



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

机械工程材料及成形基础



主编 侯俊英 王兴源
主审 李镇江



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

机械工程材料及成形基础

主 编	侯俊英	王兴源
副主编	赵 程	王守城
参 编	程俊伟	赵朋成
	张 森	胡尔建
	丁昌京	赵燕伟
主 审	李镇江	



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是根据 21 世纪全国高等教育创新型人才培养要求, 遵循机械基础课程体系与内容的改革精神, 根据原国家教委颁发的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》, 在总结近年来教学改革的研究和多年教学实践经验及山东省精品课程建设的基础上编写而成。

本书集工程材料与毛坯成形工艺为一体, 共分 10 章。内容包括金属材料的性能、结构、种类及应用, 非金属材料的种类及应用, 金属材料的热处理理论、工艺和实践, 金属材料的成形工艺——液态成形、塑性成形、焊接连接, 非金属材料的成形技术——压制、挤出与注射等方面的知识。

在众多同类书籍中, 本书力求写作风格新、内容新, 增强教材的可读性, 突出实用性和可操作性。本书除可作为机电类、近机类专业学生的教材之外, 也可供从事金属材料工程方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料及成形基础/侯俊英, 王兴源主编. —北京: 北京大学出版社, 2009. 8

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-15433-5

I. 机… II. ①侯…②王… III. 机械制造材料—高等学校—教材 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 111577 号

书 名: 机械工程材料及成形基础

著作责任者: 侯俊英 王兴源 主编

责任编辑: 郭德娟

标准书号: ISBN 978-7-301-15433-5/TH·0143

出版者: 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> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者:

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 彩插 4 387 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 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

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书为适应 21 世纪人才培养要求，并遵循机械基础课程体系与内容的改革精神，根据原国家教委颁发的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》，在总结近年来教学改革的研究和教学实践经验的基础上编写而成。本书集工程材料与毛坯成形工艺为一体，较广泛、深入地介绍了以下内容：金属材料的性能、结构、种类及应用，非金属材料的组成、制备及应用，金属材料的热处理理论和工艺，金属材料的成形工艺——液态成形、塑性成形、焊接连接，非金属材料的成形技术——压制、挤出与注射等方面的知识。

本书的编写目的是：在众多材料类书籍中力求写作风格新、内容新，使学生对教材不产生畏难情绪，增强教材的可读性，突出实用性和可操作性。学生通过对本书的学习应基本掌握金属材料与非金属材料的组织结构与性能之间的关系；基本掌握为保证机械零件的使用性能和加工工艺性能所必须采用的热处理工艺方法的基本知识；基本掌握常用工程材料的种类及根据不同的机械零件进行选材的知识；同时还要掌握获得高质量机械零件毛坯的合理的成形方法方面的知识。

本书共 10 章，一般情况下可安排 50~60 学时进行讲授，其中，18~24 学时讲授金属材料，16~20 学时讲授热处理理论与热处理工艺，4 个学时讲授非金属材料与非金属材料的成形，金属的塑性成形、铸造、焊接各讲授 4 个学时。根据学生所学的专业不同，可进行相关章节的学时调整，有些章节可供学生自学。

不管是从事机电一体化专业还是从事近机类专业，凡涉及金属材料机械零件的工程技术问题，都应该掌握金属材料、热处理工艺方面的知识。所以，本书侧重于对金属材料 and 热处理方法及其具体工艺进行较系统、深入、全面的阐述。

本书的编写策划全过程由侯俊英副教授和王兴源教授共同完成，参加编写的还有博士生导师赵程教授、王守城教授、郑州航空工业管理学院的程俊伟博士、青岛科技大学的赵朋成博士后、张淼讲师、青岛新东机械有限公司的胡尔建工程师、机械工程训练中心的丁昌京工程师和青岛科技大学的赵燕伟研究生。

本书承蒙博士生导师李镇江教授审阅，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 5 月

目 录

第 1 章 金属的性能与结构	1	第 3 章 钢的热处理工艺与实践	41
1.1 金属的性能	2	3.1 退火与正火	42
1.1.1 金属的使用性能	2	3.1.1 第一类退火	42
1.1.2 金属的工艺性能	6	3.1.2 第二类退火 (相的重结晶)	44
1.1.3 强化金属材料的方法	6	3.1.3 正火	46
1.2 金属的晶体结构与结晶	7	3.2 淬火	46
1.2.1 金属的晶体结构	7	3.2.1 淬火温度的选择	46
1.2.2 金属的结晶	11	3.2.2 钢奥氏体化的加热时间	47
1.3 合金的相结构与铁碳合金 状态图	15	3.2.3 冷却介质的选择	47
1.3.1 合金的相结构	15	3.2.4 钢的淬硬性和钢的 淬透性	49
1.3.2 合金状态图	16	3.2.5 淬火内应力	50
1.3.3 铁碳合金状态图	17	3.2.6 淬火方法	51
思考与练习	22	3.3 回火	53
第 2 章 钢的热处理理论	23	3.3.1 回火的种类	53
2.1 钢在加热时的转变	24	3.3.2 钢的回火曲线	54
2.1.1 按照 Fe - Fe ₃ C 状态图 分析钢加热时的转变	24	3.3.3 回火温度的选择	56
2.1.2 奥氏体的形成过程	24	3.3.4 保温时间的确定	57
2.1.3 奥氏体的晶粒大小及其 影响因素	25	3.3.5 加热设备的选择	57
2.1.4 晶粒大小对钢性能的 影响	26	3.3.6 冷却介质的选择	58
2.2 钢在冷却时的等温转变与 连续转变	27	3.3.7 光亮回火	58
2.2.1 钢在冷却时奥氏体的 等温转变	27	3.4 表面淬火与形变热处理	58
2.2.2 钢在冷却时奥氏体的连续 转变	35	3.4.1 表面淬火	58
2.2.3 加热时马氏体和残余奥氏体 的转变(钢的回火转变)	36	3.4.2 形变热处理	60
2.2.4 碳钢的热处理时效和 变形时效	39	3.5 化学热处理	61
思考与练习	40	3.5.1 化学热处理过程	61
		3.5.2 化学热处理工艺	62
		3.6 热处理时所产生的缺陷	66
		3.6.1 裂纹	66
		3.6.2 变形与翘曲	67
		3.7 热处理实践	67
		3.7.1 冶金厂的热处理	67
		3.7.2 机械制造厂的热处理	70
		思考与练习	73

第 4 章 钢及其用途	74	6.4.2 钛基合金	132
4.1 结构钢与特殊性能钢	75	6.5 减磨材料(轴承合金)	134
4.1.1 碳素结构钢	75	思考与练习	135
4.1.2 合金结构钢	79	第 7 章 非金属材料	136
4.1.3 不锈钢和耐热钢及其合金	91	7.1 塑料	136
4.2 工具钢与硬质合金	95	7.1.1 塑料的成分、分类和性能	137
4.2.1 切削工具钢(刀具钢)	96	7.1.2 热塑性塑料	138
4.2.2 量具钢	99	7.1.3 热固性塑料	140
4.2.3 模具钢	100	7.1.4 塑料制品的加工工艺	142
4.2.4 轧辊钢	102	7.2 橡胶材料	144
4.2.5 硬质合金	102	7.2.1 橡胶的成分和分类	144
思考与练习	103	7.2.2 通用橡胶	144
第 5 章 铸铁	104	7.2.3 特种橡胶	145
5.1 灰口铸铁	104	7.2.4 橡胶制品的分类	146
5.1.1 铸铁的石墨化过程	105	7.2.5 橡胶制品的加工工艺	146
5.1.2 灰口铸铁的化学成分与石墨化之间的关系	108	7.3 胶接材料与密封材料	146
5.1.3 灰口铸铁的种类	109	7.3.1 成膜材料的成分与分类	146
5.2 其他种类的铸铁	110	7.3.2 结构树脂胶和结构橡胶基粘剂	148
5.2.1 球状石墨的高强度铸铁	110	7.3.3 无机胶	148
5.2.2 可锻铸铁	111	7.3.4 密封材料	149
5.2.3 特种铸铁	113	7.4 陶瓷材料	150
思考与练习	114	7.4.1 陶瓷与工业陶瓷	150
第 6 章 有色金属及其合金	115	7.4.2 陶瓷制品的生产过程	150
6.1 铝及其合金	116	7.4.3 常用的陶瓷材料	151
6.1.1 铝	116	思考与练习	153
6.1.2 铝合金	116	第 8 章 金属的液态成形	154
6.1.3 铝合金的热处理	122	8.1 液态成形理论基础	155
6.2 铜及其合金	124	8.1.1 合金的铸造性能	155
6.2.1 铜	124	8.1.2 液态金属的充型能力	157
6.2.2 铜基合金	124	8.1.3 铸件中常见的缺陷	158
6.3 镁及其合金	129	8.2 液态成形工艺过程	163
6.3.1 镁	129	8.2.1 砂型铸造	163
6.3.2 镁合金	129	8.2.2 特种铸造	174
6.4 钛及其合金	132	8.3 铸件的结构工艺性	180
6.4.1 钛	132	8.3.1 铸造工艺对铸件结构的要求	181

8.3.2 合金铸造性能对铸件结构的要求	182	第 10 章 金属的焊接连接	225
思考与练习	185	10.1 焊接工程理论基础	226
第 9 章 金属的塑性成形	186	10.1.1 焊接方法的分类及其特点	226
9.1 概述	187	10.1.2 电弧焊的冶金过程及其特点	228
9.1.1 塑性成形的加工方法	188	10.1.3 焊接接头的金属组织和性能	229
9.1.2 塑性成形的特点及应用	190	10.1.4 焊接应力与变形	231
9.2 塑性成形理论	191	10.2 常用焊接方法	234
9.2.1 载荷、应力、变形与断裂	191	10.2.1 熔化焊	234
9.2.2 加热对变形金属的组织性能的影响	193	10.2.2 压力焊	244
9.2.3 可锻性	196	10.2.3 钎焊	247
9.2.4 热加工流线与锻造比	198	10.3 焊接结构设计	248
9.3 塑性成形工艺	199	10.3.1 焊接结构材料的选择	248
9.3.1 自由锻	199	10.3.2 焊接方法的选择	249
9.3.2 模锻	205	10.3.3 焊接接头工艺设计	249
9.3.3 板料冲压	215	思考与练习	253
思考与练习	224	附录	254
		参考文献	257

第 1 章 金属的性能与结构

学习目标

- ☞ 通过对金属各种性能及其指标的学习，熟悉各种性能指标的概念及实际应用
- ☞ 重点掌握金属的力学性能指标——硬度的应用场合
- ☞ 理解强化金属材料的方法
- ☞ 通过对金属晶体结构、晶体缺陷和结晶过程的学习，了解晶体中原子结合键的特点
- ☞ 熟悉典型金属晶体结构的特点和晶体缺陷的形式及对金属性能的影响
- ☞ 理解晶体与非晶体、单晶体与多晶体及金属结晶的概念
- ☞ 通过对合金相结构与二元合金状态图的学习，熟悉合金中的相结构
- ☞ 掌握固溶体和化合物的概念和性能特点
- ☞ 了解相图的基本概念及相图建立的一般方法，理解铁碳合金基本相和组织的性能特点
- ☞ 掌握铁碳合金状态图的分析及典型合金的结晶过程

学习要求

能力目标	知 识 要 点	权重	自测分数
熟练掌握金属使用性能中各项力学性能指标	金属及合金的物理性能、化学性能、静载荷下和动载荷下的各项力学性能指标	10%	
理解金属的各项工艺性能的重要性，了解强化金属材料的方法	金属工艺性能的含义，铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理工艺性能和切削加工性能；合金化、热处理和形变热处理、变形强化等各种强化金属材料的方法	10%	
掌握常见金属的晶体结构和金属铸锭的组织	金属的晶胞、晶体结构、晶格缺陷、晶向指数、晶面指数等概念；树枝状晶体、细晶粒区、柱状晶区等轴晶区	15%	
了解金属的结晶过程，理解结晶机理	金属的结晶、过冷度、结晶过程中能量的变化、纯金属的冷却曲线、形核与核长大、晶粒度的含义	10%	
理解合金相结构的概念，了解合金状态图的建立	合金、相、相结构、固溶体、化合物、合金状态图、平衡结晶、临界点等概念的含义	25%	
熟练掌握铁碳合金状态图，学会分析不同合金从液态到室温的平衡结晶过程	铁碳合金、同素异晶转变、铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体、莱氏体、共晶反应、共析反应、工业纯铁、钢、白口铁等概念	30%	



引例

金属的性能、金属的强化方法与金属的结构是研究金属及其应用的基础。金属的性能是工程构件设计的重要依据。

案例一：2003年哥伦比亚号航天飞机在载入的时候解体、烧毁了。这是因为飞机起飞的时候，其燃料箱上有一个绝热片掉下来了，冲击了机翼的表面，在隔热瓦下产生了裂纹；裂纹因几千度高温的作用而扩展，最后引起飞机的解体。这架飞机的尾翼是复合材料，与金属结构是经过螺栓连接，连接以后飞机在起飞的时候，大概有一个风切面，然后尾翼就掉下来，后来发现连接接触面有损伤破坏。

案例二：电动机转子的刚度不足，发生过大的弹性变形，造成转子与定子相撞，最后主轴撞弯，甚至折断。弹性变形的大小取决于零件的几何尺寸及材料的弹性模量。金刚石与陶瓷的弹性模量最高，其次是难熔金属、钢铁，有色金属则较低，有机高分子材料的弹性模量最低。因此作为结构件，从刚度及经济角度来看，选择钢铁是比较合适的。

在机械制造行业，金属材料依然是应用很广泛的工程材料，研究表明，绝大多数金属材料都是晶体材料。从根本上来讲，金属的晶体结构决定金属的性能。相图是研究金属的成分、组织结构与性能之间相互关系和变化规律的重要工具，因而本章重点介绍金属的性能、晶体结构，讨论铁碳合金状态图，从而奠定研究钢铁材料的成分、相和组织的变化规律，以及与性能之间关系的理论基础。

1.1 金属的性能

金属材料是现代机械制造业中最常用的材料。在各种交通运输机械、矿山机械、石油化工机械、冶金设备、动力设备中，金属制品大约占90%。金属材料之所以获得如此广泛的应用，主要是因为它具有制造机械零部件所需的物理、化学和力学性能，而且还可用较为简便的加工工艺制成机械零件，即具有良好的工艺性能。

1.1.1 金属的使用性能

1. 物理性能

金属及合金的物理性能主要有密度、热膨胀性、导电性、磁性、导热性、熔点和金属光泽等。

金属具有高的导热性。金属中的正离子不停地在自己的平衡位置上进行热振动是热传递的一种形式，自由电子的自由运动是热能传递的另一种重要形式，这两种热传递形式的叠加是金属具有高导热性的原因。

金属具有高的导电性。金属中的自由电子在不停地进行运动，那么，在微弱的电场的作用下，金属中的自由电子便可作定向的加速运动，形成电流，这就是金属具有良好的导电性的原因。

金属的可锻性。所谓金属的可锻性就是指金属在外力作用下，能够发生塑性变形的能力，也就是在外力的作用下，金属晶体中各层原子间发生的相对位移的能力。由于金属是在正离子和自由电子的电力作用下结合在一起的，因而，当受到外力作用发生塑性变形时，金属仍能保持金属键的结合力使其具有产生塑性变形而不断裂的能力。

金属具有金属光泽。自由电子很容易被可见光所激发，在可见光的作用下，自由电子

能够跃迁到较高的能量级，当它们再重新回到原来的低能量级时，就把它所吸收的可见光的能量以电磁波的形式辐射出来，这在金属的宏观表面上就表现为金属光泽。

在不同条件下工作的机器零件要求有不同的物理性能。例如，航空航天、导弹、人造卫星需选用一些比强度(抗拉强度/密度)较大的合金，如用铝合金、钛合金等来制造，则会减轻结构质量、提高飞行速度，具有极大的优越性。再如，导线就需用导电性良好的铜、铝来制作，永久性磁铁、通信器材等需用磁性金属制造。在热加工中也应考虑到材料的某些物理性能，如导热性差的高速钢在锻造过程中应采用较低的加热速度，以免产生裂纹；又如不同熔点的合金，其热加工的工艺规范也有很大的不同。

2. 化学性能

这是指金属及合金在室温或高温下抵抗各种介质化学作用的能力，如耐蚀性、耐热性等。金属材料在酸、碱或海水中及潮湿大气中工作时易受腐蚀，每年约损失 10%。因此，提高金属的耐蚀性或采用其他防腐措施对节约金属有重大意义。对于化工设备、医疗器械应采用化学稳定性良好的不锈钢，对于燃气涡轮叶片宜采用高温抗氧化能力强和具有高温强度的铬镍钢或镍基耐热合金等制造。

3. 力学性能

硬度、静力拉伸的一些性能(σ_b , σ_s , σ , φ)、冲击韧性、抗疲劳极限都属于金属和合金的力学性能。

最广泛使用的非破坏性检验是硬度试验，通过硬度又可换算出金属和合金的强度值。有几种不同的测量硬度的方法。

布氏硬度测定法是用直径为 D 的钢球，用载荷 F 作用到被测物体上，则其硬度值 HB 是载荷 F 同压痕直径 d 的面积之比(图 1.1)：

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

式中， F ——载荷(N)；

D ——钢球直径(mm)；

d ——压痕直径(mm)。

布氏硬度的单位为 MPa，但习惯上不标出单位。在实际应用中一般不是直接计算 HB，而是根据测量的 d 值在相关的表中直接查出布氏硬度值。

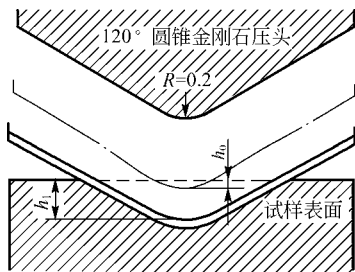


图 1.2 洛氏硬度的原理

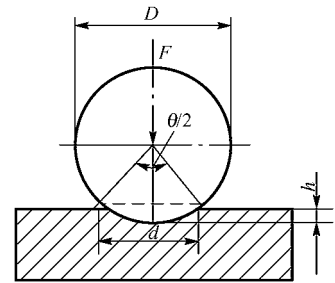


图 1.1 布氏硬度的原理

用淬火钢球作为压头测出的硬度值以 HBS 表示，适用于测量硬度小于 450HB 的材料，如结构钢、铸铁和有色金属等；用硬质合金球作为压头测出的硬度值以 HBW 表示，适用于测量硬度不超过 650HB 的材料。

布氏硬度试验的优点是测量结果准确；缺点是压痕大，不适合成品检验。

洛氏硬度测定法是压头(顶角是 120°的金刚石圆锥或直径 1.59mm 的钢球)在一定的载荷作用下压入试样表面，硬度值 HR 与压头压入深度呈反比，如图 1.2 所示。

卸除载荷后，根据压痕的深度 $h = h_1 - h_0$ 确定被测材料的洛氏硬度，该值可以直接从硬度计上的显示器上读出。

用金刚石锥体压头在总载荷为 588.4N 下测得的硬度值以 HRA 表示，适用于测量高硬度的材料，如硬质合金；用淬火钢球压头在总载荷为 980.7N 下测得的硬度值以 HRB 表示，适用于测量较软的材料，如退火钢、正火钢或有色金属等；用金刚石锥体压头在总载荷为 1471N 下测得的硬度值以 HRC 表示，适用于测量淬火钢等硬材料。三种洛氏硬度中，以 HRC 应用得最多。

洛氏硬度测量迅速、简便，压痕小，可在成品零件上检测，也可测定较薄的工件或表面有较薄硬化层的硬度。但由于压痕比较小，易受材料微区不均匀的影响，因而数据的重复性比较差。

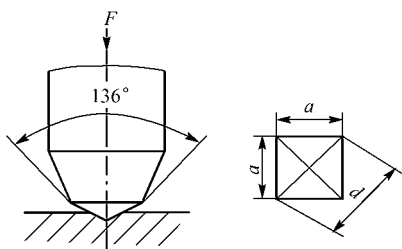


图 1.3 维氏硬度的原理

维氏硬度测定法能够测定软的材料硬度，也能测定高硬度的材料，其硬度值 HV 是根据金刚石压头的压痕对角线来决定的。维氏硬度测定原理基本上与布氏硬度相同，也是根据压痕凹陷单位面积上的力为硬度值，但维氏硬度使用的是锥面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体，压痕是四方锥形（图 1.3）。测量压痕两对对角线的平均长度 d ，计算压痕的面积 A_v ，用 HV 表示维氏硬度：

$$HV = \frac{F}{A_v} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

式中， F ——载荷(N)；

A_v ——压痕面积(mm^2)。

维氏硬度的单位为 MPa，一般不标。

维氏硬度所用的载荷小，压痕深度浅，测量精确度高于布氏硬度和洛氏硬度，适用于测量较薄的材料或表面硬化层、金属镀层的硬度。由于维氏硬度的压头是金刚石角锥，载荷可调范围大，所以维氏硬度可用于测量从软到硬的各种工程材料，测定范围为 0 ~ 1000HV。

在拉伸试验机上所进行的静力试验，就能够测定材料的力学性能，如图 1.4、图 1.5 所示。

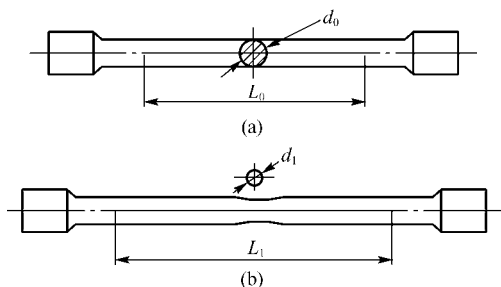


图 1.4 静拉伸试验的试样

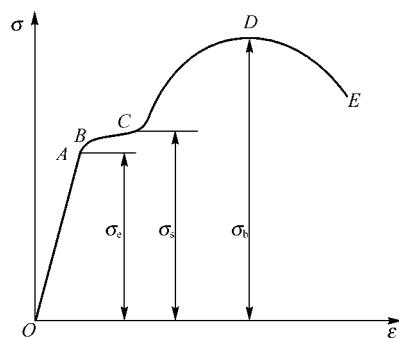


图 1.5 低碳钢的拉伸曲线

特别提示

硬度是静载力学性能指标，种类多，初学者易混淆。在学习中应注意不同硬度的应用范围，进行归纳总结整理，以利于记忆和在实际中正确选用。

屈服极限(σ_s)是指试样在拉伸过程中，在载荷不增加的情况下，仍继续产生塑性变形的恒定载荷除以原横截面面积所得的应力，其表达式为 $\sigma_s = F_s$ (屈服载荷)/ S_0 (原横截面面积)。

当拉伸曲线上不出现平台线段时，则用条件屈服极限($\sigma_{0.2}$)来表示，即发生试样长度 0.2% 残余变形的应力。

更高的载荷导致更大的塑性变形，发生在试样断裂之前的应力称为“强度极限” σ_b (F_b/S_0)。材料的塑性是用延伸率 δ 和断面收缩率 φ 来表示的。

延伸率
$$\delta = (L_k - L_0)/L_0 \times 100\%$$

式中， L_0 ——试样的原有长度；

L_k ——断裂后的试样长度。

断面收缩率
$$\varphi = (S_0 - S_k)/S_0$$

式中， S_0 ——试样的原有横截面面积；

S_k ——断裂后的试样横截面面积。

材料抵抗冲击载荷的能力称为“冲击韧性”。冲击韧性是用一次摆锤冲击弯曲试验机来测定的，其表达式为

冲击韧性 $\alpha_k = A_k$ (冲击载荷使切口试样断裂所做的功)/ S (试样切口处的截面积)

如图 1.6 所示。

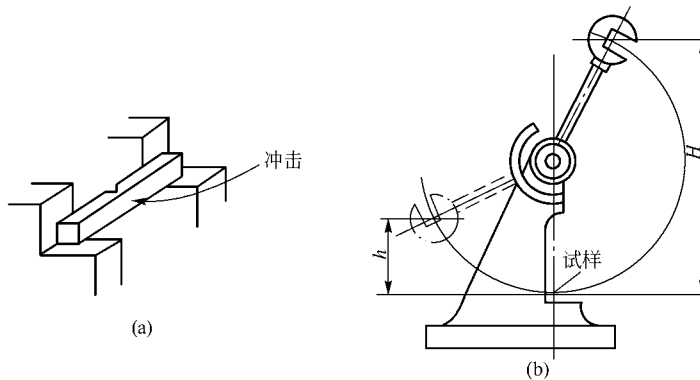


图 1.6 V 形缺口试样的冲击试验

在重复或交变载荷作用下，金属中产生的损伤逐渐积累，引起了裂纹的形成和断裂，这种现象称为“疲劳”。金属抵抗疲劳的性能称为“抗疲劳强度”。

因为试验条件与机器零件的实际工作条件之间总是存在着很大的差异，所以对机器零件来说，较能客观地反映材料在使用过程中的安全性的是结构强度。能够保证机器零件材料在具体的使用条件下正常工作的强度称为结构强度。在结构强度中，首先要考虑的是可靠性，其次是寿命。

在机器零件的设计中，如何保证材料在使用中的可靠性，首先要考虑的是材料的脆性起点温度，因为冷脆性起点温度表征材料在一定的低温条件下要发生脆性断裂的倾向性。

因此，在冷脆性起点温度与使用的工作温度之间必须留有较大的韧性储备温度范围，这样才能降低材料脆性断裂的倾向性，并降低材料对应力集中的敏感性。韧性温度储备愈大，则脆性断裂的危险性就会愈小。表示脆性断裂倾向的冲击韧性是材料中裂纹的形成和裂纹的扩展所做功的总和，这种功愈大，则机器零件产生脆性断裂的倾向性就会愈小。

在机器零件的工作寿命中，首先暴露出来的是疲劳强度。这里应该指出的是，零件表面加工得愈好，则抗疲劳极限就会愈高。除此之外，进行化学热处理和能够使表面形成压应力的其他强化处理都能提高抗疲劳极限，并降低对应力集中源的敏感性。在很多情况下，是由于零件接触面之间在相对运动时产生的摩擦，引起了零件磨损从而限制了机器零件的寿命。有各种各样的磨损存在，如机械磨损、腐蚀机械磨损、侵蚀磨损和疲劳磨损。疲劳磨损也称为“接触疲劳”。如果齿轮、滚动轴承及其他一些机械零件的表面层接触疲劳强度不够，往往就要提前退役，从而降低了零件的使用寿命。

1.1.2 金属的工艺性能

金属的工艺性能是指在不同的制造工艺条件下金属所表现出的承受加工的能力，它是物理、化学和力学性能的总和。按工艺方法不同，可分为铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理工艺性能和切削加工性能等。

在设计零件和选择工艺方法时，都应考虑材料的工艺性能。例如，灰口铸铁具有良好的铸造性能和切削加工性能，但不能承受锻造，而且焊接性也较差，因此它广泛用于制造形状复杂的铸件；低碳钢的锻造性能和焊接性都很好，多用于制造各类锻压件和焊接构件；高碳钢的焊接性很差，不宜制作焊接件，却宜于作为刀具、量具等材料。热处理工艺性能包括淬透性、淬硬性、变形与开裂、过热与过烧、回火稳定性、氧化等。热处理工艺性能的好坏直接影响产品质量，而且是生产中的最后一道工序，应特别引起重视，否则会前功尽弃。

在单件或小批量生产时，材料工艺性的好坏显得并不重要。但在大批量生产条件下，为达到经济规模的要求，材料的工艺性往往成为选材中起决定作用的因素之一。

1.1.3 强化金属材料的方法

提高金属材料的强度就能够延长机器和设备的使用寿命，减轻它们的重量，增加使用的可靠性，并能节省和降低材料的消耗。

当今强化金属材料的方法有：提高位错密度，创造阻挡位错移动的条件；位错和合金元素原子的相互作用；亚晶细化；形成碳化物、氮化物弥散微粒等。最先进的强化方法有合金化、热处理和形变热处理、变形强化等。

得到无组织缺陷的金属也是提高金属强度的一种方法。例如通常所说的“晶须”，无位错缺陷的铁晶须的强度可达到 $13000\text{MN}/\text{m}^2$ ，而工业纯铁的强度是 $300\text{MN}/\text{m}^2$ 。提高金属强度的另一种方法是提高各种缺陷数量(提高密度)，其中包括位错。随着位错数量的增加，金属的强度首先降低，而后又提高。单位体积(cm^3)中位错长度之和称为“位错密度”。位错密度以 cm^{-2} 表示，退火金属所固有的位错密度等于 $10^6 \sim 10^8 \text{cm}^{-2}$ ，位错密度 $10^{12} \sim 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 是金属位错密度的临界值，金属中的位错密度高于 $10^{12} \sim 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 则导致金属中裂纹的形成。位错密度在 $10^6 \sim 10^8 \text{cm}^{-2}$ 至 $10^{10} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 的范围内，则随着位错密度的增大，金属的强度要提高，这是由于位错与位错运动阻力的相互作用而引起的。

合金元素对金属的强化作用有这样两种情况：一种情况是合金元素与基体金属的相互作用形成固溶体，导致强度提高；另一种情况是合金化引起强度更高的新相的形成，更希望新相沿晶界呈网状的形式或呈骨架的形式析出。在碳的影响下，铁的强度变化就能说明这个问题：随着铁中含碳量的增多，相的成分改变了，强度就提高了。

使用热处理强化的可能性取决于状态图的类型，并取决于合金元素在基体金属中的溶解度，以及金属中的同素异型转变。由于加热温度和冷却条件的不同，形成了很多种热处理方法。硬度 150 ~ 200HBS 的碳钢进行热处理的结果就可以作为例子，热处理(淬火)后，它的硬度提高了 2.5 ~ 3 倍。

化学热处理是钢的一种表面强化方法之一。通过化学热处理可以改变金属表面层的化学成分、组织和性能，这种处理的结果提高了硬度、抗疲劳极限、耐磨性、接触强度、抗腐蚀稳定性等。例如很多机器零件(齿轮、轴、轴承等)是在磨损和冲击条件下工作，对这些零件来说，就需要有硬而耐磨的表面和较软的心部。化学热处理就是针对这类零件的一种很好的强化方法。

塑性变形强化(滚压强化、喷丸强化等)主要用于一些不能用热处理强化的合金，利用零件表面的残余压应力以提高其接触疲劳强度。

在足够的塑性下要得到高强度，需采用形变热处理。形变热处理是把形变和淬火结合在一起的工艺过程，进行这种处理之后，除提高强度外，材料的屈服强度能提高 1.5 ~ 2 倍。

近几年在强化合金的工艺方法上，还采用超声波处理、磁场处理、高能离子辐射、激光处理等。



背景知识

从本质上讲，金属强度来源于原子间的结合力。如果一个理想晶体在切应力作用下沿一定晶面和晶向发生滑移变形，根据计算，此时金属的理论切变强度一般是其切变模量的 $1/30 \sim 1/10$ 。而金属的实际强度只是这个理论强度的几十分之一，甚至几千分之一。例如，纯铁单晶的室温切变强度约为 5kgf/mm^2 ($1\text{kgf} = 9.8\text{N}$)，而按铁的切变模量 (5900kgf/mm^2) 来估算，其理论切变强度应达 650kgf/mm^2 。造成这样大差异的原因曾是人们长期关注的课题。直到 1934 年，奥罗万 (E. Orowan)、波拉尼 (M. Polanyi) 和泰勒 (G. I. Taylor) 分别提出晶体位错的概念。位错理论的发展揭示了晶体实际切变强度(和屈服强度)低于理论切变强度的本质。在有位错存在的情况下，切变滑移是通过位错的运动来实现的，所涉及的是位错线附近的几列原子。而对于无位错的近完整晶体，切变时滑移面上的所有原子将同时滑移，这时需克服的滑移面上上下原子之间的键合力无疑要大得多。金属的理论强度与实际强度之间的巨大差别，为金属的强化提供了可能性和必要性(见形变和断裂)。可以认为，实测的纯金属单晶体在退火状态下的临界分切应力表示了金属的基础强度，是材料强度的下限值；而估算的金属的理论强度是经过强化之后所能期望达到的强度的上限。

1.2 金属的晶体结构与结晶

1.2.1 金属的晶体结构

1. 晶体结构

液体金属结晶时(慢冷)，其原子在空间中总是进行有规则的排列，形成了结晶体，并

组成了晶格。结晶体的性能是各向异性的，即它们在不同的方向有不同的性能，这种现象要以在不同的晶面上有不同的原子数量来解释。

金属具有不同的晶格类型，经常遇到的是三种晶格类型：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。组成各种晶体的基本晶胞可用图 1.7 表示。借助于这些晶胞就可建立金属晶体的结构概念。

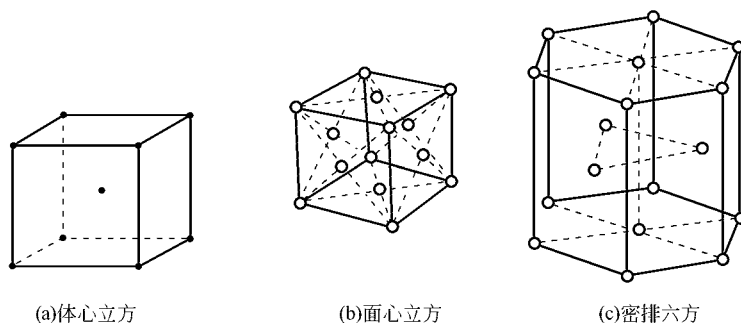


图 1.7 金属的晶胞

在体心立方晶格的基本晶胞中共有 9 个原子，8 个原子分布在晶胞的各个结点上，1 个原子分布在晶胞的中心位置上。锂、钠、钾、铷、钒、钼、钨、 α -铁等都具有这种晶格类型。

在面心立方晶格的基本晶胞中共有 14 个原子，其中 8 个原子分布在基本晶胞的各个结点上，6 个原子分布在晶胞六个面的中心位置上。铅、镍、银、金、铜、铝、 γ -铁等具有这种晶格。

在密排六方晶格的基本晶胞中含有 17 个原子，各个结点上分布着 12 个原子，上、下底面的中心位置上各 1 个原子，另外，在上、下底面之间的中间平面上还有 3 个原子。铍、镁、锌、镉等具有这种晶格。

2. 晶格缺陷

金属晶体中总是存在结构的缺陷，这种缺陷就会导致晶格中原子正确排列的破坏。晶格缺陷的存在会直接影响到金属的性能。根据缺陷的特征，晶格缺陷又分为点缺陷、线缺陷和面缺陷。

空位和间隙原子属于点缺陷。我们知道，存在于晶格结点上的原子在不停地进行热振动，加热就能增大这种振动的振幅。在晶格上的大多数原子都具有相同的能量（平均能），但是，一些个别原子所具有的能量可能就超过了这种平均能。这样，这种个别原子就能够从原有位置跑到另一个位置，特别是靠近表面的那些原子要跑到表面上，而离表面较远的原子再去占据它们的位置。跑掉的原子空出来的位置称为“空位”。随着温度的升高，空位数量会增多。在金属和合金中所发生的原子扩散过程中，空位起到了很重要的作用。

金属原子从晶格结点上跑到晶格结点之间就形成了间隙缺陷，存在于结点之间的原子则称为“间隙原子”。点缺陷的存在会引起晶格的歪扭（图 1.8）。

晶格中的位错称为“线缺陷”。位错有刃型位错（图 1.9）和螺旋位错两种。刃型位错是晶格的局部歪扭，而螺旋位错是由于这种位错的形成过程具有螺旋形特征。热处理和化学

热处理时，金属的结晶过程中，塑性变形与相变过程中都能形成位错。位错的特征是原子移动率大，这与位错区的晶格是弹性歪扭状态，而要移动的原子总是趋向于移动到平衡位置有关。不仅位错密度影响金属的性能，而且位错在金属中的分布情况也会直接影响到金属的性能。

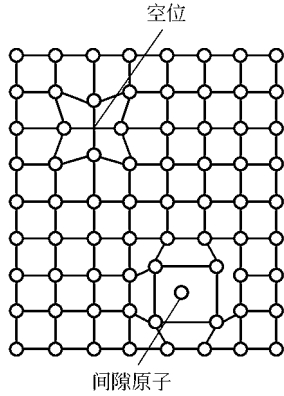
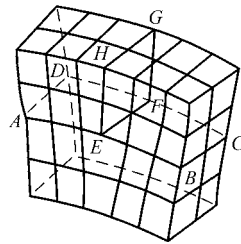
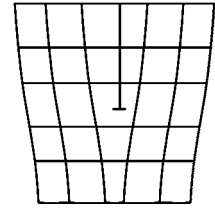


图 1.8 金属晶格中的点缺陷



(a)刃型位错的立体模型



(b)刃型位错的平面图

图 1.9 线缺陷

金属中的晶界和亚晶界称为“面缺陷”，因为晶界和亚晶界处原子的排列要比晶粒内更不规则(图 1.10)。

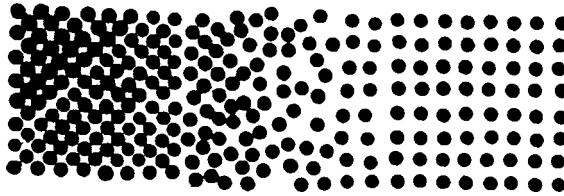


图 1.10 面缺陷

在金属与合金中存在着的各种晶格缺陷都会直接影响到它们的性能。

3. 晶面与晶向的表示方法

金属晶体中各个方位上的原子面称为“晶面”，各个方向上的原子列称为“晶向”。金属的性能往往都与晶面上原子的排列情况和晶向上原子的分布特点有关。因此，要对各个晶面和晶向规定一定的符号，以此表示出它们在晶体中的位置和方向。用来表示晶面和晶向的这种符号称为“晶面指数”和“晶向指数”。要确定晶面的位置，就得用 h, k, l 指数。

确定晶面指数的方法如下。

以晶格中的某一个原子为原点，通过原点平行于晶胞的三个边作 Ox, Oy, Oz 三坐标轴，以晶格常数 a, b, c 分别作为相应的三个坐标轴上的长度单位。求出要确定的晶面在三坐标轴上的截距，然后取三截距值之倒数，再把三个倒数按比例化为最小整数，把这三个整数加上一个圆括号，这就是晶面指数。晶面指数的一般表达式即 (hkl) 。

用图 1.11(a)举例说明。从图中可以看出，立方体的每一个晶面都只通过一条轴，这时，这些截距就等于 $(1\infty\infty), (\infty 1\infty), (\infty\infty 1)$ ；再取这些截距的倒数，就相应地等于

(100), (010), (001), 把晶面指数 h, k, l 写到圆括弧内, 即(100), (010), (001), 就确切地表示出相应的晶面。

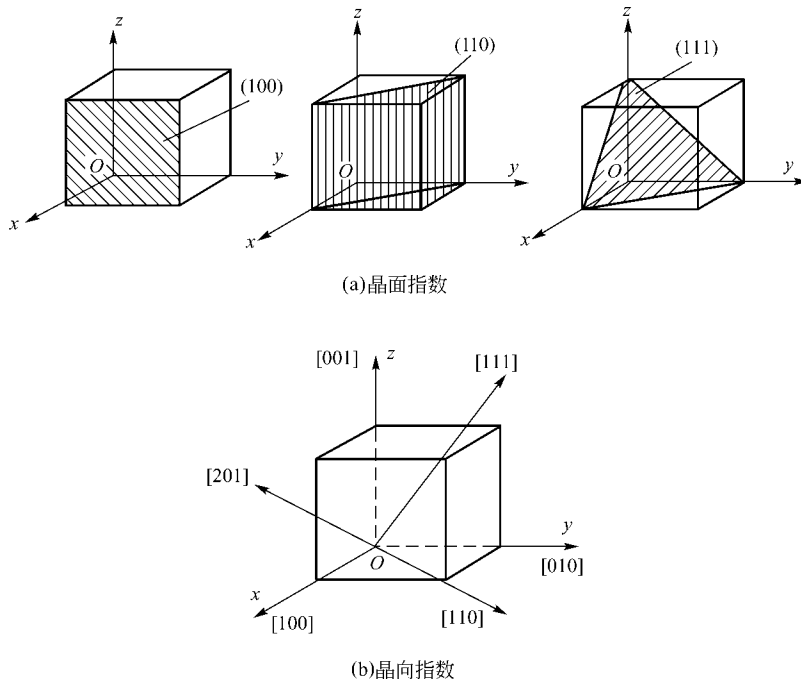


图 1.11 立方晶格的晶面指数和晶向指数

在立方晶格中, 除立方的几个侧面外, 还有(111)晶面和(110)晶面。

在面心立方晶格中, 原子密度最大的晶面是(111)晶面; 而在体心立方晶格中, (110)晶面是原子排列密度最大的晶面。

(1) 晶向的确定。确定晶向时, 先在晶体中引一条通过原点的直线, 使其平行于所求的晶向。求出该直线上任意一点的三个坐标值, 再把三个坐标值按比例化为最小整数值, 加上方括弧, 就是所求的晶向指数, 其一般表达式是 $[uvw]$ 。

在图 1.11(b)中, 立方体的主要晶向指数是平行于 x 轴方向的 $[100]$ 晶向, 平行于 y 轴方向的 $[010]$ 晶向, 平行于 z 轴方向的 $[001]$ 晶向, 还有侧面的对角线晶向指数 $[110]$, $[101]$, $[110]$, 以及晶胞对角线的晶向指数 $[111]$ 。

(2) 晶体性能的各向异性。由于晶体中各个晶面和晶向上的原子密度不同, 使晶体在不同方向上的性能就有差别。对单晶体来说, 在不同的晶向上, 这种物理性能、化学性能、机械性能所表现的方向性称为“各向异性”。



应用案例

案例一: 由于体心立方的 Fe 晶体在不同晶向上的原子密度不同, 原子结合力不同, 因而其弹性模量 E 便不同, 在 $[111]$ 方向 $E=290000MN/m^2$, 在 $[100]$ 方向 $E=135000MN/m^2$ 。许多晶体物质如石膏、云母、方解石等常沿一定的晶面易于破裂, 具有一定的解理面, 也是同样道理。

案例二: 金属的各向异性不论在弹性模量、破断抗力、屈服强度, 或电阻、磁导率、线膨胀系数, 以及在酸中的溶解速度等许多方面都会表现出来, 并在工业上得到了应用。例如制作变压器用的硅钢片,