

绪 论

一、材料与人类文明

1. 材料与人类文明密不可分

举例：衣、食、住、行、学习、娱乐等说明材料无处不在，引出材料的概念

2. 从人类社会的发展看材料的发展

旧石器时代——新石器时代——青铜器时代——铁器时代——现代（钢时代，硅时代，新材料时代）

从一定意义上说，人类发展的历史可以概括为一部材料发展史

3. 现代高技术与材料

举例：长征三号运载火箭、太阳能电池帆板、石油钻井平台、磁悬浮列车、笔记本电脑……

4. 现代生活与材料

举例：牙齿

5. 文化与材料

陶冶、百炼成钢、锻炼、瓷器……

二、材料科学的发展及研究内容

1. 材料学的发展

2. 材料科学研究的内容

材料科学——研究材料的成分、组织结构、制备加工工艺与性能之间关系的科学。

材料工程——应用已知基础理论，解决加工制造工艺中的实际问题。

材料学 = 材料科学 + 材料工程

材料科学与工程就是关于材料成分、结构、工艺和性能与用途之间有关知识和应用的科学，这四个方面构成了材料学的基础，称为材料科学与工程四个基本要素，简称四要素。

三、材料科学的重要地位

材料科学的发源、建立与发展同人类活动及经济生活的需要密切相关，是人类赖以生存的物质基础。

举例：飞机的发展：木头——铝合金——钛合金——复合材料

自行车发展：锰钢车——铝合金车——复合材料做支架

日常生活用品：彩电、冰箱、洗衣机、空调、洗浴器皿、上下水道

国民经济各部门从事物质生产：以材料为工具和加工的原料

许多重大技术革命的发生，在很大程度上依赖于新材料的诞生。

举例：半导体材料——大规模集成电路——计算机

光导纤维材料——信息时代

高强度复合材料——使人类冲出了地球在太空遨游……

材料工程、能源工程、信息工程已成为现代文明的三大基础支柱。

材料科技水平，新型材料的发展，与一个国家的经济活力、军事实力和科技能力都有着十分密切的关系。

举例：日本、美国、我国 对材料发展的重视程度

四、工程材料的分类及性能特点

按组成分：金属、陶瓷、高分子、复合材料

按使用性能分：结构材料、功能材料

1. 金属材料：（高强度、高韧性，良好的导电性）

钢铁材料：碳钢、合金钢、铸铁

有色金属：铝合金、铜合金、钛合金、镍合金等

优良性能：（1）优良的（加工）工艺性能

（2）良好的使用性能（物理性能、化学性能、力学性能）

2. 陶瓷材料：（硬度高，但脆性大，大多数是电绝缘材料）

无机非金属材料的通称，包括水泥、玻璃、耐火材料和陶瓷等

特点：重量轻，压缩强度、熔点、硬度、化学稳定性高，耐蚀性好，电与热的绝缘材料。

3. 高分子材料：

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（合成纤维、塑料、橡胶等）

特点：重量轻，强度、塑性及弹性模量较低，且多数不导电。

4. 复合材料

可分为：金属基、塑料基和陶瓷基复合材料

第一章 材料结构的基本知识

材料的结构分四个层次：原子结构、原子结合键、材料中原子的排列、晶体材料的显微组织。

§ 1.1 原子结构(atomic structure)

◆ 物质的组成：物质是由无数微粒（分子、原子、离子）按一定方式聚集而成的集合体。

◆ 原子结构：原子是由原子核(由带正电荷的质子和呈电中性的中子组成)和核外电子(带负电荷)构成。

一、原子的电子排列

原子是由原子核及其核外电子构成的，电子绕着原子核在一定的轨道上旋转。

电子运动的轨道由四个量子数(quantum number)决定的：主量子数 n （电子层）、轨道量子数 l （电子亚壳层）、磁量子数 m （轨道数）、自旋角动量量子数 m_s （自旋方向）。

核外电子的分布与四个量子数有关，且服从两个基本原理：

(1)Pauli不相容原理(Pauli principle)：一个原子中不可能存在四个量子数完全相同的两个电子。

(2)能量最低原理：电子总是优先占据能量低的轨道，使系统处于最低能量状态。

二、元素周期表及性能的周期性变化

§1.2 原子间的结合键(binding bond)

按结合力大小分为一次键和二次键两类。

一次键（化学键或主价键）：金属键、离子键、共价键

二次键（物理键或次价键）：范德华键、氢键

一、一次键（化学键、主价键）

1. 金属键(metallic bond)

特点：电子共有化, 没有方向性和饱和性。

特性：(1)良好的导电、导热性；

(2)正的电阻温度系数；

(3)不透明，具有金属光泽；

(4)具有较高的强度和良好的塑性；

(5)金属之间的溶解性(固溶能力)。

2. 离子键(ionic bond)

特点：结合力较强；硬度、熔点高；绝缘；有饱和性而没有方向性。

3. 共价键(covalent bond)

特点：(1)结合极为牢固

(2)有明显的方向性、饱和性

(3)结构稳定

(4)熔点高

(5)硬而脆

二、二次键（物理键、次价键）

靠原子之间的偶极吸引力结合而成

1. 范德华键

特点：(1)没有方向性、饱和性

(2)键力低于一次键。

2. 氢键

特点：(1)表达式： $X-H\cdots Y$

(2)有饱和性、方向性

(3)对高分子材料重要

三、混合键

四、结合键的本质及原子间距

结合键的本质：原子之间存在的静电作用力。

原子间距：当原子之间的静电作用力达到平衡时原子之间的距离。

五、结合键与性能

1. 物理性能

①熔点

②导热、导电性

③密度：与结合键类型有关

2. 力学性能

①弹性模量 E

②强度

③塑性

表1 三大类材料的结合键类型及性能特点

§ 1.3 原子的排列方式

一、晶体与非晶体

- 区别：(1) 原子（分子）规则排列

- (2) 固定熔点

- (3) 各向异性

- 凝固与结晶

表2 晶体与非晶体的区别

§ 1.4 晶体材料的组织

- 组织（显微组织、金相组织）：显微镜下观察到的各种晶粒的组合特征，即相对量，尺寸大小，形状及分布等。是影响材料性能极为敏感而重要的结构因素。

- 相：成分相同、结构相同、与其它部分明显有界面分开的均匀组成部分。

- 相关概念

- (1) 晶核、晶粒、晶界
- (2) 单晶体与多晶体
- (3) 单相组织与多相组织
- (4) 单相合金与多相合金

材料是有结构的，结构是分层次的，材料的结构决定材料的性能；材料的结构是可以改变的，成分、工艺等条件可以通过改变材料的结构而改变其性能，从而展现出工程材料的各种特征来。

§ 1.5 材料的稳态与亚稳态结构

稳态——能量最低

亚稳态结构——能量相对较高

1. 热力学条件（能量降低的方向，转变过程的推动力）
2. 动力学条件（反应速度，转变过程的阻力）

• 本章重点和难点

用金属键的特征解释金属材料的性能——①正的电阻温度系数；②良好的延展性；③良好的导电、导热性；④具有金属光泽；⑤金属之间的溶解性。

§ 2 材料的结构

Unit 1 § 2.1 晶体学基础

概述

根据结合键类型不同，晶体可分为金属晶体、离子晶体、共价晶体和分子晶体。

晶体结构：晶体中原子（离子或分子）在三维空间的具体排列方式。

• 空间点阵与晶胞

1. 相关概念

- 空间点阵(lattice)
- 晶格(space lattice)
- 阵点（结点）
- 晶胞（cell）

选取晶胞应遵循一定的原则

晶胞大小和形状表示方法

二、晶系和布拉菲点阵

根据晶体的对称性和每个阵点周围具有相同的环境，布拉菲运用数学方法推算，将花样繁

多的晶体结构归纳为14种空间点阵（称为布拉菲点阵）。根据晶格常数 a 、 b 、 c 及 α 、 β 、 γ 是否相等，又将14中空间点阵归属于七大晶系。

晶体结构和空间点阵之间的区别

- 空间点阵 (space lattice)：晶体中质点排列的几何学抽象，用以描述和分析晶体结构的周期性和对称性。由于各阵点的周围环境相同，只有14种类型。
- 晶体结构 (crystal structure)：晶体中原子（离子或分子）在三维空间的具体排列方式。由于组成晶体的物质质点及其排列方式不同，晶体结构是无限的，但总能按其原子（分子或离子）排列的同期性和对称性，归属于14种空间点阵中的一种。

七大晶系：

1. 三斜晶系 (triclinic system)： $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
2. 单斜晶系 (monoclinic system)： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
3. 正交(斜方)晶系 (orthogonal system)： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4. 四(正)方晶系 (tetragonal system)： $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
5. 立方晶系 (cubic system)： $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6. 六方晶系 (hexagonal system)： $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$
7. 菱形晶系 (rhombohedral system)： $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

十四种空间点阵：

- 1 简单立方点阵： $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 2 体心立方点阵： $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 3 面心立方点阵： $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 4 简单四方点阵： $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 5 体心四方点阵： $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 6 简单菱方点阵： $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
- 7 简单六方点阵： $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$
- 8 简单正交点阵： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 9 底心正交点阵： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 10 体心正交点阵： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 11 面心正交点阵： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 12 简单单斜点阵： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$
- 13 底心单斜点阵： $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$
- 14 简单三斜点阵： $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

金属晶体的结构主要为：FCC、BCC、HCP

三、晶向指数和晶面指数

1. 立方晶系中的晶向指数

晶向指数的确定方法

晶向指数规律

2. 立方晶系中的晶面指数

晶面指数的确定方法

晶面指数规律

3. 六方晶系的晶向和晶面指数

4. 晶带

晶带 (zone) —— 相交或平行于某一直线的所有晶面的组合

晶带轴：此直线为晶带轴。

共带面：同一晶带中的晶面。

晶带定理 (zone law)：同一晶带上晶带轴 $[uvw]$ 和晶带面 (hkl) 之间存在以下关系：

$$hu + kv + lw = 0$$

5. 晶面间距

1. 需掌握的概念和术语：

(1) 晶体结构、空间点阵、晶格、晶胞、晶系（七个），布拉菲点阵（14种）

(2) 晶面指数、晶向指数、晶面间距

(3) 求晶面间距 $d(hkl)$ 、掌握晶带定理

2. 几个常用的公式

(1) 指数相同的晶向和晶面必然垂直。如 $[111] \perp (111)$

(2) 当一晶向 $[uvw]$ 位于或平行某一晶面 (hkl) 时，则

必然满足： $h \cdot u + k \cdot v + l \cdot w = 0$

(3) 晶面间距： $d(hkl)$ 的求法

Unit 2 § 2.2 金属的晶体结构

金属晶体以金属键结合，其晶体结构比较简单，常见的有：

面心立方结构 A1 或 fcc (face-centered cubic) 立方晶系

体心立方结构 A2 或 bcc (body-centered cubic) 立方晶系

密排六方结构 A3 或 hcp (hexagonal Close-packed) 六方晶系

• 三种典型金属的晶体结构

描述晶胞从以下几个方面：

- 晶胞中原子的排列方式（原子所处的位置）
- 点阵参数（晶格常数和晶轴间夹角）
- 晶胞中原子数
- 原子半径 R (原子的半径) (和点阵常数关系)
- 配位数 (coordinative number) 和致密度
- 密排方向和密排面
- 晶体结构中的间隙（大小和数量）
- 原子的堆垛方式
- 面心立方结构
 - 晶胞中原子排列：
 - 点阵参数： $a=b=c$ ； $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
 - 晶胞中原子数： $n=8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$ 个
 - 原子半径： $R = a\sqrt{2}/4$
 - 配位数与致密度：配位数 $CN=12$ ；致密度 $k=0.74$
 - 间隙有两种：四面体间隙（8个）和八面体间隙（4个）
 八面体间隙： $r_B=0.414R$ ，
 四面体间隙： $r_B=0.225R$
 - 堆垛方式：ABCABC…或ACBACB…的顺序堆垛
 - 具有面心结构金属： γ -Fe、Al、Cu、Ni、Au、Ag等。

2. 体心立方结构

- 原子排列：
- 点阵参数： $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
- 晶胞中原子数： $n=8 \times 1/8 + 1 = 2$ 个
- 原子半径： $R = a\sqrt{3}/4$
- 配位数和致密度：配位数 $CN=8$ ；致密度 $k=0.68$
- 间隙有两种：八面体间隙（6个）和四面体间隙（12个）
 八面体间隙： $r_B=0.154R$ (在 $\langle 100 \rangle$) 或 $r_B=0.633R$ (在 $\langle 110 \rangle$)
 四面体间隙： $r_B=0.291R$
- 堆垛方式：ABABAB…的顺序堆垛
- bcc结构金属： α -Fe、 δ -Fe、Cr、Mo、W、V等

3. 密排六方结构

- 原子排列:
- 点阵参数: $a_1=a_2=a_3 \neq c$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$
- 晶胞中原子数: $n=12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3=6$ 个
- 原子半径: $R=a/2$
- 配位数和致密度: 配位数CN=12; 致密度K=0.74
- 间隙: 较为复杂

八面体间隙 (6 个): $r_B=0.414R$

四面体间隙 (12 个): $r_B=0.225R$

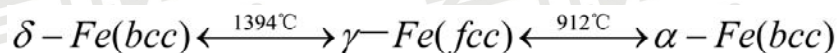
- 堆垛方式: ABABAB...顺序堆垛
- hcp结构金属有:Mg、Zn、Be、Cd等

二、多晶型性

多晶型性: 某些金属在不同温度和压力下具有不同的晶体结构。

多晶型性转变: 金属在外部条件 (如 T 和 P) 改变时, 其内部从一种晶体结构向另一种晶体结构的转变, 又称同素异构转变。

例如纯铁:



三、晶体的各向异性

各向异性: 由于在不同方向上的原子排列的紧密程度不同使晶体在不同方向上的物理、化学和力学性能不同。而一般整个晶体不显示各向异性, 称为伪等向性。

Unit 3 § 2.3 合金相结构

概述

1. 合金(alloy):

组元: 组元可以是纯元素, 也可以是化合物, 如Fe、C、Fe₃C

根据组成合金的组元数目分二元合金、三元合金和多元合金。

2. 组织(structure):

宏观组织: 肉眼或是30倍放大镜观察所呈现的形貌。

微观组织 (显微组织): 显微镜观察所呈现的形貌。

3. 相(phase):

单相合金、多相合金

合金相分类: 固溶体和中间相(金属间化合物)

- 固溶体
- 中间相(金属化合物)

中间相可以用分子式来大致表示其组成。

合金相的性质主要由以下三个因素控制:

- (1) 电化学因素(电负性或化学亲和力因素)
- (2) 原子尺寸因素
- (3) 原子价因素(电子浓度因素)

一、固溶体(solid solution)

固溶体分类

(1) 按溶质原子在溶剂晶格中所占位置分为:

置换固溶体(substitutional solid solution)

间隙固溶体(interstitial solid solution)

(2) 按固溶度(溶质原子在溶剂原子中的溶解度)大小分为:

有限固溶体

无限固溶体(称连续固溶体)如: Cu-Ni、Au-Ag、Ti-Zr……

结构相同是无限互溶的前提条件。

(3) 按溶质原子在溶剂中的分布特点分类

无序固溶体

有序固溶体

(4) 按基体类型分类:

第一类固溶体(一次固溶体): 以纯金属为基形成的固溶体。

第二类固溶体(二次固溶体): 以化合物为基形成的固溶体。

1. 置换固溶体

一般在金属元素之间形成, 可有限互溶, 也可无限互溶。

影响溶解度因素为:

- (1) 晶体结构类型:
- (2) 原子尺寸因素:
- (3) 电化学因素(电负性因素):
- (4) 电子浓度(原子价)因素:

此外固溶度还与温度有关。

2. 间隙固溶体

间隙固溶体的溶质原子是一些原子半径小于0.1nm的非金属元素（如C、N、O、H、B）。

形成条件： $\Delta r > 41\%$ 或 $r_{\text{质}}/r_{\text{剂}} < 0.59$

间隙固溶体只能是有限固溶体，一般溶解度较小。

影响间隙固溶体溶解度的因素：

(1) 溶剂的晶格类型：fcc、bcc

(2) 溶质原子半径

3. 固溶体的微观不均匀性

固溶体中溶质原子的分布并不是完全无序的

有序固溶体结构称为超点阵

4. 固溶体的性质

固溶体的最大特点：保持溶剂的结构。固溶体中由于溶质原子的溶入会引起点阵常数、性能的变化，表现在：

(1) 点阵常数改变

置换固溶体： $r_{\text{质}} > r_{\text{剂}}$ ， a 增大； $r_{\text{质}} < r_{\text{剂}}$ ， a 减小。

间隙固溶体： a 始终随溶质原子溶入而增大。

(2) 产生固溶强化：溶质原子溶入溶剂中，使其硬度和强度升高，塑性、韧性下降的现象。

(3) 物理、化学性能改变。如电阻、导磁率、矫顽力升高。

二、中间相

• 中间相是一种新相，可以是化合物，也可以是以化合物为基的固溶体（二次固溶体），一般可以用化学分子式来表示，但不一定符合化合价规律。

• 中间相中原子的结合方式为金属键与其它结合键相混合的方式。它们都具有金属特性。

• 中间相如：钢中Fe₃C、铝铜合金中CuAl₂、半导体中GaAs、形状记忆合金中NiTi和CuZn、核反应堆材料中Zr₃Al等。

• 中间相分类：

正常价化合物、电子化合物、原子尺寸有关的化合物（间隙相、间隙化合物、TCP相）、超结构。

1. 正常价化合物（主要受电负性控制）

特点：符合化合物规律，具有严格的化合比、成分固定不变，成分可用化学式表示，一般为AB型、AB₂型或A₂B型、A₃B₂型。

正常价化合物在常温时有很高的硬度和脆性。在工业合金中，能起到提高材料强度和硬度的

作用,称为强化相。如Al—Mg—Si合金中Mg₂Si;但有时也是有害相,如钢中FeS会引起钢的脆性。

2. 电子化合物(主要受电子浓度控制)

特点:是不遵循原子价规律,电子浓度是决定其晶体结构的主要因素。电子浓度相同,相的晶体结构类型相同。

$$\text{电子浓度} = (\text{化合物元素价电子总数} / \text{化合物原子数})$$

电子化合物具有金属特性,具有高熔点、高硬度但塑性低,与固溶体适当搭配使合金得到强化,作为非Fe合金中重要组成相。

3. 原子尺寸因素有关的化合物

(1) 间隙相和间隙化合物:由过渡族金属与原子半径很小的非金属元素(C、H、N、B等)组成的。

当 $\Delta r \geq 41\%$ 或 $r_x/r_m \leq 0.59$ 时,形成结构简单的间隙相。

当 $30\% \leq \Delta r \leq 41\%$ 或 $r_x/r_m > 0.59$ 时,形成结构复杂的间隙化合物。

a、间隙相: 间隙相的晶格类型比较简单,如面心立方、密排六方,少数为体心立方或简单六方结构,且与各组元的结构不同。在间隙相晶格中金属原子占据正常位置,非金属原子占据间隙位置,

即由金属原子构成骨架,非金属原子在间隙中规则分布。

化学式: M_4X M_2X MX MX_2 。

间隙相具有金属特性如有金属光泽、良好的导电性、极高的硬度和熔点,是合金工具钢、硬质合金和高温金属陶瓷材料的重要组成相。

b、间隙化合物: 晶体结构比较复杂。

表达式有如下类型: M_3C 、 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 、 M_6C 。

常见的间隙化合物有: M_3C 型(如Fe₃C, Mn₃C), M_7C_3 型(如Cr₇C₃), $M_{23}C_6$ 型(如Cr₂₃C₆), M_6C 型(如Fe₃W₃C, Fe₄W₂C)等。

间隙化合物中金属元素M常被其它金属元素所代替形成化合物为基的固溶体(二次固溶体)。

例如: (Fe, Mn)₃C、(Cr, Fe)₇C₃, (Fe, Ni)₃(W, Mo)₃C等。

间隙化合物的熔点、硬度较高,也是强化相。

(2) TCP相(topologically close-packed phase)

特点: ①由配位数为12、14、15、16的配位多面体堆垛而成;

②呈层状结构。

TCP相类型: ①Laves相 AB₂型 镁合金、不锈钢中出现

②σ相 AB型或A_xB_x型 有害相

4. 超结构(有序固溶体)

超结构 (super structure/lattice) 类型

有序化条件: 异类原子之间的相互吸引大于同类原子间。

5. 金属间化合物的用途

工业上绝大多数合金都是以固溶体为基体, 以金属间化合物为强化相。

作业题:

1. 简述固溶体的分类、结构特点和性能特点。
2. 简述间隙固溶体、间隙相、间隙化合物两两之间的异同点。

Unit 4 § 2.4 - §2.7

离子晶体、共价晶体、硅酸盐晶体、非晶态固体的结构

1. 离子晶体的结构、主要特点及典型离子晶体的结构
2. 共价晶体的结构、主要特点及典型共价晶体的结构

§ 2.4 离子晶体的结构

一、离子晶体的主要特点

离子晶体(ionic crystal): 由正、负离子通过离子键按一定方式堆积起来而形成的。陶瓷大多数属于离子晶体。

特点: ◆ 离子键结合, 硬度高、强度大、熔点高、热膨胀系数较小, 但脆性大;

◆ 良好的绝缘体;

◆ 无色透明的。典型的离子晶体是无色透明的。

如: 透明的 Al_2O_3 可作电炉的高温观测窗。

二、离子半径、配位数、负离子配位多面体、离子堆积

1. 离子半径(ionic radius): 从原子核中心到其最外层电子的平衡距离, 是决定离子晶体结构类型的一个重要的几何参数。

离子半径大小并非绝对, 同一离子随着价态和配位数的变化而变化。

2. 配位数CN(coordination number): 与某一离子邻接的异号离子的数目。

正离子的配位数取决于正负离子的半径比 R^+/R^- , 根据不同的 R^+/R^- , 正离子选取不同的配位数。常见的是4、6、8。

3. 负离子配位多面体: 离子晶体中与某一正离子成配位关系而邻接的各个负离子中心线所构成的多面体。

4. 离子的堆积: 离子晶体通常由负离子堆积成骨架, 正离子按其自身大小位于相应负离子空

隙（负离子配位多面体）中。

堆积方式有：

立方最密堆积、六方最密堆积、立方体心堆积、四面体堆积

三、离子晶体的结构规则——鲍林规则

1. 负离子配位多面体规则——鲍林第一规则

根据这一规则，描述和理解离子晶体结构时，将其视为由负离子配位多面体按一定方式连接而成，正离子处于配位多面体的中央。

2. 电价规则——鲍林第二规则

正负离子电价平衡

3. 负离子多面体共用顶、棱、面的规则——鲍林第三规则

共用点、棱、面，会降低结构稳定性

4. 不同种类正离子多面体间连接规则

电价高、配位数低的正离子配位多面体之间有尽量互不结合的趋势。

5. 节约规则

同种正离子和同种负离子的结合方式应最大限度地趋于一致。

四、典型离子晶体的结构

1. AB型：(1) CsCl型

(2) NaCl型

(3) 立方ZnS(闪铝矿)型

(4) 六方ZnS(纤锌矿)型

2. AB₂型：(1) CaF₂(萤石型)

(2) TiO₂(金红石)型

(3) β -SiO₂(方晶石、方石英)型

3. A₂B₃型： α -Al₂O₃

4. ABO₃型：(1) CaTiO₃(钙钛矿、灰钛矿)型

(2) CaCO₃(方解石)型、三方晶系

5. AB₂O₄型：尖晶石(MgAl₂O₄)

6. 其他：ABO₄型、简单结构派生型

§ 2.5 硅酸盐的晶体结构

简单地说，硅酸盐矿物是氧化硅中的硅被其它元素取代后的变体，具有不同的晶型结构。

硅酸盐基本结构单元是[SiO₄]⁴⁻四面体，根据其排列情况，硅酸盐结构类型有岛状、组群状、链状（单链及双链）、层状及架状结构。

一、硅酸盐晶体的结构特点:

- (1) 基本结构单元是 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体;
- (2) 每个 O^{2-} 最多只能连接2个 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体;
- (3) 结构中 Si^{4+} 间没有直接的键, 通过 O^{2-} 连接起来;
- (4) 硅氧四面体间只能共顶连接, 而不能共棱和共面连接;

硅酸盐的结构组成: 硅氧骨干—硅和氧按不同比例组成的负离子团、硅氧骨干以外的正离子和负离子。

二、硅酸盐的分类

按 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 的不同结合, 将硅酸盐分为:

- (1) 岛状硅酸盐: $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 以孤立状存在。
- (2) 组群状硅酸盐: 由 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 通过共用氧 (桥氧) 连接形成2、3、4或6个硅氧组群。
- (3) 链状硅酸盐: 由 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 通过公共氧的连接在一维方向伸长成单链或双链、链与链间为正离子连结。

(4) 层状硅酸盐: 由 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体通过公共氧连接成在二维平面内延伸的具有六角环的硅氧四面体层。当活性氧与其它负离子一起与金属正离子组成八面体层, 就与四面体构成双层结构。

(5) 架状硅酸盐: 由 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体所有4个顶点均与相邻硅氧四面体的顶点相连并向三维空间延伸形成架状结构。

§ 2.6 共价晶体的结构

共价晶体: 由同种非金属元素的原子或异种元素的原子以共价键结合成的无限大分子。

一、共价晶体特点:

- (1) 由于共价键的饱和性和方向性, 共价晶体中的原子配位数比离子晶体和金属晶体中的小。
- (2) 共价键的结合力比离子键强, 故具有更高的硬度、强度、脆性、熔点、沸点; 更低的挥发性, 结构也更稳定。
- (3) 导电能力差, 因共用电子不能自由运动。

二、典型共价晶体:

金刚石、 ZnS (AB型)、 SiO_2 (AB₂型) 三种。

金刚石结构: Si 、 Ge 、 $\alpha\text{-Sn}$

AB型: SiC

§ 2.7 非晶态固体结构

非晶态固体结构通常指玻璃体、树脂和橡胶等。

玻璃体包括：硅酸盐玻璃、硼酸盐玻璃、半导体玻璃、金属玻璃。

本节主要讨论玻璃的概念和通性，玻璃的结构和形成条件。

一、玻璃的概念和通性

概念：由硅酸盐矿物、氧化物等加热、熔融、冷却而形成的一种无定型的固体。

玻璃的通性：

- (1) 各向同性
- (2) 介稳性
- (3) 熔融态向玻璃态转化的过程是可逆的与渐变的
- (4) 无固定的熔点
- (5) 熔融态向玻璃态转化时物理、化学性质随温度变化的连续性

二、玻璃的结构

目前较普遍为人们接受的玻璃结构学说是无规则网络学说。

1. 无规则网络结构学说的内容

由德国学者扎哈里阿森在1933年提出。认为：凡是成为玻璃态的物质与相应的晶体结构一样，也是由一个三维空间网络所构成。这种网络是由离子多面体(四面体和三角形)构筑起来的。而玻璃体的结构中多面体重复没有规律性。

2. 无规则网络结构的特点

- (1) 在结构中，每个 O^{2-} 只能连接2个多面体；
- (2) 多面体之间只能共顶连接，而不能共棱和共面连接；
- (3) 多面体是属于高电价低配位的多面体；
- (4) 每一个多面体至少有3个顶点与相邻多面体连接；
- (5) 结构中存在活性氧(非桥氧)和非活性氧(桥氧)。

3. 无规则网络结构的基本构成

- (1) 网络形成体 结构中以多面体的形式存在，是无规则网络结构的骨架。
- (2) 网络变性体 用于饱和 O^{2-} 过剩的负电荷，处在网络间隙位置，会改变玻璃的性质。
- (3) 网络中间体 既是网络网络形成体，又是网络变性体。

玻璃的结构具有近程有序和远程无序的结构特点。因此玻璃是具有近程有序区域的无定形体物质。

本章小结

1. 晶体结构与空间点阵、晶格、晶胞、点阵常数，晶系(七个)、布拉菲点阵(14种)，七种晶系各自特点。

2. 晶面指数、晶向指数，能标注三种晶胞的晶向和晶面指数。晶面族，晶向族，晶带轴，晶面与晶向平行或垂直，晶向和晶面指数的一些规律。求晶面间距 $d(hkl)$ 。掌握晶带定理。

3. 能绘出三维的体心、面心立方和密排六方晶胞，根据原子半径计算出金属的体心和面心立方晶胞的晶胞常数。掌握三种典型晶体结构的特征(包括：晶胞形状、晶格常数、晶胞原子数、原子半径、配位数、致密度、各类间隙尺寸与个数，最密排面(滑移面)和最密排方向的指数与个数，滑移系数目等)。

4. 合金、合金系，相、组元、组织(显微、宏观)，合金相结构分类；影响相结构因素；

5. 固溶体的分类、特点和性质，影响固溶体固溶度的因素(固溶体，置换固溶体，间隙固溶体，有限固溶体，无限固溶体，有序固溶体，无序固溶体，端部固溶体，中间固溶体)。

6. 中间相的类型和特点。

7. 晶粒、晶界、各向同性与各向异性、同素异构转变(重结晶)和多晶型性转变、单晶与多晶的区别。

8. 离子化合物(硅酸盐晶体)的结构类型和特点，硅酸盐结构的一般特点

9. 共价晶体的特点

10. 需掌握的概念和术语

(1) 晶体、非晶体、空间点阵、晶格、晶胞、晶系(七个)，布拉菲点阵(14种)、晶面指数、晶向指数、晶面间距

(2) 各向同性与各向异性、实际晶体的伪各向异性、同素异构转变(重结晶)、多晶型性转变、多晶体与单晶体、晶粒、晶界。

(3) 合金、相、组元、组织(显微、宏观)、固溶体、中间相、间隙(置换)固溶体、有(无)序固溶体、有(无)限固溶体、间隙相、间隙化合物、电子浓度、电子化合物、正常价化合物、超结构

(4) 离子晶体、硅氧骨干、共价晶体

§ 3 高分子材料的结构

概述（几个基本概念）

①单体：是化合物独立存在的基本单元，单个分子存在的稳定状态。如：聚乙烯单体： $\text{CH}_2=\text{CH}_2$

②链节：组成大分子链的基本结构单元，链节重复连接构成大分子化合物。代表了高分子化合物的结构和成分。

如：聚乙烯链节： $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$

③聚合度：大分子链中链节的重复次数。反映了大分子链的长短和相对分子质量大小。

如： $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$

④共聚：由两种或两种以上的单体参加聚合而形成聚合物的反应。是高分子材料中一个主要的“合金化”方式。

如：ABS塑料由丙烯腈(A)、丁二烯(B)、苯乙烯(C)三者共聚形成的三元“合金”

高分子材料的结构包括：高分子的链结构和高分子的聚集态结构

一、高分子的链结构

1. 近程结构

◆化学组成(碳链、杂链、元素有机、无机高分子)

◆链接方式(均聚物：头-头、尾-尾、头-尾；

共聚物：无规、交替、嵌段、接枝)

◆几何形状(线型、支化、交链)

◆空间构型(全同立构、间同立构、无规立构)

2. 远程结构

◆高分子链的大小和形态

高分子的大小：高分子化合物是由大量大分子链组成的，各个大分子链的链节数不相同，长短不一样，相对分子质量不相等，这种现象即相对分子质量的多分散性，决定了物理和化学性能的大分散度。

◆高分子链的柔顺性

高分子链的柔顺性(内旋转构象) ([flash rotate](#))

单键的内旋转：每一个单键围绕其相邻单键按一定角度进行的旋转运动。

高分子链的构象：由于单键内旋转引起的原子在空间占据不同位置所构成的分子链的各种形象(态)。

高分子链的柔顺性：由于每个单键都可以内旋转，且频率很高，使分子键出现许多不同的空间构象(形态)。由于构象变化获得不同卷曲程度的特性。

影响高分子链柔性的因素：主链、侧基、链的长短

二、高分子的聚集态结构

高分子聚集态结构是在分子间力作用下大分子相互致聚在一起形成的组织结构。指高分子链之间的排列和堆砌。在加工成型过程中形成的。包括非晶态结构、晶态结构、取向态结构、液晶态结构、织态结构。

聚集态结构分为晶态结构和非晶态结构

1. 聚合物的晶态结构

只有少数简单、对称性高的分子结构可以得到晶体。并非100%晶态，包含一定量的非晶相。晶相（分子链整齐平行排列的区域）与非晶相（分子链弯弯曲曲运动自由的区域）同时共存。

- 聚合物的晶体形态有多种多样，可分为：

- (1) 片晶
- (2) 球晶
- (3) 串晶
- (4) 树枝状晶

- 聚合物晶态结构模型

- (1) 缨状胶束模型：两相模型 认为结晶高分子中晶区和非晶区互相穿插,同时存在。
- (2) 折叠链模型：认为聚合物晶体中大分子链是以折叠形式堆砌起来的。
- (3) 伸直链模型：认为结晶大分子链垂直排列在晶片上
- (4) 串晶的结构模型：认为串晶是伸直链和折叠链的组合结构。
- (5) 球晶模型：认为大量多层片晶以晶核为中心,以相同的速率辐射型长大。
- (6) 霍斯曼模型：折中模型（半晶态聚合物模型）

2. 聚合物的取向态结构

在某种外力作用下，高分子链沿着外力作用方向择优取向排列的结构。

3. 高分子的液晶态（liquid crystals）：

一些物质的结晶结构受热熔融或被溶剂溶解后，表观上虽然失去了固态物质的刚性，变成了具有流动性的液态物质，但结构上仍然保存有序排列，从而在物理性质上呈现出各向异性，形成一种兼有晶体和液体性质的过度状态，称为液晶态。又称中间相或介晶。

介绍几个相关概念

- (1) 晶态（crystalline state）：各向异性，原子规排，固定熔点，长程有序
- (2) 非晶态（noncrystalline state）：各向同性，无固定熔点，没规则外形，长程无序，短程有序（玻璃）
- (3) 准晶态（quasicrystalline state）：具有一般晶体不能有的对称性（如五次对称轴）

(4) 液晶 (liquid crystals)：有机物加热时所经历的某一不透明的浑浊液态阶段 (中间相)，具有和晶体相似的性质，又称中间相或介晶。

§ 4 晶体缺陷

Unit 1 § 4.1– 4.2 点缺陷和位错的结构

概述

举例：[玉米棒上玉米粒](#)的分布。视频

- 晶体缺陷 (crystal defect; crystalline imperfection)：

通常把原子规则排列受到破坏的区域或原子排列偏离理想的点阵结构的区域称为晶体缺陷。

理想晶体结构：①原子排列完全规则、整齐；

②原子在结点上静止不动。

实际晶体结构：①原子排列不可能完全规则、不完整性；

②原子热运动。

★ 晶体缺陷产生的原因

外因：①与晶体的生成条件有关 如 液-固

②晶体中原子的热运动 T

③对晶体进行的加工过程 载荷、冷压、冷拉

内因：多晶体，存在大量晶界

实际晶体是原子的规则排列和不规则排列构成的统一体。

★ 研究晶体缺陷的意义

对材料的性能有重要影响

★ 晶体缺陷分类及特征：

[1]点缺陷 (*point defect*)：又称零维缺陷，包括空位、间隙原子、置换原子和杂质原子。

[2]线缺陷 (*line defect*)：又称一维缺陷，如各类位错。

[3]面缺陷 (*planar defect*)：又称二维缺陷，包括表面、晶界、亚晶界、相界、孪晶界

等。

★ 缺陷的运动

随条件改变而变动，可产生、发展、运动和交互作用，并且能合并和消失。

§ 4.1 点缺陷

一、点缺陷的形成及类型

离开平衡位置的原子有三个去处：

- (1) 形成肖脱基 (Schottky) 空位 (*vacancy*) —— 迁移到晶界、晶体表面或其它空位处
- (2) 形成弗兰克尔 (Frankely) 缺陷，同时产生间隙原子——挤入晶体的间隙位置
- (3) 跑到其它空位上

点缺陷的类型：

- (1) 空位
- (2) 间隙原子 (异类) (*interstitial atom*) :
- (3) 自间隙原子 (同类) (*self- interstitial atom*)
- (4) 外来杂质原子:
- (5) 置换原子 (*substitutional atom*) :

二、点缺陷的平衡浓度

- 空位形成能 (*vacancy formation energy*):

点缺陷的平衡浓度 (*equilibrium consistence*):

经热力学推导:

$$C_e = n/N = \exp[-(E_v - T\Delta S_f) / Kt]$$

$$= A \exp(-E_v / kT)$$

C_e 与 T 、 E_v 之间呈指数关系。

T 一定时, E_v 高, 则 C_e 低; E_v 一定时, T 上升, 则 C_e 升高。

间隙原子形成能较大, 同一 T 时, 间隙原子比空位平衡浓度小得多, 通常忽略不计。

点缺陷是热力学稳定存在的缺陷。

三、点缺陷的运动

点缺陷的运动方式:

- (1) 空位运动
- (2) 间隙原子迁移
- (3) 空位和间隙原子相遇, 两缺陷同时消失。
- (4) 逸出晶体到表面, 或移到晶界, 点缺陷消失。

四、点缺陷对结构和性能的影响

- 点缺陷引起晶格畸变 (*distortion of lattice*), 能量升高, 结构不稳定, 易发生转变。
- 点缺陷的存在会引起性能的变化

(1) 物理性质、如 R 增大、 V 膨胀、 ρ 下降等;

(2) 力学性能: 采用 高温急冷 (如淬火 *quenching*), 大量的冷变形 (*cold working*), 高能粒子辐照 (*radiation*) 等方法可获得过饱和点缺陷, 如使 σ_s 提高;

(3)影响固态相变, 化学热处理等。

§ 4.2 位 错 (*dislocation*)

- 位错理论的提出:

[位错理论](#)是上个世纪材料科学最杰出的成就之一。

- 位错理论假设:

①实际晶体结构并非理想完整的, 存在偏离正常排列的原子结构——某中缺陷, 并能在较小的应力下运动;

②实际晶体的滑移并非同步、刚性的, 滑移首先从缺陷处开始, 滑移的继续靠缺陷的逐步传递而实现; [毛毛虫的运动视频](#)

③这种特殊的原子排列组态称为位错。

一、位错的基本类型和特征

位错的类型: 刃型位错、螺型位错、混合位错

1. 刃型位错 (*edge dislocation*)

(1) 刃型位错图示

(2) 刃型位错特征:

① 刃型位错有一个额外的 (多余) 半原子面。

② 刃型位错可以是[直线](#)、[折线](#)或[曲线](#)。它与滑移方向、柏氏矢量垂直。

③ 滑移面是位错线和滑移矢量确定的平面。滑移面唯一。

④ 晶体中存在刃位错后, 位错周围的点阵发生弹性畸变。

⑤ 在位错线周围的畸变区每个原子具有较大的平均能量。畸变区是一个狭长的管道。

2. 螺型位错 (*screw dislocation*)

(1) 螺型位错的图示

(2) 螺型位错的特点:

①螺型位错无额外半原子面, 原子错排是呈轴对称的。

②根据位错线附近呈螺旋形排列的原子的旋转方向不同, 螺型位错可分为右旋和左旋螺型位错。

③螺型位错线与滑移矢量平行, 因此一定是直线, 而且位错线的移动方向与晶体滑移方向互相垂直。

④纯螺型位错的滑移面不是唯一的。

⑤螺型位错线周围的点阵也发生了弹性畸变。

⑥螺型位错周围的点阵畸变随离位错线距离的增加而急剧减少。故它也是包含几个原子宽度的线缺陷。

3. 混合位错 (*mixed dislocation*)

(1) 混合位错的图示

(2) 混合位错特征：位错线与滑移矢量有一定夹角。混合位错可分为刃型分量和螺型分量。

位错环 (*dislocation loop*) 是一种典型的混合位错。

二、柏氏矢量 (*Burgers vector*)

1. 柏氏矢量的确定

(1) 选定位错线正向，一般选定出纸面的方向为位错线的正向。

(2) 在实际晶体中作柏氏回路 (*Burgers circuit*)

(3) 在完整晶体中按(2)中相同方向和步数作回路。回路不封闭，由终点向起点作矢量，即为柏氏矢量。

2. 用柏氏矢量判断位错类型

(1) 刃型位错 $\xi e \perp be$

右手法则：食指指向位错线方向，中指指向柏氏矢量方向，拇指指向代表多余半原子面位向，向上为正，向下为负。

(2) 螺型位错 $\xi s \parallel bs$

正向（方向相同）为右螺旋位错，负向（方向相反）为左螺旋位错。

(3) 混合位错 柏氏矢量与位错线方向成夹角 ϕ

3. 柏氏矢量的特性

- 柏氏矢量的物理意义：是一个反映位错性质以及由位错引起的晶格畸变大小的物理量。
- 柏氏矢量特性：

(1) 用柏氏矢量可以表示位错区域晶格畸变总量的大小。 (2) 柏氏矢量具有守恒性。即一条位错线的柏氏矢量恒定不变。

(3) 柏氏矢量的唯一性。即一根位错线具有唯一的柏氏矢量。

(4) 柏氏矢量守恒定律。

4. 柏氏矢量表示法

立方晶系中 $b = (a/n) [uvw]$ ，其大小为位错强度，用 b 模表示，模的大小表示该晶向上原子间的距离。

六方晶系中： $b = (a/n) [uvtw]$

三、位错的组态和密度

位错的组态：位错环、位错网络、位错塞积

位错密度 (*dislocation density*)：单位体积内位错线的总长度。

通常用穿过单位面积晶面的位错数目表示。

表达式: $\rho = 1/v$ 或 $\rho = n/A$ 单位: $1/\text{cm}^2$

【教学小结】

一、基本概念

1. 点缺陷、Schottky空位、Frankel空位、间隙原子、置换原子
2. 线缺陷、刃型位错、螺型位错、混合型位错、柏氏矢量

二、重点及难点

1. 点缺陷的平衡浓度公式
2. 位错类型的判断及其特征、柏氏矢量的特性及意义

【阅读材料】

- 《材料科学基础》刘智恩主编 西北工业大学出版社
- 《材料科学基础》胡赓祥主编 上海交通大学出版社
- 《金属学原理》侯增寿主编 机械工业出版社

【复习思考题与作业题】

作业题: P134: 1; P135: 3, 4

Unit 2 § 4.3 - 4.5

位错的运动、位错的应力场、位错与晶体缺陷间的交互作用

§ 4.3 位错的运动

运动基本形式: 滑移和攀移

滑移 (*slip*): 位错在切应力作用下沿着滑移面所进行的运动。

攀移 (*climb*): 位错在垂直于滑移面的方向上所进行的运动。

除滑移和攀移外还有交割 (*cross/interaction*) 和扭折 (*kink*)

1. 位错的滑移 (*slipping of dislocation*)

任何类型的位错均可进行滑移。 [滑移动画](#)

(1) 刃位错的滑移过程 (教材图3-12) $\parallel b$ 、 $b \perp$ 、滑移方向 \perp 、滑移方向 $\parallel b$, 单一滑移面。

(2) 螺型位错的滑移过程 (教材图3-12) $\parallel b$ 、 $b \parallel$ 、滑移方向 \perp 、滑移方向 $\perp b$, 非单一滑移面。可发生交滑移、双交滑移。

(3) 混合位错的滑移过程 (教材图3-13) 沿位错线各点的法线方向在滑移面上扩展, 滑动方向垂直于位错线方向。但滑动方向与柏氏矢量有夹角。

列表总结各类位错的滑移特征

2. 位错的攀移(*climbing of dislocation*)

- 位错的攀移：在垂直于滑移面方向上运动。
- 攀移的实质：刃位错多余半原子面向上或向下运动。

刃位错的攀移过程：[正攀移](#)，向上运动；[负攀移](#)，向下运动

- 影响攀移的因素：

①温度：常温下难以攀移，高温下对位错的攀移影响重大。

②与外加应力有关：只有正应力有助于位错实现攀移。

[压（拉）促进正（负）攀移](#)

- 注意：只有刃型位错才能发生攀移。滑移不涉及原子扩散，而攀移必须借助空位或原子的扩散。

§ 4.4 位错的应力场

1. 位错的应力场(*stress field*)

广泛采用弹性连续介质(*elastic-continous media*) 模型；三个假说：晶体是完全弹性体、是各向同性的、是由连续介质组成的。

可以认为，位错是晶体中的一种内应力源。位错所引起的内应力从中心到四周逐渐减小，中心处的畸变最大，内应力也最大，这种内应力分布就构成了位错的应力场。

2. 位错的应变能(*dislocation strain energy*)

晶体中位错的存在引起点阵畸变，导致能量的增高，此增量称为位错的弹性应变能。

位错的能量包括两部分：

- 位错中心畸变能(*distortion energy of dislocation core*) (常被忽略)
- 位错周围的弹性应变能(*elastic strain energy*)

$$E = E_e + E_o$$

据估算，位错中心区的弹性应变能约占位错总能量的10%，常常忽略不计，而以中心区外的弹性应变能代表位错的能量。 $E = E_e$

单位长度位错的能量为： $W = \alpha G b^2$

α 为0.5~1 G —切变模量 $W \propto b^2$ b 越小，位错越稳定

此外，位错的能量与位错线的长度成正比，因此位错有尽量缩短的趋势。位错是热力学不稳定的晶体缺陷。

3. 位错的线张力

[位错的线张力\(*tension of dislocation line*\)](#)：

$$T = \alpha G b^2 \quad \alpha = 0.5$$

4. 作用于位错上的力

- 利用虚功原理，可求出 $Fd = \tau b$
- Fd 为作用在单位长度位错线上的力，其方向与位错垂直并指向滑移面未滑移部分。
- 注意：(1) Fd 是一个假想力
(2) Fd 被看成是引起位错运动的原因。 Fd 必然与位错线运动方向一致，永远垂直于位错线。
(3) 引起位错线运动的外切应力 τ 必须作用在滑移面上。在纯刃位错中 $\tau // Fd$ ，螺位错中 $\tau \perp Fd$
- 引起位错攀移的力 (climb force) : $dy = -\sigma b$

§ 4.5 位错与晶体缺陷间的交互作用

1. 位错间的交互作用

(1) 两平行螺位错间的交互作用 (interaction):

同号相斥，异号相吸

(2) 两平行刃位错间交互作用,

同号相斥，异号相吸

位错交互作用的结果使体系处于较低的能量状态。如位错墙

(3) 相互平行的刃位错和螺位错间不发生交互作用, 即交互作用力为0。

(4) 两个相互垂直的螺位错间的交互作用以及两个相互垂直的刃位错和螺位错间的交互作用比较复杂。

2. 位错与点缺陷的交互作用

(1) 热力学条件：作用后能量降低

(2) 动力学条件：溶质原子的扩散能力强

间隙原子小扩散容易，与刃位错交互作用十分强烈。

交互作用的结果使体系处于较低的能量状态。

如钢中固溶的C、N小原子常分布于刃位错周围，使位错周围的C、N浓度明显高于平均值。

通常把溶质原子（间隙原子）与位错交互作用，在位错周围偏聚形成的小原子集团称为柯垂尔气团或柯氏气团。气团的存在，对位错有钉扎作用，使位错难以运动，是固溶强化原因之一。

用柯氏气团解释屈服现象的物理本质

低碳钢的屈服现象通常认为溶质原子C、N与位错交互作用而形成柯氏气团，使位错的弹性应变能降低，位错趋向稳定不易运动，即对位错有着“钉扎作用”。位错要运动，必须在更大的应力作用下才能挣脱气团的钉扎而移动，这就形成了上屈服点；而位错一旦从气团中挣脱之后，运动就比较容易，因此有应力降落，出现下屈服点和水平平台。这就是屈服现象的物理本质。

【教学小结】

1. 基本概念和术语:

滑移、攀移、交滑移、位错的运动、位错应力场、应变能、线张力、作用在位错上的力、柯氏气团、古溶强化效应

2. 掌握位错与晶体缺陷间的作用，会用位错理论解释低碳钢的屈服现象。

3. 掌握位错的弹性应变能，与柏氏矢量的平方成正比。

4. 关于位错的应力场、位错的应变能、线张力等可作为一般了解

【阅读材料】

- 《材料科学基础》刘智恩主编 西北工业大学出版社
- 《材料科学基础》胡赓祥主编 上海交通大学出版社
- 《金属学原理》侯增寿主编 机械工业出版社

【复习思考题与作业题】

作业题: P135: 5, 6, 7, 8

Unit 3 § 4.6 - 4.8

位错的增殖、塞积与交割、实际晶体中的位错、界面

【教学目标与要求】

1. 掌握下列基本概念和术语:

位错生成、位错增殖、位错塞积、位错交割、单位位错、全位错、不全位错、堆垛层错、Schottky不全位错、Frankel不全位错、位错反应、扩展位错、Thompson四面体

2. 掌握几种典型金属晶体中单位位错的柏氏矢量及Schottky和Frankel不全位错的柏氏矢量及特点

3. 掌握位错的增殖机制和位错的交割

§ 4.6 位错的增殖、塞积与交割

1. 位错的生成

位错来源(位错源: *source/origin of dislocation*)主要有:

- (1) 晶体生长过程中产生。如杂质粒子、热应力作用产生塑性变形
- (2) 晶体中过饱和空位的聚集。
- (3) 应力集中，产生局部区域滑移产生位错

2. 位错的增殖(*dislocation multiplication*)

①F-R源增殖(图3-23)

②双交滑移增殖模型(图3-24)

3. 位错的塞积和缠结

位错的塞积(*dislocation pile-upgroup*) : 在切应力作用下由同一个位错源放出的位错在障碍前受阻, 这个位错源放出的位错在障碍前排列起来, 这一位错组态称为位错的塞积。

位错的缠结(*dislocation tangle*) :

4. 位错的交割 (cross)

位错的交割: 相互运动的位错发生互相切割的现象。

(1) 割阶与扭折 (*jog and kink*)

割阶: 曲折段垂直于位错的滑移面时

扭折: 曲折段在位错的滑移面上时

注: ①刃型位错的割阶仍为刃型位错, 扭折为螺型位错。螺型位错的割阶和扭折均为刃型位错。

②刃型位错的扭折是一可动螺位错, 割阶也是一可动的刃位错。螺型位错的扭折是可动的刃型位错, 割阶是不可动的刃型位错。

(2) 几种典型的位错交割

交割后要遵循柏氏矢量的一些特征。

① 两柏氏矢量相互垂直的刃型位错交割 (图3.18a) : PP' 为割阶, $b_2 \perp PP'$, PP' 大小和方向取决于 b_1 , 为刃型位错。

②两柏氏矢量相互平行的刃型位错交割 (图3.18b) : PP' 为扭折, $b_2 \parallel PP'$, QQ' 为扭折, $b_1 \parallel QQ'$, PP' 和 QQ' 都是螺位错。

③ 两柏氏矢量相互垂直的刃型位错和螺型位错交割 (图3.19) : MM' 为割阶, $b_1 \perp MM'$, MM' 大小和方向取决于 b_2 , 为刃型位错。 NN' 为扭折, $b_2 \perp NN'$, NN' 大小和方向取决于 b_1 , 为刃型位错。

④ 两柏氏矢量相互垂直的螺型位错交割 (图3.20) : MM' 和 NN' 均为刃型割阶。

结论:

①任意两种类型运动交割时, 可以产生扭折或割阶, 其大小和方向取决与另一位错的柏氏矢量, 但具有原位错的柏氏矢量。如果另一位错的柏氏矢量与该位错线平行, 则交割后该位错线不出现曲折。

② 所有割阶都是刃位错, 而扭折可以是刃位错, 也可以是螺位错。交割后曲折段的方向取决与位错相对滑移过后引起晶体的相对位移情况。

③ 扭折与原位错在同一滑面上, 可随主位错线一起运动, 几乎不产生阻力, 且扭折在线张力作用下易与消失。

割阶与原位错线不在同一滑移面上,除攀移外割阶一般不能随主位错一起运动,成为位错运动的障碍。

§ 4.7 实际晶体结构中的位错

1. 实际晶体中位错的柏氏矢量

几个基本概念

单位位错 (*dislocation*): 柏氏矢量等于单位点阵矢量的位错

全位错 (*perfect dislocation*): 柏氏矢量等于点阵矢量的位错

不全位错 (部分位错 *partial dislocation*): 柏氏矢量不等于点阵矢量的位错。

实际晶体中位错的柏氏矢量必须符合以下两个条件:

- (1) 结构条件: 柏氏矢量大小与方向, 必须连接一个原子平衡位置到另一个原子平衡位置
- (2) 能量条件: 位错能量 $E \propto b^2$, 柏氏矢量越小越稳定

列表归纳典型晶体中单位位错的柏氏矢量

2. 堆垛层错 (*stacking fault*)

正常堆垛顺序fcc: *ABCABC*…… hcp: *ABABAB*……

堆垛层错: 正常堆垛顺序遭到破坏或错排, 有两类:

- (1) 抽出型层错
- (2) 插入型层错

堆垛层错能: 形成层错时几乎不产生点阵畸变, 但它破坏了晶体的完整性和正常的周期性, 使晶体的能量有所增加。

3. 不全位错

(1) Shockley不全位错 (*Shockley partial dislocation*):

柏氏矢量: $b = a/6[1-21]$

特点: 可以是刃型位错、螺型位错、混合型位错; 可滑移, 滑移的结果使层错面扩大或缩小。但不能攀移。

(2) Frank不全位错 (*Frank partial dislocation*):

负Frank不全位错—抽出型

正Frank不全位错—插入型

柏氏矢量: $b = a/3\langle 111 \rangle$

特点: 纯刃型, 柏氏矢量垂直于层错面不能滑移, 只能通过点缺陷的运动沿层错面进行攀移, 使层错面扩大或缩小。所以弗兰克不全位错又称不滑动位错或固定位错, 而肖克莱不全位错则属于可动位错。

4. 位错反应 (*dislocation reaction*)

位错反应满足条件:

(1) 几何条件 柏氏矢量守恒性

$$\text{即: } \Sigma bs = \Sigma bh$$

(2) 能量条件 反应过程能量降低

$$\text{即: } \Sigma |bs|^2 > \Sigma |bh|^2$$

5. 扩展位错(extended/split dislocation)

扩展位错: 两个不全位错加上中间一片堆垛层错区的组态。

fcc中的扩展位错为两个Shockley不全位错加上中间的堆垛层错。

扩展位错的宽度为 3.32式 (P103)

扩展位错的束集: 外力作用下收缩为原来全位错的过程。

6. Thompson四面体

Thompson四面体把FCC中所有重要的位错和位错反应清晰而直观地表示出来, 利用Thompson四面体可确定fcc结构中的位错反应。

7. 其它晶体中的位错

(1) bcc 滑移面有 {111} {112} {113}

单位位错 $b = a/2 \langle 111 \rangle$

bcc中易发生交滑移, 没有扩展位错, 没有位错分解。

(2) hcp 全位错

(3) 关于离子晶体的位错、共价晶体中的位错、高分子晶体中的位错请参考教材及有关资料。

4.8 晶体中的界面

- 面缺陷的特征:

- 面缺陷类型:

表面(surface)

内界面(interface): 晶界、亚晶界、孪晶界、相界、层错

1. 晶界的结构与晶界能

- 晶界(grain boundary):

- 亚晶界(subgrain boundary):

- 确定晶界位置用:**

(1) 两晶粒的位向差 θ

(2) 晶界相对于一个点阵某一平面的夹角 ϕ 。

- 按 θ 的大小分类:

小角度晶界 $\theta < 10^\circ$

大角度晶界 $\theta > 10^\circ$

(1) 小角度晶界

小角度晶界 (*low angle grain boundaries*) : 由一系列相隔一定距离的刃型位错所组成。

分类:

(1) 对称倾斜界面 (*tilt boundary*) : 晶界平面为两个相邻晶粒的对称面。是由一系列平行的刃型位错所组成。相邻位错距离 D 与 b 、 θ 之间关系: 4-11式

(2) 扭转晶界 (*twist boundary*) : 将一块晶体沿横断面切开, 并使上下部分晶体绕轴转动 θ 角, 再与下部分晶体粘在一起形成。可看成是由互相交叉的螺位错所组成。

(2) 大角度晶界

大角度晶界 (*high angle grain boundaries*) 为原子呈不规则排列的一过渡层, 仅有2-3个原子厚度的薄层。

大多数晶粒之间的晶界都属于大角度晶界。

(3) 晶界能

晶界能: 形成单位面积时, 系统的自由能变化。J/m²。

- 晶界能量与 θ 有关: $\gamma = \gamma_0 \theta (A - \ln \theta)$,
式中 $\gamma_0 = Gb/4n(1 - \nu)$
- 大角度晶界能量与 θ 无关, 基本上为一恒定值, 0.25-1.0J/m²
- 在平衡状态时, 三叉晶界的各面角 均趋于稳定状态, 此时

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 120^\circ.$$

- 由于界面能的存在, 晶粒长大和晶界的平直化过程是自发过程

(4) 晶界特征

- ① 晶界处点阵畸变大, 存在晶界能。
- ② 常温下晶界会对位错的运动起阻碍运动, 使塑性变形抗力提高, 使晶体(材料)的硬度和强度提高。(常温下晶界强度高, 高温下晶界强度低)
- ③ 晶界处原子具有较高的动能, 且存在大量缺陷。原子在晶界处扩散比晶内快得多。(短路扩散)
- ④ 固态相变时 易在晶界处形核。
- ⑤ 晶界上富集杂质原子多, 熔点低, 加热时容易过烧。
- ⑥ 晶界腐蚀速度比晶内快。
- ⑦ 晶界具有不同于晶内的物理性质。

2. 表面及表面能

- 表面 (*crystal surface*)
- 表面能 (γ) : 晶体表面单位面积自由能的增加

$$\text{表示法: } \gamma = dw/ds \quad \gamma = T/L$$

$$\gamma = [\text{被割断的结合键数/形成单位新表面}] \times [\text{能量/每个键}]$$

影响 γ 的因素:

- (1) γ 与晶体表面原子排列的致密程度有关。原子密排的表面具有最小的表面能。
- (2) γ 还与晶体表面曲率有关。曲率半径小, 曲率大, γ 愈大。
- (3) 外部介质的性质。介质不同, 则 γ 不同。
- (4) 还与晶体性质有关。晶体本身结合能高, 则 γ 大。

【小结】

1. 基本概念和术语:

位错生成、位错增殖、位错塞积、位错交割、单位位错、全位错、不全位错、堆垛层错、Schottky不全位错、Frankel不全位错、位错反应、扩展位错、Thompson四面体

2. 掌握几种典型金属晶体中单位位错的柏氏矢量, Schottky不全位错和Frankel不全位错的柏氏矢量及特点

3. 会判断位错反应能否进行

4. 位错源、位错的增殖 (F-R源、双交滑移机制等) 和运动、交割

5. 注重对材料性能的影响

【复习思考题与作业题】

作业题: P135: 8, 10, 11, 12, 14

本章小结

一、概念和术语

1. 点缺陷、Schottky空位、Frankel空位、间隙原子、置换原子
2. 线缺陷、刃型位错、螺型位错、混合型位错、柏氏矢量、位错运动、滑移、(双)交滑移、攀移、交割、割价、扭折、塞积; 位错应力场、应变能、线张力、作用在位错上的力、位错密度、位错源、位错生成、位错增殖、位错反应、单位位错、全位错、不全位错、堆垛层错、扩展位错、Thompson四面体、晶界的特性

二、本章重点及难点

1. 点缺陷的平衡浓度公式
2. 位错类型的判断及其特征、柏氏矢量的特征，
3. 位错源、位错的增殖(F-R源、双交滑移机制等)和运动、交割
4. 关于位错的应力场、位错的应变能、线张力等可作为一般了解
5. 晶界的特性

§ 5 材料的相结构及相图

(材料的相结构已提前在§2材料中的晶体结构中讲过)

Unit 1 相图基本知识、单元系相图、二元系相图

【目标与要求】

1. 掌握组元、合金系、相、相变、固态相变、相平衡、相图凝固与结晶等基本概念
2. 掌握二元系相图的测定方法
3. 掌握相律，杠杆定律及其应用

【内容】

1. 相图基本知识
2. 单元系相图
3. 二元系相图的建立

【重点、难点】

1. 相变、固态相变、相平衡、相图、凝固与结晶等基本概念
2. 相律、杠杆定律及其应用

【方法及手段】

采用多媒体辅助教学，并结合提问和启发相结合的方式。利用动画来演示相图的测定。

【进程】

§ 5.1 相图的基本知识

一、组元、合金系

1. 组元(component)：组成合金最基本的、可以独立存在的物质。

一元合金：纯Fe、纯Cu

二元合金：Fe-C、Cu-Zn、Cu-Ni

三元合金：1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13

2. 合金系(alloy system)：一系列成分不同的合金

二 (三、多) 元系合金

二、相、相变、相平衡、相律

1. 相 (phase) :

单相合金: 如单相 A 体不锈钢, 单相黄铜 (30%Zn)

多相合金: 如双相不锈钢 (A+F、A+M)、双相黄铜 (40%Zn)

2. 相变 (phase transformation): 旧相 \rightarrow 新相的转变过程

固态相变 (solid phase transformation)。

从液相转变为固相的过程称为凝固 (solidification)。

若凝固后的产物为晶体称为结晶 (crystallization)。

金属转变过程为: 汽态 \leftarrow 液态 \longleftrightarrow 固态

3. 相平衡 (phase equilibrium): 没有量的增减和成份的改变。

实际上是一种动态平衡

相平衡条件: 每个组元在各相中的化学势都彼此相等。

4. 相律 (phase rule)

相律数学表达式: $f=c-p+2$

式中 p —平衡相数 c —体系的组元数

f —体系自由度数 2 —温度和压力

自由度数 f : $f \geq 0$

在恒压下, 相律表达式: $f=c-p+1$

5. 相律的应用

① 利用相律可以判断在一定条件下系统最多可能平衡共存的相数

② 利用它可解释纯金属与二元合金结晶时的差别。

注意: 使用相律有一些限制:

①只适用于热力学平衡状态。

②只表示体系中组元和相的数目, 不能指明组元和相的类型和含量。

③不能预告反应动力学 (即反应速度问题)。

④ $f \geq 0$

三、相图的分类 (平衡图、状态图)

相图 (phase diagram):

根据组元数分为一元相图、二元相图、三元相图。

一元相图: 纯水、纯铁相图

二元相图： 匀晶、共晶、包晶相图

三元相图： 匀晶、共晶

§ 5.2 单元系相图

单元系相图：

1. 水的单元相图分析（图5-1）

2. 纯铁的相图分析（图5-2）

纯铁的冷却曲线及晶体结构变化图示

3. SiO₂相平衡图

§ 5.3 二元系相图

一、二元相图的表示法

二元系合金由于合金有成分变化，相图需用纵、横两个坐标轴表示，纵轴表示温度，横轴表示成分，通常用质量百分数表示。

二、二元相图的建立

相图的建立：有实验测定和理论计算两种方法。

二元相图是测定材料的临界点绘制。测定临界点有两种方法：

(1) 动态法：热分析法、膨胀法、电阻法

(2) 静态法：金相法、X-ray衍射分析法

这些方法主要是利用合金在相结构变化时，引起物理性能、力学性能及金相组织变化的特点来测定。

举例：Cu—Ni 相图测定

① 配制一系列不同成分的Cu—Ni合金。

② 熔化均匀后测出所配合金及纯Cu、纯Ni的冷却曲线。

③ 确定合金的凝固温度。求出各冷却曲线上的临界点。

④ 将各临界点分别投到对应的合金成分、温度坐标中，连接各相同意义的临界点（开始点或终止点）。

⑤ 填写相区即得到Cu—Ni合金的二元相图。

三、二元相图中的点、线、区

点（表象点）：可以确定任一合金在任一温度下所处的状态。

线：液相线（liquidus line）：

固相线（solidus line）：

相区（phase regions）：表明存在的平衡相类型和数目。

单相区（single phase region）、

两相区 (two phase region)

三相区 (three phase region)

四、杠杆法则 (杠杆定律) (the lever rule)

杠杆法则:

应用: 杠杆定律仅适应于平衡相图的两相区

(1) 确定两平衡相的成分 (浓度)。

(2) 确定两平衡相的相对量。

【教学小结】

1. 掌握以下基本概念和术语

组元、合金系、相、相变、固态相变、相平衡、相图
凝固与结晶

- 掌握相图的测定方法
- 掌握相律, 杠杆定律及其应用

【阅读材料】

- 《材料科学基础》石德珂主编 西安交大出版社
- 《材料科学基础》刘智恩主编 西北工业大学出版社
- 《材料科学基础》胡赓祥主编 上海交通大学出版社
- 《金属学原理》侯增寿主编 机械工业出版社

【复习思考题与作业题】

作业题: P219: 1, 2

Unit 2 匀晶相图和共晶相图

【内容】

1. 匀晶相图
2. 共晶相图

【重点、难点】

1. 合金的结晶转变过程及转变组织
2. 组织组成物与相组成物、晶内偏析与枝晶偏析
3. 不平衡凝固过程及伪共晶、不平衡共晶组织、离异共晶

【方法及手段】

采用多媒体辅助教学，并结合提问和启发相结合的方式。利用动画来演示合金的结晶转变过程。

一、匀晶相图及固溶体的凝固

匀晶相图概述

- 由液相直接结晶出单相固溶体的过程称为匀晶转变。
- 完全具有匀晶转变的相图称为匀晶相图。
- 特点：两组元在液态和固态都能无限互溶。

举例：Cu—Ni、Au—Ag、Au—Pt、Fe—Ni、Cr—Mo、Fe—Cr等；

CaO—MnO、NiO—CoO、CoO—MgO、NiO—MgO等

- 匀晶相图分析（Cu—Ni为例）

- 两种特殊的匀晶相图

① 具有极大点：Pb—Tl

② 具有极小点：Au—Cu、Cr—Mo、Fe—Co

2. 固溶体的平衡凝固

平衡凝固 (equilibrium solidification)：

平衡组织 (equilibrium microstructure)：

- [固溶体合金平衡结晶过程示意图](#)

固溶体合金与纯金属结晶时的异同点：

共同点：形核与长大过程，但合金中存在第二组元，凝固

过程比纯金属复杂。

区别：

- ① 固溶体结晶是在一温度范围内完成，而纯金属在恒温下完成。
- ② 固溶体合金结晶析出的固相成分与液态成分不同（选分结晶）而纯金属结晶过程中固相与液相的成分始终相同（同分结晶）
- 固溶体结晶过程的实质：
 - ① 液、固相内成分扩散、均匀过程；
 - ② 固相长大过程

3. 固溶体的不平衡结晶

不平衡凝固(结晶) (non-equilibrium solidification)

不平衡组织 (non-equilibrium microstructure)

- [固溶体合金不平衡结晶](#)

通过对非平衡凝固分析得到如下结论：

(1) 固相、液相的平均成分分别与固相线、液相线不同，有一定的偏离。其偏离程度与冷速

有关。液相线的偏离程度较固相线小。

(2) 先结晶部分含有较多的高熔点组元(Ni)，后结晶部分含有较多的低熔点组元(Cu)。

(3) 非平衡结晶条件下，凝固的终止温度低于平衡时的终止温度。

- 晶内偏析 (coring) :

固溶体不平衡结晶时，由于先后从液相中结晶出来的固相成分不同，并因冷速较快而不能扩散均匀，结果使每个晶粒内部的化学成分不均匀，这种现象称为晶内偏析。

- 枝晶偏析 (dendritic segregation) 。

由于工业用合金固溶体通常以树枝状方式结晶，枝晶轴（干）含高熔点组元多，而枝晶间含低熔点的组元多，导致先结晶的枝干和后结晶的枝间成分不同，故亦称枝晶偏析。

- 晶内偏析对合金的力学性能影响较大。容易导致合金塑性，韧性下降；易引起晶间腐蚀，降低合金的抗蚀性能。

- 枝晶偏析可通过均匀化退火(扩散退火)来消除。

二、共晶相图及合金凝固

共晶相图的概念

- 共晶转变 (the eutectic reaction) :
- 共晶组织 (eutectic structure) :
- 共晶相图 (the eutectic phase diagram) :
- 共晶温度 (the eutectic temperature) :
- 共晶点 (the eutectic point) 或共晶成分:
- 共晶相图的特点: 液态下两组元能无限互溶，固态下只能部分互溶，甚至有时完全不溶，并具有共晶转变。

举例: Pb—Sn、Pb—Sb、Al—Si、Al—Cu、Mg—Si、Al—Mg等

1. 共晶相图分析 (以Pb—Sn为例)

点与线:

相区: 单相区、双相区、三相区

共晶转变: $LE \rightarrow \alpha M + \beta N$

2. 共晶系合金的平衡凝固

(1) 端部固溶体合金

结晶过程: $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow \alpha + \beta$ II

匀晶反应+脱溶转变

室温组织: $\alpha + \beta$ II

(2) 共晶合金 (eutectic alloy)

结晶过程: $L \rightarrow L + (\alpha + \beta) \rightarrow (\alpha + \beta)$ 共

共晶反应+脱溶转变

室温组织: $(\alpha + \beta)$ 共

(3) 亚共晶合金 (hypoeutectic alloys)

结晶过程: $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow L + \alpha + (\alpha + \beta) \text{ 共} \rightarrow \alpha + (\alpha + \beta) \text{ 共} \rightarrow \alpha + \beta \text{ II} + (\alpha + \beta) \text{ 共}$

匀晶反应+共晶反应+脱溶转变

室温组织: $\alpha + \beta \text{ II} + (\alpha + \beta) \text{ 共}$

先共晶相 (pro-eutectic phase)。

(4) 过共晶合金 (hypereutectic alloys)

凝固过程和组织特征与亚共晶合金相类似, 只是初生相为 β 固溶体而不是 α 固溶体。

其结晶过程组织变化示意图如图:

结晶过程: $L \rightarrow L + \beta \rightarrow L + \beta + (\alpha + \beta) \text{ 共} \rightarrow \beta + (\alpha + \beta) \text{ 共} \rightarrow$

$\beta + \alpha \text{ II} + (\alpha + \beta) \text{ 共}$

匀晶反应+共晶反应+脱溶转变

室温组织: $\beta + \alpha \text{ II} + (\alpha + \beta) \text{ 共}$

组织组成物与相组成物的区别:

- 组织组成物: 在结晶过程中形成的, 有清晰轮廓的独立组成部分, 如 α 、 $\alpha \text{ II}$ 、 β 、 $\beta \text{ II}$ 、 $(\alpha + \beta)$ 共 都是组织组成物。
- 相组成物: 组成显微组织的基本相, 它有确定的成分及结构但没有形态上的概念。

Pb—Sn组织分区图

3. 共晶系合金的非平衡凝固

(1) 伪共晶 (pseudo-eutectic)

在不平衡结晶条件下, 成分在共晶点附近的合金 (亚共晶合金或过共晶合金) 也可能全部转变成共晶组织。由非共晶成分合金所得到的共晶组织称为伪共晶 (pseudo-eutectic)。

(2) 不平衡共晶组织

对于小于饱和溶解度的合金 (a点以左, c点以右) 在不平衡结晶时固相线下移, 使其冷却到共晶温度时仍有少量液相发生共晶转变而形成不平衡共晶组织。

(3) 离异共晶 (divorced eutectic)

当合金中共晶组织 $(\alpha + \beta)$ 相对量较少, 先共晶相(α) 相对量很多时, 有时共晶组织中与先共晶相相同的那一个相就会依附在先共晶相上形核长大, 把另一相推向最后凝固的晶界处, 从而使共晶体两组成相相间的组织特征消失, 这种两相分离的共晶组织称为离异共晶 (divorced eutectic)。

【教学小结】

1. 掌握匀晶相图（Cu-Ni相图）和共晶相图（Pb-Sn相图）
2. 熟练分析两种相图中合金的结晶转变过程及转变组织。
3. 搞清组织组成物与相组成物、晶内偏析与枝晶偏析
4. 了解二元合金的不平衡凝固过程及伪共晶、不平衡共晶组织、离异共晶基本概念。

【阅读材料】

- 《材料科学基础》石德珂主编 西安交大出版社
- 《材料科学基础》刘智恩主编 西北工业大学出版社
- 《材料科学基础》胡赓祥主编 上海交通大学出版社
- 《金属学原理》侯增寿主编 机械工业出版社
-

【复习思考题与作业题】

作业题：P219：3，4，5

Unit 3包晶相图及其它二元相图、相图分析与应用

【教学目标与要求】

1. 掌握包晶相图、会分析合金的结晶转变过程及转变组织
2. 掌握二元相图的几何规律和复杂二元相图的分析方法。
3. 会根据相图推测合金的性能
4. 了解其它类型二元系相图

【教学内容】

1. 包晶相图
2. 其它类型二元系相图
3. 复杂相图分析和相图的应用

【重点、难点】

1. 包晶合金的结晶转变过程及转变组织
2. 复杂二元相图的分析方法
3. 根据相图推测合金的性能

【教学方法及手段】

采用多媒体辅助教学，并结合提问和启发相结合的方式。利用动画来演示合金的结晶转变

过程。

【教学进程】

一、包晶相图及其合金凝固

包晶相图概述

包晶转变 (peritectic reaction)

包晶相图 (the peritectic phase diagram)

举例: Cu—Sn、Fe—C、Cu—Zn、Ag—Sn、Pt—Ag

1. 包晶相图分析 (以Pt—Ag为例)

点与线:

相区: 单相区、双相区、三相区

2. 包晶系合金的平衡凝固

① 包晶点 (P) 合金

包晶反应: $L + \alpha \rightarrow \beta + P$

结晶过程: $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow L + \alpha + \beta \rightarrow \beta + \alpha II + \beta$

匀晶反应 + 包晶反应 + 脱溶转变

室温组织: $\alpha II + \beta$

② 包晶点 (P) 以右合金

结晶过程: $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow L + \alpha + \beta \rightarrow L + \beta \rightarrow \beta + \alpha II + \beta$

匀晶反应 + 包晶反应 + 匀晶反应 + 脱溶转变

室温组织: $\alpha II + \beta$

③ 包晶点 (P) 以左合金

结晶过程: $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow L + \alpha + \beta \rightarrow \alpha + \beta \rightarrow \alpha + \beta + \alpha II + \beta II$

匀晶反应 + 包晶反应 + 脱溶转变

室温组织: $\alpha + \beta + \alpha II + \beta II$

3. 包晶系合金的不平衡凝固

二、其他类型的二元相图

1. 具有化合物的二元相图

根据化合物的稳定性, 可分为稳定化合物和不稳定化合物。

(1) 形成稳定化合物的相图

- 稳定化合物: 具有固定的熔点, 且在熔点以下不发生分解。
- 相图特征: 形成的没有溶解度的化合物在相图上表现为一条垂线。可以把它作为一个独

立的组元而把相图分为两部分。

- 形成稳定化合物的二元相图有：Mg—Si、Cu—Ti、Fe—P、Mg—Cu、Ag—Sr、Na₂SiO₃—SiO₂、BeO—Al₂O₃、SiO₂—MgO

(2) 形成不稳定化合物的相图

- 不稳定化合物：在加热到一定温度时会发生分解的化合物。
- 包晶反应所形成的中间相均属于不稳定化合物。它们不能视为独立组元而把相图划分为简单相图。

例如：K—Na相图

2. 具有偏晶转变的相图

- 偏晶转变（monotectic reaction）： $L1 \rightarrow \alpha + L2$
- 相图特点：在一定的成分和温度范围内，两组元在液态下也只能有限溶解，存在两种不同浓度的液相L1和L2。
- 具有偏晶转变的二元系有：Cu—S、Cu—O、Mn—P

3. 具有合晶转变的相图

- 合晶转变（syntectic reaction）： $L1 + L2 \rightarrow \beta$
- 相图特点：二元组在液态下有限溶解，存在不熔合线，不熔合线以下为两液相L1和L2。
- 具有合晶转变的二元系如：Na—Zn、K—Zn等

4. 具有熔晶转变的相图

- 熔晶转变（metatectic reaction）： $\delta \rightarrow L + \gamma$
- 具有熔晶转变的合金很少，如Fe—S、Cu—Sb

5. 具有固态转变的二元相图

当合金中组元具有同素(分)异构转变时，则其固溶体会出现三种情况：固溶体的多晶型转变，共析转变、包析转变、偏析转变。

(1) 具有固溶体多晶型转变的相图

固溶体的多晶型转变又称为多型性转变。具有这类转变的合金有：Fe—C、Fe—Ti合金等。

(2) 具有共析转变（eutectoid reaction）的相图

共析转变与共晶转变相似，区别在于它是由一个固相在恒温下转变为另外两个固相。

共析转变对热处理强化意义很大。钢的热处理是以共析转变为基础的。

(3) 具有包析转变（peritectoid reaction）的相图

包析转变：类似于包晶转变，区别在于包析转变是由两个固相反应生成另外一个固相。

(4) 具有脱溶沉淀过程的相图

随着温度降低固溶体中溶解度下降，析出第二相的过程，称为脱溶过程。

- (5) 具有有序—无序转变的相图
- (6) 具有固溶体形成中间相转变的相图
- (7) 具有磁性转变的相图

三、二元相图的几何规律

二元相图应遵循如下规律：

- (1) 相图中所有的线条都代表发生相转变的温度和平衡相的成分，所以相界线是相平衡的体现，平衡相的成分必须沿着相界线随温度而变化。
- (2) 两个单相区之间必定有一个由该两相组成的两相区分开，而不能以一条线接界。两个两相区必须以单相区或三相水平线分开。即相邻相区相数之差均为1，为相区接触法则。
- (3) 二元相图中的水平线均表示三相平衡共存的恒温转变(如表5-1)。三个单相区分别处于水平线的两端和中间，水平线的上下方分别与3个两相区相接。
- (4) 当两相区与单相区的分界线与三相等温线相交则分界线的延长线应进入另一两相区内，而不会进入单相区。
- (5) 若两个恒温转变中有两个共同的相，则这两条水平线之间必定是这两个相组成的相区。

四、复杂二元相图的分析方法

- (1) 首先看相图中是否存在化合物，如有稳定化合物，则以这些稳定化合物为界，把相图分成几个区域(基本相图)进行分析。
 - (2) 根据相区接触法则，弄清各相区的组成相。
 - (3) 找出所有的三相共存水平线及与其接触的三个单相区，根据3个单相区与水平线的相互位置确定三相平衡转变的类型及反应式。
 - (4) 应用相图分析典型合金的结晶过程和组织变化规律。
- 单相区：相成分与原合金相同。
- 双相区：两相成分分别沿相界线变化，相对量可由杠杆法则求得。
- 三相共存(平衡)时：三个相的成分固定不变，可用杠杆法则求出恒温转变前、后相组成的相对量。
- (5) 相图只表示平衡状态的情况，而实际生产条件下很难达到平衡状态，因此要特别重视它们的非平衡条件下可能出现的相和组织。
 - (6) 相图的正确与否可用相律来判断。

在分析和认识了相图中的相、相区及相变线的特点之后，就可分析具体合金随温度改变而发生的相变及组织变化。

五、根据相图推测合金的性能

1. 使用性能(力学、物理性能)
2. 判断合金的工艺性能
 - (1) 合金铸造性能
 - (2) 合金压力加工性能
 - (3) 合金切削加工性能
 - (4) 热处理工艺性能：可借助于相图判断合金能否通过热处理强化，并能为热处理提供数据。
 - 相图中无固态相变的合金不能进行热处理强化，但能进行消除枝晶偏析的扩散退火。
 - 具有多晶型转变的合金，可通过再结晶退火和正火处理使合金晶粒细化，以提高强度、硬度，称为细晶强化。
 - 具有溶解度变化的合金，可通过固溶处理及时效处理来提高合金的硬度、强度，称为时效强化或析出强化。
 - 具有共析转变的合金，原则上可进行淬火处理。
 - 合金进行化学热处理时，渗入元素必须在被渗金属中具有一定的溶解度或者能形成化合物。

【教学小结】

1. 掌握包晶相图，熟练分析合金的结晶转变过程及转变组织
2. 熟悉二元相图的几何规律并会使用
3. 掌握复杂二元相图的分析方法
4. 根据相图推测合金的性能，了解相图的应用
5. 了解其它类型二元系相图

【复习思考题与作业题】

作业题：P219：6

Unit 4-5 铁碳相图

【教学目标与要求】

1. 能按比例默画铁碳合金状态图
2. 掌握铁碳合金的结晶过程和组织变化
3. 掌握铁碳合金的成分、组织与性能间的关系
4. 熟悉铁石墨相图
5. 了解石墨与基体对铸铁机械性能的影响

【教学内容】

1. 铁碳合金状态图
2. 铁碳合金的结晶过程和组织变化
3. 铁碳合金的成分、组织与性能间的关系
4. 铁石墨相图
5. 石墨与基体对铸铁机械性能的影响

【重点、难点】

1. 铁碳合金状态图
2. 铁碳合金的结晶过程和组织变化
3. 铁碳合金的成分、组织与性能间的关系

【教学方法及手段】

采用多媒体辅助教学，并结合提问和启发相结合的方式。利用动画来演示合金的结晶转变过程。

【教学进程】

Fe-C合金概述

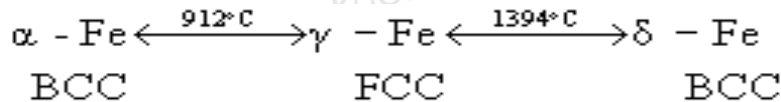
- 铁碳合金：钢(Steels)和铸铁(Cast irons)基本组成都是Fe和C两种元素，属于铁碳合金；合金钢和合金铸铁是有意加入合金元素的铁碳合金。
- 铁碳相图描述了钢铁材料的成分、温度与组织（相）之间的关系，是了解钢铁材料的基础。
- 在铁碳合金中，Fe与C可形成一系列化合物： Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC 。Fe-C相图可划分成Fe-Fe₃C，Fe₃C-Fe₂C，Fe₂C-FeC和FeC-C四个部分。只有Fe-Fe₃C部分有实际应用价值。

一、Fe-Fe₃C合金中的组元

铁碳合金中组元：纯铁(Fe)、渗碳体(Fe₃C)

1. 纯铁(Fe)

- 纯铁 (pure iron) $W_{Fe} > 99.8\%$, 纯铁的熔点 1538°C 。
- 纯铁固态下具有同素异构转变 (allotropic transformation) :



- 纯铁具有磁性转变 (770°C 磁性转变、magnetic transformation)。纯铁的强度低, 塑性好, 很少用于结构材料。主要利用铁磁性 (ferromagnetism)。

2. 渗碳体 (Fe_3C) (cementite)

- 渗碳体具有复杂的晶格 (正交晶系), 其晶体结构如图。
- Fe_3C 熔点为 1227°C , Fe_3C 是一种亚稳化合物。Fe— Fe_3C 相图叫介稳定系相图, Fe—C 相图叫稳定系相图, 二者画在同一图上称为 Fe—C 合金双重相图。
- Fe_3C 在 230°C 以下具有铁磁性, 常用 A_0 表示这个临界点。
- Fe_3C 在钢和铸铁中呈现片状, 粒状, 网状和板条状。渗碳体硬而脆 (HB800), 塑性极低, 延伸率接近于 0。它是钢铁材料中的主要强化相。

二、Fe—C 合金中的基本相

五 (六) 个基本相: L 相、 δ 相、 γ 相、 α 相、 Fe_3C 相、(石墨 G)

(1) 液相 (L):

(2) δ 相: C 在 δ -Fe 中的间隙固溶体。bcc 结构。在 1459°C 时最大溶解量可达 0.09%。 , 也称高温铁素体。

(3) 奥氏体 (γ 或 A) (austenite): C 在 γ -Fe 中的间隙固溶体。fcc 结构, 可以溶解较多的碳, 1148°C 时最多可以溶解 2.11% 的碳, 到 727°C 时含碳量降到 0.77%。奥氏体的硬度 (HB170~220) 较低, 塑性 (延伸率 δ 为 40%~50%) 高。晶粒呈平直多边形。 γ 是顺磁性。

(4) 铁素体 (α 或 F) (ferrite): C 在 α -Fe 中的间隙固溶体。bcc 结构。含碳量非常低, 在 727°C 时最大溶解量为 0.0218%。其性能与纯铁相似。硬度 (HB50~80) 低, 塑性 (延伸率 δ 为 30%~50%) 高。铁素体的显微组织与工业纯铁相同。晶粒常呈多边形。 770°C 以下为铁磁性。

(5) 渗碳体 (cementite) 前面已讨论过

(6) 石墨 (C)

在一些条件下, 碳可以游离态石墨 (graphite) (hcp) 稳定相存在。所以石墨在 Fe—C 合金铸铁中也是一个基本相。

三、Fe— Fe_3C 相图分析

1. Fe-Fe₃C相图的点

Fe-Fe₃C相图中的各特性点所对应的温度、成分和意义。

A、B、C、D、E、F、G、H、J、K、N、P、S、Q

2. Fe-Fe₃C相图的线

(1) 三条水平线

① HJB—包晶转变线: 1459℃

$L_{0.53} + \delta_{0.09} \rightarrow \gamma_{0.17}$

转变产物为奥氏体(austenite), 强度低, 塑性好

② ECF—共晶转变线: 1148℃

$L_{4.3} \rightarrow \gamma_{2.11} + Fe_3C$

转变产物为莱氏体(ledburite), Ld表示, 硬、脆、无法加工。

③ PSK—共析转变线(A₁线): 727℃

$\gamma_{0.77} \rightarrow \alpha_{0.0218} + Fe_3C$

珠光体(pearlite), P表示。塑性、韧性、硬度介于 α 和Fe₃C之间。

(2) 两条磁性转变线

① A₀线(虚线): 渗碳体的磁性转变线, 230℃以上无磁性, 230℃以下铁磁性。

② M₀(A₂线): 铁素体的磁性转变线。770℃以上无磁性, 770℃以下铁磁体。A₂温度又称居里点

● 磁性转变时, 晶格类型并不改变, 故不属于相变

(3) 三条重要的相界线(固态转变线)

① GS线(A₃线): 冷却时从 γ 中开始析出或加热时 α 全部溶入 γ 中的转变线。又称为先共析 α 相开始析出线。

② ES线(A_{cm}线): 碳在 γ 中的溶解度曲线。冷却时从 γ 中开始析出Fe₃C II或加热时Fe₃C II全部溶入 γ 中的转变线。

从L中析出的Fe₃C称Fe₃C I, 从 γ 中析出的Fe₃C称(Fe₃C II)。

③ PQ线: 碳在 α 中的溶解度线。冷却时从 α 中开始析出Fe₃C III或加热时Fe₃C III全部溶入 α 中的转变线。

从 α 析出的Fe₃C称(Fe₃C III)。以区别于L和 γ 中析出的Fe₃C。

A₀、A₁、A₂、A₃、A_{cm}线温度依次升高。

3. Fe—Fe₃C相图中的区

5个单相区: L、 δ 、 γ 、 α 、Fe₃C

7个两相区： $L+\delta$ 、 $L+\gamma$ 、 $L+Fe_3C$ 、 $\delta+\gamma$ 、 $\gamma+Fe_3C$ 、 $\gamma+\alpha$ 、 $\alpha+Fe_3C$

3个三相共存区：

$L+\gamma+Fe_3C$ (ECF线)、 $L+\delta+\gamma$ (HJB线)、 $\gamma+\alpha+Fe_3C$ (PSK线)

四、Fe-C合金分类

Fe-C合金通常按其含碳量(W_c)及其室温平衡组织分为三大类：

工业纯铁 (pure iron)、碳钢 (carbon steel)、铸铁 (cast iron)。根据碳钢和铸铁的相变、组织特征可把二者细分。即：

(1) 工业纯铁： $(W_c < 0.0218\%)$ 显微组织为固溶体。

(2) 钢 ($W_c = 0.0218 \sim 2.11\%$) 之间的Fe、C合金。

高温组织为单相 γ ，塑性好，可锻造、轧制等压力加工。根据其室温组织的不同，碳钢 (carbon steel) 又可分为：

共析钢 (eutectoid steel)： $W_c = 0.77\%$

亚共析钢 (hypoeutectoid steel)： $W_c = 0.0218 \sim 0.77\%$

过共析钢 (hypereutectoid steel)： $W_c = 0.77 \sim 2.11\%$

(3) 白口铸铁 ($W_c = 2.11 \sim 6.69\%$) 之间的Fe、C合金。

其特点都发生共晶反应，有良好的流动性，具有良好的铸造性能。但硬、脆，不能锻造。

其断口呈银白色，故称为白口铸铁。根据白口铸铁室温组织不同，可分为三种：

共晶白口铸铁 (eutectoid cast iron)： $W_c = 4.30\%$

亚共晶白口铸铁 (hypoeutectoid cast iron)： $W_c = 2.11 \sim 4.30\%$

过共晶白口铸铁 (hypereutectoid cast iron)： $W_c = 4.30 \sim 6.69\%$

$W_c = 2.11\%$ 具有重要的意义，它是钢和铸铁(生铁)的理论分界线。

• 铁碳相图的形象记忆法

ACD、GSE 比作两只海燕，ECF、PSK 比作海平面，E、F、P、K 四点为海岸，整个相图视为“海上二燕紧相连”

铁碳相图并不难，海上二燕紧相连。

二燕背负单相区，燕翅均为析出线。

海面属于三相线，上晶下析莫混乱。

晶析组织海岸找，图文牢记在心间。

五、Fe—C合金的平衡结晶过程及组织

(1) 工业纯铁 ($W_c < 0.0218\%$)

转变过程: $L \rightarrow L+\delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta+\gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha+\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + Fe_3C_{III}$

室温组织: $\alpha + Fe_3C_{III}$

(2) 共析钢 ($W_c=0.77\%$)

转变过程: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow \gamma \rightarrow P+\gamma \rightarrow P (\alpha + Fe_3C)$

室温组织为 $P (\alpha + Fe_3C)$

(3) 亚共析钢 ($W_c=0.0218 \sim 0.77\%$)

转变过程: $L \rightarrow L+\delta \rightarrow L+\delta+\gamma \rightarrow L+\gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha+\gamma \rightarrow \alpha+P+\gamma$

$\rightarrow \alpha + P$ (析出 Fe_3C_{III})

室温组织: $\alpha + P$, α 称为先共析铁素体, α 与 γ 、 α 与 P 的相对量可用杠杆定律求得。

(4) 过共析钢 ($W_c=0.77 \sim 2.11\%$)

转变过程: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma+Fe_3C_{II} \rightarrow P + Fe_3C_{II}$

室温组织为: $P + Fe_3C_{II}$

(5) 共晶白口铸铁 ($W_c=4.30\%$)

转变过程: $L \rightarrow L + L_d (\gamma+Fe_3C) \rightarrow L_d \rightarrow L_d (\gamma+Fe_3C_{II}+Fe_3C) \rightarrow L'd (P + Fe_3C_{II}+Fe_3C)$

室温组织: $L'd (P + Fe_3C + Fe_3C_{II})$, 称为变态莱氏体。

(6) 亚共晶白口铸铁 ($W_c=2.11 \sim 4.30\%$)

结晶过程: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow L+\gamma + L_d \rightarrow \gamma + L_d \rightarrow \gamma+Fe_3C_{II}+L_d$

$\rightarrow \gamma+Fe_3C_{II}+L'd+P \rightarrow P+Fe_3C_{II}+L'd$

室温组织: $P + Fe_3C_{II} + L'd$

(7) 过共晶白口铸铁 ($W_c=0.77 \sim 2.11\%$)

结晶过程: $L \rightarrow L+Fe_3C_I \rightarrow Fe_3C_I + L_d \rightarrow Fe_3C_I + L'd$

室温组织: $Fe_3C_I + L'd$

注意区别组织中的渗碳体:

- 一次渗碳体 Fe_3C_I : 粗大的片状 (图5-51)
- 共晶渗碳体 Fe_3C : 基体 (图5-47)
- 二次渗碳体 Fe_3C_{II} : 网状 (图5-45)
- 共析渗碳体 Fe_3C : 层片状 (图5-41)
- 三次渗碳体 Fe_3C_{III} : 薄片状 (图5-39)

注意区别下列组织:

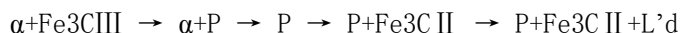
- 先共析铁素体与共析铁素体

- 先共晶奥氏体与共晶奥氏体
- 莱氏体与变态莱氏体

六、W_c对铁碳合金的组织 and 性能的影响

(1) W_c对铁碳合金平衡组织的影响

- 随着含碳量的增加, Fe-C合金的组织发生下列变化:



$\rightarrow \text{L}'\text{d} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}} + \text{L}'\text{d}$ 称为组织组成物。

Fe-C合金室温组织都是由 α 和Fe₃C两相组成, 称为相组成物。

- Fe₃C形态的变化:

Fe₃C_{III} (薄片状) \rightarrow 共析Fe₃C (层片状) \rightarrow Fe₃C_{II} (网状)

\rightarrow 共晶Fe₃C (连续基体) \rightarrow Fe₃C_I (粗大片状)

- 铁素体形态的变化

铁素体基体 \rightarrow 连续分布的块状组织 \rightarrow 沿晶界网状分布

\rightarrow 层片状共析铁素体 \rightarrow 没有

- 性能的变化

W_c%变化 \rightarrow 相的相对量发生变化、形态和分布变化

\rightarrow 组织变化 \rightarrow 性能变化

举例: 20、45、T8、T12性能不同

(2) W_c对铁碳合金机械性能的影响

F为软韧相, Fe₃C为硬脆相, 故Fe-C合金的力学性能取决于 α 和Fe₃C两相的相对量及它们的相互分布特征。

	硬度 (HB)	延伸率 δ (塑性、韧性)	强度 (Mpa)
铁素体	50-80	30%-50%	180-230
渗碳体	800	0	30
珠光体	180	20%-35%	770

珠光体的硬度、塑性、韧性介于 α 和Fe₃C之间, P的强度最高, 且随P片间距的减小而增大。

(3) W_c对铁碳合金工艺性能的影响

- 切削加工性:

低C钢: F多, 塑性、韧性好, 容易粘刀, 不易断屑, 影响表

面粗糙度;

高C钢: Fe₃C多, 硬度高, 刀具磨损严重;

低C钢: 硬度、塑性适中, 切削加工性能较好。

- 可锻性：金属经受压力加工改变形状但不产生裂纹的性能。

含C量低，塑性好，可锻性好，含C量高，可锻性差。

白口铸铁，有L'd，可锻性很差，不能锻造。

- 铸造性：

流动性：

收缩性：

晶内偏析

七、铁-石墨相图

1. Fe-C相图

Fe-Fe₃C中，凡有Fe₃C存在的相区均由石墨G取代，凡是析出Fe₃C的线，都将析出石墨。

2. 灰口铸铁的组成

按Fe-C相图结晶的铸铁组织中，碳以游离的G形式存在，铸铁断裂时断口呈暗灰色，故称灰口铸铁（石墨化铸铁）

灰口铸铁结晶过程与白口铸铁十分相似。亚共晶合金、共晶合金、过共晶合金最终组织均为铁素体和片状石墨，只不过石墨数量和尺寸不同而已。

普通灰铁中石墨多为粗片状，在铁水浇铸前

(1) 若加入少量硅铁或硅钙孕育剂，进行孕育处理，则G变为细片状，形成孕育铸铁。

(2) 若加入镁或稀土镁合金等球化剂，进行球化处理，则G变为球状，形成球墨铸铁。

(3) 若加入稀土硅铁、稀土镁钛等稀土合金，则使G 成为蠕虫状，形成蠕墨铸铁。

3. 石墨与基体对铸铁机械性能的影响

铸铁机械性能取决于基体的组织及G的数量、形状、大小和分布。

(1) G对铸铁机械性能的影响

石墨机械性能很低，尤如一种裂纹或孔洞，削弱基体，引起应力集中，形成裂纹源，所以铸铁的抗拉强度、塑性和韧性都比钢铁低得多。

G的形状、大小、数量和分布不同，对铸铁机械性能的影响情况不同。在基体相同的情况下，普通灰铸铁、孕育灰铸铁、球墨铸铁抗拉强度依次升高。

(2) 基体对铸铁机械性能的影响

一般说，基体中F量越多，塑性和韧性越好，但强度、硬度越低；基体中P量越多，强度、硬度越高，但塑性和韧性越低。

可见，铸铁的机械性能取决于基体的组织及G的形状、数量、大小和分布。

- 提高铸铁机械性能的途径：

① 改变G的形状、大小和分布，减少对基体的有害影响。

② 通过合金化、热处理手段、调整、改善基体组织，提高性能。

- 铸铁的优点

虽然铸铁的机械性能不如钢，但G的存在，却赋予铸铁许多为钢所不及的性能，如良好的耐磨性、高的消振性、优良的切削加工性能；同时铸铁含碳量高，接近于共晶成分，熔点低，铁水流动性好，因G结晶时体积膨胀，收缩率小，铸造性能优于钢；且生产设备简单，成本低廉，是工业上应用面宽量大的铸造材料。

八、铁碳相图的应用

主要应用在钢铁材料的选用和加工工艺的制订两个方面。

(1) 在选材方面

铁碳相图表明了成分-组织-性能之间的关系及规律，为钢铁材料的选用提供了依据。

建筑结构和各种型钢：低碳钢

各种机械零件：中碳钢

各种工具：高碳钢

纯铁：电工材料

白口铸铁：冷轧辊犁铧 球磨机的磨球

(2) 在铸造工艺方面

(3) 在热锻热轧工艺方面

(4) 在热处理工艺方面

- 铁碳相图的局限性

(1) 铁碳相图只反应了铁碳二元合金中相的平衡状态，若含有其它组元，相图将发生变化。

(2) 铁碳相图反应平衡条件下相的状态，若冷却或加热速度较快，其组织转变不能完全用相图分析，必须借助于其它理论知识。

【教学小结】

1. 按比例默画出Fe-Fe₃C相图，①各特性点的成分、温度及意义；②三个基本恒温转变的名称、转变式、转变产物及性能；③三条重要的固态转变线的意义；④两条磁性转变线的温度，是否相变？⑤铁碳合金的分类；⑥特征温度 A₀、A₁、A₂、A₃、A_{cm}的意义。

2. 铁素体、奥氏体、渗碳体的结构，碳原子的分布、是固溶体还是化合物、性质、表示法，为什么A 溶碳能力高于F？

3. 七类铁碳合金的结晶过程和组织变化

4. W_c对铁碳合金的组织 and 性能的影响

5. Fe₃C I、Fe₃C II、Fe₃C III、共晶Fe₃C、共析Fe₃C的区别

6. 下列组织之间的区别

先共析铁素体与共析铁素体

先共晶奥氏体与共晶奥氏体

莱氏体与变态莱氏体

7. 熟悉铁石墨相图

8. 熟悉石墨与基体对铸铁机械性能的影响

【复习思考题与作业题】

作业题：P219：8，9，10，11，12，13

Unit 6-7 三元相图

【目标与要求】

1. 掌握以下基本概念：直线法则、杠杆定律、重心法则、蝴蝶形规律、共轭曲线、共轭连接线、共轭三角形、三相平衡棱柱
2. 掌握三元相图的成分表示方法
3. 会分析典型合金的结晶过程和组织变化
4. 会运用三元匀晶和共晶相图的等温截面、垂直截面、投影图

【内容】

1. 三元相图的基础知识
2. 三元匀晶相图
3. 固态互不溶解的三元共晶相图
4. 固态下有限互溶的三元共晶相图

【重点、难点】

1. 三元相图的基础知识
2. 三元匀晶和共晶相图中典型合金的结晶过程和组织变化

3. 三元匀晶和共晶相图中的等温截面、垂直截面、投影图

【进程】

一、三元相图的基础知识

三元相图的基本特点：

- (1) 完整的三元相图是三维的立体模型；
- (2) 三元系中可发生四相平衡转变，四相平衡区是恒温水平面；
- (3) 三元相图中有单相区、两相区、三相区和四相区。除四相平衡区外，其它三区均占有
一定空间，是变温转变。

1. 三元相图成分表示方法

通常用浓度(或成分)三角形表示。

常用：等边成分三角形、等腰成分三角形、直角成分三角形。

(1) 等边成分三角形

顶点：纯组元；边：二元系合金；三角形内任一点：三元合金

(2) 等边成分三角形中的特殊

- ① 平边线等浓度关系
- ② 顶角线等比成分关系

(3) 成分的其它表示法

- ① 等腰成分三角形
- ② 直角成分三角形

2. 三元相图中的法则(及定律)

- (1) 直线法则(共线法则)和杠杆定律
- (2) 重心法则
- (3) 相区接触法则

3. 三元相图的平面化

- (1) 等温(水平)截面图
- (2) 垂直(变温)截面图
- (3) 投影图

二、三元匀晶相图

1. 立体图形

2. 三元固溶体合金的结晶过程

蝴蝶型变化规律

共轭连线

3. 等温（水平）截面图

等温截面图确定了给定温度下的相平衡关系，可分析给定合金的相变和在某一温度下的状态。

根据直线法则可确定液固两相的成分，根据杠杆定律可以计算两平衡相的相对量。

4. 垂直截面图

① 通过成分三角形某一顶点的截面，两组元的含量比固定不变。

② 通过平行于成分三角形某一边的截面，则一个组元成分固定。

注意：垂直截面不能应用直线法则和杠杆定律来确定两平衡相的成分和相对含量。

5. 投影图（projection drawing）

投影图有两种：

① 把三元相图中所有相区间的交线都垂直投影到成分三角形中（好象把相图在垂直方向上压成一个平面）得到的投影图。

利用它可以分析合金在加热和冷却过程中的相变。

② 等温投影图：把一系列等温截面中的相界线都投影到成分三角形中，并在每一条投影线上标明相应的温度所得到的投影图。

它能够反映空间相图中各种相界面的高度随成分变化的趋势，还可以分析给定合金开始凝固或凝固终了的大致温度。

三、固态互不溶解的三元共晶相图

1. 空间模型

2. 水平截面图

3. 垂直截面

4. 投影图

5. 典型合金的平衡结晶过程

(1) 具有四相平衡共晶成分的合金（E点）

结晶过程： $L \rightarrow L + (A+B+C) \rightarrow (A+B+C)$ ，只经过了四相平衡共晶点E，发生 $L \rightarrow (A+B+C)$

(2) 位于三相平衡共晶线(e1E、e2E、e3E)上的合金

如过e1E的合金的结晶过程： $L \rightarrow L + (A+B)$

$\rightarrow L + (A+B+C) + (A+B) \text{ 共} \rightarrow (A+B) \text{ 共} + (A+B+C) \text{ 共}$ ，经历了三相平衡共晶转变面和四相平衡共晶水平面。发生了： $L \rightarrow (A+B)$ （或 $L \rightarrow (B+C)$ 、 $L \rightarrow (A+C)$ ） $L \rightarrow (A+B + C) \text{ 共}$

(3) 位于液相面内的合金

以图5-81中0合金为例，结晶过程：

$L \rightarrow L+A_{\text{初}} \rightarrow L+A_{\text{初}}+(A+B) \text{ 共} \rightarrow L+A_{\text{初}}+(A+B) \text{ 共}+(A+B+C) \text{ 共}$

$\rightarrow A_{\text{初}}+(A+B) \text{ 共}+(A+B+C) \text{ 共}$ ，经历了液相面，三相平衡共晶转变面和四相平衡共晶水平面。

(4) 位于二元共晶曲面和三元共晶曲面交线上的合金

以AE线上的合金为例，结晶过程：

$L \rightarrow L+A_{\text{初}} \rightarrow L+A_{\text{初}}+(A+B+C) \text{ 共} \rightarrow A_{\text{初}}+(A+B+C) \text{ 共}$

四、固态下有限互溶的三元共晶相图

1. 立体模型和相图分析
2. 投影图
3. 等温截面图
4. 垂直截面图
5. 典型合金的平衡结晶过程

【小结】

1. 基本概念

直线法则、杠杆定律、重心法则、蝴蝶形规律、共轭曲线、共轭连接线、共轭三角形、三相平衡棱柱

2. 三元相图的成分表示方法
3. 三元匀晶相图的等温截面、垂直截面、投影图
4. 三元共晶相图的等温截面、垂直截面、投影图

第六章 材料的凝固与气相沉积

一、教学目标与要求：

- 1、概述材料制备的主要两种方法----凝固与气相沉积，对这种方法有一个全面地了解；
- 2、重点讲述凝固中的结晶，以及固溶体合金的凝固。

二、教学内容与重点、难点

(一) 材料凝固时晶核的形成（重点）

- 1、均匀形核
- 2、形核率
- 3、非均匀形核

(二) 材料凝固时晶体的生长（重点）

- 1、材料的熔化焓对晶体生长的影响
- 2、温度梯度对晶体生长的影响

(三) 固溶体合金的凝固

- 1、合金凝固的三种典型情况（重点、难点）

2、成分过冷及其对晶体生长的影响

(四) 制造工艺与凝固组织

1、铸锭与铸件的凝固组织及偏析

2、连续铸造和熔化焊的凝固组织

(五) 用凝固法材料的制备技术

1、区域熔炼

2、制备单晶

3、用快速冷凝法制备金属玻璃

4、定向凝固

(六) 材料非晶态

1、材料的非晶态概述

2、常用材料的非晶态

三、教学手段与教学时数:

采用多媒体进行教学,并结合提问和启发相结合的方式,同时加入重点、难点分析。

本章共8学时。

四、教学小结及复习参考题、作业题

重点掌握晶核的形成以及材料凝固时晶体的生长,固溶体合金凝固的三种典型情况作为本章的难点讲解。

复习参考题与作业题为273-275页1、2、4、5、7、等。

一、教学目标与要求:

1、掌握扩散定律及其应用、固态相变中的形核及长大、掌握扩散型相变及无扩散型相变;

2、了解扩散机制。

二、教学内容与重点、难点

(一) 扩散定律及其应用 (重点)

1、扩散第一定律

2、扩散第二定律 (难点)

(二) 扩散机制

1、间隙扩散和空位扩散

2、互扩散和柯肯达尔效应

3、扩散系数的计算

(三) 影响扩散的因素与扩散驱动力

1、影响扩散的因素

2、扩散驱动力

(四) 固态相变中的形核

1、固相的相界面

2、均匀形核与非均匀形核

(五) 固态相变的晶体成长

1、扩散控制长大

- 2、界面控制长大
- (六) 扩散型相变 (重点)
 - 1、Al—Cu合金的淬火时效
 - 2、陶瓷材料中的脱溶沉淀反应
 - 3、合金中的调幅分解 (难点)
 - 4、玻璃中的调幅分解
- (七) 无扩散相变 (重点)
 - 1、马氏体相变的基本特征
 - 2、马氏体转变的晶体学
 - 3、马氏体的形态与性能
 - 4、陶瓷材料中的马氏体相变

第八章 材料的变形与断裂

一、教学目标与要求:

- 1、掌握滑移与孪晶变形、单晶体的塑性变形、冷变形金属的组织与性能等。
- 2、了解金属变形的各个阶段。

二、教学内容与重点、难点

- (一) 金属变形概述
- (二) 金属的弹性变形
- (三) 滑移与孪晶变形
 - 1、滑移观察
 - 2、滑移机制
 - 3、滑移面和滑移方向 (难点)
 - 4、孪晶变形
- (四) 单晶体的塑性变形 (重点)
 - 1、施密特定律
 - 2、单滑移、多滑移和交滑移
- (五) 多晶体的塑性变形
 - 1、晶界和晶体取向对塑性变形的影响
 - 2、晶粒大小对材料强度与塑性的影响
- (六) 纯金属的变形强化
 - 1、位错的交割
 - 2、位错的反应
 - 3、位错的增殖
- (七) 合金的变形与强化
 - 1、单相合金的变形与强化
 - 2、低碳钢的屈服和应变时效
 - 3、第二相对合金变形的影响
- (八) 冷变形金属的组织与性能 (重点)
 - 1、冷变形金属的力学性能
 - 2、冷变形金属的组织
 - 3、形变织构

4、残余应力

(九) 金属的断裂 (重点)

1、理论断裂强度

2、实际断裂强度

(十) 冷变形金属的回复阶段

1、回复阶段性能与组织的变化

2、回复动力学

3、回复机制

(十一) 冷变形金属的再结晶 (重点)

1、再结晶的形核

2、再结晶动力学

3、影响再结晶的因素

4、再结晶后的晶粒长大

三、教学手段与教学时数:

采用多媒体进行教学,并结合提问和启发相结合的方式,同时加入重点、难点分析。

本章共10学时。

四、教学小结及复习参考题、作业题

重点掌握单晶体的塑性变形、冷变形金属的组织与性能、冷变形金属的再结晶等。

复习参考题与作业题为374--375页2、3、5、8、9、11等。