

“十三五”普通高等教育本科规划教材  
全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

# 金属材料及工艺

(第2版)

于文强 陈宗民 主编

教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

2017

“十三五”普通高等教育  
全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

# 金属材料及工艺 (第2版)

主 编	于文强	陈宗民
副主编	姜学波	张 勇
	尹文红	秦聪祥
	翟晓庆	



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书内容主要包括金属材料的种类与性能,金属的结构与结晶,二元合金相图及其应用,钢的热处理,合金钢,有色金属,机械零件的失效分析与选材,铸造工艺基础,砂型铸造,特种铸造,铸件结构设计,铸造新工艺与发展,塑性成形理论基础,常用锻造方法,板料冲压,现代塑性加工与发展趋势,熔化焊成形基础理论,熔化焊,其他焊接方法,常用金属材料的焊接,焊接结构设计,焊接过程自动化和毛坯的选择。每章后附有习题。

本书注重学生分析与解决工程技术问题能力的培养以及学生工程素质与创新思维能力的提高。为此,内容上既体现了现代制造技术、材料科学和现代信息技术的密切交叉与融合,又体现了工程材料和制造技术的历史传承与发展趋势。

本书可作为高等工科院校机械类、近机类各专业的教材和参考书,也可作为高职类工科院校及机械制造工程技术人员的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属材料及工艺/于文强,陈宗民主编. —2版. —北京:北京大学出版社,2017.1

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-27674-7

I. ①金… II. ①于…②陈… III. ①金属材料—高等学校—教材②金属加工—工艺学—高等学校—教材 IV. ①TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 255814 号

**书 名** 金属材料及工艺(第2版)

JINSHU CAILIAO JI GONGYI

**著作责任者** 于文强 陈宗民 主编

**责任编辑** 童君鑫

**标准书号** ISBN 978-7-301-27674-7

**出版发行** 北京大学出版社

**地 址** 北京市海淀区成府路 205 号 100871

**网 址** <http://www.pup.cn> 新浪微博:@北京大学出版社

**电子信箱** pup\_6@163.com

**电 话** 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

**印刷者** 北京富生印刷厂

**经 销 者** 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.25 印张 545 千字

2011 年 9 月第 1 版

2017 年 1 月第 2 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

**定 价** 52.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

**版权所有,侵权必究**

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

## 第 2 版前言

本次修订是在《金属材料及工艺》第 1 版的基础上进行的, 经过近 5 年的发行, 本书在各高校机械工程及其相关专业的金属材料与热加工工艺教学中已被广泛使用, 反馈教学效果优良。教材依照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求, 合理定位, 由长期在教育第一线从事教学工作, 富有教学经验的教师立足于教学改革的需要而编写, 无论在发行量还是在社会评价方面都取得了显著成绩, 为专业知识规范整合、创新形式教学作出了较大贡献。

机械零件的选材、毛坯的制备以及合理的热处理工艺方案是获得优秀工业产品所必需的技术能力核心, 企业必须掌握先进的工业化的制造技术, 产品才能具备市场竞争力。金属材料及工艺课程是工科院校进行产品制造工艺教育的一门重要的技术基础课程, 着重阐述常用金属材料及热成形方法的基本原理和工艺特点, 全面讲述了机械零件材料的选用、热处理工艺方案的确定、毛坯成形方法的选择以及工艺路线的拟订和机械制造中的新技术、新工艺。其兼有基础性、实用性、知识性、实践性与创新性等特点, 是培养现代复合型人才的重要基础课程之一。本书注重学生获取知识、分析与解决工程技术问题能力的提高, 力求体现学生工程素质与创新思维能力的培养。为此, 本书内容上既体现了现代制造技术、材料科学和现代信息技术的密切交叉与融合, 又体现了工程材料和制造技术的历史传承和发展趋势。

为适应不同类型、不同层次学校教学的需要, 教材编委参考了国外原版教材的优秀体例, 以科学性、先进性、系统性和实用性为目标, 整合金属材料学、金属热加工工艺学等有关材料科学、材料选择和毛坯成形方法等专业知识; 在吸取了各高校教学改革经验以及广大读者对《金属材料及工艺》第 1 版的建议和意见的基础上, 对本书第 2 版进行了以下修订。

(1) 整合第 1 版中“第 4 章 金属的塑性变形与再结晶”“第 14 章 锻压工艺基础”内容, 解决这两章中知识的交叉重叠问题, 合并后安排在“第 13 章 塑性成形理论基础”中讲解;

(2) 进一步描述了钢材的淬透性问题, 并辅以钢材淬透性测定方法的介绍;

(3) 调整了部分章节的课后习题内容, 以方便学生的课后复习总结;

(4) 为便于学生对材料的微观组织形态有客观的认识, 增加了部分金相组织照片插图;

(5) 充实了各类教学资源, 为便于资源的共享, 请专业任课教师加入 QQ 群: 39024033, 探讨问题、研究教学方法、交流教学资源, 同时为本书提供课件下载。

本书由山东理工大学于文强、陈宗民、姜学波、张勇、尹文红、秦聪祥、翟晓庆等多位一线教师合作编写。全体同仁为教材的出版付出了辛勤的劳动, 在此表示衷心的感谢!

本书可作为高等工科院校机械类、近机类各专业的教材和参考书,也可供高职类工科院校选用及机械制造工程技术人员学习参考。

在本书的编写过程中,吸收了许多教师对编写工作的宝贵意见,在编写和出版过程中得到了北京大学出版社和印刷单位有关工作人员的大力支持,在此一并表示由衷的感谢!

由于编者水平有限,时间仓促,不妥之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

编者

2016年9月

# 目 录

<b>第 1 章 金属材料的种类与性能</b> .....	1	<b>第 3 章 二元合金相图及其应用</b> .....	36
1.1 金属材料的种类 .....	2	3.1 合金的相结构 .....	37
1.2 金属材料的性能 .....	3	3.1.1 基本概念 .....	37
1.2.1 力学性能 .....	3	3.1.2 固态合金的相结构 .....	38
1.2.2 物理、化学性能 .....	13	3.2 二元合金相图的建立 .....	39
1.2.3 工艺性能 .....	15	3.2.1 相图的绘制 .....	39
习题 .....	16	3.2.2 二元匀晶相图 .....	41
<b>第 2 章 金属的结构与结晶</b> .....	18	3.2.3 二元共晶相图 .....	43
2.1 材料结构的类型 .....	19	3.2.4 二元包晶相图 .....	47
2.1.1 结构类型 .....	19	3.2.5 形成稳定化合物的 二元合金相图 .....	48
2.1.2 几何晶体学的 基本概念 .....	20	3.2.6 具有共析反应的 二元合金相图 .....	49
2.2 金属键与金属的特性 .....	22	3.2.7 合金的性能与相图间的 关系 .....	50
2.2.1 金属键 .....	23	3.3 铁碳合金相图 .....	51
2.2.2 金属的特性 .....	23	3.3.1 铁碳合金基本相及组织 ..	52
2.3 纯金属常见的晶体结构 .....	24	3.3.2 铁碳合金相图分析 .....	52
2.3.1 体心立方晶格 .....	24	3.3.3 典型铁碳合金的结晶过程 分析 .....	55
2.3.2 面心立方晶格 .....	25	3.3.4 碳的质量分数对铁碳合金 组织、性能的影响 .....	57
2.3.3 密排六方晶格 .....	25	3.3.5 铁碳合金相图的应用 .....	58
2.3.4 配位数和致密度 .....	25	3.4 碳素钢及铸铁 .....	59
2.4 金属的实际晶体结构 .....	26	3.4.1 碳钢中常存杂质及其 对性能的影响 .....	59
2.4.1 多晶体结构和亚结构 .....	26	3.4.2 碳素钢分类、牌号及 用途 .....	59
2.4.2 晶体中的缺陷 .....	27	3.4.3 铸铁分类、牌号及 用途 .....	65
2.5 金属的结晶 .....	28	习题 .....	70
2.5.1 结晶概述 .....	28	<b>第 4 章 钢的热处理</b> .....	72
2.5.2 纯金属的冷却曲线和 冷却现象 .....	29	4.1 钢的热处理原理 .....	73
2.5.3 纯金属的结晶过程 .....	30	4.1.1 钢在加热时的组织转变 ..	73
2.5.4 晶粒大小与金属力学性能的 关系 .....	31		
2.5.5 金属的铸锭组织 .....	32		
2.6 金属的同素异构转变 .....	34		
习题 .....	34		

4.1.2 钢在冷却时的组织转变	75	5.5 特殊性能钢	119
4.2 钢的普通热处理	79	5.5.1 不锈钢	119
4.2.1 钢的退火与正火	79	5.5.2 耐热钢	120
4.2.2 钢的淬火	81	5.5.3 耐磨钢	121
4.2.3 钢的淬透性	83	习题	122
4.2.4 钢的回火	84	<b>第 6 章 有色金属</b>	126
4.3 钢的表面热处理	87	6.1 铝及铝合金	127
4.3.1 钢的表面淬火	87	6.1.1 工业纯铝	127
4.3.2 钢的化学热处理	88	6.1.2 铝合金	127
4.4 钢的其他热处理方法	91	6.2 铜及铜合金	131
4.5 热处理的技术条件和 结构工艺性	92	6.2.1 工业纯铜	131
4.5.1 热处理技术条件的标注	92	6.2.2 铜合金	132
4.5.2 热处理零件的 结构工艺性	93	6.3 钛及其合金	133
4.6 典型零件热处理工艺分析	94	6.3.1 纯钛	133
4.6.1 车床主轴热处理工艺	94	6.3.2 钛合金	133
4.6.2 20CrMnTi 变速箱齿轮的 渗碳热处理工艺	95	6.4 滑动轴承合金	134
习题	98	6.4.1 轴承合金的性能要求和 组织特征	135
<b>第 5 章 合金钢</b>	101	6.4.2 轴承合金的分类及 牌号	135
5.1 合金元素在钢中的作用	102	6.5 其他材料	136
5.1.1 合金元素对钢中基本相的 影响	102	习题	138
5.1.2 合金元素对 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的 影响	103	<b>第 7 章 机械零件的失效分析与选材</b>	140
5.1.3 合金元素对钢材热处理的 影响	104	7.1 机械零件的失效分析	141
5.2 合金钢的分类与编号	105	7.2 选材的一般原则	144
5.3 合金结构钢	106	7.3 典型零件的选材与工艺	146
5.3.1 低合金高强度结构钢	106	7.3.1 提高疲劳强度与耐磨性的 选材与工艺	146
5.3.2 合金渗碳钢	108	7.3.2 齿轮类与轴类零件的 选材与工艺	148
5.3.3 合金调质钢	109	习题	152
5.3.4 合金弹簧钢	110	<b>第 8 章 铸造工艺基础</b>	153
5.3.5 滚动轴承钢	111	8.1 液态合金的充型	154
5.4 合金工具钢	112	8.1.1 合金的流动性	154
5.4.1 合金刀具钢	113	8.1.2 影响充型能力的因素	155
5.4.2 合金模具钢	116	8.2 铸件的凝固与收缩	156
5.4.3 合金量具钢	119	8.2.1 铸件的凝固方式	156

8.2.2 铸造合金的收缩 .....	157	<b>第 12 章 铸造新工艺与发展</b> .....	214
8.2.3 铸件的缩孔与缩松 .....	158	12.1 造型新方法 .....	215
8.3 铸造应力与变形、开裂 .....	160	12.2 铸造新技术 .....	217
8.4 铸件的缺陷与分析 .....	163	12.3 铸造技术的发展趋势 .....	219
习题 .....	165	习题 .....	220
<b>第 9 章 砂型铸造</b> .....	167	<b>第 13 章 塑性成形理论基础</b> .....	221
9.1 造型材料 .....	168	13.1 金属的塑性变形规律 .....	222
9.1.1 造型材料的种类 .....	168	13.1.1 金属单晶体的	
9.1.2 型砂与芯砂的配制 .....	169	塑性变形 .....	222
9.2 造型和造芯方法 .....	171	13.1.2 金属多晶体的	
9.2.1 手工造型 .....	171	塑性变形 .....	226
9.2.2 机器造型 .....	172	13.1.3 金属塑性变形时遵循的	
9.2.3 造芯 .....	174	基本规律 .....	228
9.3 砂型铸造工艺设计 .....	178	13.2 金属的塑性变形对组织和性能的	
9.3.1 浇注位置与分型面的		影响 .....	229
确定 .....	178	13.2.1 锻造流线 with 锻造比 .....	229
9.3.2 主要工艺参数的确定 .....	180	13.2.2 加工硬化与残余应力 .....	231
9.3.3 铸造工艺图的绘制 .....	184	13.2.3 织构现象 .....	232
9.3.4 支座铸造工艺方案		13.3 变形金属在加热时组织和性能的	
实例 .....	184	变化 .....	232
习题 .....	186	13.3.1 回复与再结晶 .....	233
<b>第 10 章 特种铸造</b> .....	189	13.3.2 再结晶温度与晶粒度 .....	234
10.1 金属型铸造 .....	190	13.4 金属的热变形加工 .....	237
10.2 压力铸造 .....	191	13.4.1 热变形加工与冷变形	
10.3 低压铸造 .....	194	加工的区别 .....	237
10.4 熔模铸造 .....	195	13.4.2 金属的热变形加工对组织和	
10.5 离心铸造 .....	196	性能的影响 .....	238
10.6 其他铸造方法 .....	197	13.5 金属的锻造性能 .....	239
习题 .....	201	习题 .....	241
<b>第 11 章 铸件结构设计</b> .....	203	<b>第 14 章 常用锻造方法</b> .....	243
11.1 铸造工艺对铸件结构设计		14.1 自由锻造 .....	244
要求 .....	204	14.1.1 锻造设备与生产特点 .....	244
11.2 合金铸造性能对铸件结构设计		14.1.2 自由锻造工艺 .....	245
要求 .....	207	14.1.3 典型锻件的自由锻工艺	
11.3 不同铸造方法对铸件结构的		实例 .....	248
要求 .....	210	14.1.4 自由锻件的结构	
习题 .....	212	工艺性 .....	249
		14.2 模锻 .....	250

14.2.1 锤上模锻 .....	250	19.2 钎焊 .....	328
14.2.2 其他设备模锻 .....	256	习题 .....	329
14.2.3 胎模锻 .....	258	<b>第20章 常用金属材料的焊接</b> .....	330
14.2.4 典型锻件的模锻工艺 实例 .....	260	20.1 金属材料的焊接性 .....	331
习题 .....	262	20.2 碳钢及低合金结构钢的 焊接 .....	332
<b>第15章 板料冲压</b> .....	265	20.3 不锈钢的焊接 .....	333
15.1 冲压设备与冲模结构 .....	266	20.4 铸铁的焊补 .....	334
15.2 冲压基本工序 .....	268	20.5 非铁金属的焊接 .....	335
15.3 板料冲压件的结构工艺性 .....	274	习题 .....	336
习题 .....	276	<b>第21章 焊接结构设计</b> .....	337
<b>第16章 现代塑性加工与发展趋势</b> .....	277	21.1 焊接结构件材料的选择 .....	338
16.1 现代塑性加工方法 .....	278	21.2 焊接方法的选择 .....	338
16.2 塑性加工发展趋势 .....	286	21.3 焊接接头的工艺设计 .....	339
习题 .....	287	21.3.1 焊缝的布置 .....	339
<b>第17章 熔化焊成形基础理论</b> .....	288	21.3.2 接头的设计 .....	341
17.1 熔焊冶金过程 .....	289	习题 .....	343
17.2 焊接接头组织和性能 .....	292	<b>第22章 焊接过程自动化</b> .....	345
17.3 焊接应力与变形 .....	294	22.1 计算机辅助焊接技术 .....	346
17.4 焊接接头的缺陷 .....	297	22.2 焊接机器人 .....	346
习题 .....	302	22.2.1 点焊机器人 .....	347
<b>第18章 熔化焊</b> .....	303	22.2.2 弧焊机器人 .....	350
18.1 电弧焊 .....	304	22.2.3 焊接机器人工作方式 .....	351
18.1.1 焊接电弧 .....	304	22.3 焊接柔性生产系统 .....	352
18.1.2 焊条电弧焊 .....	305	习题 .....	353
18.1.3 埋弧自动焊 .....	308	<b>第23章 毛坯的选择</b> .....	354
18.1.4 气体保护焊 .....	310	23.1 毛坯的选择原则 .....	355
18.2 气焊与气割 .....	313	23.1.1 毛坯的种类及成形方法的 比较 .....	355
18.2.1 气焊工艺 .....	314	23.1.2 毛坯选择的3个原则 .....	357
18.2.2 气割原理与工艺 .....	316	23.2 零件的结构分析及毛坯选择 .....	358
18.3 其他熔焊方法 .....	317	23.3 毛坯选择实例 .....	361
习题 .....	320	习题 .....	363
<b>第19章 其他焊接方法</b> .....	322	<b>参考文献</b> .....	364
19.1 压力焊 .....	323		

# 第 1 章

## 金属材料的种类与性能



### 教学目标

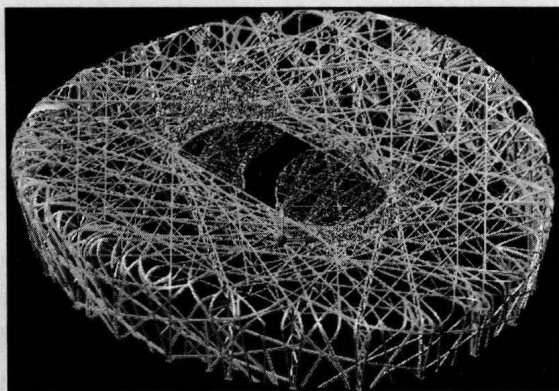
通过学习，了解金属材料的种类，掌握金属材料的使用性能和工艺性能。



### 导入案例

#### 材料的力学性能

材料在常温、静载作用下的宏观力学性能，是确定各种工程设计参数的主要依据。这些力学性能均需用标准试样在材料试验机上按照规定的试验方法和程序测定，并可同时测定材料的应力-应变曲线。随着工农业的迅速发展，如何有效地利用有限的资源成为当今材料界关注的重点，其中利用材料的力学性能设计构件不但能够保证安全使用，而且还能提高资源的利用效率。



鸟巢

“鸟巢”所用钢材的强度是普通钢的两倍，是由我国自主创新研发的特种钢材，集刚强、柔韧于一体，从而保证了“鸟巢”在承受最大 460MPa 的外力后，依然可以恢复到

原有形状,也就是说它能抵抗当年唐山大地震那样强烈的地震波。托起“鸟巢”最关键的是“肩部”结构,这一部分所用的钢材——“Q460”钢板厚度达到了10mm,具有良好的抗震性、抗低温性和可焊性等特点。为满足抗震要求,钢构件的节点部位还特别作了加厚处理,杆件的连接方式一律为焊接,以增加结构整体的刚度和强度。“鸟巢”凌空的屋顶气势不凡,支撑它的24根巨大钢柱脚更是雄伟壮观。为保证建造在8度抗震设防的高烈度地震区的“鸟巢”能站稳脚跟,科研设计人员克服“鸟巢”柱脚集合尺寸大且构造复杂、我国现行规范的计算假定与设计方法难以适用等难题,为这些钢柱脚增加了底座和铆钉,将柱脚牢牢铆在了混凝土中。柱脚下的承台厚度高达4~6m,24根巨大钢柱分别与24个巨大的钢筋混凝土墩牢固地连在一起,共同撑起巨大的“鸟巢”。“鸟巢”的设计综合考虑了材料的强度、韧性以及材料的利用效率。

人类生活、生产的过程是使用材料和将材料加工成成品的过程。材料使用的能力和水平标志着人类文明的进步程度。人类发展的历史时代按人类对材料的使用可分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等。在当今社会,能源、信息和材料已成为现代化技术的三大支柱,而能源和信息的发展又依托于材料。因此,世界各国都把材料的研究、开发放在突出的地位,我国的“863”计划把材料列为7个优先发展的领域之一。

为了便于材料的生产、应用与管理,也为了便于材料的研究与开发,有必要对材料进行分类。由于材料的种类繁多,用途甚广,因此分类的方法也很多。

按材料的用途可分为:建筑材料、电工材料、结构材料等;按材料的结晶状态可分为:单晶体材料、多晶体材料及非晶体材料;按材料的物理性能及物理效应可分为:半导体材料、磁性材料、激光材料(这类材料能受激辐射而发出方向恒定、波长范围窄、颜色单纯的激光,如红宝石、钇铝石榴石、含钆玻璃等)、热电材料(在温度作用下产生热电效应,由热能直接转变为电能或由电能转变为热能,可用于制造引燃、引爆器件)、光电材料(利用光电效应,可将光能直接转变成电能,如用硅、硫化镉等光电材料制作的太阳能电池)等。

值得注意的是,在工程上通常按材料的化学成分、结合键的特点将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料等几大类。

## 1.1 金属材料的种类

金属材料是以过渡族金属为基础的纯金属及含有金属、半金属或非金属的合金。由于金属材料具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能,能采用比较简便和经济的加工方法制成零件,因此金属材料是目前应用最广泛的材料。工业上通常把金属材料分为两大类:一类是黑色金属,它是指铁、锰、铬及其合金,其中以铁为基的合金——钢和铸铁应用最广,占整个结构和工具材料的80%以上;另一类是有色金属,它是指黑色金属以外的所有金属及其合金。

这两类材料还可进一步细分为图1.1所示的系列。

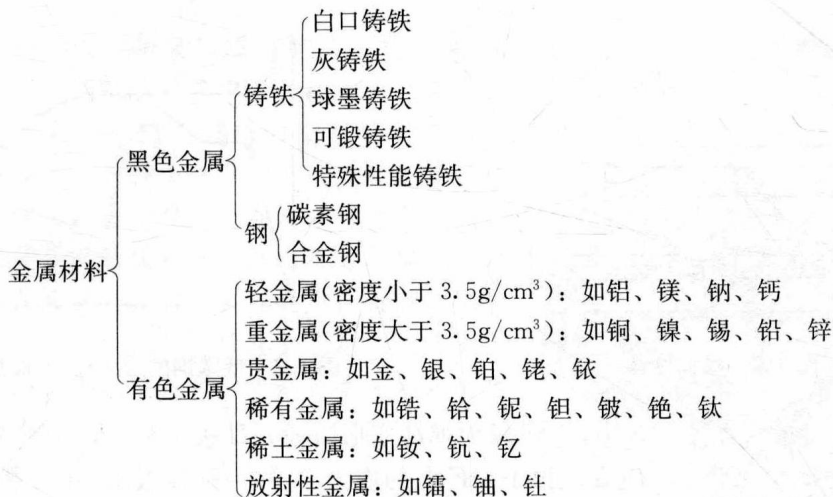


图 1.1 不同系列的金属材料

## 1.2 金属材料的性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中应具备的性能，它包括力学性能(强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等)、物理性能(密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性等)和化学性能(耐蚀性、抗氧化性等)。工艺性能是金属材料从冶炼到成品的生产过程中，为适应各种加工工艺(如：冶炼、铸造、冷热压力加工、焊接、切削加工、热处理等)应具备的性能。

### 1.2.1 力学性能

材料的力学性能是指材料在外力作用下所表现出的抵抗能力。由于荷载的形式不同，材料可表现出不同的力学性能，如强度、硬度、塑性、韧性、疲劳强度等。材料的力学性能是零件设计、材料选择及工艺评定的主要依据。

#### 1. 强度

材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力称为材料的强度。根据外力的作用方式，材料的强度分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。在使用中一般以抗拉强度作为基本的强度指标，常简称为强度。强度单位为 MPa(N/mm<sup>2</sup>)。

材料的强度、塑性是依据国家标准(GB/T 228—2002)通过静拉伸试验测定的。它是把一定尺寸和形状的试样装夹在拉力试验机上，然后对试样逐渐施加拉伸载荷，直至把试样拉断为止。拉伸前后的试样如图 1.2 所示。标准试样的截面有圆形的和矩形的，圆形试样用得较多，圆形试样有长试样( $l_0=10d_0$ )和短试样( $l_0=5d_0$ )之分。一般拉伸试验机上都带有自动记录装置，可绘制出载荷( $F$ )与试样伸长量( $\Delta L$ )之间的关系曲线，并据此可测定应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )关系： $\sigma=F/S$ ( $S$ 为试样原始截面积)、 $\epsilon=(L-L_0)/L_0$ (%)。图 1.3 为低碳钢的应力-应变曲线( $\sigma-\epsilon$ 曲线)。研究表明低碳钢在外加载荷作用下的变形过程一般可分为 3 个阶段，即弹性变形、塑性变形和断裂。

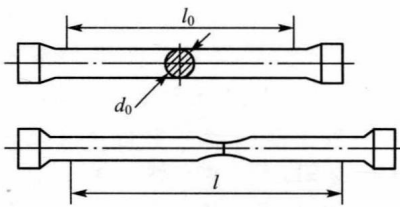


图 1.2 拉伸试样

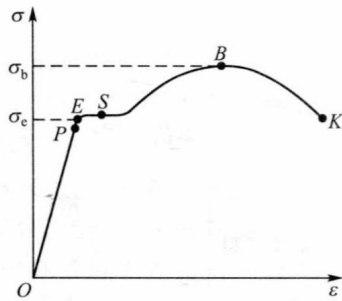


图 1.3 低碳钢的应力-应变曲线图

(1) 弹性变形 在图 1.3 中,  $OE$  段为弹性变形阶段, 即去掉外力后, 变形立即恢复, 这种变形称为弹性变形, 其应变值很小,  $E$  点的应力  $\sigma_E$  称为弹性极限。  $OE$  线中  $OP$  部分为一斜直线, 因为应力与应变始终成比例, 所以  $P$  点的应力  $\sigma_P$  称为比例极限。由于  $P$  点和  $E$  点很接近, 所以一般不作区分。

在弹性变形范围内, 应力与应变的比值称为材料的弹性模量  $E(\text{MPa})$ 。弹性模量  $E$  是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标, 工程上常把它称为材料的刚度。  $E$  值越大, 使其产生一定量弹性变形的应力也越大, 即材料的刚度越大, 说明材料抵抗产生弹性变形的能力越强, 越不容易产生弹性变形。

(2) 塑性变形 在  $S$  点附近, 曲线较为平坦, 不需要进一步的增大外力, 便可以产生明显的塑性变形, 该现象称为材料的屈服现象,  $S$  点称为屈服点,  $\sigma_s$  称为屈服强度。

工业上使用的某些材料(如高碳钢、铸铁和某些经热处理后的钢等)在拉伸试验中没有明显的屈服现象发生, 故无法确定屈服强度  $\sigma_s$ 。国家标准规定, 可用试样在拉伸过程中标距部分产生 0.2% 塑性变形量的应力值来表征材料对微量塑性变形的抗力, 称为屈服强度, 即所谓的“条件屈服强度”, 记为  $\sigma_{0.2}$ 。

(3) 断裂 经过一定的塑性变形后, 必须进一步增加应力才能继续使材料变形。当达到  $B$  点时,  $\sigma_B$  为材料能够承受的最大应力, 称为强度极限。超过  $B$  点后, 试棒的局部迅速变细, 产生颈缩现象, 迅速伸长, 应力明显下降, 到达  $K$  点后断裂。



### 阅读材料 1-1

#### 世贸中心的倒下

纽约世界贸易中心大楼位于曼哈顿闹市区南端, 是美国纽约市最高、楼层最多的摩天大楼。它由原籍日本的总建筑师山崎实设计, 于 1966 年开工, 历时 7 年, 1973 年竣工以后, 以 411 米的高度作为 110 层的摩天巨人而载入史册。它是由 5 幢建筑物组成的综合体。其主楼呈双塔形, 塔柱边宽 63.5m。大楼采用钢结构, 用钢 7.8 万 t, 楼的外围有密置的钢柱, 墙面由铝板和玻璃窗组成, 素有“世界之窗”之称。

美国东部时间 2001 年 9 月 11 日上午 8 时 45 分, 一架起飞重量达 160t 的波音 767 型飞机, 直接撞击纽约世界贸易中心北塔; 18 分钟后, 又一架起飞重量为 100t 的波音 757 型飞机, 几乎拦腰撞击世界贸易中心南塔。在高达 1000℃ 的烈焰煎熬下, 撞击后的一个半小时内, 两幢塔楼最终还是坍塌了(图 1.4)。

随后，关于大楼坍塌的原因有了很多种说法，但较一致的观点是认为世贸中心大楼的双塔并不是由于撞击，而是由于喷气燃料的剧烈燃烧而坍塌的。撞击发生后，在撞击过程中没有立即燃尽的喷气燃料向下流去，由于碰撞，在几分钟之内又燃烧起来。钢架构表面的保护层绝缘面板随之脱落。双塔的钢架构因此完全暴露于大火之中，当时大火的温度已接近于钢的软化点。据宾夕法尼亚州立大学的秦德·库朗萨玛教授推测，燃烧的喷气燃料的温度高达华氏 1000 度到 3000 度（摄氏 537 度到 1649 度）。而钢在华氏 1000 度下就会失去将近一半的强度而弯曲变形。在华氏 1400 度，只能剩下 10%~20% 的强度。燃烧的高温使钢柱软化，而被撞击层以上楼层的重力在加速度作用下，以雷霆万钧之势，造成了世界贸易中心遇袭后的必然结果——坍塌。

“9·11”恐怖袭击发生后，美国联邦紧急事务管理局和美国民用工程师协会曾联合发表了一份调查报告。报告认为，大楼的最终倒塌是由于飞机冲撞和随后引发的大火的共同作用。“喷气燃料燃烧发出的热量本身的温度似乎并不能使大楼崩塌，但是，随着燃烧的喷气燃料向双塔各层的扩散，引着了众多的楼内物品，同时发生了多起火灾。这些大火发出的热量可以和大规模商业发电所发出的电力相匹敌。高热给已经破损的钢结构框架更大的应力，同时，软化了钢结构框架。这个附加的荷重及其结果产生的危害足以使双塔崩塌。”



图 1.4 纽约世界贸易中心  
大楼被撞击的瞬间

### 阅读材料 1-2

#### 弹性变形引起的事故

“挑战者”号航天飞机(图 1.5)是美国正式使用的第二架航天飞机，在 1986 年 1 月 28 日执行第 10 次太空任务时，因为右侧固态火箭推进器上的一个 O 形环失效，导致一连串的连锁反应，在升空后 73 秒，爆炸解体坠毁。机上的 7 名宇航员全部在该次意外中丧生。O 形环是一种依靠密封件发生弹性变形的积压形密封，但是由于 O 形环低温硬化失效未能及时发生弹性变形产生密封效果从而导致了一场悲剧。

2007 年 10 月 21 日，在深圳南山湾 F1 摩托艇世界锦标赛深圳大奖赛决赛的比赛中，F1 天荣摩托艇招商银行队的中国选手彭林武在出发情况非常好的情况下未能走完 55 圈，只开了 28 圈就因为自己的一次急切操作导致赛艇的后盖整个掀飞，不得不退出了比赛。原因为赛艇的两个固定艇罩的弹簧全部被拉得失去了弹性(图 1.6)。

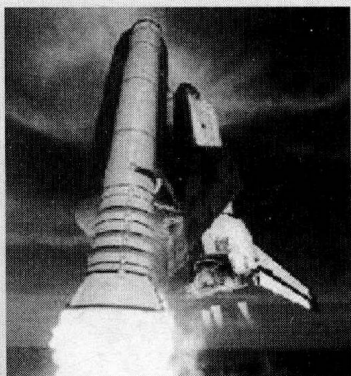


图 1.5 挑战者号航天飞机

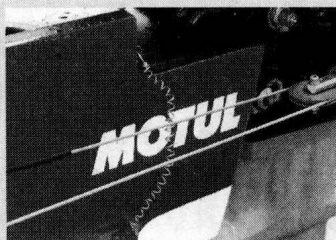


图 1.6 固定艇罩的弹簧

## 2. 塑性

材料在外力作用下,产生永久变形而不致引起破坏的性能,称为塑性。许多零件和毛坯是通过塑性变形而成形的,要求材料有较高的塑性;并且为了防止零件工作时脆断,也要求材料有一定的塑性。塑性通常由伸长率和断面收缩率表示。

### 1) 伸长率

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中:  $\delta$  为伸长率;  $l_0$  为试棒原始标距长度(mm);  $l$  为试棒受拉伸断裂后的标距长度(mm)。

### 2) 断面收缩率

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中:  $\psi$  为断面收缩率;  $A_0$  为试棒原始截面积( $\text{mm}^2$ );  $A$  为试棒受拉伸断裂后的截面积( $\text{mm}^2$ )。

$\delta$  或  $\psi$  值愈大,材料的塑性愈好。两者比较,用  $\psi$  表示塑性更接近材料的真实应变。

长试样( $l_0 = 10d_0$ )的伸长率写成  $\delta$  或  $\delta_{10}$ ; 短试样( $l_0 = 5d_0$ )的伸长率须写成  $\delta_5$ 。同一种材料  $\delta_5 > \delta$ , 对不同材料,把  $\delta$  值和  $\delta_5$  值不能直接比较。一般把  $\delta > 5\%$  的材料称为塑性材料,把  $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料。铸铁是典型的脆性材料,而低碳钢是黑色金属中塑性最好的材料。



## 阅读材料1-3

### 塑性成形的广泛应用

塑性成形不仅可以把材料加工成各种形状和尺寸的制品(图 1.7 和图 1.8),而且还可以改变材料的组织和性能。如广泛应用的各类钢材,根据断面形状的不同,一般分为型材、板材、管材和金属制品四大类。大部分钢材通过压力加工,使钢(坯、锭等)产生塑性变形。

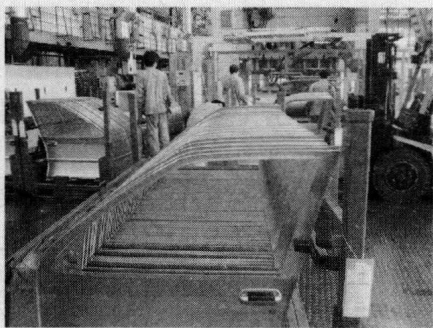


图 1.7 冲压成型的车门

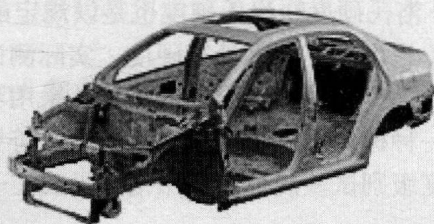


图 1.8 冲压焊接成形的车身

工字钢、槽钢、角钢等广泛应用于工业建筑和金属结构,如厂房、桥梁(图 1.9)、船舶、农机车辆制造、输电铁塔,运输机械等。

2000年9月建成的芜湖长江大桥是国家“九五”重点交通项目,其桥型为公路、铁路两用钢桁梁斜拉桥,铁路桥长 10 616m,公路桥长 6078m,其中跨江桥长 2193.7m,大桥主跨 312m。采用 14MnNbq 钢,厚板焊接全封闭整体节点钢梁,是目前中国最长的公铁两用桥。



图 1.9 金属结构桥梁

### 3. 硬度

材料抵抗硬物压入的能力称为硬度。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度等。

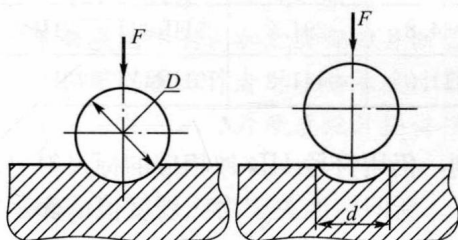


图 1.10 布氏硬度测试原理

(1) 布氏硬度 图 1.10 是布氏硬度测试原理图,在载荷  $F$  的作用下迫使硬质合金球压向被测金属的表面,保持一定时间后卸除载荷,并形成凹痕。

布氏硬度值按式(1-3)计算:

$$HBW = \frac{\text{所加载荷}}{\text{压痕表面积}} (\text{N/mm}^2) \quad (1-3)$$

按旧标准规定,布氏硬度试验可以采用钢球压头或硬质合金球压头两种。压头为钢球时,用符号“HBS”或“HB”表示;压头为硬质合金球时,用符号“HBW”表示。钢球压头的布氏硬度试验适用于 450HBS 以下的材料,硬质合金球压头的布氏硬度试验适用于 650HBW 以下的材料。由于淬火钢球相对硬质合金球压头容易产生变形,当布氏硬度值超过 350HBS 时,用钢球和硬质合金球得到的试验结果明显不同。因此,为了统一起见,金属布氏硬度新标准(GB/T 231.1—2002)只规定了硬质合金球压头一种。因此,新标准实施后,硬度计应全部采用硬质合金球压头,技术文件应一律标注符号“HBW”。

布氏硬度试验适用于测量退火钢、正火钢及常见的铸铁和有色金属等较软材料。布氏硬度试验的压痕面积较大,测试结果的重复性较好,但操作较烦琐。

布氏硬度试验是由瑞典工程师布利涅尔(J. B. Brinell)于1900年提出的。

(2) 洛氏硬度 洛氏硬度也是以规定的载荷,将坚硬的压头垂直压向被测金属来测定硬度的。它由压痕深度计算硬度。实际测试时,直接从刻度盘上读值。

为了适应不同材料的硬度测试,采用不同的压头与载荷组合成几种不同的洛氏硬度标尺,每一种标尺用一个字母在洛氏硬度符号后注明,如HRA、HRB、HRC等,几种常用洛氏硬度级别试验规范及应用范围见表1-1。

表1-1 常用洛氏硬度的级别及其应用范围

洛氏硬度	压头	总载荷/N	硬度范围	适用材料
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4	60~85	硬质合金材料、表面淬火钢等
HRB	φ1.588mm球	980.7	25~100	软钢、退火钢、铜合金等
HRC	120°金刚石圆锥体	1471.1	20~67	淬火钢、调质钢等

新版金属洛氏硬度试验方法国家标准(GB/T 230.1—2009)在旧标准基础上,新标准增加了15N、30N、45N、15T、30T、45T共6个洛氏硬度标尺及其对应的硬度适用范围(表1-2)。

表1-2 增加的洛氏硬度标尺及其对应的参数

洛氏硬度标尺	硬度符号	压头类型	初试验力/N	主试验力/N	总试验力/N	适用范围
15N	HR15N	金刚石圆锥	29.42	117.7	147.1	70HR15N~94HR15N
30N	HR30N	金刚石圆锥	29.42	264.8	294.2	42HR30N~86HR30N
45N	HR45N	金刚石圆锥	29.42	411.9	441.3	20HR45N~77HR45N
15T	HR15T	φ1.5875mm球	29.42	117.7	147.1	67HR15T~93HR15T
30T	HR30T	φ1.5875mm球	29.42	264.8	294.2	29HR30T~82HR30T
45T	HR45T	φ1.5875mm球	29.42	411.9	441.3	10HR45T~72HR45T

新旧标准关于洛氏硬度表示符号的规定没有差别,仍用符号HR加相应的标尺符号表示。比如,常用的C标尺洛氏硬度符号仍为“HRC”。新旧标准关于洛氏硬度值的表示方法的规定也没有差别,仍按硬度值、洛氏硬度表示符号这一顺序读写。但按新标准规定,洛氏硬度试验采用金刚石圆锥压头,也可以采用钢球压头或硬质合金球压头。因此,为了区别洛氏硬度试验所使用的压头类型,新标准增加了在硬度符号后面追加符号“S”或“W”的规定。当采用钢球压头试验时,应在原符号后面加字母“S”;当采用硬质合金球压头时,应在原符号后面加字母“W”;而采用金刚石圆锥压头时,则不用附加任何符号。例如,B标尺、硬质合金球压头测定的洛氏硬度值为60,应表示为“60 HRBW”。

按GB/T 230.1—2009标准规定,标尺为A、C、D、15N、30N、45N的洛氏硬度试验均为金刚石圆锥压头。其余标尺的洛氏硬度试验采用钢球或硬质合金球压头。因此,对标尺为A、C、D、15N、30N、45N的洛氏硬度试验,表示硬度值时,不必考虑附加任何符