

21 世纪高职高专应用型特色规划系列教材

# 材料工程基础

CAILIAO GONGCHENG JICHU

罗大金 主编



化学工业出版社

21 世纪高职高专应用型特色规划系列教材

# 材料工程基础

罗大金 主编

左传付 范敏 侯景文 杨晓红 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是贯彻落实 2005 年 11 月发布的《国务院关于大力发展职业教育的决定》，按照会议精神，着手课程改革的教材建设编写该书的。本书综合了“金属工艺学”、“工程材料及热处理”、“工模具材料及失效”三门课的内容，突出职业教育要注重实践能力、技能培训和创新能力的特点。全书主要内容包括：材料性能的测试方法和指标表示，金属学基础知识和热处理基本知识，常用金属、非金属和复合材料及金属材料状态图，较详细地介绍了工具和模具材料，较系统地介绍了铸、锻、焊的实质、特点、工艺过程和合理地进行结构设计的工艺原则。同时，还介绍了机械零件和工具、模具失效的形式和原因，介绍了提高各种模具寿命的措施和材料的选择方法。

本书可作为高职高专机械类、机电类专业教材，也可作为专科和本科高等工科院校近机电专业的教材，以及适用于工程技术人员。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

材料工程基础/罗大金主编. —北京: 化学工业出版社, 2007. 7

(21 世纪高职高专应用型特色规划系列教材)

ISBN 978-7-122-00545-8

I. 材… II. 罗… III. 工程材料-高等学校: 技术学院-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 087721 号

---

责任编辑: 高 钰

文字编辑: 王 琪

责任校对: 郑 捷

装帧设计: 高 峰

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 22½ 字数 591 千字 2007 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

在认真学习了《国务院关于大力发展职业教育》的决定和教育部有关高职教育的文件,对近年的高职机电类专业的专业基础课和专业课主要教材作了调查,针对目前的问题,结合机械制造类行业的实际需要,在总结近年课改试验的基础上,与企业共同对高职院校制造类(模具)专业的专业基础课和专业课进行整合。按“中国高等职业技术教育研究会文件”[(2007) 21号],建设6~8门优质核心课程,本书为其中之一。

本教材较系统地介绍了当前机械制造中的热加工部分和材料选择。教学目标是引导学生的工程意识、质量意识、效益意识和环境保护意识,培养和造就素质高、知识面广的应用型人才,培养综合应用能力,引导学生学会应用所学的理论知识解决一些实际问题。本书主要特点如下。

1. 以材料为核心,以制造为主线,以应用为目的,以够用为尺度,按少而精、浅而广的原则打破旧的课程界限和专业体系,精选内容,重新安排,构建应用型的新体系。

2. 按高职高专培养的是应用型高技能人才,应突出专业,以淡化基础为目的,强调专业基础课为专业课打下针对性强的基础,把基础课和专业课进行了力度较大的整合。

3. 根据教学改革的原则和要求,从实际出发,注意实践性、启发性和科学性,力争做到重点突出,概念清晰,简明扼要,着重培养学生灵活应用基础知识解决工程实际问题的能力,同时加强学生的创新能力的培养。

本书由罗大金教授任主编,左传付副教授、范敏副教授、侯景文副教授、杨晓红担任副主编,书中的第一章、第二章由左传付编写,第三章第一节、第四章由栗洪照编写,第五章第二、三节由范敏编写,第五章第一节、第七章、第九章第三节由侯景文编写,第十一章由李聚群编写,第九章第一、二、四、五节和第十二章第一、二节由王蕾编写,第六章和第八章由杨晓红编写,第十章和第三章第二节由李小城编写,第十二章第四、五节由余爱香编写,绪论和第十二章第三节由罗大金编写并负责统稿、定稿。

本书由黄利文和刘洁审稿。彭娜、潘洁、左伟亚等参加了书稿的打印、制图、排版工作。

由于课程改革和教材建设是一项长期而艰巨的工作,现仍处于摸索阶段,经验不足,书中的不足之处恳请广大师生和读者指正。

编者

2007年5月

# 目 录

绪论	1	二、钢在冷却时的转变	37
一、课程的性质和地位	1	第二节 热处理的基本类型	40
二、课程的内容与特点	1	一、钢的退火和正火	40
三、课程学习要求	1	二、钢的淬火和回火	41
第一章 金属材料基础	3	三、钢的表面淬火	44
第一节 金属材料与机械制造过程	3	四、钢的化学热处理	45
一、金属材料的分类	3	复习与思考题	46
二、钢铁材料生产过程概述	4	第四章 工程上常用的钢和铁及其热处理	48
三、机械制造过程概述	5	第一节 钢中基本元素作用	48
第二节 金属材料的基本性能	6	一、常存元素和杂质对钢性能的影响	48
一、金属材料的力学性能	6	二、合金元素在钢中的作用	49
二、金属材料的物理性能与化学性能	13	第二节 结构钢	54
三、金属材料的工艺性能	15	一、碳素结构钢	55
复习与思考题	16	二、低合金高强度结构钢	60
复习与思考题	16	三、合金结构钢	61
第二章 金属材料结构的基本知识	18	第三节 特殊性能钢	72
第一节 金属材料的晶体结构	18	一、不锈钢	72
一、金属的理想晶体结构	18	二、耐热钢	76
二、金属的实际晶体结构	20	三、耐磨钢	78
三、合金的晶体结构	22	习题与思考题	78
四、金属的结晶过程及理论	23	第五章 常用工模具钢及热处理	81
五、二元合金状态图	25	第一节 常用工模具用钢	81
第二节 铁碳合金状态图	27	一、碳素工具钢	81
一、铁碳合金相图分析	27	二、高碳低合金钢	84
二、钢和白口铸铁结晶过程分析	30	三、高耐磨冷作模具钢	86
三、含碳量与铁碳合金性能的关系	32	四、高速钢	91
四、Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的应用	33	五、中碳合金工具钢	93
复习与思考题	34	第二节 高性能工模具钢	100
第三章 金属热处理基本知识	36	一、基体钢	101
第一节 钢在加热和冷却时的组织转变	36	二、微变形钢	105
一、钢在加热时的转变	36	三、硬质合金	109

第三节 新型工模具钢 .....	115	第八章 高分子材料、陶瓷材料及 复合材料 .....	175
一、热作模具钢 .....	115	第一节 高分子材料 .....	175
二、冷作模具钢 .....	127	一、基本概念 .....	175
三、塑料模具钢 .....	131	二、高聚物的合成 .....	177
四、最新模具材料 .....	140	三、高聚物的分类和命名 .....	178
复习与思考题 .....	140	四、常用高聚物材料——塑料 .....	178
第六章 铸铁 .....	142	第二节 陶瓷材料 .....	181
第一节 概述 .....	142	一、概述 .....	181
一、铸铁的特点 .....	142	二、陶瓷的组成相及其结构 .....	181
二、Fe-C 状态图和 Fe-C-Si 状态图 .....	143	三、陶瓷的性能及应用 .....	183
三、铸铁的石墨化过程 .....	144	第三节 复合材料 .....	185
第二节 常用铸铁种类 .....	145	一、概述 .....	185
一、灰铸铁 .....	145	二、复合材料的性能 .....	186
二、可锻铸铁 .....	148	三、常用复合材料 .....	186
三、球墨铸铁 .....	149	习题与思考题 .....	188
四、耐磨铸铁 .....	154	第九章 铸造成形技术 .....	189
五、耐蚀铸铁 .....	155	第一节 铸造工艺基础 .....	189
六、耐热铸铁 .....	155	一、液态合金充型理论 .....	189
复习与思考题 .....	158	二、铸件的凝固与收缩 .....	190
第七章 有色金属 .....	159	三、铸造内应力、变形和裂纹 .....	193
第一节 铝及铝合金 .....	159	四、铸件中的气孔 .....	195
一、工业纯铝 .....	159	五、铸件的常见缺陷 .....	196
二、铝合金分类及时效强化 .....	159	第二节 普通型砂铸造 .....	197
三、变形铝合金 .....	161	一、造型方法选择 .....	197
四、铸造铝合金 .....	162	二、浇注位置与分型面的选择 .....	205
第二节 铜及铜合金 .....	164	三、工艺参数的选择 .....	206
一、工业纯铜 .....	164	第三节 特种铸造 .....	209
二、铜合金的分类及牌号表示方法 .....	164	一、熔模铸造 .....	209
三、黄铜 .....	165	二、金属型铸造 .....	212
四、青铜 .....	167	三、压力铸造 .....	213
第三节 滑动轴承合金 .....	169	四、低压铸造 .....	215
一、对轴承合金性能的要求 .....	169	五、离心铸造 .....	216
二、轴承合金的组织特征 .....	169	第四节 各种铸造方法的比较 .....	217
三、常用的轴承合金 .....	170	第五节 铸件结构设计 .....	218
第四节 粉末冶金材料 .....	172	一、铸件结构与砂型铸造工艺的关系 .....	218
一、粉末冶金法及其应用 .....	172	二、铸件结构与合金铸造性能的关系 .....	221
二、机械制造中常用的粉末冶金材料 .....	172	复习与思考题 .....	225
习题与思考题 .....	173		

<b>第十章 塑性成形加工技术</b> .....	226	四、钎焊 .....	281
<b>第一节 金属的塑性变形基础</b> .....	226	<b>第三节 常用金属材料的焊接</b> .....	282
一、金属塑性变形的实质 .....	226	一、金属材料的可焊性 .....	282
二、塑性变形后金属的组织 and 性能 .....	226	二、碳钢的焊接 .....	283
三、金属的可锻性 .....	228	三、合金结构钢的焊接 .....	284
<b>第二节 自由锻</b> .....	230	四、铸铁的焊补 .....	285
一、自由锻工艺规程的制定 .....	231	五、有色金属的焊接 .....	286
二、高合金钢锻造特点 .....	232	<b>第四节 焊接结构设计</b> .....	287
<b>第三节 模型锻造</b> .....	233	一、焊接结构件材料的选择 .....	287
一、锤上模锻 .....	233	二、焊接方法的选择 .....	287
二、胎模锻 .....	240	三、焊接接头工艺设计 .....	288
三、摩擦压力机上模锻 .....	241	<b>第五节 焊接质量检验</b> .....	293
四、曲柄压力机上模锻 .....	242	一、焊接接头缺陷分析 .....	293
五、平锻机上模锻 .....	244	二、焊接质量检验过程与方法 .....	294
<b>第四节 板料冲压</b> .....	245	<b>复习与思考题</b> .....	296
一、分离工序 .....	245	<b>第十二章 机械零件(模具零件)材料及</b>	
二、变形工序 .....	248	<b>毛坯制造工艺选择</b> .....	299
三、冲模的分类和构造 .....	251	<b>第一节 机械零件(模具零件)的失</b>	
四、板料冲压件结构工艺性 .....	253	效机理 .....	299
<b>第五节 特种成形工艺</b> .....	256	一、磨损失效 .....	299
一、精密模锻 .....	256	二、断裂失效 .....	304
二、零件的挤压 .....	257	三、塑性变形失效 .....	307
三、零件的轧制 .....	258	<b>第二节 模具的失效形式</b> .....	308
四、超塑性成形 .....	261	一、冷作模具的工作条件与失效形式 .....	308
五、摆动碾压 .....	262	二、热作模具的工作条件与失效形式 .....	311
<b>复习与思考题</b> .....	263	三、塑料模具的工作条件与失效形式 .....	314
<b>第十一章 焊接技术</b> .....	266	<b>第三节 失效分析的方法</b> .....	315
<b>第一节 电弧焊</b> .....	266	一、失效分析的主要任务 .....	315
一、手工电弧焊的焊接过程 .....	266	二、失效分析的方法和步骤 .....	316
二、电弧焊的冶金过程特点 .....	267	三、失效分析的基本手段 .....	317
三、电焊条 .....	267	<b>第四节 影响模具寿命的因素</b> .....	319
四、焊接接头金属组织与性能的变化 .....	268	一、模具的结构形式 .....	319
五、焊接应力与变形 .....	270	二、模具零件的几何形状 .....	320
六、埋弧自动焊 .....	272	三、模具工作条件 .....	322
七、气体保护焊 .....	273	四、模具制造及热处理 .....	324
<b>第二节 其他常用焊接方法</b> .....	276	<b>第五节 机械零件(模具零件)材料的选择</b> .....	329
一、电渣焊 .....	276	一、选材的一般原则 .....	329
二、等离子弧焊接与切割 .....	277	二、选材的步骤及具体方法 .....	336
三、电阻焊 .....	278	三、典型零件的选材实例分析 .....	337
		<b>复习与思考题</b> .....	349
		<b>参考文献</b> .....	352

# 绪 论

## 一、课程的性质和地位

《材料工程基础》是一本机械专业现有的金属工艺学、机械工程材料及热处理、工模具材料及失效三门技术基础课和专业课进行整合后的新课程体系教材。它系统地介绍了机械工程和工模具材料的类型、力学性能、成形方法及工模具对材料的要求，及选材方法、机械和工模具零件的失效等，是机械类专业的一门重要课程。

机械工业是国民经济中十分重要的产业，其中的材料是决定机械和工模具的工作性能和寿命的关键之一。材料产业与能源产业、信息产业构成了当今三大支柱产业，它是人类生产和生活的物质基础，也是人类社会的历史证明，生产技术的进步和生活水平的提高与新材料的应用息息相关。

作为一个机械工业中高技能、应用型人才或高水平研究型人才，都必须掌握甚至精通材料工程基础知识。

## 二、课程的内容与特点

本课程的内容主要包括：材料基本性能、材料结构基本知识、金属材料热处理基本知识、工程和工模具常用材料及热处理、机械及模具材料选择分析等十二章。

本教材有下列特点。

### 1. 构成了新的结构体系

它突破了传统的学科内容结构，综合了传统的金属工艺学、工程材料及热处理、工模具材料及失效三门课程的内容。

### 2. 打破了传统的课程界限

长期以来在工科院校中执行的公共基础课、专业基础课、专业菜的三段制教学模拟的课程结构，自立体系，泛泛介绍，针对性、实践性差，本课程强调专业基础课必须针对专业菜，又以具有代表性的模具专业为重点，介绍材料的基础知识。

### 3. 涵盖了较广的基础知识

以材料为中心。突出金属材料，重点介绍高分子材料，强调复合材料的发展。

以制造为主线。突出铸锻成形工艺的基本方法，重点保证焊接结构的质量。

以应用为目标。紧密结合实际，注意实践应用，强调理论与技能结合，着重培养学生应用基础知识解决工程实际问题的能力。

## 三、课程学习要求

本教材是高职高专院校机电类专业的必学教材，它适合于“模具设计与制造”、“数控技术”、“机械设计、制造及自动化”、“机电一体化”、“材料成形及控制”等专业。

通过本课程的理论教学以及与实践环节的配合，应使学生达到以下几点。

1. 了解工程材料结构组织和性能、常用材料的类型和力学性能、铸造性能、塑性加工、焊接工艺的基本原理、机械和模具零件的选择方法。

2. 熟悉热处理的组织转变、表面热处理和化学热处理的类型和目的及应用、铸造成形、塑性加工、焊接工艺的基本方法。

3. 掌握工程材料力学性能、铁碳合金状态图、普通热处理基本类型和目的、铸造成形、





# 第一章 金属材料基础

## 第一节 金属材料与机械制造过程

### 一、金属材料的分类

金属材料是现代机械制造部门使用最广的工程材料。对于从事机械制造的人员来说，了解金属材料的分类及机械制造生产过程具有非常重要的意义。

金属是指具有良好的导电性和导热性，有一定的强度和塑性并具有光泽的物质，如铁、铝和铜等。金属材料是由金属元素或以金属元素为主组成的并具有金属特性的工程材料，它包括纯金属和合金两大类。

纯金属在工业生产中虽然具有一定的用途，但是，由于它的强度、硬度一般都较低，而且价格较高，因此，在使用上受到一定的限制。目前在工业生产中广泛使用的主要是各种合金材料。如钢、铸铁、黄铜、硬铝等。

上述合金是由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素组成的材料。例如，普通黄铜是由铜和锌两种主要金属元素组成的合金，钢主要是由铁和碳组成的合金。与纯金属相比，合金除具有更好的力学性能外，还可通过调整组成元素之间的比例，以获得一系列性能各不相同的合金，从而满足工业生产上不同的性能要求。

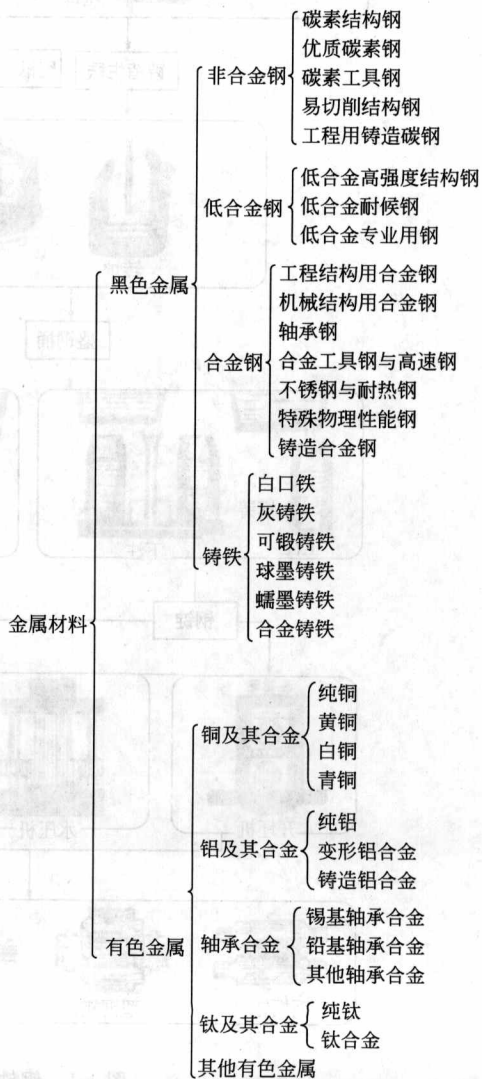
在金属材料中使用最多是钢铁材料，这是由于它具有比其他材料更优越的性能，如物理性能、化学性能、力学性能和工艺性能等，更能够适应生产和科学技术发展的需要。所以金属材料通常可分为黑色金属和有色金属两大类(表 1-1)。

(1) 黑色金属 表面为黑色，铁、铬和锰为黑色金属，其中以铁元素为主而组成的合金应用最广，如钢和铸铁。

(2) 有色金属 表面具有色彩，除黑色金属以外的其他金属，如铜、铝和镁及其合金等。

此外，在机械制造工业中，还出现了许多新型的高性能金属材料，如非晶态金属材料、纳米金属材料、单晶合金以及新型金属功能材

表 1-1 金属材料的分类



料等。

### 二、钢铁材料生产过程概述

钢铁材料是铁和碳的合金，并含有少量的 Si、Mn、S、P 等杂质元素。按碳的质量分数  $w_c$  (含碳量) 可分为：工业纯铁  $w_c < 0.0218\%$ ，钢  $w_c = 0.0218\% \sim 2.11\%$ ，生铁  $w_c > 2.11\%$ 。

生铁由铁矿石经高炉冶炼而得，它是炼钢和铸造的原材料。

钢材以生铁为主要原料，将生铁装入高温的炼钢炉里，通过氧化作用降低生铁中碳和杂质元素的质量分数而炼成钢水，然后铸成钢锭，经轧制形成不同规格的钢材进行供应。少数钢锭经锻造形成锻件后进行供应。图 1-1 为钢铁材料生产过程示意图。

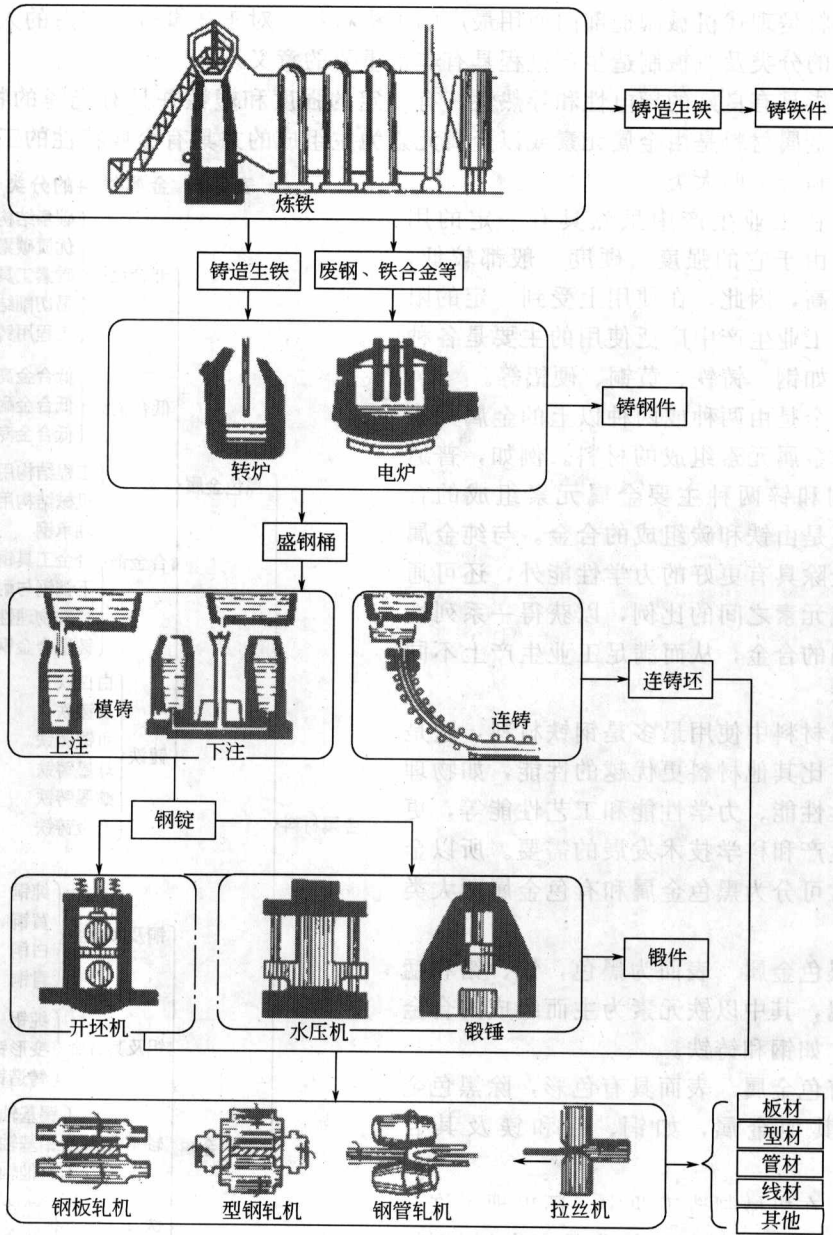


图 1-1 钢铁材料生产过程示意图

### 三、机械制造过程概述

机械产品的制造过程一般分为设计、制造与使用三个阶段，如图 1-2 所示。

#### (一) 设计阶段

在设计阶段首先要从市场调查、产品性能、生产数量等方面出发，制定出产品的研制开发规划。在设计时先进行总体设计，再进行部件设计，画出总装配图和零件图。然后根据机械零件的使用条件、场合、性能及环境保护要求等，选择合理的材料及加工方法。不同的机械产品有不同的性能要求，如汽车必须满足动力性能、控制性能、操纵性、安全性，以及使用起来舒适、燃料消耗率低、噪声小等要求。在满足了产品性能和成本要求的前提下，由工艺部门编制工艺规程或工艺图，并交付生产。

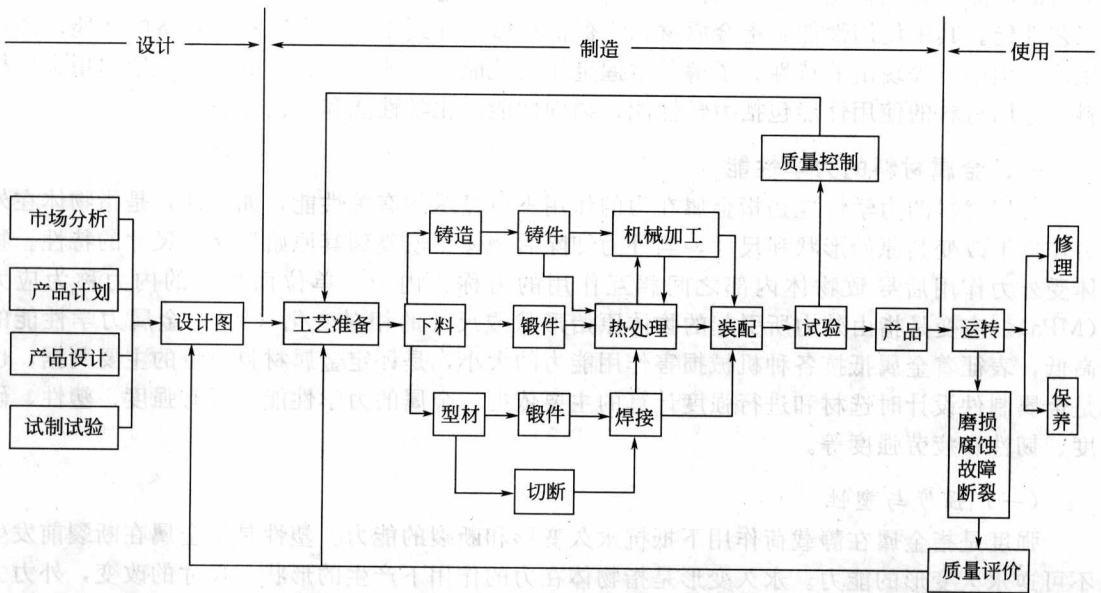


图 1-2 机械产品制造过程的三个阶段

设计人员在设计零件时，应根据机械产品的使用场合、工作条件等选择零件的材料和决定加工方法。例如，在高温氧化性气氛环境中工作的受力零件，应选择耐热性高的特殊物理性能钢；如果零件的力学性能要求不高，则应选择铸造生产；若力学性能要求高，则选择锻压生产，若形状复杂，尺寸很大，则选择焊接生产。同时，在设计过程中要特别重视零件的使用性能要与服役条件、材料及其加工方法相统一。

#### (二) 制造阶段

生产部门根据工艺规程与机械零件图进行制造，然后进行装配。通常不能根据设计图直接进行加工，而应根据设计图绘制出制造图，如铸件图、锻件图，再按制造图进行加工。这是由于设计图绘制出的是加工完成的最终状态图，而制造图则是表示在制造过程中某一工序完成时工件的状态。两者是有差异的。因此，在加工时需根据制造图准备合适的坯料，并进行预定的加工。准备好材料后，视零件的不同，采用铸造、锻造、机械加工、热处理等不同的加工方法，分别在各类车间进行加工。零件加工完成后再装配成部件或整机。机械产品装配完后，按设计要求应进行各种试验，诸如，空载与负荷试验、性能与寿命试验以及其他单项试验等。整机质量验收合格后进行涂装、包装和装箱，准备投入市场。

### (三) 使用阶段

出厂产品一经投入使用, 机器的磨损、腐蚀、故障和断裂就会接踵而来, 就会暴露出设计和制造过程中存在的质量问题。一个好的产品除了应注重设计功能、外观特征和制造工艺外, 还应经常注意收集与积累使用过程中零件失效的资料, 据此反馈给制造、设计部门, 以进一步提高产品的质量。

## 第二节 金属材料的基本性能

金属材料由于其特有的性能而被广泛应用。在机械制造行业中, 为了设计、制造具有竞争力的产品, 必须首先了解和掌握材料的各种性能。通常把金属材料的性能分为使用性能和工艺性能。其中使用性能是指金属材料为保证机械零件或工具正常工作应具备的性能, 即在使用过程中所表现出的特性。了解并掌握金属的性能, 才能正确、经济、合理地选用金属材料。金属材料的使用性能包括力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能。

### 一、金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属在力的作用下所显示的有关性能, 如弹性, 是指物体在外力作用下改变其原始形状和尺寸, 当外力卸除后物体又恢复到其原始形状和尺寸的特性。物体受外力作用后导致物体内部之间相互作用的力称为内力; 单位面积上的内力称为应力 (MPa)。应变是指由外力所引起的物体原始形状或尺寸的相对变化 (%)。金属力学性能的高低, 表征着金属抵抗各种机械损害作用能力的大小, 是评定金属材料质量的主要判据, 也是金属制件设计时选材和进行强度计算的主要依据。金属的力学性能主要有强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度等。

#### (一) 强度与塑性

强度是指金属在静载荷作用下抵抗永久变形和断裂的能力。塑性是指金属在断裂前发生不可逆永久变形的能力。永久变形是指物体在力的作用下产生的形状、尺寸的改变, 外力去除后, 物体因变形不能恢复到原始的形状和尺寸。这种不能恢复到原始的形状和尺寸的变形称永久变形或塑性变形。金属材料的强度和塑性指标可以通过拉伸试验测得。

##### 1. 拉伸试验

拉伸试验是指用静拉伸力对试样进行轴向拉伸, 测量拉伸力和相应的伸长, 并测其力学性能的试验。拉伸时一般将拉伸试样拉至断裂。

(1) 拉伸试样 通常采用圆柱形拉伸试样, 试样尺寸按国家标准 (GB/T 6397—86) 中金属拉伸试验试样中的有关规定进行制作。试样分为短试样和长试样两种, 一般都采用短试样。标准试样如图 1-3(a) 所示, 图 1-3(b) 为拉伸后的试样。 $d_0$  为标准试样的原始直径;  $d_1$  为试样断口处的直径;  $L_0$  为标准试样的原始标距长度;  $L_1$  为拉伸试样对接后测出的标距长度。长试样:  $L_0 = 10d_0$ ; 短试样:  $L_0 = 5d_0$ 。

(2) 试验方法 试验在拉伸试验机上进行。图 1-4 为拉伸试验机示意图。将试样 1 装在拉伸试验机上、下夹头上, 开动拉伸试验机, 在轴向拉伸力的作用下, 试样受到拉伸。同时, 记录装置记录下拉伸过程中的力-伸长曲线。

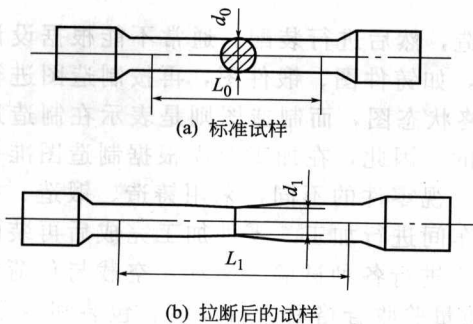


图 1-3 圆柱形拉伸试样

## 2. 力-伸长曲线

在进行拉伸试验时，拉伸力  $F$  和试样伸长量  $\Delta L$  之间的关系曲线，称为力-伸长曲线。通常把拉伸力  $F$  作为纵坐标，伸长量  $\Delta L$  作为横坐标，图 1-5 为退火低碳钢的力-伸长曲线图。

观察拉伸试验和力-伸长曲线，会发现在拉伸试验的开始阶段，试样的伸长量  $\Delta L$  与拉伸力  $F$  之间成正比例关系，在力-伸长曲线图中为斜直线  $Op$ 。在该阶段，当拉伸力增加时试样的伸长量  $\Delta L$  也呈正比增加。当去除拉伸力后试样伸长变形消失，恢复其原始形状，符合虎克定律，表现为弹性变形。图中  $F_p$  是试样保持弹性变形的最大拉伸力。当拉伸力不断增加，超过  $F_p$  时，试样将产生塑性变形，去除拉伸力后，变形不能完全恢复，塑性伸长将被保留下来。当拉伸力继续增加到  $F_s$  时，力-伸长曲线在  $s$  点后出现一个平台，即在拉伸力不再增加的情况下，试样也会明显伸长，这种现象称为屈服， $F_s$  称为屈服拉伸力。当拉伸力超过屈服拉伸力后，试样抵抗变形的能力将会增加，此为冷变形强化，即抗力增加现象。在力-伸长曲线上表现为一段上升曲线。即随着塑性变形量的增大，试样变形抗力也逐渐增大。

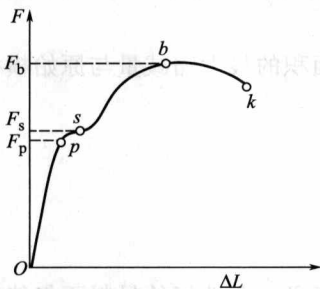


图 1-5 退火低碳钢的力-伸长曲线

当拉伸力达到  $F_b$  时，试样的局部截面开始收缩，产生了缩颈现象。由于缩颈使试样局部截面迅速缩小，最终试样被拉断。缩颈现象在力-伸长曲线上表现为一段下降的曲线。 $F_b$  是试样拉断前能承受的最大拉伸力，称为极限拉伸力。

从完整的拉伸试验和力-伸长曲线可以看出，试样从开始拉伸到断裂要经过弹性变形阶段、屈服阶段、冷变形强化阶段、缩颈与断裂阶段。

### 3. 强度指标

金属材料的强度是用应力来度量的，即材料受载荷作用后内部产生一个与载荷相平衡的内力，用  $\sigma$  表示。常用的强度指标有屈服强度、规定残余伸长应力、抗拉强度等。

(1) 屈服强度和规定残余伸长应力 屈服强度是指试样在拉伸试验过程中力不增加（保持恒定）仍然能继续伸长（变形）时的应力。屈服强度是工程技术上极为重要的力学性能指标之一，也是大多数机械零件选材和设计的依据。屈服强度用符号  $\sigma_s$  表示，单位为 MPa。屈服强度  $\sigma_s$  的值可用下式计算：

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中  $F_s$ ——试样屈服时的拉伸力，N；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ 。

工业上使用的一些金属材料，如高碳钢、铸铁等，在进行拉伸试验时没有明显的屈服现象，也不会产生缩颈现象，这就需要规定一个相当于屈服点的强度指标，即规定残余伸长应力。规定残余伸长应力是指试样卸除拉伸力后，标距的残余伸长达规定数值时的应力，用应力的符号  $\sigma$  加下角标表示。例如， $\sigma_{0.2}$  表示规定残余伸长率为 0.2% 时的应力。

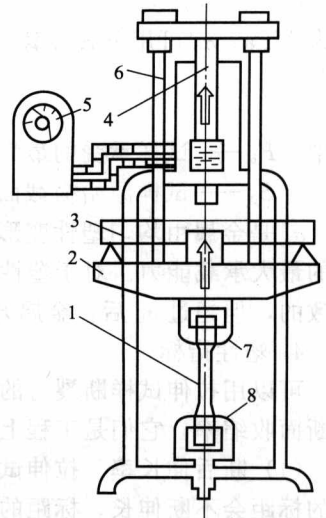


图 1-4 拉伸试验机示意图

- 1—试样；2—工作台；3—立柱；  
4—工作活塞；5—表盘；6—拉杆；  
7—上夹头；8—下夹头

(2) 抗拉强度 抗拉强度是指试样拉断前承受的最大标称拉应力，用符号  $\sigma_b$  表示，单位为 MPa。 $\sigma_b$  可用下式计算：

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中  $F_b$ ——试样承受的最大拉伸力，N；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ ；

$\sigma_b$  是金属由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡的临界值，也是金属在静拉伸条件下的最大承载能力。对于塑性金属来说，拉伸试样在承受最大拉应力  $\sigma_b$  之前，变形是均匀一致的，但超过  $\sigma_b$  后，金属开始出现缩颈现象，即产生集中变形。

#### 4. 塑性指标

可以用拉伸试样断裂时的最大相对变形量表示金属的塑性指标，如拉伸后的断后伸长率和断面收缩率，它们是工程上广泛使用的表征材料塑性好坏的主要力学性能指标。

(1) 断后伸长率 拉伸试样在进行拉伸试验时，在力的作用下产生塑性变形，原始试样中的标距会不断伸长。标距的伸长与原始标距的百分比称为伸长率。试样拉断后的标距伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率，用符号  $\delta$  表示。 $\delta$  可用下式计算：

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

式中  $L_1$ ——拉断试样对接后测出的标距长度，mm；

$L_0$ ——试样原始标距，mm。

因试样分为长试样和短试样，使用长试样测定的断后伸长率用符号  $\delta_{10}$  表示，通常写成  $\delta$ ；使用短试样测定的断后伸长率用符号  $\delta_5$  表示。同一种材料的断后伸长率  $\delta_{10}$  和  $\delta_5$ ，数值是不相等的，一般短试样  $\delta_5$ ，都大于长试样  $\delta_{10}$ 。

(2) 断面收缩率 断面收缩率是指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。断面收缩率用符号  $\psi$  表示。 $\psi$  值可用下式计算：

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

式中  $S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ ；

$S_1$ ——试样断口处的横截面积， $\text{mm}^2$ 。

金属塑性的好坏，对零件的加工和使用都具有重要的实际意义。塑性好的材料不仅能顺利地锻压、轧制等成形工艺，而且在使用时万一超载，由于塑性好，能避免突然断裂。所以大多数机械零件除要求具有较高的强度外，还都必须具有一定的塑性。

#### (二) 硬度

硬度是衡量金属软硬程度的一种性能指标，是指金属抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。

硬度试验和拉伸试验都是在静态力下测定材料力学性能的方法。硬度试验由于其基本上不损伤试样，简便迅速，不需要专门制作试样，而且可以直接在工件上进行测试，因而在生产中被广泛应用。拉伸试验虽能准确地测出金属的强度、塑性，但属于破坏性试验，因而在生产中不如硬度试验应用广泛。硬度是一项综合力学性能指标，从金属表面的局部压痕即可以反映出材料的强度和塑性，因此在零件图上常常标注硬度值，作为技术要求。硬度值的高低对机械零件的耐磨性有直接影响，一般情况下钢的硬度愈高，其耐磨性亦愈高。

硬度测定方法有压入法、划痕法、回弹法等，其中压入法的应用最为普遍。压入法是在规定的静态试验力作用下，将压头压入金属材料表面层，然后根据压痕的面积大小或深度测

定其硬度值。这种评定方法称为压痕硬度。在压入法中根据试验力、压头和表示方法的不同,常用的硬度测试方法有布氏硬度(HBS或HBW)、洛氏硬度(HRA、HRB、HRC)和维氏硬度(HV)。

### 1. 布氏硬度

布氏硬度的试验原理是用一定直径的淬火钢球或硬质合金球,以规定的试验力压入试样表面,经规定的保持时间后,去除试验力,测量试样表面的压痕直径 $d$ ,然后根据压痕直径 $d$ 计算其硬度值,如图1-6所示。布氏硬度值是指球面压痕单位面积上所承受的平均压力。选择淬火钢球压头时,用符号HBS表示;选择硬质合金球压头时,用符号HBW表示。布氏硬度值可用下式计算:

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

式中  $F$ ——试验力, N;

$D$ ——压头的直径, mm;

$d$ ——压痕的直径, mm。

式中只有 $d$ 是变数,因此试验时只要测量出压痕直径 $d$ ,就可通过计算或查布氏硬度表得出HBS(HBW)值。布氏硬度计算值一般都不标出单位,只写明硬度的数值。

由于金属有硬有软,工件有厚有薄,在进行布氏硬度试验时,压头直径 $D$ 、试验力和保持时间应根据被测金属种类和厚度正确地进行选择。

在进行布氏硬度试验选择压头时,HBS适用于测定布氏硬度值在450以下的材料,如灰铸铁、有色金属及经退火、正火和调质处理的钢材等;HBW适用于测定布氏硬度值在450~650之间的材料。目前中国布氏硬度试验常用的压头主要是淬火钢球。

布氏硬度的标注方法是,测定的硬度值应标注在硬度符号的前面。除了采用钢球直径 $D$ 为10mm,试验力为3000kgf(29.42kN),保持时间为10s的试验条件外,在其他条件下试验测得的硬度值,均应在硬度符号的后面用相应的数字注明压头直径、试验力大小和试验力保持时间。

150HBS10/1000/30表示:用直径为10mm的淬火钢球,在1000kgf(9.807kN)试验力作用下保持30s测得的布氏硬度值为150。

500HBW5/750表示:用直径为5mm的硬质合金球,在750kgf(7.355kN)试验力作用下保持10~15s测得的布氏硬度值。一般试验力保持时间为10~15s时都不需标明。

布氏硬度的特点是试验时金属表面压痕大,能在较大范围内反映材料的平均硬度,测得的硬度值比较准确,数据重复性强。但由于其压痕大,对金属表面的损伤也较大,因此不宜测定太小或太薄的试样。

### 2. 洛氏硬度

洛氏硬度的试验原理是以锥角为 $120^\circ$ 的金刚石圆锥体或直径为1.588mm的淬火钢球压入试样表面,如图1-7所示。试验时,先加初试验力,然后加主试验力,压入试样表面之后,去除主试验力,在保留初试验力的情况下,根据试样压痕深度来衡量金属的硬度大小。

在图1-7中,0-0位置为金刚石压头还没有和试样接触时的原始位置。当加上初试验力 $F_0$ 后,压头压入试样中,

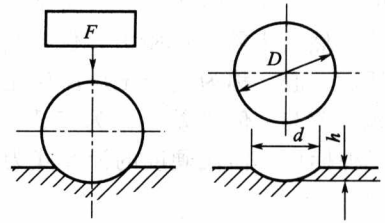


图 1-6 布氏硬度试验原理图

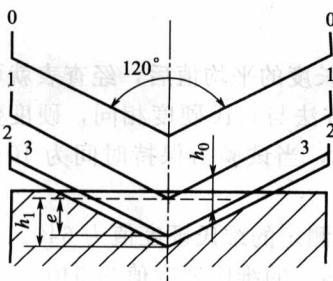


图 1-7 洛氏硬度试验原理图



深度为  $h_0$ ，处于 1-1 位置。再加主试验力  $F_1$ ，使压头又压入试样的深度为  $h_1$ ，处于图中 2-2 位置。然后去除主试验力，保持初试验力，压头因金属的弹性恢复在图中处于 3-3 位置。图中所示  $e$  值，称为残余压痕深度增量，对于洛氏硬度试验其单位为  $0.002\text{mm}$ 。标尺刻度满量程  $k$  值与  $e$  值之差，称为洛氏硬度值。根据压头和试验力的不同，洛氏硬度常用 A、B、C 三种标尺。洛氏硬度的计算式为：

$$\text{HR} = k - e = k - \frac{\text{压痕深度}}{0.002}$$

式中，压痕深度的单位为  $\text{mm}$ 。

对于由金刚石圆锥压头进行的试验，其标尺刻度量程为 100，洛氏硬度值为  $100 - e$ 。

对于由淬火钢球压头进行的试验，其标尺刻度量程为 130，洛氏硬度值为  $130 - e$ 。

洛氏硬度根据试验时选用的压头类型和试验力大小的不同分别采用不同的标尺进行标注。根据 GB/T 230—1991 规定，硬度数值写在符号的前面，HR 后面写使用的标尺，如 50HRC 表示用“C”标尺测定的洛氏硬度值为 50。

洛氏硬度试验是生产中广泛应用的一种硬度试验。其特点是：硬度试验压痕小，对试样表面损伤小，常用来直接检验成品或半成品的硬度；试验操作简便，可以直接从试验机上显示出硬度值，省去了烦琐的测量、计算和查表等工作。但是，由于压痕小，硬度值的准确性不如布氏硬度，因此，在测试洛氏硬度时通常都选取不同位置的三点测出硬度值，再计算平均值作为被测金属的硬度值。

### 3. 维氏硬度

布氏硬度试验不适合测定硬度较高的金属。洛氏硬度试验虽可用于测定各种金属的硬度，但由于采用了不同的压头、总试验力和标尺，硬度值彼此没有联系，因此不能直接换算。为了从软到硬对各种金属进行连续一致的硬度标度，因而制定了维氏硬度试验法。

维氏硬度的测定原理与布氏硬度基本相似，如图 1-8 所示：将夹角为  $136^\circ$  的正四棱锥体金刚石作为压头，以选定的试验力

( $49.03 \sim 980.7\text{N}$ ) 压入试样表面，经规定保持时间后，去除试验力，则试样表面上压出一个正四棱锥形的压痕，测量压痕两对角线的平均长度，计算硬度值。维氏硬度是用正四棱锥形压痕单位面积上承受的平均压力表示硬度值的，用符号 HV 表示。维氏硬度的计算式为：

$$\text{HV} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

式中  $F$ ——试验力，N；

$d$ ——压痕两条对角线长度算术平均值，mm。

试验时，用测微计测出压痕的对角线长度，算出两对角线长度的平均值后，经查表就可得出维氏硬度值。维氏硬度的测量范围在  $5 \sim 1000\text{HV}$ 。标注方法与布氏硬度相同，硬度数值写在符号的前面，试验条件写在符号的后面。对于钢及铸铁，当试验力保持时间为  $10 \sim 15\text{s}$  时，可以不标出。

640HV30 表示：用  $30\text{kgf}$  ( $294.2\text{N}$ ) 试验力保持  $10 \sim 15\text{s}$  测定的维氏硬度值为 640。

640HV30/20 表示：用  $30\text{kgf}$  ( $294.2\text{N}$ ) 试验力保持  $20\text{s}$  测定的维氏硬度值为 640。

维氏硬度适用范围宽，从极软的材料到极硬的材料都可以测量。尤其适用于零件表面层

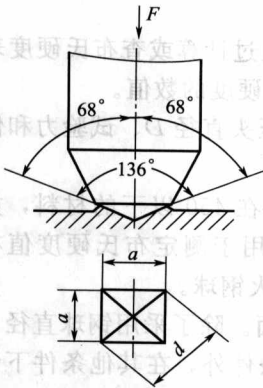


图 1-8 维氏硬度试验原理图