



高职高专“十一五”规划教材

金属材料与热处理

司卫华 王学武 主编

高朝祥 副主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

金属材料与热处理

司卫华	王学武	主 编
高朝祥		副主编
王大力		主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要讲授常用金属材料的分类、编号、组织结构、力学性能、热处理以及应用等方面的基本知识,全书以金属材料的性能及改性为核心,并以金属材料的性能与成分、组织结构、加工工艺(热处理)之间的关系为主线贯穿始终。全书共分11章,包括:金属材料的力学性能、金属的晶体结构与结晶、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、工业用钢、铸铁、有色金属及合金、非金属材料与复合材料及金属材料的失效与选用等。

本书可作为高职、高专、各类成人教育机械类专业的教材或培训用书,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料与热处理/司卫华,王学武主编. —北京:化学工业出版社,2008.12
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-04027-5

I. 金… II. ①司…②王… III. ①金属材料-高等学校:技术学院-教材②热处理-高等学校:技术学院-教材
IV. TG14 TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第165680号

责任编辑:韩庆利 高 钰

装帧设计:史利平

责任校对:徐贞珍

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:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张13 $\frac{3}{4}$ 彩插1 字数349千字 2009年2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:23.00元

版权所有 违者必究

前 言

高等职业技术教育经过快速发展,已成为我国高等教育的重要组成部分。高等职业技术教育主要是培养掌握最新实践技术能力的应用型人才,满足社会生产、建设、管理、服务第一线对高等级技术应用型专门人才的需要。

为满足高等职业教育课程改革和教材建设的要求,根据高职高专人才培养目标,编者在多年从事高职教学实践和经验的基础上,编写了这本《金属材料与热处理》教材,可供高职高专机械工程类、热加工类、近机类专业教学使用,还可供相关技术人员参考。

本书紧密结合高等职业教育的办学特点和教学目标,强调实践性、应用性和创新性。降低理论深度,理论知识坚持以应用为目的,以必需、够用为度;注意内容的精选和创新,突出实践应用,拓宽知识领域,重在能力的培养。书中涉及的名词术语和相关的标准与国家最新标准一致。

本书共分为 11 章,主要内容有金属材料的力学性能、金属的结构与结晶、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、工业用钢、铸铁、有色金属及合金等,以金属材料的力学性能与化学成分、加工工艺之间关系为主线,以培养学生认识金属材料、合理选用金属材料为主导。

本书由渤海船舶职业学院司卫华(第 1、4、8、9 章),王学武(绪论、第 5~7、11 章、附录),马春来(第 10 章),四川化工职业技术学院高朝祥(第 2、3 章)共同编写,司卫华、王学武任主编,高朝祥任副主编。天津有机化工总厂王大力(教授级高级工程师)主审。

在本书的编写过程中,参考了大量已出版的文献和资料,在此向原作者致谢。

由于编者学识水平和收集资料来源有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者不吝赐教。

编者

2008 年 10 月

元素周期表

族	1	2	过渡金属										13	14	15	16	17	18				
周期	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA				
1	H 氢 1s ¹ 1.00794(7)	He 氦 1s ² 4.002602(2)													B 硼 2s ² 2p ¹ 10.811(7)	C 碳 2s ² 2p ² 12.0107(8)	N 氮 2s ² 2p ³ 14.0067(2)	O 氧 2s ² 2p ⁴ 15.9994(3)	F 氟 2s ² 2p ⁵ 18.9984032(5)	Ne 氖 2s ² 2p ⁶ 20.1797(6)		
2	Li 锂 2s ¹ 6.941(2)	Be 铍 2s ² 9.012182(3)													Al 铝 3s ² 3p ¹ 26.981538(2)	Si 硅 3s ² 3p ² 28.0855(3)	P 磷 3s ² 3p ³ 30.973761(2)	S 硫 3s ² 3p ⁴ 32.065(5)	Cl 氯 3s ² 3p ⁵ 35.453(2)	Ar 氩 3s ² 3p ⁶ 39.948(1)		
3	Na 钠 3s ¹ 22.989770(2)	Mg 镁 3s ² 24.3050(6)													Ga 镓 4s ² 4p ¹ 69.723(1)	Ge 锗 4s ² 4p ² 72.64(1)	As 砷 4s ² 4p ³ 74.92160(2)	Se 硒 4s ² 4p ⁴ 78.96(3)	Br 溴 4s ² 4p ⁵ 79.904(1)	Kr 氪 4s ² 4p ⁶ 83.798(2)		
4	K 钾 4s ¹ 39.0983(1)	Ca 钙 4s ² 40.078(4)	Sc 钪 3d ¹ 4s ² 44.955910(8)	Ti 钛 3d ² 4s ² 47.867(1)	V 钒 3d ³ 4s ² 50.9415	Cr 铬 3d ⁵ 4s ¹ 51.9961(6)	Mn 锰 3d ⁵ 4s ² 54.938049(9)	Fe 铁 3d ⁶ 4s ² 55.845(2)					Ni 镍 3d ⁸ 4s ² 58.6934(2)	Cu 铜 3d ¹⁰ 4s ¹ 63.546(3)	Zn 锌 3d ¹⁰ 4s ² 65.409(4)	Ga 镓 4s ² 4p ¹ 69.723(1)	Ge 锗 4s ² 4p ² 72.64(1)	As 砷 4s ² 4p ³ 74.92160(2)	Se 硒 4s ² 4p ⁴ 78.96(3)	Br 溴 4s ² 4p ⁵ 79.904(1)	Kr 氪 4s ² 4p ⁶ 83.798(2)	
5	Rb 铷 5s ¹ 85.4678(3)	Sr 锶 5s ² 87.62(1)	Y 钇 4d ¹ 5s ² 88.90585(2)	Zr 锆 4d ² 5s ² 91.224(2)	Nb 铌 4d ⁴ 5s ¹ 92.90638(2)	Mo 钼 4d ⁵ 5s ¹ 95.94(2)	Tc 锝 4d ⁵ 5s ² 97.907	Ru 钌 4d ⁷ 5s ¹ 101.07(2)					Rh 铑 4d ⁸ 5s ¹ 102.90550(2)	Pd 钯 4d ¹⁰ 106.42(1)	Ag 银 4d ¹⁰ 5s ¹ 107.8682(2)	Cd 镉 4d ¹⁰ 5s ² 112.411(8)	In 铟 5s ² 5p ¹ 114.818(3)	Sn 锡 5s ² 5p ² 118.710(7)	Sb 锑 5s ² 5p ³ 121.760(1)	Te 碲 5s ² 5p ⁴ 127.60(3)	I 碘 5s ² 5p ⁵ 126.90447(3)	Xe 氙 5s ² 5p ⁶ 131.293(6)
6	Cs 铯 6s ¹ 132.90545(2)	Ba 钡 6s ² 137.327(7)	La-Lu 镧系 铜系		Hf 铪 5d ² 6s ² 178.49(2)	Ta 钽 5d ³ 6s ² 180.9479(1)	W 钨 5d ⁴ 6s ² 183.84(1)	Re 铼 5d ⁵ 6s ² 186.207(1)	Os 锇 5d ⁶ 6s ² 190.23(3)		Pt 铂 5d ⁹ 6s ¹ 195.078(2)	Au 金 5d ¹⁰ 6s ¹ 196.96655(2)	Hg 汞 5d ¹⁰ 6s ² 200.59(2)	Tl 铊 6s ² 6p ¹ 204.3833(2)	Pb 铅 6s ² 6p ² 207.2(1)	Bi 铋 6s ² 6p ³ 208.98038(2)	Po 钋 6s ² 6p ⁴ 208.98 ⁺	At 砹 6s ² 6p ⁵ 209.99 ⁺	Rn 氡 6s ² 6p ⁶ 222.02 ⁺			
7	Fr 钫 7s ¹ 223.02 ⁺	Ra 镭 7s ² 226.03 ⁺	Ac-Lr 锕系 铜系		Rf 𬬻 6d ² 7s ² 261.11 ⁺	Db 𬬻 6d ³ 7s ² 262.11 ⁺	Sg 𬬻 6d ⁴ 7s ² 263.12 ⁺	Bh 𬬻 6d ⁵ 7s ² 264.12 ⁺	Hs 𬬻 6d ⁶ 7s ² 265.13 ⁺		Mt 𬬻 6d ⁷ 7s ² 266.13	Rg 𬬻 6d ¹⁰ 7s ² (272) ⁺	Uub 𬬻 6d ¹⁰ 7s ² (277) ⁺	Uut 𬬻 6d ¹⁰ 7s ² (278) ⁺	Uuq 𬬻 6d ¹⁰ 7s ² (289) ⁺	Uup 𬬻 6d ¹⁰ 7s ² (288) ⁺	Uuh 𬬻 6d ¹⁰ 7s ² (289) ⁺					

71 Lu 镥 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² 174.967(1)	70 Yb 镱 4f ¹⁴ 6s ² 173.04(3)	69 Tm 铥 4f ¹³ 6s ² 168.9342(1)	68 Er 铒 4f ¹² 6s ² 167.259(3)	67 Ho 钬 4f ¹¹ 6s ² 164.93032(2)	66 Dy 镝 4f ¹⁰ 6s ² 162.500(1)	65 Tb 铽 4f ⁹ 6s ² 158.92534(2)	64 Gd 钆 4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 157.25(3)	63 Eu 铕 4f ⁷ 6s ² 151.964(1)	62 Sm 钐 4f ⁶ 6s ² 150.36(3)	61 Pm 钷 4f ⁵ 6s ² 144.91 ⁺	60 Nd 钕 4f ⁴ 6s ² 144.24(3)	59 Pr 镨 4f ³ 6s ² 140.90765(2)	58 Ce 铈 4f ¹ 5d ¹ 6s ² 140.116(1)	57 La 镧 5d ¹ 6s ² 138.9055(2)	103 Lr 𬬻 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² 260.11 ⁺	102 No 𬬻 5f ¹⁴ 7s ² 259.10 ⁺	101 Md 𬬻 5f ¹³ 7s ² 258.10 ⁺	100 Fm 𬬻 5f ¹² 7s ² 257.10 ⁺	99 Es 𬬻 5f ¹¹ 7s ² 252.08 ⁺	98 Cf 𬬻 5f ¹⁰ 7s ² 251.08 ⁺	97 Bk 𬬻 5f ⁹ 7s ² 247.07 ⁺	96 Cm 𬬻 5f ⁸ 7s ² 247.07 ⁺	95 Am 𬬻 5f ⁷ 7s ² 243.06 ⁺	94 Pu 钷 5f ⁶ 7s ² 244.06 ⁺	93 Np 钷 5f ⁶ 7s ² 237.05 ⁺	92 U 铀 5f ³ 6d ¹ 7s ² 238.02891(3)	91 Pa 镤 5f ² 6d ¹ 7s ² 231.035888(2)	90 Th 钍 6d ² 7s ² 232.0381(1)	89 Ac 锕 6d ¹ 7s ² 227.03 ⁺	★ 镧系
---	--	--	---	---	---	--	---	--	---	---	---	--	--	---	---	---	---	---	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---------

目 录

绪论	1
第 1 章 金属材料的力学性能	3
1.1 强度与塑性	3
1.1.1 拉伸试验与拉伸曲线	3
1.1.2 刚度	4
1.1.3 强度	5
1.1.4 塑性	6
1.1.5 GB/T 228—2002 与 GB/T 228—1987 对比	6
1.2 硬度	7
1.2.1 布氏硬度	7
1.2.2 洛氏硬度	8
1.2.3 维氏硬度	9
1.3 冲击韧度	10
1.3.1 摆锤式一次冲击试验	10
1.3.2 低温脆性	11
1.4 疲劳极限	11
1.4.1 疲劳现象	11
1.4.2 疲劳极限	12
1.4.3 提高疲劳极限的途径	12
复习与思考题 1	12
第 2 章 金属的晶体结构与结晶	14
2.1 纯金属的晶体结构	14
2.1.1 晶体结构的基本概念	14
2.1.2 常见的金属晶格类型	15
2.1.3 金属的同素异构转变	16
2.2 合金的晶体结构	17
2.2.1 合金的基本概念	17
2.2.2 合金的相结构	18
2.3 金属的实际晶体结构	20
2.3.1 多晶体	20
2.3.2 晶体缺陷	20
2.4 纯金属的结晶	22
2.4.1 冷却曲线与过冷度	22
2.4.2 纯金属的结晶过程	22
2.4.3 晶粒大小及控制	23
2.5 合金的结晶	25
2.5.1 二元合金相图的建立	25
2.5.2 二元匀晶相图	26
2.5.3 二元共晶相图	28
复习与思考题 2	32
第 3 章 铁碳合金相图	34
3.1 铁碳合金的基本相及组织	34
3.1.1 铁碳合金的基本相	34
3.1.2 铁碳合金的基本组织	35
3.2 铁碳合金相图	36
3.2.1 相图中的主要特性点	37
3.2.2 主要特性线	38
3.2.3 相区	38
3.2.4 铁碳合金的分类	38
3.3 典型合金平衡结晶过程分析	39
3.3.1 共析钢	39
3.3.2 亚共析钢	39
3.3.3 过共析钢	40
3.3.4 共晶白口铸铁	41
3.3.5 亚共晶白口铸铁	42
3.3.6 过共晶白口铸铁	43
3.4 铁碳合金的性能与成分、组织的 关系	44
3.4.1 碳的质量分数对铁碳合金平衡 组织的影响	44
3.4.2 碳的质量分数对铁碳合金力学 性能的影响	44
3.4.3 铁碳合金相图的应用	45

3.4.4 相图的局限性	46	复习与思考题 3	47
第 4 章 非合金钢	49		
4.1 杂质元素对非合金钢性能的影响	49	4.2.3 按钢的用途分类	51
4.1.1 锰的影响	49	4.3 常用非合金钢	51
4.1.2 硅的影响	49	4.3.1 我国钢铁产品的牌号表示方法	51
4.1.3 硫的影响	49	4.3.2 碳素结构钢	51
4.1.4 磷的影响	50	4.3.3 优质碳素结构钢	53
4.1.5 非金属夹杂物的影响	50	4.3.4 碳素工具钢	56
4.2 非合金钢的分类	50	4.3.5 碳素铸钢	57
4.2.1 按钢中碳的质量分数分类	50	复习与思考题 4	57
4.2.2 按钢的冶炼质量分类	51		
第 5 章 钢的热处理	59		
5.1 热处理概述	59	5.6.2 钢在回火时组织和力学性能的变化	72
5.1.1 热处理的实质、目的和作用	59	5.6.3 钢的回火种类	72
5.1.2 热处理的分类	59	5.7 表面热处理	73
5.2 钢在加热时的组织转变	60	5.7.1 感应加热表面淬火	73
5.2.1 热处理加热目的和临界温度	60	5.7.2 火焰加热表面淬火	74
5.2.2 奥氏体晶粒度及其控制	60	5.8 化学热处理	74
5.3 钢在冷却时的组织转变	61	5.8.1 钢的渗碳	75
5.3.1 过冷奥氏体等温冷却转变	61	5.8.2 渗氮	75
5.3.2 马氏体转变	64	5.9 热处理新技术简介	76
5.3.3 过冷奥氏体连续冷却转变	65	5.9.1 可控气氛热处理	76
5.4 钢的退火和正火	67	5.9.2 真空热处理	76
5.4.1 钢的退火	67	5.9.3 形变热处理	77
5.4.2 钢的正火	68	5.9.4 高能束表面热处理	77
5.5 钢的淬火	68	5.9.5 新型淬火冷却介质	77
5.5.1 钢的淬火	68	5.10 热处理的质量控制	78
5.5.2 淬火工艺参数	69	5.10.1 钢热处理的主要缺陷	78
5.5.3 常用的淬火方法	70	5.10.2 热处理对零件设计的要求	79
5.5.4 钢的淬透性与淬硬性	71	复习与思考题 5	79
5.6 钢的回火	71		
5.6.1 钢的回火	71		
第 6 章 金属的塑性变形与再结晶	81		
6.1 金属的塑性变形	81	6.3.1 回复	87
6.1.1 单晶体的塑性变形	81	6.3.2 再结晶	87
6.1.2 多晶体的塑性变形	83	6.3.3 晶粒长大	88
6.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	84	6.4 金属的热变形加工	89
6.2.1 冷塑性变形对金属性能的影响	84	6.4.1 冷、热变形加工的区别	89
6.2.2 冷塑性变形对金属组织的影响	85	6.4.2 热变形加工对金属组织和性能的影响	90
6.3 冷塑性变形金属在加热时的变化	87	复习与思考题 6	91

第 7 章 低合金钢和合金钢	93
7.1 低合金钢与合金钢概述	93
7.1.1 低合金钢和合金钢	93
7.1.2 低合金钢和合金钢的分类	93
7.2 合金元素在钢中的作用	94
7.2.1 合金元素与铁、碳的作用	94
7.2.2 合金元素对铁碳相图的影响	95
7.2.3 合金元素对热处理的影响	97
7.2.4 合金元素对钢的工艺性能的影响	98
7.3 低合金钢与合金钢的编号	99
7.3.1 合金结构钢的编号	99
7.3.2 合金工具钢与特殊性能钢的编号	100
7.3.3 专用钢的编号	100
7.4 低合金钢	100
7.4.1 低合金钢的分类	100
7.4.2 低合金高强度钢 (HSLA)	101
7.4.3 低合金高耐候性钢	102
7.4.4 低温用钢	103
7.5 机器零件用钢	104
7.5.1 合金渗碳钢	104
7.5.2 合金调质钢	105
7.5.3 合金弹簧钢	107
7.5.4 滚动轴承钢	109
7.6 合金工具钢	110
7.6.1 低合金刀具钢	110
7.6.2 高速工具钢	111
7.6.3 合金模具钢	115
7.6.4 量具钢	118
7.7 特殊性能钢	119
7.7.1 不锈钢	119
7.7.2 耐热钢	122
7.7.3 高锰耐磨钢	124
复习与思考题 7	125
第 8 章 铸铁	128
8.1 铸铁及其石墨化	128
8.1.1 铸铁的特点和分类	128
8.1.2 铸铁的石墨化	129
8.1.3 影响石墨化程度的主要因素	130
8.2 灰铸铁	131
8.2.1 灰铸铁的组织	131
8.2.2 灰铸铁的性能	132
8.2.3 灰铸铁的牌号和用途	132
8.2.4 灰铸铁的热处理	133
8.3 球墨铸铁	133
8.3.1 球墨铸铁的化学成分和组织特征	133
8.3.2 球墨铸铁的牌号、性能和应用	133
8.3.3 球墨铸铁的热处理	134
8.4 蠕墨铸铁	135
8.4.1 蠕墨铸铁的化学成分和组织特征	135
8.4.2 蠕墨铸铁的牌号、性能特点及用途	135
8.5 可锻铸铁	136
8.5.1 可锻铸铁的化学成分和石墨化退火	136
8.5.2 可锻铸铁的牌号、性能特点及用途	137
8.6 特殊性能铸铁	138
8.6.1 耐磨铸铁	138
8.6.2 耐热铸铁	138
8.6.3 耐蚀铸铁	139
复习与思考题 8	139
第 9 章 有色金属及其合金	141
9.1 铝及铝合金	141
9.1.1 纯铝的性能与用途	141
9.1.2 铝合金的分类	142
9.1.3 铝合金的时效硬化	142
9.1.4 变形铝合金	143
9.1.5 铸造铝合金	145
9.2 铜及铜合金	146
9.2.1 纯铜	146
9.2.2 铜合金的分类及牌号表示方法	147
9.2.3 黄铜	148
9.2.4 青铜	149
9.2.5 白铜	151
9.3 钛及钛合金	151
9.3.1 钛及钛合金的种类和性能	151
9.3.2 常用的钛合金	152
9.4 滑动轴承合金	154

9.4.1 滑动轴承合金的性能和组织要求	154	合金)	155
9.4.2 锡基和铅基轴承合金(巴氏合金)		9.4.3 铜基和铝基轴承合金	155
		复习与思考题 9	156
第 10 章 非金属材料及复合材料	158		
10.1 塑料	158	10.3.1 陶瓷的定义和分类	163
10.1.1 塑料的组成	158	10.3.2 陶瓷的生产过程	164
10.1.2 塑料的分类	158	10.3.3 陶瓷的性能	164
10.1.3 塑料的特性	159	10.3.4 常用的陶瓷	165
10.1.4 常用工程塑料	159	10.4 复合材料	166
10.2 橡胶	161	10.4.1 复合材料的组成与基本类型	166
10.2.1 橡胶制品的组成	162	10.4.2 复合材料的性能特点	167
10.2.2 橡胶的分类	162	10.4.3 常用复合材料	167
10.2.3 常用的橡胶	162	复习与思考题 10	168
10.3 陶瓷	163		
第 11 章 金属材料的失效与选材	170		
11.1 金属材料的失效	170	11.2.2 金属材料选材的方法与步骤	175
11.1.1 失效的概念	170	11.3 典型零构件的选材	175
11.1.2 失效形式	170	11.3.1 轴类零件的选材	175
11.1.3 失效的原因	171	11.3.2 齿轮类零件的选材	177
11.1.4 失效分析的一般过程	172	11.3.3 刀具的选材	178
11.2 金属材料的合理选用	173	11.3.4 箱体类零件的选材	179
11.2.1 金属材料选材的一般原则	173	复习与思考题 11	180
附录	182		
附录 A 实验指导书	182	附录 D 常用钢种的临界温度	204
附录 B 平面布氏硬度值计算表	197	附录 E 金属热处理工艺的分类及代号	206
附录 C 黑色金属硬度及强度换算表	201	附录 F 世界各国常用钢号对照表	209
参考文献	212		

绪 论

1. 金属材料的分类及其在现代工业中的地位

材料是人类生存和发展的物质基础，从日常生活用的器具到高技术产品，从简单的手工具到复杂的航天器、机器人，都是用各种材料制作而成或由其加工的零件组装而成的。材料的发展水平和利用程度已成为人类文明进步的标志，从旧石器时代人们懂得利用材料到科技发达的现代社会，经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代、钢铁时代、半导体时代，现在人们正处于新材料时代。如今，材料、能源、信息已成为现代化社会生产的三大支柱，而材料又是能源和信息发展的物质基础。

现代材料种类繁多，据粗略统计，目前世界上的材料总和已达 40 多万种，并且每年还在以 5% 的速度增长。机械工程材料按化学成分可分成金属材料和非金属材料两大类，其中应用最广的仍是金属材料。

金属材料可分为两大类：黑色金属（或钢铁）和有色金属（也称非铁金属），如图 0-1 所示。

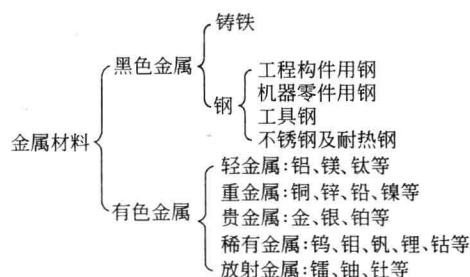


图 0-1 金属材料的分类

金属材料之所以应用广泛，原因是其来源丰富，而且具有优良的力学性能和工艺性能，如具有较高的强度、优良的塑性和韧性；具有耐热性、耐低温性、耐蚀性；可铸造、锻造、冲压和焊接；还有良好的导电性、导热性等。更为重要的是，金属材料的性能可以通过化学成分、热处理或其他加工工艺进行调整，使其性能可在较大范围内变化，以满足工程需要。

2. 金属材料的发展及材料科学的形成

金属是人类较早开发利用的材料。早在 4000 多年前，人类在寻找石器过程中认识了矿石，并在烧陶生产中发展了冶铜术，开创了冶金技术。殷商时期，我国青铜的冶铸技术已达到很高水平。公元前 1200 年，人类开始使用铸铁，从而进入了铁器时代。随着技术的进步，又发展了钢的制造技术。18 世纪，钢铁工业的发展，成为产业革命的重要内容和物质基础。19 世纪中叶，现代平炉和转炉炼钢技术的出现，使人类真正进入了钢铁时代。与此同时，铜、铅、锌也大量得到应用，铝、镁、钛等金属相继问世并得到应用。直到 20 世纪中叶，金属材料在材料工业中一直占有主导地位。进入 21 世纪，随着经济的飞速发展和科学的进步，对金属材料的要求越来越苛刻，结构材料向高强度、高韧性、耐腐蚀、耐高温等方向发展，新型金属材料也在不断地涌现。

第一次工业革命以后,钢铁进入大规模生产阶段,人们对金属材料的认识逐渐深入,将感性认识上升到理性认识的高度,自此,材料科学正式诞生了。1863年光学显微镜第一次被用于研究金属,英国金相学家和地质学家展示了钢铁在显微镜下的六种不同的金相组织,出现了“金相学”,同时证明了钢在加热和冷却时,内部会发生组织改变。法国人奥斯蒙德确立的铁的同素异构理论,以及英国人奥斯汀最早制定的铁碳相图,为现代热处理工艺初步奠定了理论基础。1912年X射线衍射技术、1932年电子显微镜的问世对金属材料与热处理产生巨大的推动作用,将人类已有的对金属材料的认识带入了更深的层次。如今,金属材料与热处理已经形成完善的学科体系,并继续向更高、更深入的方向发展。

新中国成立后,我国金属材料与热处理取得了快速发展,建立健全了材料工业体系,我国各种金属材料的品种齐全,已能满足国民经济发展的基本要求,2007年我国的钢产量已达6亿吨,高居世界首位。我国用自己生产的金属材料使“神舟”宇宙飞船升入太空、使原子弹和氢弹爆炸成功以及其他领域内的伟大成就都充分体现了我国在金属材料与热处理方面取得的发展和进步。但与世界发达国家相比,我们还有一定的差距,需要我们继续努力,以缩小这些差距。

3. 课程的性质、任务和学习方法

金属材料与热处理是高等职业院校机械类专业重要的技术基础课。学习本课程的目的是使学生获得常用金属材料的种类、成分、组织、性能和改性方法的基本知识。

从材料学的角度看,金属材料的性能取决于内部结构,而金属材料的内部结构又取决于成分和加工工艺,这同时也是金属材料与热处理这门课程一条鲜明的主线。所以,正确地选择金属材料,确定合理的加工工艺,得到理想的组织,获得优良的使用性能,是决定机械产品性能的重要环节。

本课程的任务就是以金属材料的性能为核心,以培养学生的能力为目标,以金属材料的应用为出发点,介绍常用金属材料的性能与成分、组织结构、加工工艺之间的关系,重点是机械工业中常用的金属材料。

通过本课程的学习,学生应掌握常用金属材料的种类、牌号、性能及应用,初步具有合理选用金属材料的能力;初步具有正确选择和制定热处理工艺的能力。

本课程既有一定的理论性,又有较强的应用性,各种概念、名词术语较多。因此,在学习时,应认真听讲,在记忆的基础上,注重理解、分析和应用,并注意前后内容的衔接与综合应用。在理论学习外,要注意密切联系生产和生活实际,运用如杂志、互联网等各种学习方式,广泛涉猎,勤动手,认真做好各项实验,认真完成各项作业。

在教学中应多采用直观教学、现场教学、多媒体教学、启发教学等,增加课堂教学的信息量和利用效率,培养学生的自学能力和思维能力,为后续专业课的学习打下良好的基础。

第 1 章 金属材料的力学性能

教学提示：

金属材料在现代工业中的广泛应用主要是由于其能满足各种工程构件或机械零件所需的力学性能和工艺性能要求，所以掌握各种金属材料的力学性能及其变化规律，根据工作条件及力学性能选择材料，充分发挥其性能潜力，是保证构件或零件质量的基础。

教学要求：

在本章中，将对金属材料的力学性能指标——强度、硬度、塑性、韧性和疲劳极限进行讲述。

金属材料的力学性能是指在承受各种外加载荷（拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等）时，对变形与断裂的抵抗能力及发生变形的能力。

常用的力学性能有：强度、刚度、弹性、塑性、硬度、冲击韧性及疲劳极限等。

1.1 强度与塑性

强度是指金属材料在静载荷作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力。塑性是指金属材料在静载荷作用下产生塑性变形而不致引起破坏的能力。金属材料的强度和塑性的判据可通过拉伸试验测定。

1.1.1 拉伸试验与拉伸曲线

1. 拉伸试验

拉伸试验是指在静拉伸力作用下，对试样进行轴向拉伸，直到拉断。根据拉伸试验绘制的应力-应变曲线，即可计算出强度和塑性的性能指标。

拉伸试验前，将材料制作成一定尺寸和形状的标准拉伸试样（GB/T 228—2002），如图 1-1 所示为常用的圆形拉伸试样。将拉伸试样装夹在拉伸试验机上，对试样施加拉力，在拉力不断增加的过程中，观察试样的变化，直至把试样拉断，如图 1-2 所示。

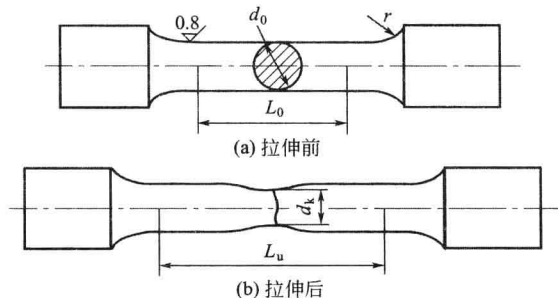


图 1-1 拉伸试样

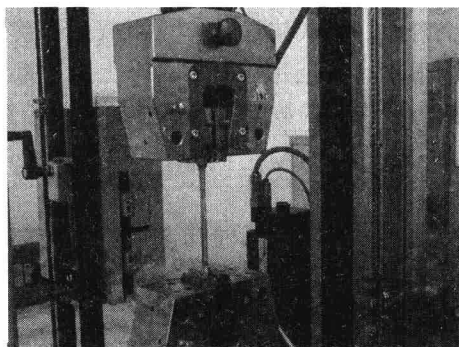


图 1-2 拉伸试验

2. 拉伸曲线

拉伸试验时，拉伸试验机可自动绘制出反映拉伸过程中载荷（ F ）与试样的伸长量（ ΔL ）之间关系的拉伸曲线，如图 1-3(a) 所示低碳钢的力-伸长曲线。用试样原始截面积 S_0 去除拉力 F 得到应力 σ ，用试样原始标距 L_0 去除伸长量 Δl 就得到应变 ϵ ，则力-伸长曲线就成了应力-应变曲线，如图 1-3(b) 所示。

拉伸过程可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

在曲线的 Op 段，试样的伸长量与载荷呈直线关系，完全符合胡克定律，试样处于弹性变形阶段。在曲线的 pe 段，伸长量与载荷不再成正比关系，拉伸曲线不成直线，试样仍处于弹性变形阶段。

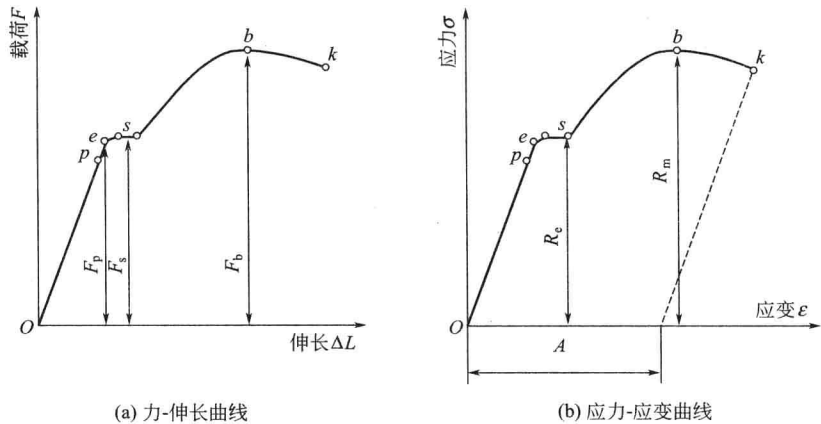


图 1-3 拉伸曲线

在曲线的 s 段（ e 点后的平台或锯齿），外力不增加或变化不大，试样仍继续伸长，出现明显的塑性变形，这种现象称为屈服，标志材料开始发生明显的塑性变形。

在曲线的 sb 段，载荷增加，伸长沿整个试样长度均匀进行，称均匀塑性变形阶段；同时，随着塑性变形不断增加，试样的变形抗力也逐渐增加，产生加工硬化，这个阶段是材料的强化阶段。

在曲线的最高点（ b 点），载荷达到最大，试样局部面积减小，伸长增加，形成了“缩颈”，如图 1-1(b) 所示。随着缩颈处截面不断减小（非均匀塑性变形阶段），承载能力不断下降，到 k 点时，试样发生断裂。

不同材料的拉伸曲线形状有很大差别，并不是都有明显的上述几个阶段。如灰铸铁、淬火高碳钢等脆性材料，在断裂前塑性变形量很小，甚至弹性变形后马上发生断裂，在拉伸曲线上没有屈服阶段或强化阶段，如图 1-4 所示为铸铁的拉伸曲线。

1.1.2 刚度

刚度是指材料抵抗弹性变形的能力，刚度的大小一般用弹性模量 E 表示。在拉伸曲线上，弹性模量就是直线（ Op ）段的斜率。对于材料而言，弹性模量 E 越大，其刚度越大。

弹性模量 E 主要取决于各种金属材料的本性，是一个对组织不敏感的力学性能指标。对钢进行热处理、微量合金化及塑性变

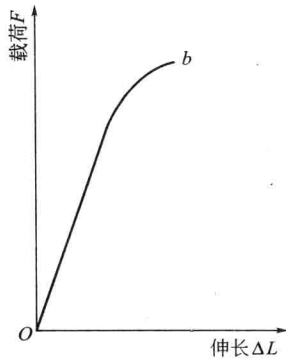


图 1-4 铸铁的拉伸曲线

形等，其弹性模量变化很小。常用材料的弹性模量如表 1-1 所示。

结构的刚度除取决于组成材料的弹性模量外，还同其几何形状、截面尺寸等因素以及外力的作用形式有关，在弹性模量 E 一定时，零件或构件的截面尺寸越大，其刚度越高。

对于一些须严格限制变形的结构（如机翼、高精度的装配件等），须通过刚度分析来控制变形。许多结构（如建筑物、船体结构等）也要通过控制刚度以防止发生振动、颤振或失稳。

表 1-1 常用材料的弹性模量

材料	陶瓷	钢	硬铝	铜	钛	铍青铜	聚酯塑料	玻璃	木材	混凝土	碳纤维强化复合材料
E/GPa	400	210	69	110	117	120	1~5	69	12	47	270

1.1.3 强度

工程上常用的强度指标有屈服强度、规定残余伸长强度、抗拉强度等。

1. 屈服强度和规定残余伸长强度

屈服强度是指表示材料开始产生明显塑性变形的最小应力值。当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点，应区分上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。上屈服强度是试样发生屈服而力首次下降前的最高应力；下屈服强度为屈服期间内，不计初始瞬时效应时的最低应力，如图 1-5 所示。

屈服强度 R_e 可用下式计算：

$$R_e = \frac{F_s}{S_0} \text{ (MPa)}$$

式中 F_s ——试样发生屈服现象时的载荷，N；

S_0 ——试样的原始横截面积， mm^2 。

对于高碳淬火钢、铸铁等材料，在拉伸试验中没有明显的屈服现象，无法确定其屈服强度。国标 GB/T 228—2002 规定，一般规定以试样达到一定残余伸长率对应的应力作为材料的屈服强度，称为规定残余伸长强度，通常记作 R_r 。例如 $R_{r0.2}$ 表示残余伸长率为 0.2% 时的应力。

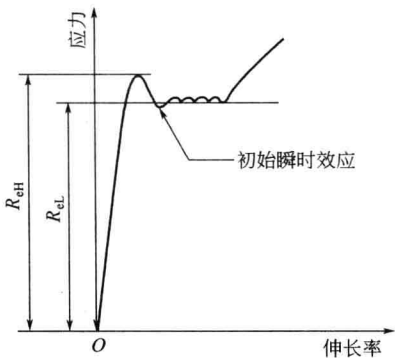


图 1-5 屈服强度的定义

工程上各种构件或机械零件工作时均不允许发生过量的塑性变形，因此屈服强度 R_e 和规定残余伸长强度 R_r 是工程技术上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。

2. 抗拉强度

抗拉强度是指材料在断裂前所承受的最大应力值，故又称强度极限，用 R_m 表示，即

$$R_m = \frac{F_b}{S_0} \text{ (MPa)}$$

式中 F_b ——试样拉断前承受的最大载荷，N；

S_0 ——试样的原始横截面积， mm^2 。

抗拉强度 R_m 是塑性材料抵抗大量均匀塑性变形的能力。铸铁等脆性材料拉伸过程中一般不出现缩颈现象，抗拉强度就是材料的断裂强度。

断裂是零件最严重的失效形式，所以，抗拉强度也是机械工程设计和选材的主要指标，

特别是对脆性材料来讲。

3. 强度的意义

强度是指金属材料抵抗塑性变形和断裂的能力，一般钢材的屈服强度在 200~1000MPa 之间。强度越高，表明材料在工作时越可以承受较高的载荷。当载荷一定时，选用高强度的材料，可以减小构件或零件的尺寸，从而减小其自重。因此，提高材料的强度是材料科学中的重要课题，称为材料的强化。

1.1.4 塑性

金属的塑性常用断后伸长率和断面收缩率表示。

1. 断后伸长率

断后伸长率是指试样拉断后标距的伸长量 ($L_u - L_0$) 与原始标距 L_0 的比值，用 A 表示，即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_u ——试样拉断后标距的长度，mm；

L_0 ——试样的原始标距，mm。

同一材料的试样长短不同，测得的断后伸长率略有不同。用短试样 ($L_0 = 5d_0$) 测得的断后伸长率 A 略大于用长试样 ($L_0 = 10d_0$) 测得的断后伸长率 $A_{11.3}$ 。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的减小量 ($S_0 - S_u$) 与原始横截面积 S_0 的比值，用 Z 表示，即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_u ——试样拉断后断裂处的最小横截面积，mm²；

S_0 ——试样的原始横截面积，mm²。

断面收缩率 Z 的大小与试样尺寸无关，只取决于材料的性质。很显然，断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 越大，说明材料在断裂前发生的塑性变形量越大，也就是材料的塑性越好。

3. 塑性的意义

任何零件都要求材料具有一定的塑性。塑性好的金属材料可以发生大量塑性变形而不破坏，便于通过各种压力加工方法（锻造、轧制、冷冲压等）获得形状复杂的零件或构件。如低碳钢的断后伸长率可达 30%，断面收缩率可达 60%，可以拉成细丝，轧成薄板，进行深冲成形。而铸铁由于塑性很差，不能进行塑性加工。此外，工程构件或机械零件在使用过程中虽然不允许发生塑性变形，但在偶然过载时，塑性好的材料发生一定的塑性变形而不致突然断裂；再者，材料塑性变形可以减弱应力集中、消减应力峰值，零件在使用时更显安全。

1.1.5 GB/T 228—2002 与 GB/T 228—1987 对比

目前金属室温拉伸试验方法采用 GB/T 228—2002 新标准，本书亦采用此标准。但一些书籍或资料的金属力学性能指标是按 GB/T 228—1987 测定和标注的，为方便读者学习和阅读，将关于金属材料强度与塑性的新、旧标准名称和符号对照列于表 1-2 中。

表 1-2 金属材料强度与塑性的新、旧标准名称和符号对照

GB 228—2002 新标准		GB 228—1987 旧标准	
名称	符号	名称	符号
屈服强度	$R_e^{\text{①}}$	屈服点	σ_s
上屈服强度	R_{eH}	上屈服点	σ_{sH}
下屈服强度	R_{eL}	下屈服点	σ_{sL}
规定残余伸长强度	R_r	规定残余伸长应力	σ_r
抗拉强度	R_m	抗拉强度	σ_b
断后伸长率	A 或 $A_{11.3}$	断后伸长率	δ_5 或 δ_{10}
断面收缩率	Z	断面收缩率	ψ

① 在 GB/T 228—2002 中没有对屈服强度的符号做出规定，本书采用 R_e 作为屈服强度的符号。

1.2 硬度

硬度是衡量金属材料软硬的指标，是指金属材料在静载荷作用下抵抗表面局部变形，特别是塑性变形、压痕、划痕的能力。

硬度试验设备简单，操作迅速方便，可直接在工件上测量而不伤工件，更为重要的是通过硬度测量可以估计出金属材料的其他力学性能指标，如强度、塑性等。因此，硬度是力学性能中最常用的性能之一，硬度试验在科研和生产中得到了广泛应用。

硬度的测定方法一般分为压入法、刻划法、回跳法三类。生产中常用的是压入法，它是将一定形状的压头，在一定的载荷下，压入被测的金属材料表面，根据压入程度来测定其硬度值。在同样的实验条件下（压头相同、载荷相同），若压入的程度越大，则材料的硬度越低，反之越高。生产中应用广泛的压入硬度测试方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

1.2.1 布氏硬度

布氏硬度试验法的原理是在一定的载荷 F 作用下，将一定直径 D 的硬质合金球压入到被测材料的表面，保持规定时间后将载荷卸掉，测量被测材料表面留下压痕的直径 d ，根据 d 计算出压痕球缺的面积 S ，最后求出压痕单位面积上承受的平均压力，以此作为被测金属材料的布氏硬度值，如图 1-6 所示。

布氏硬度值的计算公式为

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

式中 F ——载荷大小，N；
 D ——压头的直径，mm；
 d ——压痕表面的直径，mm；
 S ——压痕的面积，mm²。

布氏硬度值的单位为 kgf/mm² 或者 N/mm²，但习惯上布氏硬度是不标单位的。

布氏硬度实际测试时，硬度值是不用计算的，利用刻度放大镜测出压痕直径 d ，根据 d 值查平面布氏硬度表即可查出硬度值（见附录 B）。

目前，金属布氏硬度试验方法执行 GB/T 231—2002 标准，用符号 HBW 表示，布氏硬度试验范围上限为 650HBW。

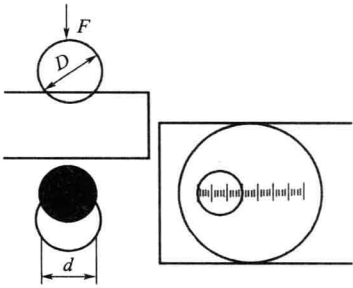


图 1-6 布氏硬度试验原理

布氏硬度的表示方法如下：硬度值+硬度符号+试验条件。如 200HBW10/1000/30 表示用 10mm 直径的硬质合金球压头，在 1000kgf（9.807kN）作用下，保持 30s（持续时间 10~15s 时，可以不标注），测得的布氏硬度值为 200。

在进行布氏硬度试验时，试验力 F 与压头直径（mm）的平方的比值（ $0.102F/D^2$ ）就应为 30、15、10、5、2.5、1 中的一个。根据金属材料的种类、试样厚度及试样的硬度范围，按照表 1-3 的规范选择合适的试验条件。

表 1-3 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度 值范围	球直径 D/mm	$0.102F/D^2$	试验力 F /N 或 kgf	保持时间 /s	备 注
钢、铸铁	≥ 140	10	30	29420(3000)	10	压痕中心距试样边沿 距离不应小于压痕平均 直径的 2.5 倍 相邻压痕中心距离不 应小于压痕平均直径的 4 倍 试样厚度至少应为压 痕深度的 10 倍。试验 后,试样支承面应无明 显变形痕迹
		5		7355(750)		
		2.5		1839(187.5)		
	< 140	10	10	9807(1000)	10~15	
		5		2452(250)		
		2.5		613(62.5)		
有色金属材料	≥ 130	10	30	29420(3000)	30	
		5		7355(750)		
		2.5		1839(187.5)		
	55~130	10	10	9807(1000)	30	
		5		2452(250)		
		2.5		613(62.5)		
	< 35	10	2.5	2452(250)	60	
		5		613(62.5)		
		2.5		153(15.5)		

布氏硬度的优点是试验时试样上压痕面积较大，能较好反映材料的平均硬度；数据较稳定，重复性好。缺点是测试麻烦，压痕较大，不适合测量成品及薄件材料。目前，布氏硬度主要用于铸铁、有色金属（如滑动轴承合金等）及经过退火、正火和调质处理的钢材。

1.2.2 洛氏硬度

洛氏硬度的试验原理是用顶角为 120° 金刚石圆锥体或者用直径为 1.588mm 的淬火钢球作为压头，先加初载荷为 98.07N（10kgf），再加规定的主载荷，将压头压入金属材料的表面，卸去主载荷后，根据压头压入的深度最终确定其硬度值，如图 1-7 所示。

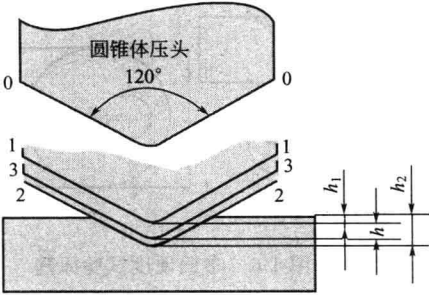


图 1-7 洛氏硬度试验原理

在图 1-7 中，0-0 位置为金刚石压头还没有与试样接触时的位置。当加初载荷后，压头与试样表面之间产生良好接触，此时压头位置为 1-1，压入深度为 h_1 ，并以此作为测量的基准；再施加主载荷，试样压到最深处，此时压头位置为 2-2，压入深度为 h_2 ；卸去主载荷后，被测试样的弹性变形恢复，压头略微抬高，此时压头位置为 3-3，测得的深度就是基准与压头顶点最后位置之间的距离 h 。 h 越大，被测金属的硬度越低，为了和习惯（数值越大，硬度越高）相符，用常数 k 减 h 来表示硬度大小，用 0.002mm 表

示一个硬度单位，洛氏硬度值（HR）的计算公式为：