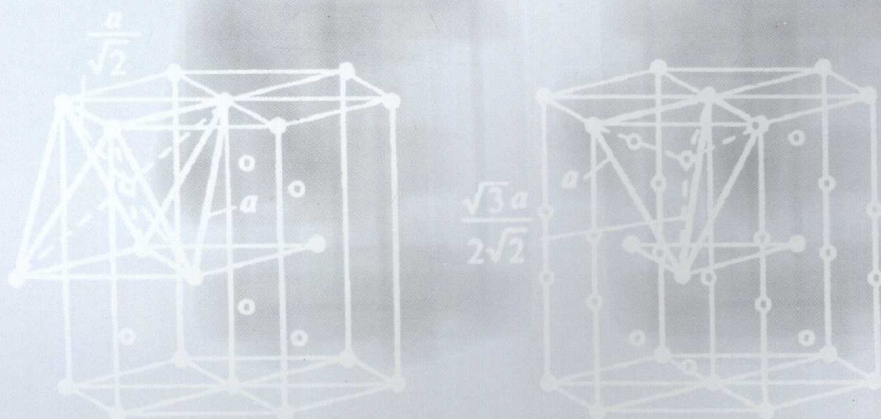


21 世纪教学改革与创新规划教材

# 工程材料

苏旭平 主编



湘潭大学出版社

21 世纪教学改革与创新规划教材

# 工 程 材 料

主 编：苏旭平

副 主 编：王建华 尹付成

参编人员：（按姓氏笔画）

王鑫铭 刘 亚 李 智 赵满秀

湘潭大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

工程材料 / 苏旭平主编. —湘潭: 湘潭大学出版社,  
2008.9

ISBN 978-7-81128-057-9

I. 工… II. 苏… III. 工程材料 IV.TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 126888 号

# **工 程 材 料**

苏旭平 主编

责任编辑: 朱美香 罗 联

封面设计: 胡 瑶

出版发行: 湘潭大学出版社

社 址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0732-8298966 邮编: 411105

网 址: <http://xtup.xtu.edu.cn>

印 刷: 湖南大学印刷厂

经 销: 湖南省新华书店

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14.125

字 数: 341 千字

版 次: 2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81128-057-9

定 价: 26.00 元

(版权所有 严禁翻印)

# 前 言

材料、能源、信息是当今世界发展科技和生产力的三大支柱,其中材料这一支柱是社会经济的基础。因为任何产品的制造、任何工程的建设离开了材料,都将无法实现,并且材料的使用寿命与材料品质的优劣及设计选材是否得当密切相关。随着现代高科技的迅速发展,材料的品种、类型越来越多,应用范围越来越广,在工程领域中,除采用金属材料外,非金属材料、复合材料的应用也日趋广泛。这就要求从事工程技术工作的人员必须较全面地掌握材料科学的基本理论及材料的分类、应用、改性等相关知识。

基于上述原因,也为了推进教学改革,适应 21 世纪“知识经济”时代的需要及高等学校人才培养目标的需要,编者根据多年的教学实践,并参考了近年来国内外有关的教材及文献,编写了此教材,以指导机械类与近机类专业的学生对《工程材料》课程的学习,并为后续课程的学习打下基础。同时,本书也可供有关工程技术人员、企业管理人员参考。

全书共 8 章,第 1~5 章讲述工程材料的性能、结构与凝固、塑性变形、强化与热处理,第 6~8 章讲述钢铁材料、有色金属材料和其他工程材料。

本书编写具备如下特点:

(1) 紧紧围绕高等教育的人才培养目标编排教材内容。正确处理知识与能力的辩证统一关系,其中理论知识部分深浅适度,知识应用部分突出,体现了高等教育规律和人才培养要求。

(2) 重视综合性、应用性和实践性。本书安排了综合性实验,强调培养学生的技术应用能力。

(3) 文字简练,图文并茂,通俗易懂,便于自学。

(4) 紧跟时代发展,注重新材料、新工艺、新技术的引入。

全书由苏旭平任主编,王建华、尹付成任副主编。参加本教材编写的有苏旭平(第 1 章),王鑫铭(第 2 章),刘亚(第 3 章),王建华(第 4、8 章),李智(第 5 章),尹付成(第 6 章),赵满秀(第 7 章)。教材中的大部分金相照片的拍摄由石英和吴煜在湘潭大学机械工程学院工程材料实验室完成。

编写过程中,编者参阅了部分国内外相关教材、科技著作及论文,在此向相关作者表示衷心感谢!

由于编者学识所限,书中的错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月

# 目 录

## 第 1 章 绪 论

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 1.1 材料的发展历史 .....     | (1) |
| 1.2 材料的研究对象及分类 .....  | (1) |
| 1.3 材料的力学性能及其指标 ..... | (2) |
| 习题 1 .....            | (6) |

## 第 2 章 金属的晶体结构与结晶

|                     |      |
|---------------------|------|
| 2.1 金 属 .....       | (7)  |
| 2.2 金属的晶体结构 .....   | (8)  |
| 2.3 实际金属的晶体结构 ..... | (21) |
| 2.4 纯金属的结晶 .....    | (31) |
| 2.5 金属凝固理论的应用 ..... | (43) |
| 习题 2 .....          | (48) |

## 第 3 章 二元相图及铁碳合金

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 3.1 固态合金中的相结构 .....   | (49) |
| 3.2 二元合金相图 .....      | (51) |
| 3.3 典型的二元相图 .....     | (54) |
| 3.4 合金的性能与相图的关系 ..... | (60) |
| 3.5 铁碳相图 .....        | (61) |
| 3.6 碳钢 .....          | (74) |
| 习 题 3 .....           | (78) |

## 第 4 章 金属的塑性变形与再结晶

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 4.1 金属的塑性变形 .....           | (79) |
| 4.2 冷变形对金属组织与性能的影响 .....    | (83) |
| 4.3 冷变形金属在加热时的组织与性能变化 ..... | (85) |

|                        |              |       |
|------------------------|--------------|-------|
| 4.4                    | 回复           | (86)  |
| 4.5                    | 再结晶          | (89)  |
| 4.6                    | 晶粒长大         | (93)  |
| 4.7                    | 金属的热变形       | (94)  |
|                        | 习题 4         | (97)  |
| <b>第 5 章 钢的热处理</b>     |              |       |
| 5.1                    | 概述           | (98)  |
| 5.2                    | 钢在加热时的转变     | (99)  |
| 5.3                    | 钢在冷却时的转变     | (104) |
| 5.4                    | 钢的退火与正火      | (114) |
| 5.5                    | 钢的淬火与回火      | (117) |
| 5.6                    | 其他类型热处理      | (121) |
|                        | 习题 5         | (125) |
| <b>第 6 章 合金钢</b>       |              |       |
| 6.1                    | 合金元素在钢中的主要作用 | (126) |
| 6.2                    | 合金钢的分类及编号    | (131) |
| 6.3                    | 合金结构钢        | (132) |
| 6.4                    | 合金工具钢        | (147) |
| 6.5                    | 特殊性能钢        | (160) |
|                        | 习题 6         | (170) |
| <b>第 7 章 铸铁及有色金属材料</b> |              |       |
| 7.1                    | 铸铁           | (171) |
| 7.2                    | 有色金属及其合金     | (182) |
|                        | 习题 7         | (199) |
| <b>第 8 章 其他机械工程材料</b>  |              |       |
| 8.1                    | 概述           | (200) |
| 8.2                    | 复合材料         | (200) |
| 8.3                    | 陶瓷材料         | (205) |
| 8.4                    | 高分子材料        | (209) |
|                        | 习题 8         | (218) |
|                        | 参考文献         | (219) |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 材料的发展历史

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的物质。它是人类文明的物质基础,是人类发展的里程碑,也是现代文明的三大支柱之一。纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到每一类重要新材料的发现和应用,都会引起生产技术的革命,给社会生产力和人类生活水平带来巨大的变化,并大大加速社会文明发展的进程。

早在一百万年以前,人类开始用石头做工具,使人类进入旧石器时代。大约一万年以前,人们知道对石头进行加工,使之成为精致的器皿或工具,从而使人类进入新石器时代。人类在不断改进石器和寻找石料的过程中发现了天然铜块和铜矿石,并在用火烧制陶器的生产过程中发现了冶铜术,后来又发现把锡矿石加到红铜里一起熔炼,制成的物品更加坚韧耐磨,这就是青铜。公元前 5000 年人类进入青铜器时代。我国原始社会后期开始有陶器,夏代开始冶炼青铜。公元前 13~14 世纪,人类已开始使用铸铁,3000 年前铁工具的使用比青铜工具更普遍,人类开始进入铁器时代。到 19 世纪先后发明了转炉和平炉炼钢,使世界钢产量飞速发展,人类进入了钢铁时代。此后,不仅不断出现新的钢种,而且铜、铝、镁、钛和很多稀有金属都相继出现,并得到了广泛的应用。金属材料已成为当前最重要的工程材料,到 2007 年,全球的粗钢产量已超过 13 亿吨,我国钢铁材料年产量也已超过 2 亿吨,已成为世界上最大的钢铁生产和消费国家。在可预见的几十年中,金属材料仍将占据重要位置。

20 世纪初,由于物理和化学等科学理论在材料技术中的应用,从而出现了材料科学。在此基础上,人类开始了人工合成材料的新阶段。人工合成塑料、合成纤维及合成橡胶等高分子材料的出现,加上已有的金属材料和陶瓷材料(无机非金属材料)构成了现代材料。目前,世界 3 大有机合成材料(树脂、纤维和橡胶)年产量逾亿吨。20 世纪 50 年代金属陶瓷的出现标志着复合材料时代的到来。人类已经可以利用新的物理、化学方法,根据实际需要设计独特性能的复合材料。20 世纪后半叶,新材料研制日新月异,出现了所谓“高分子时代”、“半导体时代”、“先进陶瓷时代”和“复合材料时代”等提法,材料发展进入了丰富多彩的新时期。

## 1.2 材料的研究对象及分类

随着人们对材料研究的深入,已经形成了材料科学与工程学科,它包含材料科学与材料工程两部分。材料科学是以研究材料的成分、结构与性能的关系;而材料工程则是在材料科学研究的基础之上,解决材料设计、制备及使用过程中的工程技术问题。

材料是人类生产生活的物质基础。一般来说,材料可分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料。金属材料是指由金属元素组成的材料,包括黑色金属和有色金属,前者包括铁

和以铁为基础的合金(如钢、铸铁和铁合金),后者是黑色金属以外的所有金属及其合金(如铝及铝合金)的总称,其具体分类见表 1.1。高分子材料是由大量相对分子质量特别大的大分子化合物组成的材料,主要包括塑料、合金纤维、橡胶、胶粘剂等。无机非金属材料是除金属材料和高分子材料以外所有材料的统称,其品种和名目极其繁多,用途各不相同,目前还没有一个统一而完善的分类方法。通常把它们分为传统的和先进的无机非金属材料,前者主要包括传统陶瓷、水泥、玻璃、耐火材料、搪瓷、砖瓦、琉璃、铸石、碳素材料、非金属矿等,而后者主要包括先进陶瓷、非晶态材料、人工晶体、磨料、无机涂层、无机纤维及其它们的复合材料等。

工程材料是在生活、生产和科技各个领域,用于制造结构、机器、工具和功能器件的各类材料统称,它是材料科学与工程最主要的研究对象,工程材料按其组成特点可分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料及复合材料四大类。若按材料的使用性能可分为结构材料与功能材料两大类。结构材料是作为承力结构使用的材料,其使用性能主要是力学性能;功能材料的使用性能主要是光、电、磁、热、声等特殊功能性能。按应用领域材料又可分为信息材料、能源材料、建筑材料、机械工程材料、生物材料、航空航天材料等多种类别。

由于金属材料工业已形成了庞大的生产能力,并且质量稳定,性价比具有一定的优势,所以金属材料仍占据材料工业的主导地位。分类方法不同,金属材料的分类也不一样,如表 1.1 所示。目前,金属材料不断推陈出新,还涌现了其他许多新型高性能金属材料,如快速凝固金属非晶和微晶材料、纳米金属材料、超导材料和单晶合金等。

表 1.1 金属材料的分类

|      |      |              |                                                                                                                                                     |
|------|------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 金属材料 | 黑色金属 | 钢            | 按冶炼设备分类:平炉钢、转炉钢和电炉钢<br>按脱氧程度和浇铸制度分类:沸腾钢、镇静钢和半镇静钢<br>按化学成分分类:碳素钢和合金钢<br>按用途分类:结构钢、工具钢、特殊钢和专业用钢<br>按品质分类:普通钢、优质钢和高级优质钢<br>按制造加工形式分类:铸钢、锻钢、热轧钢、冷轧钢和冷拔钢 |
|      |      | 铸铁           | 按断面颜色分类:灰口铸铁、白口铸铁和麻口铸铁<br>按化学成分分类:普通铸铁和合金铸铁<br>按生产方法和组织性能分类:普通灰铸铁、孕育灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和特殊性能铸铁                                                            |
|      | 有色金属 | 按密度和自然界中储量分类 | 轻有色金属:铝、镁、钠、钾、钙、锶、钡等<br>重有色金属:铜、镍、铅、锌、钴、锡、锑、汞、镉、铋等<br>贵金属:金、银及铂族元素<br>半金属:硅、硒、砷、硼等<br>稀有金属:稀有轻金属、稀有高熔点金属、稀土金属及稀有放射性金属                               |
|      |      | 按化学成分分类      | 铜及铜合金、铝及铝合金、镁及镁合金、钛及钛合金和其他合金                                                                                                                        |
|      |      | 按用途分类        | 铸合金、变形合金、轴承合金、焊料及其他用途合金                                                                                                                             |

### 1.3 材料的力学性能及其指标

材料的性能主要包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是指材料在使用条件下表现出来的性能,它包括物理性能(如密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性、磁性等),化学性能(如腐蚀性、抗氧化性等),力学性能(强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳极限等)等。工艺性能指材料在制造加工过程中反映出来的各种性能。材料的物理化学性能都是大家所熟知



的,在机械设备及工具的设计、制造中选用金属材料时,大多以其力学性能为主要依据。下面将简单介绍一下材料常用的力学性能。

### 1.3.1 强度

强度是材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力,一般采用拉伸试验方法测定。工程上常用的静拉伸强度判据有弹性极限、屈服点和抗拉强度等。

#### 1. 弹性极限

弹性是指金属在外力作用下产生变形,当外力取消后又恢复到原来的形状和大小的一种特性。在弹性阶段内,卸力后而不产生塑性变形的最大应力为材料的弹性伸长应力,通常称为弹性极限,以  $\sigma_e$  表示:

$$\sigma_e = F_e / S_0 \quad (1.1)$$

式中:  $F_e$  ——试样产生完全弹性变形时的最大拉伸力,单位为 N;  $S_0$  ——试样原始横截面积,单位为  $\text{mm}^2$ 。应力的单位通常用 MPa 表示,  $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$ 。

材料在弹性范围内应力与应变成正比,其比值  $E = \sigma/\epsilon$ , 称为弹性模量,标志着材料抵抗弹性变形的能力,用以表示材料的刚度。

#### 2. 屈服点

在拉伸过程中力不增加(保持恒定),试样仍能继续伸长时的应力称为材料的屈服点(也称屈服极限),以  $\sigma_s$  表示:

$$\sigma_s = F_s / S_0 \quad (1.2)$$

式中:  $F_s$  ——材料屈服时的最小拉伸力,单位为 N。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。由于大多数合金没有明显的屈服现象,因此提出“规定残余伸长应力”作为相应的强度指标。国家标准规定:当试样卸除拉伸力后,其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分比时的应力,作为规定残余伸长应力( $\sigma_r$ )。例如  $\sigma_{r0.2}$  表示规定残余伸长率为 0.2% 时的应力。

#### 3. 抗拉强度

拉伸过程中最大力  $F_b$  所对应的应力称为抗拉强度(曾称强度极限):

$$\sigma_b = F_b / S_0 \quad (1.3)$$

抗拉强度表征材料对最大均匀变形的抗力,是材料在拉伸条件下所能承受最大力的应力值,它是设计和选材的主要依据之一。

### 1.3.2 塑性

材料在外力作用下,产生永久变形而不致破裂的能力叫塑性。常用的塑性判据是材料断裂时的最大相对塑性变形,如拉伸时的断后伸长率和断面收缩率。

#### 1. 断后伸长率

试样拉断后,标距的伸长量与原始标距的百分比称为断后伸长率,以  $\delta$  表示:

$$\delta = [SX( ) L_1 - L_0 [ ] L_0 [SX)] \times 100\% \quad (1.4)$$

式中:  $L_1$  ——试样拉断后的标距,单位为 mm;  $L_0$  ——试样原始标距,单位为 mm。

#### 2. 断面收缩率

试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率,以  $\varphi$  表示。其数值按下式计算:

$$\varphi = [SX( ) S_0 - S_1 [ ] S_0 [SX)] \times 100\% \quad (1.5)$$

式中:  $S_0$  ——试样的原始截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ ;  $S_1$  ——试样断裂后缩颈处的最小横截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ 。

材料的断后伸长率  $\delta$  或断面收缩率  $\varphi$  数值越大, 则塑性越好。

### 1.3.3 硬度

硬度是指金属表面一个小的或很小的体积内抵抗弹性变形、塑性变形或抵抗破裂的一种能力, 在一定程度上反映了材料的综合力学性能指标。硬度能够反映出金属材料在化学成分、金相组织和热处理状态上的差异, 是检验产品质量、确定合理的加工工艺所不可缺少的检测性能之一。同时硬度试验也是金属力学性能试验中最简便、最迅速的一种方法。硬度试验方法很多, 机械制造生产中应用最广泛的方法是布氏硬度试验法和洛氏硬度试验法。

#### 1. 布氏硬度

布氏硬度的测定是用一定大小的试验力  $F(\text{N})$ , 把直径为  $D(\text{mm})$  的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面, 保持规定时间后卸除试验力, 测出压痕平均直径  $d(\text{mm})$ , 然后按公式求出布氏硬度 HB 值, 或者根据  $d$  从已备好的布氏硬度表中查出 HB 值。

$$\text{HBS}(\text{HBW}) = 0.102 \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.6)$$

布氏硬度试验法主要用于铸铁、非铁金属及经退火、正火和调质处理的钢材的硬度测定。

#### 2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的性能试验方法, 它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。是用顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为  $1.588 \text{ mm}$  ( $1/16$  英寸) 的淬火钢球作压头, 先施加初试验力  $F_1$  ( $98 \text{ N}$ ), 再加上主试验力  $F_2$ , 其总试验力为  $F = F_1 + F_2$ 。在规定的保持时间内卸除主试验力  $F_2$ , 仍保留初试验力  $F_1$ , 试样弹性变形的恢复使压头上升到新的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为  $h$ 。金属越硬,  $h$  值越小。一般洛氏硬度机不需直接测量压痕深度, 硬度值可由刻度盘上的指针指示出来。

为了能用一种硬度计测定从软到硬的材料硬度, 采用不同的压头和总负荷组成几种不同的洛氏硬度标度, 每一个标度用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后加以注明。我国常用的是 HRA、HRB、HRC 三种, 试验条件 (GB230-91) 及应用范围见表 1.2。洛氏硬度值标注方法为硬度符号前面注明硬度数值, 例如 52 HRC、75 HRA 等。

表 1.2 常用的 3 种洛氏硬度的试验条件及应用范围

| 硬度符号 | 压头类型                       | 总实验力 $F/\text{kN}$ | 硬度值有效范围 | 应用举例             |
|------|----------------------------|--------------------|---------|------------------|
| HRA  | $120^\circ$ 金刚石圆锥体         | 0.588 4            | 75~85   | 硬质合金, 表面淬硬层, 渗碳层 |
| HRB  | $\Phi 1.588 \text{ mm}$ 钢球 | 0.980 7            | 25~100  | 非铁金属, 退火, 正火钢等   |
| HRC  | $120^\circ$ 金刚石圆锥体         | 1.4711             | 20~67   | 淬火钢, 调质钢等        |

注: 总试验力 = 初始试验力 + 主试验力; 初始试验力为  $98 \text{ N}$ 。

洛氏硬度 HRC 可以用于硬度很高的材料, 操作简便迅速, 而且压痕很小, 几乎不损伤工件表面, 故在钢件热处理质量检查中应用最多。但由于压痕小, 硬度值代表性差些。如果材料有偏析或组织不均匀的情况, 则所测硬度值的重复性较低, 故需在试样不同部位测定 3 点, 取其算术平均值。

### 1.3.4 冲击韧度

机械零部件在使用过程中不仅受到静载荷或变动载荷作用,而且还会受到不同程度的冲击载荷作用,如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时,还必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧度。

目前最常用的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验,其试验原理如图 1.1 所示。将待测定的材料先加工成标准试样,然后放在试验机的机架上,试样缺口背向摆锤冲击方向,将具有一定重量  $W$  的摆锤举至一定高度  $H_1$ ,使其具有势能 ( $WH_1$ ),然后摆锤落下冲击试样;试样断裂后摆锤上摆到  $H_2$  高度,在忽略摩擦和阻尼等条件下,摆锤冲断试样所做的功,称为冲击吸收功,以  $A_K$  表示,则有

$$A_K = WH_1 - WH_2 = W(H_1 - H_2) \quad (1.7)$$

用  $A_K$  除以试样的断口处截面面积  $S_N$  即得到冲击韧度,用  $\alpha_K$  表示,单位为  $J/cm^2$ 。

$$\alpha_K = A_K / S_N \quad (1.8)$$

对一般常用钢材来说,所测冲击吸收功  $A_K$  越大,材料的韧性越好。试验还表明,冲击韧度值  $\alpha_K$  随温度的降低而减小,在某一温度范围时材料的  $\alpha_K$  值急剧下降。材料由韧性状态向脆性状态转变的温度称为韧脆转变温度。

### 1.3.5 疲劳极限

材料在循环应力和应变作用下,在一处或几处产生局部永久性累积损伤,经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程称为材料的疲劳。

许多机械零件(如轴、齿轮、弹簧等)和工程结构都是在循环或交变应力下工作的,它们工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。疲劳失效与静载荷下的失效不同,断裂前没有明显的塑性变形,发生断裂也较突然。这种断裂具有很大的危险性,常常造成严重的事故。据统计,大部分机械零件的失效是由金属疲劳造成的。

在交变载荷下,金属材料承受的交变应力( $\sigma$ )和断裂时应力循环次数( $N$ )之间的关系,通常用疲劳曲线来描述,如图 1.2 所示。金属材料承受的最大交变应力  $\sigma$  越大,则断裂时应力循环的次数  $N$  越小,反之, $\sigma$  越小则  $N$  越大。当应力低于某值时,应力循环到无数次也不会发生疲劳断裂,此应力值称为材料的疲劳极限。

通常材料疲劳性能的测定是在旋转弯曲疲劳实验机上进行的,对称弯曲疲劳极限用

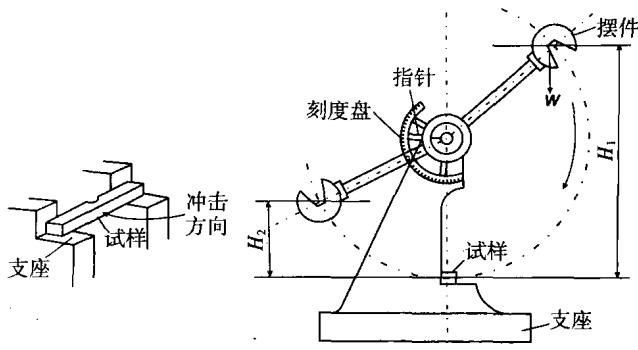


图 1.1 冲击实验原理图

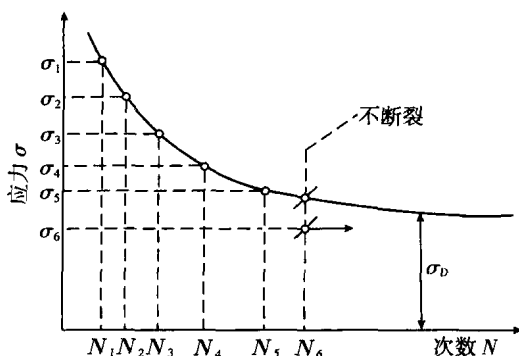


图 1.2 疲劳曲线示意图

$\sigma_{-1}$ 表示。除正常条件下的疲劳问题以外,特殊条件下的疲劳问题,如腐蚀疲劳、接触疲劳、高温疲劳、热疲劳等也值得高度重视。疲劳断裂通常在机件最薄弱的部位或缺陷所造成的应力集中处发生。为了提高机件的疲劳抗力,防止疲劳断裂事故的发生,在进行机件设计和成形加工时,应选择合理的结构形状,防止表面损伤,避免应力集中。

## 习 题 1

1. 请简述材料的分类。
2. 基本概念:弹性极限、屈服点、抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率、硬度、冲击韧度、疲劳极限。

## 第 2 章 金属的晶体结构与结晶

金属材料的化学成分不同,其性能也不同。但是对于同一种成分的金属材料,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。由此可以看出,除了化学成分以外,金属内部的结构和组织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及合金内部结构的研究,以改善金属材料的性能。

金属和合金在固态下通常是晶体。要了解金属及合金的内部结构,首先必须学习并掌握晶体结构的基础知识。

### 2.1 金 属

金属是重要的固体材料之一,在已知的 109 种化学元素中,金属约占 80%。因此有必要对金属进行深入的了解。金属传统的定义是具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽的物质。然而该定义并没有揭示金属区别于其他材料的本质,因为有些金属,如锑,并不具有良好的延展性能,铈的导电性还不如非金属元素石墨好。现在比较严格的定义为:金属是具有正的电阻温度系数的物质,其电阻随着温度的升高而增加。为了弄清楚这一本质,我们应当从金属的原子结构及原子间的结合方式开始研究。

原子结构理论指出,孤立的自由原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子所组成。原子核中又包括质子和中子,质子和中子的质量相等。质子具有正电荷,每一个质子所带电荷与一个电子所带电荷相等,符号相反。每个原子中的质子数与核外电子数相等。核外电子按能级不同由低至高分层排列着。最外层电子的能量高,与核结合力弱,这样的电子称为价电子。

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,最多不超过 3 个。由于这些外层电子与原子核的结合弱,所以很容易脱离原子核的束缚而变为自由电子,此时的原子变成正离子。因此常将金属元素称为正电性元素。过渡族金属元素,如钛、钒、铬、铁等,它们的原子结构,除了上述金属原子的特点之外,还有一个特点,即在次外层尚未填满电子的情况下,最外层就先填充了电子。因此,过渡族金属原子不仅容易丢失最外层电子,而且还容易丢失次外层 1~2 个电子,这样就出现了过渡族金属元素化合价可变的现象。当过渡族金属的原子彼此相互结合时,不仅最外层电子参与结合,而且次外层电子也参与结合。因此,过渡族金属原子间结合力特别强,表现为熔点高、强度高。由此可见,原子外层参与结合的电子数目,不仅决定着原子间结合键的本质,而且也影响化学性能和强度等特性。

金属的原子特殊结构使得金属原子之间的相互结合很有特点。金属原子很容易丢失其价电子而成为正离子。被丢失的价电子不为某个或某两个原子所专有或者共有,而是为全体原子所公有。这些公有化的电子叫自由电子,他们在正离子之间自由运动,形成电子云。正离子在三维空间或电子云中呈高度对称的规则分布。正离子和电子云之间产生强烈的静

电吸引力,使全部离子结合起来。这种结合力就叫金属键。

在金属晶体中,价电子弥漫在整个体积内,所有的金属离子皆处于相同的环境之中,全部离子(或原子)均可被看作是具有一定体积的圆球,所以金属键无饱和性和方向性。

金属所具有的良好导电性、导热性、正的电阻温度系数、金属光泽、良好的塑性变形能力等特性都可由金属是金属键结合来解释。

## 2.2 金属的晶体结构

金属中原子的排列是有规则的,而不是杂乱无章的。人们将这种原子在三维空间有规律的周期性排列的物质称为晶体,金属一般都为晶体。在晶体中,原子排列的规律不同,则其性能也不同,因此必须研究金属的晶体结构,即原子的实际排列情况。

### 2.2.1 晶体的特征

固态物质按其原子(离子、分子)的聚集状态可分为晶体和非晶体两大类。所谓晶体是指原子(离子、分子)在三维 $\kappa$ 空间有规则的周期性重复排列的物体,其排列的方式称为晶体结构,如天然金刚石、水晶、氯化钠等。原子(离子、分子)在空间无规则排列的物体称为非晶体,如普通玻璃、松香、石蜡等。由于晶体和非晶体的原子排列方式不同,二者在性能上有一些重要的区别。

首先,晶体具有一定的熔点,而非晶体则没有。熔点是物质的结晶状态与非结晶状态互相转变的临界温度。晶体在熔点以上为液体,处于非结晶状态。从固态晶体转变为液体是突变的,有一定的熔点。非晶体从固态到液态的转变是逐步过渡的,没有确定的熔点。

其次,晶体由于在不同方向上原子排列的紧密程度不同,导致原子间距和原子间结合力不同,因而在不同方向上具有不同的性能,该现象称为各向异性。非晶体在各个方向上性能完全相同,称之为各向同性。例如单晶体铁(只含有一个晶粒)的弹性模量,在 $\langle 111 \rangle$ 方向上为  $2.90 \times 10^{-5}$  MPa,而在 $\langle 100 \rangle$ 方向上只有  $1.35 \times 10^{-5}$  MPa。

由此可见,晶体与非晶体之间存在本质的差别,但这并不意味着两者之间必然存在着不可逾越的鸿沟。在一定条件下,可以将原子呈不规则排列的非晶体转变为原子呈规则排列的晶体,反之亦然。例如玻璃经高温长时间加热后能形成晶态玻璃;用特殊的设备,使液态金属以极快的速度冷却下来,可以制出非晶态金属。当然,这些转变的结果,必然会使其性能发生极大的变化。

### 2.2.2 空间点阵和晶体结构

为了研究晶体中原子排列的规律性,可以先把晶体看做没有任何缺陷,原子排列绝对规则的理想晶体。

假设理想晶体中的原子(离子、分子或原子集团等质点)都是固定不动的刚性球,则晶体是由这些刚球堆垛而成(图 2.1(a))。原子堆垛模型立体感强,但难以反映晶体中原子排列的规律。为此,可进一步将这些刚球抽象为纯粹的几何点,得到一个由无数几何点在三维 $\kappa$ 空间规则排列而成的阵列,称之为空间点阵。空间点阵中的几何点称为阵点或结点,它们代表原子(离子、分子或原子集团)的中心(即平衡位置)。空间点阵的主要特征是每个阵点在空间分布必须具有完全相同的周围环境(即几何环境和物质环境),亦即点阵的阵点都是等同点。为便于观察,可用许多平行的直线将空间点阵的所有阵点连接起来,构成一个三维 $\kappa$ 的几何格架(图 2.1(b)),称为晶格。

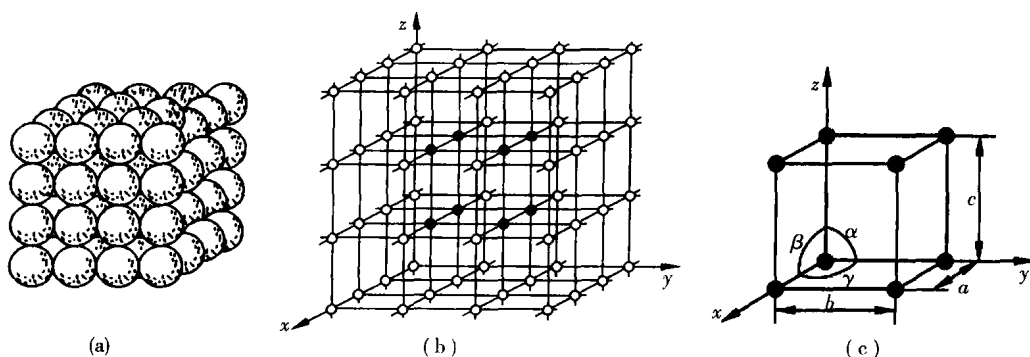


图 2.1 晶体中原子堆垛、晶格和晶胞示意图

(a) 原子堆垛模型; (b) 晶格; (c) 晶胞

应当指出,在一个给定的空间点阵中,各阵点的空间几何位置是固定的,但可通过不同的平行线连接方法而连成不同的空间格架。

由于晶体中原子排列具有周期性的特点,因此,可从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元,这个有代表性的最小几何单元称为晶胞(图 2.1(c))。晶胞通常选为晶格中最小的平行六面体。有些晶胞只在平行六面体的 8 个顶角有阵点,叫简单晶胞;为更好地体现点阵的对称性,有些晶胞除 8 个顶角外,在平行六面体的体心,面心或底心也有一个阵点,叫复杂晶胞。

晶胞的几何特征可以用晶胞的 3 条棱边长  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和 3 条棱边之间的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  6 个参数来描述。其中, $a$ 、 $b$ 、 $c$  称为晶格常数或点阵常数,它们可通过 X 射线衍射分析求得。沿 3 条棱边所作的坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  称为晶轴,晶轴间的夹角称为轴间角,用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示。

### 2.2.3 3 种典型的晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种,结构各不相同,但根据晶胞的 3 条棱边是否相等、3 个夹角是否相等以及是否为直角等关系,晶体学将所有晶体分为 7 个晶系,如表 2.1。

表 2.1 晶体结构的 7 个晶系

| 序 号 | 晶 系       | 点阵参数特征                                                         | 举 例                             |
|-----|-----------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1   | 三斜晶系      | $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ | $K_2CrO_7$                      |
| 2   | 单斜晶系      | $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$       | $\beta$ S, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ |
| 3   | 正交晶系(斜方)  | $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$          | $\alpha$ S, $Fe_3C$ , Ga        |
| 4   | 六方晶系      | $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$  | Zn, Mg, Cd                      |
| 5   | 菱方晶系(3 角) | $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$             | As, Sb, Bi                      |
| 6   | 正方晶系(四方)  | $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$             | $\beta$ Sn, $TiO_2$             |
| 7   | 立方晶系      | $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                | Fe, Cr, Cu, Ag, Au              |

法国晶体学家布拉菲(A. Bravais)用数学方法证明:在上述 7 个晶系中,只能有 14 种空间点阵。这 14 种点阵被称为布拉菲点阵,它们的晶胞包括 7 种简单晶胞和 7 种复杂晶胞,如图 2.2 所示。

应该强调指出,虽然晶体只有 14 种空间点阵,但点阵中的每一个阵点可以由一个或一个以上的质点(原子、离子或分子)组成,而这些质点的组合和排列又可以有多种不同的形式。因此,每种空间点阵都可以形成无限多的晶体点阵(晶体结构)。例如,图 2.3 中的(a)、(b)和(c)为 3 种不同的晶体结构(由于对称关系,这里只用平面图形表示),但却属于同一种

空间点阵(d),即简单立方点阵。

晶体结构是指晶体中原子规则排列的具体方式。由于金属原子趋向于紧密排列,所以工业上使用的金属元素中,除少数具有复杂的晶体结构外,绝大多数均具有比较简单的晶体结构。其中最典型、最常见的金属晶体结构只有3种,即体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。前两种属于立方晶系,后一种属于六方晶系。

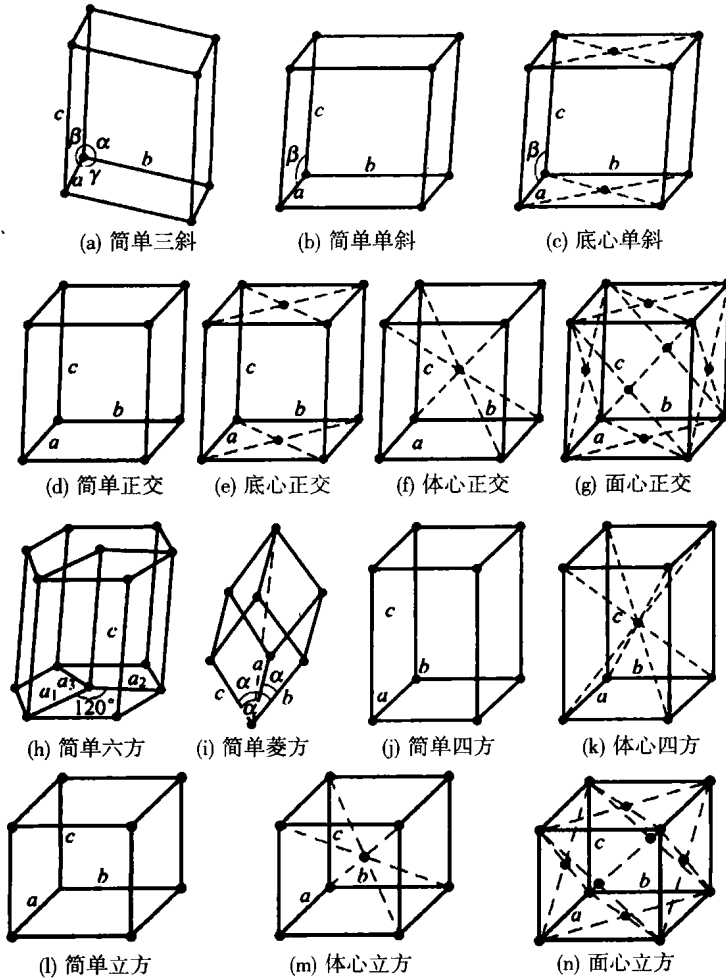


图 2.2 14 种布拉菲点阵的晶胞

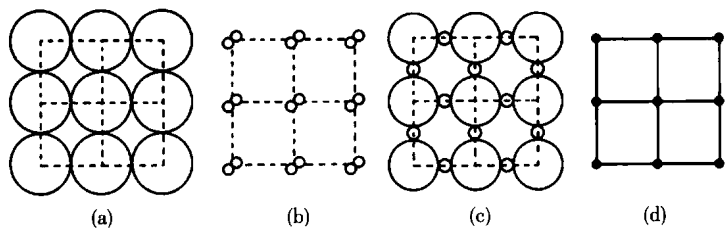


图 2.3 晶体点阵与空间点阵



### 1. 体心立方晶胞(bcc)

体心立方晶胞如图 2.4 所示。在体心立方晶胞中,原子分布在立方晶胞的 8 个顶角及其体心位置,角上 8 个原子与中心原子紧靠。具有这种晶体结构的有 Cr、V、Mo、W 和  $\alpha$ -Fe ( $<912\text{ }^{\circ}\text{C}$ )等 30 多种。

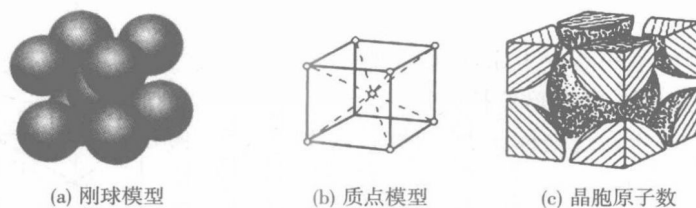


图 2.4 体心立方晶胞

### 2. 面心立方晶胞(fcc)

面心立方晶胞如图 2.5 所示。在面心立方晶胞中,原子分布在立方晶胞的 8 个顶角及 6 个面的中心,面中心的原子与该面 4 个角上的原子紧靠。具有这种晶体结构的有 Al、Cu、Ni 和  $\gamma$ -Fe( $912\sim1\,394\text{ }^{\circ}\text{C}$ )等约 20 种。

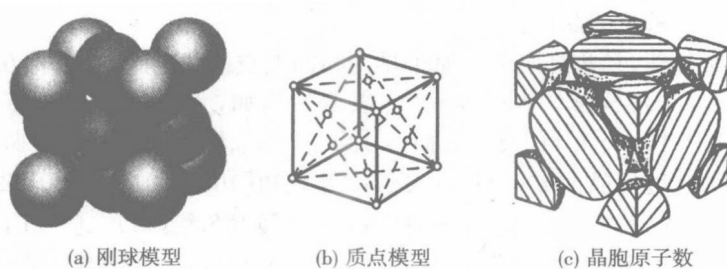


图 2.5 面心立方晶胞

### 3. 密排六方晶胞(hcp)

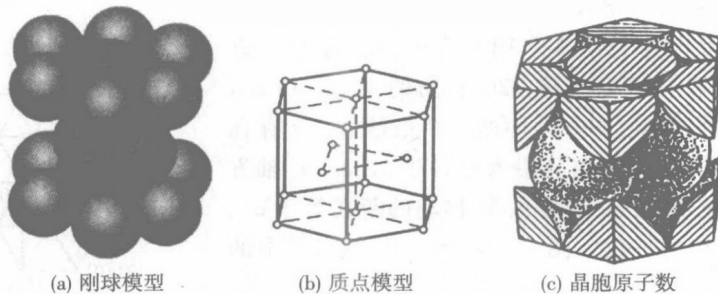


图 2.6 密排六方晶胞

密排六方晶胞如图 2.6 所示。在密排六方晶胞中,原子分布在六方晶胞的 12 个顶角和上下底面的中心及晶胞体内两底面之间 3 个间隙里。具有这种晶体结构的有 Mg、Zn、Cd、Be 等 20 多种。

#### 2.2.4 晶向指数与晶面指数

在晶体中,任意两个原子之间的连线称为原子列,其所指方向称为晶向,由一系列原子