

## 第一章要求掌握的内容

第一节 晶体与非晶体，晶体结构与空间点阵，晶胞与原胞，晶系，布拉菲点阵，点阵常数。

第二节 晶面指数、晶向指数的确定，晶面族，晶向族，晶带轴，晶面与晶向平行或垂直。

第三节 面心立方、体心立方、密排六方晶胞结构，原子数，配位数，紧密系数，间隙种类，间隙大小（定性），间隙位置，

第四节 面心立方和密排六方的堆垛方式，堆垛层错

## 第一章（一）内容及习题

### 引言

金属由于其性能的多样性，而被人们广泛的应用。金属的性能由其成分、结构所决定。成分、结构、性能之间的关系，以及它们的变化规律，构成了本课程的基础。金属（或非金属）在固态通常是晶体，故金属的结构通常被称为金属的晶体结构。第一章介绍的是学习和研究晶体结构所需要掌握的一些基本知识——晶体学基础。

### 本节课要求

- 1 要求掌握“晶体与非晶体、晶体结构与空间点阵、晶胞与原胞、晶系、布拉菲点阵、点阵常数”概念，理解布拉菲点阵的唯一性。
- 2 看完第一节，并完成习题 1~3。

### 习题

- 1 描述晶体与非晶体的区别，从结构、性能等方面。

- 2 何谓空间点阵，简述晶体结构与空间点阵的区别。
- 3 对于图 1-4 (n) 的面心立方点阵，如果在该点阵的上下两个底面的面中心各添加一个阵点，请问，新的结构是属于 14 种空间点阵的哪一种。

## 第一章（二）内容及习题

### 引言

晶体的特征在于构成晶体的原子的排列呈现三维周期结构。在材料中，金属与陶瓷通常是晶体，即使高分子或生物材料也有相应的晶体状态。所以，对材料学家来说，了解和掌握晶体结构的基本概念是十分重要的。

19 世纪出现了布拉菲的空间点阵学说，当时它仅是一个合理的猜想，其正确性到 1912 年才被劳厄等人的 X 射线衍射实验所证实。以后，大量的研究探明了成千上万的晶体结构，肯定了晶体的周期性质。现在用高分辨电子显微镜和扫描隧道显微镜等已能直接显示原子的周期排列图像。

空间点阵体现了晶体的平移对称性，即：点阵经平移后，可以获得完全的重复。晶胞是构成空间点阵的较小体积单元，通常为一个小的平行六面体。晶胞全面反映了点阵（晶体结构）的平移对称性或周期性。如果知道了晶胞的大小和形状，并且知道了晶胞内各阵点的坐标，也就确定了晶体结构。

在研究晶体结构时，并不需要了解晶胞（或晶体）内各阵点的坐标，只需要了解阵点之间的相对位置，即阵点之间的几何关系，晶面指数和晶向指数就反映了点阵中阵点之间的几何关系。

### 本节课要求

1 掌握晶面指数、晶向指数的概念及其确定，掌握晶面与晶向平行或

垂直，理解晶面族，晶向族。

2 看完第二节，并完成习题 4~6。

### 习题

4 在简单立方晶系中，(1) 作图表示下述的晶面和晶向；(2) 判断其中哪些晶面与晶向是垂直的，哪些是平行的，并指出垂直或平行的条件。 $(111), (011), (201), [111], [110], [11\bar{2}]$

5 请写出简单立方晶系中 $\{111\}$ 的等价晶面， $\langle 110 \rangle$ 的等价晶向。并在图中画出。

6 试在六方晶系的晶胞上画出 $(10\bar{1}2)$ 晶面、 $[11\bar{2}0]$ 和 $[\bar{1}101]$ 晶向。

## 第一章第三节内容及习题

### 引言

在研究晶体结构时，并不需要了解晶胞（或晶体）内各阵点的坐标，只需要了解阵点之间的相对位置，即阵点之间的几何关系，晶面指数和晶向指数就反映了点阵中阵点之间的几何关系。

晶面指数表示的是一组平行的晶面，每个晶面的原子（阵点）排列情况都是相同的，晶面与晶面之间的距离都为  $d$ ，称为晶面间距。晶向指数表示的是一组平行的方向。

在对六方晶系的晶面、晶向指数进行操作时，要注意：若已知指数要求作图，则先要将四指数换算成三指数，再以三指数进行作图；若由图求指数，则先要在图中读出三指数，然后再换算成四指数。

绝大多数金属具有简单的结构，用 A1（面心立方）、A2（体心立方）和 A3（密排六方）结构。若将原子或点阵看成是硬的小球，则可以用硬球的堆积来反映相应的结构。

### 本节课要求

- 1 掌握面心立方、体心立方、密排六方晶胞结构，掌握原子数、配位数、紧密系数、间隙的概念，理解和定性分析间隙种类，间隙大小（定性），间隙位置
- 2 学习第三节，并完成习题 7~8。

### 习题

- 4 在简单立方晶系中，（1）作图表示下述的晶面和晶向；（2）判断其中哪些晶面与晶向是垂直的，哪些是平行的，并指出垂直或平行的条

件。  $(111), (011), (201), [11\bar{1}], [110], [1\bar{1}2]$

5 请写出简单立方晶系中 $\{111\}$ 的等价晶面， $\langle 110 \rangle$ 的等价晶向。并在图中画出。

6 试在六方晶系的晶胞上画出 $(10\bar{1}2)$ 晶面、 $[11\bar{2}0]$ 和 $[\bar{1}101]$ 晶向。

7、分别对面心立方 A1 和体心立方 A2 的 $(100)$ 、 $(110)$ 、 $(111)$ 面，请问：

(1) 计算上述晶面的紧密系数，指出最紧密排列的晶面（注：面的紧密系数 = 晶面中实占的原子面积 / 晶面面积）。

(2) 画出上述晶面的原子排列方式。

8、分别对面心立方 A1 和体心立方 A2 的 $[100]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$ 晶向，请计算上述晶向中相邻两个阵点之间的距离（若点阵常数为  $a$ ），指出最紧密排列的晶向。

## 第一章第四节内容及习题

### 引言

绝大多数金属具有简单的结构，用 A1（面心立方）、A2（体心立方）和 A3（密排六方）表示。若将原子或点阵看成是硬的小球，则可以用硬球的堆积来反映晶体的结构。如：面心立方，就可以看成是由（100）晶面顺序堆积而成的，也可以看成是由（110）晶面或（111）晶面顺序堆积而成的。同样，其它的结构也都可以看出是由某一晶面顺序堆积而成的。由此，可以了解和分析晶体的结构

### 本节课要求

- 1 掌握面心立方和密排六方的堆垛方式，及其它们之间的差异；理解堆垛层错的概念。
- 2 学习第四节，并完成习题 9、10、11。

### 习题

9、铁有两种结构，分别为体心立方 A2（称为  $\alpha$ -Fe 或铁素体）和面心立方 A1（称为  $\gamma$ -Fe 或奥氏体），铁的原子半径分别为 0.127nm，问：（1）哪种结构更致密。（2）两种结构中，四面体间隙和八面体间隙中可以容纳的原子的最大半径是多少？（3）碳原子的半径为 0.077nm，当碳原子进入上述结构的间隙时，铁的结构会发生怎样的变化？

10 由表 1—3 可见，A1（面心立方）和 A3（密排六方）结构具有相同的紧密系数，为 0.7404。数学家曾经证明，若将相同直径的硬球，在空间进行堆积，其最大的紧密系数就是 0.7404。所以，A1 和 A3

结构都是最紧密堆积的结构。

问题（1）请指出 A1 和 A3 堆积结构的差异。（提示：请先分析 A1 以（111）晶面进行的堆积，A3 以（0001）晶面进行的堆积，再讨论两者之间的差异。）

问题（2）请指出，A1 结构经过怎样的变化，可以变成 A3 结构。

11 铜为面心立方结构，X 射线衍射测定  $a=0.3615\text{nm}$ ，（1）按刚球密堆模型计算最近邻原子中心距离是多少？以任一原子为中心，这样距离的原子数目是多少？（2）原子密排面和密排方向是什么？（3）原子密排面 $\{hkl\}$ 和密排方向 $\langle uvw \rangle$ 组成的 $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ （注意： $[uvw]$ 须位于 $(hkl)$ 面上）共有多少组？



### 第一章习题参考答案

1 描述晶体与非晶体的区别，从结构、性能等方面。

晶体中的原子或原子集团都是有规律地排列的。晶体有一定的凝固点和熔点；晶体具有各向异性。

2 何谓空间点阵，简述晶体结构与空间点阵的区别。

晶体中原子或原子集团被抽象为规则排列的几何点，且其沿任一方向上相邻点之间的距离就等于晶体沿该方向的周期。这样的几何点的集合就构成空间点阵（简称点阵），每个几何点称为点阵的结点或阵点。

3 对于图 1-4 (n) 的面心立方点阵，如果在该点阵的上下两个底面的面中心各添加一个阵点，请问，新的结构是属于 14 种空间点阵的哪一种。

体心正方。

4 在简单立方晶系中，（1）作图表示下述的晶面和晶向；（2）判断其中哪些晶面与晶向是垂直的，哪些是平行的，并指出垂直或平行的条件。 $(111), (011), (201), [111], [110], [1\bar{1}2]$

$(111)$ 与 $[111]$ 垂直， $(111)$ 与 $[11-2]$ 平行， $(201)$ 与 $[11-2]$ 平行。

5 请写出简单立方晶系中 $\{111\}$ 的等价晶面， $\langle 110 \rangle$ 的等价晶向。并在图中画出。

$$\{111\} = (111) + (11\bar{1}) + (1\bar{1}1) + (\bar{1}11)$$

$$\langle 110 \rangle = [110] + [1\bar{1}0] + [101] + [10\bar{1}] + [011] + [01\bar{1}]$$

6 试在六方晶系的晶胞上画出  $(10\bar{1}2)$  晶面、 $[11\bar{2}0]$  和  $[\bar{1}101]$  晶向。

7、分别对面心立方 A1 和体心立方 A2 的  $(100)$ 、 $(110)$ 、 $(111)$  面，请问：

- (3) 计算上述晶面的紧密系数，指出最紧密排列的晶面。
- (4) 画出上述晶面的原子排列方式。
- (5) 计算上述晶面的晶面间距（点阵常数为  $a$ ，公式见附录）。

		$(100)$	$(110)$	$(111)$
面心立方	紧密系数	$\frac{\pi}{4}$ (0.785)	$\frac{\pi}{4\sqrt{2}}$ (0.555)	$\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$ (0.906)
	晶面间距	$a/2$	$\sqrt{2}a/4$	$\sqrt{3}a/3$
体心立方	紧密系数	$\frac{3\pi}{16}$ (0.589)	$\frac{3\pi}{8\sqrt{2}}$ (0.833)	$\frac{3\pi}{16\sqrt{3}}$ (0.34)
	晶面间距	$a/2$	$\sqrt{2}a/2$	$\sqrt{3}a/6$

8、分别对面心立方 A1 和体心立方 A2 的  $[100]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$  晶向，请计算上述晶向中相邻两个阵点之间的距离（若点阵常数为  $a$ ），指出最紧密排列的晶向。

	[100]	[110]	[111]
面心立方	a	$\sqrt{2}a/2$	$\sqrt{3}a/2$
体心立方	a	$\sqrt{2}a$	$\sqrt{3}a/2$

9、铁有两种结构，分别为体心立方 A2（称为  $\alpha$ -Fe 或铁素体）和面心立方 A1（称为  $\gamma$ -Fe 或奥氏体），铁的原子半径分别为 0.127nm，问：（1）哪种结构更致密。（2）两种结构中，四面体间隙和八面体间隙中可以容纳的原子的最大半径是多少？（3）碳原子的半径为 0.077nm，当碳原子进入上述结构的间隙时，铁的结构会发生怎样的变化？

(1)面心立方结构更紧密。(3) 当碳原子进入间隙时，将挤开周围的铁原子，使铁原子偏离平衡位置。

	四面体间隙	八面体间隙
面心立方	$0.225 \times r(\text{Fe})$ 0.0286	$0.414 \times r(\text{Fe})$ 0.0526
体心立方	$0.291 \times r(\text{Fe})$ 0.037	$0.155 \times r(\text{Fe})$ 0.02

10、请计算密排六方 A3 的 (0001)、(1-100)、(-12-10) 晶面的紧密系数，指出最紧密排列的晶面。请画出这些晶面的原子排列方式。

(0001)	(1-100)	(-12-10)
--------	---------	----------

0.29 $\pi$ 0.91	0.15 $\pi$	0.17 $\pi$ 0.53
	0.47	

11 由表 1—3 可见，A1（面心立方）和 A3（密排六方）结构具有相同的紧密系数，为 0.7404。数学家曾经证明，若将相同直径的硬球，在空间进行堆积，其最大的紧密系数就是 0.7404。所以，A1 和 A3 结构都是最紧密堆积的结构。

问题（1）请指出 A1 和 A3 堆积结构的差异。（提示：请先分析 A1 以（111）晶面进行的堆积，A3 以（0001）晶面进行的堆积，再讨论两者之间的差异。）

A1: ABCABCABC.....

A3: ABABAB.....

问题（2）请指出，A1 结构经过怎样的变化，可以变成 A3 结构。

抽掉 C（即引入一个弗兰克位错）

12 铜为面心立方结构，X 射线衍射测定  $a=0.3615\text{nm}$ ，（1）按刚球密堆模型计算最近邻原子中心距离是多少？以任一原子为中心，这样距离的原子数目是多少？（2）原子密排面和密排方向是什么？堆垛顺序如何？（3）原子密排面  $\{hkl\}$  和密排方向  $\langle uvw \rangle$  组成的  $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ （注意： $[uvw]$  须位于  $(hkl)$  面上）共有多少组？

（1） $\sqrt{2}a/2=0.2556$ ，12 个

（2）（111） $[110]$ ，ABCABC.....

(3) 12 组:  $(111) \times [1-10]$ ,  $(111) \times [10-1]$ ,  $(111) \times [01-1]$ ;  $(11-1) \times [1-10]$ ,  $(11-1) \times [101]$ ,  $(11-1) \times [011]$ ;  $(1-11) \times [110]$ ,  $(1-11) \times [10-1]$ ,  $(1-11) \times [011]$ ;  $(-111) \times [110]$ ,  $(-111) \times [101]$ ,  $(-111) \times [01-1]$ 。

## 第二章主要内容

第二节 波尔理论和波动力学理论对原子核外电子的运动轨道的描述。波粒两相性的基本方程。

第三节 五种结合键的特点

第四节 结合键与晶体结构

第五节 合金，合金系，合金相结构分类

第六节 影响相结构因素，

第七节 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

第八节 离子化合物的结构类型和特点

第九节 硅酸盐结构的一般特点

## 第二章第一次内容及习题

### 提示

我们可以从不同的学科侧面来观察材料的结构问题。在第一章中，从晶体学的侧面分析了材料的结构，也就是分析了原子的排列（或堆垛）方式、及其规律性。在分析的过程中，不涉及到单个原子的种

类和性质。实际上，原子的排列（或堆垛）是依赖于原子之间的键合而实现的，而不同的键合方式是由原子的核外电子分布及其性质所决定的。这是从化学的侧面来分析材料的结构，也是第二章的内容。

### 本节课的要求

- 1 掌握波尔理论和波动力学理论对原子核外电子的运动轨道的描述。掌握波粒两相性的基本方程。掌握离子键、共价键、金属键、分子键和氢键的概念，理解结合键与电子分布的关系，理解形成离子键、共价键、金属键、分子键和氢键时键合作用力的来源
- 2 学习完第二章的第一、二、三节，完成习题 1~3。

### 习题

- 1 简述波尔理论和波动力学理论分别是如何描述原子核外电子的运动轨道。
- 2 粒子具有波粒二象性，请计算下列粒子的波长。  
A, 质量为 20g，速度为 1000m/s 的子弹；  
B, 质量为  $10^{-15}\text{kg}$ ，速度为 0.01m/s 的尘埃；  
C, 质量为  $9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$ ，速度为  $10^6\text{m/s}$  的电子。
- 3 何谓结合键；简述离子键、共价键、金属键、分子键和氢键与电子分布的关系；指出形成离子键、共价键、金属键、分子键和氢键时键

合作用力的来源。



## 第二章第二次内容及习题

### 提示

原子的排列（或堆垛）是依赖于原子之间的键合而实现的，不同的键合方式是由原子的核外电子分布及其性质所决定的。

一个自由、孤立的原子，其电子的实际分布区域是从靠近原子核起一直分布到无限远。由于电子的能级是确定的，根据测不准，其位置是在空间中散布的。通常以电子出现大几率的区域范围作为原子的半径。

电子的具体分布遵循如下原则：泡利不相容原理、能量最低原理、洪德定则。

对于多电子的原子，它的化学键中真正起作用的是外壳层电子。但是，过渡、稀土与钢系元素的内壳电子也可能起作用。

### 本节课的要求

- 1 掌握结合键与晶体结构的关系，掌握合金、合金系、合金相结构的概念，掌握固溶体、化合物的概念和结构特点。
- 2 学习完第二章的第三、四、五节，完成习题 4~6。

### 习题

- 4 举例说明元素的结构特性是依赖于结合键的，并由此而影响了其性质。（如：石墨的层片状结构是由于碳以共价键结合形成层，层与层以分子键结合，其性质表现为层与层之间易滑移。）指出下述元素的

结合键类型和结构类型：铝、硅、砷、碘、 $\alpha$ -Fe、镁。

5 何谓合金，简述合金与纯金属的区别。何谓相、单相合金、多相合金。

6 合金相可以分成哪两类。何谓固溶体，何谓化合物。从晶体结构上讲，纯金属、固溶体、化合物之间有何区别。

## 第二章第三次内容及习题

### 提示

金属从结构的角度可以分为纯金属、固溶体和化合物。其中，纯金属由一个组元组成，固溶体和化合物由二个或二个以上的组元组成。固溶体的结构与一个组元（溶剂）的结构相同，化合物的结构与组元的结构都不相同。若固溶体的溶剂为化合物，则这类固溶体称为第二类固溶体，也称为中间固溶体，它的本质是化合物。

### 本节课的要求

1 掌握影响相结构因素，掌握原子半径、负电性、价电子浓度的概念，掌握置换固溶体、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、中间固溶体的概念，理解不同固溶体的结构差异。

2 学习完第二章的第六、七节，完成习题 7~10，课后完成习题 11。

### 习题

7 请问影响合金相结构的因素主要有哪几个。

8 何谓原子半径、负电性和价电子浓度。

9 固溶体可以分成哪几类，说明各类固溶体之间在结构上的差异。

10 （1）钢是由铁和碳元素组成的，请问钢是纯金属还是合金。（2）铁在室温是体心立方，碳（石墨）是六方结构，钢在室温由铁素体和渗碳体组成，其中铁素体是体心立方，铁原子位于阵点，碳原子位于间隙；渗碳体（ $\text{Fe}_3\text{C}$ ）是正交结构，请问铁素体与渗碳体是固溶体还是化合物，若是固溶体则是哪种固溶体。（3）钢在室温是单相还是多相。

11（课后）说明原子半径、负电性和价电子浓度分别是如何影响合金相结构的。

## 第二章第四次内容及习题

### 提示

陶瓷材料是以各种粘土为主要原料，成形后经高温烧制而成的制品。它是人类制得的第一类经化学变化而成的产品，它的出现比金属材料早得多。

陶瓷材料的特点是熔点高、硬度高、化学稳定性高，因此具有耐高温、耐磨损、耐氧化和腐蚀，以及质量轻、弹性模量大、强度高等优良性能。

组成陶瓷材料的基本相为：晶相、玻璃相（非晶相）和气相（气孔）。其中，晶相是最主要的组成相。

陶瓷材料是以离子键、共价键以及离子键和共价键的混合键结合在一起。

离子化合物和硅酸盐是两种重要的陶瓷材料。

### 本节课的要求

- 1 理解离子化合物的结构类型和特点，理解硅酸盐结构的一般特点
- 2 学习完第二章的第八、九节，完成习题 12、13。

### 习题

- 12 何谓离子化合物，离子化合物有哪些结构类型，其具体的结构是

怎样的。

13 简述硅酸盐结构的基本特点。

## 第二章习题参考答案

1 简述波尔理论和波动力学理论分别是如何描述原子核外电子的运动轨道。

波尔理论认为核外电子是在确定的轨道上运动的，符合牛顿定律。波动力学认为电子具有波粒二象性，电子有可能出现在核外的各个位置，只是出现在不同位置的几率不同。

2 粒子具有波粒二象性，请计算下列粒子的波长。

D, 质量为 20g，速度为 1000m/s 的子弹；

E, 质量为  $10^{-15}\text{kg}$ ，速度为 0.01m/s 的尘埃；

F, 质量为  $9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$ ，速度为  $10^6\text{m/s}$  的电子。

$$\lambda = h/mu, \quad \lambda_1 = 6.62 \times 10^{-34} / [0.02 \times 1000] = 3.2 \times 10^{-35} \text{m};$$

$$\lambda_2 = 6.5 \times 10^{-17} \text{m}; \quad \lambda_3 = 7.1 \times 10^{-10} \text{m}。$$

3 何谓结合键；简述离子键、共价键、金属键、分子键和氢键与电子分布的关系；指出形成离子键、共价键、金属键、分子键和氢键时键合作用力的来源。

所谓结合键是指由原子结合成分子或固体的方式和结合力的大小。

离子键：得、失电子形成正负离子，外层电子结构成为稳定的八电子层结构。正负离子通过静电引力（库仑引力）而结合。

共价键：相邻原子通过共用一对或几对价电子使各原子的外层电子结构都成为稳定的八电子层（或  $1s^2$ ）结构，

金属键：各原子都贡献出其价电子而次外层则为“八电子层”，形成金属正离子。通过自由电子气与正离子实之间的库仑引力而结合。

分子键：由共价键结合而成双原子的分子，外层电子结构成为稳定的八电子层结构。分子间通过形成瞬时电偶极矩，产生瞬时电场，而结合。

氢键：氢原子核与极性分子间的库仑引力

4 从结合键的角度简述元素的晶体结构（举两例说明），指出下述元素的结合键类型和结构类型：铝、硅、砷、碘、 $\alpha$ -Fe、镁。

铝：金属键，面心立方结构；

硅：共价键，金刚石结构；

砷：共价键，菱方结构；

碘：共价键和分子键，正交结构；

$\alpha$ -Fe：金属键，体心立方结构；

镁：金属键，密排六方结构。

5 何谓合金，简述合金与纯金属的区别。何谓相、单相合金、多相合金。

合金是由金属和其他一种或多种元素通过化学键合而形成的材料。

人们把具有相同的（或连续变化的）成分、结构和性能的部分（或区域）称为合金相或简称相。由一种相组成的合金叫作单相合金，而由几种不同相组成的合金叫作多相合金。

6 合金相可以分成哪两类。何谓固溶体，何谓化合物。从晶体结构上讲，纯金属、固溶体、化合物之间有何区别。

按照晶体结构，可以将合金相分为固溶体和化合物两类。

固溶体是一种组元（溶质）溶解在另一种组元（溶剂，一般是金属）中，并具有溶剂（或称基体）的点阵类型。

化合物是由两种或多种组元按一定比例（一定的成分）构成一个新的点阵，它既不是溶剂的点阵，也不是溶质的点阵。

7 请问影响合金相结构的因素重要有哪几个。

影响合金相结构的主要因素有原子半径、负电性、价电子浓度等。

8 何谓原子半径、负电性和价电子浓度。

最近邻原子或离子之间的距离就等于两个原子或离子半径之和。

元素的电负性是表示它在和其他元素形成化合物或固溶体时吸引电子能力的一个参量。

价电子浓度（或简称电子浓度）是指合金中每个原子平均的价电子数。

9 固溶体可以分成哪几类，说明各类固溶体之间在结构上的差异。

按固溶体在相图中的位置分类：端部和中间固溶体；

按溶质原子在点阵中的位置分类：置换和间隙固溶体；

按固溶度分类：有限和无限固溶体；



按各组元原子分布的规律性分类：有序和无序固溶体。

10 (1) 钢是由铁和碳元素组成的，请问钢是纯金属还是合金。(2) 铁在室温是体心立方，碳（石墨）是六方结构，钢在室温由铁素体和渗碳体组成，其中铁素体是体心立方，铁原子位于阵点，碳原子位于间隙；渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 是正交结构，请问铁素体与渗碳体是固溶体还是化合物，若是固溶体则是哪种固溶体。(3) 钢在室温是单相还是多相。

(1) 钢是合金；(2) 铁素体是固溶体，渗碳体是化合物；(3) 钢在室温是多相合金。

### 第三章主要内容

第一节 理想晶体与晶体缺陷，缺陷种类

第二节 点缺陷种类，空位形成本质，点缺陷平衡浓度，空位种类，点缺陷对性能的影响

第三节 位错与滑移，螺位错，刃位错，混合位错，柏矢量

第四节 螺位错和刃位错的特征，应变能，线张力，位错线受力

第五节 滑移，攀移，割界，应力集中

第六节 位错反应，全位错，不全位错，扩展位错

第七节 晶界，亚晶界，相界，共格界，孪晶界

### 第三章内容和习题(一)

提示：

晶格的周期性，也称为平移对称性。所谓平移对称性，就是晶格中的点阵经过平移后，可以获得完全的重复。

#### 本节课的要求

- 1 理解理想晶体与缺陷的概念，掌握缺陷的种类。掌握点缺陷的概念及其结构特点，理解空位形成的本质，理解点缺陷对晶体性能的影响。
- 2 学习第三章的第一、二节，完成习题 1~3。

#### 习题

- 1 何谓理想晶体，何谓晶体缺陷
- 2 缺陷可以分为几类？对每一类缺陷说出一种具体的缺陷名称。

3 点缺陷的存在,对晶体结构将造成怎样的影响?对晶体的性能将造成怎样的影响?形成点缺陷的驱动力是什么?

### 第三章内容和习题(二)

提示:

点缺陷是一种热力学平衡缺陷,也就是说,在一定的温度下,点缺陷的数目是一定的。可以定性地进行分析:从热力学上来说,在一定的温度下,随点缺陷数目增加,晶体结构的畸变增加,导致系统自由能增加。另一方面,随点缺陷数目增加,系统的熵值增加,导致系统的自由能下降。当增加的自由能与下降的自由能相等时,系统达到平衡。显然,这时所对应的点缺陷数目是一定的。所以,从平衡的角度来说,在一定的温度下,点缺陷的数目是一定的。

点缺陷的存在,对晶体结构造成影响,从而对晶体的性能也会造成影响。这又是一个结构与性能之间存在关系的例子。

位错是晶体中最为常见的缺陷之一,它对晶体材料的各种性质都有程度不同的影响,很早就被人们关注和研究,有了比较成熟的理论和大量的实验研究结果,是本章的重点。

#### 本节课的要求

- 1 掌握空位的分类,掌握点缺陷的平衡浓度概念及其计算。掌握位错的分类及其结构特点,掌握柏矢量的物理意义及其求法。
- 2 学习第三章的第三节,完成习题 4~7。

#### 习题

- 4 何谓肖脱基空位、弗仑克尔空位、点缺陷的平衡浓度

- 5 已知铁的空位形成能为  $104.6\text{kJ/mol}$ 。试问，（1）从  $20^\circ\text{C}$  加热到  $850^\circ\text{C}$ ，空位的数目将增加多少倍？（2）若将加热后的铁快速淬冷到  $20^\circ\text{C}$ ，这些“额外”的空位会消失吗？
- 6 简述：位错概念是在怎样的情况下被提出的，位错概念的提出首先解决了什么问题。
- 7 位错有哪两种类型，简述它们的几何特点。
- 8 （1）请说明柏氏矢量的物理意义。（2）先在一个简单立方（点阵常数为  $a$ ）的二维晶格中画出一个正刃型位错，再用柏氏回路求出正刃型位错的柏氏矢量，并具体写出柏氏矢量的方向和大小。

### 第三章内容和习题（三）

提示：

人们发现，经塑性变形的晶体的表面存在大量的台阶，提出塑性变形是通过晶体的滑移来实现的，计算了晶体发生整体滑移所需的临界分切应力，发现其值与实测值相差很大，由此提出设想：晶体可能是借助于位错的运动，通过逐步滑移来实现塑性变形的。经计算，位错运动所需的临界分切应力与实测值很接近，从而间接地证明了晶体中可能有位错的存在，直至几十年后，人们通过电子显微镜，才真正证明了位错的存在。

位错的提出，一方面解决了理论强度与实验值的差异，同时也对塑性变形过程提出了见解：当一个位错在切应力的作用下滑移出晶体时，就在晶体的表面出现一个台阶，台阶的宽度就是一个柏矢量。当有许多位错滑移出晶体时，晶体就发生了宏观的塑性变形。

正、负刃型位错的区别是多余半原子面的位置，左、右螺型位错的区别是螺旋方向的不同。位错的本质是原子的畸变区，这一区域的横截面仅有几个原子的尺寸，区域的长度是非常多的原子尺寸，所以为线缺陷。由于位错是原子的畸变区，所以，位错的存在，导致了体系能量的升高。

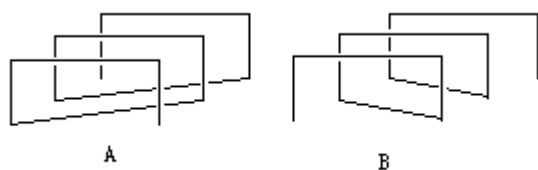
#### 本节课的要求

1 进一步理解位错的结构特点，进一步理解柏矢量的求法，掌握位错的应变能、线张力的概念及其表示方法，了解用位错的应变能进行位错运动趋势分析的方法。

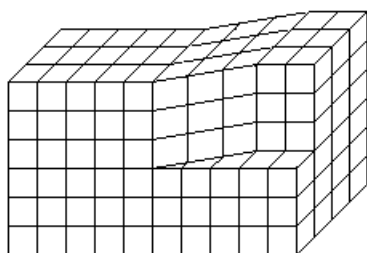
2 先完成上次的习题，再学习第三章的第三、四、五节，其中的第四节从第 15 页开始学习，15 页前的内容，有兴趣的同学自己看。完成习题 9~14。

### 习题

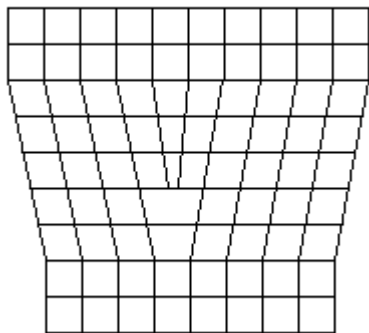
9 判断图（1）中螺旋的方向（是右螺旋还是左螺旋）。



10 判断图中为何位错，求图（2）中位错的柏矢量（为简单立方晶胞，点阵常数为  $a$ ）。



11 求图（3）中位错的柏矢量（为简单立方晶胞，点阵常数为  $a$ ）。



- 12 何谓位错的应变能。位错是热力学平衡缺陷还是不平衡缺陷。
- 13 何谓位错的线张力，其估算值为多少。
- 14 当两个位错相遇时，定性地判断：同号位错将如何，异号位错将如何。（课后：请从应变能的角度对此进行判断。）



### 第三章内容和习题(四)

提示:

正、负刃型位错的区别是多余半原子面的位置，左、右螺型位错的区别是螺旋方向的不同。位错的本质是原子的畸变区，这一区域的横截面仅有几个原子的尺寸，区域的长度是非常多的原子尺寸，所以为线缺陷。由于位错是原子的畸变区，所以，位错的存在，导致了体系能量的升高。

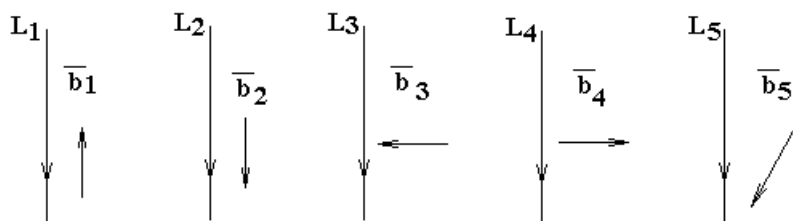
#### 本节课的要求

- 1 进一步理解位错的结构特点，掌握位错的标注方法，理解位错周围原子的应力状态及其与溶质原子的交互作用。
- 2 再次学习第三章的第四、五节，完成习题 15~18。

#### 习题

15 请简要的说明：(1) 位错是一种线缺陷，(2) 缺陷的存在，一般是使体系的能量上升还是下降？使体系处于稳定状态还是非稳定状态？

16 请简要说明：(1) 刃型位错周围的原子处于怎样的应力状态（为切应力还是正应力，为拉应力还是压应力）；(2) 若有间隙原子存在，



则间隙原子更容易存在于位错周围的哪些位置（可以以图示的方式说

明)。

17 请判断如下为何种位错：

18 在简单立方晶体中，假定有一刃型位错 A，其柏氏矢量为  $b_1=a[0-10]$ ，沿着 (100) 晶面滑移；假如还有一个螺型位错 B，柏氏矢量为  $b_2=a[100]$ ，并在 (001) 晶面上滑动，请在三维晶格图中画出位错 A 和 B。

### 第三章内容和习题（五）

#### 提示

位错在力的作用下会发生运动，位错运动的结果，使晶体发生了塑性变形，而位错运动的难易程度又反映了晶体的强度。

#### 本节课的要求

1 掌握位错的运动形式，掌握滑移和攀移的概念，理解刃型位错与螺型位错在运动形式上的差异，了解割阶的概念，掌握位错之间的交互作用。

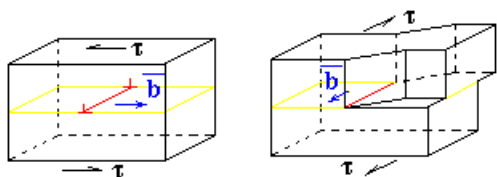
2 学习第三章的第五节，完成习题 19~22。

#### 习题

19 位错运动通常具有哪两种形式，它们的区别何在。

20 简述刃型位错和螺型位错在运动形式上的差异。

21 （1）请问图示分别是何种位错。（2）指出位错运动的方向。（3）作图表示位错在应力的作用下运动出晶体后，晶体所发生的变化。



22 在简单立方晶体中，假定有一刃型位错 A，其柏氏矢量为  $b_1=a[0-10]$ ，沿着 (100) 晶面滑移，(a) 请在三维晶格图中画出位错 A。(b) 如果有另一个刃型位错 B，柏氏矢量为  $b_2=a[010]$  方向，沿着 (001) 晶面上运动，请画出位错 B。(c) 如果位错 B 运动经过位错 A，请问位错 A 将发生什么情况？请作图表示。(d) 如果有一个柏氏

矢量为  $b_3=a[100]$ ，并在  $(001)$  晶面上滑动的螺型位错 C 通过位错 A，首先请画出位错 C。若位错 C 运动经过位错 A，试问位错 A 将发生什么情况？请作图表示。

### 第三章内容和习题（六）

#### 提示

在前面的学习中，我们通过简单立方晶体结构为代表，得到了位错知识和一般讨论。实际金属材料具有面心立方、体心立方和密排六方等结构。在不同的晶体结构中位错的组态和性质是不同的，它们对晶体性能也有不同的影响。

界面是一种面缺陷，如晶体的外表面，在外表面上的原子与内部的原子相比，外表面的原子处于不平衡位置，所以，晶体的外表面是一种缺陷。类似的缺陷还有好几种。

#### 本节课的要求

- 1 掌握位错反应的判断，理解全位错、不全位错、扩展位错的概念，了解弗兰克不全位错和肖克莱不全位错的形成。掌握面缺陷的种类，掌握晶界，亚晶界，相界，共格界，孪晶界的概念。
- 2 学习第三章的第六和七节，完成习题 23~25。

#### 习题

- 23 位错反应的基本条件是什么？指出面心立方（fcc）和体心立方（bcc）中的特征位错（以最短点阵矢量为柏矢量的位错），并判断第六节中第 5 页和第 14 页的位错反应是否可以进行，为什么。
- 24 何谓全位错、不全位错？说明弗兰克不全位错是如何形成的。
- 25 指出面缺陷的种类。若将一个包含有许多晶粒的晶体加热，请问，

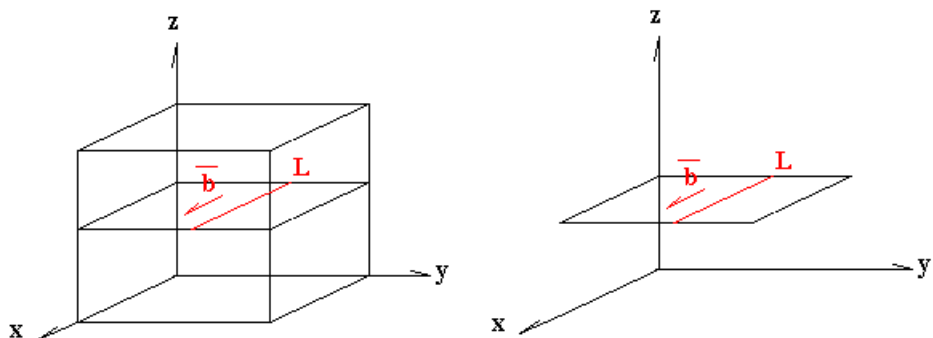
随加热时间的延长或加热温度的提高, 这些晶粒将长大还是缩小还是不变? 为什么?

注意 1: 作柏氏矢量时, 先要确定一个坐标, 然后在有缺陷的晶体中画个柏氏回路, 再在理想晶体中依样画个回路, 从终点至起点连线即为柏氏矢量, 用数学式来表示这个矢量。

注意 2: 在画位错时, 通常将位错线与柏矢量画在同一个平面上, 这个平面一般是滑移面。如下题:

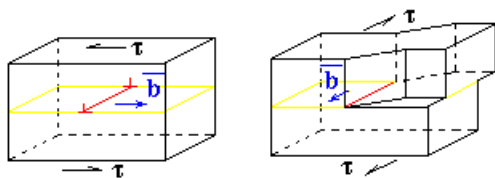
18 在简单立方晶体中, 假如有一个螺型位错 **B**, 柏氏矢量为  $\mathbf{b} = a[100]$ , 并在 (001) 晶面上滑动, 请在三维晶格图中画出位错 **B**。

下图中的两种画法都是可以的, 其中, **L** 为位错线, **b** 为柏矢量。

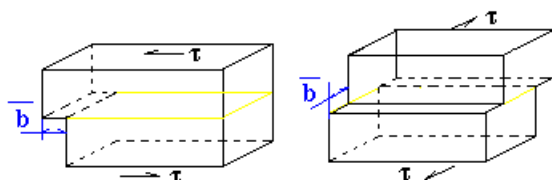


注意 3：位错线正方向的判断：一般规定，位错线从里到外、从上到下为其正方向

注意 4：21 （1）请问图示分别是何种位错。（2）指出位错运动的方向。（3）作图表示位错在应力的作用下运动出晶体后，晶体所发生的变化。



为正刃型位错和右螺型位错，图中红线为位错线，位错都将向左运动，位错运动出晶体后晶体的变化如下图



### 第三章习题参考答案

#### 1 何谓理想晶体，何谓晶体缺陷

由于局部地方格点的破坏导致平移操作无法完整地复制。这样的晶体，我们就称之为含缺陷的晶体，对称性破坏的局部区域称为晶体缺陷。

#### 2 缺陷可以分为几类？对每一类缺陷说出一种具体的缺陷名称。

点缺陷（空位）、线缺陷（位错）、面缺陷（晶界）。

#### 3 点缺陷的存在，对晶体结构将造成怎样的影响？对晶体的性能将造成怎样的影响？形成点缺陷的驱动力是什么？

点缺陷周围，原子间的相互作用力失去平衡，出现弹性畸变区。

导致电阻上升、密度的减小、比热和机械性能的变化

使原子脱离平衡位置的动力，称为形成点缺陷的驱动力，可以是温度、离子轰击、冷加工等等。

#### 4 何谓肖脱基空位、弗仑克尔空位、点缺陷的平衡浓度

离位原子迁移到晶体的表面或晶界，此时在晶体内部留下的空位叫肖脱基空位(简称肖氏空位)。离位原子挤入晶体的间隙位置，在晶体内部同时形成数目相等空位和间隙原子，这种空位叫弗仑克尔空位。

一定温度下，点缺陷的数目是一定的，这就是点缺陷的平衡浓度。



5 已知铁的空位形成能为  $104.6\text{kJ/mol}$ 。试问，(1) 从  $20^\circ\text{C}$  加热到  $850^\circ\text{C}$ ，空位的数目将增加多少倍？(2) 若将加热后的铁快速淬冷到  $20^\circ\text{C}$ ，这些“额外”的空位会消失吗？

(1) 空位平衡浓度公式： $C_v = A \exp(-E_v / kT)$ ，从  $20^\circ\text{C}$  加热到  $850^\circ\text{C}$ ，空位的数目将增加倍数为  $= C(850^\circ\text{C}) / C(20^\circ\text{C}) = \exp(-104.6 \times 1000 / 8.31 / 1123) / \exp(-104.6 \times 1000 / 8.31 / 293) = 6.2 \times 10^{13}$

(2) 若将加热后的铁快速淬冷到  $20^\circ\text{C}$ ，这些“额外”的空位不会消失

6 简述：位错概念是在怎样的情况下被提出的，位错概念的提出首先解决了什么问题。

晶体滑移的临界切应力计算值与实验值相差过大，泰勒(Taylor)提出了位错的局部滑移来解释晶体的塑性形变。位错概念的提出解决了理论强度与实验值差别过大的问题。

7 位错有哪两种类型，简述它们的几何特点。

位错有两种基本类型：刃型位错和螺型位错。

刃型位错的几何特征：(1)位错线与其滑移矢量  $\mathbf{d}$  垂直，刃型位错可以为任意形状的曲线。(2)有多余半原子面。(3)刃型位错可人为地分为正和负两种，多余半原子面在滑移面以上的位错称为正刃型位错，反之为负刃型位错。

螺位错的几何特征：(1)螺位错线与其滑移矢量  $\mathbf{d}$  平行，故纯螺位错

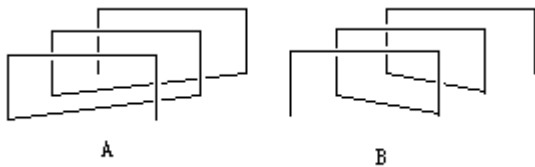
只能是直线。(2)根据螺卷面的不同，螺位错可分左和右两种，当螺卷面为右手螺旋时，为右螺位错，反之为左螺位错。(3)螺位错没有多余原子面，它周围只引起切应变而无体应变。

8 (1) 请说明柏氏矢量的物理意义。(2) 先在一个简单立方（点阵常数为  $a$ ）的二维晶格中画出一个正刃型位错，再用柏氏回路求出正刃型位错的柏氏矢量，并具体写出柏氏矢量的方向和大小。

(1) 柏氏矢量是对位错周围晶体点阵畸变的叠加， $b$  越大，位错引起的晶体弹性能越高。

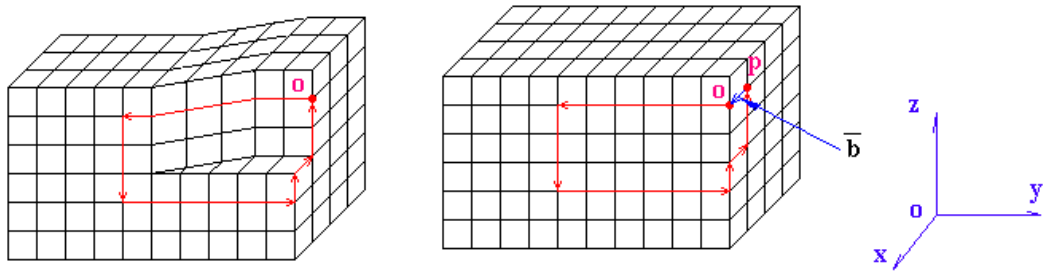
(2) 略，0。

9 判断图 (1) 中螺旋的方向（是右螺旋还是左螺旋）。



A 为左螺旋，B 为右螺旋。

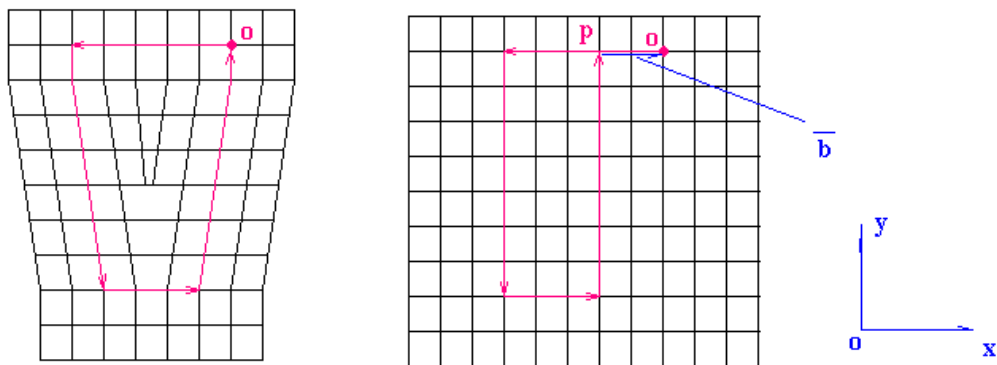
10 判断图中为何位错，求图 (2) 中位错的柏氏矢量（为简单立方晶胞，点阵常数为  $a$ ）。



图中 O 为起点，P 为终点，PO 为柏矢量， $b=a[100]$ 。

11 求图（3）中位错的柏矢量（为简单立方晶胞，点阵常数为 a）。

图中 O 为起点，P 为终点，PO 为柏矢量， $b=2a[100]$ 。



12 何谓位错的应变能。位错是热力学平衡缺陷还是不平衡缺陷。

位错在晶体中引起畸变，使晶体产生畸变能，称之为位错的应变能或位错的能量。

位错是热力学不平衡缺陷。

13 何谓位错的线张力，其估算值为多少。

线张力的定义为：位错线增加一个单位长度时，引起晶体能量的增加。

通常用  $Gb^2/2$  作为位错线张力的估算值。

14 当两个位错相遇时，定性地判断：同号位错将如何，异号位错将如何。（课后：请从应变能的角度对此进行判断。）

同号位错相斥，异号位错相吸。

假设有两个柏矢量都为  $b$  的正刃型位错，当它们相离时，系统的能量为  $b^2+b^2=2b^2$ ，若它们相近时，系统的能量为  $(b+b)^2=4b^2$ ，所以，两个位错将相离。

再假设有一个柏矢量为  $b$  的正刃型位错和一个柏矢量为  $-b$  的负刃型位错，当它们相离时，系统的能量为  $b^2+(-b)^2=2b^2$ ，若它们相近时，系统的能量为  $[b+(-b)]^2=0$ ，所以，两个位错将相吸。

15 请简要的说明：（1）位错是一种线缺陷，（2）缺陷的存在，一般是使体系的能量上升还是下降？使体系处于稳定状态还是非稳定状态？

(1) 在垂直位错线的截面上，仅有少量的原子处于畸变状态，而在位错线的长度方向上有非常多的原子处于畸变状态，所以，位错是一种线缺陷。

(2) 缺陷的存在，一般使体系的能量上升，使体系处于非稳定状态。

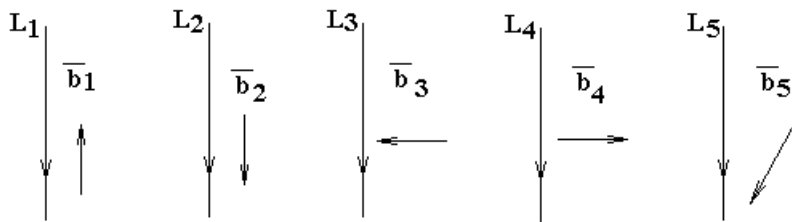
16 请简要说明：（1）刃型位错周围的原子处于怎样的应力状态（为切应力还是正应力，为拉应力还是压应力）；(2)若有间隙原子存在，则间隙原子更容易存在于位错周围的哪些位置（可以以图示的方式说

明)。

(1)刃型位错不仅有正应力同时还有切应力。所有的应力与沿位错线的方向无关，应力场与半原子面左右对称，包含半原子面的晶体受压应力，不包含半原子面的晶体受拉应力。

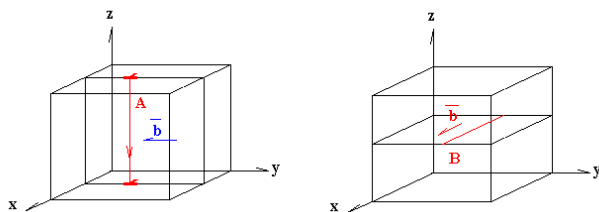
(2)对正刃型位错，滑移面上方的晶胞体积小于正常晶胞，吸引比基体原子小的置换式溶质原子或空位；滑移面下方的晶胞体积大于正常晶胞，吸引间隙原子和比基体原子大的置换式溶质原子。

17 请判断如下为何种位错：



左螺型位错，右螺型位错，负刃型位错（半原子面在纸背面），正刃型位错（半原子面在纸正面），混合位错。

18 在简单立方晶体中，假定有一刃型位错 A，其柏氏矢量为  $b_1=a[0-10]$ ，沿着 (100) 晶面滑移；假如还有一个螺型位错 B，柏氏矢量为  $b_2=a[100]$ ，并在 (001) 晶面上滑动，请在三维晶格图中画出位错 A 和 B。



19 位错运动通常具有哪两种形式，它们的区别何在。

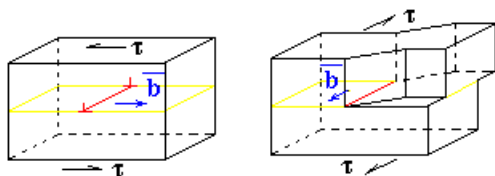
位错运动通常分滑移和攀移。滑移是位错在滑移面内的运动，攀移是位错垂直滑移面的运动。

20 简述刃型位错和螺型位错在运动形式上的差异。

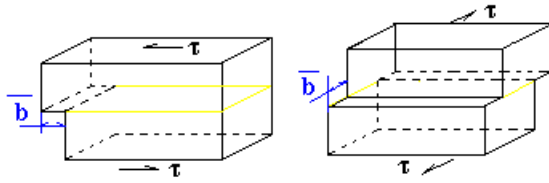
刃型位错可以滑移和攀移，螺型位错仅能滑移。

21 （1）请问图示分别是何种位错。（2）指出位错运动的方向。（3）

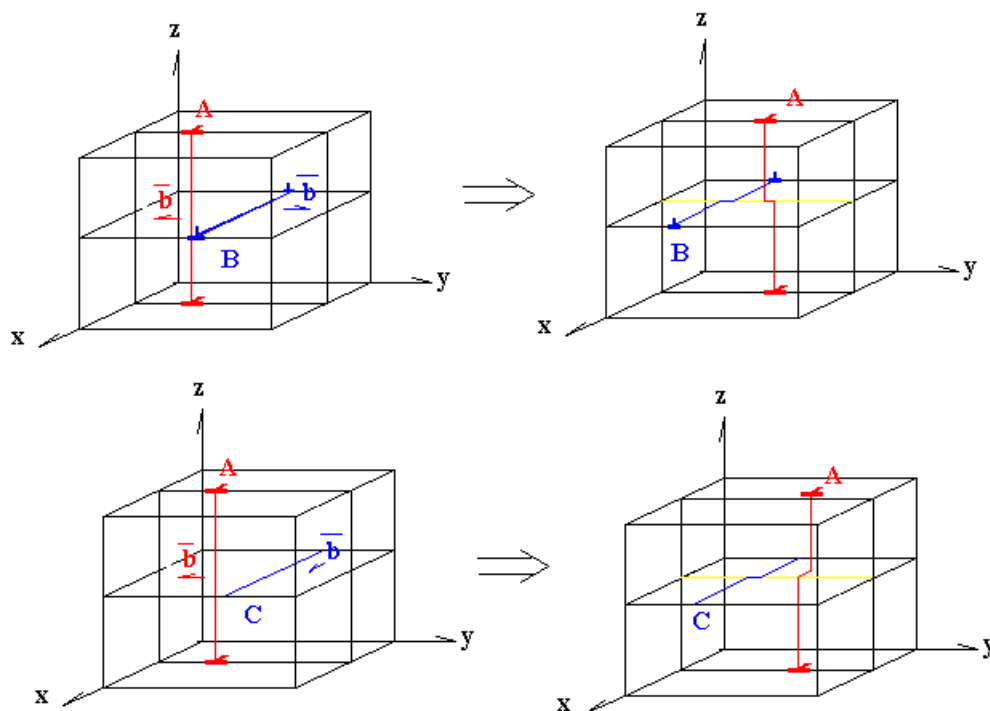
作图表示位错在应力的作用下运动出晶体后，晶体所发生的变化。



为正刃型位错和右螺型位错，位错都将向左运动，位错运动出晶体后晶体的变化如下图



22 在简单立方晶体中，假定有一刃型位错 A，其柏氏矢量为  $b_1=a[0-10]$ ，沿着 (100) 晶面滑移，(a) 请在三维晶格图中画出位错 A。(b) 如果有另一个刃型位错 B，柏氏矢量为  $b_2=a[010]$  方向，沿着 (001) 晶面上运动，请画出位错 B。(c) 如果位错 B 运动经过位错 A，请问位错 A 将发生什么情况？请作图表示。(d) 如果有一个柏氏矢量为  $b_3=a[100]$ ，并在 (001) 晶面上滑动的螺型位错 C 通过位错 A，首先请画出位错 C。若位错 C 运动经过位错 A，试问位错 A 将发生什么情况？请作图表示。



23 位错反应的基本条件是什么？指出面心立方（fcc）和体心立方（bcc）中的特征位错（以最短点阵矢量为柏矢量的位错），并判断第六节中第 5 页和第 14 页的位错反应是否可以进行，为什么。

位错反应的两个条件：

(1)几何条件  $\Sigma \mathbf{b}_{\text{前}} = \Sigma \mathbf{b}_{\text{后}}$ 。

(2)能量条件  $\Sigma b^2_{\text{后}} < \Sigma b^2_{\text{前}}$ 。

fcc:  $\mathbf{b} = 1/2 \langle 110 \rangle$ ; bcc:  $\mathbf{b} = 1/2 \langle 111 \rangle$ 。

可以进行。

对于 P5 :  $\Sigma \mathbf{b}_{\text{前}} = [\mathbf{100}] + [\mathbf{001}] = [\mathbf{101}]$ ,  $\Sigma \mathbf{b}_{\text{后}} = 1/2[\mathbf{111}] + 1/2[\mathbf{1-11}] = [\mathbf{101}] = \Sigma \mathbf{b}_{\text{前}}$

$$\Sigma b^2_{\text{前}} = 1 + 1 = 2, \Sigma b^2_{\text{后}} = 1/4 \sqrt{3} + 1/4 \sqrt{3} = 1/2 \sqrt{3} < \Sigma b^2_{\text{前}}$$

对于 P14 :  $\Sigma \mathbf{b}_{\text{前}} = 1/2[\mathbf{-110}]$ ,  $\Sigma \mathbf{b}_{\text{后}}$



$$=1/6[-12-1]+1/6[-211]=1/6[-330]=1/2[-110]=\Sigma b_{\text{前}}$$

$$\Sigma b^2_{\text{前}}=1/4 \sqrt{2}, \Sigma b^2_{\text{后}}=1/36 \sqrt{6}+1/36 \sqrt{6}=1/18 \sqrt{6} < \Sigma b^2_{\text{前}}$$

前

24 何谓全位错、不全位错？说明弗兰克不全位错和肖克莱不全位错分别是如何形成的。

将柏矢量等于滑移方向原子间距整数倍的位错称为全位错。

位错柏矢量小于滑移方向的原子间距，这种位错称为不全位错。

如果在完整 fcc 晶体的{111}面间插入或抽出半个原子面，这样形成的层错边界就是弗兰克不全位错。

在面心立方晶体的(111)面上，把任意一层原子面以上的部分晶体沿[-12-1]方向作相对滑移，滑移距离为  $a/6$ ，结果在晶体内部的局部地方产生了堆垛方式为“ABCABABC”的错排面——即层错，层错的边界就是肖克莱不全位错。

25 指出面缺陷的种类。若将一个包含有许多晶粒的晶体加热，请问，随加热时间的延长或加热温度的提高，这些晶粒将长大还是缩小还是不变？为什么？

面缺陷包括晶界、相界、表面等。若将一个包含有许多晶粒的晶体加热，随加热时间的延长或加热温度的提高，这些晶粒将长大。随着晶粒的长大，晶界总面积将下降，所以，晶粒长大过程是一个自发的过程。

## 第四章内容和习题

### 提示

在液体和气体中很容易感觉到扩散现象，如一滴蓝墨水滴入一杯清水中，逐渐地整杯水都变成蓝色了，这是由于蓝墨水扩散的结果。对于固体，扩散较难被感觉到。但是，扩散对于固体是非常重要的。在学习过程中，可以借助于已经熟悉的液体和气体中的扩散现象来理解固体中的扩散。

扩散过程伴随有浓度的变化，若浓度不随扩散时间而变，则为稳态扩散，此时适用第一定律。用扩散第一定律可以分析相应的扩散过程。若浓度随扩散时间而变，则为非稳态扩散，此时适用第二定律，第二定律的不同解分别对应了不同的适用场合。

### 本节课要求

- 1 理解固体中的扩散现象及其与原子运动的关系，掌握扩散的条件。理解稳态扩散和非稳态扩散的概念，掌握扩散第一适用的场合及其对相应的扩散过程进行分析的方法。
- 2 学习 1、2 节，完成习题 1~3。

### 习题

- 1 描述在金属固体中发生扩散时，原子是如何运动的。指出扩散的条件。
- 2 何谓稳态扩散、非稳态扩散，指出第一定律适用的场合。
- 3 有一球壳，内半径为  $r_1$ ，外半径为  $r_2$ 。在  $T$  温度保温，有物质从

球壳内向球壳外扩散，当扩散达到平衡后，球壳内表面扩散物质的浓度为  $C_1$ ，外表面的浓度为  $C_2$ ，并测得在单位时间内从球壳内向球壳外扩散的物质总量为  $Q$ 。设扩散系数为常数。求：

A, 扩散系数。

B,  $r=(r_1+r_2)/2$  处的浓度。

(提示：对第一定律进行定积分)

## 主要内容

第一节 扩散条件

第二节 扩散定律的描述，第二定律在渗碳中的应用，

第三节 换位机制，空位机制，间隙机制， $D = D_0 \exp(-Q/RT)$  中参数的物理意义，

第四节 柯肯达尔效应描述及其意义

第五节 针对  $D = D_0 \exp(-Q/RT)$  说明影响扩散的因素

## 第四章内容和习题

### 提示

扩散过程伴随有浓度的变化，若浓度不随扩散时间而变，则为稳态扩散，此时适用第一定律。用扩散第一定律可以分析相应的扩散过程。若浓度随扩散时间而变，则为非稳态扩散，此时适用第二定律，第二定律的不同解分别对应了不同的适用场合。

### 本节课要求

- 1 了解扩散第二定律的描述,掌握扩散第二定律适用的场合及其对相应的扩散过程进行分析的方法。
- 2 学习 2 节,完成习题 4~5。

### 习题

- 4 简述第二定律中的不同解分别适用的场合。
- 5 对于第二节第 15 页上的例子,问:扩散  $7 \times 10^7 \text{s}$  后,表面、距表面 4 和  $8 \mu\text{m}$  处的硼浓度分别是多少? ( $1100^\circ\text{C}$  时硼在硅中的扩散系数  $D$  为  $4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ , 硼膜质量为  $M=9.43 \times 10^{19}$  原子/ $\text{m}^2$ )

## 第四章内容和习题

### 提示

扩散第二定律的误差函数解适用于渗碳过程,渗碳过程是指:将含碳量小于 0.2% 的铁碳合金,放入含碳量为 1% 左右的富碳气氛中(也可以放入富碳的液体或固体中),加热到  $900^\circ\text{C}$  左右,保温几个或十几个小时后,使合金的表面获得几个或几十个微米厚的含碳量为 1% 左右的富碳层,而心部的含碳量仍然是 0.2%。汽车变速箱中的齿轮通常都经过渗碳处理。利用扩散第二定律可以有效地控制渗碳过程。

扩散的本质是原子的迁移运动,原子如何从一位置移动到二位置,

对于置换原子和间隙原子来说是不同的，也就是它们的扩散机制是不同的。

### 本节课的要求

- 1 掌握几种重要的扩散机制的描述及其适用的对象，掌握扩散系数的概念及其表达式的物理意义。
- 2 学习 3 节，完成习题 6、7。

### 习题

- 6 简述置换原子和间隙原子的扩散机制。
- 7 钢可以在 870℃ 渗碳也可以在 930℃ 渗碳，问：A) 计算钢在 870℃ 和 930℃ 渗碳时，碳在钢（奥氏体）中的扩散系数。已知  $D_0 = 2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ， $Q = 144 \times 10^3 \text{ J/mol}$ 。B) 在 870℃ 渗碳要用多长时间才能获得 930℃ 渗碳 10 小时的渗层深度？（渗层深度：在浓度—距离曲线中，某一浓度所对应的离表面的距离。）  
(提示：对 A，使用公式： $D = D_0 \exp(-Q/RT)$ 。对 B，使用扩散第二定律中的误差函数解 4-18 式，因为渗层深度相同，所以 C、C1、C2、t 都相等。)

### 第四章内容和习题

#### 提示

柯肯达尔效应的提出，对于认识固体中原子的扩散机制是有重要意义的。

温度、晶体结构和化学成分对扩散有重要的影响。公式： $D = D_0 \exp(-Q/RT)$ 反映了温度（T）、晶体结构和成分（ $D_0$ 和 Q）对扩散的影响。

### 本节课的要求

- 1 掌握柯肯达尔效应的描述，理解柯肯达尔效应的意义。掌握温度和晶体结构对扩散的影响。
- 2 学习 4、5 节，完成习题 8~9。

### 习题

- 8 何谓柯肯达尔效应，简述柯肯达尔效应的意义。
- 9 简述影响扩散的因素（从温度、晶体结构两方面来简述）

第四章习题参考答案

1 描述在金属固体中发生扩散时，原子是如何运动的。指出扩散的条件。

原子做定向迁移，这一定向是统计概念的定向。扩散的条件是：驱动力、温度、时间。

2 有一球壳，内半径为  $r_1$ ，外半径为  $r_2$ 。在  $T$  温度保温，有物质从球壳内向球壳外扩散，当扩散达到平衡后，球壳内表面扩散物质的浓度为  $C_1$ ，外表面的浓度为  $C_2$ ，并测得在单位时间内从球壳内向球壳外扩散的物质总量为  $Q$ 。设扩散系数为常数。求：

C， 扩散系数。

D，  $r=(r_1+r_2)/2$  处的浓度。

(提示：对第一定律进行定积分)

A， 已知半径为  $r$  处的球壳表面积为  $4\pi r^2$ ，则  $J=Q/(4\pi r^2)$ ，将第一定律方程中的  $x$  换成  $r$ ，并将  $J=Q/(4\pi r^2)$  待入，获得  $J=Q/(4\pi r^2)=-DdC/dr$ (式 1)，对  $C$  和  $r$  进行定积分， $C$  为  $C_1\sim C_2$ ， $r$  为  $r_1\sim r_2$ ，可以求得  $D$ 。

B， 将  $D$  值待入式 1，再次进行定积分，此次， $C$  为  $C_1\sim C$ ， $r$  为  $r_1\sim (r_1+r_2)/2$ ，可以求得  $C$ 。

3 简述第二定律中的不同解分别适用的场合。

高斯解适用于扩散过程中扩散元素质量保持不变，其值为  $M$ 。扩散开

始时扩散元素集中在表面，好像一层薄膜。高斯解用得比较多的情况是在工件表面涂有一层扩散物质，这是要保证扩散物质总量  $M$  不变。例如制作半导体元件时，常先在硅表面沉积一薄膜，然后加热使之扩散。

误差函数解适用于无限长棒或半无限长棒的问题。如：渗碳过程。

正弦解适用于计算薄片扩散时间较长的扩散问题。经常用来计算均匀化扩散退火一类问题。

4 对于第二节第 15 页上的例子，问：扩散  $7 \times 10^7 \text{s}$  后，表面、距表面 4 和  $8 \mu\text{m}$  处的硼浓度分别是多少？（ $1100^\circ\text{C}$  时硼在硅中的扩散系数  $D$  为  $4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ ，硼膜质量为  $M=9.43 \times 10^{19}$  原子/ $\text{m}^2$ ）

由高斯解可求得扩散  $7 \times 10^7 \text{s}$  后表面（ $x=0$  处）硼的浓度为：

$$C = 9.43 \times 10^{19} / (4 \pi \times 10^{-7} \times 7 \times 10^7)^{-1/2} = 1.66 \times 10^{-8} \text{kg/m}^3$$

$$\text{距表面 4 和 } 8 \mu\text{m} \text{ 处: } C = 1.66 \times 10^{-8} \text{kg/m}^3$$

5 简述置换原子和间隙原子的扩散机制。

置换原子是空位机制，间隙原子是间隙机制。

6 何谓柯肯达尔效应，简述柯肯达尔效应的意义。

把扩散偶中由于扩散系数不同而引起对接面移动的现象称为柯肯达尔效应。

首先，柯肯达尔效应直接否定了置换式固溶体扩散的换位机制，支持



了空位机制。另外，柯肯达尔效应还说明，在扩散系统中，每一组元都有自己的扩散系数。

7 简述影响扩散的因素（从温度、晶体结构两方面来简述）

温度：随温度升高，扩散速度大大加快。

晶体结构包括：

结构类型——面心立方的扩散系数小于体心立方；固溶体类型——间隙原子扩散系数大于置换原子；晶体缺陷处扩散系数大于非缺陷处，当温度低时尤其这样；等等。

8 钢可以在 870℃ 渗碳也可以在 930℃ 渗碳，问：A) 计算钢在 870℃ 和 930℃ 渗碳时，碳在钢（奥氏体）中的扩散系数。已知  $D_0 = 2.0 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ， $Q = 144 \times 10^3 \text{J/mol}$ 。B) 在 870℃ 渗碳要用多长时间才能获得 930℃ 渗碳 10 小时的渗层深度？（渗层深度：在浓度—距离曲线中，某一浓度所对应的离表面的距离。）

(提示：对 A，使用公式： $D = D_0 \exp(-Q/RT)$ 。对 B，使用扩散第二定律中的误差函数解 4-18 式，因为渗层深度相同，所以 C、C1、C2、x 都相等。)

$$A, D(870^\circ\text{C}) = D_0 \exp(-Q/RT) = 2 \times 10^{-5} \exp(-144 \times 1000 / 8.31 / 1143) = 5.2 \times 10^{-12}$$

$$D(930^\circ\text{C}) = D_0 \exp(-Q/RT) = 2 \times 10^{-5} \exp(-144 \times 1000 / 8.31 / 1193) = 0.98 \times 10^{-11}$$

B, 因为 C、C1、C2、x 都相等, 所以有:  $D_1t_1=D_2t_2$ , 所以,  $t=9.8/0.52=19(h)$

## 第五章 (071226) 上机内容及习题

### 本节课提示:

- 1 匀晶转变是在液相中结晶出一个结构的固相,若在结晶过程中同时结晶出两种不同结构的固相,则这种转变叫共晶转变。
- 2 从液相中同时结晶出的两个固相,通常具有特定的组态形貌,用光学显微镜可以观察到它们的组态形貌,称为共晶组织。组织与相是两个不同的概念,组织反映在光学显微镜中可以观察到的组态形貌,相是指结构,即原子排列方式。
- 3 随着温度的下降,在液相中将结晶出固相。这种从液相中结晶出的固相一般称为一次相。对于某些合金来说,随着温度的下降,在其固相中还会析出另一种不同结构的固相,新析出的固相称为二次相。二次相的结构与其一次相的结构相同,但是,组织通常是不同的。
- 4 由一个液相和固相同时结晶出另一个固相的转变叫包晶转变,与共晶转变相类似,在包晶转变过程中,处于三相平衡。

### 本节课要求

- 1 掌握共晶转变、共晶相图、亚(过)共晶合金、共晶合金、先共晶相、二次析出相、共晶组织、伪共晶、不平衡共晶、离异共晶的概念,掌握具有共晶转变的二元合金的平衡结晶过程分析,平衡相和平衡组织的计算,了解不平衡冷却过程的组织变化规律,了解共晶形貌和初晶形貌的形成规律。
- 2 掌握包晶转变、包晶相图概念,掌握具有包晶转变的二元合金的平衡结晶过程分析,掌握平衡相和平衡组织的计算,了解包晶转变在实

际生产中的应用。

3 完成习题 1~3。

### 习题

1 在匀晶转变中, 结晶的固相, 其成分与合金的成分是否一样? 与液相的成分是否一样? 若不一样, 请指出何种成分的含量提高了 (以 Ni - Cu 合金为例)。

2 对于含 Sn19%的 Pb-Sn 合金(图 5-18 中的 C 点成分的合金), 请问,

- (1) 在平衡结晶过程中有否发生共晶转变?
- (2) 请画出平衡冷却曲线, 计算平衡冷却至室温时的平衡相和平衡组织的相对量;
- (3) 若含 Sn 量小于 19%, 其冷却曲线将有怎样的变化? 此时的平衡相和平衡组织分别是什么? 平衡相和平衡组织的相对量将发生怎样的变化?
- (4) 若含 Sn 量大于 19%, 如为 50%, 其冷却曲线将有怎样的变化? 此时的室温平衡相和平衡组织分别是什么? 计算室温平衡相和平衡组织的相对量。
- (5) 含 Sn19%的 Pb-Sn 合金在不平衡结晶过程中, 会发生共晶转变吗? 为什么?

3 对于含 Ag30%的 Ag-Pt 合金 (合金的相图在图 5-38), 要求: (1) 请画出平衡结晶的冷却曲线 (2) 计算平衡冷却至室温时的平衡相和平衡组织的相对量 (3) 画出室温组织示意图。

## 第五章（071228）上机内容及习题

### 本节课要求

- 1 掌握 Fe-C 合金的相结构（铁素体，奥氏体，渗碳体）及其成分，掌握 Fe-C 合金的组织（铁素体，珠光体，莱氏体，一次渗碳体，二次渗碳体，三次渗碳体）及其形貌和成分，掌握 Fe-C 合金的平衡结晶过程分析，平衡相、平衡组织及其相对量计算，了解 Fe-C 合金的成分与性能关系
- 2 学习第九节，并完成习题 4~5。

### 习题

- 4 指出铁与碳可以组成哪些相结构，哪些组织，写出具体的相结构名称和组织名称。
- 5 含碳 0.45% 和 3.5% 的铁碳合金分别称为何种合金。分析它们的平衡结晶过程，画出冷却曲线，写出它们的室温平衡相和平衡组织的组成，计算室温平衡相相对量和平衡组织相对量。比较这两种合金的力学性能，并指出造成性能差异的原因。

## 第五章（080104）内容及习题

## 引言

### 本次提示:

#### 三元合金相图

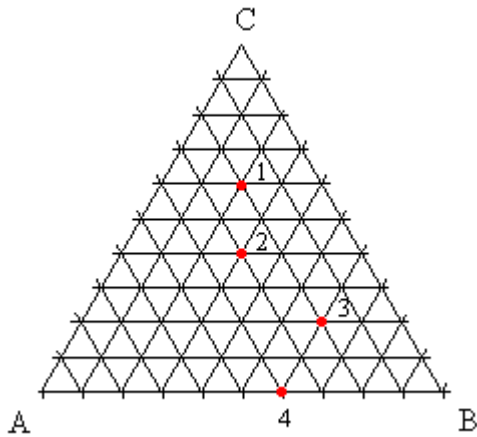
- 1 三元合金的相图是一个空间立体图，由底三角形和垂直底三角形的温度坐标组成。
- 2 通常使用等温截面和垂直截面来表示三元相图。其中，等温截面反映了在该温度下的平衡情况，可以使用杠杆定律和重心法则。垂直截面反映了合金的凝固过程中的相变化情况。
- 3 请同学们思考：三元合金，当处于三相平衡时，自由度为多少？此时的冷却曲线是否有平台？

### 本节课要求

- 1 掌握相平衡的公切线法则，理解自由能—成分曲线与简单二元相图的关系。
- 2 掌握三元合金相图中成分三角形及其成分的标注方法，掌握成分三角形中的特殊线的意义，掌握直线法则、杠杆定律、重心法则的含义和适用的场合，掌握匀晶相图平衡结晶过程分析（连接线方向、连接线走向）。
- 3 掌握三元简单共晶相图中不同相区的位置，掌握二元共晶转变、三元共晶转变特点，掌握具有共晶转变的三元合金的平衡结晶过程的分析，了解其水平截面和垂直截面的不同形状。
- 4 学习第十节，并完成习题 7~10。

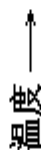
## 习题

6 请写出下图中四点的成分。示意性地画出 A 与 B 含量之比为常数的合金成分变化线和 B 含量为常数的合金成分变化线。



7 在三元合金中，描述杠杆定律及其应用的场合，描述重心法则及其应用的场合。

8 下图是 A—B—C 三元合金的等温截面 ( $T_1$ ) 和垂直截面，假定 A、B、C 在液态完全互溶，在固态也完全互溶，并且  $T_A > T_1 > T_B > T_C$ ，其中  $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$  分别为组元 A、B、C 的熔点。有合金 O，其成分如图所示。试求：(1) 请写出合金 O 的成分；(2) 分析合金 O 的平衡结晶过程，并画出冷却曲线；(3) 合金在  $T_1$  时处于什么状态；(4) 请判断题中合金 O 在等温截面图中可能的连接线，并计算两平衡相的相对量。



10 针对图 5-112，分别分析 E 点成分的合金、EE1 线上成分的合金、EA'线上成分的合金的平衡冷却过程：（1）画出冷却曲线（2）写出平衡反应式。



## 第五章（七）内容及习题

### 引言

#### 三元合金相图

- 1 三元合金的相图是一个空间立体图，由底三角形和垂直底三角形的温度坐标组成。
- 2 通常使用等温截面和垂直截面来表示三元相图。其中，等温截面反映了在该温度下的平衡情况，可以使用杠杆定律和重心法则。垂直截面反映了合金的凝固过程中的相变化情况。

#### 本节课要求

- 1 掌握三元匀晶相图中水平截面、垂直截面的使用，掌握平衡相的计算，平衡冷却过程的分析方法。
- 3 学习第十节，并完成习题 18~20。

### 习题

### 第五章参考答案

1 简述相图的组成、作用，具体描述一种制作相图的方法。

相图组成：组元、温度、相结构。

作用：反映成分、温度、平衡状态之间的关系。

制作方法：（略）

2 简述相律中各项的含义，应用相律说明在常压下，一元、二元和三元系统中最大的相数各是多少？

$f=c-p+2$ 。f：自由度；c：组元数；p：平衡相数；2：温度和压力。

常压下，一元、二元、三元系统中最大的平衡相数各为 2、3、4。

3 有 1000g 铜镍二元合金，成分为  $w(\text{Ni})=w(\text{Cu})=50\%$ ，问：（1）合金在何温度开始熔化，何温度开始凝固。与纯铜或纯镍相比，有何差异。（2）将合金加热至完全熔化后，缓慢地冷却至  $1300^\circ\text{C}$  等温，使液、固相平衡，分析出液相的平衡成分为  $w(\text{Ni})=43\%$ ，固相的平衡成分为  $w(\text{Ni})=55\%$ ，计算这时有多少克合金凝固了。（3）若将完全熔化后的合金快速地冷却至  $1300^\circ\text{C}$ ，使液、固两相不处于平衡，请定性指出，此时固相的成分与（2）相比有何差异；固相的量与（2）比有何差异。

（1） $1320^\circ\text{C}$  开始凝固， $1350^\circ\text{C}$  开始熔化。与纯金属相比，纯金属的开始凝固和开始熔化温度为同一个温度，合金是不同的温度。

（2）设有  $x\text{g}$  合金凝固，则有： $1000 \times 0.5 = 0.43(1000-x) + 0.55x$ ，

所以,  $x=583\text{g}$ 。

(3) 快速凝固时, 固相中含镍量增加, 固相量下降。

4 在匀晶转变中, 结晶的固相, 其成分与合金的成分是否一样? 与液相的成分是否一样? 若不一样, 请指出何种成分的含量提高了 (以 Ni-Cu 合金为例)。

固相的成分与合金的成分不同, 含有更多的 Ni, 与液相的成分也不同, 也是含有更多的 Ni。

5 对于 Ni-Cu 合金, 若以平衡结晶, 获得的室温组织的形貌是怎样的? 若以不平衡结晶, 则获得的室温组织的形貌又是怎样的? 并简述原因。(请参考图 5-14 和图 5-17)

若平衡结晶, 获得的室温组织形貌为等轴晶, 以不平衡结晶, 组织形貌为树枝晶。因为: 不平衡结晶时, 先结晶的固相富含高熔点组元, 形成树枝晶的枝干, 最后结晶的固相富含低熔点组元, 处于枝干之间, 腐蚀时不同成分的腐蚀程度不同, 所以显示出树枝晶形貌。

6 对于含 Sn50% 的 Pb-Sn 合金 (Pb-Sn 合金的相图在图 5-18), 要求:

(1) 请画出平衡结晶的冷却曲线 (2) 计算平衡冷却至室温时的平衡相和平衡组织的相对量 (3) 若将合金快速地冷却至伪共晶区后再冷至室温, 则室温组织是什么, 相对量是多少。

(1) 冷却曲线与图 5-21 相似。

(2) 平衡冷却至室温的平衡相为  $\alpha + \beta$  , 相对量为:  $W(\alpha) = (1-0.3) / (1-0.02)$ ,

$$W(\beta) = (0.3-0.02) / (1-0.02)。$$

平衡组织为  $\alpha + \beta_{II} + (\alpha + \beta)$  , 其中  $\alpha + \beta_{II}$  是由先共晶  $\alpha$  产生的,  $(\alpha + \beta)$  为共晶组织, 由液相产生。相对量为:  $W(\alpha + \beta) = W(L) = (0.3-0.19) / (0.619-0.19) = 0.26$ ,

$$\text{所以, } W(\alpha + \beta_{II}) = (0.619-0.3) / (0.619-0.19) = 0.74,$$

$$W(\alpha) = (1-0.19) / (1-0.02) * 0.74,$$

$$W(\beta_{II}) = (0.19-0.02) / (1-0.02) * 0.74$$

(3) 快速冷却至伪共晶区, 室温获得 100% 的共晶组织。

7 对于含 Ag30% 的 Ag-Pt 合金 (合金的相图在图 5-38), 要求: (1) 请画出平衡结晶的冷却曲线 (2) 计算平衡冷却至室温时的平衡相和平衡组织的相对量 (3) 画出室温组织示意图。

(1) 冷却曲线与图 5-39 相似。

(2) 平衡冷却至室温的平衡相为  $\alpha + \beta$  , 相对量为  $W(\alpha) = (Q-0.3) / (Q-P)$ ,

$$W(\beta) = (0.3-P) / (Q-P)。$$

平衡组织为  $\alpha + \beta_{II} + \beta + \alpha_{II}$  , 其中,  $\alpha + \beta_{II}$  由 E 点  $\alpha$  转变而来,  $\beta + \alpha_{II}$  由 D 点  $\beta$  转变而来, 所以有:

$$W(\alpha + \beta_{II}) = W(\alpha_E) = (D-0.3)/(D-E)$$

其中:  $W(\alpha) = (Q-E)/(Q-P) * W(\alpha_E)$ ,  $W(\beta_{II}) = (E-P)/(Q-P) * W(\alpha_E)$

$$W(\beta + \alpha_{II}) = W(\beta_D) = (0.3 - E)/(D - E)$$

其中:  $W(\beta) = (D - P)/(Q - P) * W(\beta_D)$ ,  $W(\alpha_{II}) = (Q - D)/(Q - P) * W(\beta_D)$

(3)组织示意图见图 5-40。

8 指出铁与碳可以组成哪些相结构, 哪些组织, 写出具体的相结构名称和组织名称。

铁与碳可以组成的相结构有: 固溶体 ( $\alpha$ 、 $\gamma$ ) 和化合物 ( $Fe_3C$ ), 组织为铁素体、珠光体、莱氏体、一次渗碳体、二次渗碳体、三次渗碳体。

9 含碳 0.45% 和 3.5% 的铁碳合金分别称为何种合金。分析它们的平衡结晶过程, 画出冷却曲线, 计算室温平衡相相对量和平衡组织相对量。比较这两种合金的力学性能, 并指出造成性能差异的原因。

(1) 含碳 0.45% 的铁碳合金叫亚共析钢,

室温平衡相为  $\alpha + Fe_3C$ ,

$$\text{相对量 } W(\alpha) = (6.69 - 0.45)/(6.69), \quad W(Fe_3C) = (0.45)/(6.69)$$

室温平衡组织为 F+P,

$$\text{相 对 量} \quad W(F) = (0.77 - 0.45)/(0.77 - 0.0218),$$

$$W(P) = (0.45 - 0.0218)/(0.77 - 0.0218)。$$

(2) 含碳 3.5% 的铁碳合金叫亚共晶白口铁,

室温平衡相为  $\alpha + Fe_3C$ ,

相对量  $W(\alpha) = (6.69 - 3.5) / (6.69)$ ,  $W(\text{Fe}_3\text{C}) = (3.5) / (6.69)$

室温平衡组织为  $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + \text{Ld}$ , 其中,  $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  是由先共晶奥氏体产生,  $\text{Ld}$  为莱氏体, 由液相产生。所以有:

相 对 量  $W(\text{Ld}) = (3.5 - 2.11) / (4.5 - 2.11)$ ,  $W(\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}) = (4.5 - 3.5) / (4.5 - 2.11)$ ,

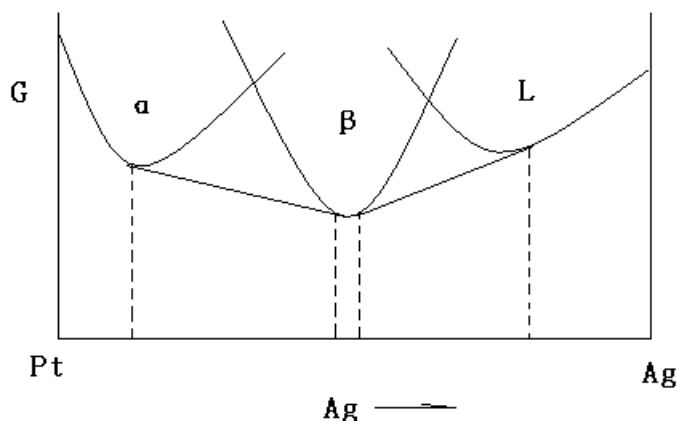
$W(\text{P}) = (6.69 - 2.11) / (6.69 - 0.77) * W(\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}})$

$W(\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}) = (2.11 - 0.77) / (6.69 - 0.77) * W(\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}})$

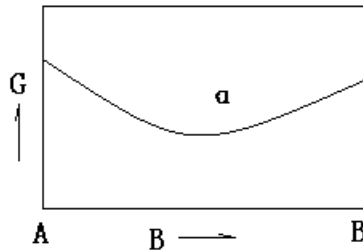
(3) 亚共析钢有一定的强度、硬度和塑性、韧性, 随珠光体量增加, 强度、硬度上升, 塑性、韧性下降。亚共晶白口铁, 由于含有莱氏体, 硬度很高, 塑性、韧性很差, 脆性很大。

10 请描述求解单相固溶体自由能的方法。对于  $\text{Pt-Ag}$  合金, 请示意地画出  $1100^\circ\text{C}$  时的成分—自由能曲线, 以及平衡的情况。

如图



11 请画出金属固溶体的成分—自由能曲线的示意图。

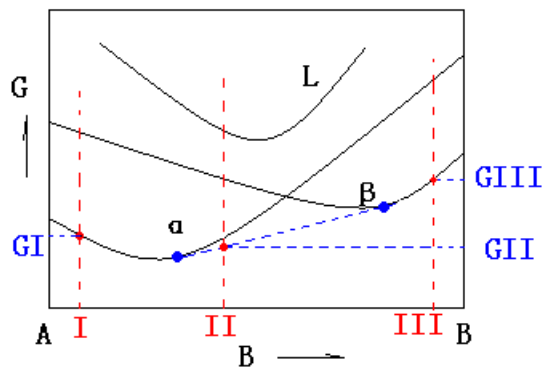


如图

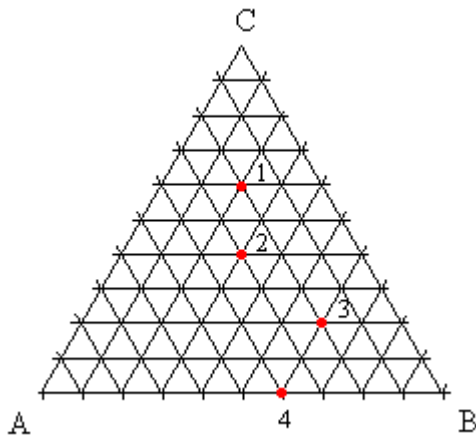
12 已知二元合金 A-B，如图是温度 T 时的三个单相的成分—自由能曲线示意图，其中 L 是液相，另外两个是固相。问：（1）在此温度时，液相是否可以稳定存在，为什么？（2）分析温度 T 时，成分为 I、II、III 的合金，可以存在的平衡相是什么？合金的自由能是多少。

(1) 液相不能稳定存在。

(2) I 合金为  $\alpha$ ，II 合金为  $\alpha + \beta$ ，III 合金为  $\beta$ ，合金的自由能值分别为  $G_I$ 、 $G_{II}$  和  $G_{III}$ ，如图所示。



13 请写出图(2)中四点的成分。示意性地画出 A 与 B 含量之比为常数的合金成分变化线和 B 含量为常数的合金成分变化线。



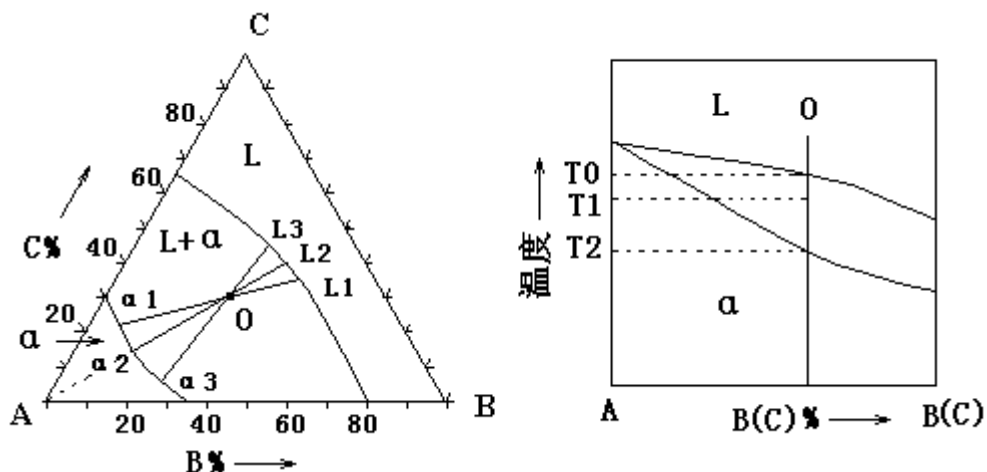
1: A=20%, B=20%, C=60%; 2: A=30%, B=30%, C=40%;

3: A=20%, B=60%, C=20%; 4: A=40%, B=60%, C=0%;

14 在三元合金中，描述杠杆定律及其应用的场合，描述重心法则及其应用的场合。

杠杆定律适用于两相平衡，重心法则适用于三相平衡。

15、图（3）是 A—B—C 三元合金的等温截面（T<sub>1</sub>）和垂直截面，假定 A、B、C 在液态完全互溶，在固态也完全互溶，并且



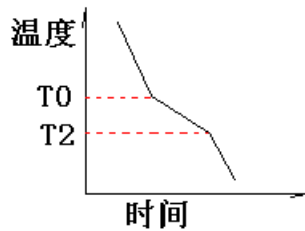
$T_A > T_1 > T_B > T_C$ ，其中  $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$  分别为组元 A、B、C 的熔点。有合金 O，其成分如图所示。试求：（1）请写出合金 O 的成分；（2）分



析合金 O 的平衡结晶过程，并画出冷却曲线；(3) 合金在 T1 时处于什么状态。(4) 请判断图中可能的连接线，并计算两平衡相的相对量。

(1) 成分：A=40%, B=30%, C=30%

(2) 如图



(3)  $L + \alpha$

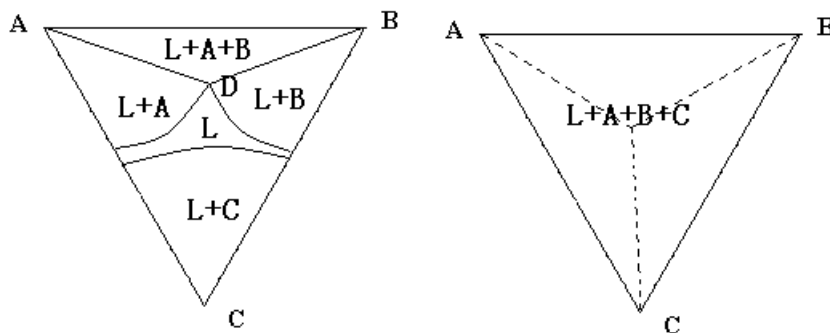
(4) 连接线为  $\alpha_3 L_3$ ，因为：  $T_B > T_C$ ，所以有：  $B_\alpha / C_\alpha > B_O / C_O > B_L / C_L$ ，所以，连接线为  $\alpha_3 L_3$ 。

$$W_\alpha = OL_3 / \alpha_3 L_3, \quad W_L = \alpha_3 O / \alpha_3 L_3,$$

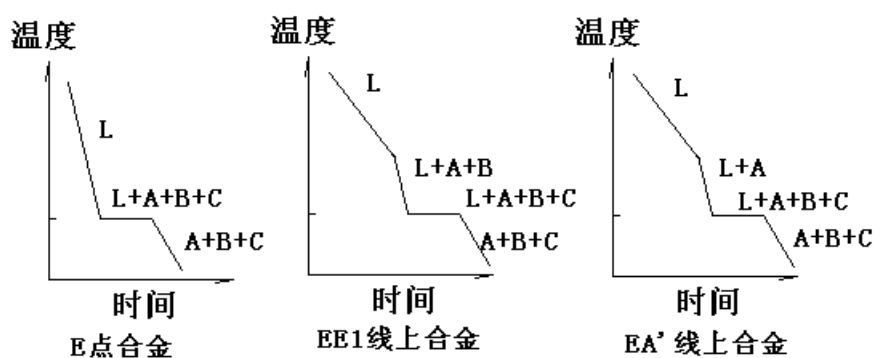
16 A、B、C 三组元在液态完全互溶，在固态完全不互溶，并有共晶反应，其相图如图 5-111 所示，要求：(1) 指出相图中有几个两相区、几个三相区、几个四相区。(2) 分别画出一个两相区、一个三相区和一个四相区的等温截面示意图。

(1) 有三个两相区，四个三相区，一个四相区。

(2) 见图



17 针对图 5-112，分别分析 E 点成分的合金、EE1 线上成分的合金、



EA'线上成分的合金的平衡冷却过程：(1) 画出冷却曲线 (2) 写出平衡反应式。

(1)如图

(2)对 E 点成分的合金:  $L = A+B+C$

EE1 线上成分的合金:  $L = A+B$ ,  $L = A+B+C$

EA'线上成分的合金:  $L = A$ ,  $L = A+B+C$

## 第六章 材料的塑性变形

### 第六章 (080111)

#### 引言

1 从今天开始我们学习第六章，第六章主要学习金属的凝固过程及其

对凝固后组织（晶粒大小、形貌等）的影响。整章内容包括：纯金属的凝固（2~6 节）和合金的凝固（7~9 节）。合金与纯金属相比，主要是增加了成分对凝固过程的影响，当在不平衡凝固时，成分的影响尤其重要。

2 所谓凝固，就是从液体中产生固体。通常，固体是晶体，所以，凝固也叫结晶。

3 液体和固体具有不同的结构（指原子排列），所以，从宏观上来看，凝固过程中发生的液体到固体的转变是个突变过程，但是，从微观上来看，这一转变过程却是个渐变过程。

#### 本节课要求：

1 了解液体金属结构的描述，掌握液体金属结构与固体金属结构的差异。掌握过冷、过冷度概念，理解结晶的基本过程。了解凝固过程的热力学条件的描述。

2 掌握均匀形核、非均匀形核、临界形核半径、临界形核功、形核率的概念，掌握均匀形核的热力学推导，理解形核过程的驱动力与阻力的含义，了解非均匀形核的热力学推导。

3 学习第六章第一、二、三、四节，完成习题 1~5。

#### 习题

1 描述液态金属的结构，指出与固态金属结构的差异。

2 何谓过冷。推导过冷的热力学条件。

- 3 金属凝固过程包括哪两个基本过程。
- 4 指出形核过程的驱动力和阻力分别是什么，比较均匀形核和非均匀形核的临界形核功大小和形核率的大小，说明造成两者差异的原因。

## 重点与难点

### 内容提要：

材料体系的平衡相图与非平衡状态下的动力学规律是材料学家分析材料时手中最主要的两个工具。扩散是影响材料非平衡过程最重要的动力学因素之一。对固体中扩散的认识主要基于两方面的知识：

扩散的宏观规律；

扩散的微观机理。

由浓度差引起的扩散可以用菲克定律描述。菲克定律的基础是扩散速率与浓度梯度成正比且扩散与浓度梯度反向这一基本规律（菲克第一定律）；在引入质量守恒定律后，菲克第一定律被推广应用于非稳态过程（菲克第二定律）。扩散物质的扩散系数  $D$  是描述其扩散能力的重要参数。在发生互扩散的扩散偶中，由于柯肯道尔效应，菲克定律中应采用互扩散系数。

热力学理论分析证明，扩散的真正驱动力是扩散物质的热力学梯度，即扩散的真正驱动力是扩散物质热力学势的梯度，即扩散的方向和速率取决于扩散物质体系中热力学势梯度而不是浓度梯度。热力学势梯度可以由浓度、温度化学位、应力应变、电位等物理量在空间上的差异造成。浓度梯度引起的扩散只是一个最为常见的特例。

扩散是扩散物质质点（原子、离子、分子等）由于热运动引起的迁移造成的。扩散物质质点每一次迁移的方向是随机的。扩散流是无数扩散物质质点迁移的统计结果，因此扩散具有热激活性质。间隙扩散与空位扩散是晶体中最主要的两种扩散机制，前者的扩散系数及扩散激活能都要明显低于后者。本章以晶体中的原子扩散为主线，根据原子热运动迁移模型，给出了扩散系数的计算公式，从而把扩散的宏观变化规律与扩散的微观机理联系起来。

以上两方面的知识是在后面几节分析复杂扩散问题及各种因素影响的基础。

### **基本要求：**

（1）正确理解菲克定律及其物理实质，并能够较好地应用菲克定律解决一些较简单的扩散问题（2）熟悉掌握扩散的原子模型，能够根据这一模型分析扩散问题及各种因素对扩散的影响。

（3）了解并掌握以下概念与术语：

扩散、自扩散、互扩散、间隙扩散、空位扩散、上坡扩散、反应扩散、稳态扩散、非稳态扩散、扩散系数、互扩散系数、扩散激活能、扩散通量、原子的热运动、原子迁移率、本征扩散、非本征扩散、晶界扩散、表面扩散、柯肯道尔效应。

本章主要讨论材料的形变行为和微观机制。

## 6. 1 弹性变形

### 6. 1. 1 普弹性

晶体发生弹性变形时，应力与应变成线性关系，去掉外力后，应变完全消失，晶体恢复到未变形状态。弹性变形阶段应力与应变服从虎克定律。

弹性模量是重要的物理和力学参量，表示使原子离开平衡位置的难易程度，只取决：晶体原子结合的本性，不依晶粒大小以及组织变化而变。是一种组织不敏感的性质。

### 6. 1. 2 滞弹性

在弹性范围内加载或去载，发现应变不是瞬时达到其平衡值，而是通过一种驰豫过程来完成的，即随时间的延长，逐步趋于平衡值的，在应力作用下逐渐产生的弹性应变叫滞弹性应变。

应力—应变曲线就成一回线，回线所包围的面积是应力循环一周所消耗的能量，称为内耗。

## 6. 2 单晶体的塑性变形

工程上应用的金属材料通常是多晶体。

金属的塑性变形主要通过滑移方式进行，此外还有孪生与扭折。高温变形时，还会以扩散蠕变与晶界滑动方式进行。

### 6. 2. 1 滑移

#### 1. 滑移现象

滑移带，若用电子显微镜观察，发现每条滑移带均由许多聚集在一起的相互平行的滑移线所组成。滑移线实际上是晶体表面产生的一个个滑移台阶造成的。

在晶体缺陷一章已指出，室温下晶体塑变的主要方式是滑移。滑移是靠位错的运动实现的位错沿滑移面滑移。当移动到晶体表面时，便产生了大小等于柏氏矢量的滑移台阶，如果该沿移面上有大量位错运动到晶体表面，宏观上，晶体的一部分相对另一部份沿滑移面发生了相对位移，这便是滑移，滑移矢量与柏氏矢量平行。

#### 2. 滑移系

滑移时，滑移面应是面间距最大的密排面，滑移方向是原子的最密排方向，一个滑移面与其上的一个滑移方向组成一个滑移系。

面心立方金属的滑移面为  $\{111\}$ ，共有四组，包含三个滑移方向，因此共有 12 个滑移系。

密排六方金属滑移面为  $(0001)$ ，滑移方向为  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ ，每组滑移面包含 2 个滑移方向，故也有 12 个滑移系。

密排六方金属滑移系少，滑移过程中，可能采取空间位向少，故塑性差。

体心立方金属得移系较多故比密排六方结构金属塑性好。但其滑移面原子密排程度不如面心立方，滑移方向的数目也少于面心立方，故体心立方金属不如面心立方金属塑性好

### 3. 滑移的临界分切应力

### 4. 滑移时的晶体转动

晶体发生塑性变形时，往往伴随取向的改变，当晶体在拉应力作用下产生滑移时，若夹头不受限制，欲使滑移面的滑移方向保持不变，拉力轴取向必须不断变化。实际上夹头固定不动，即拉力轴方向不变，此时晶体必须不断发生转动。转动结果，使滑移面法线与外力轴夹角增大，使外力与滑移方向夹角变小。



## 5. 多滑移与交滑移

### (1) 多滑移

对于有多组滑移系的晶体，当其与外力轴取向不同时，处于软位向的一组滑移系首先开动，这便是单滑移。若两组或几组滑移系处在同等有利的位向，在滑移时，各滑移系同时开动，或由于滑移过程中晶体的转动使两个或多个滑移系交替滑移叫多滑移。

### (2) 交滑移

交滑移是指两个或多个滑移面沿同一个滑移方向滑移。

面心立方晶体中，扩展位错由两个肖克莱不全位错和它们所夹的层错带构成。展位错只能沿层错面移动。如果增大应力可使扩展位错集，即使两个肖克莱不全位错结合成一个螺型全位错便可交滑移至另一滑移面，然后在该滑移面扩展开。热激活可促进交滑移，故升高温度有利于交滑移进行。交滑移过程还与扩展位错的宽度有关。

## 6. 单晶体的应力—应变曲线

单晶体的塑变过程可以用单晶体的应力—应变曲线清晰表示出来。

图 6—16 给出面心立方单晶的几种取向的应力·应变曲线。

### 6. 2. 2 孪生

孪生是冷塑性变形的另一种重要形式，常作为滑移不易进行时的补充。一些密排六方的金属如 Cd, Zn, Mg 等常发生孪生变形。体心立方及面心立方结构的金属在形变温度很低，形变速率极快时，也会通过孪生方式进行塑变。孪生是发生在晶体内部的均匀切变过程，总是沿晶体的一定晶面(孪晶面)，沿一定方向(孪生方向)发生，变形后晶体的变形部分与未变形部分以孪晶面为分界面构成了镜面对称的位向关系。金相显微镜下一般呈带状，有时为透镜状。

### 1. 孪生的晶体学

### 2. 孪生变形特点

孪生与滑移有如下差别：(1)孪生使一部分晶体发生了均匀切变，而滑移只集中在一些滑移面上进行。(2)孪生后晶体的变形部分的位向发生了改变，滑移后晶体各部分位向均未改变(3)与滑移系类似，孪生要素也与晶体结构有关，但同一结构的孪晶面、孪生方向与滑移面，滑移方向可以不同。

孪生对塑变的直接贡献比滑移小很多。

### 6. 2. 3 晶体的扭折

沿六方金属 C 轴压缩时，当外力超过某一临界值时晶体会产生局部弯曲，这种形式的变形叫扭折，扭折是晶体弯曲变形或滑移在某些

部位受阻，位错在那里堆积而成的。压缩时产生的理想对称扭折带是由好几个楔形区域组成。

### 6. 3 多晶体的塑性变形

实际使用的绝大多数金属材料都是多晶体。多晶体塑变与单晶体塑变即有相同之处，又有不同之处。相同之处是变形方式也以滑移，孪生为基本方式。不同之处是变形受到晶界阻碍与位向不同的晶粒的影响使变形更为复杂。

#### 6. 3. 1 多晶体塑性变形过程

多晶体由位向不同的许多小晶粒组成，在外加应力作用下，只有处在有利位向的晶粒中的那些取向因子最大的滑移系才能首先开动。周围位向不利的晶粒的各滑移系上的分切应力尚未达到临界值，所以还没发生塑变，处在弹性变形状态。当有晶粒塑变时，就意味着其滑移面上的位错源将不断产生位错，大量位错将沿滑移面源源不断运动，但由于四周晶粒位向不同，滑移系的位向也不同，运动着的位错不能越过晶界。

#### 6. 3. 2 晶粒大小对塑性变形的影响

由以上分析可知，晶粒越细，单位体积所包含的晶界越多，其强化效果越好。这种用细化晶粒提高金属强度的方法叫细晶强化。

#### 6. 3. 3 多晶体应力—应变曲线

多晶体应力—应变曲线如图 6—25，它不具有典型单晶体的第 1 阶段——易滑移阶段。这是因为晶粒方位不同，各晶粒变形需互相协调，至少有 5 个独立滑移系开动，一开始便是多滑移，故无易滑移阶段。此外由于晶界的强化作用和多滑移过程中位错的相互干扰，使多晶体应力—应变曲线斜率即加工硬化率明显高于单晶。

## 6. 4 塑性变形对金属组织与性能的影响

### 6. 4. 2 形变织构

金属冷塑性变形时，晶体要发生转动，使金属晶体中原为任意取向的各晶粒逐渐调整到取向彼此趋于一致，这就形成了晶体的择优取向，我们称它为形变织构。

### 6. 4. 3 残余应力

宏观残余应力又称第一类内应力，是物体各部分不均匀变形所引起，在整个物体范围内处于平衡。

微观内应力也叫第二类内应力，由晶粒或亚晶变形不均匀引起，在晶粒或亚晶范围内互相平衡。

点阵畸变也叫第三类内应力，约占储存能的 90%。由形变金属内部产生的大量位错等晶体缺陷引起，其作用范围仅为几十至几百个 nm。

## 6. 5 金属及合金强化的位错解释

## 6. 5. Cottrell 气团

晶体中溶质原子的溶入，引起了点阵畸变，形成了应力场。若晶体中同时存在位错，则位错的应力场与溶质原子倾向于聚集到位错周围；形成比较稳定的分布。通常把溶质原子在位错周围的聚集叫柯氏气团。

## 6. 5. 2 位错交割和带割阶位错的运动

## 6. 5. 3 固定位错

有些位错本身不能沿滑移面滑动，称为固定位错。

## 6. 5. 4 滑动位错与第二相质点的交互作用

## 第六章参考答案

1 描述液态金属的结构，指出与固态金属结构的差异。

液态金属的原子大部分是无序、混乱的分布，但是在微小区域内存在着有序、规则的排列，为短程有序。这种短程有序是不稳定的，表现为：在一定时间内液体中可能出现一些原子呈规则排列的微体积，经过一段时间之后，它们就消散。同时，在液体的另外一些微体积中又会形成原子的规则排列。这一过程可以不断重复进行。随着温度的下降，短程有序的程度和微观体积的尺寸增大。

与固态结构的差异：

(1) 液体中原子之间的平均距离比固体中略大。

(2) 液体中原子的配位数比密排结构晶体的配位数小。

(3) 液态中原子排列混乱度增加。

2 何谓过冷。推导过冷的热力学条件。

金属开始凝固的温度  $T_n$  低于其熔点  $T_m$ ，这种现象叫做过冷。

推导见第六章第三节。

3 金属凝固过程包括哪两个基本过程。

包括形核和长大两个过程。

4 指出形核过程的驱动力和阻力分别是什么，比较均匀形核和非均匀形核的临界形核功大小和形核率的大小，说明造成两者差异的原因。

形核过程的驱动力是体积自由能的下降，阻力是面积自由能的上升。  
非均匀形核的临界形核功小于均匀形核，非均匀形核的形核率大于均匀形核。这是因为在非均匀形核时阻力小于均匀形核所致。

5（课后习题）若在液相中发生均匀形核，假设晶核为立方体，试求临界晶核边长  $a^*$  和临界形核功  $\Delta G^*$ 。若发生的是非均匀形核，即形核在一个现成的固-液界面上，界面面积为  $A(A>a^2)$ ，界面比表面能均为  $\sigma$ ，假设晶核仍为立方体，试求临界晶核边长  $a^*$  和临界形核功  $\Delta G^*$ 。

均匀形核时： $G_1$ （形核前）= $V_L G_L$ ， $G_2$ （形核后）= $(V_L - V_S)G_L + V_S G_S + A \sigma$

则有： $\Delta G = G_2 - G_1 = V_S(G_S - G_L) + A \sigma = V_S \Delta G_V + A \sigma = a^3 \Delta G_V + 6a^2 \sigma$

令： $d(\Delta G)/d(a)=0$ ,

则有： $a^* = -4 \sigma / \Delta G_V$ ,

$$\Delta G^* = 32 \sigma^3 / (\Delta G_V)^2,$$

非均匀形核时： $G_1$ （形核前）= $V_L G_L + A_1 \sigma$ ,

$$G_2(\text{形核后}) = [(V_L - V_S)G_L + V_S G_S] + [(A_1 - a^2) \sigma + 5a^2 \sigma]$$

则有： $\Delta G = G_2 - G_1 = V_S(G_S - G_L) + 4a^2 \sigma = a^3 \Delta G_V + 4a^2 \sigma$

令： $d(\Delta G)/d(a)=0$ ,

则有： $a^* = -(8/3) \sigma / \Delta G_V$ ,

$$\Delta G^* = (256/27) \sigma^3 / (\Delta G_V)^2,$$

6 何谓正温度梯度和负温度梯度。何谓粗糙界面和光滑界面。

正温度梯度有  $dT/dx > 0$  关系，即离开界面越远，液体的温度越高。负温度梯度正好相反。

粗糙界面：界面上有一半位置为原子占据，一半为空位。界面在微观范围是粗糙的，高低不平。界面由几个原子厚的过渡层组成。这种微观上粗糙的界面在宏观上是平直的。

光滑界面：界面上要么固相原子极少，要么空位极少。因而界面保持晶体学光滑表面的特性。界面为一个原子厚的过渡层，与液相截然分开。界面上各处晶体学表面取向不同，因此，从宏观上看界面是曲折、锯齿形小平面，

7 简述三种长大机制。分析金属和非金属在正或负温度梯度下分别以何种机制长大，及其对固体形貌的影响。

三种长大机制：垂直长大机制、二维形核长大机制、螺旋长大机制。金属在正、负温度梯度下都以垂直长大机制长大，在正温度梯度下以平面方式长大，长成等轴晶，在负温度梯度下以树枝晶方式长大，长成树枝晶。

非金属在正、负温度梯度下都以二维形核机制和螺旋机制长大，在正温度梯度下以平面方式长大，长成等轴晶；在负温度梯度下有树枝晶的倾向，但是不明显。



8 简述影响金属凝固后晶粒尺寸的因素。在金属凝固过程中,采用哪些措施可以使凝固后的晶粒细小。

形核率和长大速度影响凝固后的晶粒尺寸。在金属凝固过程中,通过加快冷却速度、搅拌、变质处理可以细化晶粒。

9 固溶体与纯金属的形核相比,除了需要结构起伏、能量起伏外,还需要什么。

还需要成分起伏,因为先凝固的固相成分与液相成分是不同的。

10 何谓平衡分配系数和有效分配系数。

在某一温度下,平衡的固相成分与液相成分之比叫平衡分配系数。固溶体在不平衡凝固过程中,固液界面附近固相成分与远离界面的液相成分之比叫有效分配系数。

11 固溶体在非平衡凝固过程中,其溶质原子的分布受液态金属状态的影响,请分析是如何影响的。

见图 6—38,其中:a 是平衡结晶,b 是液相完全混合,c 是液相完全不混合,d 是液相部分混合。

12 纯金属凝固为什么需要结构起伏和能量起伏?

因为固相的结构与液相不同,所以凝固时需要结构起伏。在凝固时,具有临界尺寸的晶胚是可以形核和长大的,但是,此时的形核功大于

零，当液相中存在能量起伏时，若在较高能量的液相部分形核，就可以弥补所需的形核功。

13 何谓成分过冷，说明形成成分过冷的条件。

在不平衡凝固时，由于液相中溶质分布不均匀引起的过冷，叫成分过冷。

成分过冷形成的条件： $\frac{G}{R} = \frac{mc_0}{D} \frac{1-k_0}{k_0}$

14 说明成分过冷对合金组织的影响。

在无成分过冷时，固溶体晶体以平直界面方式生长，形成稳定的平直界面。

在小的成分过冷时，平界面不稳定，界面上偶然凸起，进入过冷液体，可以长大。但因过冷区窄，凸出距离不大，不产生侧向分枝，发展不成枝晶，而形成胞状界面。最后出现胞状结构，其纵截面为长条形，横截面为六角形。

在大的成分过冷时，液相很大范围处于过冷状态，类似负温度梯度条件。此时，晶体以树枝状方式长大，长成树枝晶。

15 说明偏析产生的原因，指出消除偏析的方法。

在不平衡凝固过程中，固相中溶质浓度分布不均匀，因而凝固结束，晶体中产生成分偏析。

用扩散退火可以减轻或消除偏析。

16 为了获得粗大的柱状晶，如何控制凝固条件。为了获得细小的等轴晶，又该如何控制凝固条件。

为了获得粗大的柱状晶，可以采用定向凝固的方法。

为了获得细小的等轴晶，可以采用搅拌、快速冷却（对小铸件）、进行变质处理等。

17 固溶体在非平衡凝固过程中，其固相的溶质原子分布受液态金属状态的影响，液态金属可能存在三种状态，分别为完全混合、完全不混合和部分混合，请根据这三种液态情况，来分析凝固后固相中溶质原子的分布。

同 11 题。

## 第七章掌握和理解的基本内容

第一节 工程应力，工程应变，真实应力，真实应变

第二节 弹性模量，弹性变形特点

第三节 滑移及其与位错关系，滑移系，面心立方与体心立方的滑移系，临界分切应力与分切应力，取向因子，单滑移，复滑移，交滑移，孪生，常见晶体的孪生要素，孪生的特点，加工硬化

第四节 等强温度，Hall-Petch 公式，细晶强化

第五节 固溶强化，第二相强化，纤维组织，位错胞结构，织构，塑性变形后金属组织和性能的变化

## 第七章（一）

### 引言

1 材料在加工制备过程中，或者制作成零件在工作中都要受到外力的作用，并发生变形。随着外力的增大，材料先后会发生弹性变形、塑性变形和断裂。

2 应力—应变曲线反映了材料在变形过程中应力(外加力)和应变(变形)间的关系，所以，应力—应变曲线是研究材料变形特性的重要工具。在应力—应变曲线上还可以获得材料的强度和塑性指标。

### 本节课要求

- 1 掌握工程应力、工程应变、真实应力、真实应变的概念，了解它们之间的关系。理解应力—应变曲线的含义，掌握屈服强度、抗拉强度、延伸率的概念，掌握弹性模量的概念，了解弹性变形特点。
- 2 学习第一、二节，完成习题 1~4。

### 习题

- 1 何谓金属的塑性变形和弹性变形，何谓屈服强度、抗拉强度。
- 2 指出工程应力和真实应力、工程应变和真实应变的差异，写出真应力和真应变的计算式。
- 3 金属在塑性变形过程中，随应变的增加，应力将如何变化？
- 4 弹性变形是在正应力还是在切应力作用下发生的？塑性变形呢？

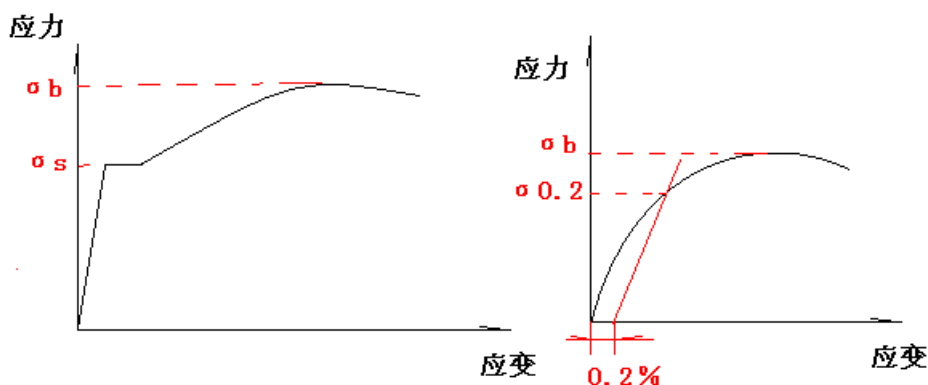
## 第七章（二）

### 引言

#### 一、前述反馈：

当应力超过弹性极限( $\sigma_e$ )，材料就发生塑性变形。工程上通常将开始塑性变形所需的最小应力称为屈服强度，用  $\sigma_s$  表示。同样，屈服强度也可以认为是不发生塑变的最大应力。而抗拉强度也被称为强度极限，用  $\sigma_b$  表示，表征的是材料在断裂前可以承受的最大（工程）应力。这里提出一个问题：**屈服强度和抗拉强度在工程上分别有何重要意义？**请同学们思考。

屈服强度和抗拉强度通常是通过测试应力—应变曲线来获得的。



对于不同性质的金属材料，主要有如下两种应力应变曲线：

其中，前者曲线中平台对应的强度即为屈服强度，后者曲线中没有平台，则以发生了 0.2% 残余（工程）应变时对应的应力来表征该材料的屈服强度，用  $\sigma_{0.2}$  表示。

在应力—应变曲线中还可以看出，在塑性变形过程中，随着应变的不断增加，应力是不断增加的。这一方面说明，要使塑变不断进行，需要有更大的应力施加在材料上，同时也说明，随着塑变的不断进行，

材料的强度不断的提高。由此提出了另一个问题：为何随着塑变的不断进行，材料的强度会不断的提高？这一现象称为什么？有何重要的工程意义和应用？

应力—应变曲线从宏观上反映了材料的塑变性能，那么塑变的微观机理是什么？这是本节课要学习的内容。

## 二、本次内容：

工程上用的材料绝大多数都是多晶体，但多晶体的变形是和其中各个晶粒变形相关的。因此，单晶体的变形是金属变形的基础。

在常温和低温下，单晶体的塑性变形主要通过滑移方式进行的，此外，还可以通过孪生、扭折等方式进行。

单晶体的滑移，是在一定的晶面上，沿着一定的晶向进行的，并借助于位错运动而实现的。

## 本节课的要求

- 1 掌握滑移、滑移系、临界分切应力、取向因子的概念，理解滑移与位错的关系、位错运动与强度的关系，了解面心立方与体心立方的滑移系，理解单滑移、复滑移、交滑移的概念。
- 2 掌握孪生的概念，了解常见晶体的孪生要素和孪生的特点。
- 3 掌握加工硬化的概念，理解位错增殖的模型。
- 4 学习第三节，完成习题 5~10。

## 习题

- 5 简述塑变、滑移、位错运动之间的关系。
- 6 写出面心立方、体心立方金属的主要滑移系。

- 7 何谓临界分切应力，并说明临界分切应力与屈服强度的关系（针对单晶体而言）。
- 8 有一 70MPa 应力作用在 fcc 晶体的[001]方向上，求作用在(111)[10-1]和(111)[-110]滑移系上的分切应力。
- 9 （课后）一镁合金的屈服强度为 180MPa，弹性模量为 45GPa，（1）求不至于使一块 10mm×2mm 的镁板发生塑性变形的最大载荷。（2）求在此载荷下，该镁板每 mm 的伸长量使多少。
- 10 （课后）铜单晶圆棒试样的直径为 5mm，滑移面和滑移方向为{111}和<110>，临界分切应力为 0.98N/mm<sup>2</sup>，试求：（1）若沿[001]方向拉伸，需要多大的外力才能使试样屈服？屈服强度是多少？（2）若沿[111]方向拉伸，则需要多大的外力才能使试样屈服？屈服强度又是多少？（3）请分别写出在上述两种情况下的等效滑移系。



## 第七章（三）

### 引言

#### 前述提示：

上节课学习了单晶体的塑变过程和特点。

若单晶体受到外加应力  $\sigma$ ，则该应力在滑移面和滑移方向上的分切应力为  $\tau$ ， $\tau = \sigma \times \cos\lambda \times \cos\varphi$ ，其中， $\lambda$  为外加应力与滑移方向的夹角， $\varphi$  为外加应力与滑移面法线的夹角。 $\tau_K$  为该滑移系的临界分切应力，其值与原子结构有关。当  $\tau > \tau_K$ ，晶体就沿着滑移系开始滑移，即开始发生塑变，此时所对应的外加应力就是屈服强度。

显然，屈服强度与  $\tau_K$  有关， $\tau_K$  越小，屈服强度越低。屈服强度还与  $\cos\lambda \times \cos\varphi$  有关， $\cos\lambda \times \cos\varphi$  被称为取向因子， $\cos\lambda \times \cos\varphi$  值越大，则屈服强度越低，即开始塑变所需的应力越小。有最大  $\cos\lambda \times \cos\varphi$  值的取向称为软取向，反之则为硬取向。

晶体滑移的本质是位错的运动。在外力作用下，位错开始运动。当位错运动至晶体表面，在晶体表面产生了滑移台阶，也就是晶体产生了变形。显然，这是永久变形，即发生了塑变。随着位错不断地运动至晶体表面，晶体不断地发生塑变。实验证明，随着塑变的不断进行，晶体内的位错数目是不断增加的，请同学们思考，为何随着塑变的进行，晶体内的位错数目是增加的而不是下降的？

#### 本节课提示：

1 实际使用的金属都是多晶体，室温下，多晶体中每个晶粒变形的基  
本方式与单晶体是相同的，但是，由于多晶体中相邻晶粒之间取向不

同，以及晶界的存在，使得多晶体的变形要受这些因素的影响。

2 与纯金属相比，在工程上使用更多的是合金，合金的相结构包括固溶体和化合物，显然，纯金属、固溶体、化合物的变形性质是不同的。

3 金属经过塑性变形后，其组织结构和性能将发生变化。

### 本节课的要求

1 理解多晶体的变形特点，了解 Hall-Petch 公式的表述，掌握细晶强化的概念。

2 掌握固溶强化、第二相强化的概念，理解细晶强化、固溶强化、第二相强化与位错的关系，掌握纤维组织、位错胞结构、织构的概念，了解塑性变形后金属组织和性能的变化。

3 学习第四、第五节，完成习题 10~13。

### 习题

1 何谓金属的塑性变形和弹性变形，何谓屈服强度、抗拉强度。

2 指出工程应力和真实应力、工程应变和真实应变的差异，写出真应力和真应变的计算式。

3 金属在塑性变形过程中，随应变的增加，应力将如何变化？

4 弹性变形是在正应力还是在切应力作用下发生的？塑性变形呢？

5 简述塑变、滑移、位错运动之间的关系。

6 写出面心立方、体心立方金属的主要滑移系。

7 何谓临界分切应力，并说明临界分切应力与屈服强度的关系（针对单晶体而言）。

- 8 有一 70MPa 应力作用在 fcc 晶体的[001]方向上,求作用在(111)[10-1]和(111)[-110]滑移系上的分切应力。
- 9 (课后)一镁合金的屈服强度为 180MPa,弹性模量为 45GPa, (1)求不至于使一块 10mm×2mm 的镁板发生塑性变形的最大载荷。(2)求在此载荷下,该镁板每 mm 的伸长量使多少。
- 10 (课后)铜单晶圆棒试样的直径为 5mm,滑移面和滑移方向为{111}和<110>,临界分切应力为 0.98N/mm<sup>2</sup>,试求:(1)若沿[001]方向拉伸,需要多大的外力才能使试样屈服?屈服强度是多少?(2)若沿[111]方向拉伸,则需要多大的外力才能使试样屈服?屈服强度又是多少?(3)请分别写出在上述两种情况下的等效滑移系。
- 11 简述多晶体塑变与单晶体塑变的差异。
- 12 (1)写出 Hall-Petch 公式,说明公式的意义。(2)已知平均晶粒直径为 1mm 和 0.0625mm 的  $\alpha$ -Fe 的屈服强度分别为 112.7MPa 和 196MPa,问平均晶粒直径为 0.0196mm 的纯铁的屈服强度为多少。
- 13 何谓加工硬化、固溶强化、第二相强化、细晶强化,说明它们与位错的关系。

### 第七章习题参考答案

1 何谓金属的塑性变形和弹性变形，何谓屈服强度、抗拉强度。

晶体在外力作用下会发生变形。当外力较小时，应力和应变之间满足线性关系，卸载后变形会随之消失。这种可恢复的变形就称为弹性变形。

当外加应力超过一定值时，应力和应变之间就不再满足线性关系，卸载后形变也不能恢复而留下一定大小的永久变形，这种现象就称为晶体的塑性或范性变形。

开始塑变的最小强度叫屈服强度，均匀塑变的最大强度叫抗拉强度。

2 指出工程应力和真实应力、工程应变和真实应变的差异，写出真应力和真应变的计算式。

工程应力是力除以原始截面积，工程应变是长度变化除以原始长度；真实应力是力除以瞬时截面积，真实应变是长度变化除以瞬时长度。真实应力和应变的计算式见 7—6 式和 7—7 式。

3 金属在塑性变形过程中，随应变的增加，应力将如何变化？

金属在塑变过程中，随应变增加，应力先是与应变成正比的增加，以后不成正比的增加，最后下降。

4 弹性变形是在正应力还是在切应力作用下发生的？塑性变形呢？

弹性变形可以在正应力和切应力下发生，而塑变仅在切应力下发生。

5 简述塑变、滑移、位错运动之间的关系。

塑变的主要方式是滑移，滑移是由于位错运动而实现的。

6 写出面心立方、体心立方金属的滑移系。

面心立方滑移系：(111) [1-10], (111)[10-1], (111)[01-1]; (11-1)[101], (11-1)[1-10], (11-1)[011]; (1-11)[110], (1-11)[10-1], (1-11)[011]; (-111)[110], (-111)[101], (-111)[0-11]

体心立方滑移系：(110)[1-11], (110)[-111]; (1-10)[111], (1-10)[11-1]; (101)[-111], (101)[11-1]; (10-1)[111], (10-1)[1-11]; (011)[1-11], (011)[11-1];

7 何谓临界分切应力，并说明临界分切应力与屈服强度的关系（针对单晶体而言）。

使滑移发生的最小分切应力叫临界分切应力。

关系：(1)  $\tau = \sigma \cos\lambda \cos\phi$ ，当  $\sigma = \sigma_s$  时， $\tau = \tau_k$ ，(2) 对一定的材料， $\tau_k$ （临界分切应力）是一定的，而  $\sigma_s$ （屈服强度）是与  $\cos\lambda \cos\phi$ （取向因子）有关的。

8 有一 70MPa 应力作用在 fcc 晶体的[001]方向上，求作用在(111)[10-1]和(111)[-110]滑移系上的分切应力。

(1) 已知滑移系为: (111)[10-1], 外力轴为[001]。

外力轴 [001] 与 滑移方向 [10-1] 夹角的余弦:  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [10-1]) = 1/\sqrt{2}$ ,

外力轴 [001] 与 滑移面 (111) 的法线的夹角的余弦:  $\cos\phi = \cos([001] \sim [111]) = 1/\sqrt{3}$ ,

所以,  $\cos\lambda \cos\phi = 1/\sqrt{6}$

则分切应力  $\tau = \sigma \cos\lambda \cos\phi = 70/\sqrt{6} = 28.6\text{MPa}$

(2) 若滑移系为(111)[-110], 由于外力轴 [001]与 滑移方向[-110]夹角的余弦:  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [-110]) = 0$ , 所以, 分切应力  $\tau = \sigma \cos\lambda \cos\phi = 0$

9 (课后) 一镁合金的屈服强度为 180MPa, 弹性模量为 45GPa, (1) 求不至于使一块 10mm×2mm 的镁板发生塑性变形的最大载荷。(2) 求在此载荷下, 该镁板每 mm 的伸长量使多少。

(1) 最大载荷  $F = 180 (\text{MN/m}^2) * (10\text{mm} * 2\text{mm}) = 3.6\text{KN}$

(2) 每 mm 的伸长量  $= 180 / (45 * 1000) = 0.004\text{mm}$

10 (课后) 铜单晶圆棒试样的直径为 5mm, 滑移面和滑移方向为{111} 和<110>, 临界分切应力为 0.98N/mm<sup>2</sup>, 试求: (1) 若沿[001]方向拉伸, 需要多大的外力才能使试样屈服? 屈服强度是多少? (2) 若沿[111]方向拉伸, 则需要多大的外力才能使试样屈服? 屈服强度又是多少? (3) 请分别写出在上述两种情况下的等效滑移系。

(1) 已知面心立方的滑移系为: (111) [1-10], (111)[10-1], (111)[01-1]; (11-1)[101], (11-1)[1-10], (11-1)[011]; (1-11)[110], (1-11)[10-1], (1-11)[011]; (-111)[110], (-111)[101], (-111)[0-11]。外力轴为[001]。

则 对于 ( 111 ) [1-10] 有 :  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [1-10]) = 0$ ,  
 $\cos\phi = \cos([001] \sim [111]) = 1/\sqrt{3}$ ,

所以,  $\cos\lambda \cos\phi = 0$

对 于 (111)[10-1] 有 :  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [10-1]) = 1/\sqrt{2}$ ,  
 $\cos\phi = \cos([001] \sim [111]) = 1/\sqrt{3}$ ,

所以,  $\cos\lambda \cos\phi = 1/\sqrt{6}$

对 于 (111)[01-1] 有 :  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [01-1]) = 1/\sqrt{2}$ ,  
 $\cos\phi = \cos([001] \sim [111]) = 1/\sqrt{3}$ ,

所以,  $\cos\lambda \cos\phi = 1/\sqrt{6}$

对 于 (11-1)[101] 有 :  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [101]) = 1/\sqrt{2}$ ,  
 $\cos\phi = \cos([001] \sim [11-1]) = 1/\sqrt{3}$ ,

所以,  $\cos\lambda \cos\phi = 1/\sqrt{6}$

对 于 (11-1)[1-10] 有 :  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [1-10]) = 0$ ,  
 $\cos\phi = \cos([001] \sim [11-1]) = 1/\sqrt{3}$ ,

所以,  $\cos\lambda \cos\phi = 0$

对 于 (11-1)[011] 有 :  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [011]) = 1/\sqrt{2}$ ,  
 $\cos\phi = \cos([001] \sim [11-1]) = 1/\sqrt{3}$ ,

所以,  $\cos\lambda \cos\phi = 1/\sqrt{6}$

对 于 (1-11)[110] 有 :  $\cos\lambda = \cos([001] \sim [110]) = 0$ ,

$$\cos\varphi = \cos([001] \sim [1-11]) = 1/\sqrt{3},$$

$$\text{所以, } \cos\lambda \cos\varphi = 0$$

$$\text{对于 } (1-11)[10-1] \text{ 有: } \cos\lambda = \cos([001] \sim [10-1]) = 1/\sqrt{2},$$

$$\cos\varphi = \cos([001] \sim [1-11]) = 1/\sqrt{3},$$

$$\text{所以, } \cos\lambda \cos\varphi = 1/\sqrt{6}$$

$$\text{对于 } (1-11)[011] \text{ 有: } \cos\lambda = \cos([001] \sim [011]) = 1/\sqrt{2},$$

$$\cos\varphi = \cos([001] \sim [1-11]) = 1/\sqrt{3},$$

$$\text{所以, } \cos\lambda \cos\varphi = 1/\sqrt{6}$$

$$\text{对于 } (-111)[110] \text{ 有: } \cos\lambda = \cos([001] \sim [110-1]) = 0,$$

$$\cos\varphi = \cos([001] \sim [-111]) = 1/\sqrt{3},$$

$$\text{所以, } \cos\lambda \cos\varphi = 1/\sqrt{6}$$

$$\text{对于 } (-111)[101] \text{ 有: } \cos\lambda = \cos([001] \sim [101]) = 1/\sqrt{2},$$

$$\cos\varphi = \cos([001] \sim [-111]) = 1/\sqrt{3},$$

$$\text{所以, } \cos\lambda \cos\varphi = 1/\sqrt{6}$$

$$\text{对于 } (-111)[0-11] \text{ 有: } \cos\lambda = \cos([001] \sim [0-11]) = 1/\sqrt{2},$$

$$\cos\varphi = \cos([001] \sim [-111]) = 1/\sqrt{3},$$

$$\text{所以, } \cos\lambda \cos\varphi = 1/\sqrt{6}$$

从中找出  $\cos\lambda \cos\varphi$  最大值, 代入  $\tau_k = \sigma_s \cos\lambda \cos\varphi$ , 即可求出  $\sigma_s$  和  $F$ 。

(2) 使用与 (1) 相同的方法做。

(3) 找出  $\cos\lambda \cos\varphi$  最大值所对应的滑移系即为等效滑移系。



10 简述多晶体变形与单晶体的差异。

多晶体由于晶粒间位向不同和晶界的存在，导致其变形时不同晶粒的变形是不同时的、不连续的，变形过程中晶粒之间要相互协调。

11 写出 Hall-Petch 公式，说明公式的意义。

公式：  $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ ，说明晶粒越细晶体的屈服强度越高。

12 说明金属在塑性变形后，其组织和性能将发生怎样的变化。

金属塑性变形后，组织变化包括晶粒和亚结构的变化，其中，晶粒被拉长，形成纤维组织；亚结构细化，缺陷数目大大增加。另外，畸变能也大大增加。性能变化包括力学性能和物理化学性能，其中，力学性能变化为强度、硬度上升，塑性、韧性下降，物理化学性能变化为电阻率上升。

13 （课后题）何谓加工硬化、固溶强化、第二相强化、细晶强化，说明它们与位错的关系。

加工硬化：晶体经过变形后，强度、硬度上升，塑性、韧性下降的现象称为加工硬化。随着变形的进行，晶体内位错数目增加，位错产生交互作用，使位错可动性下降，强度上升。

固溶强化：由于溶质原子的存在，导致晶体强度、硬度增加，塑性、韧性下降的现象叫固溶强化。由于溶质原子的存在阻碍或定扎了位错的运动，导致强度的升高。

第二相强化：由于第二相的存在，导致晶体强度、硬度上升，塑性、韧性下降的现象叫第二相强化。由于第二相的存在，导致位错移动困难，从而使强度上升。

细晶强化：由于晶粒细化导致晶体强度、硬度上升，塑性、韧性不下降的现象叫细晶强化。

由于晶粒细化，使晶界数目增加，导致位错开动或运动容易受阻，使强度上升；又由于晶粒细化，使变形更均匀，使应力集中更小，所以，细晶强化在提高强度的同时，并不降低塑性和韧性。

## 第八章掌握和了解的内容

冷塑性变形的金属在加热时组织和性能的变化，回复，再结晶，再结晶温度，再结晶动力学方程，影响再结晶因素，影响晶粒长大的因素

### 第八章（一）

#### 引言

金属和合金经塑性变形后，不仅内部的组织结构和性能发生了明显的变化，而且，由于空位、位错等缺陷的数目大大的增加，导致畸变能升高，将使其处于热力学不稳定状态，具有自发恢复到变形前的低自由能状态的趋势。所以，经过冷塑性变形的金属在加热时，将发生组织和性能的变化。了解这些变化过程的发生和发展规律，可以改善和控制金属材料的组织和性能，从而可以更好的使用金属材料。

#### 本节课的要求

- 1 掌握回复、多边化的概念，理解回复过程组织和性能的变化，了解回复的应用。
- 2 掌握再结晶、再结晶温度的概念，了解影响再结晶温度的因素。
- 3 学习第一、第二节，完成习题 1~4。

#### 习题

- 1 说明金属在塑性变形后，其组织和性能将发生怎样的变化。
- 2 请问，经过冷塑性变形后的金属，在加热过程中，所温度的升高，将发生什么过程，各个过程是如何区分的。
- 3 冷塑性变形后的金属，在加热过程中，将发生回复，请问，在回复过程中，金属的组织 and 性能发生怎样的变化？回复有什么应用？
- 4 何谓再结晶温度，简述影响再结晶温度的因素。
- 5 已知 Cu-30%Zn 合金的再结晶激活能为 250KJ/mol, 此合金在 400℃ 的恒温下完成再结晶需要 1 小时，试求此合金在 390℃ 的恒温下完成再结晶需要多少小时？
- 6 何谓临界变形量和再结晶晶粒异常长大。请描述变形量和退火温度对再结晶晶粒大小的影响。
- 7 在再结晶和晶粒长大过程中金属的组织 and 性能将发生怎样的变化？
- 8 回复、再结晶、晶粒长大过程的驱动力分别是什么。

## 第八章（二）

### 引言

金属经过冷塑性变形，由于加工硬化，将使金属的强度、硬度上升，塑性、韧性下降。同时，金属内部的缺陷数目大大增加，使其内能（弹性畸变能）也大大增加，能量下降是一个自发过程，所以，畸变能的下降成为了回复和再结晶的驱动力。伴随着回复、再结晶的进行，其组织结构将发生变化，导致其性能发生变化。请同学们思考：

在生活和生产实践中，是如何利用塑性变形、回复再结晶的。（例如：通常使用的钢丝绳、钢缆，包括大桥的钢索，都是经过冷塑性变形的，利用了加工硬化，使其有高的强度。）

冷变形晶体在回复过程中性能的变化是一个渐变过程，组织结构没有明显的变化。进一步提高退火温度，当达到某一临界值(严格说应是一个窄的温度范围)，就可以看到组织结构发生了急剧变化，在原变形组织中产生了新的无畸变的晶粒，性能也发生了明显的变化，这个过程称为再结晶。随着退火温度的进一步提高，或退火时间的进一步增加，再结晶后的晶粒也将长大，这一过程称为晶粒长大。

显然，合金的成分、冷变形量、加热温度等因素将影响再结晶后的组织结构，再结晶图就反映了这种关系。再结晶后的组织结构（如：晶粒大小、缺陷数目等）将影响到合金的性能。

### 本节课的要求

- 1 掌握再结晶后晶粒尺寸与变形量、加热温度的关系，掌握临界变形度的概念，理解再结晶的动力学公式。
- 2 掌握再结晶、晶粒长大过程的组织和性能的变化，了解晶粒异常长大的概念。
- 3 掌握动态回复、动态再结晶的概念。
- 4 学习第二、三、四节，完成习题 5~10。

### 习题

- 1 说明金属在塑性变形后，其组织和性能将发生怎样的变化。
- 2 请问，经过冷塑性变形后的金属，在加热过程中，所温度的升高，将发生什么过程，各个过程是如何区分的。
- 3 冷塑性变形后的金属，在加热过程中，将发生回复，请问，在回复过程中，金属的组织 and 性能发生怎样的变化？回复有什么应用？
- 4 何谓再结晶温度，简述影响再结晶温度的因素。已知
- 5 已知 Cu-30%Zn 合金的再结晶激活能为 250KJ/mol, 此合金在 400℃ 的恒温下完成再结晶需要 1 小时，问：（1）此合金在 390℃ 的恒温下完成再结晶需要多少小时？（2）若希望在 100℃ 的恒温下完成再结晶，则需要多少时间？
- 6 何谓临界变形量和再结晶晶粒异常长大。请描述变形量和退火温度对再结晶晶粒大小的影响。
- 7 在再结晶和晶粒长大过程中金属的组织 and 性能将发生怎样的变化？
- 8 回复、再结晶、晶粒长大过程的驱动力分别是什么。
- 9 （课后）某工厂用一冷拉钢丝绳将一大型钢件吊入热处理炉内，由于一时的疏忽，未将钢丝绳取出，而是随同工件一起加热至 860℃，保温时间到了，打开炉门，要吊出工件时，钢丝绳发生了断裂，试分析原因。
- 10 （课后）工业纯铝在室温下经大变形量轧制成带材后，测得其室温力学性能为冷加工硬化态的性能，已知工业纯铝的再结晶温度为 150℃，但是，若将上述经过冷变形的铝带加热至 100℃，并保温 16

天后冷至室温，再测其强度，发现强度明显下降，请解释其原因。

### 第八章习题参考答案

1 说明金属在塑性变形后，其组织和性能将发生怎样的变化。

金属塑性变形后，组织变化包括晶粒和亚结构的变化，其中，晶粒被拉长，形成纤维组织；亚结构细化，缺陷数目大大增加。另外，畸变能也大大增加。性能变化包括力学性能和物理化学性能，其中，力学性能变化为强度、硬度上升，塑性、韧性下降，物理化学性能变化为电阻率上升。

2 请问，经过冷塑性变形后的金属，在加热过程中，随着温度的升高，将发生什么过程，各个过程是如何区分的。

经过冷变形的金属，在加热过程中，随着温度的升高，将发生回复、再结晶和晶粒长大过程。各个过程以晶粒来区分，在回复阶段，晶粒不变，保持纤维状，在再结晶过程，有新的等轴晶粒产生，当组织中的畸变晶粒都消失时，则再结晶就完成了，以后就是晶粒的长大过程。

3 冷塑性变形后的金属，在加热过程中，将发生回复，请问，在回复过程中，金属的组织 and 性能发生怎样的变化？回复有什么应用？

在回复过程中，主要发生空位数目的大大减少，在高温回复，位错开始运动，产生多边化。在回复过程中，晶体的残余应力下降，电阻率大大的下降。



4 何谓再结晶温度，简述影响再结晶温度的因素。

再结晶开始的温度叫再结晶温度，生产上通常用经过严重冷变形的金属在 1 小时完成再结晶的温度来定义再结晶温度。

影响再结晶温度的因素有：成分、冷变形量、退火温度等。

5 已知 Cu-30%Zn 合金的再结晶激活能为 250KJ/mol, 此合金在 400℃ 的恒温下完成再结晶需要 1 小时，试求此合金在 390℃ 的恒温下完成再结晶需要多少小时？

因为  $V = A \exp(-Q / kT)$

所以  $\ln(t_1 / t_2) = Q (1/T_1 - 1/T_2) / R$

其中：  $T_1=673K$ ,  $T_2=663K$ ,  $Q=250000J/mol$ ,  $R=8.314$ ,  $t_1=1h$

求得：  $t_2=1.96h$

6 何谓临界变形量和再结晶晶粒异常长大。请描述变形量和退火温度对再结晶晶粒大小的影响。

在经过较小的变形量变形后，其再结晶晶粒将非常的大，所对应的变形量称为临界变形量。

在经过大变形量变形后，其再结晶晶粒变得异常的大，称为再结晶晶粒异常长大。

在很小变形量变形后，其再结晶晶粒变化很少；在较小变形量变形后，其再结晶晶粒将非常大；以后，随着变形量增加，其再结晶晶粒尺寸下降。

在退火温度低时，温度的影响小；退火温度高时，容易发生再结晶晶粒异常长大。

7 在再结晶和晶粒长大过程中金属的组织 and 性能将发生怎样的变化？

在再结晶过程中，金属形成新的无畸变的等轴晶粒，金属内的位错数目大大下降，强度、硬度下降，塑性、韧性上升，物理化学性能恢复到冷变形前。

8 回复、再结晶、晶粒长大过程的驱动力分别是什么。

回复、再结晶的驱动力为畸变能下降，晶粒长大的驱动力为晶界能下降。

9 （课后）某工厂用一冷拉钢丝绳将一大型钢件吊入热处理炉内，由于一时的疏忽，未将钢丝绳取出，而是随同工件一起加热至  $860^{\circ}\text{C}$ ，保温时间到了，打开炉门，要吊出工件时，钢丝绳发生了断裂，试分析原因。

因为钢丝绳发生了再结晶，导致其强度下降，无法再承受这一载荷，导致钢丝绳断裂。

10 （课后）工业纯铝在室温下经大变形量轧制成带材后，测得其室温力学性能为冷加工硬化态的性能，已知工业纯铝的再结晶温度为

150℃，但是，若将上述经过冷变形的铝带加热至 100℃，并保温 16 天后冷至室温，再测其强度，发现强度明显下降，请解释其原因。  
发生了再结晶。