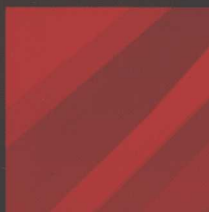
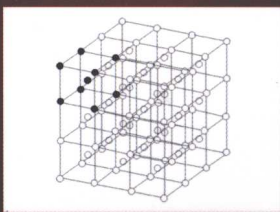


普通高等教育“十二五”规划教材

金属学及热处理

杨秀英 刘春忠 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

金属学及热处理

主 编 杨秀英 刘春忠
副主编 王红梅 武 丹
参 编 李 雅 杨玉芳 李增荣
主 审 杨 林



机械工业出版社

本书包括金属学、热处理及工程材料三部分内容, 比较全面系统地介绍了金属及合金的基本结构与性能、金属的凝固、相图、塑性变形、热处理原理与工艺、常用的工程材料(包括金属材料、非金属材料及新材料)等。作为应用型本科教材, 本书内容由浅入深, 循序渐进, 避免过多的数学推导, 便于教师和学生阅读。

本书可作为材料类专业的专业基础课教材, 主要对象是应用型本科院校的材料成形及控制工程专业、焊接技术与工程专业、金属材料工程专业以及材料加工工程等专业的学生, 也可供非材料类专业(机械类、化工类)学生以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属学及热处理/杨秀英, 刘春忠主编. —北京: 机械工业出版社, 2010. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-31327-4

I. ①金… II. ①杨…②刘… III. ①金属学-高等学校-教材②热处理-高等学校-教材 IV. ①TG1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第136448号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 冯春生 责任编辑: 冯春生 白刚

版式设计: 张世琴 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张静 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2010年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·363千字

标准书号: ISBN 978-7-111-31327-4

定价: 26.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

“金属学及热处理”是高等院校材料类专业的一门专业基础课。本书从材料的性能应用角度出发，以材料的结构决定材料的性能为主线，阐述各种材料的共性基础知识；从材料的组织结构出发，介绍材料的成分、组织、结构、加工工艺与性能之间的关系。同时介绍了金属热处理的原理与工艺、常用工程材料及选材、复合材料和纳米材料等新材料及其应用等内容。本书重在理论联系实际，列举了大量最新的材料应用实例，有利于读者融会贯通，各部分内容既相对独立又互相联系，便于教师在教学中根据需要选用。根据教学大纲的规定，建议讲授理论部分的课时为60~90学时左右。

本书由三部分内容组成：第一部分（第1~5章）为金属学部分，阐述了金属学的基本概念和理论，是该课程的基础，对金属材料的生产、应用及发展起到重要的指导作用，但是该部分内容比较抽象，所以在选取上以够用为度；第二部分（第6~7章）为热处理原理与工艺部分，着重阐述了钢在不同工艺条件下的组织转变规律及钢的热处理工艺的运用；第三部分（第8~11章）为工程材料部分，介绍了金属材料、非金属材料及新材料等方面的知识，阐述了机械零件的失效与选材知识以及工程材料在汽车、机床、仪器仪表、化工设备等领域的应用情况。本书内容由浅入深，循序渐进，避免过多的数学推导，便于教师和学生阅读。

本书共11章，由杨秀英、刘春忠任主编，王红梅、武丹为副主编。其中第5~7章由杨秀英编写，第1章和第11章由刘春忠编写，第2~4章及第11章的11.4.3节由王红梅编写，第8章由武丹编写，第9章由李增荣编写，第10章由杨玉芳和李雅编写。

杨林教授对全书进行了认真审阅，并提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。

在本书编写过程中，参考和借鉴了部分国内公开出版和发表的著作、教科书及文献等，部分照片下载自互联网，并得到许多专家和同行的热情支持，特向这些作者和专家表示感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中难免有不妥或疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 金属材料的性能与结构 1

1.1 金属材料的性能 1

1.1.1 金属材料的力学性能 1

1.1.2 金属材料的物理性能和化学性能 ... 6

1.1.3 金属材料的工艺性能 7

1.1.4 金属材料的经济性能 8

1.2 金属的晶体结构 8

1.2.1 金属 9

1.2.2 晶体结构 10

1.2.3 实际金属的晶体结构 14

1.3 合金的相结构 18

1.3.1 固溶体 18

1.3.2 金属化合物 21

本章小结 22

第2章 纯金属的结晶 24

2.1 金属结晶的现象 24

2.1.1 金属结晶的宏观现象 24

2.1.2 金属结晶的微观现象 25

2.2 金属结晶的条件 25

2.2.1 金属结晶的热力学条件 25

2.2.2 金属结晶的结构条件 26

2.3 金属结晶的过程 26

2.3.1 晶核的形成方式 26

2.3.2 晶体的长大方式 27

2.4 晶粒大小的控制 28

2.5 金属铸锭的组织与缺陷 29

2.5.1 铸锭的组织 29

2.5.2 铸锭的缺陷 30

2.5.3 钢中的杂质元素 31

本章小结 32

第3章 合金的结晶 33

3.1 固态合金中的相与组织 33

3.2 二元合金相图的建立 34

3.2.1 二元相图的表示方法 34

3.2.2 二元合金相图的测定方法 35

3.2.3 杠杆定律 35

3.3 几种典型的二元合金相图 36

3.3.1 二元匀晶相图 36

3.3.2 二元共晶相图 37

3.3.3 二元包晶相图 39

3.3.4 二元共析相图 41

3.3.5 组元间形成稳定化合物的相图 41

3.4 相图与合金性能的关系 42

3.5 三元合金相图简介 43

本章小结 48

第4章 铁碳合金 49

4.1 铁碳合金的组元 49

4.2 Fe-Fe₃C 相图分析 50

4.2.1 相图中的基本相 50

4.2.2 相图中的点、线、区 52

4.2.3 包晶转变 53

4.2.4 共晶转变 53

4.2.5 共析转变 54

4.3 典型铁碳合金平衡结晶过程及组织 54

4.3.1 工业纯铁 54

4.3.2 共析钢 56

4.3.3 亚共析钢 56

4.3.4 过共析钢 57

4.3.5 共晶白口铸铁 58

4.3.6 亚共晶白口铸铁 58

4.3.7 过共晶白口铸铁 59

4.4 铁碳合金的成分-组织-性能之间的关系 60

4.4.1 含碳量对平衡组织的影响 60

4.4.2 含碳量对力学性能的影响 61

4.4.3 含碳量对工艺性能的影响 62

4.5 Fe-Fe₃C 相图的应用 62

4.6 应用 Fe-Fe₃C 相图应注意的问题 63

本章小结 63

第5章 金属的塑性变形、回复和再结晶 64

5.1 单晶体的塑性变形 64

5.1.1 滑移 64

5.1.2 孪生	66	7.5.2 真空热处理	107
5.2 多晶体的塑性变形	67	7.5.3 离子渗扩热处理	107
5.3 塑性变形对金属组织和性能的影响	68	7.5.4 形变热处理	108
5.4 回复和再结晶	69	7.5.5 表面技术	109
5.4.1 回复	69	本章小结	110
5.4.2 再结晶	70	第8章 金属材料	111
5.4.3 晶粒长大	70	8.1 工业用钢	111
5.5 金属材料的热塑性变形	71	8.1.1 钢的分类和编号	111
5.5.1 热加工与冷加工的区别	71	8.1.2 工业用钢中合金元素的作用	114
5.5.2 热加工对金属组织和性能的影响	71	8.1.3 碳素钢	116
5.6 金属的断裂	72	8.1.4 合金结构钢	120
5.6.1 断裂的基本形式	72	8.1.5 合金工具钢	132
5.6.2 影响断裂的基本因素	74	8.1.6 特殊性能钢	140
本章小结	75	8.2 铸铁	150
第6章 钢的热处理原理	76	8.2.1 铸铁的特点和分类	150
6.1 热处理概述	76	8.2.2 铸铁的石墨化	151
6.2 钢在加热时的转变	76	8.2.3 常用铸铁	152
6.2.1 奥氏体转变温度与 Fe-Fe ₃ C 相图的关系	77	8.3 有色金属及合金	159
6.2.2 奥氏体的形成	77	8.3.1 铝及铝合金	160
6.2.3 影响奥氏体转变速度的因素	78	8.3.2 铜及铜合金	163
6.2.4 奥氏体的晶粒度及控制因素	80	8.3.3 镁及镁合金	171
6.3 钢在冷却时的转变	81	8.3.4 钛及钛合金	172
6.3.1 过冷奥氏体的等温转变图	82	8.3.5 滑动轴承合金	174
6.3.2 过冷奥氏体的连续冷却转变图	88	本章小结	177
6.3.3 过冷奥氏体转变图的应用	89	第9章 非金属材料	178
本章小结	90	9.1 高分子材料	178
第7章 钢的热处理工艺	91	9.1.1 高分子材料的基本知识	178
7.1 钢的热处理工艺分类	91	9.1.2 高分子材料的性能特点	182
7.2 钢的普通热处理	91	9.1.3 常用高分子材料及其应用	183
7.2.1 退火与正火	91	9.1.4 合成橡胶	187
7.2.2 退火与正火的选择	93	9.1.5 粘合剂	190
7.2.3 淬火和回火	94	9.2 陶瓷材料	190
7.3 钢的表面热处理	100	9.2.1 陶瓷的制作工艺	191
7.3.1 感应加热表面热处理	100	9.2.2 陶瓷的组织结构	192
7.3.2 火焰加热表面热处理	102	9.2.3 陶瓷的性能	192
7.4 钢的化学热处理	102	9.2.4 常用陶瓷材料的分类及其应用	193
7.4.1 渗碳	102	本章小结	194
7.4.2 渗氮	104	第10章 新型材料	195
7.4.3 碳氮共渗	105	10.1 新型材料的分类	195
7.5 钢的热处理新技术	106	10.2 功能材料	195
7.5.1 可控气氛热处理	106	10.2.1 形状记忆合金	196
		10.2.2 超导材料	198

10.2.3 储氢材料	199	第 11 章 工程用金属材料的选用	216
10.2.4 智能材料	202	11.1 机械零件的失效与分析	216
10.2.5 梯度功能材料	203	11.2 工程材料选择的基本原则	217
10.3 复合材料	205	11.3 轴、齿轮等工件的选材及工艺路线 分析	218
10.3.1 复合材料的定义及其分类	205	11.3.1 轴类零件	218
10.3.2 复合材料中各组元的作用	206	11.3.2 齿轮类零件	219
10.3.3 复合材料的性能特征	207	11.4 箱体类零件分析	222
10.3.4 复合材料的复合机制	208	11.4.1 常用箱体类零件及选材	222
10.3.5 复合材料的应用	209	11.4.2 箱体类零件加工工艺分析	222
10.4 纳米材料	210	11.4.3 化工设备用材	223
10.4.1 纳米材料的分类	211	11.5 工程材料应用举例	226
10.4.2 纳米材料的特性	211	本章小结	228
10.4.3 纳米材料的应用	213	参考文献	229
10.4.4 纳米材料的制备	214		
本章小结	215		

第 1 章 金属材料的性能与结构

内容提要：金属材料由于具有满足工程应用的性能而在工程中得到广泛应用。金属材料的性能主要包括力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能、经济性能等，这些性能构成了工程中选择某一材料的基础和依据。本章讨论了金属材料的性能分类、定义、表征方法等，介绍了金属常见的三种晶体结构——面心立方（fcc）、体心立方（bcc）和密排六方（hcp）结构，同时讨论了晶体中晶面、晶向的确定方法及晶体中的缺陷。材料的实际显微组织决定了材料的性能，显微组织包括材料的缺陷和相结构，相结构按晶体结构特点可分为固溶体和金属间化合物两大类。

教学重点：金属材料各种性能的分类、定义以及分析测量方法；金属材料的三种常见晶体结构（面心立方、体心立方、密排六方）特点及其晶面、晶向的确定；金属材料的缺陷、固溶体、金属化合物。

教学难点：难点在于对金属晶体结构的理解，包括对晶格、晶胞结构及三种常见晶体结构的理解和晶面、晶向的确定。

1.1 金属材料的性能

材料是构成一切工程的物质基础，这些材料包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料等几大类。其中金属材料是材料的重要组成部分之一，在国计民生中占有举足轻重的地位。

金属材料是由金属元素或以金属元素为主构成的具有金属特性的材料的统称，一般分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属包括钢、铸铁、铬、锰等；其他金属如铝、镁、铜、锌等及其合金都为有色金属。

金属材料的性能包括力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能、经济性能等。金属材料具有晶体的结构特点，具有良好的导热、导电等物理性能和较高的强度、良好的塑性等力学性能，有的甚至在高温下仍然能够保持较强的力学性能。除此之外，很多金属材料易于加工、造价低、具有较高的性能价格比。设计工程师根据金属材料不同的性能，将它们应用在很多工业领域，如机械、冶金、航空航天、医疗、通信、能源、交通等，这些材料的应用极大地促进了世界科技的进步和经济的发展，推动了人类文明的进步。

1.1.1 金属材料的力学性能

任何由金属材料制成的机械零件或工具，在使用过程中都不可避免要受到各种形式的内力或外力的作用。例如，汽车上的半轴在行驶过程中不仅要受到弯矩扭力的作用，而且还会受到冲击力的作用等。零件受到力的作用后，材料会对此有一定的反应。一般情况下，金属材料受力后的反应分三种类型：①金属材料受到较小力时，只发生弹性变形；②受力较前者稍大时，金属材料发生永久（塑性）变形；③受力达到一定值后，金属材料断裂。金属零

2 金属学及热处理

件能否经得起这些力的作用而不影响其使用主要取决于受到力的大小和金属材料自身的性质，这就要求金属制品材料必须具有一定的承受载荷的能力，这种能力就是材料的力学性能，是材料的基本性能。

金属材料的力学性能指标一般包括弹性、强度、硬度、塑性和韧性等。一些性能指标可通过拉伸试验机对一定尺寸的试样进行拉伸获得，试样（参见 GB/T 228—2002）受力前后标距和截面发生的变化如图 1-1 所示。

根据试样在拉伸过程中所承受的载荷和产生的变形量之间的关系，测定该材料的拉伸曲线如图 1-2 所示，在拉伸曲线上可以确定该材料的强度、塑性、弹性等力学性能指标。

1. 强度

强度是指金属材料在静载荷作用下抵抗破坏（过量塑性变形或断裂）的性能。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等形式，所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。各种强度间常有一定的联系，抗拉强度是使用较多的一种最基本的强度指标。强度指标一般用单位面积材料所承受的载荷即应力表示

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中， σ 为应力； F 为外界载荷； A 为试样横截面积。

工程中常用的强度指标有弹性极限 σ_e 、屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b （图 1-2）。在外力作用下产生弹性变形时所能承受的最大拉应力为弹性极限 σ_e 。屈服强度是指在拉伸过程中，材料所受载荷达到某一临界值即屈服极限 σ_s 时，即使载荷不再增加，材料也继续变形或产生 0.2% 应变时（非塑性材料）的应力值。抗拉强度 σ_b 也叫强度极限，是指材料在断裂前承受的最大应力值。在实际工程中，设计工程师一般要根据实际情况选择屈服强度作为强度设计的依据。

2. 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下发生永久变形而不被破坏的能力。在工程中常用塑性指标来判断金属材料的可成形性，常用伸长率和断面收缩率来表征。

伸长率是指试样被拉伸断裂后的拉断标距长度的延长值（即试样断裂后的标距长度与原始标距长度的差值，见图 1-1）与原始标距长度的比值，即

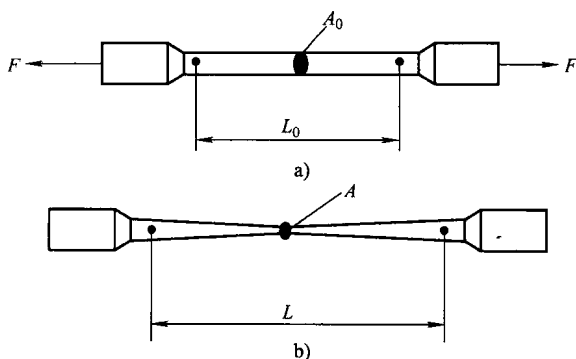


图 1-1 试样拉伸前后标距和截面变化示意图

a) 试样拉伸前 b) 试样拉伸后

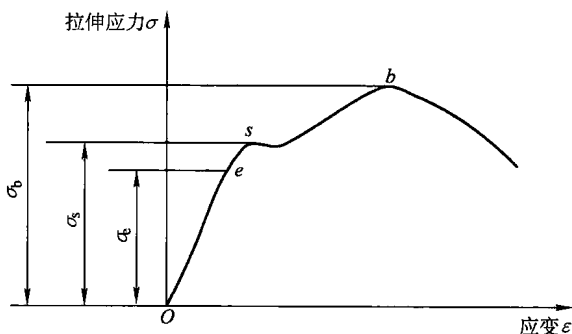


图 1-2 单轴拉伸曲线示意图

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1-2)$$

式中， δ 为伸长率； L_0 为试样原始标距长度； L 为试样被拉断后的标距长度。

断面收缩率是指试样拉伸断裂后的断面收缩值（即原始横截面积与试样拉断后缩颈处的横截面积的差值，图 1-1）与原始横截面积的比值，用 ψ 表示

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \quad (1-3)$$

式中， A_0 为试样原始横截面积； A 为试样拉断后缩颈处的横截面积。

伸长率和断面收缩率越大，材料塑性越好；反之，塑性越差。良好的塑性是金属材料进行变形加工的必要条件，也是保证机械零件工作安全，不发生突然脆断的必要条件。

3. 弹性模量

材料在弹性范围内由于受力而发生形状或尺寸的变化，其应力与应变的关系服从胡克定律，即

$$\sigma = E\varepsilon \quad \tau = G\gamma \quad p = K\theta \quad (1-4)$$

式中， σ 、 τ 、 p 分别为正应力、切应力和压力； ε 、 γ 、 θ 分别为线应变、切应变和体积应变； E 、 G 、 K 分别为弹性模量、切变模量和体积模量。它们都表示材料在受力时抵抗弹性变形的能力，或材料弹性变形的难易程度。

由式 (1-4) 可知，弹性模量是拉伸曲线上 σ_e 以下线性曲线的斜率（图 1-2）。该斜率越大，材料弹性模量越大，弹性变形越不容易进行。弹性模量是材料的重要力学性能指标，它的大小主要取决于金属键，与显微组织关系不大。在设计要求刚性较大的机械零件时，应选用具有较高弹性模量的材料。

4. 硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标，它是材料表面在小的体积范围内抵抗弹性变形、塑性变形或破坏的能力，是与材料强度、塑性、弹性和韧性等力学性能有关的综合指标。目前在实际工程中，最常用的测定硬度的方法是压入硬度法，它是用一定几何形状的压头在一定载荷下压入被测试的金属表面，根据被压入程度（压痕大小或深度）和外界载荷来测定其硬度值。硬度试验根据其测试方法的不同可分为静载压入法和动载压入法。在静载压入法中又分为布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和显微硬度等。

(1) 布氏硬度 布氏硬度以 HBW 表示（参见 GB/T 231.1—2009）。在工程中有非常广泛的用途。如图 1-3 所示，其测量原理为用一定直径的硬质合金球以相应的试验力压入待测材料表面，保持规定时间并达到稳定状态后卸除试验力，然后测量材料表面的球面压痕直径，用球面压痕单位面积上所承受的平均压力，即压入载荷与压痕面积的比值来计算布氏硬度。即

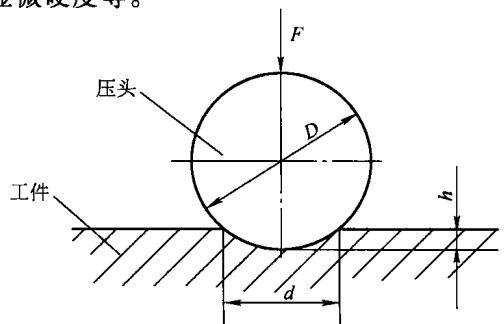


图 1-3 布氏硬度测量原理示意图

$$\text{HBW} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ 或 } \text{HBW} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-5)$$

式中, F 为载荷 (kgf 或 N); D 为压头直径 (mm); d 为压痕直径 (mm)。

布氏硬度实验法的优点有: ① 测量值较准确, 重复性好; ② 压痕面积较大, 硬度值代表全面, 能反映较大范围内组成材料的各相的平均硬度, 而不受个别组成相的综合影响。其缺点有: ① 可测的硬度值不高; ② 一般不能测试成品与薄件; ③ 测量费时, 效率低。

在工程实践中, 布氏硬度特别适合经退火、正火和调质的钢件, 以及灰铸铁、有色金属、低合金结构钢及非金属材料等毛坯或半成品的硬度测试。布氏硬度值和抗拉强度之间存在着一定的换算关系。

(2) 洛氏硬度 当硬度大于 450HBW 或者试样过小时, 不能采用布氏硬度测试而改用洛氏硬度方法计量。洛氏硬度是以压痕塑性变形的深度来确定材料的硬度值 (参见 GB/T 230.1—2002)。根据测试材料硬度的不同, 分四种不同的标度来表示, 即 HRA、HRB、HRC、HRD, 国内运用较多的是前三种, 它们的测量范围和应用范围也不同, 应用时要根据材料的硬度决定采用哪种具体的实验方法。HRA 是采用 60kgf 载荷和金刚石圆锥压头求得的硬度, 用于硬度极高的材料 (如硬质合金等)。HRB 是采用 100kgf 载荷和直径 1.58mm 的淬硬钢球为压头, 适用于硬度较低的材料 (如退火钢、铸铁等)。HRC 是采用 150kgf 载荷和金刚石圆锥压头, 用于硬度较高的材料 (如淬火钢等)。洛氏硬度具有简便迅速、效率高、对测试表面的损伤小, 并且对测试表面的要求较低等优点。其缺点是不同标度的硬度值无法相互比较, 而且其对组织的不均匀性很敏感, 重复性差, 不适合具有粗大或者不均匀组织材料的硬度测量。洛氏硬度测试基本原理如图 1-4 所示。

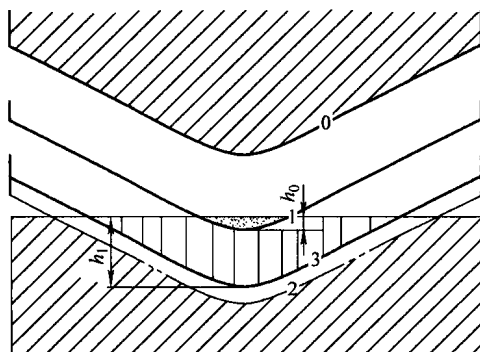


图 1-4 洛氏硬度测试示意图

图中, 0 为试验开始之前压头与试样未接触的位置; 1 为压头受初载荷 F_0 后, 压入试样深度 h_0 的位置; 2 为施加主载荷 F_1 后压头压入试样表面的位置; 3 为卸掉主载荷 F_1 后, 压头由于试样弹性恢复而稍微回弹的位置。此时实际压入试样深度为 h_1 , 则压头受主载荷而压入试样深度为 $h_1 - h_0$ 。 $h_1 - h_0$ 的数值越小, 表示试样硬度越大。反之, 表示试样越软, 硬度越低。

(3) 维氏硬度 维氏硬度以 HV 表示 (参见 GB/T 4340.1—2009), 其基本原理与测试方法和洛氏硬度相同。此方法特别适合于表面硬化层和薄片状材料的硬度测量。测量原理为将夹角为 136° 的金刚石四棱锥体压头 (图 1-5) 使用很小的试验力 F (49.03 ~ 980.07N) 压入试样表面, 保持一定时间, 然后测出压痕对角线的长度 d 。则维氏硬度值为

$$\text{HV} = 0.1891 \times \frac{F}{d^2} \quad (1-6)$$

式中, F 为试验加载力 (N); d 为压痕对角线长度 (mm)。

在选择载荷时, 应使材料测试层厚度大于 1.5 倍的压痕直径。当待测试材料层的厚度较

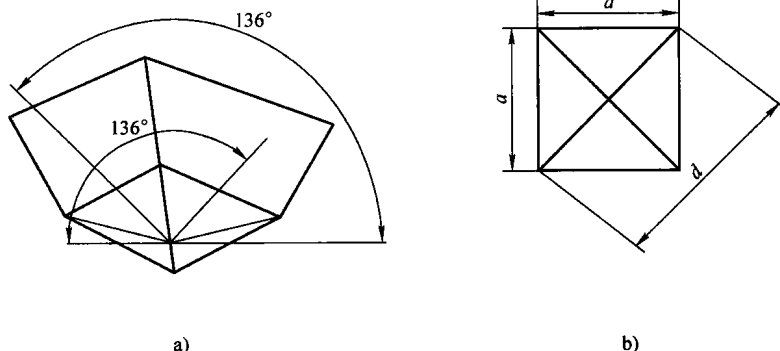


图 1-5 维氏硬度仪中压头和压痕示意图

a) 压头 b) 压痕

大时，应采用较大的载荷，以提高测量精度。

维氏硬度实验法的优点是：①测量准确，适用硬度范围广（从极软到极硬），而且不存在洛氏硬度那种不同标度硬度无法比较的问题，测量精度也比洛氏硬度高；②试验载荷力较小，压入深度比较浅，故可测量较薄的材料，也可测量表面渗碳、氮化层的硬度。其缺点是：①对试样表面要求高，效率低；②测量压痕对角线长度的测试较繁琐。

(4) 显微硬度 显微硬度法是测试载荷小于 200gf 的硬度实验。其原理与测试方法同上，它可以测量极小范围内实验材料的硬度，如区别显微组织中各相的硬度。此法特别适合研究材料表层的硬度以及薄件的硬度，此外还适用于陶瓷等脆性材料。

5. 冲击韧性

机械零件在服役过程中，还会受到以很大速度作用于其上的冲击载荷作用，如冲床、锻锤等机械零部件。金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力叫做冲击韧性。由于冲击载荷加载速率大，变形条件复杂，使塑性变形不充分，所以冲击试验更能反映材料的变脆性能。通常采用一定尺寸和形状的金属试样在规定类型的冲击试验机上承受冲击载荷而折断时，断口处单位横截面积上的冲击吸收功来表征材料的韧性（图 1-6），即

$$a_k = \frac{A_k}{S} = \frac{G(h_1 - h_2)}{S} \quad (1-7)$$

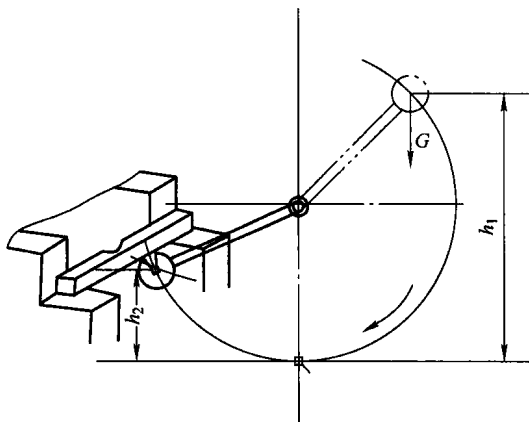


图 1-6 冲击试验示意图

式中， a_k 称做金属材料的冲击韧度； S 为断口的原始横截面积； A_k 为冲击吸收功。

6. 疲劳强度极限

前面所讨论的强度、塑性、弹性等都是金属在静载荷实验条件下获得的材料力学性能指标，只根据这些性能指标设计的零件有时还会发生意外断裂事故。实际上，许多机械零件都是受到循环载荷的作用，在这种载荷条件下，零件受到的外界应力即使低于其屈服强度，也会因疲劳损伤而被破坏。这种损伤是指金属材料在长期循环变动载荷作用下（应力一般情况下均小于其屈服强度），材料内部的微观缺陷会逐渐发展，在几乎没有发生塑性变形的情况

况下就突然发生断裂的现象，其断口特征如图 1-7 所示。金属材料的疲劳破坏过程首先是在其薄弱位置处，如缺陷处（或应力集中位置）产生微细裂纹，这种裂纹就是疲劳源，之后在外界载荷循环作用下形成疲劳裂纹扩展区，当此区达到某一临界尺寸后，零件材料就在甚至低于其弹性极限的应力下突然脆断，形成最后的脆断区。

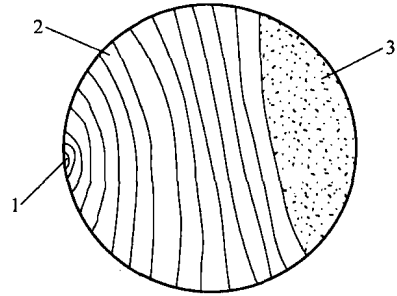


图 1-7 疲劳断口的特征示意图
1—疲劳源 2—裂纹扩展区 3—瞬时脆断区

一般把试样在重复或交变应力（拉应力、压应力等）作用下，在规定的次数内（一般规定钢为 $10^6 \sim 10^7$ 次，有色金属为 10^8 次）不发生断裂所能承受的最大应力称为疲劳强度极限，用 σ_{-1} 表示。在工程中绝大多数机械零件，特别是在变动载荷下工作的机械零件，如齿轮、轴、弹簧等，其主要的破坏形式都是疲劳断裂，由于疲劳断裂大多数是在没有任何征兆的情况下发生的，因此其危害极大。

1.1.2 金属材料的物理性能和化学性能

1. 金属材料的物理性能

在工程应用中，除了力学性能外，金属材料的物理性能在保证及丰富器件功能的过程中也起到相当重要的作用，如金属涂层的线膨胀系数、热导率、密度等。金属材料的物理性能主要包括：

(1) 密度 在工程中除了可以根据材料密度计算零件的重量外，还可利用金属的比强度（强度 σ_s 与密度 ρ 之比）来选材，也可用在与无损检测相关的声学 and 射线探伤中（密度不同的物质对射线有不同的吸收能力）等。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-8)$$

式中， ρ 为密度； m 为质量； V 为体积。

(2) 熔点 熔点为金属由固态向液态转变的温度，其对金属的熔炼、热加工以及材料的高温性能等都有很大影响。

(3) 热膨胀系数 随着温度的改变，金属材料的体积将发生变化，即热胀冷缩，这种现象就是热膨胀，一般用线膨胀系数来衡量。固体物质的温度每改变 1°C 时，其长度的变化和它原来长度之比，叫做线膨胀系数，符号为 α_l ，单位为 $1/\text{K}$ 。在工程中，很多地方都对金属材料的膨胀系数提出特殊要求，如精密仪器、仪表等使用的材料要求的热膨胀系数要低，也常利用材料的热膨胀性来实现零件装配中的过盈，对于热敏原件材料却要求有尽可能高的热膨胀系数。

(4) 磁性 材料具有能吸引铁磁性物体的性质，即称该材料具有磁性。磁性主要由磁导率 μ 、磁滞损耗、剩余磁感应强度、矫顽磁力等参数指标来表征。研究物质的磁学性能是非常重要的，这是因为磁性是材料最重要的基本属性之一，它存在的范围很广，小到微观粒子大到宇宙天体几乎都存在着磁性。磁性与材料的微观结构密切相关，它不仅取决于物质的原子结构，还取决于原子之间的相互作用——键和晶体结构等。物质的磁性可以分为弱磁性和强磁性。弱磁性又分为抗磁性、顺磁性和反铁磁性；强磁性又分为铁磁性和亚铁磁性。随

随着现代科学技术的发展，磁性材料的应用越来越广泛，特别是电子技术的发展对磁性又提出了新的要求。因此，研究有关磁性的理论，发现新型磁性材料是材料科学的一个重要研究方向。工程上，磁性材料常用于制造电气零件，如扬声器、电机等。

(5) 电学性能 表征金属材料电学性能的主要参数为反应材料导电性能的电导率，符号为 γ 。该性能对电磁无损检测中的电阻率和涡流损耗等都有影响，并且该性能与材料的微观结构密切相关。工程中，为了减少电输送中电能的损耗，要采用导电性较好的材料，如铝、铜等。相反，对于加热元器件，常采用导电性差的材料，如Fe-Cr合金等。

(6) 导热性 表征材料导热性能的主要参数是热导率，它常用来表征材料传导热量的能力，常用符号 λ 表示。热导率越高，导热性越好。常用导热性差的材料作隔热材料。此外，导热性差的材料热处理时，加热应缓慢，以减少变形和开裂。

2. 金属材料的化学性能

金属材料的化学性能是指在常温或高温下，金属材料抵抗各种介质侵蚀，保证其正常使用的能力，主要包括抗氧化性、耐蚀性和热稳定性等。

抗氧化性是指金属材料在常温或高温下抵抗自然界中空气的氧化作用的能力。工厂热力设备中的高温部件，如电站锅炉中的加热器、过热管、汽轮机中的气缸、叶片等都长期在高温下工作，易被空气中的氧化。这是由于许多金属都能与空气中的氧进行化合而形成氧化物，在金属表面形成一层氧化膜，如果这层氧化物比较疏松并且不稳定，外界氧气便可以继续与金属作用，使金属材料受到破坏，这种现象就叫做金属的氧化。如果形成的氧化物层比较致密且稳定，而且牢固地覆盖在金属表面上，就形成了一层保护层，阻止了金属的继续氧化，金属就得到了保护，这样的金属抗氧化性能高。

金属材料抵抗各种介质（大气、酸、碱、盐）侵蚀的能力称为耐蚀性，它主要由材料的成分、化学性能、组织形态等决定。金属的腐蚀可以分为全面腐蚀和局部腐蚀两大类。从工程上来看，局部腐蚀的危险比全面腐蚀的更大，因为往往在没有预兆的情况下，金属材料就因为局部腐蚀而突然断裂，造成严重的事故。局部腐蚀的种类很多，可以分为点蚀、缝隙腐蚀、选择腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等。

热稳定性是指金属材料在高温条件下保持材料组织结构和性能不变的性质和能力。

1.1.3 金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能是指其能够承受各种加工、处理而不发生损坏的能力。由于材料是要经过一系列加工后才能制成符合要求的零部件而得以在工程中应用，因此，工艺性能也是非常重要的，一般包括可锻性、铸造性、焊接性、热处理性、可加工性等。

1. 可锻性

指金属材料在压力加工时能改变形状而不产生裂纹的性能，它包括在热态或冷态下能够进行锤锻、轧制、拉深、挤压等加工。可锻性的好坏主要与金属材料的化学成分有关，通常碳钢具有良好的可锻性，低碳钢的可锻性最好，中碳钢次之，高碳钢较差。铸铁、硬质合金不能进行锻压加工。

2. 铸造性

指金属材料是否适合铸造加工的工艺性能，主要包括液态金属的流动性、收缩率、偏析等。流动性是指液态金属充分流动而充满铸型的一种能力；收缩率是指金属在凝固后发生体

积收缩的程度；偏析是指铸件凝固后，其内部化学成分或金属组织不均匀的一种现象。液态金属的流动性越好，凝固后其收缩和偏析程度越小，则其铸造性能越好。

3. 焊接性

是指通过加热、加压等手段，把两种或两种以上的金属材料连接到一起并能满足一定使用性能的特性。焊接过程中，在焊缝部位易产生裂纹、气孔、夹渣等缺陷，这对焊接接头的力学性能危害很大。金属材料焊接性的好坏取决于材料的化学成分、焊接工艺等。通常低碳钢的焊接性较好，高碳钢和铸铁较差。

4. 可加工性

指零件被切削加工成合格制件的难易程度，它与金属材料的化学成分、力学性能、导热性能等因素有关。在生产和实验研究中，可用刀具寿命的长短、加工制件表面质量的好坏、切削功率的大小和断屑的难易程度等作为判据来评定材料可加工性的好坏。通常，灰铸铁具有良好的可加工性，普通碳素钢也具有较好的可加工性。

5. 热处理性

主要是指金属材料能否通过热处理达到需要满足的力学性能，例如材料可否进行热处理强化、是否适合某种热处理方式等。热处理工艺主要包括退火、正火、淬火、回火、调质、化学热处理等，需要根据材料的成分和所需使用性能而进行不同的热处理。详见第7章。

1.1.4 金属材料的经济性能

金属材料的经济性能主要体现在由于该材料的应用而带来的经济价值，包括材料的成本、加工成本、维护成本、增值效益等。用材的相对稳定性、材料在制造过程中的利用率以及材料的工艺性能等都将影响由材料制得零件的总成本，进而影响其经济性。20世纪中叶，在世界范围内，曾将钢的产量作为衡量国家工业实力的标志，直到今天，世界各国的经济依然与金属材料的生产密切相关。材料科学家与工程师们一直在努力改善金属材料的使用性能和加工性能，使之能胜任人们越来越高的技术要求，进而体现科技的进步，改变人们的生活及工作方式。例如，1961年，新型镍基超级合金材料已经在飞机燃气轮机中使用，它们在高温高压下具有良好的性能，并且降低了成本。1980年，由于铸造技术的改进，定向凝固柱状晶及单晶的镍基合金已成功应用于航空发动机。1990年，单晶定向凝固铸造合金已应用于很多航空发动机中，它具有更好的高温性能，提高了飞机发动机的效率，使我们乘坐的飞机更安全、速度更快。近些年来，钛合金、不锈钢等材料由于加工技术的进步使得成本降低，促使人们开发出心脏支架、骨骼固定装置并成功应用于人体的介入治疗，大大减轻了患者的痛苦，提高了人类的生命质量。同时，材料微细加工技术的发展，亦使微电子技术得到迅猛发展，带动了世界信息技术的革命。这些实例都说明，材料及其加工技术的进步、成本的降低，彻底改变了人类的生活方式，推动了人类文明的发展，也带来了巨大的经济利益。可以预计，材料，尤其是金属材料的发展还会给人类社会带来更大的进步和发展。

1.2 金属的晶体结构

金属材料都具有一定的化学成分，其成分不同，性能也就不同。但影响材料性能的因素不仅仅是化学成分，对于同一种化学成分金属材料，通过不同的加工处理工艺，改变材料

内部的组织结构，也可以使其性能发生极大的变化。因此金属的内部结构和组织状态也是决定金属材料性能的重要因素，这就促使人们致力于金属材料内部结构的研究，为改善和发展金属材料的性能奠定了理论基础。

任何物质都是由原子排列组成的。物质按原子规则排列程度的不同可分为晶体和非晶体。晶体是组成物质的原子按一定规则呈周期性重复排列，而非晶体物质的原子排列则是杂乱的无规则排列。金属材料在固态下通常都是晶体。要了解金属材料的内部结构，首先必须了解晶体的结构即原子排列方式，需要了解晶体中原子是如何相互作用并结合起来的，原子的排列方式和分布规律，各种晶体的特点及差异等。

1.2.1 金属

金属材料具有许多与非金属材料不同的特性，如金属有金属光泽，具有良好的导电导热性能及良好的延展性能，并且具有正的电阻温度系数等。为了搞清楚金属材料这些特性的本质，应当分析研究金属的原子结构及原子间的结合方式。

近代物理理论研究表明，孤立的原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子组成的。原子核中又包括具有正电荷的质子和电中性的中子，每个质子所带电荷与一个电子所带电荷相等，但符号相反。每个原子中的质子数与核外电子数相等。核外电子按其能量高低分布在不同的层面上，内层电子的能量低，相对稳定。最外层电子的能量高，与原子核结合最弱，容易脱离原子核对它的束缚，这样的电子通常称为价电子。原子中所有电子的运动均服从量子力学规律。

金属原子的结构特点是其最外层的电子数很少，一般为1~2个。这些电子与原子核的结合力弱，容易脱离原子核的束缚而变成自由电子，即价电子，此时的原子即变为正离子。近代物理学的理论指出，处于聚集状态的金属原子将它们的大部分价电子贡献出来，为其整个集体（聚集体）所公有，称之为电子云或电子气。这些价电子或自由电子不再只围绕自己的原子核转动，而是与所有价电子一起在所有原子核周围运动着。贡献出价电子的原子则变为正离子，沉浸在电子云中，它们依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用而结合起来，这种结合方式叫做金属键，它没有方向性和饱和性。

根据金属键的性质可以解释固态金属的一些性能，如自由电子在电场下的运动使金属具有良好的导电性；随着温度的升高，正离子或原子本身振动的振幅加大、频率加快，可阻碍电子的运动，使电阻升高，因而金属具有正的电阻温度系数；由于自由电子吸收可见光的能量而被激发到较高的能级，当它“跳回”到原来的能级时，通常情况下，就把部分吸收的能量重新以光的形式辐射出来，从而使金属不透明，并具有金属光泽等。

在固态金属中，众多原子依靠金属键结合在一起。原子之间的相互作用力包括正离子与公用自由电子间的异性电荷吸引力，正离子之间以及电子之间的同性电荷排斥力。吸引力与排斥力的大小以及它们的结合能量都随原子间距离的变化而发生改变，这样就存在一个原子间距，如果原子间相互排斥力与吸引力相等，原子处于稳定平衡状态，该原子间距即为平衡距离，这时原子之间的结合能为最低，系统最稳定。任何原子偏离此平衡距离都会使原子的势能升高，从而使原子处于不稳定状态，原子就有力图回到低能状态，恢复到平衡距离的趋势。因此当大量金属原子结合成固体时，为使固态金属具有最低的能量，以保持其稳定状态，原子之间必须保持一定的平衡距离，这就是固态金属中的原子趋于规则紧密排列的重要

原因。

应当指出，所有离子和原子在各自的平衡位置上并不是固定不动的，而是各自以其平衡位置为中心作微弱的热振动。温度越高，热振动的振幅越大。

1.2.2 晶体结构

在金属晶体中，原子排列的规律不同，则其性能也不同，因而必须研究金属的晶体结构，即原子的实际排列情况，掌握其规律，以便人们能够更好地利用材料性能，挖掘材料潜能，不断开发出新型材料。

1. 晶体结构的基本知识

在晶体中，原子按一定的规律周期性地重复排列着，而非晶体，如玻璃等，其内部的原子则是分布散乱的不规则排列。晶体从固体至液体或从液体至固体的转变是突变的。而非晶体则不然，它的转变是逐渐过渡的，没有确定的熔点或凝固点。晶体的另一个特点是在不同的方向上测量其性能（如导电性、热膨胀性、塑性、弹性和强度等）时，表现出或大或小的差异，称之为各向异性或异向性。而非晶体在不同方向上的性能则是一样的，不因方向而异，称之为各向同性或等向性。

在一定条件下，可以将原子呈不规则排列的非晶体转变为呈规则排列的晶体，反之亦然。例如，使液态金属以极快的速度冷却下来，可以制成非晶态金属。这些转变都伴随着原子排列方式的改变，因此结果必然是其性能发生极大的变化。

晶体结构是指晶体中原子在三维空间有规律的周期性的重复排列方式。组成晶体的原子种类不同或者排列规则不同，就可以形成各种各样的晶体结构，也就是说，实际存在的晶体结构可以有很多种。由于金属键没有方向性和饱和性，可以假设金属晶体中的原子都是固定的刚球，晶体就是由这些刚球堆垛而成的，即为原子堆垛模型（图 1-8a），但是此模型很难看清原子排列的规律和特点，不便于研究。为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常将构成晶体的原子忽略，而将其抽象为几何点，称之为阵点，所有阵点的外部环境都相同。注意：阵点可以由一个或几个同一元素的原子构成，也可以是由几个不同元素的原子构成。由这些阵点有规则地周期性重复排列所形成的三维空间阵列称为空间点阵。为了方便起见，人为地将阵点用直线连接起来形成空间格子，称之为晶格（图 1-8b），它的实质仍是空间点阵。

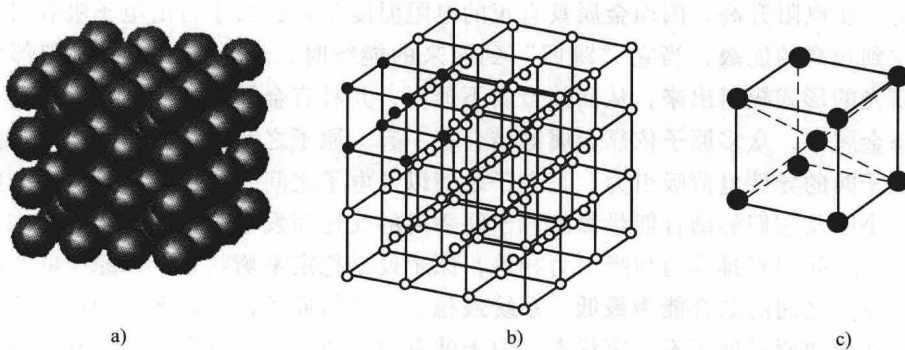


图 1-8 原子排列示意图

a) 原子堆垛模型 b) 晶格 c) 晶胞