削。刨削是最普通的平面加工方法之一。刨床的加工范围很广，主要用来加工平面等。刨削加工的尺寸精度一般可达 $IT9 \sim IT8$ ，表面粗糙度一般可达 $Ra12.5 \sim 1.6 \mu m$ 。图 11.3.3 为刨床加工范围。

刨削的工艺特点：

低，刀具的生产和刃磨简单，生产准备周期短，所以刨削加工的成本低。

时冲击现象很严重，限制了切削速度的提高，所以，刨削加工生产率较低，一般用于单件小批生产或修配工作。

刨床的种类很多，型号也很多。按其结构特征，可分为牛头刨床、龙门刨床和插床等类型。

刨削名称	刨平面	刨垂直面	刨斜面	刨燕尾槽
加工简图				
刨削名称	刨 T 形槽		刨直槽	刨成形面
加工简图				

图 11.3.3 刨床加工范围

牛头刨床是用来刨削中、小型工件的刨床，工件的长度一般不超过 1 m。工件装夹在可调整的工作台上或夹在工作台上的平口钳内，利用刨刀的直线往复运动歇移动部分组成，如图 11.3.4 所示。

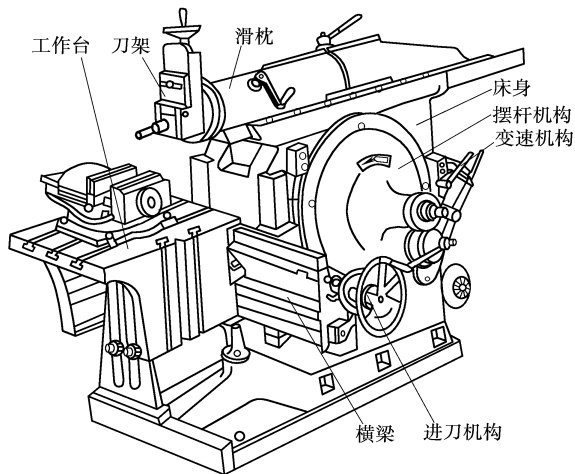


图 11.3.4 B6065 牛头刨床

它用来支承和连接刨床的各部件。其顶面水平导轨供滑枕作往复运动用，侧面垂直导轨供横梁

它用来带动刀架

它用来夹持刨刀，并可使刨刀作上下移动，以实现进刀或作垂直进给。当将转盘转过一定角度后，就可使刨刀作斜向进给。

它可带动工作台沿床身垂直导轨作升降运动。其内腔装有工作台进给丝杠。

它是用来安装工件的，可随横梁作上下调整，并可沿横梁作水平方向移动或作间歇进给运动。

刨刀的几何参数与车刀相似，但由于刨削加工的不连续性，刨刀切入工件时，受到较大的冲击力，容易使刀具损坏，所以刨刀刀杆的横截面通常比车刀大。刨刀刀杆常做成弯头，这是刨刀的特点。刨刀的种类很多，常用刨刀的形状及应用如图 11.3.5 所示。

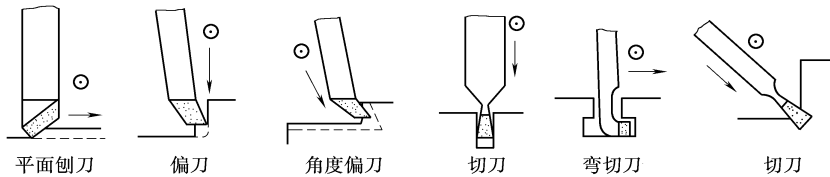


图 11.3.5 刨刀的种类及其应用

11.3.3 磨削加工

磨削是以砂轮作刀具进行切削加工的，主要用于工件的精加工，磨削加工可使工件表面粗糙度达到 $Ra0.8 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ，加工精度达 IT6 ~ IT5，超精磨削时，加工精度会更高。

磨削砂轮由于磨料、结合剂及制造工艺的不同，特性差别很大，对磨削加工质量、生产效率和经济性有重要影响。常用的磨料有刚玉和碳化硅两类。磨粒的大小用粒度表示，粒度号数越大，颗粒越小。一般情况下粗加工及磨削软材料时选用粗磨粒，精加工及磨削脆性材料时选用细磨粒。

磨床按用途不同可分为外圆磨床、内圆磨床、平面磨床、无心磨床、工具磨床、螺纹磨床、齿轮磨床以及其它各种专用磨床等。图 11.3.6 所示为 M1432 型万能外圆磨床的外形图。

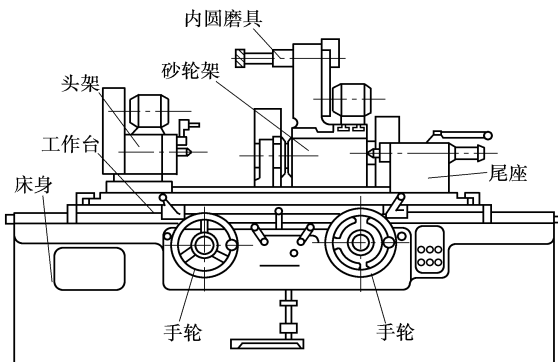


图 11.3.6 M1432 型万能外圆磨床

11.4 数控加工与特种加工

11.4.1 数控加工

数控加工是根据被加工零件图样及工艺要求，编制成以数码表示的程序，输入到机床数控系统中，以控制工件和刀具的相对运动，使之加工合格零件的方法。数控机床的种类较多，如数控车床、数控铣床等。加工中心是设有刀库和刀具自动交换装置的数控机床，工件一次装夹后，可自动更换刀具并连续地对零件各加工表面进行车、铣、钻、镗、攻螺纹等多种加工。数控加工现已成为现代机械制造的核心应用技术。

数控加工有以下特点：

小批量生产。

工件夹具的数量与投资。

1. 数控车床

数控车床一般由车床主体、数控装置和伺服系统三大部分组成，如图 11.4.1 所示。

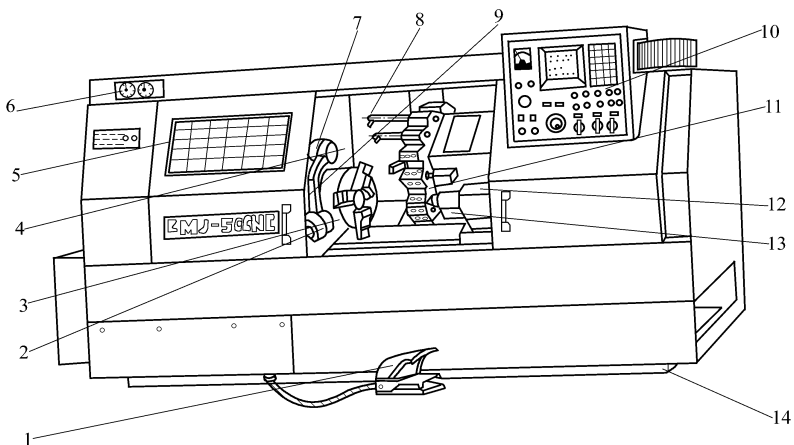


图 11.4.1 MJ - 50 卧式数控车床外形图

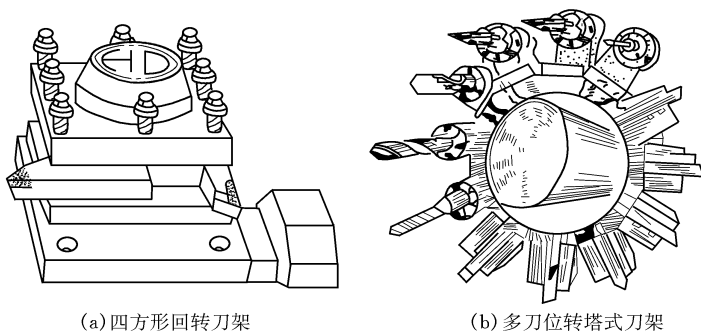
1—主轴卡盘夹紧、松开脚踏开关；2—对刀仪；3—卡盘；4—主轴箱；5—防护门；6—液压系统压力表；7—对刀仪防护罩；8—导轨防护罩；9—对刀仪转臂；10—数控装置；

11—回转刀架；12—尾座；13—倾斜滑板；14—床身

主轴与主轴箱 数控车床的主轴一般具有同步运行、自动变速及定向准停功能。其主轴箱的结构较普通车床简单，全功能数控车床主传动系统一般采用交流无级调速电机。

导轨及进给传动机构 数控车床多采用贴塑导轨，摩擦系数小，低速进给平稳性好。进给传动系统简单，卧式数控车床只有纵向、横向进给滚珠丝杠传动机构，它将进给伺服电机的旋转运动转变为刀架的纵、横向直线运动。

自动转位刀架 亦称回转刀架。通常为四方形回转刀架
安装四把或六把刀具。全功能数控车床一般装有多刀位转塔式刀架



(a) 四方形回转刀架

(b) 多刀位转塔式刀架

图 11.4.2 四方形回转刀架与多刀位转塔式刀架

数控装置 数控装置的核心是计算机。它接受数控程序或操作按钮输入的各种信息，并对这些信息进行译码、计算、处理，向伺服驱动机构发出执行命令，控制车床的运行。

伺服系统 是以机械位移为直接控制目标的自动控制系统，它准确执行数控装置发出的命令，通过驱动电路和执行元件

检测装置 它将位移、速度等信息反馈给数控装置，以便经处理后发出新的执行命令。

2. 数控加工操作要点

11.4.2 特种加工

随着科学技术的发展，具有高强度、高硬度、高韧性、高脆性的材料不断出现，各种复杂

结构及特殊工艺要求越来越多，采用传统的切削加工已不能适应这些新材料及特殊工艺要求的加工，特种加工与传统的金属切削加工不同点在于它不是主要依靠机械性能，而是直接利用电、光、声、化学等能量来去除工件材料。特种加工方法很多，包括电火花加工，线切割加工、激光加工、超声波加工、电子束、离子束加工等。

1. 电火花加工

电火花加工的原理是利用工具电极与工件电极间放电时电腐蚀来蚀除工件材料的。它可以用于穿孔，型腔加工、切割加工、表面强化等。电火花加工多用于模具生产中，可以加工淬硬或非淬硬的金属材料。

2. 线切割加工

线切割加工实质上也是电火花加工方法的一种，它是以金属丝（0.02 ~ 0.3 mm 的钼丝）

电压，当两极间的距离很近时，在两极间产生放电击穿作用，由于高温点的金属局部熔化或气化。

线切割加工时，无明显的机械切削力，它可加工导电的超硬材料（石等）

表面粗糙度 Ra 可达 $1.6 \mu\text{m}$ 。

3. 激光加工

激光加工是靠光能量进行加工的，它利用光学系统将强度高，方向性好，单色性好的激光束聚成一个极小的光斑，使光斑周围的金属熔化。

激光加工生产效率高，热影响区小，能加工微孔等材料的加工。

4. 超声加工

超声加工是利用声能进行加工的，它是利用超声波发生器产生的超声波使工件与工具间悬浮液中的磨粒发生振动，迫使磨粒以很大的速度和加速冲击、抛磨工件。超声加工特别适用于脆性材料，如玻璃、陶瓷、金刚石等的加工。

思考题与习题

- 11.1 切削运动按其功能可分为几种？
- 11.2 如何选择刀具的前角，后角及主偏角？
- 11.3 刀具材料应具备哪些性能？常用的刀具材料有哪些？
- 11.4 切削液的种类及其特点有哪些？
- 11.5 车刀的切削部分是由哪些部分组成的？
- 11.6 在车床上能加工哪些表面？
- 11.7 车外圆常用哪些车刀？车削细长轴的外圆时，为什么常用 90° 的偏刀？
- 11.8 车螺纹时为何必须用丝杠带动刀架移动？主轴转速与刀具移动速度有何关系？
- 11.9 在车床上车圆锥常用方法有哪些？各有何特点？
- 11.10 卧铣与立铣的主要区别是什么？

-
- 11.11 铣床能加工哪些表面？各用什么刀具？
 - 11.12 刨削时刀具和工件作哪些运动？与车削相比，刨削运动有何特点？
 - 11.13 刨刀有哪几种？各适合于加工什么表面？
 - 11.14 万能外圆磨床功用有哪些？
 - 11.15 平面磨削常用的方法有哪些？各有何特点？
 - 11.16 数控加工有什么特点？
 - 11.17 试述数控车床的一般操作过程。
 - 11.18 你所在的实训基地或车间有哪些特种加工设备？简述其特点和应用。

第 12 章 非金属材料成形工艺

问一问，想一想：塑料、橡胶、陶瓷等非金属材料以及玻璃钢这样的复合材料的成形工艺与金属材料有什么不同？比如我们常见的塑料饮料瓶是怎么做出来的？

学习目标

1. 重点了解工程塑料的基本成形及其工艺特点；
2. 了解橡胶、陶瓷与复合材料的成形工艺方法及其特点。

由于非金属材料及复合材料的发展日新月异，因此了解这类材料的成形工艺也是十分必要的。事实上，非金属材料的成形，如塑料的注塑、挤塑、压塑、铸塑等成形方法，其工艺实质与金属的铸造、压力加工等是相同或相近的。

12.1 塑料成形

塑料制品的生产主要由成形、机械加工、修配和装配等过程组成。其中成形是塑料制品成形生产最重要的基本工序。工程塑料的成形就是将粉状、粒状、溶液等各种物态的聚合物料转变为所需形状制品的过程。

12.1.1 挤出成形

挤出成形亦称挤塑，是热塑性塑料成形中变化最多、用途最广的一种加工方法。挤出成形过程一般分为两个阶段：第一阶段是使固态塑料塑化，并在加压情况下使其通过特殊形状的模口而成为截面与模口形状相似的连续体；第二阶段是用适当的处理方法使挤出的具有粘流态的连续体转变为玻璃态的连续体，即可得到所需型材或制品，如图 12.1.1 所示。

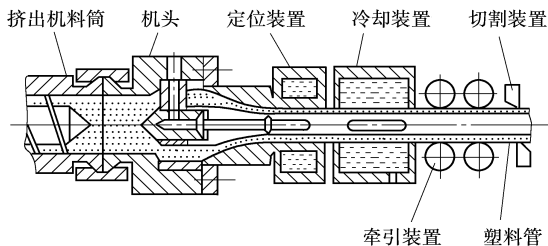


图 12.1.1 挤出成形示意图

挤出成形的设备可分为连续式（螺杆式）和间歇式（柱塞式）两种。这种成形方法具有生产过程连续、生产率高、应用范围广、适应性强等特点。主要用于生产塑料板材、片材、棒材、异型材、电缆护层等。目前，挤塑制品约占热塑性塑料制品的 40% ~ 50%。此外，挤塑方法还可以用于某些热固性塑料和树脂基复合材料成形。

12.1.2 注射成形

注射成形也称注塑，是利用注射机将熔化的塑料快速注入闭合的模具内并固化而得到各种塑料制品的方法。注塑制品品种繁多，如日用塑料制品、机械设备和电器的塑料配件等。除氟塑料外，几乎所有的热塑料都可采用注塑加工；也可用于某些热固性塑料。注塑加工具有生产周期短、生产率高、易于实现自动化生产和适应性强的特点。目前，注塑制品约占热塑性塑料制品的 20% ~ 30%。

注塑机是注塑加工的主要设备，按注射方式可分为往复螺杆式、柱塞式，其中前者用得最多。注塑机除了液压传动系统和自动控制系统外，主要部分为注射装置、模具和合模装置。注射装置使塑料在机筒内均匀受热融化并以足够的压力和速度注射到模具模腔内。注射过程包括加料、塑化、注射、冷却和脱模等工序。经冷却定型后，通过开启动作和顶出系统即可得到制品。现代化注塑设备可通过设定控制压力、速度、温度、时间等参数，即可实现全自动生产过程。注塑工艺过程包括：成形前的准备、注射过程、制品后处理等。注塑生产示意图如图 12.1.2。

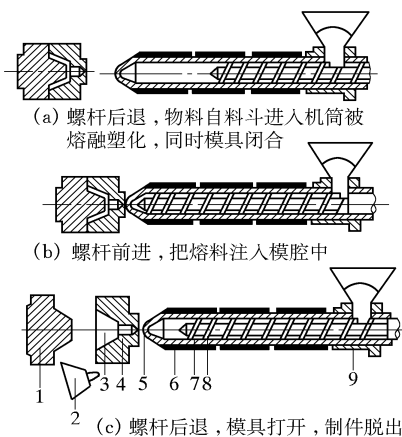


图 12.1.2 注塑生产示意图

1—模具；2—制品；3—模腔；4—模具；5—喷嘴；6—加热套；7—机筒；8—螺杆；9—料筒

12.1.3 压制成形

压制成形也称压塑，是塑料加工生产中最传统的工艺方法，通常用于热固性塑料的成形。压制成形主要有模压法和层压法两种。模压法是将称量好的原料置于已加热的模具模腔内，通过压机压紧模具加压，塑料在模腔内受热塑化

反应而固化得到塑料制品的过程。图 12.1.3 为模压机结构示意图。

压制过程包括加料、闭模、排气、固化、脱模和吹洗模具等步骤。与挤塑和注塑相比，压塑设备、模具和生产过程控制较为简单，并易于生产大型制品；但生产周期长、效率低，较难实现自动化，工人劳动强度大，难于成形厚壁制品及形状复杂的制品。

12.1.4 浇铸成形

浇铸成形又称铸塑，是将处于流动状态的高分子材料或能生成高分子成形物的液态单体材料注入特定的模具中，在一定的条件下使之反应固化，从而得到与模具型腔相一致的制品的工艺方法。浇铸成形既可用于塑料制品的生产，也可用于橡胶制品的生产。

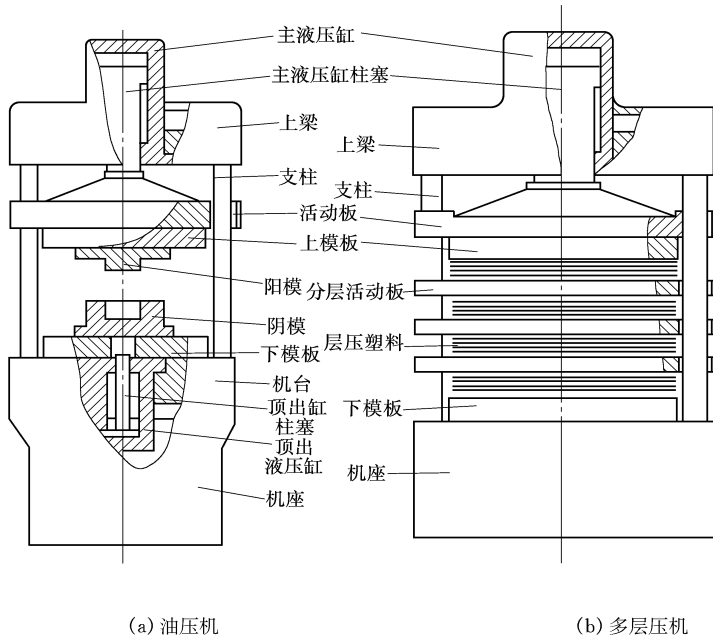


图 12.1.3 模压机结构示意图

按照模具结构不同可分为敞开式浇铸、水平浇铸、侧立式浇铸、倾斜式浇铸等。敞开式浇铸如图 12.1.4 所示。该浇铸成形装置结构简单，一般只有阴模，排气容易，所得制品内部缺陷较少，通常用于制造外形较简单的制品。

铸塑方法生产设备简单，成形过程无需加压，宜生产小批量的大型制品，制品内应力较小，质量优良。但其生产周期较长，制品尺寸准确性较差，生产率不高。浇铸尼龙的成形和有机玻璃的生产就采用此方法。

12.1.5 吹塑成形

吹塑成形简称吹塑，也称为中空成形，属于塑料的二次加工，是制造空心塑料制品的方法。吹塑生产过程是先挤塑、注塑等方法制成管状型坯，然后把保持适当温度的型坯置于对开的阴模模腔中，将压缩空气通入其中将其吹胀，紧紧贴于阴模内壁，两半阴模构成的空间形状即制品形状。吹塑成形的生产过程示意图见图 12.1.5。吹塑成形方法广泛用于生产口径不大的瓶、壶、桶等容器及儿童玩具等。最常用的塑料是聚乙烯、聚碳酸酯等。

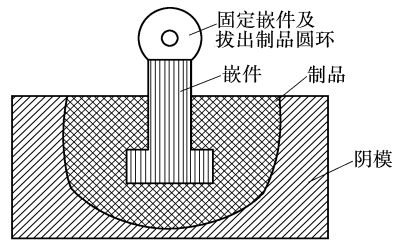


图 12.1.4 敞开式浇铸

12.1.6 回转成形

回转成形(或旋转成形)

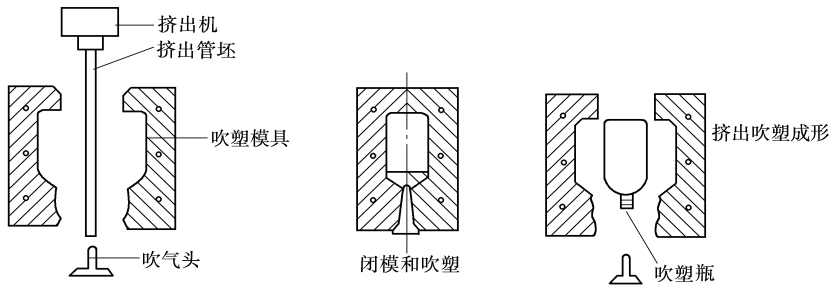


图 12.1.5 吹塑成形示意图

直轴不断旋转并使之加热，模内塑料逐渐均匀地涂布、熔融粘附于模腔的整个表面上，成形为所需要的形状，经冷却定型而得到塑料制件。

滚塑工艺使用的设备和模具较之吹塑、注塑等成形方法更为简单、价廉，投资少，新产品更新快，正确地应用滚塑工艺可以获得巨大的经济效益。滚塑成形现已得到广泛应用，既可制作小巧的儿童玩具，也可制作庞大的塑料贮槽、塑料游艇等。

12.2 橡胶成形

橡胶有良好的弹性和耐磨性、绝缘性，因而成为常用的弹性材料、密封材料、减振材料和传动材料。橡胶制品的生产一般要经过塑炼、混炼、压延与压出、硫化等几个工序。

塑炼是生胶在力的作用和氧化裂解作用下，使部分橡胶长分子链被切断，分子质量分布趋于均匀，降低弹性，增加可塑性的过程。通常在炼胶机上进行。

混炼是使生胶和配合剂混合均匀的过程，在混炼机上进行。混炼除了要严格控制温度和时间外，还应注意加料顺序。混炼越均匀，制品质量越好。

压延所用设备为压延机，是将胶料压成薄膜和片材的成形方法，还可在胶片上压出某种花纹，其既可用于塑料，也可用于橡胶。如在最后一对辊间同时通过已经处理的纸张或织物，使热的塑料或橡胶膜片在辊筒压力下与这些基材贴合在一起，可制造出复合制品。这种方法称为压延贴合，对橡胶而言，又称贴胶。大家熟悉的人造革、壁纸等均是塑料与基材的复合制品。

压出是橡胶加工中的一项基础工艺。其基本作业是在压出机中对胶料加热与塑化，通过螺杆的旋转，使胶料在螺杆和机筒壁之间受到强大的挤压力，不断地向前移送，并借助口型压出各种断面的半成品，以达到初步造型的目的。在橡胶工业中压出的产品很多，如轮胎胎面、内胎、胶管内外层胶、电线、电缆外套以及各种异形断面的制品等。

硫化是橡胶加工的主要工序之一，是橡胶由线型结构变为体型结构的工艺过程。其目的是使橡胶具有足够的强度、耐久性以及抗剪切和其它变形能力，减少橡胶的可塑性。

12.3 陶瓷成形

陶瓷制品的生产过程主要包括配料、成形、烧结三个阶段。烧结是通过加热使粉体产生颗

粒粘结，经过物质迁移使粉体产生高强度并导致致密化和再结晶的过程。陶瓷由晶体、玻璃体和气孔组成，显微组织及相应的性能都是经烧结后产生的。烧结过程直接影响晶粒尺寸与分布、气孔尺寸与分布等显微组织结构。陶瓷经成形、烧结后还可以根据需要进行磨削加工和抛光，甚至切削加工。通过研磨、抛光，陶瓷表面可达镜面的光洁度。很显然，在原料确定之后，陶瓷制品的组织结构及性能主要依靠烧结，而其形状、尺寸及精度等则要靠烧结成形及烧结后的加工。

12.3.1 压制成形

压制成形根据粉料中含水量的多少分为干压成形、半干压成形等。干压成形是将粉料装入钢模内，通过模冲对粉末施加压力，压制成具有一定形状和尺寸的压坯的成形方法。卸模后将坯体从阴模中脱出。图 12.3.1 为干压成形示意图。

由于压制过程中粉末颗粒之间、粉末与模冲、模壁之间存在摩擦，使压力损失而造成压坯密度不均分布，故常采用双向压制并在粉料中加入少量有机润滑剂

剂
般适用于形状简单、尺寸较小的制品。

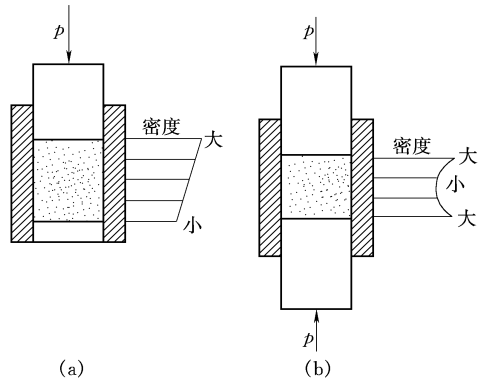


图 12.3.1 干压成形示意图

12.3.2 注浆成形

注浆成形是将陶瓷颗粒悬浮于液体中，然后注入多孔质模具，由模具的气孔把料浆中的液体吸出，而在模具内留下坯体的成形方法。主要有空心注浆和实心注浆两种。

空心注浆是将泥浆注入模型，当铸件达到要求厚度时，排除多余泥浆而形成空心铸件，如图 12.3.2 所示。它要求石膏模型单面吸浆，模型工作面的形状决定坯体的外形，坯体的厚度取决于泥浆在模型中停留的时间。这种方法适合于小件、薄壁制品的成形。另外，金属铸造生产的离心铸造、真空铸造、压力铸造等工艺方法也被引用于注浆成形，并形成了离心注浆、真

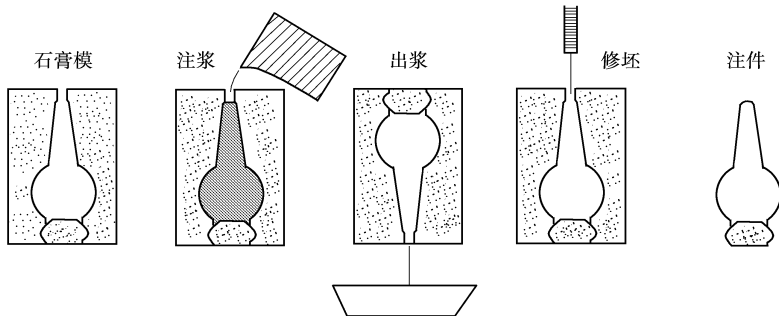


图 12.3.2 空心注浆示意图

空注浆、压力注浆等方法。离心注浆适用于制造大型环状制品，而且坯体壁厚均匀；真空注浆可有效去除料浆中的气体；压力注浆可提高坯体的致密度，减少坯体中的残留水分，缩短成形时间，减少制品缺陷，是一种较先进的成形工艺。

12.3.3 注射成形

将粉料与有机粘接剂混合后，加热混练，制成粒状粉料，用注射成形机在 130~300 温度下注射入金属模具中，冷却后粘接剂固化，取出坯体，经脱脂后就可按常规工艺烧结。这种工艺成形简单，成本低，压坯密度均匀，适用于复杂零件的自动化大规模生产。

12.4 复合材料成形

复合材料成形工艺的实质和特点主要取决于复合材料的基体。一般情况下其基体材料的成形工艺方法也常常适用于以该类材料为基体的复合材料，特别是以颗粒、晶须及短纤维为增强体的复合材料。例如，金属材料的各种成形工艺多适用于颗粒、晶须及短纤维增强的金属基复合材料，包括压铸、精铸、挤压、轧制、模锻等。而树脂基复合材料主要有手糊成形、层压成形、喷射成形和缠绕成形等方法。

12.4.1 手糊成形

这是以手工作业为主的成形方法。先在经清理并涂有脱模剂的模具上均匀刷上一层树脂，再将纤维增强织物按要求裁剪成一定形状和尺寸，直接铺设到模具上，并使其平整。多次重复以上步骤层层铺贴，制成坯件，然后固化成形。其工艺流程如图 12.4.1 所示。

手糊成形主要用于不需加压、室温固化的不饱和聚酯树脂和环氧树脂为基体的复合材料成形。特点是不需专用设备，工艺简单，操作方便，不受制品的尺寸和形状限制。但劳动条件差，生产率低，制品质量不易控制。一般用于成形尺寸大、批量小、形状复杂的制品，如船体、储罐、大口径管道、汽车壳体、飞机机翼、火箭外壳等。手糊成形还用于热压罐、压力袋、压力机等模压成形方法的坯件制造。

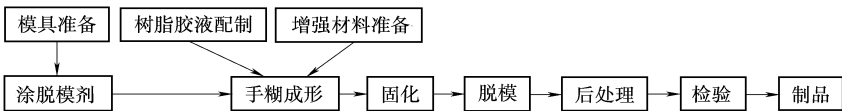


图 12.4.1 手糊成形工艺流程

12.4.2 层压成形

层压成形是制取复合材料的一种高压成形工艺，此工艺多用纸、棉布、玻璃布作为增强填料，以热固性酚醛树脂、环氧树脂及有机硅树脂为粘结剂。其工艺过程如图 12.4.2 所示。

增强填料的浸渍和烘干在浸胶机中进行。增强填料浸渍后连续进入干燥室以除去树脂液中含有的熔液以及其它挥发性物质，并控制树脂的流动度。浸胶材料层压成形是在多层压机上完

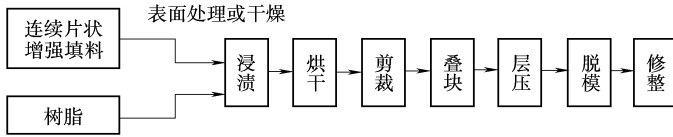


图 12.4.2 层压成形工艺过程

成的。热压前需按层压制品的大小，选用适当尺寸的浸胶材料，并根据制品要求的厚度

面层浸胶材料含树脂量较高、流动性较大，因而可使层压制品表面光洁美观。

12.4.3 喷射成形

喷射成形是将经过特殊处理而雾化的树脂与短切纤维混合并通过喷射机的喷枪喷射到模具上，至一定厚度时，用压辊排泡压实，再继续喷射，直至完成坯件制作成形。主要用于不需加压、室温固化的不饱和聚酯树脂材料。

喷射成形方法生产效率高，劳动强度低，节省原材料，制品形状和尺寸受限制小，产品整体性好；但场地污染大，制件承载能力低。适于制造船体、浴盆、汽车车身等大型部件。

12.4.4 缠绕成形

缠绕成形是把纤维长丝浸渍树脂后按一定规律缠绕在芯模上，经固化成为制品的一种方法，如图 12.4.4 所示。与其它成形方法比较。用该法获得的复合材料制品比强度高，可超过钛合金；纤维按规定方向排列整齐，制品精度高；制品呈各向异性，强度方向性明显，可以按照承力要求确定纤维排布的方向、层次，以实现强度设计，因而制品结构合理。但缠绕成形法需缠绕机、高质量的芯模和专用的固化加热炉，投资较大。目前主要用于缠绕圆柱体及某些回转体制品。

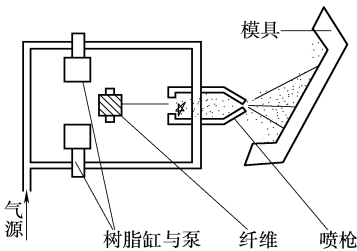


图 12.4.3 喷射成形示意图

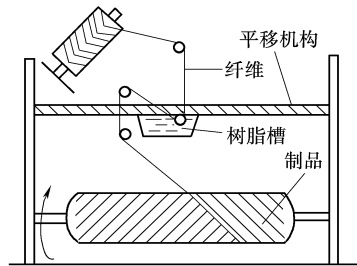


图 12.4.4 缠绕成形示意图

思考题与习题

12.1 工程塑料的中空成形应采用何种工艺？有何特点？

12.2 外形复杂的塑料

12.3 试比较金属铸造与塑料铸造的异同点。

12.4 试比较各类工程塑料的成形方法。

12.5 有一电缆密封装置，要求耐压耐腐蚀、绝缘并宜于螺纹连接，请选用非金属材料及其成形工艺。

12.6 试分析橡胶压出成形的工艺特点。

12.7 陶瓷材料应用在刀具上比其它常用刀具材料成形工艺角度予以说明。

12.8 请举例说明身边的非金属材料是用什么成形工艺制造出来的。

第 13 章 材料与成形工艺选择及产品质量控制

问一问，想一想：以上学习的工程材料和各种成形工艺技术在机械制造或维修等实际工作中是如何综合应用的？您可以回顾一下您在本书第一章学习之初考虑的那个制品或零件为什么？结合实训或工作情况选择并分析一个机械零件的材料和成形工艺。

学习目标

1. 了解机械零件的主要失效形式，零件加工工艺路线的制定，材料及成形工艺的选择原则；
2. 具有选择材料和成形工艺的初步能力，初步具备对机械工程实际问题的综合分析能力；
3. 了解材料的成分分析、组织分析及无损探伤等质量检验方法。

在机械产品的设计、制造过程中，都会遇到材料与成形工艺的选择问题。在生产实践中，往往由于材料的选择和加工工艺路线不当，造成机械零件在使用过程中发生早期失效，给生产带来了重大的损失。因此，在机械制造业中，正确地选择机械零件材料和成形工艺方法，对于保证零件的使用性能要求，降低成本、提高生产率和经济效益，有着重要的意义。

在机械制造业中，工程材料的质量控制是获得高质量产品与赢得市场的重要环节。材料的化学成分、组织状态、性能及其热处理、热加工过程中的变化，需要确定是否合乎要求；原材料及其加工中的缺陷需要确认，并作为改进加工工艺的依据；产品服役过程中的质量需要跟踪等等，都需要通过检验来分析和控制。

13.1 机械零件的失效形式

失效是指零件在使用过程中，由于尺寸、形状或材料的组织与性能发生变化而失去原有设计效能的现象。一般机械零件在以下三种情况下都认为已经失效：零件完全不能工作；零件虽能工作，但已不能完成指定的功能；零件有严重损伤而不能继续安全使用。

零件的失效有达到预定寿命的失效，也有远低于预定寿命的不正常的早期失效。不论何种失效，都是在外力或能量等外在因素作用下的损害。正常失效是比较安全的；而早期失效则会带来经济损失，甚至会造成人身和设备事故。

13.1.1 零件失效原因

引起失效的因素很多，涉及零件的结构设计、材料选择与使用、加工制造、装配、使用保

养等。就零件失效形式而言则与其工作条件有关。零件工作条件包括：应力情况大小 分布 残余应力及应力集中情况等）
温 常温 ,高温或交变温度）

零件失效的原因大体可归纳为图 13.1.1 所示。

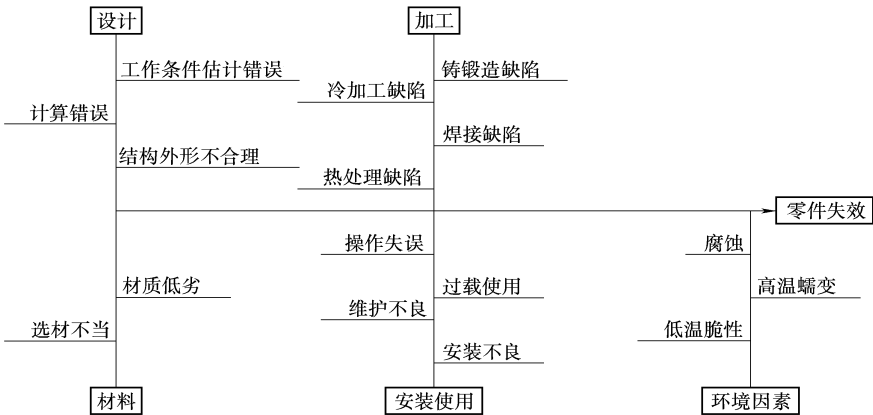


图 13.1.1 零件失效主要原因示意图

13.1.2 零件失效形式

一般机械零件常见的失效形式有：断裂失效，包括静载荷或冲击载荷断裂、疲劳破坏以及应力腐蚀破裂等；磨损失效，包括过量的磨损、表面龟裂、麻点剥落等；变形失效，包括过度的弹性或塑性变形

失效形式及要求的力学性能。图 13.1.2 大致列出了材料的失效分析过程。

表 13.1.1 几种零件工作条件、失效形式及力学性能

零件	工作条件			常见失效形式	要求的主要力学性能
	应力种类	载荷性质	其它		
普通紧固螺栓	拉、切应力	静	—	过量变形、断裂	屈服强度及抗剪强度、塑性
传动轴	弯、扭应力	循环、冲击	轴颈处摩擦、振动	疲劳破坏、过量变形、轴颈处磨损、咬蚀	综合力学性能
传动齿轮	压、弯应力	循环、冲击	强烈摩擦、振动	磨损、麻点剥落、齿折断	表面硬度及弯曲疲劳强度、接触疲劳抗力，心部屈服强度、韧性
弹簧	扭应力 (旋簧) 力	循环、冲击	振动	弹性丧失、疲劳断裂	弹性极限、屈强比、疲劳强度

续表

零件	工作条件			常见失效形式	要求的主要力学性能
	应力种类	载荷性质	其他		
油泵柱塞副	压应力	循环、冲击	摩擦、油的腐蚀	磨损	硬度、抗压强度
冷作模具	复杂应力	循环、冲击	强烈摩擦	磨损、脆断	硬度，足够的强度、韧性
压铸模	复杂应力	循环、冲击	高温、摩擦、金属液腐蚀	热疲劳、脆断、磨损	高温强度、热疲劳抗力、韧性和红硬性
滚动轴承	压应力	循环、冲击	强烈摩擦	疲劳断裂、磨损、麻点剥落	接触疲劳抗力、硬度、耐蚀性
曲轴	弯、扭应力	循环、冲击	轴颈摩擦	脆断、疲劳断裂、咬蚀、磨损	疲劳强度、硬度、冲击疲劳抗力、综合力学性能
连杆	拉、压应力	循环、冲击		脆断	抗压疲劳强度、冲击疲劳抗力

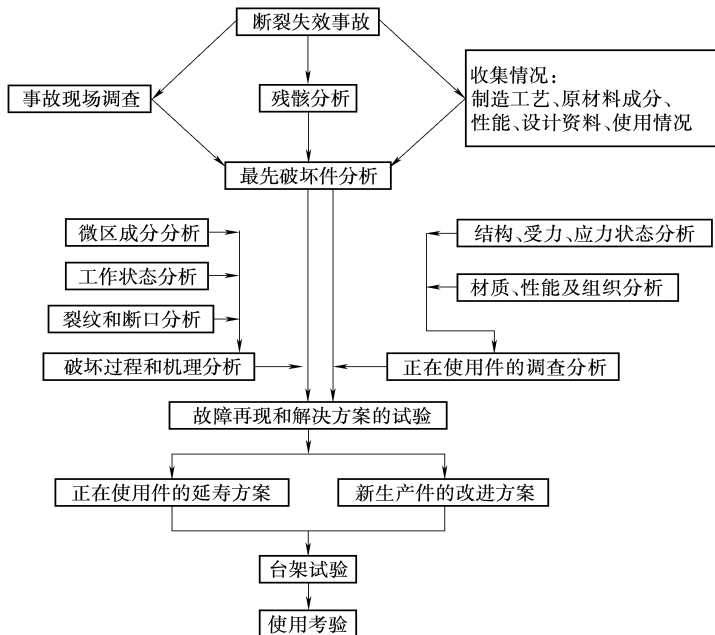


图 13.1.2 失效分析过程

13.2 材料及成形工艺选择原则

在进行材料及成形工艺选择时要具体问题具体分析，一般是在满足零件使用性能要求的情况下，同时考虑材料的工艺性及总的经济性，并要充分重视、保障环境不被污染，符合可持续性发展要求，积极采用生态材料和绿色制造工艺。

材料及成形工艺选择主要遵循以下原则：

13.2.1 使用性原则

材料使用性是指机械零件或构件在正常工作情况下材料应具备的性能。满足零件的使用要求是保证零件完成规定功能的必要条件，是材料及成形工艺选择应主要考虑的问题。

零件的使用要求体现在对其形状、尺寸、加工精度、表面粗糙度等外部质量，以及对其化学成分、组织结构、力学性能、物理性能和化学性能等内部质量的要求上。在进行材料及成形工艺选择时，主要从三个方面给以考虑：零件的负载和工作情况；对零件尺寸和重量的限制；零件的重要程度。零件的使用要求也体现在产品的宜人化程度上，材料及成形工艺选择时要考虑外形美观、符合人们的工作和使用习惯。

由于零件工作条件和失效形式的复杂性，要求在选择时必须根据具体情况抓住主要矛盾，找出最关键的力学性能指标，同时兼顾其它性能。

零件的负载情况主要指载荷的大小和应力状态。工作状况指零件所处的环境，如介质、工作温度及摩擦等。若零件主要满足强度要求，且尺寸和重量又有所限制时，则选用强度较高的材料；若零件尺寸主要满足刚度要求，则应选择 E 值大的材料；若零件的接触应力较高，如齿轮和滚动轴承，则应选用可进行表面强化的材料；在高温下工作的零件，应选用耐热材料；在腐蚀介质中的零件，应选用耐腐蚀的材料。

零件的尺寸和重量还可能影响材料成形方法的选择。对小零件，从棒料切削加工而言可能是经济的，而大尺寸零件往往采用热加工成形；反过来，对利用各种方法成形的零件一般也有尺寸的限制，如采用熔模铸造和粉末冶金，一般仅限于几千克、十几千克的零件。

零件的具体力学性能指标和数值确定之后，即可利用手册选材。但应注意以下几点：材料的性能不仅与化学成分有关，也与加工、处理后的状态有关。应注意手册中的数据是在什么条件下得到的。材料的数据与加工处理时试样的尺寸有关，应注意零件尺寸与手册中试样尺寸的差别，并进行适当的修正。

13.2.2 工艺性原则

材料工艺性是指材料适应某种加工的性能。在零件功能设计时，必须考虑工艺性。有些材料如果仅从零件的使用性能要求来看是完全合适的，但无法加工制造或加工制造很困难，成本很高，这些都属于工艺性不好。因此工艺性的好坏，对决定零件加工的难易程度、生产效率、生产成本等方面起着十分重要的作用，是选材时必须同时考虑的重要因素。

材料的工艺性能要求与零件制造的加工工艺路线密切相关，具体的工艺性能要求是结合制造方法和工艺路线提出来的。材料工艺性能主要包括热处理工艺性、铸造工艺性、锻造工艺

性、焊接工艺性、切削加工工艺性和装配工艺性等。

一般金属材料的加工工艺路线如图 13.2.1 所示。

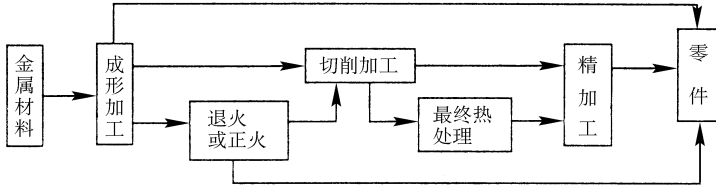


图 13.2.1 金属材料的加工工艺路线

13.2.3 经济性原则

经济性原则一般指应使零件的生产和使用的总成本降至最低，经济效益最高。总成本包括材料价格，零件成品率、加工费用、零件加工过程中材料的利用率、回收率，零件寿命以及材料的货源、供应、保管等综合因素。

1. 材料选定时，应在满足使用性能前提下，尽可能选用价廉材料

材料的直接成本常占到产品价格的 30% ~ 70%，因此能用非合金钢的不用合金钢，能用硅锰钢的不用铬镍钢。表 13.2.1 为我国常用工程材料的相对价格。

表 13.2.1 常用工程材料的相对价格

材 料	相 对 价 格	材 料	相 对 价 格
非合金结构钢	1	非合金工具钢	1.4~1.5
低合金高强度结构钢	1.2~1.7	合金量具刀具钢	2.4~3.7
优质非合金结构钢	1.4~1.5	合金模具钢	5.4~7.2
易切削钢	2	高速工具钢	13.5~15
合金结构钢	1.7~2.9	铬不锈钢	8
镍铬合金结构钢	3	铬镍不锈钢	20
滚动轴承钢	2.1~2.9	普通黄铜	13
弹簧钢	1.6~1.9	球墨铸铁	2.4~2.9

2. 选材时要考虑材料来源，符合国情厂情

含铝超硬高速钢

适合我国资源情况。又如 9Mn2V 钢不含铬元素，符合我国资源情况，故价格较低，性能与 Cr-WMn 钢相近，拉刀、长铰刀、长丝锥等均可使用。

3. 用非金属材料代替金属材料

具有许多优异性能的聚合物材料，在某些场合可代替金属材料，不仅可以降低成本，而且性能可能更为优异。表 13.2.2 列出了某些塑料代替金属的应用实例。

表 13.2.2 用塑料代替金属的应用实例

零件类型	产 品	零件名称	原用材料	现用材料	工作条件	使用效果	
摩擦传动零件	轴 承	四吨载重汽车	底盘衬套 轴承	轴承钢	聚甲醛 F-4 铝粉	低速、重载、 干摩擦	1 万公里以上不用加油 保养
		柴油机	推力轴承	巴氏合 金	喷涂尼龙 1010	在油中工作， 平均滑动线速度 7.1 m/s，载 荷 1.5 MPa	磨损量小，油温比用巴 氏合金时低 10 左右
		水压机	立柱导套	9-4 铝 青铜	MC 尼龙	~ 100 往复 运动	良好，已投入生产
	齿 轮	六角车床	走刀机械 传动齿轮	45 钢	聚甲醛 (铸型尼龙)	摩擦但较平稳	噪声减少，长期使用无 损坏磨损
		起重机	吊索绞盘 传动蜗轮	磷青铜	MC 铸型尼 龙	最大起吊重量 6~7 t	零件质量减轻 80%，使 用两年磨损很小
		万能磨床	油泵圆柱 齿轮	40 Cr	铸型尼龙、 氯化聚醛	转速高 (n/min) 大，在油中运 转 连续工作油压 1.5 MPa	噪声小，压力稳定，长 期使用无损坏
一般结构件	螺 母	铣床	丝杠螺母	锡青铜	聚甲醛	对丝杠不起磨 损作用或磨损极 微，有一定强度、 刚度	良好
	油 管	万能外圆 磨床	滚压系统 油管	紫铜	尼龙 1010	耐压 0.8~2.5 MPa，工作台换 向等精度高	良好，已推广使用
	紧 固 件	外圆磨床	管接头	45 钢	聚甲醛	< 55 ，耐 20 机油压 0.3~ 8.1 MPa	良好
		摇臂钻床	上、下部 管体螺母	HT150	尼龙 1010	室温、冷却液 3 个大气压力	密封性好，不渗漏水
	壳 体 件	万能外圆 磨床	罩壳衬板	镀锌钢 板	ABS	电器按钮盒	外观良好，制作方便
		D26 型电 压表	开关罩	铜合金	聚乙烯	40~60 ，保 护仪表	良好，便于装配
		电风扇	开关外罩	铝合金	改性有机 玻璃	有一定强度， 美观	良好
	手柄手 轮等	柴油机	摇手柄套	无缝钢 管	聚乙烯	一般	良好
		磨床	手把	35 钢	尼龙 6	一般	良好
电焊机		控制滑阀	铜	尼龙 1010	6 个大气压	良好	

4. 材料利用率与再生利用率

材料利用率指零件成品重量

损及成形加工工艺的工作量。在选择材料时尽可能的提高利用率，以增加产品的附加值。材料的再生利用率是现代制造技术关注的问题。在现代产品设计中，不仅要进行结构设计、零件设计、装配设计，而且特别强调拆卸设计，使产品报废处理时，能够进行材料的再循环，节约能源，保护环境。

值得注意的是，选材时不能片面强调材料的费用及零件的制造成本，还需对不同情况下零件的使用寿命给予足够的重视。评价零件的经济效果时，还需考虑其实用过程中的经济效益。如某零件在使用过程即使失效，也不会造成整机破损事故，而且该零件拆换方便，用量又大时，一般希望该零件制造成本低，售价便宜。有些零件，如高速柴油机曲轴、连杆等，一旦该零件失效，将造成整台机器损坏的事故。为了提高零件的使用寿命，材料成本就可以较高，但从整体经济性看也是合理的。还有一些关键零件，当其性能提高以后，可使整个产品的性能指标得以提高，往往可以取得整体较好的经济效益。有时关键零件的成本稍高些，而产品的价值却会有大幅度的提高。总之，通过降低成本和改善功能，要力求充分合理化，使整体经济效益最好。

13.3 材料及成形工艺选择的方法

13.3.1 材料及其成形工艺选择的步骤

零件材料的合理选择通常是按照以下步骤进行的。

的失效抗力指标，以此作为选材的依据。表 13.3.1 列出了几种机械零件主要损坏形式和主要抗力指标。

表 13.3.1 几种机械零件主要损坏形式和主要抗力指标

零件名称	工作条件	主要损坏形式	主要抗力指标
重要螺栓	拉应力或交变应力冲击载荷	拉断(过量塑性变形) 疲劳断裂	$\sigma_{0.2}$, σ_{-1p} , HB
重要传动齿轮	交变弯曲应力；交变接触应力；冲击载荷；齿表面摩擦与磨损	齿的折断；过度磨损； 疲劳麻点	σ_{-1} , σ_{bb} , HRC, 接触 疲劳强度
曲轴、轴类	交变弯曲应力；扭转应力；冲击负荷；磨损	疲劳破坏造成断裂；过 度磨损	$\sigma_{0.2}$, σ_{-1} , HRC
滚动轴承	点或线接触下的交变应力磨损	过度磨损破坏；疲劳破 坏造成的断裂	σ_e , σ_{bc} , σ_{-1} , HRC
弹 簧	交变应力冲击、振动	弹力丧失；疲劳破坏引 起断裂	σ_e , σ_s , σ_b , σ_{-1p}

注： σ_{-1p} 为抗压或对称拉伸时的疲劳强度； σ_{-1} 为光滑试样对称弯曲应力的疲劳强度； σ_{bb} 为抗弯强度； σ_{bc} 为抗压强度； $\sigma_{0.2}$ 为规定残余伸长应力； σ_e 为弹性极限； σ_s 为屈服强度； σ_b 为抗拉强度。

要力学性能指标，正确选择材料。这时要综合考虑所选材料应满足失效抗力指标和工艺性的要求，同时还需考虑所选材料在保证实现先进工艺和现代生产组织方面的可能性。

并提出所选材料在供应状态下的技术要求。

理的生产成本等)

机械零件选材的步骤可归纳为图 13.3.1 所示。

13.3.2 材料及成形工艺选择方法及依据

材料及成形工艺的选择方法应具体问题具体分析，主要依据有：

1. 依据零件的结构特征选择

机械零件常分为：轴类、盘套类、支架箱体类及模具等类零件。轴类零件几乎都采用锻造成形方法，材料为中碳非合金钢或合金钢如 45 钢和 40Cr；异型轴也采用球墨铸铁毛坯；特殊要求的轴也可采用特殊性能钢。盘套类零件以齿轮应用为最广泛，以中碳钢锻造及铸造为多。小齿轮可用圆钢为原料，也可采用冲压甚至直接冷挤压成形。箱体类零件以铸件最多，支架类件少量时可采用焊接获得。

2. 依据力学性能要求选择

如果是新设计的关键零件，通常还应进行必要的力学性能试验；如是一般的常用零件（轴类零件或齿轮等）

以上选择原则及依据等来进行选材。在按力学性能选材时，其具体方法有以下三种类别：

当零件工作时承受多类载荷时，其失效形式主要是过量变形与疲劳断裂，要求材料具有较高的强度、疲劳强度、塑性与韧性，即要求有较好的综合力学性能。如气缸螺栓、锻锤杆、连杆等，一般可采用调质状态的非合金钢，调质或渗碳合金钢；正火或等温淬火状态的球墨铸铁等来制造。

对传动轴及齿轮等零件，整个截面上受力是不均匀的（最大而齿轮齿根处承受很大的弯曲应力）疲劳强度，应适当提高抗拉强度。在抗拉强度相同时，调质后的组织组织的塑性、韧性好，并对应力集中敏感性较小，因而具有较高的疲劳强度。表面处理除可提

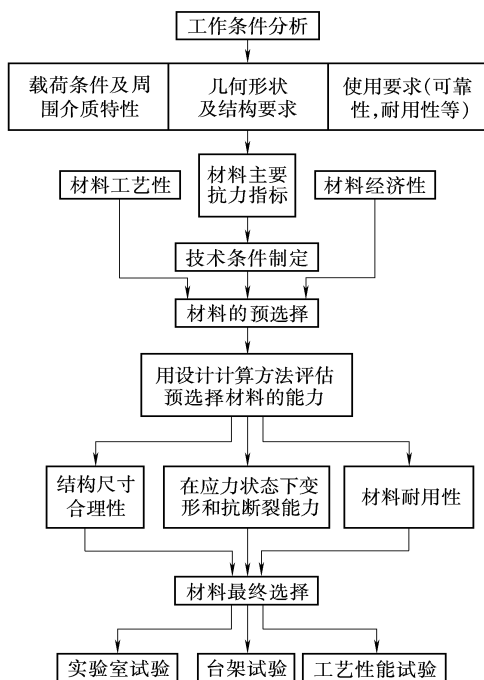


图 13.3.1 机械零件选材的一般步骤

高表面硬度外，还可在零件表面造成残余应力，可以部分抵消工作时产生的拉应力，是最有效的提高疲劳强度的方法。

两零件摩擦时，磨损量与其接触应力、相对速度、润滑条件及摩擦副的材料有关。而材料的耐磨性是其抵抗磨损能力的指标，它主要与材料硬度、显微组织有关。根据零件工作条件的不同，其选材也有所不同：在受力较小、摩擦较大的情况下，其主要失效形式是磨损，故要求材料具有高的耐磨性，如各种量具、冷冲模等。同时受磨损与循环载荷、冲击载荷的零件，其失效形式主要是磨损、过量的变形与疲劳破坏。如传动齿轮、凸轮等。为了使心部获得一定的综合力学性能，且表面有高的耐磨性，应选适于表面热处理的钢材。

3. 依据生产批量选择

生产批量对于材料及其成形工艺的选择极为重要。一般的规律是，单件、小批量生产时铸件选用手工砂型铸造成形；锻件采用自由锻或胎模锻成形方法；焊接件则以手工或半自动的焊接方法为主；薄板零件则采用钣金、钳工等。在大批量生产的条件下，则分别采用机器造型、模锻、埋弧自动焊及板料冲压等成形方法。

在一定条件下，生产批量也会影响成形工艺。机床床身，一般情况下都采用铸造成形，但在单件生产的条件下，经济上往往并不合算；若采用焊接件，则可大大降低生产成本，缩短生产周期，当然焊接件的减震、耐磨性不如铸件。

表 13.3.2 列出了在各种生产类型情况下适用的成形工艺方法。

表 13.3.2 各种生产类型适用的工艺方法

单件小批生产	成批生产	大量(连续)
(((
(((
(((
(((
(((
(((

4. 依据最大经济性选择

为获得最大的经济性，对零件的材料选择与成形方法要具体分析。表 13.3.3 为常用毛坯类型及其制品的比较。

5. 依据生产条件选择

在一般情况下，应充分利用本企业的现有条件完成生产任务。当生产条件不能满足产品要求时，可供选择的途径有：第一，在本厂现有的条件下，适当改变毛坯的生产方式或对设备进行适当的技术改造；第二，扩建厂房，更新设备，提高企业的生产能力和技术水平；第三，厂外协作。

材料的选择往往是根据手册与经验，加上力学核算。随着计算机的普及，在设计与制造中的材料选择也可通过材料性能数据库，按性能要求选择材料。材料性能数据和结构分析相结合是现代化设计工作的基础。迅速而准确地获得所需材料的性能数据是工程技术人员必须掌握的基本技能。

表 13.3.3 常用毛坯类型及其制品的比较

毛坯类型 比较内容	铸 件	锻 件	冲 压 件	焊 接 件	轧 材
成型特点	液态下成形	固态下塑性变形	同锻件	永久性连接	同锻件
对原材料工艺性能要求	流动性好, 收缩率低	塑性好, 变形抗力小	同锻件	强度高, 塑性好, 液态下化学稳定性好	同锻件
常用材料	灰铸铁、球墨铸铁、中碳钢及铝合金、铜合金等	中碳钢及合金结构钢	低碳钢及有色金属薄板	低碳钢、低合金钢、不锈钢及铝合金等	低、中碳钢、合金结构钢及铝合金、铜合金等
金属组织特征	晶粒粗大、疏松、杂质排列无方向性	晶粒细小、致密、晶粒呈方向性排列	拉深加工后沿拉深方向形成新的流线组织, 其他工序加工后原组织基本不变	焊缝区为铸造组织, 熔合区和过热区有粗大晶粒	同锻件
力学性能	灰铸铁件力学性能差, 球墨铸铁、可锻铸铁及铸钢件较好	比相同成分的铸钢件好	变形部分的强度、硬度提高, 结构刚度好	接头的力学性能可达到或接近母材	同锻件
结构特征	形状一般不受限制, 可以相当复杂	形状一般较铸件简单	结构轻巧, 形状可以较复杂	尺寸、形状一般不受限制, 结构较轻	形状简单, 横向尺寸变化小
零件材料利用率	高	低	较高	较高	较低
生产周期	长	自由锻短, 模锻长	长	较短	短
生产成本	较低	较高	批量越大, 成本越低	较高	—
主要适用范围	灰铸铁件用于受力不大或承压为主的零件, 或要求有减震、耐磨性能的零件; 其他合金铁碳铸件用于承受重载或复杂载荷的零件; 机架、箱体等形状复杂的零件	用于对力学性能, 尤其是强度和韧性, 要求较高的传动零件和工具、模具	用于以薄板成形的各种零件	主要用于制造各种金属结构, 部分用于制造零件毛坯	形状简单的零件

续表

毛坯类型 比较内容	铸 件	锻 件	冲 压 件	焊 接 件	轧 材
应用举例	机架、床身、底座、工作台、导轨、变速箱、泵体、阀体、带轮、轴承座、曲轴、齿轮等	机床主轴、传动轴、曲轴、连杆、齿轮、凸轮、螺栓、弹簧、锻模、冲模等	汽车车身覆盖件、机表、电器及仪器、仪表壳及零件、油箱、水箱各种薄金属件	锅炉、压力容器、化工容器管道、厂房构架、吊车构架、桥梁、车身、船体、飞机构件、重型机械的机架、立柱、工作台等	光轴、丝杠、螺栓、螺母、销子等

13.4 典型零件的选材实例分析

金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料是目前的主要工程材料，它们各有自己的特性，所以各有其合适的用途。当然这种情况也在随着科技进步发生着变化。

高分子材料的强度、刚度

还不能用来制造承受载荷较大的结构零件。在机械工程中，常制造轻载传动齿轮、轴承、紧固件及各种密封件等。

陶瓷材料在室温下几乎没有塑性，在外力作用下不产生塑性变形，易发生脆性断裂。因此，一般不用于制造重要的受力零件。但其化学稳定性很好，具有高的硬度和红硬性，故用于制造在高温下工作的零件、切削刀具和某些耐磨零件。由于其制造工艺较复杂、成本高，一般机械工程应用还不普遍。

复合材料综合了多种不同材料的优良性能，如强度、弹性模量高；抗疲劳、减摩、耐磨、减振性能好；且化学稳定性优异；故是一种很有发展前途的工程材料。

金属材料具有优良的综合力学性能和某些物理、化学性能，因此它被广泛地用于制造各种重要的机械零件和工程结构，目前是机械工程中最主要的结构材料。从应用情况来看，机械零件的用材主要是钢铁材料。下面介绍几种典型钢制零件的选材实例。

13.4.1 轴类零件的选材

1. 机床主轴的工作条件及技术要求

(

应具有较高的硬度以增加耐磨性。轴颈的磨损程度决定于与其相配合的轴承类别。在与滚动轴承相配合时，因摩擦已转移给滚珠与套圈，轴颈与轴承不发生摩擦，故轴颈部位没有耐磨要求，硬度一般为 220~250 HBS 即可。但有时为保证装配工艺性和装配精度，对精度高的轴颈，其硬度可提高至 40~50 HRC。在与滑动轴承配合中，轴颈和轴瓦直接摩擦，所以耐磨性要求较高；转速较高且轴瓦材质较硬时，耐磨性要求亦随之提高，轴颈表面硬度也应越高。如与锡

青铜轴承配合的主轴轴颈硬度不得低于 300~400 HBS；对于高精度机床主轴于少量磨损就会导致精度下降，常采用与淬火钢质滑动轴承配合，故主轴轴颈必须具有更高的硬度与耐磨性，常用渗氮钢进行渗氮处理。

对有些带内锥孔或外锥体的主轴，工作时无相对滑动摩擦，但配件装拆频繁，如铣床主轴上需经常调换刀具；磨床头尾架主轴上需调换顶尖和卡盘等，装拆过程中为防止这些部位的磨损，硬度应在 45 HRC 以上；高精度机床应提高到 56 HRC 以上。

转、冲击等。故要求主轴具有抵抗各种载荷的能力。当弯曲载荷较大、转速又很高时，主轴还承受着很高的交变应力。因此要求主轴具有较高的疲劳强度和综合力学性能。

2. 主轴选材实例

主轴材料与热处理的选择主要应根据其工作条件及技术要求来决定。当主轴承受一般载荷、转速不高、冲击与循环载荷较小时，可选用中碳钢经调质或正火处理。要求高一些的，可选取合金调质钢进行调质处理。对于表面要求耐磨的部位，在调质后尚需进行表面淬火。当主轴承受重载荷、高转速、冲击与循环载荷很大时，应选用合金渗碳钢进行渗碳淬火。现以图示 13.4.1 车床主轴分析其选材与热处理方法。

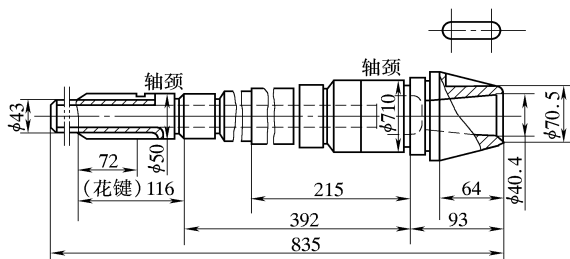


图 13.4.1 车床主轴简图

该主轴选用 45 钢。热处理技术条件为：整体调质，硬度 220~250 HBS；内锥孔与外锥体淬火，硬度 45~50 HRC；花键部位高频淬火，硬度 48~53 HRC。由于主轴上阶梯较多，直径相差较大，宜选锻件毛坯。材料经锻造后粗略成形，可以节约原材料和减少加工工时，并可使主轴的纤维组织分布合理并提高力学性能。

车床主轴的加工工艺路线为：

下料 锻造 正火 机械粗加工 调质 机械半精加工
孔及外锥体)
圆、外锥体及锥孔)

3. 曲轴的选材

曲轴是内燃机中形状复杂而又重要的零件之一，它在工作时受气缸中周期性变化的气体压力、曲柄连杆机构的惯性力、扭转和弯曲应力和冲击力的作用。根据内燃机转速不同，选用不同的材料。表 13.4.1 列出了几种曲轴用材和热处理工艺对比。

表 13.4.1 几种曲轴用材和热处理工艺对比

机 型	曲轴材料	心部热处理		轴颈热处理	
		方式	硬度/HBS	方式	硬度/HRC
解放牌汽车	45 钢	正火	163 ~ 197	高频淬火	52 ~ 62
东方红拖拉机	45 钢	调质	207 ~ 241	高频淬火	52 ~ 62
东方红型内燃机车	42CrMo 钢	调质	255 ~ 302	中频淬火	58 ~ 63
国外高速柴油机	38CrMoAlA	调质		氮化	
东风型内燃机车	球墨铸铁	调质		—	—
东风型内燃机车	合金球铁	喷雾正火、回火	285 ~ 315	镀钛氮化	50 ~ 55

13.4.2 齿轮类零件的选材

1. 齿轮的工作条件、主要失效形式及对材料性能的要求

过程大致相似，只是受力程度有所不同。齿轮工作时，通过齿面的接触传递动力，在啮合齿表面既有滚动又有滑动，有高的接触载荷与强烈的摩擦。传递动力时，其轮齿类似一根受力的悬臂梁，接触作用力在齿根处产生很大的力矩，使齿根部承受较高的弯曲应力。换挡、启动和啮合不均匀时，将承受冲击载荷，也可能因超载而发生脆断。

齿面的剥落形态。

下主要性能。高的接触疲劳抗力。使齿面在受到接触应力后不致发生麻点剥落。通过提高齿面硬度，特别是采用渗碳、碳氮共渗、渗氮等，可大幅度提高齿面抗麻点剥落的能力。高的弯曲疲劳强度，特别是齿根处要有足够的强度，使运行时所产生的弯曲应力不致造成疲劳断裂。

2. 齿轮的选材

机床中齿轮的工作条件和矿山机械、动力机械中的齿轮相比，其运转较平稳、载荷较小。常用的材料有中碳非合金钢或中碳合金结构钢和低合金结构钢

中碳合金结构钢中，最常用的材料是 45 钢和 40Cr 钢。一般 45 钢用于中小载荷齿轮，如床头箱齿轮、溜板箱齿轮等，经高频淬火与低温回火后，硬度值可达 52 ~ 58 HRC；40Cr 钢用作中等载荷齿轮，如铣床工作台变速箱齿轮等，经高频淬火及低温回火后，硬度为 52 ~ 58 HRC。合金渗碳钢中如 20Cr、20CrMnTi、20Mn2B、12CrNi3 等材料，一般用作承受高速、高载荷和有冲击作用的齿轮。

机床齿轮根据所选材料和力学性能要求的不同，其热处理方法及热处理工序位置也会有所不同。对非合金中碳钢或中碳合金结构钢常采用的加工工艺路线为：下料 锻造 正火 机械粗加工 调质 机械精加工 高频淬火 + 低温回火

中，通过它来改变发动机、曲轴和主轴齿轮的转速；在差速器中，通过齿轮来增加扭转力矩，且调节左右两边车轮的转速，并将发动机动力传给主动轮，推动汽车、拖拉机运行，所以其传递功率、受到的冲击力及摩擦压力都很大，工作条件比机床齿轮繁重得多。因此，耐磨性、疲劳强度、心部强度和冲击韧度等方面都有更高的要求。实践证明，选用碳钢经渗碳(渗)所示。

表 13.4.2 汽车发动机零件选用材料概况

典型零件	材料类别牌号	使用性能	失效形式	热处理及其他
缸体、缸盖、飞轮、正时齿轮	灰铸铁 HT200	刚度、强度、尺寸稳定	产生裂纹、孔臂磨损、翘曲变形	不处理或去应力退火，也可 ZL104 淬火时效做缸体、缸盖
缸套、排气门座	合金铸铁	耐磨、耐热	过量磨损	铸造状态
曲轴等	球墨铸铁 QT600 - 2	度、耐磨、疲劳抗力	过量磨损、断裂	表面淬火，圆角滚压、氮化，亦可用锻钢件
火塞销等	渗碳钢 20、20Cr、20CrMnTi、12Cr2Ni4	强度、冲击、耐磨	磨损、变形、断裂	渗碳、淬火、回火
连杆、连杆螺栓、曲轴等	调质钢 45、40Cr、40MnB	强度、疲劳抗力、冲击韧度	过量变形、断裂	调质、探伤
各种轴承、轴瓦	轴承钢和轴承合金	耐磨、疲劳抗力	磨损、剥落、烧蚀破裂	不热处理
排气门	耐热气阀钢 4Cr3Si2、6Mn2Al5MoVnB	耐热、耐磨	起槽、变宽、氧化烧蚀	淬火、回火
气门弹簧	弹簧钢 65Mn、50CrVA	疲劳抗力	变形、断裂	淬火、中温回火
火塞	有色金属合金 ZL110、ZL108	耐热强度	烧蚀、变形、断裂	淬火及时效
支架、盖、罩、挡板、油底壳等	钢板 Q235、08、20、16Mn	刚度、强度	变形	不热处理

13.4.3 手用丝锥的选材

1. 手用丝锥的工作条件及失效形式

手用丝锥是加工金属零件内孔螺纹的刀具。因它用手动攻丝，受力较小，切削速度很低。它的主要失效形式是磨损及扭断。因此，手用丝锥对力学性能的主要要求是：齿刃部应有高硬度与高耐磨性以抵抗磨损；而心部及柄部要有足够强度与韧性以抵抗扭断。

手用丝锥热处理技术条件为：齿刃部硬度 59~63 HRC；心部及柄部硬度 30~45 HRC。

2. 手用丝锥选材举例

根据上述分析，手用丝锥材料的含碳量应较高，使其淬火后获得高硬度，并形成较多的碳化物以提高耐磨性。由于手用丝锥对热硬性、淬透性要求较低，受力很小，故可选用 $w_c = 1\% \sim 1.2\%$ 的碳素工具钢。再考虑到需要提高丝锥的韧性及减小淬火时开裂的倾向，应选硫、磷杂质很少的高级优质碳素工具钢，常用 T12A

为了使丝锥齿刃部具有高的硬度，而心部有足够韧性，并使淬火变形尽可能减小（齿刃部以后不再磨削）

M12 手用丝锥的加工工艺路线为：

下料 球化退火

法加工螺纹)

(发蓝)

淬火冷却时，采用硝酸盐等温冷却。淬火后，丝锥表层组织

渗碳体 + 残余奥氏体，硬度大于 60 HRC，具有高的耐磨性；心部组织为托氏体 + 贝氏体 + 马氏体 + 渗碳体 + 残余奥氏体，硬度为 30~45 HRC，具有足够的韧性。丝锥等温淬火后，变形量一般在允许范围以内。

13.4.4 机架、箱体类零件

1. 机架类零件

各种机械的机身、底座、支架、横梁、工作台以及齿轮箱、轴承座、阀体、导轨等为典型机架类零件，如图 13.4.2 所示。机架类零件的特点是形状不规则，结构比较复杂并带有内腔，

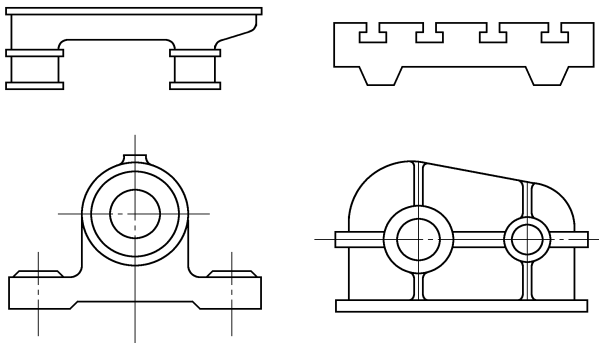


图 13.4.2 机架类零件

质量从几千克至数十吨，工作条件也相差很大。其中一般的基础零件，如机身、底座等，主要起支承和连接机床各部件的作用，而非运动的零件，以承受压应力和弯曲应力为主，为保证工作的稳定性，应有较好的刚度及减振性；工作台和导轨等零件，则要求有较好的耐磨性。这类零件一般受力不大，但要求良好的刚度和密封性，在多数情况下选用灰铸铁件或合金铸钢件，个别特大型的还可采用铸钢 - 焊接联合结构。

按零件类别及结构特征选材时，还应注意到整机是由零件组装而成的，零件特别是整机外表零件对整机的包装、搬运以及外观美都会产生重要影响，因此应注意综合考虑。

2. 箱体类零件

床头箱、变速箱、进给箱、溜板箱、内燃机的缸体等，都可视为箱体类零件。由于箱体大都结构复杂，一般多用铸造的方法生产出来，故几乎箱体都是由铸造合金浇铸而成。

一些受力较大、要求高强度、高韧性，甚至在高温下工作的零件，如汽轮机机壳，可选用铸钢；一些受力不大，而且主要是承受静力，不受冲击的箱体可选用灰铸铁；如该零件在服役时与其它部件发生相对运动，其间有摩擦、磨损发生，则应选用珠光体基体的灰铸铁；受力不大，要求自重轻或要求导热好的则可选用铸造铝合金制造；受力很小，要求自重轻的还可考虑选用工程塑料；受力较大，但形状简单的，可选用型钢焊接而成。

13.5 材料的质量检验

材料的质量检测方法主要有成分分析法、组织分析法和无损检测方法等。

13.5.1 成分分析

金属材料的成分是其组织和性能的基础。成分检验，通常使用火花鉴别、化学分析、光谱分析、电子探针等方法。

1. 火花鉴别

所谓火花鉴别，是将待测的钢铁材料与高速旋转的砂轮相接触，根据产生的火花形状与颜色来近似地确定材料成分的一种鉴别方法。火花鉴别法操作简便、易于施行，是现场鉴别某些钢号的常用方法。同时，对钢渗碳后的表面含碳量、渗氮处理的质量和钢的表面脱碳程度，也能作定性或半定量分析，在生产中有一定的实用价值。

2. 化学分析

化学分析是确定材料成分的重要方法，既可以定性，也可以定量。定性分析是确定合金所含的元素，而定量分析则是确定某一合金的元素含量。化学分析的精确度较高，但时间较长，费用也较高。工厂中常用的化学分析法有滴定法和比色法两种。

滴定法是将标准的已知浓度的溶液滴入被测物质的溶液中，使之发生反应，待反应达到终点后，根据所用标准溶液的体积，计算被测物质的含量。

比色法是利用光线，分别透过有色的标准溶液和被测物质溶液，比较透过光线的强度，以测定被测物质含量。由于出现了高灵敏度、高精度的光度计和新的显色计，这种方法在工业上应用很广。

3. 光谱分析

金属是由原子组成的，原子是由原子核及围绕着原子核在一定能级轨道上运动着的电子组成的。在外界高能激发下，原子将有固定的辐射能，代表该元素的所特有的固定光谱。光谱能表征每一元素。原子在激发状态下，是否具有这种光谱线，是这种物质是否存在标志；光谱的强度，是该元素含量多少的标志。

进行金属的定性和定量的光谱分析时，激发原子辐射光能通常用特殊光源，如电弧或高压火花，使金属变为气态，使所含元素的蒸汽发光，利用分光镜或光谱仪进行定性分析。光的强度

元素的百分含量。所以，要进行定量分析，还必须使用摄谱仪照下光谱的照片，再用光度计测量光谱的强度。对照该标准元素的光谱强度，便可计算出合金中该元素的含量。

光谱分析方法既迅速又价格低廉，消耗材料少。分析少量元素时，灵敏度和精度也比较高。

4. 电子探针

确定合金中各种组成相的成分以及其它细节的成分时，目前广泛使用电子探针来解决。其工作原理如图 13.5.1 所示。

用金相显微镜观察，确定金相试样中的测定点，再用很细的电子射线束射到所选择的某一点，电子碰撞该点原子。引起发射固定波长的 X 射线，这时，该元素原子存在的越多，相应的 X 射线的强度就越强。所以，如果把试样调到该元素的电子射线束的反射角位置，用盖比计数器，计算发射的 X 射线强度，就可测定所选点合金的任何元素的含量。

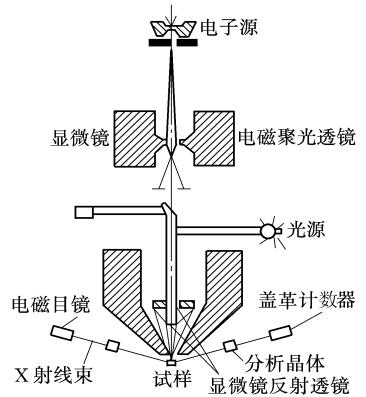


图 13.5.1 电子探针
工作原理示意图

13.5.2 组织分析

1. 低倍分析

低倍分析是指用肉眼或不大于 20 倍的放大镜来观察分析金属及合金的组织状态的方法。这种方法所用设备简单，使用面广。现场常采用这种方法检查宏观缺陷，特别是对断口进行初步的观察与分析。

2. 显微分析

在对各种金属或合金的组织进行研究的方法中，利用金相显微镜来观察和分析金属与合金的内部组织是一项最基本的方法。为了在金相显微镜下确切地、清楚地观察到金属内部的显微组织。金属试样必须进行精心的制备。试样制备过程包括取样、磨制、抛光、浸蚀等工序。

金相显微镜和生物显微镜的构造基本上是相同的，其中主要的区别是：生物显微镜是通过透过过试样的光线进行观察，而金相显微镜则利用试样的反射光线来观察。金相显微镜的种类和形式很多，常见的有台式、立式和卧式三大类，其构造往往由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成，有的还附有摄影装置。图 13.5.2 为 XJB - 1 型金相显微镜的外形结构图。

用光学金相显微镜，对金属磨面
组成物

件的渗碳层、渗氮层等的厚度和特征等。

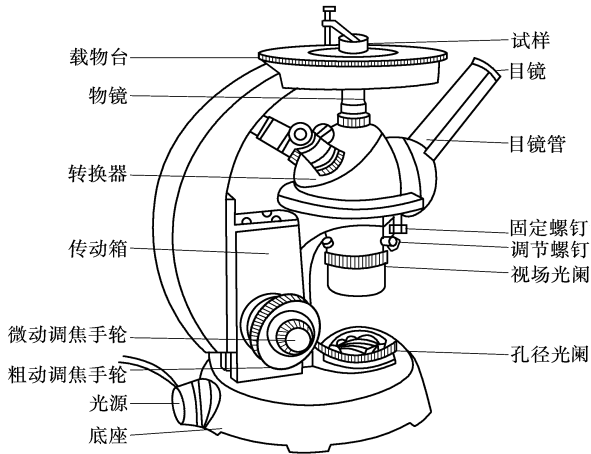


图 13.5.2 XJB - 1 型金相显微镜的外形结构图

深入研究金属的显微结构，常用的光学金相显微镜的放大倍数已不能满足需要。需采用电子显微镜进行分析。电子显微镜是依靠电子束在电磁场内的偏转使电子束聚焦，具有比金相显微镜高得多的放大倍数和分辨本领。它是用电子枪获得的电子射线束，再经过电磁透镜进行聚焦，聚焦后的电子束透过极薄样品，借电磁物镜被放大成中间像，投射在中间像荧光屏上。再经过一组电磁透镜将中间像再次放大到很高的倍数，射在荧光屏上观察，或者射在底片上感光。这样的电子显微镜一般的电压为 $10^3 \sim 10^6$ V，实际分辨率极限在 $2 \sim 100$ Å。高压和超高压透射电子显微镜，可以直接观察薄层晶体，也可以观察复型，获得金属构造的细节和断口的形貌。扫描电子显微镜既能进行表面形貌观察，又能进行成分分析和晶体分析，是一种得到广泛应用的先进的综合分析和检测仪器。

13.5.3 无损探伤

随着机械、石油化工、运输、航空航天等工业的迅速发展，对产品质量的要求越来越严格，尤其是随着动力机械和高压容器向高速、高温、高压方向的发展，不仅对产品内部缺陷的有无提出要求，而且对缺陷的尺寸大小有精确的定量要求。无损检测技术已广泛应用于材料和产品的静态和动态质量检测等方面。

无损检测技术的主要方法有射线探伤、超声波探伤、表面探伤等。

1. 射线探伤

射线探伤是利用射线透过物体后，射线强度发生变化的原理来发现材料和零件的内部缺陷的方法。探伤应用的射线是 X 射线或 γ 射线。由于被检零件与内部缺陷介质对射线能量衰减程度的不同，从而引起射线透过工件后的强度出现差异，这种差异可用胶片记录下来，或用荧光屏、射线探测器等来观察，从而对照标准来评定零件的内部质量。目前工业中应用最广的是

X射线探伤。射线探伤适宜于探测体积型缺陷，如气孔、夹渣、缩孔、疏松等。能发现焊缝中的未焊透、气孔和夹渣等缺陷和铸件中的缩孔、夹渣、疏松、热裂等缺陷。但不适用于检测锻件和型材中的缺陷。

2. 超声波探伤

探伤用超声波，是由电子设备产生一定频率的电脉冲，通过电声换能器冲相同频率的超声波会被反射回来而被探头所接收。如果物体内部存在缺陷，射入的超声波碰到缺陷后会被立即反射回来而被探头所接收。从两者反射回来的声波信号差别，就可在荧光屏上检查出缺陷的大小、性质和存在的部位。超声波探伤的应用范围很广，可探测表面缺陷，也可探测内部缺陷，探测内部缺陷的深度，是目前其它探伤方法所不及的。其特别适用于探测试件内部的面积型缺陷。如裂纹、白点、分层、夹渣、疏松和焊缝中的未焊透等。而不适用于一些形状复杂或表面粗糙的工件。

3. 表面探伤

对于有表面或近表面缺陷的零件而言，在对其磁化时，缺陷附近会出现不均匀的磁场和局部漏磁场。诸如裂纹、气孔和夹杂物等缺陷将阻碍磁力线通过，产生磁力线弯曲现象。当缺陷存在于零件表面或附近时，则磁力线不但会在试件内部产生弯曲，而且还有一部分磁力线绕过缺陷暴露在空气中，产生漏磁，形成S—N极的局部磁场，这个小磁场能吸附磁粉。根据吸附磁粉的多少、形状等可判断缺陷的性质、形状、部位等等，但难以确定缺陷的深度。磁力探伤适于探测铁磁性材料及其工件的缺陷，对裂纹类缺陷最为敏感。

渗透探伤也是目前无损检测常用的方法，它主要用来检查材料或工件表面开口性的缺陷。利用液体的某些特性对材料表面缺陷进行良好的渗透。当显像液喷洒在工件表面时，残留在缺陷内的渗透液又被吸出来，形成缺陷痕迹，由此来判断缺陷。按溶质的不同，渗透探伤可分为着色法和荧光法两种。将工件洗干净后，把渗透液涂于工件表面，渗透液就渗入缺陷内，之后用清洗溶液将工件表面的渗透液洗掉后，将显像材料涂敷在工件的表面，残留在缺陷内的渗透液就会被显像剂吸出，在其表面形成放大的红色的显示痕迹。显示痕迹，则需在紫外线照射下才能发出强的荧光断的目的。

思考题与习题

13.1 零件的常见失效形式有哪几种？它们要求材料的主要性能指标分别是什么？

13.2 分析说明如何根据机械零件的服役条件选择零件用钢的含碳量及组织状态？

13.3 汽车、拖拉机变速箱齿轮多半用渗碳钢来制造，而机床变速箱齿轮又多采用调质钢制造，原因何在？

13.4 某工厂用T10钢制造的钻头对一批铸件钻10深孔，在正常切削条件下，钻几个孔后钻头很快磨损。据检验钻头材料、热处理工艺、金相组织及硬度均合格。试问失效原因，并

提出解决办法。

13.5 生产中某些机器零件常选用工具钢制造。试举例说明哪些机器零件可选用工具钢制造，并可得到满意的效果？分析其原因。

13.6 确定下列工具的材料及最终热处理：

10 麻花钻头。

13.7 下列零件应采用何种铝合金制造？

13.8 指出下列工件在选材与制定热处理技术条件中的错误，说明理由及改正意见：

工件及要求	材 料	热处理技术条件
表面耐磨的凸轮	45 钢	淬火、回火；60 HRC
直径 30 mm，要求良好综合力学性能的传动轴	40Cr	调质；40 ~ 45 HRC
弹簧 (15 mm)	45 钢	淬火、回火；55 ~ 66 HRC
板牙	9SiCr	淬火、回火；55 ~ 66 HRC
转速低、表面耐磨性及心部强度要求不高的齿轮	45 钢	渗碳淬火；58 ~ 62 HRC
钳工凿子	T12A	淬火、回火；55 ~ 66 HRC
传动轴	45 钢	调质；40 ~ 45 HRC
塞规	T7A 或 T8	淬火、回火；55 ~ 66 HRC

13.9 指出下列工件各应采用所给材料中哪一种材料？并选定其热处理方法

工件：车辆缓冲弹簧、发动机排气阀门弹簧、自来水管弯头、机床床身、发动机连杆螺栓、机用大钻头、车床尾架顶针、螺丝刀、镗床镗杆、自行车车架、车床丝杠螺母、电风扇机壳、普通机床地脚螺栓、高速粗车铸铁的车刀。

材料：38CrMoAl、40Cr、45、Q235、T7、T10、50CrVA、16Mn、W18Cr4V、KTH300 - 06、60Si2Mn、ZL102、ZCuSn10P1、YG15、HT200

13.10 工程材料质量检验的范围有哪些？有什么意义？

13.11 工程材料的成分分析、组织分析方法有哪些？

13.12 无损检测有哪几种方法？它们的原理、基本工艺、适用范围是什么？

附录 综合性实验指导

1. 铁碳合金成分、平衡组织与性能间的关系

a. 观察并分析铁碳合金在平衡状态下的显微组织，测定不同含碳量的碳钢在平衡状态下的性能。

b. 了解含碳量对铁碳合金显微组织与性能的影响规律。

c. 熟悉金相显微镜与布氏硬度试验机的使用。

a. 金相显微镜。

b. 铁碳合金金相试样一套。

c. 布氏硬度试验机。

d. 碳钢硬度测定试样一套。

a. 根据提供的铁碳合金金相试样组织判定每个试样的大致成分范围。

b. 绘出所观察的每块试样的显微组织示意图

条件、金相组织与形态、浸蚀剂与放大倍数等。

c. 用布氏硬度计测定三种碳钢试样的硬度。

d. 写出实验报告，并归纳说明铁碳合金成分、平衡组织与性能间的关系。

2. 金属材料的热处理

(

通过金属材料的热处理工艺设计、热处理操作、试样制备、组织观察、显微摄影、性能测定、撰写实验报告等全过程，深入了解金属材料的成分、处理条件、组织、性能之间的相互关系和变化规律，掌握金属材料热处理工艺的制定与分析的一般方法。

a. 高温电阻炉、中温电阻炉及测温仪表。

b. 金相显微镜、金相显微摄影仪。

c. 硬度试验机。

d. 预磨机、砂轮机、抛光机及金相砂纸等。

e. 印相机或放大机等洗印设备与药品。

f. 金属材料试样或零件。

a. 教师提出实验任务与实验的基本要求。

b. 学生自己查阅有关文献资料，做好实验方案设计的准备。

c. 在教师指导下进行实验方案的设计，包括：实验过程及进度安排；仪器设备的选择类、型号等)

画出热处理工艺曲线。提倡采用多种不同方案，以便分析比较。

d. 按所选定参数进行热处理操作。

e. 制备热处理后的组织的金相试样。

f. 在金相显微镜下进行观察，并用金相显微摄影仪选取典型组织拍摄。

g. 进行暗室操作，获得合格的金相照片。

h. 分别测定各个试样的性能指标

i. 对实验过程和结果进行综合性分析，并得出相应的结论。

j. 了解实验报告及工程分析报告的写作并写出实验报告。

a. 综合性实验题目可根据专业特点选择，各校各专业应根据具体情况选择与本专业结合密切、与生产现场有关的力求真实的题目，要使学生有生产技术第一线之感，这样才能学有兴趣，做有实效。

b. 综合性实验要特别强调独立完成，即要求学生从工艺设计、工艺实施到撰写工艺报告，一定要通过自己的独立思考与实践完成。也可成立若干个实验小组进行分析讨论。

3. 钢铁材料的质量检验

(

了解一般工厂常用的材料成分、组织与无损探伤检验方法。

a. 砂轮机。

b. 火花鉴别用试样一套。

c. 断口低倍观察试样一套。

d. 超声波探伤仪。

e. 超声探伤用缺陷样板一套。

a. 绘出观察样品的火花特征示意图，判断其中碳的大致含量和所含合金元素的种类，并大致确定钢号。

b. 掌握材料的低倍分析方法，初步了解钢铁材料的脆性断口、韧性断口及疲劳断口特征。

c. 了解超声波探伤方法。

d. 写出实验报告，并论述材料失效分析的基本过程。

主要参考文献

- 1 丁德全主编. 金属工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 2 杨 森主编. 金属工艺实习. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 3 王纪安主编. 金属工艺学实验. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 4 王雅然主编. 金属工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 5 杨慧智主编. 工程材料及成形工艺基础. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 6 李义增主编. 金属工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 7 相瑜才主编. 工程材料及机械制造基础
- 8 王俊昌主编. 工程材料及机械制造基础
- 9 王荣生主编. 工程材料及机械制造基础
- 10 孙以安主编. 金工实习. 上海: 上海交通大学出版社, 1998
- 11 王焕庭主编. 机械工程材料. 大连: 大连理工大学出版社, 1998
- 12 瞿大中主编. 工程材料与热加工. 成都: 电子科技大学出版社, 1993
- 13 房世荣主编. 工程材料与金属工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 14 王英杰主编. 金属工艺学. 太原: 山西科学技术出版社, 1997
- 15 王隆太主编. 现代制造技术. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 16 沈 莲主编. 机械工程材料与设计选材. 西安: 西安交通大学出版社, 1996
- 17 陈贻瑞等编. 基础材料与新材料. 天津: 天津大学出版社, 1994
- 18 陈昌杰等编. 塑料滚塑与搪塑. 北京: 化学工业出版社, 1997
- 19 胡德昌等编. 新型材料特性及其应用. 广州: 广东科学技术出版社, 1996
- 20 邓文英主编. 金属工艺学. 北京: 高等教育出版社, 1990
- 21 王运炎主编. 机械工程材料. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 22 机械工程手册编辑委员会. 机械工程手册. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 23 热处理手册编委会. 热处理手册. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 24 曹惟诚等编. 胶接技术手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- 25 赵文轸主编. 金属材料表面新技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1993
- 26 张继世主编. 金属表面工艺. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 27 金禧德主编. 金工实习. 北京: 高等教育出版社, 1992
- 28 杜丽娟主编. 工程材料成形技术基础. 北京: 电子工业出版社, 2003
- 29 王爱珍主编. 工程材料及成形技术. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 30 周大恂主编. 机械制造基础实习. 北京: 高等教育出版社, 2003
- 31 孙康宁等编. 现代工程材料成形与制造工艺基础. 北京: 机械工业出版社, 2001
- 32 许德珠主编. 机械工程材料. 北京: 高等教育出版社, 2001
- 33 吕广庶主编. 工程材料及成形技术基础. 北京: 高等教育出版社, 2001

-
- 34 齐宝森等编. 机械工程材料. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003
 - 35 刘天模等编. 工程材料. 北京: 机械工业出版社, 2001
 - 36 齐乐华主编. 工程材料及成形工艺基础. 西安: 西北工业大学出版社, 2002
 - 37 王纪安主编. 工程材料与材料成形工艺. 北京: 高等教育出版社, 2000

第 10 章 电动机的选择

一、基本要求

1. 了解电动机选择的基本内容。
2. 了解电动机发热和冷却的规律。
3. 掌握 S_1 、 S_2 、 S_3 三种基本工作制，了解其他 6 种特殊工作制。
4. 了解电动机额定功率的确定，了解影响电动机实际允许输出功率的主要因素。
5. 掌握恒定负载电动机额定功率的选择。
6. 了解变动负载电动机额定功率的选择。

二、思考题解答

10.2 为什么说电动机运行时的稳定温升取决于负载的大小？

答 负载大，则电流大，损耗大，电机在单位时间内产生的热量 Q 多，电机的稳定温升 $Q_{\infty} = \frac{Q}{A}$ 高。

10. S_1 、 S_2 、 S_3 三种工作制的电动机其发热的特点是什么？

答 连续工作制 S_1 的电动机在恒定负载下运行的时间很长，足以使其温升达到稳定温升。

短时工作制 S_2 的电动机，在恒定负载下运行的时间短，温升达不到稳定温升，断电停转的时间又很长，温升触降至 $2K$ 以下。

断续周期工作制 S_3 的电动机，在恒定负载下运行的时间短，温升达不到稳定温升，断电停转的时间也很短，温升又未降至 $2K$ 以下。

10.4

答 主要考虑了电机的工作制、额定运行条件、电机允许的最高温度、环境温度和海拔高度等因素。

10.4

S_2 和 S_3 工作制设计的电动机改作 S_1 方式运行时，其允许输出的功率要小于其铭牌上标示的额定功率？

答 按 S_2 和 S_3 工作制设计的电动机，其额定功率是最高温升或上限温升等于额定温升时的功率。它们的最高温升和上限温升低于在该功率时的稳定温升。如果改作 S_1 方式运行，而输出功率不变，则电机的稳定温升会超过额定温升，所以允许输出的功率要小于铭牌上标示的额定功率。

10.5

S_2 工作制的电动机，运行时间增加时，它的额定功率是增加了还是减小了？

答 减少了。

10.5

S_3 工作制的电动机，负载持续率减小时，它的额定功率是增加了还是减小了？

答 增加了。

10.6

答 计算法是根据负载图来计算电动机的额定功率的，只有在负载图可靠时，计算才比较准确。但是，有许多生产机械，由于生产工艺的多样性以及原始数据的不足或不准确等原因，很难得到可靠的负载图。而采用统计法和类比法等都比较简单和实用，但也有一定的局限性。

10.6

答 平均损耗温是通过比较损耗的大小来校验发热的，结果比较准确。各种电动机都可采用。但必须知道电动机的效率曲线，计算比较麻烦。

等效电流法是通过比较电流的大小来校验发热的。只适用于电动机的空载损耗和电阻不变，而且转矩与电流成正比的情况。

等效功率法是通过比较功率的大小来校验发热的。只适用于电动机的空载损耗和电阻不变，转矩与电流成正比，而且转速基本不变的情况。

三、练习题解答

10.4.1 某台原为海拔 1 000 m 以下地区设计的电动机，额定功率 $P_N = 11 \text{ kW}$ ，试求在下述两种情况下该电机允许输出的功率：
度为 2 000 m。

解(

$$P_2 = (1 - 5\%) P_N = 0.95 \times 11 \text{ kW} = 10.45 \text{ kW}$$

$$P_2 = 1 - \frac{2\,000 - 1\,000}{100} \times 0.5\% P_N =$$

10.4.2 一台为平原地区设计的电动机，额定功率 $P_N = 30 \text{ kW}$ ，额定温升 $Q_N = 80^\circ$ ，满载时的铁损耗与铜损耗之比 $= 0.6$ 。若将该电机用于海拔高度为 3 000 m、环境温度为 10° 的地区，试问该电机允许输出的功率是多少？

解 温环境度为 10° 时

$$P_2 = P_N \left(1 + 1 + \frac{40^\circ - 10^\circ}{80} \right) = 30 \times 1 \times \frac{40 - 10}{80} \text{ kW} \\ = 37.947 \text{ kW}$$

海拔高度为 3 000 m 时

$$P_2 = 1 - \frac{3\,000 - 1\,000}{100} \times 0.5\% P_2 = (1 - 0.1) \times 37.947 \text{ kW} = 34.15 \text{ kW}$$

10.5.1 现有一台额定功率 $P_N = 55 \text{ kW}$ ，额定转速 $n_N = 980 \text{ r/min}$ 的电动机。欲用它直接拖动离心式水泵，水泵流量 $Q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ，扬程 $H = 21 \text{ m}$ ，效率 $\eta_m = 0.78$ ，转速 $n = 1\,000 \text{ r/min}$ 。试问该电机能否适用？

解 $R_L = \frac{QH}{102 \text{ m t}} = \frac{0.2 \times 1\,000 \times 21}{102 \times 0.78 \times 1} \text{ W} = 52.79 \text{ kW}$

由于 $P_N > P_L$ ，所以该电机适用。

10.5.2 某电力拖动系统中的直流电动机，短时运行时间 $t_w = 45 \text{ min}$ ，负载功率 $P = 70 \text{ kW}$ ，满载时的损耗比 $= 0.6$ ，发热时间常数 $= 100 \text{ min}$ 。不考虑过载能力和起动能力的情况

下，求采用下述三种工作制的电动机时，额定功率不应小于多少？
 $t_{WN} = 30 \text{ min}$ 的 S_2 工作制电动机；
 $FC_N = 25\%$ 的 S_3 工作制电动机。

解 S_1 工作制的电动机时

$$P_{LN} = P_L \frac{1 - e^{-\frac{t_w}{\tau_w}}}{1 + e^{-\frac{t_w}{\tau_w}}} = 70 \times \frac{1 - e^{-\frac{45}{100}}}{1 + 0.6e^{-\frac{45}{100}}} \text{ kW} = 36 \text{ kW}$$

S_2 工作制的电动机时

$$P_{LN} = \frac{P_L}{\frac{t_{WN}}{t_w} - \frac{t_{WN}}{t_w} - 1} = \frac{70}{\frac{30}{45} - 0.6 \times \frac{30}{45} - 1} \text{ kW} = 74 \text{ kW}$$

S_3 工作制的电动机时

$$P_{LN} = \frac{P_L}{\frac{t_{WN}}{t_w} - \frac{t_{WN}}{t_w} - 1} = \frac{70}{\frac{60}{45} - 0.6 \times \frac{60}{45} - 1} \text{ kW} = 66 \text{ kW}$$

10.5.3 某三相笼型异步电动机， $P_N = 15 \text{ kW}$ ， $n_N = 970 \text{ r/min}$ ， $m_T = 2.0$ ， $t_{st} = 1.8$ 。现欲用它直接拖动恒转矩负载作短时运行，负载功率 $P_L = 20 \text{ kW}$ ，运行时间 $t_w = 10 \text{ min}$ ，电机的发热时间常数 $\tau_w = 100 \text{ min}$ 。试问该电动机能否适用？

解 由于 $t_w = 10 \text{ min} < (0.3 \sim 0.4) \times 100 \text{ min} =$
 校验起动能力和载能力即可。

由于 $t_{st} P_N = 1.8 \times 15 \text{ kW} = 27 \text{ kW} > P_L =$
 明 $T_{st} = t_{st} T_N > T_L$ ，起动能力合格。

由于 $m_T P_N = 2.0 \times 15 \text{ kW} = 30 \text{ kW} > T_L = 20 \text{ kW}$ ，说明 $T_M > T_L$ ，过载能力合格。

10.5.4 某生产机械由一台 S_3 工作制的三相绕线型异步电动机拖动。运行时间 $t_w = 120 \text{ s}$ ，停机时间 $t_s = 360 \text{ s}$ ，电动机的负载功率 $P_L = 12 \text{ kW}$ 。试选择电动机的额定功率。

解
$$FC = \frac{t_w}{t_w + t_s} \times 100\% = \frac{120}{120 + 360} \times 100\% = 25\%$$

选择 $FC_N = 25\%$ ， $P_N \geq 12 \text{ kW}$ 的 S_3 工作制电动机。

10.5.5 某 S_3 工作制的电动机，满载损耗比 $\lambda = 0.8$ ，负载持续率为 25% ，它的额定功率为 42 kW 。求负载持续率分别为 15% 、 40% 和 60% 时，该电机允许输出的功率。

解 $FC = 15\%$ 时

$$P = \frac{P_N}{\frac{FC_N}{FC} + \frac{FC_N}{FC} - 1} = \frac{42}{\frac{15}{25} + 0.8 \frac{15}{25} - 1} \text{ kW} = 79.37 \text{ kW}$$

(2) $FC = 40\%$ 时

$$P = \frac{P_N}{\frac{FC_N}{FC} + \frac{FC_N}{FC} - 1} = \frac{42}{\frac{40}{25} + 0.8 \frac{40}{25} - 1} \text{ kW} = 29.12 \text{ kW}$$

(3) $FC = 60\%$ 时

$$P = \frac{P_N}{\frac{FC_N}{FC} + \frac{FC_N}{FC} - 1} = \frac{42}{\frac{60}{25} + 0.8 \frac{60}{25} - 1} \text{ kW} = 22.39 \text{ kW}$$

10.6.1 某生产机械需用一台三相异步电动机拖动，负载曲线如图 10.1 所示。已知 $t_1 = 20$ s, $P_{L1} = 20$ kW, $t_2 = 40$ s, $P_{L2} = 12$ kW, $t_3 = 40$ s, $P_{L3} = 10$ kW。现拟选用的电动机的 $P_N = 15$ kW, $\eta_N = 89.5\%$ 。由该电动机的效率特性查得对应于各段的效率为 $\eta_1 = 85\%$, $\eta_2 = 90\%$, $\eta_3 = 92\%$ 。试用平均损耗法对该电动机作发热校验。

解
$$P_{al1} = \frac{P_{L1}}{\eta_1} - P_{L1} = \frac{20}{0.85} - 20 \text{ kW} = 3.53 \text{ kW}$$

conservation . Consider an isotropic point source in free space , emitting energy equally in all directions

radii