

普通高等工科教育规划教材

# 工程材料

崔占全 孙振国 主编

机械工业出版社

CHINA MACHINE PRESS



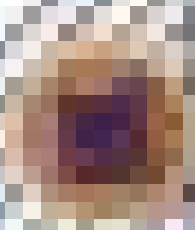
Gongcheng Cailiao



第 1 版 (2018 年 12 月)

# 工程材料

第 1 版 (2018 年 12 月)



普通高等工科教育规划教材

TB3-42  
C92

# 工 程 材 料

主 编 崔占全 孙振国  
副主编 王正品 陈 扬  
参 编 朱张校 杨庆祥 王天生  
主 审 郑明新



机械工业出版社

本书是根据第九届全国“工程材料”课程协作组会议的决定而编写的。内容分为三篇：第一篇 工程材料的基本理论，包括材料的结构与性能、金属材料组织与性能的控制；第二篇 常用工程材料，包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、其它工程材料（功能材料、纳米材料等）；第三篇 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。

本书建立了以“工程材料”为主的教材体系；精简传统内容，强化非金属材料、新型材料及选材的知识。可作为工科院校机械类及近机类专业教材，也可供相关专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料/崔占全，孙振国主编. —北京：机械工业出版社，  
2003. 2

普通高等工科教育规划教材

ISBN 7-111-11496-5

I. 工… II. ①崔…②孙… III. 工程材料-高等学校-教材  
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 005238 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：董连仁 版式设计：冉晓华 责任校对：程俊巧  
张祖凤

封面设计：张 静 责任印制：闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·9.5 印张·365 千字

0 001—7 000 册

定价：24.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

根据第九届全国“工程材料”课程协作组会议的决议,为适应我国高等教育改革形势下的教学需要,本着加强基础、淡化专业、加强能力和素质教育的宗旨,同时考虑到各高校减少该课程学时的实际情况,组织相关院校的一线教师编写了本书。

《工程材料》是工科院校机械类及近机类专业开设的一门技术基础课教材。本书在编写过程中注意了以下几个问题:

- 1) 建立以工程材料为主的教材体系。
- 2) 精简传统内容,强化非金属材料及选材的内容。
- 3) 编入功能材料、纳米材料、零件失效与强化等新材料、新工艺、新技术。
- 4) 教材体系更符合教学规律。
- 5) 对工程材料的应用作了较详尽的介绍。

编者本着改革的愿望,力图使本教材体系更加符合机械类及近机类专业的培养目标。当然,一个科学、合理的教材体系的建立不是一朝一夕就能完成的,不可能一次性就能完全突破旧的框架,仅以此书作为教材改革的一次尝试。

本教材共分为三篇,计九章。绪论、第二章第六节、第四章、第五章、第六章及附录由燕山大学崔占全教授编写;第一章由燕山大学王天生副教授编写;第二章第一节、第二节由清华大学朱张校教授编写;第二章第三节、第四节,第三章第二节、第三节由华东船舶学院孙振国教授编写;第二章第五节、第三章第一节由西安工业学院王正品教授编写;第七章由燕山大学杨庆祥教授编写;第八章、第九章由辽宁工程技术大学陈扬副教授编写。全书由崔占全、孙振国主编,王正品、陈扬副主编;由清华大学郑明新教授主审。

本书在编写过程中,参考和引用了一些文献资料的有关内容,并得到了机械工业出版社教编室的大力支持与指导,在此一并感谢!

由于编者水平有限,错误及不足之处难以避免,敬请读者批评指正。

编者

2002年10月

# 目 录

## 前言

|          |   |
|----------|---|
| 绪论 ..... | 1 |
|----------|---|

|                     |   |
|---------------------|---|
| 第一篇 工程材料的基本理论 ..... | 4 |
|---------------------|---|

|                    |   |
|--------------------|---|
| 第一章 材料的结构与性能 ..... | 4 |
|--------------------|---|

|                   |   |
|-------------------|---|
| 第一节 材料的结合方式 ..... | 4 |
|-------------------|---|

|                 |   |
|-----------------|---|
| 第二节 金属的结构 ..... | 7 |
|-----------------|---|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第三节 金属材料的性能 ..... | 20 |
|-------------------|----|

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第四节 高分子材料的结构与性能 ..... | 30 |
|-----------------------|----|

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第五节 陶瓷材料的结构与性能 ..... | 41 |
|----------------------|----|

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第二章 金属材料组织与性能的控制 ..... | 53 |
|------------------------|----|

|                  |    |
|------------------|----|
| 第一节 纯金属的结晶 ..... | 53 |
|------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| 第二节 合金的结晶 ..... | 61 |
|-----------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第三节 金属的塑性加工 ..... | 79 |
|-------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| 第四节 钢的热处理 ..... | 88 |
|-----------------|----|

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第五节 钢的合金化 ..... | 107 |
|-----------------|-----|

|                |     |
|----------------|-----|
| 第六节 表面技术 ..... | 111 |
|----------------|-----|

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第二篇 常用工程材料 ..... | 125 |
|------------------|-----|

|                |     |
|----------------|-----|
| 第三章 金属材料 ..... | 125 |
|----------------|-----|

|                |     |
|----------------|-----|
| 第一节 工业用钢 ..... | 125 |
|----------------|-----|

|              |     |
|--------------|-----|
| 第二节 铸铁 ..... | 159 |
|--------------|-----|

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第三节 有色金属及其合金 ..... | 170 |
|--------------------|-----|

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第四章 高分子材料 ..... | 190 |
|-----------------|-----|

|                |     |
|----------------|-----|
| 第一节 工程塑料 ..... | 190 |
|----------------|-----|

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第二节 橡胶与合成纤维 ..... | 200 |
|-------------------|-----|

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第三节 合成胶粘剂和涂料 ..... | 203 |
|--------------------|-----|

|                |     |
|----------------|-----|
| 第五章 陶瓷材料 ..... | 206 |
|----------------|-----|

|              |     |
|--------------|-----|
| 第一节 概述 ..... | 206 |
|--------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第二节 常用工程结构陶瓷材料 ..... | 208 |
|----------------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第三节 金属陶瓷（硬质合金） ..... | 213 |
|----------------------|-----|

|                |     |
|----------------|-----|
| 第六章 复合材料 ..... | 217 |
|----------------|-----|

|      |                                       |     |
|------|---------------------------------------|-----|
| 第一节  | 概述 .....                              | 217 |
| 第二节  | 复合材料的增强机制及性能 .....                    | 218 |
| 第三节  | 常用的复合材料 .....                         | 221 |
| 第七章  | 其它工程材料 .....                          | 228 |
| 第一节  | 功能材料 .....                            | 228 |
| 第二节  | 纳米材料 .....                            | 240 |
| 第三节  | 未来材料的发展方向 .....                       | 246 |
| 第三篇  | 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用 .....           | 248 |
| 第八章  | 机械零件的失效与强化 .....                      | 248 |
| 第一节  | 零件的失效形式与分析方法 .....                    | 248 |
| 第二节  | 工程材料的强化与强韧化 .....                     | 252 |
| 第九章  | 典型零件的选材及工程材料的应用 .....                 | 256 |
| 第一节  | 选材的一般原则 .....                         | 256 |
| 第二节  | 典型零件的选材及工艺路线设计 .....                  | 259 |
| 第三节  | 工程材料的应用 .....                         | 266 |
| 附录   | 金属热处理工艺的分类及代号 (GB/T 12603—1990) ..... | 292 |
| 参考文献 | .....                                 | 295 |

# 绪 论

## 一、材料科学的重要地位与作用

材料是人类用来制造各种有用物件的物质。它是人类生存与发展、征服自然和改造自然的物质基础，也是人类社会现代文明的重要支柱。因此历史学家将人类发展分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、水泥时代、钢时代、硅时代和新材料时代，人类使用材料的七个时代的开始时间见表 0-1。

表 0-1 人类使用材料的七个时代的开始时间

|            |       |
|------------|-------|
| 公元前 10 万年  | 石器时代  |
| 公元前 3000 年 | 青铜器时代 |
| 公元前 1000 年 | 铁器时代  |
| 公元 0       | 水泥时代  |
| 1800 年     | 钢时代   |
| 1950 年     | 硅时代   |
| 1990 年     | 新材料时代 |

无论远古时代，还是生产力高度发达的今天，无论是工业、农业、现代国防，还是日常生活均离不开材料。同样，20 世纪的四项重大发明，即原子能、半导体、计算机、激光器也离不开材料科学的发展。仅以计算机为例，1946 年由美国研制的埃尼阿克 (ENIAC) 电子数值积分计算机，共用 18000 多只电子管，重量达 30t 有余，占地 170m<sup>2</sup>，每小时耗电 150kW，真可谓“庞然大物”。半导体材料出现后，特别是 1967 年大规模集成电路问世，使计算机微型化，才使计算机进入办公室及普通百姓人家。现在一台微型计算机如果其功能和第一台电子管计算机相当，但运行速度快了几百倍，体积仅为原来的三十万分之一，质量仅为六万分之一。中国“两弹一星”等尖端技术的发展也离不开材料，因此，新材料技术已成为当代技术发展的重要前沿。1981 年日本的国际贸易和工业部选择了优先发展的三个领域：新材料、新装置和生物技术。材料科学的发展及进步成为衡量一个国家科学技术水平的重要标准。今天人们已强烈地认识到材料科学对社会发展与进步的作用，无论是专门从事材料研究的材料科技人员，还是经济专家、财政金融界的银行家、企业界巨头，以及经济决策人的国家领导阶层，都密切注意材料研究的动向和发展趋势，以便及时把握住时机，作出正确判断与决策，以使在世界经济发展的竞争中占有一席之地。材料科学的发展在国民经济中占有及其重要的地位，因此，材料、能源、信息被誉为现代经济发展的三大支柱。

## 二、工程材料的分类

工程材料是指具有一定性能，在特定条件下能够承担某种功能、被用来制取零件和元件的材料。工程材料种类繁多，有许多不同的分类方法。

### 1. 按材料的化学组成分类

(1) 金属材料 金属材料可分为黑色金属材料（钢和铸铁）及有色金属材料（除钢铁以外的金属材料）。有色金属材料种类很多，按照它们特性的不同，又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属和放射性金属等多种。金属材料仍然是目前应用最广泛的工程材料。

(2) 无机非金属材料 无机非金属材料包括水泥、玻璃、耐火材料和陶瓷等。它们的主要原料是硅酸盐矿物，又称硅酸盐材料。

(3) 高分子材料 高分子材料按材料来源可分为天然高分子材料（蛋白、淀粉、纤维素等）和人工合成高分子材料（合成塑料、合成橡胶、合成纤维）。按性能及用途可分为塑料、橡胶、纤维、胶粘剂、涂料。

(4) 复合材料 由于多数金属材料不耐腐蚀，无机非金属材料脆性大，高分子材料不耐高温，人们把上述两种或两种以上的不同材料组合起来，使之取长补短、相得益彰就构成了复合材料。复合材料由基体材料和增强材料复合而成。基体材料有金属、塑料、陶瓷等，增强材料有各种纤维和无机化合物颗粒等。

### 2. 按材料的使用性能分类

(1) 结构材料 结构材料是以强度、刚度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度、耐磨性等力学性能为性能指标，用来制造承受载荷、传递动力的零件和构件的材料，可以是金属材料、高分子材料、陶瓷材料或复合材料。

(2) 功能材料 功能材料是以声、光、电、磁、热等物理性能为指标，用来制造具有特殊性能的元件的材料，如大规模集成电路材料、信息记录材料、充电材料、激光材料、超导材料、传感器材料、储氢材料等都属于功能材料。目前功能材料在通讯、计算机、电子、激光和空间科学等领域中扮演着极其重要的角色。

在人类漫长的历史发展过程中，材料一直是社会进步的物质基础与先导。21世纪，材料科学必将在当代科学技术迅猛发展的基础上朝着精细化、超高性能化、高功能化、复杂化（复合化和杂化）、生态环境化和智能化的方向发展，从而为人类社会的物质文明建设作出更大贡献。

## 三、本课程的任务与内容

“工程材料”是机械制造、机械设计、机械电子等机械类和近机类各专业的技术基础课。其目的是使学生获得有关工程结构和机械零件常用的金属材料和非金属材料的基础理论知识，并使其初步具备根据零件工作条件和失效方式合理地选择与使用材料，正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。

“工程材料”的内容包括：

(1) 工程材料的基本理论 即材料的结构与性能、金属材料组织与性能控制(纯金属凝固、合金凝固、金属塑变与再结晶、钢的热处理、钢的合金化)。

(2) 常用工程材料 即金属材料(工业用钢、铸铁、有色金属及合金)、高分子材料、无机非金属材料、复合材料、功能材料、纳米材料。

(3) 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用 “工程材料”是以化学、物理、材料力学及金属工艺学和金工教学实习为基础的课程,在学习时应联系上述基础课程的有关内容,以加深对本课程内容的理解。同时,本课程又是设计选材的基础,在今后学习有关专业课程时,还应经常联系本书的有关内容,以便进一步掌握所学的知识。此外,“工程材料”是一门从生产实践中发展起来,而又直接为生产服务的科学,所以学习时不但要学习基本理论,而且要注意联系生产实际及实验条件。

# 第一篇 工程材料的基本理论

## 第一章 材料的结构与性能

固体材料（包括金属材料、高分子材料和陶瓷材料）的性能主要取决于其化学成分、组织结构及加工工艺过程。在制造、使用、研究和发展固体材料时，材料的内部结构是非常重要的研究对象。所谓结构就是指物质内部原子在空间的分布及排列规律。本章将重点讨论常用工程材料即金属材料、高分子材料、陶瓷材料的结构与性能。

### 第一节 材料的结合方式

#### 一、结合键

组成物质的质点（原子、分子或离子）间的相互作用力称为结合键。由于质点间的相互作用性质不同，则形成了不同类型的结合键，主要有共价键、离子键、金属键、分子键。

##### 1. 离子键

当两种电负性相差很大（如元素周期表中相隔较远的元素）的原子相互结合时，其中电负性较小的原子失去电子成为正离子，电负性较大的原子获得电子成为负离子，正、负离子靠静电引力结合在一起而形成的结合键称为离子键。

由于离子键的电荷分布是球形对称的，因此，它在各个方向都可以和相反电荷的离子相吸引，即离子键没有方向性。离子键的另一个特性是无饱和性，即一个离子可以同时和几个异号离子相结合。例如，在 NaCl 晶体中，每个  $\text{Cl}^-$  周围都有 6 个  $\text{Na}^+$ ，每个  $\text{Na}^+$  周围也有 6 个  $\text{Cl}^-$  等距离地排列着。离子晶体在空间三维方向上不断延续就形成了巨大的离子晶体。NaCl 晶体结构如图 1-1 所示。

由于离子键的结合力很大，因此离子晶体的硬度高、强度大、热膨胀系数小，但脆性大。离子键很

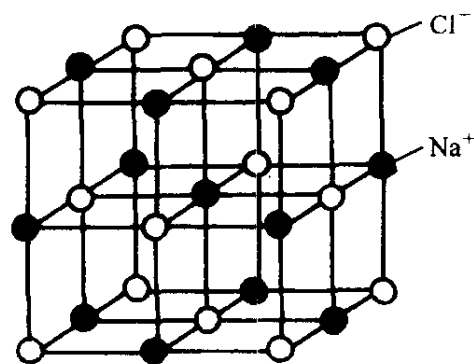


图 1-1 NaCl 晶体结构

难产生可以自由运动的电子，所以离子晶体具有很好的绝缘性。在离子键结合中，由于离子的外层电子被牢固地束缚，可见光的能量一般不足以使其受激发，因而不吸收可见光，典型的离子晶体是无色透明的。

## 2. 共价键

元素周期表中的ⅣA、ⅤA、ⅥA族大多数元素或电负性不大的原子相互结合时，原子间不产生电子的转移，以共价电子形成稳定的电子满壳层的方式实现结合。这种由共用电子对产生的结合键称为共价键。

最具代表性的共价晶体为金刚石，其结构如图1-2所示。金刚石结构由碳原子组成，每个碳原子贡献出4个价电子与周围的4个碳原子共有，形成4个共价键，构成四面体：一个碳原子在中心，与它共价的4个碳原子在4个顶角上。硅、锗、锡等元素可构成共价晶体。SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BN等化合物属于共价晶体。

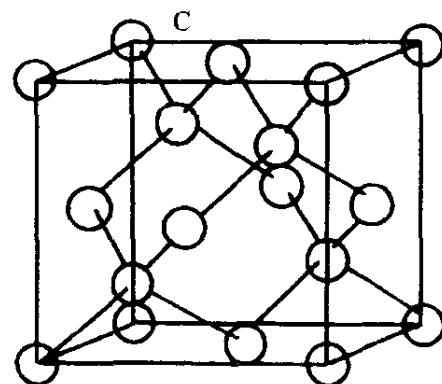


图 1-2 金刚石晶体结构

共价键结合力很大，所以共价晶体的强度、硬度高、脆性大，熔点、沸点高，挥发性低。

## 3. 金属键

绝大多数金属元素（周期表中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ族元素）是以金属键结合的。金属原子结构的特点是外层电子少，原子容易失去其价电子而成为正离子。当金属原子相互结合时，金属原子的外层电子（价电子）就脱离原子，成为自由电子，为整个金属晶体中的原子所共有。这些公有化的自由电子在正离子之间自由运动形成所谓电子气。这种由金属正离子与电子气之间相互作用而结合的方式称为金属键，如图1-3所示。

具有金属键的金属具有以下特性：

1) 良好的导电性及导热性。由于金属中有大量的自由电子存在，当金属的两端存在电势差或外加电场时，电子可以定向地流动，使金属表现出优良的导电性。由于自由电子的活动能力很强及金属离子振动的作用，而使金属具有良好的导热性。

2) 正的电阻温度系数，即随温度升高电阻增大。这是由于温度升高，离子的振动增强、空位增多，离子（原子）排列的规则性受干扰，电子的运动受阻，因而电阻增大。当温度降低时，离子的振动减弱，电阻减小。

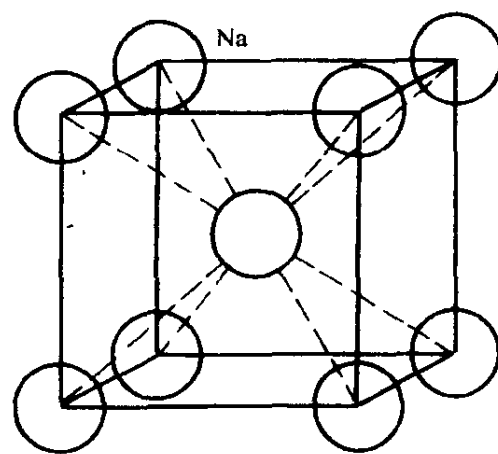


图 1-3 金属钠晶体结构

3) 良好的强度及塑性。由于正离子与电子气之间的结合力较大，所以金属晶

体具有良好的强度。由于金属键没有方向性，原子间没有选择性，所以在受外力作用而发生原子位置相对移动时结合键不会遭到破坏，使金属具有良好的塑性变形能力（良好的塑性）。

4) 特有的金属光泽。由于金属中的自由电子能吸收并随后辐射出大部分投射到其表面的光能，所以金属不透明并呈现特有的金属光泽。

4. 分子键

有些物质的分子具有极性，其中分子的一部分带有正电荷，而分子的另一部分带有负电荷。一个分子的正电荷部位与另一分子的负电荷部位间以微弱静电引力相引而结合在一起称为范德华键（或分子键）。分子晶体因其结合键能很低，所以其熔点很低，硬度也低。此类结合键无自由电子，所以绝缘性良好。

二、工程材料的键性

材料的结合键类型不同，则其性能不同。常见结合键的特性见表 1-1。实际上使用的工程材料，有的是单纯的一种键，更多的是几种键的结合。

表 1-1 结合键的特性

|      | 离子键                             | 共价键                 | 金属键                 |
|------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| 结构特点 | 无方向性或方向性不明显，配位数大                | 方向性明显，配位数小，密度小      | 无方向性，配位数大，密度大       |
| 力学性能 | 强度高，劈裂性良好，硬度大                   | 强度高，硬度大             | 有各种强度，有塑性           |
| 热学性质 | 熔点高，膨胀系数小，熔体中有离子存在              | 熔点高，膨胀系数小，熔体中有的含有分子 | 有各种熔点，导热性好，液态的温度范围宽 |
| 电学性质 | 绝缘体，熔体为导体                       | 绝缘体，熔体为非导体          | 导体（自由电子）            |
| 光学性质 | 与各构成离子的性质相同，对红外线的吸收强，多是无色或浅色透明的 | 折射率大，同气体的吸收光谱很不同    | 不透明，有金属光泽           |

1. 金属材料

绝大多数金属材料的结合键是金属键，少数具有共价键（如灰锡）和离子键（如金属间化合物  $Mg_3Sb_2$ ）。所以金属材料的金属特性特别明显。

2. 陶瓷材料

陶瓷材料的结合键是离子键和共价键，大部分材料以离子键为主。所以陶瓷材料具有高的熔点和很高的硬度，但脆性较大。

3. 高分子材料

高分子材料的结合键是共价键和分子键，即分子内靠共价键结合，分子间靠分子键结合。虽然分子键的作用力很弱，但由于高分子材料的分子很大，所以大分子间的作用力也较大，因而高分子材料也具有较好的力学性能。

如果以四种键为顶点作一个四面体，就可以把材料的结合键范围示意地表示在这个四面体上，具体材料的特性见图 1-4。

### 三、晶体与非晶体

材料依结合键以及原子或分子的大小不同可在空间组成不同的排列类型，即不同的结构。材料结构不同，则性能不同；材料的种类和结合键都相同，但是原子排列的结构不同时，其性能也有很大的差别。通常按原子在物质内部的排列规则性将物质分为晶体和非晶体。

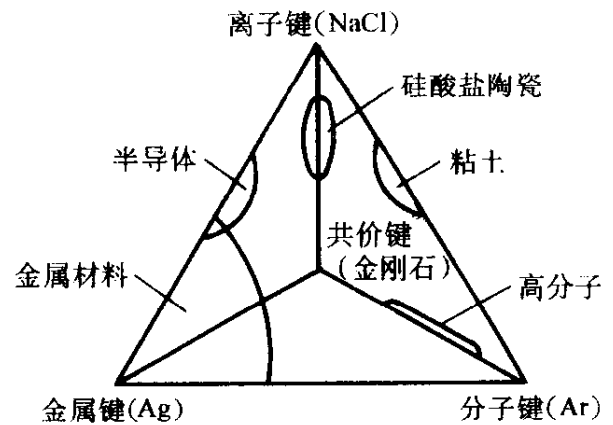


图 1-4 结合键四面体

#### 1. 晶体

所谓晶体是指原子在其内部沿三维空间呈周期性重复排列的一类物质。几乎所有金属、大部分的陶瓷以及部分聚合物在其凝固后具有晶体结构。

晶体的主要特点是：①结构有序；②物理性质表现为各向异性；③有固定的熔点；④在一定条件下有规则的几何外形。

#### 2. 非晶体

所谓非晶体是指原子在其内部沿三维空间呈紊乱、无序排列的一类物质。典型的非晶体材料是玻璃。虽然非晶体在整体上是无序的，但在很小的范围内原子排列还是有一定规律性的，所以原子的这种排列规律又称“短程有序”；而晶体中原子排列规律性又称为“长程有序。”

非晶体的特点是：①结构无序；②物理性质表现为各向同性；③没有固定的熔点；④热导率（导热系数）和热膨胀性小；⑤在相同应力作用下，非晶体的塑性形变大；⑥组成非晶体的化学成分变化范围大。

#### 3. 晶体与非晶体的转化

非晶体的结构是短程有序，即在很小的尺寸范围内存在着有序性；而晶体内部虽存在长程有序结构，但在小范围内存在缺陷，即在很小的尺寸范围内存在着无序性。所以两种结构尚存在有共同特点，物质在不同条件下，既可形成晶体结构，又可形成非晶体结构。如金属液体在高速冷却条件下 ( $>10^7\text{C/s}$ ) 可以得到非晶体金属，而玻璃经适当热处理也可形成晶体玻璃。

有些物质可看成有序与无序的中间状态，如塑料、液晶、准晶等。

## 第二节 金属的结构

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、烧结或其它方法组合而成，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。

一、纯金属的晶体结构

(一) 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  $\text{\AA}$  为单位， $1\text{\AA} = 10^{-1}\text{nm}$ ，各棱边之间夹角用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示。图 1-5c 中晶胞  $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，称为简单立方晶胞。

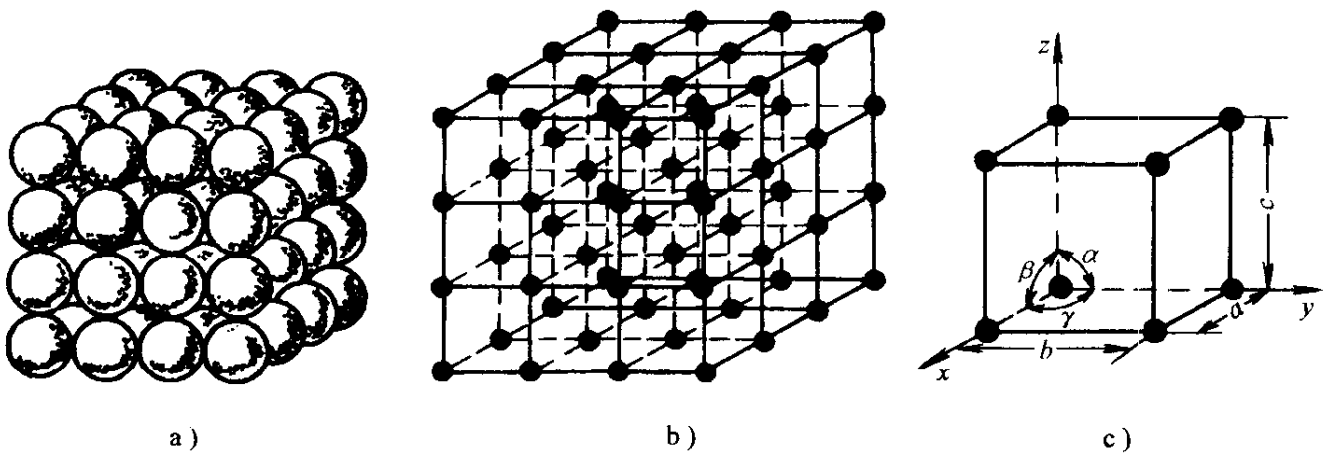


图 1-5 晶体示意图  
a) 简单立方晶体 b) 晶格 c) 晶胞

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，见表 1-2。

表 1-2 晶 系

| 晶 系 | 棱边长度及夹角关系                                                              | 举 例                                                       |
|-----|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 三 斜 | $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$         | $\text{K}_2\text{C}_3\text{O}_7$                          |
| 单 斜 | $a \neq b \neq c, \alpha \neq \gamma \neq 90^\circ \neq \beta$         | $\beta\text{-S}, \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| 正 交 | $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                  | $\alpha\text{-S}, \text{Ca}, \text{Fe}_3\text{C}$         |
| 六 方 | $a_1 = a_2, a_3 \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ | $\text{Zn}, \text{Cd}, \text{Mg}, \text{NiAs}$            |
| 菱 方 | $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$                     | $\text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}$                         |
| 四 方 | $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                     | $\beta\text{-Sn}, \text{TiO}_2$                           |
| 立 方 | $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                        | $\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Cu}, \text{Ag}, \text{Au}$   |

### 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。

## (二) 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 1-6 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。

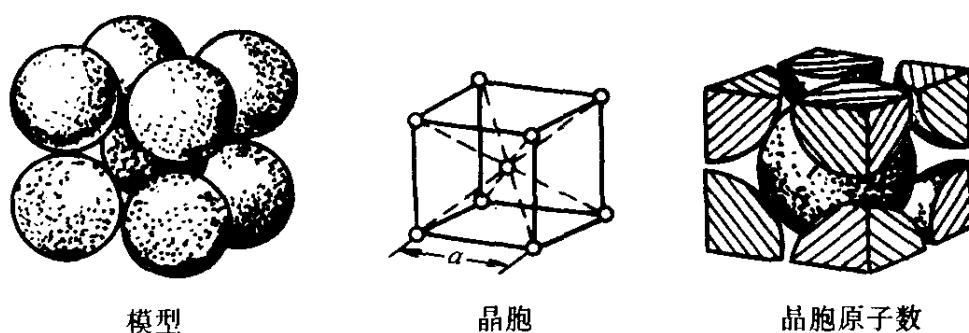


图 1-6 体心立方的晶胞示意图

(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  $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

(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:

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

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  $\alpha$ -Fe、 $\beta$ -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 1-7 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。

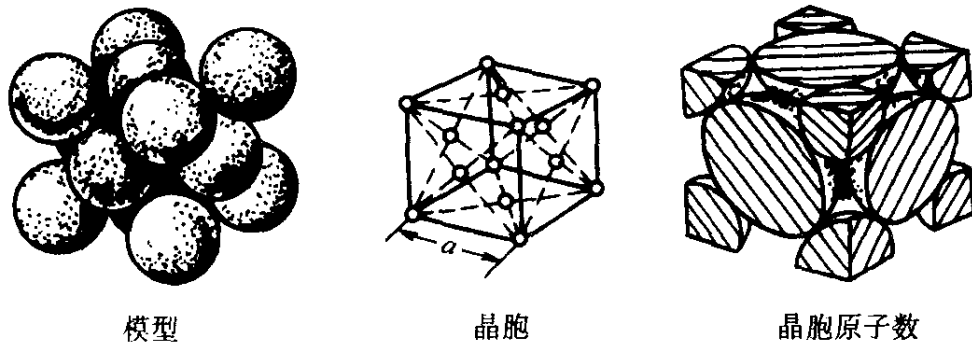


图 1-7 面心立方晶胞示意图

(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  $r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ 。

(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一个晶胞仅为  $1/2$ 。这样  $(1/8) \times 8 + (1/2) \times 6 = 4$ , 即 4 个原子。

(5) 配位数 面心立方晶胞中与任一原子最近邻且等距离的原子数 12, 如图 1-8 所示。

(6) 致密度 面心立方晶胞的致密度为

$$K = \frac{nv'}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3}{a^3} \approx 0.74 = 74\%$$

由上式可知, 面心立方晶格中有 74% 的体积被原子所占据, 有 26% 的体积为空隙。

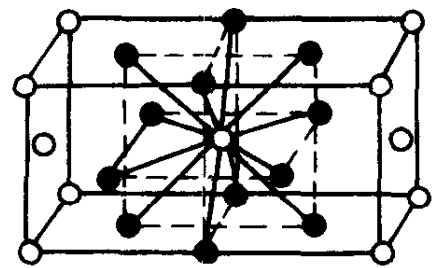


图 1-8 面心立方晶格  
配位数示意图