

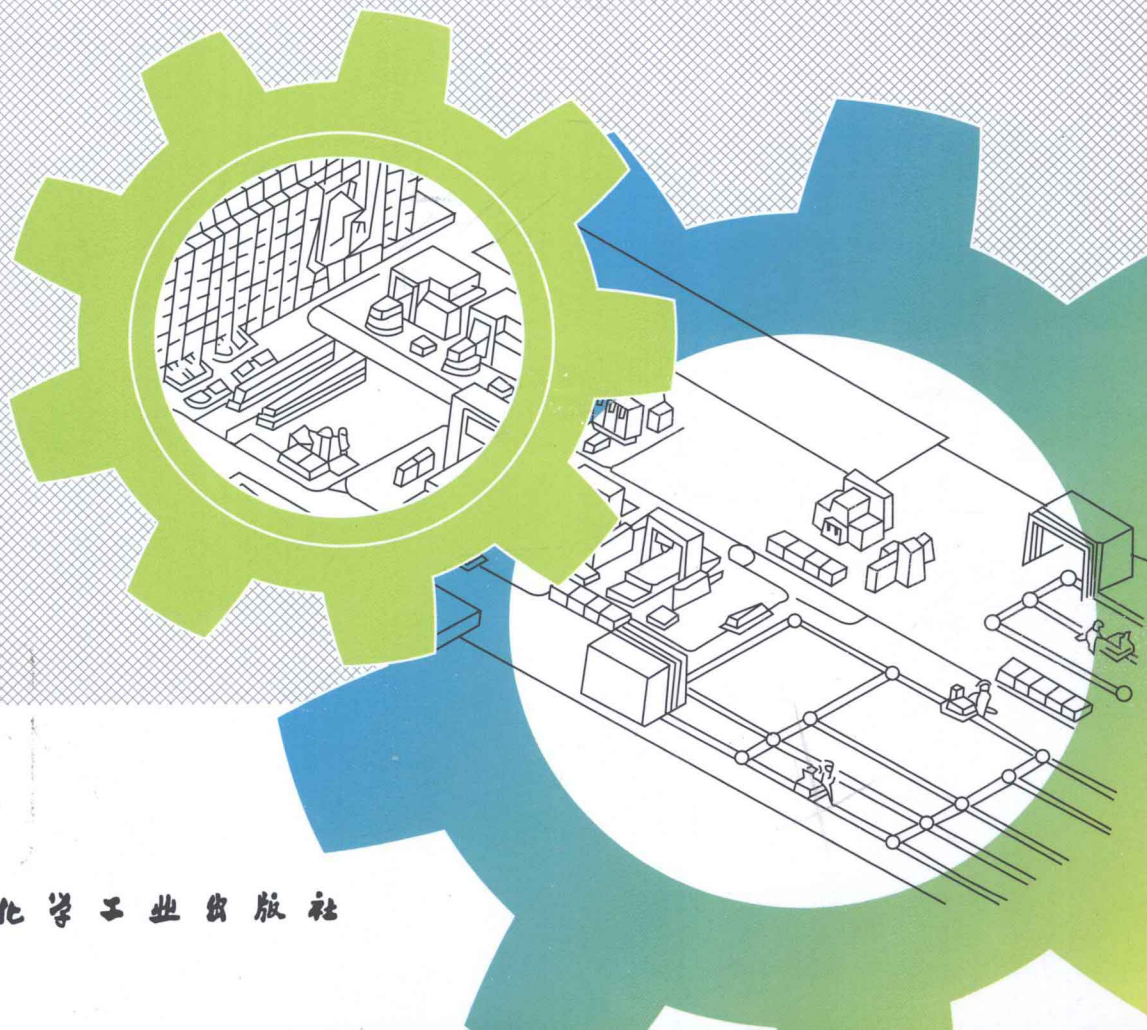
高等教育规划教材



机械制造基础

JIXIE ZHIZAO JICHU

王欣 主编 | 范敏 副主编 | 张斌 主审



化学工业出版社

本书由工程材料、材料成形工艺基础和机械制造工艺基础三篇组成。工程材料中主要介绍金属材料的基本知识,包含材料的力学、物理性能及结构,金属材料、陶瓷材料和复合材料的组成、性能、制备、应用和发展趋势,材料的强化方法和改性,零件失效与选材的关系等;材料成形工艺基础和机械制造工艺基础以介绍各种毛坯的成形方法及制造方法为主,其中包含铸造、压力加工、焊接、机械加工方法等各种成形方法及工艺,并且简要介绍了现代成形技术、现代制造技术及其发展趋势的相关内容,如非金属材料、复合材料及其成型,高能率成形,快速成形以及超精密加工、纳米加工和柔性制造系统等。

本书可作为高职高专和本科院校机电类专业教材,也可作为社会各种技能型人才培养以及相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/王欣主编. —北京:化学工业出版社,
2010.8

高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-09060-7

I. 机… II. 王… III. 机械制造-高等学校-教材
IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 129365 号

责任编辑:李娜 郭建永
责任校对:宋夏

装帧设计:刘丽华

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:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17½ 字数464千字 2010年9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:32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是根据教育部制定的机电类专业教学的基本要求和近颁布的国家有关标准,认真吸取兄弟院校专业教学改革的成功经验,在参阅了国内外出版的同类书籍之后编写而成的。

本书由工程材料、材料成形工艺基础和机械制造工艺基础三篇组成,研究了机器零件的常用材料和制造工艺方法,即从选择材料,制造毛坯,直到加工出零件。工程材料中主要介绍金属材料的基本知识,包含材料的力学、物理性能及结构、金属材料、陶瓷材料和复合材料的组成、性能、制备、应用和发展趋势,材料的强化方法和改性,零件失效与选材的关系等;材料成形工艺基础和机械制造工艺基础以介绍各种毛坯的成形方法及制造方法为主,其中包含铸造、压力加工、焊接、机械加工方法等各种成形方法及工艺,强化工艺设计,重在培养学生分析问题和解决问题的能力,并且简要介绍了现代成形技术、现代制造技术及其发展趋势的相关内容,如非金属材料、复合材料及其成形,高能率成形,快速成形以及超精密加工、纳米加工和柔性制造系统等。

本书按 72 学时编写,内容阐述全面准确,符合学生学习习惯;章节安排合理,重点突出,注重新技术、新工艺及其发展趋势;采用最新的国家标准,图文并茂;课堂教学与实践教学有机结合,能体现现代企业实际生产过程的加工工艺,并体现出与有关学科的相互交叉与渗透。作为应用性教材,本书可作为高职高专和本科院校的机电类专业教材,也可作为社会各种技能型人才培养以及相关工程技术人员参考用书。

参加本书编写的有:洛阳理工学院范敏(第 1、2、5、7 章),洛阳理工学院张庆丰(第 3、4、6 章),泰州职业技术学院顾振华(第 8、11 章),泰州职业技术学院张逊(第 9、10、12 章),泰州职业技术学院王欣(第 13、14、15、16 章)。本书由王欣担任主编,范敏担任副主编,泰州职业技术学院张斌审阅全书。

限于编者的水平,书中不妥之处在所难免,恳请有关专家、同行、广大读者批评指正。

编者

2010 年 5 月

目 录

第一篇 工 程 材 料

第 1 章 金属材料基础知识	1	3.3.1 冷、热塑性变形的区别	33
1.1 金属材料的性能	1	3.3.2 热塑性变形对金属组织和性能的影响	34
1.1.1 金属材料的力学性能	1	第 4 章 钢的热处理	36
1.1.2 金属材料的工艺性能	4	4.1 钢在加热时的转变	36
1.2 金属材料的分类	5	4.1.1 奥氏体形成过程及影响因素	36
1.2.1 钢铁材料	5	4.1.2 奥氏体晶粒大小及其影响因素	37
1.2.2 有色金属与合金	7	4.2 钢在冷却时的转变	38
第 2 章 金属与合金材料结构	9	4.2.1 共析钢过冷奥氏体等温转变曲线	39
2.1 纯金属的晶体结构与结晶	9	4.2.2 过冷奥氏体转变及其产物的组织形态与性能	39
2.1.1 晶体的基本概念	9	4.2.3 过冷奥氏体的连续冷却转变	41
2.1.2 常见金属的晶格类型	10	4.3 钢的退火和正火	43
2.1.3 晶体的不完整性	12	4.3.1 退火	43
2.1.4 纯金属的结晶	14	4.3.2 正火	44
2.2 合金的相结构	15	4.4 钢的淬火	45
2.2.1 合金的概念	15	4.4.1 淬火工艺及方法	45
2.2.2 合金中的相结构	15	4.4.2 钢的淬透性和淬硬性	47
2.3 合金的结晶	17	4.4.3 常见的淬火缺陷及预防	47
2.3.1 二元匀晶状态图	17	4.5 钢的回火	48
2.3.2 二元共晶状态图	18	4.5.1 淬火钢在回火时的转变	48
2.4 铁碳合金状态图	20	4.5.2 回火种类及应用	49
2.4.1 铁碳合金中的相、组织、性能	20	4.6 钢的表面热处理	50
2.4.2 铁碳合金状态图分析	20	4.6.1 钢的表面淬火	50
2.4.3 典型铁碳合金结晶过程分析	22	4.6.2 钢的化学热处理	51
第 3 章 金属的塑性变形	25	第 5 章 常用金属材料	54
3.1 金属的冷塑性变形	25	5.1 钢中合金元素作用	54
3.1.1 金属的塑性变形	25	5.1.1 钢中常见合金元素	54
3.1.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	28	5.1.2 合金元素对钢的影响	54
3.2 回复与再结晶	30	5.2 工程构件用钢	57
3.2.1 回复	30	5.2.1 碳素构件用钢	57
3.2.2 再结晶	31	5.2.2 低合金结构钢	58
3.2.3 晶粒的长大	32	5.3 机器零件用钢	61
3.2.4 影响再结晶退火后晶粒大小的因素	32	5.3.1 渗碳钢	61
3.3 金属的热塑性变形	33		

5.3.2 调质钢	62	5.7.1 铝及铝合金	92
5.3.3 弹簧钢	66	5.7.2 铜及铜合金	93
5.3.4 滚动轴承钢	68	5.7.3 轴承合金	96
5.4 工模具用钢	70	5.7.4 钛及钛合金	100
5.4.1 刀具钢	70	第6章 非金属材料	101
5.4.2 冷作模具钢	73	6.1 高分子材料	101
5.4.3 热作模具钢	74	6.1.1 塑料	101
5.4.4 塑料模具钢	76	6.1.2 橡胶	103
5.4.5 量具用钢	76	6.2 其他非金属材料	104
5.5 特殊性能钢	77	6.2.1 陶瓷材料	104
5.5.1 耐蚀钢	77	6.2.2 复合材料	104
5.5.2 耐热钢	81	第7章 零件的选材及工艺路线	107
5.5.3 耐磨钢	81	7.1 选材方法	107
5.6 铸铁	84	7.1.1 零件的失效分析	107
5.6.1 概述	84	7.1.2 零件选材的一般原则	110
5.6.2 灰铸铁	86	7.2 典型零件选材	111
5.6.3 可锻铸铁	87	7.2.1 轴杆类零件的选材	111
5.6.4 球墨铸铁	88	7.2.2 轮盘类零件的选材	112
5.6.5 合金铸铁	91	7.2.3 箱座类零件的选材	113
5.7 有色金属及其合金	92		

第二篇 材料成形工艺基础

第8章 铸造	115	8.6 特种铸造	139
8.1 概论	115	8.6.1 金属型铸造	139
8.2 铸件成形理论基础	116	8.6.2 熔模铸造	141
8.2.1 液态金属的充型	116	8.6.3 压力铸造	142
8.2.2 金属的凝固	118	8.6.4 离心铸造	143
8.2.3 金属的收缩	119	8.6.5 消失模铸造	143
8.3 砂型铸造	123	8.7 铸造技术的发展趋势	144
8.3.1 造型材料	124	第9章 锻压成形	146
8.3.2 造型(芯)方法	124	9.1 锻压工艺基础	146
8.3.3 合箱	126	9.1.1 金属的锻造性能	146
8.3.4 浇注	127	9.1.2 变形后金属的组织 and 性能	147
8.3.5 落砂、清理及检验	128	9.1.3 塑性成形的基本生产方式	148
8.4 铸造工艺	128	9.2 自由锻	149
8.4.1 浇注位置的选择	128	9.2.1 自由锻设备	149
8.4.2 铸型分型面的选择	129	9.2.2 自由锻工序	150
8.4.3 工艺参数的确定	131	9.2.3 自由锻件的分类和锻造过程	150
8.4.4 浇注系统	132	9.3 模锻	153
8.4.5 铸造工艺图	134	9.3.1 锤上模锻	153
8.5 铸件的结构工艺性	135	9.3.2 模锻件结构工艺性	154
8.5.1 合金铸造性能对铸件结构的要求	136	9.4 板料冲压	154
8.5.2 铸造工艺对铸件结构的要求	136	9.4.1 板料冲压基本工序	154
		9.4.2 冲床及冲模	156

第 10 章 焊接	157	11.1.1 注射成型	172
10.1 焊接过程与焊接质量	157	11.1.2 挤出成型	173
10.1.1 手工电弧焊	157	11.1.3 模压成型	174
10.1.2 焊接接头的组织和性能	159	11.1.4 压注成型	174
10.1.3 焊接应力与变形	161	11.1.5 吹塑成型	175
10.2 其他焊接方法	162	11.2 橡胶成型	175
10.2.1 气体保护焊	162	11.2.1 橡胶压制成型	175
10.2.2 埋弧焊	163	11.2.2 橡胶注射成型	176
10.2.3 电渣焊	164	11.3 陶瓷成型	176
10.2.4 电阻焊	165	11.3.1 注浆成型	177
10.2.5 钎焊	165	11.3.2 压制成型	178
10.3 常用金属材料的焊接	166	11.3.3 注射成型	178
10.3.1 金属材料的焊接性	166	11.4 复合材料成型	178
10.3.2 碳素钢和低合金结构钢的 焊接	166	11.4.1 手糊成型	179
10.3.3 不锈钢的焊接	167	11.4.2 喷射成型	179
10.3.4 铸铁的焊补	168	11.4.3 铺层法成型	179
10.3.5 非金属的焊接	168	11.4.4 缠绕法成型	180
10.4 焊接结构工艺性	169	11.4.5 层压成型	180
10.4.1 焊接结构材料的选择	169	第 12 章 零件的毛坯选择	181
10.4.2 焊缝布置	169	12.1 毛坯选择的原则	181
10.4.3 焊接接头的选择及坡口形式 设计	171	12.2 常用毛坯成形方法的比较	184
第 11 章 非金属材料成型工艺	172	12.3 常用零件的成形方法	186
11.1 塑料成型	172	12.3.1 轴杆类零件	186
		12.3.2 盘套类零件	186
		12.3.3 机架、箱体类零件	187

第三篇 机械制造工艺基础

第 13 章 金属切削加工基础知识	188	13.5.1 机床的运动	204
13.1 切削运动与切削用量	188	13.5.2 机床传动的组成和传动 原理图	205
13.1.1 切削运动	188	第 14 章 零件表面的加工方法	208
13.1.2 工件表面	189	14.1 外圆表面加工	208
13.1.3 切削用量	189	14.1.1 外圆表面的车削加工	208
13.2 刀具材料与刀具构造	190	14.1.2 外圆表面的磨削加工	209
13.2.1 刀具材料	190	14.2 内圆表面加工	214
13.2.2 刀具构造	191	14.2.1 钻削加工	215
13.3 金属切削过程	193	14.2.2 镗削加工	218
13.3.1 切削的形成过程	194	14.2.3 内圆表面磨削加工	220
13.3.2 切削力	194	14.3 平面加工	222
13.3.3 切削热和切削温度	196	14.3.1 刨削与插削加工	222
13.3.4 刀具磨损和刀具寿命	196	14.3.2 铣削加工	225
13.4 金属切削条件的选择	199	14.3.3 平面磨削加工	230
13.4.1 工件材料的切削加工性	199	第 15 章 机械加工工艺过程的基础	
13.4.2 金属切削条件的选择	200		
13.5 金属切削机床的基础知识	204		

知识	232	16.1.1 电火花加工	250
15.1 工艺过程与工艺规程	232	16.1.2 电解加工	255
15.1.1 工艺过程	232	16.1.3 超声波加工	256
15.1.2 机械加工工艺过程的组成	232	16.1.4 激光加工	257
15.1.3 生产纲领和生产类型	234	16.1.5 电子束加工	259
15.1.4 机械加工工艺规程制订	235	16.1.6 离子束加工	260
15.2 零件的结构工艺性	238	16.2 先进制造技术简介	261
15.3 典型零件机械加工工艺过程	241	16.2.1 数控加工技术	261
15.3.1 轴类零件加工	241	16.2.2 快速成形技术	263
15.3.2 套类零件加工	244	16.2.3 超精密与纳米加工技术	265
15.3.3 箱体类零件加工	246	16.2.4 工业机器人	266
第 16 章 现代制造技术	250	16.2.5 柔性制造技术	267
16.1 特种加工	250	参考文献	270

第一篇 工程材料

第 1 章 金属材料基础知识

金属材料可分为黑色金属和有色金属两大部分,黑色金属以钢铁材料为基本构成,在金属材料体系内,钢铁材料因其具有冶金生产、产品加工和社会应用等多方面显著优势,使其处于材料体系内不可动摇的主导地位。

1.1 金属材料的性能

1.1.1 金属材料的力学性能

材料在力的作用下所表现出的特性即为材料的力学性能。力学性能包括强度、硬度、塑性、韧性、疲劳性能、耐磨性等。不同的应用条件对材料性能要求有所不同。但一般来说,力学性能是衡量结构材料质量的主要指标。

金属材料的力学性能依据外力的作用速度分为静态力学性能和动态力学性能两类。所谓“静态”是指以很慢的速度施加载荷,“动态”就是以较快的速度施加载荷。外力的具体作用又可分拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切等形式。

(1) 拉伸试验与拉伸曲线

拉伸试验是测定材料强度与塑性等静态力学性能的一种试验方法。

拉伸实验是在拉伸实验机上,缓慢地在试样两端施加“静”载荷,使试样在工作部分受轴向拉力,引起试样沿轴向伸长并最终拉断的过程,通过相应的试验记录,可得到拉伸曲线,如图 1.1.1 所示。拉伸曲线的纵坐标为载荷,横坐标为伸长变形。低碳钢材料塑性较好,拉伸曲线一般可分为三个阶段。

① OE ——弹性变形阶段 此阶段载荷与变形为直线关系。在此变形阶段去除载荷后试样可以恢复原来的长度。

② EK ——塑性变形阶段 此阶段载荷与变形呈曲线关系。当载荷达到 B 点的最大值后,试样某处截面急剧缩小,出现“缩颈”现象。在此阶段若去除载荷,试样不能恢复原来长度,已发生塑性变形。

③ K 点——断裂阶段 在 B 点以后,试样变形主要集中在缩颈部分,最终在此处发生断裂。

a. 弹性和刚度 在弹性变形阶段加载过程中,若中途卸除载荷,试样恢复原长度。材料这种不产生永久变形的能力称为弹性。拉伸曲线直线段的斜率为材料的弹性模量。弹性模量表征材料产生弹性变形的难易程度。曲线斜率越大,弹性变形越不易发生,材料刚度越大。

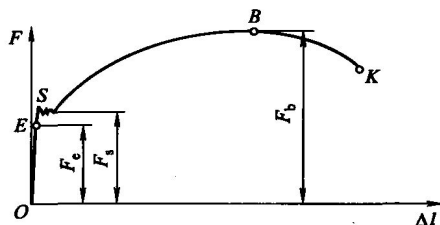


图 1.1.1 低碳钢拉伸曲线

b. 强度和塑性 在外力作用下，金属材料抵抗变形和断裂的能力称为材料的强度。拉伸试验所测定的强度指标包括弹性极限、屈服强度和抗拉强度等。

屈服强度：金属材料在外力作用下发生塑性变形的最小应力叫屈服强度，用 R_{eH} 和 R_{eL} 表示。分别表示上屈服强度和下屈服强度，由于下屈服强度重现性好，通常用它来表示材料的屈服强度。“屈服”是低碳钢等塑性好的材料受拉伸时产生的现象，即在拉伸过程进行到 S 点附近，载荷虽不再增加，但变形仍在增大的现象。与此相对应的应力即为屈服应力或屈服强度。实际上，一些金属材料并没有明显的屈服现象。工程上规定，试样产生 0.2% 非比例延伸率时的应力值为该材料的条件屈服强度，记为 $R_{p0.2}$ 。屈服强度是评价材料承载能力的重要力学性能指标。

抗拉强度：试样在被拉断前的最大承载应力为抗拉强度，记为 R_m 。图 1.1.1 中 B 点载荷所对应的应力即为其抗拉强度。

通过扭转试验、弯曲试验和压缩试验等性能测试方法，也可获得金属材料相应条件下的强度指标，例如抗扭强度、抗弯强度、抗压强度等。

塑性：金属材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力称为塑性。塑性以材料断裂后发生永久变形的大小来衡量。拉伸试验所测定的材料塑性指标有延伸率和断面收缩率，分别用 A 和 Z 表示。

$$A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad Z = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中， L_0 与 F_0 分别为试样原始长度与原始截面积， L_1 与 F_1 分别为试样拉断后的长度与拉断处的截面积。A 值与 Z 值越大，材料的塑性越好。

(2) 硬度

金属材料硬度是抵抗其他更硬外来物体压入其表面的能力。硬度是衡量材料软硬程度的指标。一般情况下，材料硬度越高，越有利于其耐磨性的提高。生产中常用硬度值来估测材料耐磨性的好坏。工程上常用的有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度、显微硬度等实验方法。

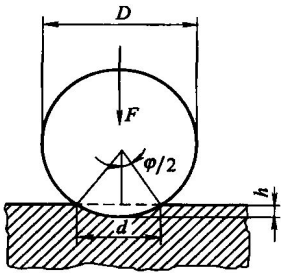


图 1.1.2 布氏硬度原理图

① 布氏硬度 布氏硬度试验原理如图 1.1.2 所示，将直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球制成的压头，以压力 F 压入被测材料的表面，保持一定时间后卸除负荷。材料表面将留下直径为 d 的压痕。负荷 F 与材料表面压痕面积的比值，即为材料的布氏硬度值，用 HB 表示。材料越软压痕越大，布氏硬度值越高，反之材料越硬压痕越小，布氏硬度值越低。布氏硬度的单位为 kgf/mm^2 。

布氏硬度适用于测量铸铁、有色金属、结构钢等硬度不很高的金属材料的硬度。若材料硬度过高，则布氏硬度不再适用。

布氏硬度压头为硬质合金球时，用 HBW 表示，适用于测量布氏硬度值在 650 以下的材料。

② 洛氏硬度 洛氏硬度试验原理如图 1.1.3 所示，洛氏硬度试验采用的压头，为锥角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588mm 的淬火钢球，以一定的压力压入材料表面，与布氏硬度不同，洛氏硬度通过测量压痕深度来确定材料硬度，压痕越深，材料越软，硬度值越低，反之，压痕越浅，材料越硬，硬度值越高。

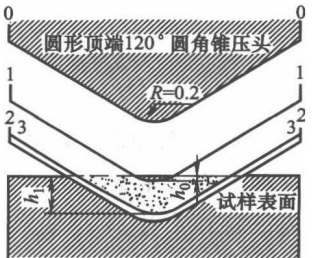


图 1.1.3 洛氏硬度原理图

不同压头及不同压力的组合，使得洛氏硬度可测量的材料

硬度范围很宽。洛氏硬度用 HR 表示。根据压头与压力的不同组合而采用不同的标尺，每种标尺用一个字母缀在 HR 之后，以作区别，如 HRA、HRB、HRC 等。

洛氏硬度可测定的硬度范围较宽。但因压痕小、易受材料微区不均匀的影响，因而数据重复性差。洛氏硬度可测定淬火钢、有色金属及工程塑料等材料的硬度。

硬度实验是材料力学性能实验中最简单的一种实验方法。生产中往往通过硬度值估测材料某些力学性能的指标值。某些金属材料的硬度与强度之间具有近似的对应关系。例如：

低碳钢： $R_m \approx 3.53HBW$ 合金调质钢： $R_m \approx 3.19HBW$

高碳钢： $R_m \approx 3.33HBW$ 灰铸铁： $R_m \approx 0.98HBW$

(3) 韧性

韧性是材料抵抗裂纹萌生与扩展的能力，指材料在断裂过程中吸收断裂功和塑性变形功的能力。材料韧性高，其脆性低。

度量韧性的指标有两类。一类是冲击韧性，用材料受冲击而破断的过程所吸收的冲击功的大小来表征材料的韧性。另一类是断裂韧性，用材料内部裂纹尖端应力强度因子的临界值 K_{IC} 来表征材料的韧性。

① 冲击韧性 在工程上，许多机件和工具均会处于冲击载荷作用下，如汽车和工程机械齿轮、锻锤锤杆、飞机起落架等。冲击载荷是一种典型的动载荷形式，由于冲击载荷加载速度大，作用时间短，机件常常因其而产生变形或破坏。因此，对于承受冲击载荷的机件，必须具有足够抵抗冲击载荷的能力，即冲击韧性。

a. 一次摆锤弯曲冲击试验。冲击韧性是金属材料在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力。一般以标准试样在冲击载荷作用下，材料破坏时的冲击吸收功 A_K 来表示。如图 1.1.4 所示，为一次摆锤弯曲冲击实验原理及所用试样。测量摆锤初始高度 H 及冲断试样后的高度 h ，即可测出标准试样在断裂过程中的冲击吸收功 A_K 。

b. 多次弯曲冲击试验。有许多承受冲击载荷的机件，每次所受冲击载荷并不大，不至于在一次或几次冲击内断裂，而是在大于 10^3 次以上的冲击之后才发生断裂。对于此类机件应进行小能量（小于 1500J）多次冲击试验，来测定材料的多次冲击抗力，评定材料的抗冲击能力。

多次冲击弯曲试验在相应的试验机上完成，试件在试验机上受到能量较小的多次冲击，试验完成后，测定在一定能量下，材料断裂前的冲击次数，作为多次冲击的抗力指标。

多次冲击抗力是一个取决于材料强度和塑性的综合力学性能指标。冲击能量高时，多次冲击抗力主要取决于材料的塑性，冲击能量低时，多次冲击抗力主要取决于其强度。

② 断裂韧性 断裂韧性是以断裂力学为基础的材料韧性指标。断裂力学承认材料中存在着由各种缺陷构成的微裂纹，在外力作用下，这些微裂纹将扩展，最终导致材料的断裂。由于存在裂纹，材料中应力分布不均匀，在裂纹尖端产生应力集中，并具有特殊的分布，形成了一个裂纹尖端的应力场。对于易于扩展的张开型裂纹，裂纹尖端应力场的大小可用应力强度因子 K_I 来描述。 K_I 与裂纹形状、尺寸及应力大小有关，可表达为：

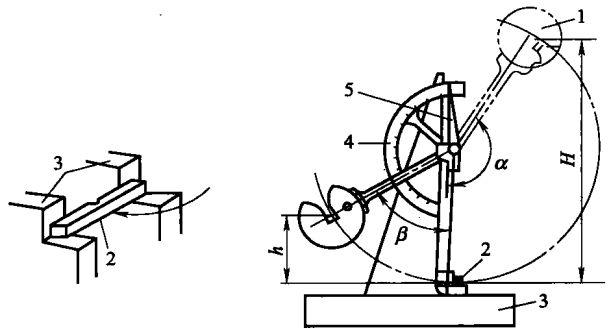


图 1.1.4 一次弯曲冲击实验示意图

1—摆锤；2—试样；3—机架；4—刻度盘；5—指针

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

式中, Y 为几何因子, σ 为外加应力, a 为裂纹半长。当 K_I 增加到某一定值时, 裂纹 a 的扩展速度会剧增, 从而导致断裂。使裂纹失稳扩展的应力强度因子临界值 K_{IC} , 即为材料的断裂韧性。

(4) 疲劳性能

载荷的大小做周期性变化时, 将在材料内部产生重复应力, 载荷大小和方向均做周期性变化时, 将在材料内部产生交变应力。齿轮、轴、弹簧等许多机械零件, 在重复或交变应力下工作, 此类零件即使承受应力最大值低于材料的屈服强度, 经一定的循环周次后材料仍会断裂, 这种现象即为材料的疲劳。疲劳断裂与静载荷下的断裂不同, 无论是脆性材料还是韧性材料, 疲劳断裂都是突然发生。

疲劳破坏是一个裂纹发生和发展的过程。由于材料冶金质量或加工过程出现缺陷, 造成

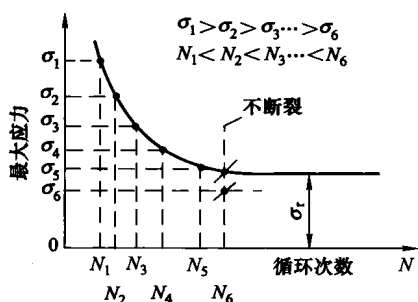


图 1.1.5 疲劳曲线

零件局部区域应力集中, 在交变载荷的作用下, 产生疲劳裂纹, 并随着应力循环周次的增加不断扩展, 材料承受载荷有效面积不断减小, 当有效面积减小到不能承受外加载荷作用时, 材料即会发生瞬时断裂。交变应力最大值与断裂循环周次之间的关系可用图 1.1.5 所示的疲劳曲线描述, 可见金属所受交变应力越大, 断裂前所受的循环周次 N 越少, 当应力低于某数值时, 在无限多的循环周次下材料也不断裂, 此应力值称为疲劳强度或疲劳极限, 用 σ_{-1} 表示, 单位为 N/mm^2 。

一般规定一个应力循环基数, 超过这个基数即认为该材料不再发生疲劳破坏。钢的循环基数为 10^7 , 有色金属和某些超高强度钢的循环基数为 10^8 。

金属疲劳强度与抗拉强度之间存在近似的比例关系:

碳素钢: $\sigma_{-1} \approx (0.4 \sim 0.5) R_m$

灰铸铁: $\sigma_{-1} \approx 0.4 R_m$

非铁金属: $\sigma_{-1} \approx (0.3 \sim 0.4) R_m$

疲劳现象主要出现在具有较高塑性的材料中, 疲劳破坏是金属主要失效形式之一。

(5) 耐磨性

一个零件相对另一个零件摩擦的结果, 引起摩擦表面有微小颗粒分离出来, 使接触面尺寸变化、重量损失, 这种现象称为磨损。材料对磨损的抵抗能力为材料的耐磨性, 可用磨损量表示。在一定条件下的磨损量越小, 则耐磨性越高。

降低材料的摩擦系数、提高材料硬度有助于增加材料的耐磨性。在干摩擦的情况下, 非金属材料摩擦系数较小, 不易黏附。金属材料尤其是软金属材料自身配对时摩擦系数大, 最易发生黏着磨损。因此在非完全润滑的重要机械摩擦副中, 尽量不用同种材料。例如蜗轮与蜗杆, 蜗轮多用青铜合金, 而蜗杆多用钢材制造。

1.1.2 金属材料的工艺性能

金属材料成形加工的难易程度, 称为金属材料的工艺性能, 包括以下几个方面。

(1) 铸造性能

主要指液态金属的流动性和凝固过程中的收缩性及偏析倾向。流动性好, 收缩和偏析性倾向小, 铸造性能好。

(2) 锻造性能

主要是指金属锻造时，其塑性好坏和变形抗力大小。塑性大，变形抗力小，锻造性能好。

(3) 切削加工性能

工件材料接受切削加工的难易程度，称为材料的切削加工性能。切削加工性能的好坏与材料的物理和力学性能有关。

(4) 热处理工艺性能

材料在实施热处理工艺过程中所应具有的工艺性能，包括淬透性、热处理应力倾向、加热和冷却过程中的裂纹形成倾向等，它对于钢材十分重要。

1.2 金属材料的分类

工业生产上，依据金属材料的成分组成，将其划分为钢铁材料与有色金属材料两大类。

1.2.1 钢铁材料

钢铁材料又分为生铁与钢材两类。钢材是含碳量小于 2.11% 的铁碳合金。

(1) 钢材的分类

为了便于生产、保管、选材和研究，可将钢材按其冶炼方法、质量类别、化学成分和用途不同加以分类，分别见表 1.2.1~表 1.2.4。实际工业生产中，钢材分类一般采用综合性的分类方法，如优质碳素结构钢，包含了质量、成分和用途等三重含义。

表 1.2.1 钢材在冶金方法上的分类

熔炼炉的种类	转炉钢、电炉钢、平炉钢
冶炼时的脱氧程度	镇静钢、半镇静钢、沸腾钢
钢材的酸碱性	碱性钢、酸性钢

表 1.2.2 钢材在化学成分上的分类

名 称	化 学 成 分
碳钢	低碳钢 $w_C < 0.25\%$ ，中碳钢 $w_C = 0.25\% \sim 0.60\%$ ，高碳钢 $w_C > 0.60\%$
合金钢	低合金钢 合金元素总量 $w_M < 5\%$
	中合金钢 合金元素总量 $w_M = 5\% \sim 10\%$
	高合金钢 合金元素总量 $w_M > 10\%$

表 1.2.3 钢材在质量上的分类

名 称	成 分	
普通钢	碳素结构钢	A 级 $w_S \leq 0.05\%$
		B 级 $w_S, w_P \leq 0.045\%$
		C 级 $w_S, w_P \leq 0.040\%$
优质钢	低合金结构钢	$w_S, w_P \leq 0.045\%$
	D 级碳素结构钢	$w_S \leq 0.035\%, w_P \leq 0.035\%$
	优质碳素结构钢	
	合金结构钢	
	碳素工具钢	$w_S \leq 0.030\%, w_P \leq 0.035\%$

续表

名 称	成 分	
高级优质钢(标号 A)	碳素工具钢	$w_S \leq 0.020\%, w_P \leq 0.030\%$
	合金结构钢	$w_S \leq 0.025\%, w_P \leq 0.030\%$
	合金工具钢	$w_S \leq 0.030\%, w_P \leq 0.030\%$
特级优质钢(标号 E)		$w_S \leq 0.015\%, w_P \leq 0.025\%$

表 1.2.4 钢材在用途上的分类

名 称	用 途	
结构钢	工程结构用钢	建筑用钢, 专门用钢(桥梁、船舶及锅炉用钢)
	机械零件用钢	渗碳钢, 调质钢, 弹簧钢, 滚动轴承钢
工具钢	量具钢, 刀具钢, 模具钢,	
特殊性能钢	不锈钢, 耐热钢, 耐磨钢	

(2) 铸铁

铸铁是碳含量大于 2.11% 的铁碳合金, 并且还含有较多量的硅、锰、硫、磷等元素。铸铁是工程上常用的金属材料, 铸铁优良的使用性能和工艺性能, 以及相对低廉的价格, 使其广泛应用在机械制造、冶金、矿山、石油化工、交通等部门。按重量百分比计算, 农业机械中铸铁件占 40% ~ 60%, 汽车拖拉机中约占 70% ~ 80%, 机床制造中约占 60% ~ 90%。

① 铸铁的组织 and 分类 铸铁分为灰口铸铁、麻口铸铁和白口铸铁等三大基本类型。表 1.2.5 中列出了铸铁经不同程度石墨化后所得到的显微组织类型。其中的灰口铸铁是常规的工业铸铁。

表 1.2.5 铸铁经不同程度石墨化后所得到的显微组织

名 称	石墨化程度			显微组织
	第一阶段	第二阶段	第三阶段	
灰口铸铁	充分进行	充分进行	充分进行	F+G
麻口铸铁	部分进行	部分进行	不进行	$L'_c + P + G$
白口铸铁	不进行	不进行	不进行	$L'_c + P + Fe_3C$

② 工业铸铁的组织 and 分类 灰口铸铁依据其组织形态可分为灰口铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁等四种类型的工业铸铁。

工业铸铁的组织由石墨和基体两部分组成。基体可以是铁素体, 珠光体或铁素体加珠光体。一般根据石墨的形态对工业铸铁进行分类, 如图 1.2.1 所示。

a. 灰口铸铁: 具有片状石墨组织的工业铸铁为灰口铸铁, 其显微组织如图 1.2.1(a) 所示。灰口铸铁又可分为片状石墨相对粗大的普通的灰口铸铁, 以及片状石墨相对细小的孕育铸铁两种。

b. 可锻铸铁: 具有团絮状石墨组织的工业铸铁为可锻造铸铁, 其显微组织如图 1.2.1(b) 所示。

c. 球墨铸铁: 具有球状石墨组织的工业铸铁为球墨铸铁, 其显微组织如图 1.2.1(c) 所示。

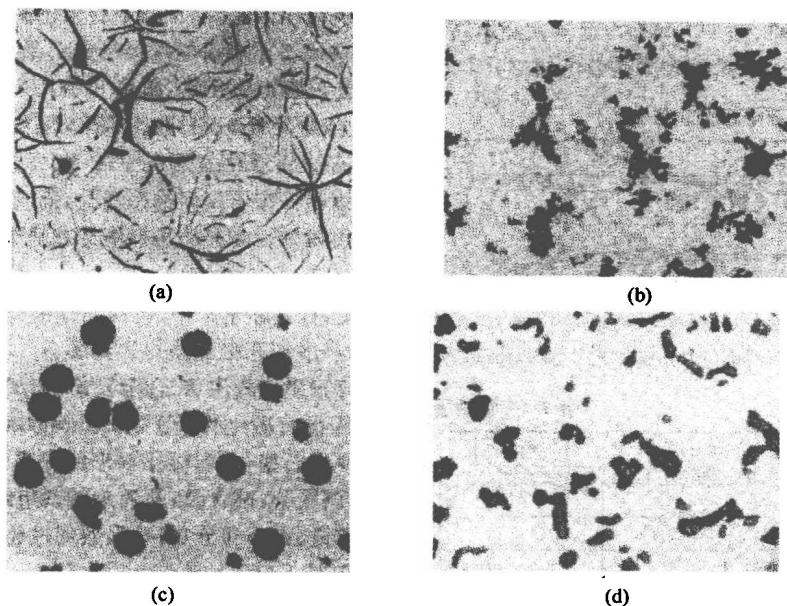


图 1.2.1 铸铁中石墨的四种存在形态

d. 蠕墨铸铁：具有蠕虫状石墨组织的工业铸铁为蠕墨铸铁，其显微组织如图 1.2.1 (d) 所示。

1.2.2 有色金属与合金

通常人们把所有的非铁金属及其合金称为有色金属。由于有色金属有许多优良的物理、化学、低温、断裂等性能，已成为现代工业中非常重要的材料。工业上常用的有色金属材料，主要包括铝及铝合金、铜及铜合金，钛及其合金。

(1) 铝及铝合金

铝及铝合金是广泛用于航空、航天、造船、交通运输、家用电器、电力工业等许多部门的一种金属材料。其常规分类见表 1.2.6。

表 1.2.6 铝及铝合金的分类

名 称	分 类		
纯铝	高纯铝		科学研究
	工业高纯铝		铝箔及冶金铝合金原料
	工业纯铝		电线、电缆、器皿等
铝合金	形变铝合金	防锈铝合金	铆钉,管道,容器等中强度结构件
		硬铝合金	叶片、铆钉等高强度构件零件
		超硬铝合金	飞机大梁、起落架等较高强度结构件
		锻铝合金等	内燃机活塞等高温工作复杂锻件
	铸造铝合金	铝硅合金	汽缸头和油泵壳体等高温高硬零件
		铝铜合金	汽缸头和活塞等高温中载零件
		铝镁合金	结构复杂的汽车、飞机和仪器零件

(2) 铜及铜合金

铜及铜合金因其优异的导电、导热、抗蚀、抗磁、减摩和耐磨等物理化学性能，良好的冷热压力加工和铸造成形等加工性能，以及色泽美观等特点，在电器工业、仪表工业、造船工业及机械制造业部门获得广泛的应用。其常规分类见表 1.2.7。

表 1.2.7 铜及铜合金的分类

名 称			分 类
纯铜			主要用于制作电真空器件及高导电性导线
铜合金	黄铜	普通黄铜	锌黄铜 冷成形板材、线材、管材及深冲零件
		复杂黄铜	铅黄铜 易切削成形的耐磨机件
			锡黄铜 海洋大气和海水中工作的构件
			铝黄铜 抗大气腐蚀的结构件
			硅黄铜 高耐磨和耐蚀性机件
			锰黄铜 海水及过热蒸汽中工作的零部件
			铁黄铜 摩擦及海水腐蚀的零件
			镍黄铜 造船和电机零部件
	青铜	锡青铜	轴瓦和衬套, 泵阀, 船舶设备
		铝青铜	舰船螺旋桨等高强度高耐蚀机件
		铍青铜	电极, 轴承, 衬套、阀, 泵, 叶片
		硅青铜	泵体阀门等耐蚀耐磨铸造成形件
		铬青铜	室温或高温的导热、导电和耐磨件
	白铜		抗海水腐蚀或化工腐蚀零件

第 2 章 金属与合金材料结构

金属材料是指以金属键结合并具有金属特性的一类物质，它包括纯金属及合金。所谓纯金属是指具有正的电阻温度系数及金属特性的一类物质。所谓合金是指由两种或两种以上的金属或金属与非金属元素经熔炼、烧结或其他方法组合而成，具有金属特性的一类物质。金属材料在固态下通常都是晶体，所以研究金属材料结构必须首先研究晶体结构。

2.1 纯金属的晶体结构与结晶

2.1.1 晶体的基本概念

(1) 晶格与晶胞

把原子看成空间的几何点，这些点的空间排列称为空间点阵。用一些假想的空间直线把这些点连接起来，就构成了三维的几何格架称为晶格。从晶格中取出一个最能代表原子排列特征的最基本的几何单元，称为晶胞。晶胞各棱边的尺寸 a 、 b 、 c 称为晶格常数，其大小用 A 为单位， $1A=10^{-1}\text{nm}$ ，各棱边之间夹角用 α 、 β 、 γ 表示。图 2.1.1(c) 中晶胞 $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，称为简单立方晶胞。

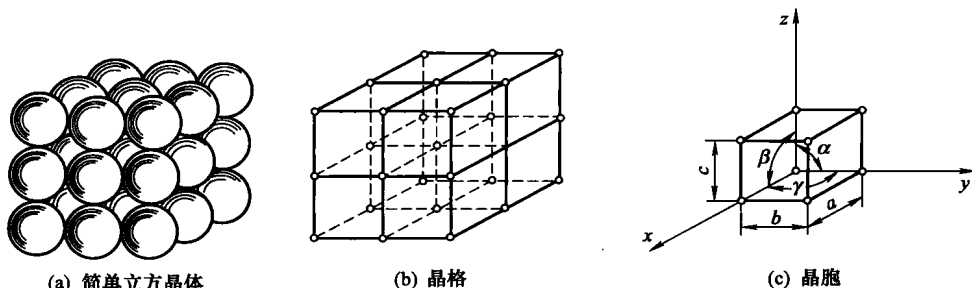


图 2.1.1 晶体示意图

(2) 晶系

各种晶体物质的晶格类型及晶格常数由原子结构、原子间的结合力（结合键）的性质决定。按原子排列形式及晶格常数不同可将晶体分为七种晶系：三斜晶系、单斜晶系、正交晶系、六方晶系、菱方晶系、四方晶系和立方晶系。

(3) 原子半径

原子半径是指晶胞中原子密度最大方向相邻两原子之间距离的一半。

(4) 晶胞中所含原子数

晶胞中所含原子数是指一个晶胞内真正包含的原子数目。晶体由大量晶胞堆砌而成，故处于晶胞顶角及每个面上的原子就不会为一个晶胞所独有，只有晶胞内部的原子才为晶胞所独有。因此，不同晶格类型的晶胞所含原子数目是不同的。

(5) 配位数及致密度

晶体中原子排列的紧密程度是反映晶体结构特征的一个重要参数。通常原子在晶体内排列的紧密程度用配位数和致密度来表示。

所谓配位数是指在晶体结构中,与任一原子最近邻且等距离的原子数。所谓致密度(K)是指晶胞中原子所占的体积分数,即

$$K = nv' / V$$

式中, n 为晶胞所含原子数, v' 为单个原子体积, V 为晶胞体积。

2.1.2 常见金属的晶格类型

(1) 体心立方晶格 (bcc 晶格)

① 原子排列特征 体心立方晶格的晶胞如图 2.1.2 所示。其原子排列特征是立方体的八个角上各有一个原子,立方体的体心位置上有一个原子,八个角上的原子与体心位置的原子紧靠。

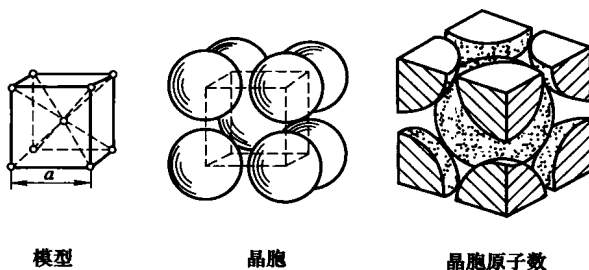


图 2.1.2 体心立方的晶胞示意图

② 晶格常数 $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

③ 原子半径 体心立方晶胞中原子排列最紧密的方向是体对角线方向,所以原子半径(r)与晶格常数 a 之间的关系为 $r = \sqrt{3}/4a$ 。

④ 晶胞所含原子数 在体心立方晶胞中,每个角上的原子在晶格中同属 8 个相邻的晶胞,因而每个角上的原子属于一个晶胞仅为 $1/8$,而体心位置上的原子则完全属于这个晶胞。所以一个体心立方晶胞所含的原子数目为 $(1/8) \times 8 + 1 = 2$,即 2 个原子。

⑤ 配位数 配位数越大,原子排列的紧密度越大。体心立方晶格的配位数为 8。

⑥ 致密度 依 $K = \frac{nv'}{V}$ 公式可得到:

$$K = \frac{nv'}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi (\frac{\sqrt{3}}{4} a)^3}{a^3} \approx 0.68 = 68\%$$

由上式可知,体心立方晶格中有 68% 的体积被原子占据,有 32% 的体积为空隙。

⑦ 具有体心立方晶格的金属 属于此类晶格类型的金属有 α -Fe、 β -Ti、Cr、W、Mo、V、Nb 等 30 余种金属。

(2) 面心立方晶格 (fcc 晶格)

① 原子排列特征 面心立方晶格的晶胞如图 2.1.3 所示。由图可知,面心立方晶胞中原子排列特征是立方体的八个角上及六个面的每个面的面心位置各被一个原子占据。

② 晶格常数 $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

③ 原子半径 面心立方晶胞中,在每个面对角线方向的原子排列最紧密,所以原子半径 $r = \sqrt{2}/4a$ 。

④ 晶胞所含原子数 晶胞中每个角上的原子为 8 个晶胞所共有,因而每个角上的原子属于一个晶胞仅为 $1/8$;每个面心上的原子为两个晶胞所共有,因而每个面心上的原子属于