



高等学校教材

工程材料及机械制造基础 (I)

# 工程材料

(机械类各专业)

浙江大学 黄振源 主编

453

高等教育出版社

高等学校教材

工程材料及机械制造基础 (I)

# 工 程 材 料

(机械类各专业)

浙江大学 黄振源 主编

高等教育出版社

(京) 112 号

### 内容提要

本书是根据国家教委批准印发的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”中工程材料的基本内容和要求编写的,在内容的取舍和编写体系方面有一定的改革创新。全书内容包括:工程材料结构,改变材料性能的主要途径,常用金属材料,其它工程材料,工程材料选用等五章。

本书除可作为高等工科院校机械类专业教材外,还可供电视大学、函授大学和职工大学选作教材或参考书,亦可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程材料/黄振源主编;黄振源,徐志农编.—北京:  
高等教育出版社,1999.6  
(工程材料及机械制造基础;I)  
高等学校教材  
ISBN 7-04-007273-4

I.工… II.①黄… ②黄… ③徐… 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(98)第33881号

书 名 工程材料  
作 者 黄振源 主编

---

出版发行	高等教育出版社	邮政编码	100009
社 址	北京市东城区沙滩后街55号	传 真	010-64014048
电 话	010-64054588		
网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>		
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	中国科学院印刷厂		
开 本	787×1092 1/16	版 次	1999年6月第1版
印 张	11.75	印 次	1999年6月第1次印刷
字 数	280 000	定 价	10.00元

---

凡购买高等教育出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页等  
质量问题,请与当地图书销售部门联系调换

**版权所有,侵权必究**

# 前 言

本书是根据国家教委批准印发的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”中工程材料的基本内容和要求编写的，是《工程材料》、《热加工工艺基础》、《机械加工工艺基础》成套教材中的一本。考虑到21世纪对人才的要求，本书在内容取舍和编写体系方面有一定的改革创新。为此，本书在编写过程中在以下方面做了努力。

(1) 全书内容仍按课程教学基本要求编写，保留了现有同类教材的基本内容，避免面貌全非不利教学。但在某些方面有适当加深和拓宽，如增加塑料模具材料、粉末冶金材料。简要介绍了功能材料概况，以适应科技发展对材料要求多样性的需要。对改变材料性能的机理作了较详细的分析。

(2) 尽力精选内容，避免繁琐的陈述，控制全书的篇幅，以适合40~50学时讲授。

(3) 充分注意与《热加工工艺基础》教材的配合。如液态合金的结晶过程，金属的塑性变形及各种金属材料的成分、组织、性能、牌号、应用等方面都作了详细阐述，为铸造和压力加工提供充分的基础知识。

(4) 在材料结构、材料改性、材料选用等方面将金属材料与非金属材料合并编写，以利综合比较。

(5) 将改变材料性能的主要方法编成一章，以使学生对这些方法的特点和应用有较系统和完整的认识，并能合理选择改性方法。

(6) 加强选材分析和选材举例。

考虑到有些院校课堂教学学时数较少，为方便教学，将常用金属材料编成一章，其它工程材料另编一章，便于在学时不够时灵活处理。

工程材料力学性能的物理概念及表示方法，以附录的形式编于书末，若讲授本课程时学生尚未学习材料力学课程，可将此内容作为一章安排在适当的位置讲授。

本书由浙江大学黄振源主编（编写第一章，第二章，第三章第三节、第四节，第五章，附录），浙江大学徐志农编写（第三章第一节、第二节，第四章），浙江大学测试中心王甫培提供金相照片。承蒙东南大学谈荣生教授和吉林工业大学苏玉林教授审阅了本书稿。两位审稿人对书稿提出了许多宝贵的意见和建议，在此谨表衷心感谢。

本书经工程材料及机械制造基础课程教学指导小组济南扩大会议上复审通过，推荐出版。

本书除可作为高等工科院校机械类各专业教材外，亦可供电视大学、函授大学和职工大学选作教材或参考书，还可供有关工程技术人员参考。

本书是一本探索性的改革教材，由于编者水平有限，书中存在的问题，敬请广大同仁和读者批评指正。

编者

1998年10月

E/A/45/04

# 目 录

绪论 .....	1	第三节 铸铁 .....	104
第一章 工程材料结构 .....	3	第四节 非铁金属及其合金 .....	116
第一节 金属材料结构 .....	3	复习思考题 .....	128
第二节 非金属材料结构 .....	21	第四章 其它工程材料 .....	130
复习思考题 .....	29	第一节 粉末冶金材料 .....	130
第二章 改变材料性能的主要途径 .....	31	第二节 高分子材料 .....	138
第一节 金属塑性变形对材料性能的影响 .....	31	第三节 陶瓷材料 .....	151
第二节 金属的晶粒度对材料性能的影响 .....	36	第四节 复合材料 .....	153
第三节 金属的合金化 .....	38	第五节 功能材料 .....	159
第四节 金属的热处理 .....	40	复习思考题 .....	162
第五节 高分子材料的增强与改性 .....	59	第五章 工程材料选用 .....	163
复习思考题 .....	61	第一节 选材的一般原则 .....	163
第三章 常用金属材料 .....	63	第二节 选材综合举例 .....	171
第一节 碳素钢 .....	63	复习思考题 .....	175
第二节 低合金钢与合金钢 .....	71	附录 工程材料力学性能概念 .....	177
		参考文献 .....	182

## 绪 论

材料是人类生产和生活的重要物质基础，这一点已被越来越多的人所认识。材料的研究和生产水平成为一个国家工业技术水平的重要标志。

人类社会的全部活动都与材料紧密相关。每一种有重要影响的新材料的问世，都推动生产技术的一次飞跃。石器的应用使原始社会的生产水平提高了一大步。随着炼铜技术的成熟，使人类社会从石器时代进入了铜器时代，社会生产力也随之大大提高。炼铁技术的发展，又使人类社会进入一个新的历史时代——铁器时代。在这些伟大的人类历史发展进程中，我国都处于世界的前列。

材料也是近代科学技术发展的重要支柱之一。每一种新材料的发明和应用，都促使某一新兴工业的产生和发展，并使人类的生活更加丰富多采。例如，合成纤维的研究成功，改变了化学工业和纺织工业的面貌，人们的衣着发生了重大变化。超高温合金的发明，使航空航天技术高速度发展。超纯半导体材料的研制和应用，使超大规模集成电路技术日新月异，为当代计算机工业的迅速发展提供了物质保证。光导纤维的开发应用，使通信技术发生重大变革。高硬度、高强度材料的开发，具有各种优异性能的工、模具材料的应用，热强钢、高淬透性钢以及某些功能材料的应用，使机械制造业从产品设计到制造工艺发生了重大变化，并向机电一体化和自动化方向前进了一大步。

目前，我国机械工业中应用的材料仍以金属材料为主。在金属材料中又以铁合金材料为主，其中碳钢和灰铸铁占总用量的一半以上。各类合金钢的用量约占铁合金的  $1/5 \sim 1/6$ 。一批高强度合金（如钛合金）开始在机械工业中应用。非铁合金（铜合金和铝合金）在机械工业中的应用目前仍占较小比例，其中铝合金的生产和应用正在逐年增多。在非金属材料中，目前应用最多的是塑料。塑料的应用已遍及机械工业各个领域和国民经济的各部门。粉末冶金材料由于其成型方法比较简单，成分和结构容易调整，并具有某些特殊性能，其应用范围正在逐步扩大。复合材料是近来发展起来的新型结构材料，可根据使用要求调整材料组分而获得满意性能，因而应用范围越来越广。非金属材料中的陶瓷材料具有独特的性能，其耐热性、耐磨性、耐腐蚀性和电绝缘性是其它材料不能与之媲美的，在机械、化工、电气、纺织等工业部门的某些领域，是不可替代的重要材料。

随着科学技术的高速发展，材料应用领域的不断扩大，各种产品的不断更新换代，对材料的要求越来越高。在机械工业中，机电一体化的进程正在加快，机械设备多功能化、智能化和自动化程度迅速提高，因此对材料性能的要求也愈来愈多样化。除了高强度、高硬度等力学性能外，要求材料具有良好的耐热性、耐腐蚀性、耐疲劳性、耐老化性，有些领域则要求材料具有压电效应、热电效应、光电效应等物理性能。尤其是在轻工业领域，功能材料的开发具有十分重大的意义，是产品升级换代的重要条件。兵器工业、航天工业、核能工业等特殊工业部门，更需要有大量具有某种特殊性能的新材料。从现在至下世纪初，材料的研制、生产和应用将发生重大变化，钢铁材料的应用比例将逐步减少，非金属材料的应用比例将增加，对材料性能的

要求将向综合性和功能化发展。可以预见，在不远的将来，将有大量新材料问世，那时整个工业领域乃至人类生活将更加五彩斑斓。

# 第一章 工程材料结构

一个机械零件应选用何种材料制造，要考虑材料的性能。材料的性能取决于材料的结构。因此，了解材料的结构是了解材料性能的必要基础。

常用工程材料有金属材料和非金属材料两大类。下面简要分析两类材料的结构特点。

## 第一节 金属材料结构

金属材料属晶体材料，要了解金属材料的特性，首先应分析其晶体结构特征。

### 一、纯金属的晶体结构与结晶

#### 1. 晶体的一些重要概念

(1) 晶体 固体材料按原子排列是否有序，可分为晶体和非晶体。原子按一定规则排列的称为晶体，如图 1-1 (a)所示。原子排列不规则的称非晶体。绝大多数的固体金属都是晶体。

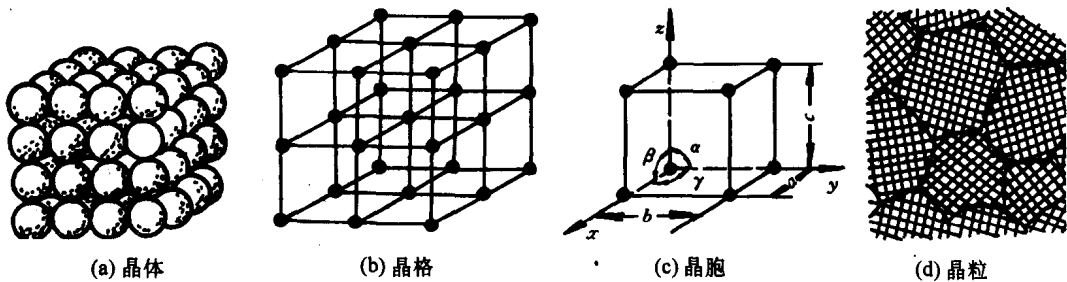


图 1-1 晶体结构

(2) 晶格 在晶体中，过原子中心用线段连接起来，即呈一定的空间几何形状，这种空间格子称为晶格，又称晶体的空间点阵，如图 1-1 (b)所示。晶格形式与晶体的性能有密切关系。

(3) 晶胞 晶格中最基本的几何单元称为晶胞，如图 1-1 (c)所示。每一种晶格都是由晶胞堆砌而成的，晶胞的结构特征就是晶格的结构特征。

(4) 晶格常数 用以表示晶胞大小及几何特征的参数称为晶格常数。通常用晶胞中各棱边的长度及各棱边的夹角表示，如图 1-1 (c)所示。

(5) 晶粒 晶体中晶格方位相同的晶区称为晶粒，如图 1-1 (d)所示。在一个晶粒内，由于各个方向原子排列的状况不同，故呈现各向异性。但实际金属都是由很多晶粒组成的多晶体结构，因而呈现各向同性。

#### 2. 常用金属的晶格及其主要参数

目前已知的晶格型式有七种晶系，如图 1-2 所示。每一种晶系又有多种空间点阵，如体心点阵、面心点阵、密排点阵等。然而在常用的金属中，主要的晶格型式只有三种，即体心立方



晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

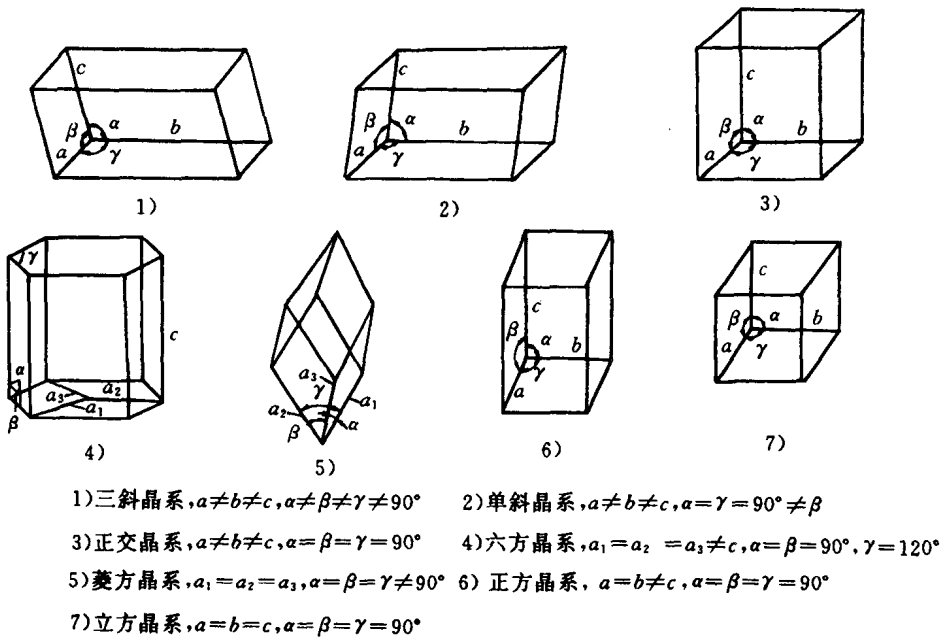


图 1-2 七种晶系型式

(1) 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞呈立方体, 如图 1-3 所示。晶格常数  $a = b = c$ , 三棱边的夹角  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。立方体的 8 个顶点各有 1 个原子, 立方体的中心有 1 个原子, 各原子紧密堆积, 故立方体内对角线上原子靠紧, 而 8 个顶点的原子彼此有一定间隙 (假定原子呈球形, 以下同)。晶格在一定范围内是连续的, 故晶胞各顶点的原子均属相邻 8 个晶胞共有, 只有晶胞中心的原子属该晶胞所有。因此每个晶胞实际包含的原子数为  $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 。若以晶格常数  $a$  来表示原子的大小, 则原子直

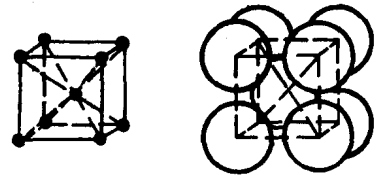


图 1-3 体心立方晶胞

径  $d = \sqrt{3}a/2$  (立方体对角线包含二个原子直径)。晶胞内原子实际占有的体积与晶胞体积之比称为晶格致密度, 用符号  $\eta$  表示。体心立方晶格的致密度为

$$\eta_{\text{体}} = \frac{2 \times \left[ \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3 \right]}{a^3} \approx 0.68 = 68\%$$

属于这类晶格的金属有  $\alpha\text{Fe}$ 、铬、钼、钨、钒等。

(2) 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞也呈立方体, 如图 1-4 所示。立方体的 8 个顶点各有 1 个原子, 立方体 6 个面的中心各有 1 个原子。各原子紧密堆积, 故立方体 6 个面的对角线上原子靠紧。晶胞各顶点的原子属 8 个晶胞共有, 6 个面中心的原子属两个晶胞共有, 故每个晶胞实际包含的原子数为  $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ 。原子直径  $d = \sqrt{2}a/2$ , 晶格致密度

$$\eta_{\text{面}} = \frac{4 \times \left[ \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3 \right]}{a^3} \approx 0.74 = 74\%$$

属于这类晶格的金属有  $\gamma$ -Fe、铜、铝等。

(3) 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞呈六方柱体，如图 1-5 所示。六方柱的 12 个顶点各有 1 个原子，上下面的中心各有 1 个原子，上下面之间有 3 个原子。六方面边长为  $a$ ，六方柱高为  $c$ ， $c = 1.633a$ 。晶胞实际包含的原子数为  $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$ 。原子直径  $d = a$ 。晶格致密度

$$\eta_{\text{密}} = \frac{6 \times \left[ \frac{4}{3} \pi \left( \frac{1}{2} a \right)^3 \right]}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} \times a \times a \times c} \approx 0.74 = 74\%$$

属于这类晶格的金属有铍、镁、锌等。

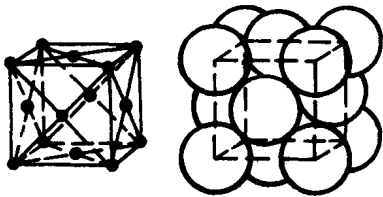


图 1-4 面心立方晶胞

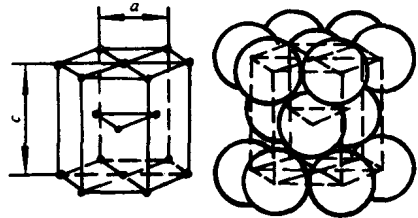


图 1-5 密排六方晶格

### 3. 晶面与晶向的表示方法

晶体中不同方位的原子面（通过原子中心的平面）称为晶面。不同方向的原子列（通过原子中心的方向）称为晶向。不同晶面和不同晶向上原子排列的状态不同，为便于分析，用晶面指数和晶向指数来表示晶面的方位和晶向的方向。

(1) 立方晶系的晶面指数 确定立方晶系晶面指数的步骤如下：

1) 选定晶胞的一个结点为坐标系原点，以与该点连接的三条棱边为坐标轴，即  $Ox$ 、 $Oy$ 、 $Oz$ （反向为负值）。

2) 以晶格常数  $a$  作为坐标轴上的度量单位，求出欲定晶面在 3 个坐标轴上的截距（截距负值时，在指数上方加“-”号）。

3) 求 3 个截距倒数并化为最小整数。

4) 将 3 个整数加圆括号，整数间不加标点。

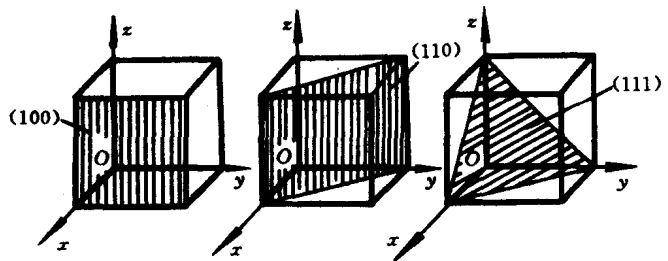


图 1-6 立方晶系主要晶面指数

用符号表示所得晶面指数写成  $(hkl)$ ，图 1-6 为立方晶系 3 个主要晶面的晶面指数。 $(hkl)$  是以某个特定晶面求得的晶面指数，由于坐标系可以平移，故此晶面指数实际上代表了原子排列相同的所有平行晶面的晶面指数。某些晶面虽然彼此不平行，但原子排列情况相同，这

些晶面称为晶面族。将  $hkl$  加以大括号  $\{hkl\}$ ，即表示晶面族的晶面指数。在立方晶系中， $\{100\}$  包含 3 个  $(100)$ ， $\{110\}$  包含 6 个  $(110)$ ， $\{111\}$  包含 4 个  $(111)$ 。

(2) 立方晶系的晶向指数 确定立方晶系晶向指数的步骤如下：

- 1) 同上述方法选定坐标系。
- 2) 过坐标原点作一直线平行欲求晶向。
- 3) 求出该直线上任意点在三坐标轴上的投影值。
- 4) 将 3 个投影值化为最小整数，并加方括号，整数间不加标点。

用符号表示所得晶向指数写成  $[uvw]$ ，图 1-7 表示立方晶系 3 个主要晶向指数。 $[uvw]$  同样表示原子排列相同的所有平行晶向的晶向指数。将 3 个指数加尖括号  $\langle uvw \rangle$ ，即表示彼此不平行但原子排列相同的晶向族的晶向指数。在立方晶系中， $\langle 100 \rangle$  包含 6 个  $[100]$ （其中三个对应负号，下同）， $\langle 110 \rangle$  包含 12 个  $[110]$ ， $\langle 111 \rangle$  包含 8 个  $[111]$ 。

(3) 六方晶系的晶面指数与晶向指数 六方晶系的坐标系由 4 个坐标轴组成，如图 1-8 所示。在底平面上选择 3 个坐标轴并互成  $120^\circ$  夹角，三轴交点为原点  $O$ ，过原点与三轴垂直的方向为第四坐标轴。晶面指数为  $(hkil)$ ，晶面族指数为  $\{hkil\}$ 。晶向指数为  $[uvw]$ ，晶向族指数为  $\langle uvw \rangle$ 。指数确定方法与立方晶系相同。

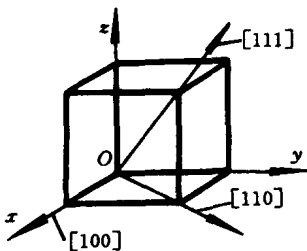


图 1-7 立方晶系主要晶向指数

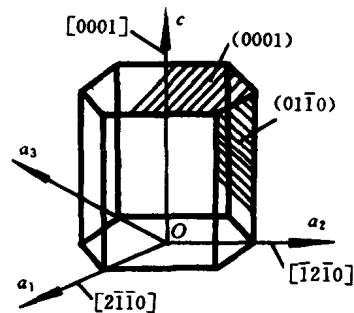


图 1-8 六方晶系的晶面指数与晶向指数

#### 4. 晶体结构的不完整性

晶体结构中，若全部原子按一定的晶格类型规则地排列在各结点上，既不多一个原子，也不缺一个原子，也无原子偏离结点位置，这种晶体称为理想晶体。

在实际金属中，绝大多数原子按一定的晶格类型排列在晶格的各结点上，但由于原子热振动的作用和其它原因，有少数原子偏离正常位置，或余缺原子，或局部原子错排。这种现象称为晶体结构的不完整性，或称晶体缺陷。按照缺陷的形态特征和区域大小，可分为以下三种。

(1) 点缺陷 点缺陷是指晶体中范围很小的缺陷，通常只有几个原子直径的大小。点缺陷又有三种形式。

1) 空位 在晶格的某个结点上没有原子存在，如图 1-9 (a) 所示。晶体中空位的位置是变化的，而且有时是连续几个结点空位。空位主要由原子的热运动产生，因此晶体的空位平衡浓度（晶体中的空位数与总原子数之比）随温度的升高而增大。

2) 置换原子 晶体中的异类原子不是位于晶格的间隙处，而是取代晶体的原子位于晶格的结点上，如图 1-9 (b) 所示。这种缺陷通常在异类原子与晶体原子大小相近时存在。

3) 间隙原子 在晶体的非结点位置存在原子, 这种缺陷又可分为自间隙原子 (图 1-9c) 和杂质间隙原子 (图 1-9d)。自间隙原子是晶体本身的原子偏离结点位置存在于晶格的间隙中; 杂质间隙原子则是由于晶体中存在异类原子而形成的。

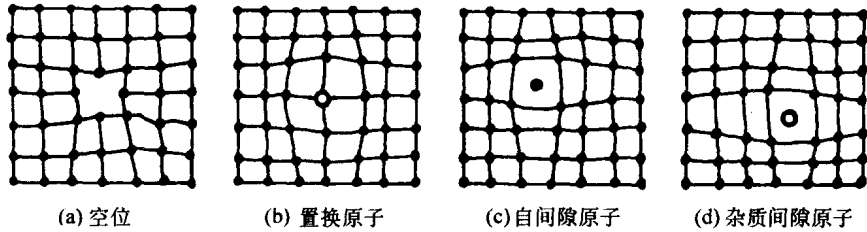


图 1-9 晶体点缺陷

以上几种点缺陷都使缺陷周围的晶格发生畸变, 提高晶体的内能, 从而使晶体抵抗外力作用的能力增强。

(2) 线缺陷 线缺陷是二维尺度很小、第三维尺度很大的缺陷。在金属晶体中, 线缺陷的基本型式是位错, 即在某一长度方向的周围原子排列错位, 如图 1-10 所示。图 1-10 (a) 为刃型位错 (图中加  $\perp$  符号), 其特征是在某一晶面的一侧多了一个原子面。这个原子面好像一片没有插到底的刀片, 故称刃型位错。此“多余”原子面的底部就是位错线。图 1-10 (b) 为螺型位错, 其特征相当于从  $AB$  切至  $CD$ , 然后左右两边沿切开面作综合平移与旋转一个或几个原子间距, 这样,  $CD$  周围的原子就呈螺旋线型排列, 故称螺型位错,  $CD$  为位错线。位错线周围晶格发生畸变, 原子排列不规则。位错线多呈不规则曲线, 且相互缠绕。位错密度 (单位体积晶体中所含位错线的总长度) 的大小对金属性能有重大影响。位错密度很小或很大时, 金属的强度较高。当位错密度在某一范围时, 金属的强度最低。

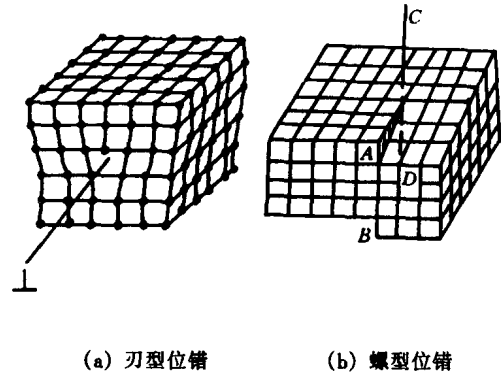


图 1-10 位错型式

(3) 面缺陷 面缺陷是二维尺度较大、第三维尺度很小的缺陷。金属晶体中面缺陷的基本型式是晶界和亚晶界, 如图 1-11 所示。

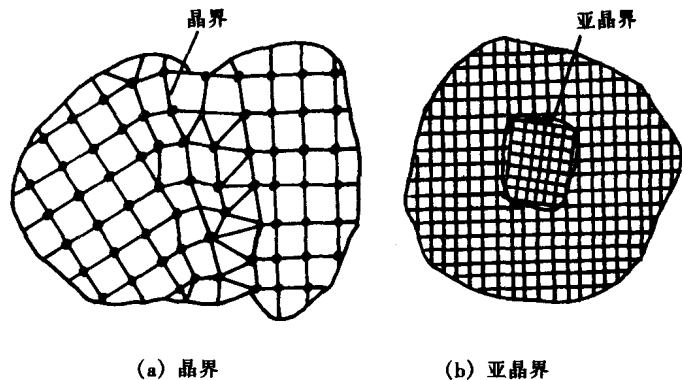


图 1-11 晶界与亚晶界

晶界为相邻晶粒的接触界面, 由于相邻晶粒的晶格位向不同, 故界面上存在一个晶格位向的过渡区。过渡区内原子排列不甚规则, 但也不是杂乱无章, 而是由一个晶粒的位向逐步过渡

到另一个晶粒的位向 (图 1-11a)。过渡区内晶格发生畸变并存在较多的位错。在实际金属中,晶界处常存在一些低熔点的杂质原子。

亚晶界是晶粒内部由于位错的堆积而使一部分晶体的晶格位向与另一部分晶体的晶格位向产生小角度偏差而形成的界面 (图 1-11b)。这样在晶粒的内部就形成亚晶粒。虽然亚晶粒的位向差较小,通常小于  $1^\circ \sim 2^\circ$ ,但亚晶粒的存在对金属的性能仍有许多影响。

上述几种晶体缺陷的共同特点是,缺陷处及其周围导致晶格畸变而使金属的某些性能发生变化。生产中常利用这一特点提高金属的某些性能,使其发挥更大的作用。

### 5. 纯金属的结晶

金属的结晶过程是原子从无序排列的液态转变为有序排列的固态 (结晶态) 的过程。纯金属的结晶过程是在恒温情况下进行的,可用冷却曲线 (温度-时间-状态关系曲线) 表示,如图 1-12 所示。图中  $T_0$  是金属的理论结晶温度,实际结晶温度  $T$  略低于  $T_0$ ,  $T_0 - T = \Delta T$ ,  $\Delta T$  称为过冷度。过冷度随冷却速度的增大而增大。

金属自液态冷却至温度  $T$  时开始结晶,由于结晶时放出结晶潜热,使冷却曲线呈现一水平线段,结晶完毕后继续冷却至室温,晶体结构不发生变化。

结晶过程包括两个阶段:晶核形成和晶核长大。

(1) 晶核的形成 液态金属原子呈无序状态,当温度降低至接近结晶温度时,某些区域的原子出现瞬时近程有序状态,即某些原子短时间呈有序排列,但很快又消失。在许多区域同时出现这种情况,称为结构起伏。这种瞬时近程有序的区域称为晶胚,如图 1-13 所示。当温度降低到理论结晶温度以下时,此时固态自由能低于液态自由能,如图 1-14 所示。系统自发向低位状态转变,结构起伏形成的较大的晶胚不再熔化,成为稳定的固态晶区,即为晶核。

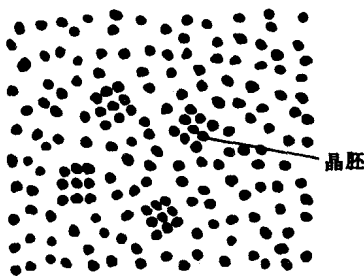


图 1-13 晶胚示意图

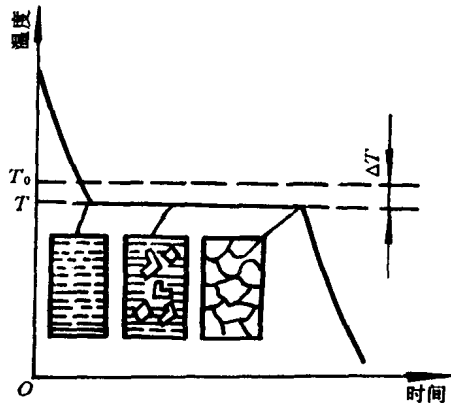


图 1-12 纯金属结晶过程

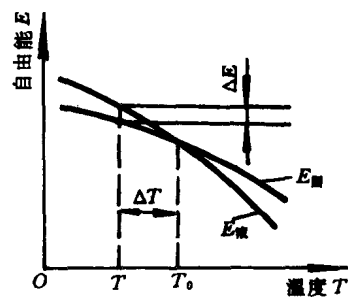


图 1-14 液态金属与固态金属自由能的变化

上述过程形成的晶核是金属自身原子形成的,称为均质晶核或自发晶核。在实际金属中常含有异质元素质点,当这些元素具有比所在金属更高的熔点,晶体结构相同,晶格常数相近时,可作为结晶的晶核,称为异质晶核或非自发晶核。在实际金属中,异质晶核对结晶具有重要作用。

(2) 晶核的长大 晶核形成以后就开始长大。即尚处于自由运动状态的原子向晶核移动, 并按一定规则固定于晶核上, 如此不停地进行, 使原来尺寸非常细小的晶核粗大起来, 此过程则称为晶核长大。大多数晶核长大的方式为树枝状长大。首先沿晶核的某一方向长大, 此方向生长的晶体称为一次晶轴。随后在一次晶轴的垂直方向生长出二次晶轴, 再在二次晶轴的垂直方向生长出三次晶轴, 就构成了树枝状晶体, 如图 1-15 所示。树枝状结晶的结果, 常在树干的间隙处产生微小空隙(疏松)。固态下互不溶解的多元合金, 常可明显地看出树枝状晶体的特征。

晶核的形成与长大是连续和交替进行的, 晶核形成后立即开始晶核长大过程。在一批晶核长大的同时, 又有一批新的晶核产生, 直至液态金属消失为止。每个晶核形成一个晶粒, 所以一般金属都是多晶体。晶核愈多则晶粒愈多愈细小。

## 二、合金的结构

### 1. 合金的概念

合金是以一种金属元素为基础, 加入另一种或几种金属或非金属元素组成的具有金属特性的物质。组成合金的基本单元称为组元。合金中的组元可以是金属元素和非金属元素, 也可以是稳定的化合物。两个组元组成的合金称为二元合金, 三个组元组成的合金称为三元合金。三个以上组元组成的合金常称多元合金。合金的名称常按其最主要的组元的名称命名, 如铜合金、铝合金等。也可按主要合金元素的名称命名, 如铁-碳合金、铜-锌合金等。

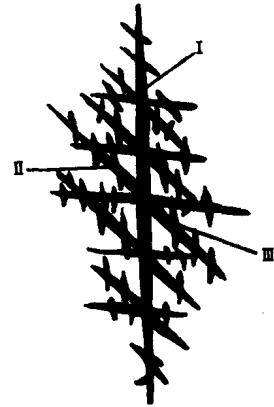


图 1-15 树枝状结晶示意图

合金中由于组元的比例不同, 可组成许多固定成分的合金, 形成一组合金系列, 称为合金系。一个合金系中不同成分的合金具有不同的结构和性能。因此合金与纯金属相比具有更大的可选择性。合金的力学性能通常比纯金属好, 故工程上都选用合金作结构材料。

合金由于是两种或更多的元素组成, 因此元素之间的相互关系及存在形式的不同, 使合金具有不同的结构。表达合金结构特征有两个重要概念——相与组织。

**相** 合金中, 凡成分相同, 结构相同并有界面与其它部分分开的独立均匀的组成部分称为相。不同的合金具有不同的相, 同一合金在不同条件下可能具有不同的相。用相的特征来表示合金结构时称为合金的相结构。结构中各种相称为相组成物。

**组织** 合金结构的微观形貌称为组织。合金的组织通常用显微镜才能观察清楚, 故也称显微组织。用组织的特征来表示合金结构时, 称为合金的组织结构, 合金中的各种组织称为组织组成物。不同的合金呈现不同的组织, 有的是单相的, 有的是多相的。同一种合金, 在不同状态下(如不同温度或经不同的热处理)可以呈现不同的组织, 使合金具有不同的性能。因此工程上选用金属材料时, 分析其组织具有更加实际的意义。

### 2. 合金的基本相

合金中存在各种组织组成物, 但其最基本的组成单元是两种基本相。

(1) 固溶体 以一种金属元素为基础, 其它合金元素(金属或非金属)的原子溶入基础元素的晶格中所形成的结构称为固溶体。通常将基础元素称为溶剂, 溶入的元素称为溶质, 溶质

溶入溶剂后即成溶体。由于是固态，故称固溶体。一般认为溶质原子在溶剂内的分布是均匀的，因此固溶体在合金中是一种相组成物，而且是工业合金基体的基本相。

固溶体的特点是：溶质溶入溶剂的数量是连续的；固溶体的晶格型式同溶剂；固溶体的性能基本同溶剂。溶质在溶剂中的质量百分数称为固溶体的浓度，其极限浓度称为固溶体的溶解度。按溶解度的大小，固溶体可分为有限固溶体与无限固溶体。有限固溶体的溶解度有一定限度，溶质原子最大的溶入量不能超过某一比值。若溶质超过此比值则形成其它相。无限固溶体的溶解度没有限度，可在 0% ~ 100% 之间变化。按溶质原子在溶剂晶格中的存在状态，固溶体又可分为间隙固溶体和置换固溶体。间隙固溶体的溶质原子存在于溶剂晶格的间隙中，如图 1-16 (a) 所示。当溶质原子比溶剂原子小时，容易形成间隙固溶体，而且都是有限固溶体。置换固溶体的溶质原子取代溶剂原子存在于溶剂晶格的结点上，如图 1-16 (b) 所示。当溶质原子与溶剂原子的大小相近而且两者晶型相同时，容易形成置换固溶体。置换固溶体可以是有限固溶体，也可以形成无限固溶体。溶解度超过 50% 时，溶质与溶剂的关系发生变化，含量多的为溶剂。

固溶体中由于溶质原子的存在，不论是间隙式或置换式，都使晶格发生畸变。间隙固溶体溶质原子将四周溶剂原子挤开，这种晶格畸变称正畸变。置换固溶体若溶质原子大于溶剂原子，则产生晶格正畸变，反之产生负畸变。故固溶体的强度和硬度都比溶剂元素高，但塑性和韧性变化不大。许多金属材料经常采用加入其它元素的方法来提高强度和硬度，尤其是非铁合金效果明显，这种方法称为固溶强化。

固溶体中由于溶质原子的存在，不论是间隙式或置换式，都使晶格发生畸变。间隙固溶体溶质原子将四周溶剂原子挤开，这种晶格畸变称正畸变。置换固溶体若溶质原子大于溶剂原子，则产生晶格正畸变，反之产生负畸变。故固溶体的强度和硬度都比溶剂元素高，但塑性和韧性变化不大。许多金属材料经常采用加入其它元素的方法来提高强度和硬度，尤其是非铁合金效果明显，这种方法称为固溶强化。

(2) 金属化合物 金属化合物是合金的另一种基本相。其特点是：组成化合物的合金元素按一定的比例结合；化合物的晶格型式不同于各组成元素的晶格；化合物的性能与组成元素原有的性能差别较大；化合物具有金属的性质。按其结构的不同，金属化合物可分为三类。

1) 正常价化合物 这类化合物符合化合价规律，可用化学式表达。通常由周期表上相距较远，负电性差别较大的元素组成，其化合键有离子键也有共价键。合金中常见的有  $Mg_2Si$ 、 $Mg_2Sn$ 、 $Cu_2Se$  等。

2) 电子化合物 这类化合物不符合化合价规律，但当满足某一电子浓度值时则可稳定存在。通常 I B 族元素与 II B 族、III A 族及 IV A 族元素之间形成这类化合物，如  $Cu-Zn$ 、 $Cu-Sn$ 、 $Cu-Al$ 、 $Cu-Si$  等。化合物中的总价电子数与化合物中的总原子数之比，称为电子浓度，用符号  $C$  表示。

$$C = \frac{UE_U + VE_V}{U + V}$$

式中： $U$  为 A 组元的原子数；

$E_U$  为 A 组元的价电子数；

$V$  为 B 组元的原子数；

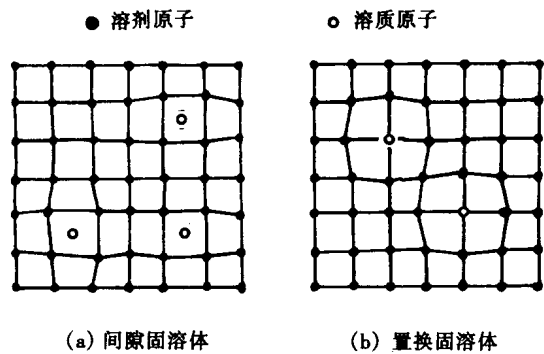


图 1-16 固溶体型式

$E_v$  为  $B$  组元的价电子数。

当合金中电子浓度为  $21/14$ 、 $21/13$ 、 $21/12$  时，能够形成各种电子化合物。表 1-1 为非铁合金中常见的电子化合物。电子化合物主要以金属键结合，有明显的金属特性。这类化合物的成分还可以在一定范围内变化，形成以电子化合物为基的固溶体。

表 1-1 非铁合金中常见的电子化合物

合金系	电子浓度		
	$\frac{3}{2} \left( \frac{21}{14} \right) \beta$ 相	$\frac{21}{13} \gamma$ 相	$\frac{7}{4} \left( \frac{21}{12} \right) \epsilon$ 相
	晶体结构		
	体心立方晶格	复杂立方晶格	密排六方晶格
Cu-Zn	CuZn	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	CuZn <sub>3</sub>
Cu-Sn	Cu <sub>5</sub> Sn	Cu <sub>31</sub> Sn <sub>6</sub>	Cu <sub>3</sub> Sn
Cu-Al	Cu <sub>3</sub> Al	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>	Cu <sub>3</sub> Al <sub>3</sub>
Cu-Si	Cu <sub>5</sub> Si	Cu <sub>31</sub> Si <sub>8</sub>	Cu <sub>3</sub> Si

3) 间隙化合物 间隙化合物是过渡族金属元素与原子直径很小的非金属元素（如碳、氮、硼等）形成的化合物。这类化合物的结合键为金属键。按其晶体结构的不同，又可分为简单晶格的间隙化合物和复杂晶格的间隙化合物。

简单晶格的间隙化合物又称间隙相，如图 1-17 (a) 所示。其晶格型式一般为体心立方或面心立方。两元素存在简单的比例关系，如 VC、W<sub>2</sub>C。有时能再溶入一些其它原子，形成以间隙相为基的固溶体。

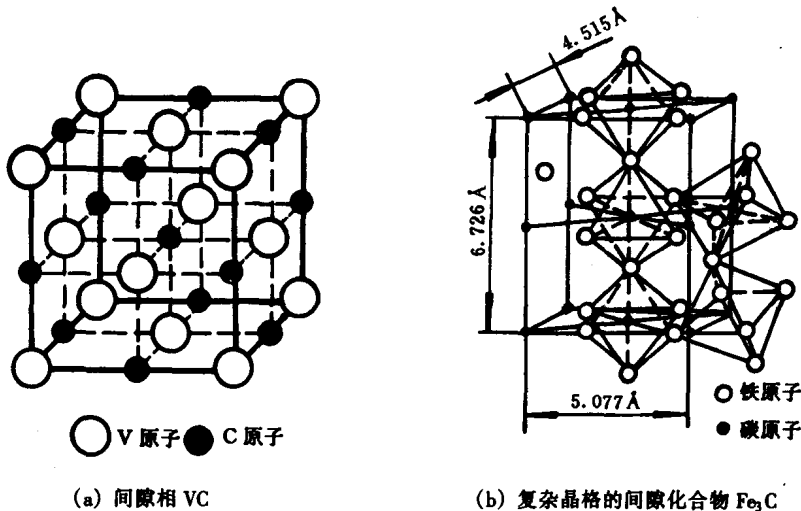


图 1-17 间隙化合物

复杂晶格的间隙化合物是指晶格型式为除体心立方和面心立方等简单型式之外的其它型式的间隙化合物。在钢铁材料中，最有代表性的复杂晶格间隙化合物是铁与碳形成的 Fe<sub>3</sub>C，呈复杂斜方晶格，如图 1-17 (b) 所示。Fe<sub>3</sub>C 在金属学中又称渗碳体，图示为渗碳体的晶胞。碳原子呈正方晶格，即  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ， $a \neq b \neq c$ 。每个碳原子都被由 6 个铁原子组成的八面体



包围，每个铁原子属两个八面体共有，故铁与碳实际原子数之比为 3:1。这类化合物中，铁原子有时会被少量的其它金属原子（如锰、铬、钼、钨等）所取代，形成合金渗碳体。

间隙化合物与间隙固溶体本质是不同的。间隙固溶体的晶格同溶剂，性能基本同溶剂；间隙化合物的晶格则不同于任一组成元素，性能也与组成元素明显不同。如 VC 为面心立方晶格，而钒为体心立方晶格，碳（石墨型）为简单六方晶格。

金属化合物的共同特点是，熔点高、硬度高、塑性低、脆性大。当合金中存在适当比例的金属化合物时，能显著提高合金的强度和硬度。故金属化合物成为各种金属材料的强化相。正常价化合物与电子化合物通常为各种非铁合金的强化相；间隙化合物则为各种碳素钢和合金钢的强化相。

### 3. 机械混合物

机械混合物是合金中一种特殊的结构，由固溶体与化合物或固溶体与固溶体两相组成。其特点是两相具有固定的比例，固定的合金成分，且同时形成。可在合金结晶时同时结晶，或合金在固态转变时同时析出，成为合金结构中的一种独立的形态（参看图 1-24），是一种组织组成物。机械混合物的许多性能介于两组成相之间。

## 三、合金状态图

合金状态图是表示合金系中不同成分合金在不同温度与不同压力时所呈现的状态的图形，是研究分析各种合金结构的重要工具。由于对合金的加工和使用一般都是在常压状态，因而合金状态图实际上只表示合金成分、温度与组织三者之间的关系。对于二元合金，二维坐标系即可表达这种关系。常以横坐标表示合金成分，纵坐标表示温度，坐标系内各表象点则表示某一成分的合金在某一温度时的组织状态。可以用相组成物表示，也可以用组织组成物表示。用相组成物表示的状态图又称合金相图。

合金状态图都是用实验的方法绘制的。首先配制各种成分的合金，然后将这些合金分别加热至液态，再使其缓慢冷却，测定其结晶过程和固态下发生相变的温度。将这些温度值标定在坐标系中相应的位置。再将各种成分线上相同意义的坐标点连接起来，就获得合金状态图。每一种合金系有一幅状态图。有些合金系状态图的图形相似，因此可将各种合金状态图分成几种类型，同类状态图的分析方法相同。

下面简要分析几种最基本的二元合金状态图。

### 1. 匀晶状态图

匀晶状态图的图形如图 1-18 所示。这类合金液态时两组元无限互溶，结晶在一定温度范围内完成，结晶后形成无限固溶体。固态冷却时不发生相变。Cu-Ni、Cu-Au、Fe-Cr 等合金系的状态图属此类状态图。

(1) 状态图分析 图中 A、B 为合金两组元， $a$ 、 $b$  分别为 A、B 组元的熔点， $a1b$  线以上，各种成分合金都呈液态， $a1b$  线是各种成分合金开始结晶的温度。 $a4'b$  线是各种成分合金结晶完毕的温度。两条曲线将坐标系划分为 3 个区。 $a1b$  线以上为液相区，代号 L， $a1b$  称为液相线。 $a4'b$  线以下为固相区，以相组成物或组织组成物的代号表示。图中  $\alpha$  为合金的固溶体相。 $a4'b$  称为固相线。液相线与固相线之间为液相与固相共存区。

(2) 合金冷却过程分析 通过对任一成分合金冷却过程的分析，可以了解合金自液态冷