

# 西安工业大学

## 试 卷 三 十

### 2002 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：金属学

适用专业：材料加工工程、材料物理与化学、材料学

---

#### 一、名词解释（每题 2 分，共 20 分）

1. 配位数 2. 晶面族 3. 位错 4. 异质形核 5. 成分过冷  
6. 反应扩散 7. 伪共晶 8. 重心定律 9. 交滑移 10. 再结晶

#### 二、证明题（每题 5 分，共 10 分）

1. 试证明位错的柏氏矢量的方向和大小与柏氏回路的选取无关。  
2. 试证明立方晶系的米勒指数为  $(uvw)$  的晶面与同指数晶向  $\langle uvw \rangle$  垂直。

#### 三、论述题（任选一题，每题 10 分，共 10 分）

1. 试指出三种以上提高金属材料强度的方法及其原理。  
2. 试指出三种以上细化金属材料晶粒的方法及其原理。

#### 四、完成下列各题（每题 5 分，共 15 分）

1. 写出立方晶系中  $\langle 110 \rangle$  和  $\langle 123 \rangle$  晶向族所包含的所有晶向。  
2. 绘出  $(110)$ 、 $(112)$ 、 $(113)$  晶面的晶带轴，并写出其具体的晶向指数。  
3. 试分析碳在奥氏体中的溶解度大于铁素体中的溶解度的原因。

#### 五、完成下列各题（每题 5 分，共 30 分）

1. 画出铁碳双重相图，注明主要特征点、线的温度和成分。  
2. 试分析铁碳双重相图产生的原因。  
3. 分析含 Fe-0.4%C 合金平衡结晶过程，指出室温时的相组成和组织并计算组织中珠光体的含量。  
4. 若上述合金在 100cm 长的水平圆模中顺序凝固，假定凝固过程中固相无扩散，液体成分完全混合，相图中各线可简化为直线，求凝固结束时  $\delta$  相、 $\gamma$  相和莱氏体组织的长度。  
5. 分析 Fe-3.6%C 合金获得珠光体基体灰口组织的结晶过程，并计算其中石

墨含量。

6. 一根足够长的共析钢棒在  $800^{\circ}\text{C}$  于强脱碳气氛中从一端脱碳一段时间后, 试画出沿长度方向碳浓度分布曲线及组织示意图。

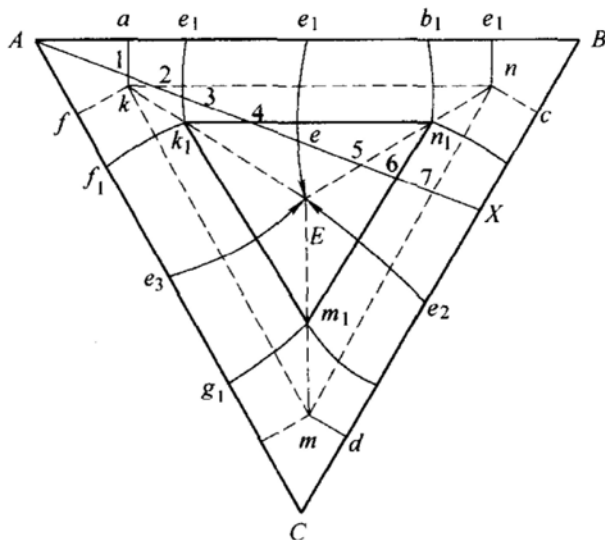


图 30-1 第六题图

六、根据图 30-1 所示三元合金相图的投影图完成下列各题: 假定  $T_A > T_B > T_C > T_{e1} > T_{e2} > T_{e3} > T_E$ 。(共 15 分)

1. 画出  $T$  温度 ( $T_{e1} > T > T_{e2}$ ) 的水平截面图。(共 6 分)
2. 画出  $AX$  垂直截面图。(共 9 分)

## 标准答案

一、

1. 配位数: 在晶体结构中, 和任意原子邻近且距离相等的原子数。
2. 晶面族: 对称关系 (原子排列和分布, 面间距) 相同的各组等同晶面, 称一个晶面族, 用  $\{hkl\}$  表示。
3. 位错: 晶体中的一维缺陷或线状缺陷, 称为位错。
4. 异质形核: 晶核在液态金属中依靠外来物质表面 (型壁或杂质) 或在温度不均匀处择优形成。
5. 成分过冷: 合金溶液在凝固时, 理论凝固温度不变, 过冷度完全取决于溶质成分的分布, 这样的过冷称为成分过冷。
6. 反应扩散: 通过扩散而形成新相的现象。
7. 伪共晶: 由非共晶成分的合金所得到的共晶组织称为伪共晶。

8. 重心定律：在三元合金相图中，如由  $R$  分解为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三个相，则  $R$  相浓度点必定位于  $\Delta\alpha\beta\gamma$  重心位置上（是三相重量重心，不是三角形几何中心），而且  $R$  相重量与  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三个相的重量有如下关系：

$$w_R \times Rd = w_\alpha \times \alpha d$$

$$w_R \times Re = w_\beta \times \beta e$$

$$w_R \times Rf = w_\gamma \times \gamma f$$

这就是重心定律，示意于图 30-2。

9. 交滑移：从一个滑移面跑到另一个滑移面上去的过程，而位错线的柏氏矢量保持不变。

10. 再结晶：形变金属在一定的加热条件下，通过新的可移动大角度晶界的形成及随后移动，从而形成无应变新晶粒组织的过程。

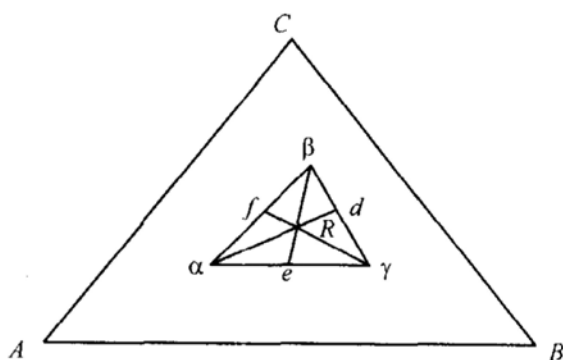


图 30-2 第一题第 8 小题解答图

二、

1. 证明：

用反证法证明：

假设有一条位错线  $PQRSP$  组成一位错环，环内没有其他位错线（如图 30-3），如各处的柏氏矢量不同，设  $PQR$  段的柏氏矢量  $\vec{b}_1$ ，其圈内为已滑移区 I，设  $RSP$  段的柏氏矢量为  $\vec{b}_2$ ，其圈内为已滑移区 II，则区 I 和区 II 为不同程度的滑移区，二者边界  $PR$  必为一位错线。这便与原假设有矛盾，故  $\vec{b}_1$  与  $\vec{b}_2$  不应有差别，即：

$$\vec{b}_1 = \vec{b}_2$$

所以，位错的柏氏矢量的方向和大小与柏氏回路的选择无关。

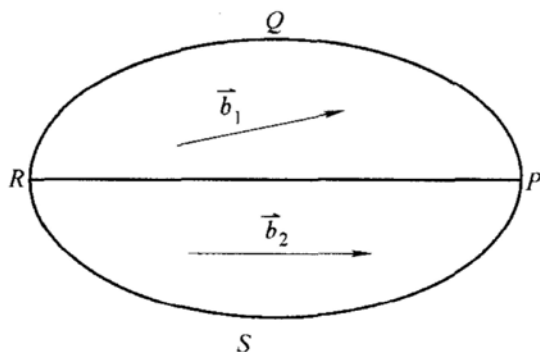


图 30-3 第二题第 1 小题解答图

2. 证明：

因为已知晶面的米勒指数为  $(uvw)$

即晶面在  $x, y, z$  轴的截距为:  $1/u, 1/v, 1/w$ ;

根据平面方程:  $x/a + y/b + z/c = 1$

可知该晶面方程为:  $ux + vy + wz = 1$

再根据平面与向量为  $\{m, n, p\}$  的直线垂直公式:  $A/m = B/n = C/p$ , 以及已知晶向指数为  $[uvw]$ , 可知:

$$u/u = v/v = w/w (=1)$$

所以, 立方晶系的米勒指数为  $(uvw)$  的晶面与同指数晶向  $\langle uvw \rangle$  垂直。

### 三、

#### 1.

(1) 细晶强化。其原理是: 增加晶粒数目, 提高晶界对移动位错的阻碍作用, 从而达到强化的效果。

(2) 固溶强化。即将溶质溶入基体金属中, 使基体金属产生点阵畸变, 从而抑制位错源的活动以提高基体金属的强度。

(3) 形变强化。即当晶体经过形变之后, 使晶体内部的位错塞积或缠结处而难以运动, 从而达到强化晶体的作用。

#### 2.

(1) 增加过冷度。由于晶粒数与形核率  $N$  成正比, 而与晶粒长大速率  $V_g$  成反比, 所以提高  $N/V_g$  就可细化晶粒。而且当增大过冷度时, 虽然  $N$  与  $V_g$  都增大, 而  $N$  增大速率比  $V_g$  快。因此,  $N/V_g$  随过冷度的增加而增大, 即晶粒变细。

(2) 加入形核剂。在熔液凝固前加入一些细小的形核剂, 使之分散在熔液中, 作为不均匀形核所需的现成基底, 这样能使晶核数大大提高, 晶核显著细化。

(3) 震动细化。使金属熔液在振动作用下进行凝固, 一方面提高了液相的形核率, 另一方面使生长的晶体破碎, 从而提供更多的结晶核心, 从而达到细化晶粒的目的。

### 四、

#### 1.

(1)  $\langle 110 \rangle$ :  $[110], [101], [011], [\bar{1}10], [\bar{1}01], [0\bar{1}1]$  共 6 个晶向。

(2)  $\langle 123 \rangle$ :  $[123], [132], [231], [213], [321], [312], [\bar{1}23], [\bar{1}32], [\bar{2}31], [\bar{2}13], [\bar{3}21], [\bar{3}12], [1\bar{2}3], [1\bar{3}2], [2\bar{3}1], [2\bar{1}3], [3\bar{2}1], [3\bar{1}2], [12\bar{3}], [13\bar{2}], [23\bar{1}], [21\bar{3}], [32\bar{1}], [31\bar{2}]$  共 24 个晶向。

2. 设晶带轴为  $[u, v, w]$ , 则由晶带轴定理有:

$$\begin{cases} u + v = 0 \\ u + v + 2w = 0 \\ u + v + 3w = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} w = 0 \\ u = -v \end{cases} \text{ 故方向指数为 } [1\bar{1}0] \text{ 或 } [\bar{1}10]$$



晶面及晶带轴示于图 30-4。

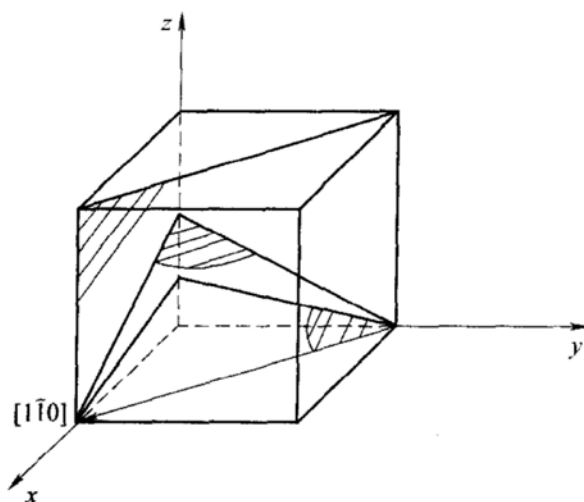


图 30-4 第四题第 2 小题解答图

3. 奥氏体是面心立方晶体, 铁素体是体心立方晶体, 而不论是面心立方还是体心立方, 碳原子均处于它们的八面体间隙中。而面心立方的八面体间隙尺寸为:  $0.535\text{\AA}^\ominus$ , 体心立方的八面体间隙为:  $0.129\text{\AA}$ 。因此可以看出, 碳在奥氏体中的溶解度要远大于碳在铁素体中的溶解度。

#### 五、

1. 略。

2. 从热力学上分析得知, 石墨的自由能总量低于  $\text{Fe}_3\text{C}$ 。因此, 石墨是更稳定的相, 而  $\text{Fe}_3\text{C}$  是介稳定相, 故通常将  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  称为介稳定系, 而将  $\text{Fe}-\text{C}$  系称为稳定系。

从动力学上分析, 由于  $\text{Fe}_3\text{C}$  含碳 6.69%, 而石墨含碳 100%, 而常用钢铁材料的含碳量小于 5%。这样, 形成石墨相所需的成分起伏比形成  $\text{Fe}_3\text{C}$  大得多, 也就是说形成石墨核心比形成  $\text{Fe}_3\text{C}$  核心要难得多。

因此, 热力学的稳定性和动力学上进行的难易决定了在不同条件下, 铁碳合金两个二元系都可能发生。

3. 当  $C\% = 0.4\%$ ,  $\text{Fe}-\text{C}$  合金冷却至室温时:

相组成物:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

组织组成物:  $P + \alpha$

组织中珠光体的含量:

$$P\% = [(0.4 - 0.0218) / (0.77 - 0.0218)] \times 100\% = 50.55\%$$

$\ominus 1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ 。

4. 利用公式:  $C_s = K_0 C_0 (1 - Z/L)^{K_0 - 1}$

先求  $\delta$  相的长度:

已知  $C_0 = 0.4$ , 且可求得:

$$K_0 = C_s / C_L = 0.09 / 0.53 = 0.1698$$

将以上条件代入公式得:

$$0.09 = 0.1698 \times 0.4 \times (1 - Z_1/L_1)^{0.1698 - 1}$$

$$0.09 / 0.06792 = (1 - Z_1/100)^{-0.8302}$$

$$1.325 = (1 - Z_1/100)^{-0.8302}$$

$$(1 - Z_1/100)^{0.8302} = 1 / 1.325 = 0.7547$$

$$1 - Z_1/100 = 0.7125$$

$$Z_1 = 28.75 \text{ cm}$$

再求  $\gamma$  相的长度:

因为

$$L_2 = (100 - 28.75) \text{ cm} = 71.25 \text{ cm}$$

且

$$C'_0 = 0.53, K'_0 = 2.11 / 4.3 = 0.4907$$

所以

$$2.11 = 0.4907 \times 0.53 \times (1 - Z_2/71.25)^{0.4907 - 1}$$

$$2.11 / 0.26007 = (1 - Z_2/71.25)^{-0.5093} = 8.1132$$

$$(1 - Z_2/71.25)^{0.5093} = 1 / 8.1132 = 0.12326$$

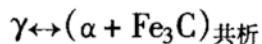
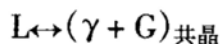
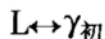
$$1 - Z_2/71.25 = 0.0164$$

$$Z_2 = 70.08 \text{ cm}$$

所以, 最终得到的莱氏体组织长度为:

$$(100 - 28.75 - 70.08) \text{ cm} = 1.17 \text{ cm}$$

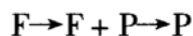
5. 对于 Fe-3.6% C 合金, 要获得珠光体基体灰铸铁组织, 根据 Fe-石墨相图, 有:



其中石墨的含量为:

$$w_G = \frac{3.6 - 0.68}{100 - 0.68} \times 100\% \approx 2.94\%$$

6. 碳浓度分布曲线见图 30-5。在 800°C 脱碳条件下(至室温)得到以下组织:



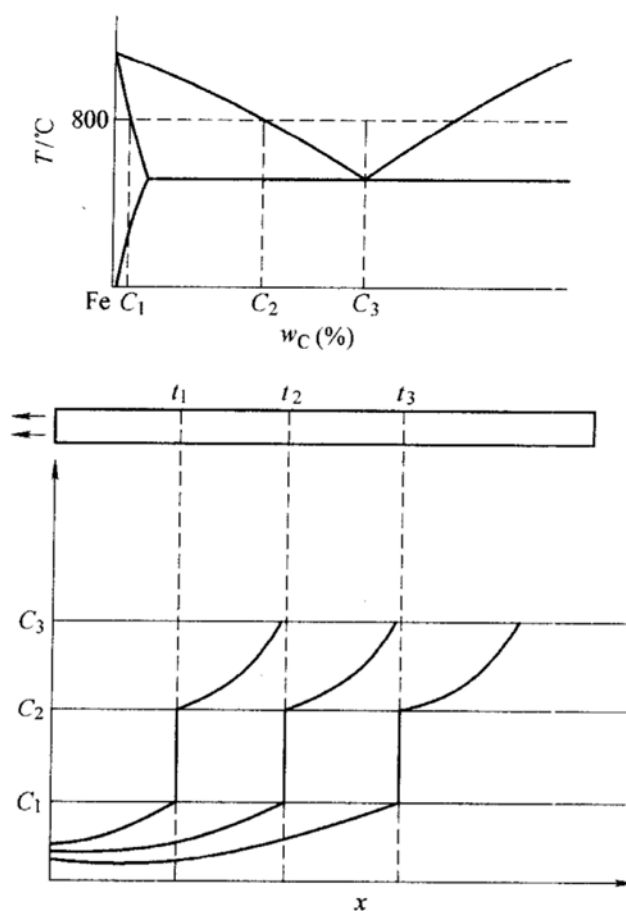


图 30-5 第五题第 6 小题解答图

六、

1. 见图 30-6a。

2. 见图 30-6b。

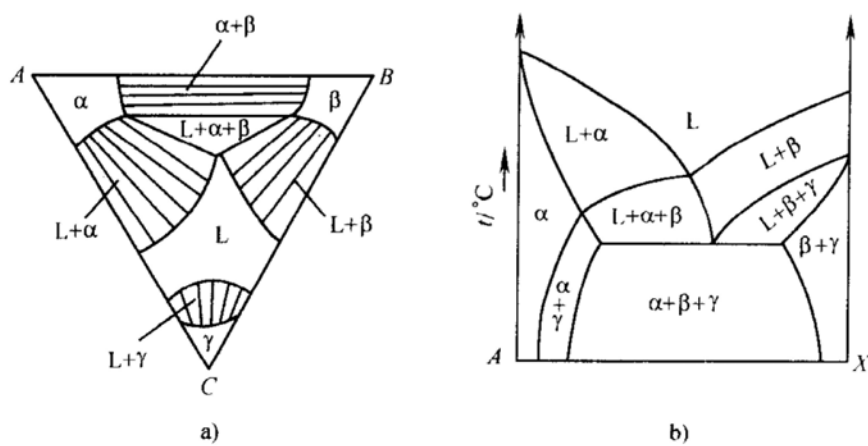


图 30-6 第六题解答图

# 试卷三十一

## 2003 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目:材料科学基础

适用专业:材料加工工程、材料物理与化学、材料学

### 一、名词解释(每题 2 分,共 10 分)

1. 配位数 2. 间隙相 3. 上坡扩散 4. 临界晶核 5. 相区接触法则

### 二、改错题(每题 2 分,共 10 分)

1. 奥氏体是面心立方结构,致密度高,而铁素体是体心立方结构,致密度低。所以,碳在奥氏体中的溶解度要比铁素体中的低。

2. 刃型位错和螺型位错都可以滑移和攀移。

3. 面心立方结构间隙固溶体中,溶质原子容易通过四面体间隙进行扩散。

4. 铁-碳相图中有五个单相区,五个单相分别是渗碳体、奥氏体、珠光体、莱氏体和铁素体。

5. 变形金属的回复再结晶是固态下发生的相变。

### 三、计算题(每题 5 分,共 10 分)

1. 已知铜为 FCC 结构,其原子半径为  $0.1278\text{nm}$ ,试计算其密度为多少?(铜的原子量为 63.5,阿伏伽德罗(Avogadro)常数为  $0.602 \times 10^{24}$ )

2. 设碳原子均处于  $\gamma\text{-Fe}$  中的八面体间隙,试计算  $\gamma\text{-Fe}$  中的八面体间隙被碳原子占据的最大比例。(铁的原子量为 55.85,阿伏伽德罗(Avogadro)常数为  $0.602 \times 10^{24}$ )

### 四、完成下列各题(任选两题,每题 5 分,共 10 分)

1. 写出立方晶系中  $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$  晶面族所包含的所有晶面。

2. 若体心立方晶体的滑移面为  $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ ,而滑移方向具体确定为  $[1\bar{1}1]$ ,试写出具体的滑移系。

3. 绘出  $(110)$ 、 $(112)$ 、 $(113)$  晶面的晶带轴,并写出其具体的方向指数。

4. 试在面心立方晶胞中画出  $\{110\}$  晶面和  $\langle 110 \rangle$  晶向。

### 五、完成下列各题(每题 6 分,共 30 分)

1. 画出  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  的平衡相图,并填写相区。

2. 说明相图中各主要特征点(至少 6 个点)的物理意义及所处温度和成分。

3. 说明相图中各水平线的相变过程,相变产物及反应条件。

4. 画出按组织分区的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 平衡相图,并填写各区。

5. 试计算含 0.40% C 合金平衡冷却到室温时各个相和组织组成物的相对含量。

六、完成下列各题(每题 15 分,共 30 分)

1. 试作出低碳钢退火试样的静拉伸曲线,说明转折点的物理变化,并回答:

(1)若低碳钢冷轧后立即进行静拉伸,其拉伸曲线有何不同?

(2)若低碳钢冷轧后放置几天再进行静拉伸,其拉伸曲线又有何不同?

2. 设有一由固态下完全不溶、且具有共晶转变的 A、B、C 三组元组成的三元相图如图 31-1 所示,已知  $t_A > t_B > t_C > e_1, e_1 > e_2 > e_3 > t_E$ ,试求:

(1)  $T_1 = e_1, T_2 = e_2, T_3 = e_3, T_4 \leq t_E$  的水平截面图,并填写相区(以上四个水平截面图,任选两个,每个 3 分)。

(2)过 PQ 线作垂直截面图,并填写相区(9 分)。

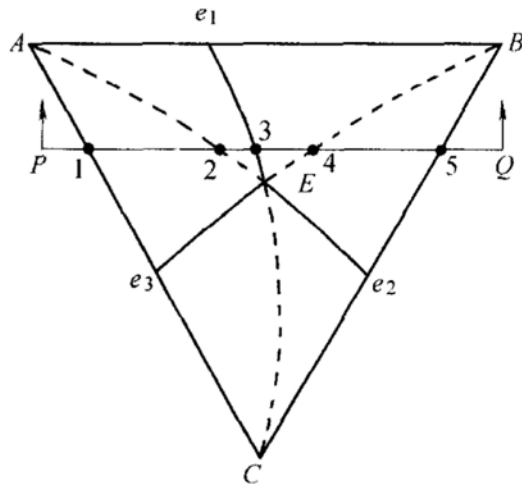


图 31-1 第六题第 2 小题图

## 标准答案

一、

1. 配位数:晶体点阵中每个原子周围最近邻且等距离的原子数目。

2. 间隙相:非金属原子(X)与过渡族金属原子形成的化合物,当金属元素(M)与非金属元素(X)原子半径之比  $R_X/R_M < 0.59$  时,非金属原子处于金属原子的间隙之中,且具有较简单的晶体结构,就称为间隙相。

3. 上坡扩散:溶质原子向浓度梯度相反方向迁移,即从低浓度区流向高浓度区,称为上坡扩散。

4. 临界晶核:金属液体中形成的半径大于临界半径  $r_k$  的晶胚,此时晶核能稳定长大,称为临界晶核。

5. 相区接触法则:在相图中相邻相区之间的相数差为 1。

二、

1. 错误。碳在奥氏体中的溶解度大于碳在铁素体中的溶解度,因为奥氏体中八面体间隙大于铁素体中的八面体间隙(碳在铁素体中仍然处于其八面体间隙之中)。

2. 错误。螺型位错没有插入面,故不可攀移。

3. 错误。在面心立方结构中,溶质原子易通过八面体间隙进行扩散。
4. 错误。铁-碳相图中有五个单相区,分别是:液相、铁素体  $\delta$ 、铁素体  $\alpha$ 、奥氏体  $\gamma$ 、渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}$ 。
5. 错误。变形金属的回复再结晶不是相变,因为所形成新晶粒没有改变其晶体结构类型。

### 三、

1. 已知, Cu 点阵为 FCC 结构, 即单位晶胞拥有 4 个原子, 欲求其密度  $\rho$ , 只需求单位晶胞的原子质量与单位晶胞体积之比

$$\rho = \frac{nM}{N_A(2\sqrt{2}r)^3} = \frac{4 \times 63.5 \times 10^{-3}}{0.602 \times 10^{24} \times (2\sqrt{2} \times 0.1278 \times 10^{-9})^3} \text{ kg/m}^3 \approx 8933 \text{ kg/m}^3$$

2. 在  $\gamma\text{-Fe}$  相中, C 浓度  $C_{\max} = 2.11\%$ , 已知  $\gamma\text{-Fe}$  为 FCC 结构,  $n = 4$ , 每 100 个单胞中有 400 个 Fe 原子, 其质量分数为:

$$w_{\text{Fe}} = 1 - 2.11\% = 97.89\%$$

总质量为: 
$$M = \frac{400 \times 55.85}{0.9789} = 22821.5$$

碳原子个数为: 
$$n_c = \frac{MC_{\max}}{M_c} = \frac{22821.5 \times 0.0211}{12} = 40$$

可知, 每 100 个晶胞中有 40 个碳原子。

### 四、

1.

(1)  $\{110\} = (110)(101)(011)(\bar{1}10)(\bar{1}01)(0\bar{1}1)$  共 6 个。

(2)  $\{111\} = (111)(\bar{1}11)(1\bar{1}1)(11\bar{1})$  共 4 个。

(3)  $\{112\} = (112)(\bar{1}12)(1\bar{1}2)(11\bar{2}) + (121)(\bar{1}21)(1\bar{2}1)(12\bar{1}) + (211)(\bar{2}11)(2\bar{1}1)(21\bar{1})$  共 12 个。

(4)  $\{123\} = (123)(\bar{1}23)(1\bar{2}3)(12\bar{3}) + (132)(\bar{1}32)(1\bar{3}2)(13\bar{2}) + (213)(\bar{2}13)(2\bar{1}3)(21\bar{3}) + (231)(\bar{2}31)(2\bar{3}1)(23\bar{1}) + (312)(\bar{3}12)(3\bar{1}2)(31\bar{2}) + (321)(\bar{3}21)(3\bar{2}1)(32\bar{1})$  共 24 个。

2.

(1)  $\{110\}[1\bar{1}1]: (110)[1\bar{1}1], (10\bar{1})[1\bar{1}1], (011)[1\bar{1}1]$ 。

(2)  $\{112\}[1\bar{1}1]: (\bar{1}12)[1\bar{1}1], (121)[1\bar{1}1], (21\bar{1})[1\bar{1}1]$ 。

(3)  $\{123\}[1\bar{1}1]: (\bar{1}23)[1\bar{1}1], (\bar{2}13)[1\bar{1}1], (231)[1\bar{1}1], (31\bar{2})[1\bar{1}1], (132)[1\bar{1}1], (32\bar{1})[1\bar{1}1]$ 。

3. 设晶带轴为  $[u, v, w]$ , 则由晶带轴定理有:

$$\begin{cases} u + v = 0 \\ u + v + 2w = 0 \\ u + v + 3w = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} w = 0 \\ u = -v \end{cases} \quad \text{故方向指数为 } [1\bar{1}0] \text{ 或 } [\bar{1}10]。$$

晶面及晶带轴如图 31-2 所示。

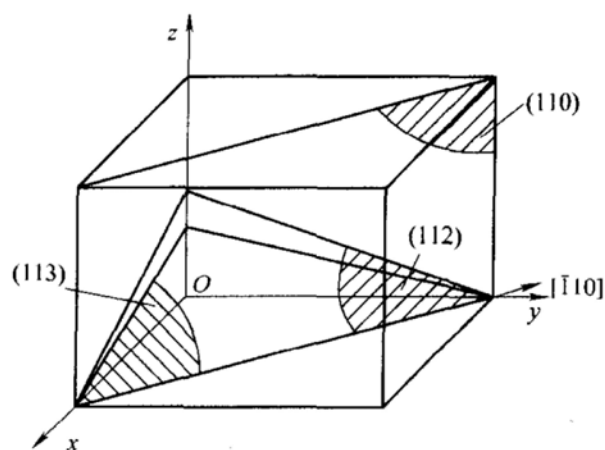


图 31-2 第四题第 3 小题解答图

4. 见图 31-3。

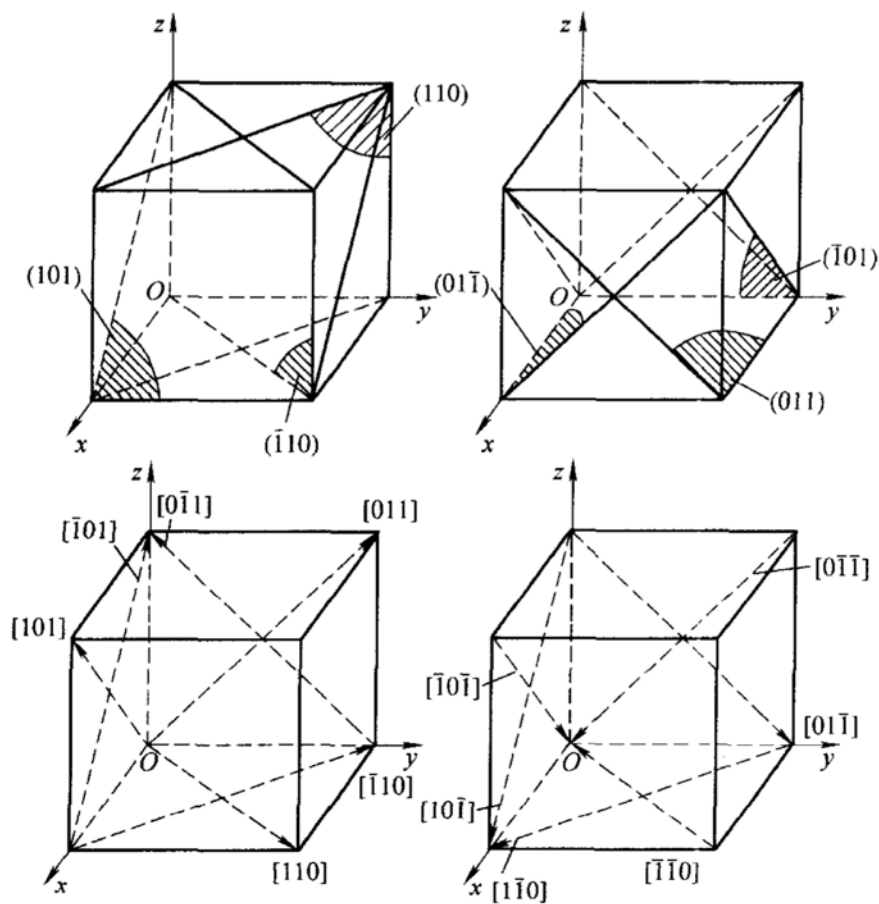


图 31-3 第四题第 4 小题解答图

## 五、

1. 略。

2. 见表 31-1。

表 31-1 第五题第 2 小题解答表

序号	符号	温度/°C	$w_C(\%)$	物理意义
1	A	1538	0	纯铁的熔点
2	B	1495	0.53	包晶转变时液相的成分
3	C	1148	4.3	共晶点
4	D	1227	6.69	渗碳体的熔点
5	E	1148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的最大溶解度
6	F	1148	6.69	渗碳体的成分
7	G	912	0	$\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$ 转变温度
8	H	1495	0.09	碳在 $\delta\text{-Fe}$ 中的最大溶解度

3.

$HJB$  水平线发生包晶反应:  $L_B + \delta_H \rightleftharpoons \gamma_J$ ; 产物: 奥氏体 (A)。

$ECF$  线发生共晶反应:  $L_C \rightleftharpoons \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$ ; 产物为: 莱氏体 (Ld)。

$PSK$  线发生共析反应:  $\gamma_S \rightleftharpoons \alpha_P + \text{Fe}_3\text{C}$ ; 产物: 珠光体 (P)。

4. 略。

5. 各组织组成物的相对含量:

$$w_P = \frac{0.40 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \times 100\% = 50.5\%$$

$$w_\alpha = 1 - w_P = 1 - 50.5\% = 49.5\%$$

各相的相对含量:

$$w_\alpha = \frac{6.69 - 0.40}{6.69 - 0.0008} \times 100\% = 94\%$$

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = 1 - w_\alpha = 1 - 94\% = 6\%$$

## 六、

1. 低碳钢退火试样的静拉伸曲线见图 31-4a。

(1) 若低碳钢冷轧后立即进行静拉伸, 其屈服中的屈服平台消失 (屈服点消失), 见图 31-4b。

(2) 放置几天后再进行静拉伸, 屈服中屈服点又复出现, 且屈服应力提高, 见图 31-4c。

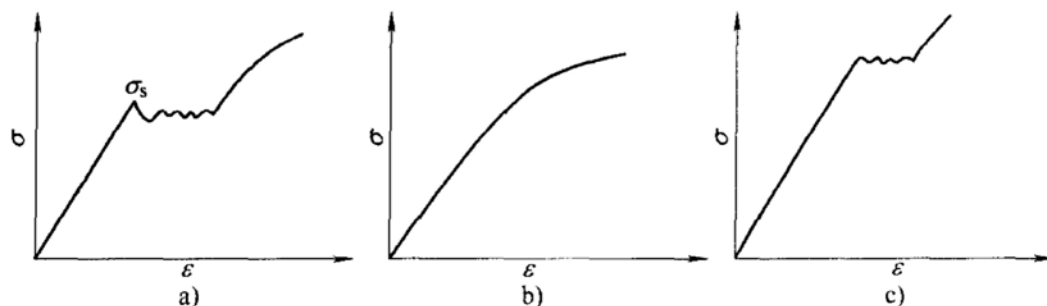


图 31-4 第六题第 1 小题解答图



2.

(1) 见图 31-5a。

(2) 见图 31-5b。

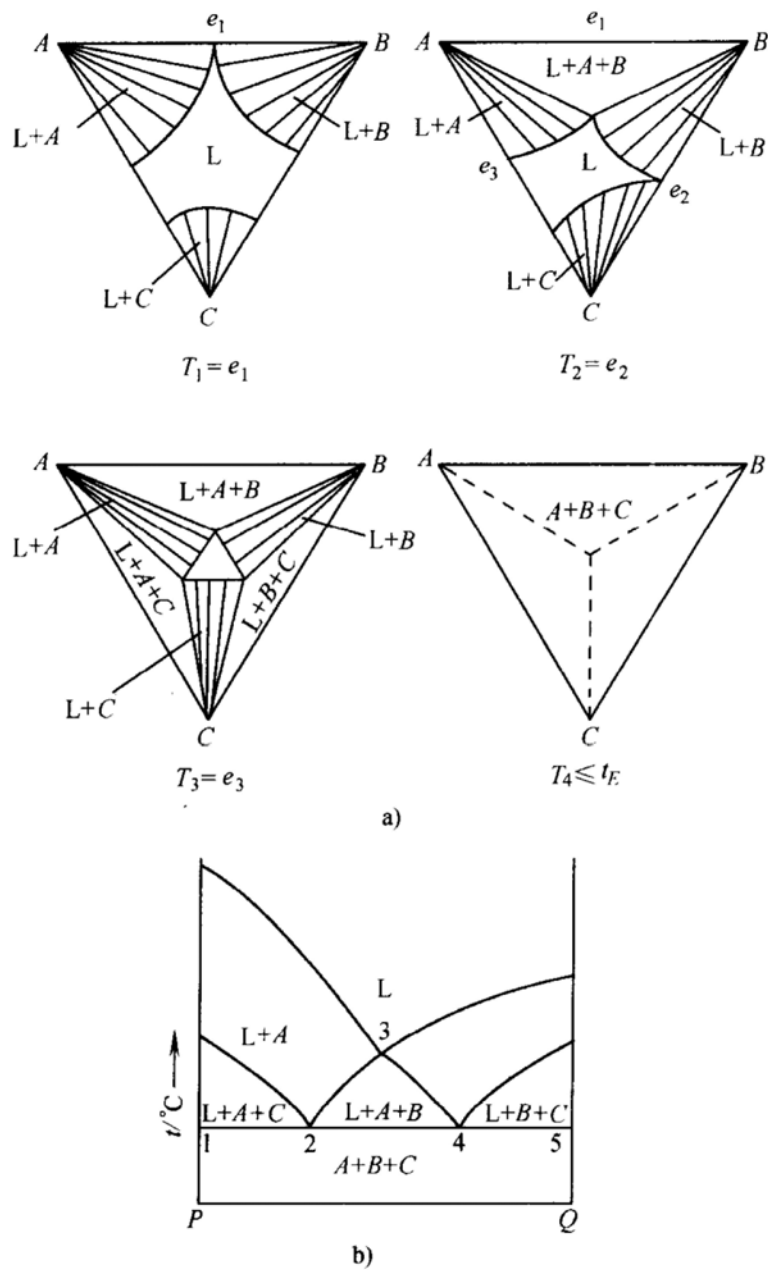


图 31-5 第六题第 2 小题解答图

# 试卷三十二

## 2004 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：材料科学基础

适用专业：材料加工工程、材料物理与化学、材料学

---

### 一、名词解释（每题 3 分，共 15 分）

1. 致密度 2. 平衡分配系数 3. 非稳态扩散 4. 临界形核功 5. 扩展位错

### 二、指出下列说法的错误并予以改正（每题 4 分，共 20 分）

1. 低碳钢薄板冲压成型时所出现的吕德斯带是发生孪生变形所致。
2. 只要符合能量条件就可以发生位错反应。
3. 间隙固溶体属于间隙相。
4. 交滑移是交替滑移的简称。
5. 变形金属的再结晶也具有形核长大过程，故是一种固态相变。

### 三、计算题（每题 15 分，共 30 分）

1. 设碳原子均处于  $\gamma\text{-Fe}$  中的八面体间隙，在  $1000^\circ\text{C}$  时有重量百分比为 1.7 的碳原子溶入  $\gamma\text{-Fe}$ 。试计算在 100 个单位晶胞中有多少个碳原子，并确定八面体间隙被碳原子占据的比例（铁的原子量为 55.85，碳的原子量为 12.01）。

2. 退火低碳钢在晶粒大小为  $N_A = 16$  个/ $\text{mm}^2$  时，其屈服强度  $\sigma_s = 100\text{MPa}$ ；当  $N_A = 4096$  个/ $\text{mm}^2$  时， $\sigma_s = 250\text{MPa}$ 。试计算  $N_A = 250$  个/ $\text{mm}^2$  时的  $\sigma_s$  为多少？

### 四、完成下列各题（每题 10 分，共 30 分）

1. 写出立方晶系中  $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$  晶面族所包含的所有晶面。

2. 若体心立方晶体的滑移面为  $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ ，而滑移方向具体确定为  $[1\bar{1}1]$ ，试写出具体的滑移系。

3. 绘出  $(110)$ 、 $(112)$ 、 $(113)$  晶面的晶带轴，并写出其具体的方向指数。

### 五、完成下列各题（每题 10 分，共 40 分）

1. 画出  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  的平衡相图，并填写相区。

2. 说明相图中各主要特征点（至少 6 个点）的物理意义及所处温度和成分。

3. 画出按组织分区的  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  平衡相图，并填写各区。

4. 试计算含 0.40% C 合金平衡冷却到室温时各个相的相对含量。

### 六、完成下列各题（共 15 分）

设有三种三元相图的四相平衡如图 32-1 所示, 试完成下列两题:

1. 写出各图的四相平衡反应式, 并说明反应的类型 (5 分)。
2. 写出各图中与四相平面上下连接的三相平衡区 (10 分)。

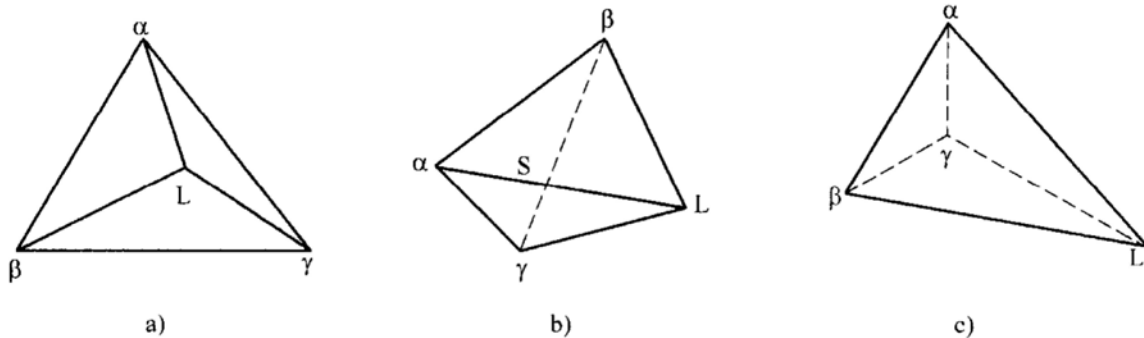


图 32-1 第六题图

## 标准答案

一、

1. 致密度: 一个晶胞内原子所占体积与晶胞体积之比。
2. 平衡分配系数: 一定温度下, 两相平衡时固液两相成分之比, 即  $k_0 = C_S / C_L$ 。
3. 非稳态扩散: 浓度梯度与扩散通量都随时间和距离而变化的扩散。
4. 临界形核功: 形成临界晶核时自由能的增量。
5. 扩展位错: FCC 晶体中的全位错, 因能量高, 很难存在, 要自动分解为两个不全位错和中间的堆垛层错, 形成了所谓的扩展位错组态。

二、

1. 低碳钢薄板冲压成型时所出现的吕德斯带是由于屈服延伸区产生不均匀变形而产生的宏观带状组织。
2. 符合几何条件和能量条件才能发生位错反应, 能量越低越稳定, 能量越高越不稳定。
3. 间隙固溶体是指溶质原子存在于溶剂晶格的间隙内而形成的固溶体, 它仍然保持着溶剂原子的晶体结构。间隙相是原子半径很小的非金属元素和过渡族金属元素之间形成的化合物, 其晶格类型与形成该相的组元均不相同。
4. 所谓交滑移, 就是位错线从一个滑移面跑到另一个滑移面上的过程。交替滑移是由两个不同的滑移系分别起动而进行的滑移, 在时间上有先后之别。

5. 变形金属的再结晶形核长大过程的晶格类型不发生改变, 故不是固态相变。

### 三、

1.  $\gamma$ -Fe 是面心立方结构, 每个晶胞中有 4 个 Fe 原子, 有 4 个八面体间隙。设一个晶胞中有  $A$  个碳原子, 则:

$$\frac{100A \times 12.01}{100 \times 4 \times 55.85 + 100A \times 12.01} = 1.7\%$$

解得  $A = 0.32$

所以 100 个晶胞中碳原子数为:  $0.32 \times 100 = 32$

八面体间隙被 C 原子占据的比例:

$$A/4 = 0.32/4 = 0.08 = 8\%$$

2. 根据霍尔-配奇公式:  $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$

因  $N_A$  与其晶粒直径  $d$  的平方成反比, 故有:

$$\sigma_s = 100\text{MPa} = \sigma_0 + Kd_1^{-1/2}$$

$$\sigma_s = 250\text{MPa} = \sigma_0 + Kd_2^{-1/2}$$

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd_3^{-1/2}$$

又有

$$d_2/d_1 = 1/16 \quad d_3/d_1 = 4/5 \sqrt{10}$$

可以解出

$$\sigma_s = 149\text{MPa}$$

### 四、

1.

(1)  $\{110\}$ :  $(110)$ 、 $(101)$ 、 $(011)$ 、 $(\bar{1}10)$ 、 $(\bar{1}01)$ 、 $(0\bar{1}1)$ 。

(2)  $\{111\}$ :  $(111)$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$ 。

(3)  $\{112\}$ :  $(112)$ 、 $(121)$ 、 $(211)$ 、 $(\bar{1}\bar{1}2)$ 、 $(\bar{1}2\bar{1})$ 、 $(2\bar{1}\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}\bar{2})$ 、 $(1\bar{2}\bar{1})$ 、 $(2\bar{1}\bar{1})$ 、 $(11\bar{2})$ 、 $(12\bar{1})$ 、 $(21\bar{1})$ 。

(4)  $\{123\}$ :  $(123)$ 、 $(\bar{1}\bar{2}3)$ 、 $(1\bar{2}\bar{3})$ 、 $(12\bar{3})$ 、 $(132)$ 、 $(\bar{1}3\bar{2})$ 、 $(1\bar{3}\bar{2})$ 、 $(13\bar{2})$ 、 $(213)$ 、 $(\bar{2}1\bar{3})$ 、 $(2\bar{1}\bar{3})$ 、 $(231)$ 、 $(\bar{2}3\bar{1})$ 、 $(2\bar{3}\bar{1})$ 、 $(23\bar{1})$ 、 $(312)$ 、 $(\bar{3}1\bar{2})$ 、 $(3\bar{1}\bar{2})$ 、 $(31\bar{2})$ 、 $(321)$ 、 $(\bar{3}2\bar{1})$ 、 $(3\bar{2}\bar{1})$ 、 $(32\bar{1})$ 。

2.

(1)  $\{110\}[1\bar{1}1]$ :  $(110)[1\bar{1}1]$ 、 $(10\bar{1})[1\bar{1}1]$ 、 $(011)[1\bar{1}1]$ 。

(2)  $\{112\}[1\bar{1}1]$ :  $(\bar{1}\bar{1}2)[1\bar{1}1]$ 、 $(121)[1\bar{1}1]$ 、 $(21\bar{1})[1\bar{1}1]$ 。

(3)  $\{123\}[1\bar{1}1]$ :  $(\bar{1}\bar{2}3)[1\bar{1}1]$ 、 $(\bar{2}13)[1\bar{1}1]$ 、 $(231)[1\bar{1}1]$ 、 $(31\bar{2})[1\bar{1}1]$ 、 $(132)[1\bar{1}1]$ 、 $(32\bar{1})[1\bar{1}1]$ 。

3. 凡平行于同一直线的晶面组成一个晶带, 该直线就称为晶带轴, 两个不平行的晶面的交线就是这两个晶面组成的晶带的晶带轴。

设晶带轴为  $[u, v, w]$ , 则由晶带轴定理有:

$$\begin{cases} u + v = 0 \\ u + v + 2w = 0 \\ u + v + 3w = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} w = 0 \\ u = -v \end{cases} \text{故方向指数为 } [1\bar{1}0] \text{ 或 } [\bar{1}10]$$

晶面及晶带轴如图 32-2 所示。

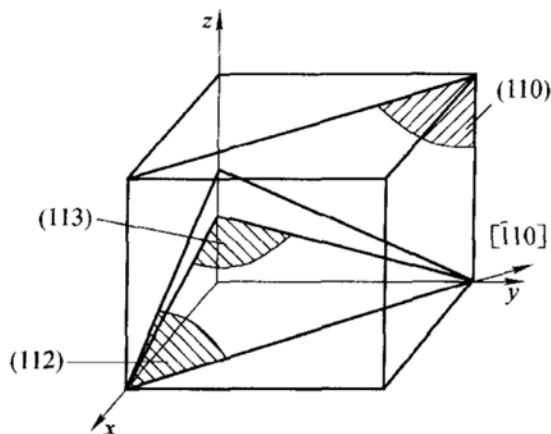


图 32-2 第四题第 3 小题解答图

五、

1. 略。

2. 见表 32-1。

表 32-1 第五题第 2 小题解答表

序号	符号	温度/°C	$w_C(\%)$	物理意义
1	A	1538	0	纯铁的熔点
2	B	1495	0.53	包晶转变时液相的成分
3	C	1148	4.3	共晶点
4	D	1227	6.69	渗碳体的熔点
5	E	1148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的最大溶解度
6	F	1148	6.69	渗碳体的成分
7	G	912	0	$\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$ 转变温度
8	H	1495	0.09	碳在 $\delta\text{-Fe}$ 中的最大溶解度
9	J	1495	0.17	包晶点

3. 略。

4. 含 0.4% C 合金的室温组织为铁素体和渗碳体，根据杠杆平衡定律有：

$$\text{铁素体相对含量} = (6.69 - 0.40) / 6.69 = 94\%$$

渗碳体相对含量 =  $1 - 94\% = 6\%$

六、

1. 平衡反应式为: a) 四相共晶反应:  $L \rightleftharpoons \alpha + \beta + \gamma$

b) 包共晶反应:  $L + \alpha \rightleftharpoons \beta + \gamma$

c) 四相包晶反应:  $L + \alpha + \beta \rightleftharpoons \gamma$

2.

(1) 图 32-1a 中, 四相平面之上邻接三个三相区, 分别为:  $L + \alpha + \beta$ 、 $L + \alpha + \gamma$ 、 $L + \beta + \gamma$ , 四相平面之下邻接一个三相区:  $\alpha + \beta + \gamma$ 。

(2) 图 32-1b 中, 四相平面之上邻接两个三相区, 分别为:  $\beta + \alpha + L$ 、 $\alpha + L + \gamma$ , 四相平面之下邻接两个三相区:  $\alpha + \beta + \gamma$ 、 $\beta + \gamma + L$ 。

(3) 图 32-1c 中, 四相平面之上邻接一个三相区:  $\alpha + \beta + L$ , 四相平面之下邻接三个三相区, 分别为:  $\alpha + \beta + \gamma$ 、 $\alpha + \gamma + L$ 、 $\beta + \gamma + L$ 。

# 试卷三十三

## 2005 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：材料科学基础

适用专业：材料加工工程、材料物理与化学、材料学

---

一、名词解释（每题 2 分，共 10 分）

1. 配位数 2. 柯氏气团 3. 非稳态扩散 4. 临界切应力 5. 离异共晶

二、指出下列说法的错误并予以改正（每题 4 分，共 20 分）

1. 低碳钢和铝合金塑性都比较好，因此它们的室温拉伸曲线形状一样。

2. 刃型位错和螺型位错的柏氏矢量分别与位错线的方向矢量垂直和平行，因此一根弯曲的位错线就有不同的性质。

3. 间隙固溶体和间隙化合物都属于间隙相。

4. 交滑移可以使晶体发生多系滑移。

5. 固态下无相变的金属或合金，如不重熔，就不能改变其晶粒大小。

三、计算题（每题 15 分，共 30 分）

1. 试计算面心立方晶体中 (100)、(110)、(111) 各面的致密度，并指出哪个面为密排面。

2. 有一长为 20cm、面积为  $4\text{cm}^2$  的金属试棒上端固定，下端加以 980N 的拉力。试求下列与金属试棒中心线成  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $\theta^\circ$  交角各面的正应力和切应力，并画出正应力和切应力与  $\theta$  角的关系曲线，找出切应力最大时的  $\theta$  角。

四、完成下列各题（每题 10 分，共 30 分）

1. 写出  $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 112 \rangle$ 、 $\langle 123 \rangle$  晶向族所包含的所有晶向。

2. 若面心立方晶体的滑移面为  $(1\bar{1}1)$ ，试写出具体的滑移系。

3. 绘出 (110)、(112)、(113) 晶面的晶带轴，并写出其具体的方向指数。

五、完成下列各题（每题 10 分，共 40 分）

1. 画出 Fe-Fe<sub>3</sub>C 的平衡相图，并填写相区。

2. 说明相图中各主要特征点（至少 6 个点）的物理意义及所处温度和成分。

3. 现有两批同样粗细的 20 钢和 T10 钢发生混料，试提出至少两种以上的检验方法把它们明确地区别开来，并确定这两种材料在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 平衡相图中的位置。

4. 试计算含 0.40% C 合金平衡冷却到室温时各个相的相对含量。

六、完成下列各题 (共 20 分)

图 33-1 为 Cu-Mn-Zn 三元合金液相面等温线的投影图, 试求:

1. 写出 I 和 II 点合金的成分 (5 分)。
2. 写出 I 和 II 点合金的熔点 (5 分)。
3. 说明 M 点发生哪一类四相反应, 并写出其化学反应式 (10 分)。

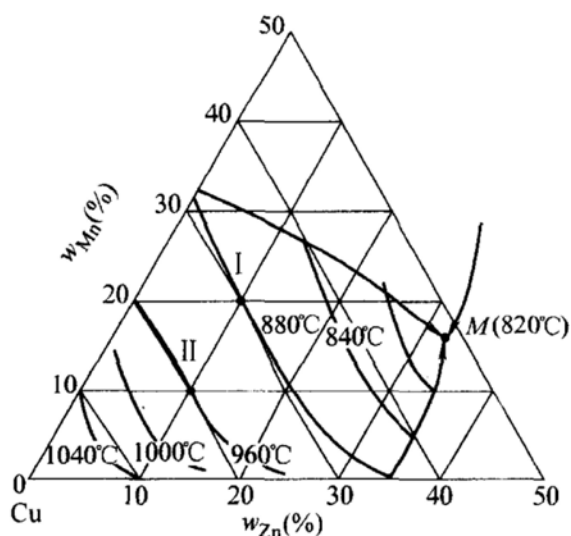


图 33-1 第六题图

## 标准答案

一、

1. 配位数: 晶体结构中任一原子和邻近且距离相等的原子数。

2. 柯氏气团: 某些塑性材料出现屈服点与金属中溶有微量间隙元素有关, 这些微量元素的间隙原子在温度和时间合适的条件下, 聚集在位错线受膨胀的一侧。这样就在位错线附近聚集了一些间隙原子, 形成所谓柯氏气团。

3. 非稳态扩散: 浓度梯度与扩散通量都随时间和距离而变化的扩散。

4. 临界切应力: 当  $\sigma_0 = \sigma_s$  时, 晶体开始滑移, 此时滑移方向上的分切应力称为临界切应力。

5. 离异共晶: 对于某些成分远离共晶点的亚共晶或过共晶合金, 由于初晶量很多, 而共晶的量很少。在共晶转变中, 若晶体中与初晶相邻的那个相依附在初晶上生长, 而剩下的另一相则单独存在于初晶晶粒的晶界处, 从而使共晶组织特征消失, 这种两相分离的共晶称为离异共晶。



## 二、

1. 低碳钢和铝合金塑性都比较好, 但它们的室温拉伸曲线形状不一样。低碳钢中因为存有柯氏气团而有明显上下屈服点现象, 铝合金则没有明显屈服点现象。

2. 刃型位错和螺型位错的柏氏矢量分别与位错线的方向矢量垂直和平行, 一根弯曲的位错线其柏氏矢量恒定不变, 但各处的性质随着位错线的方向矢量与柏氏矢量的几何关系不同而不同。

3. 间隙固溶体属于固溶体, 其晶体结构仍保持原溶剂原子的晶体结构。间隙化合物和间隙相都形成了与原溶剂原子的晶体结构不同的新结构。

4. 交滑移就是位错线从一个滑移面转移到另一个滑移面的过程。

5. 固态下无相变的金属或合金, 如不重熔, 通过塑性变形和再结晶处理也能改变其晶粒大小。

## 三、

1. 对于面心立方晶体, 其原子半径  $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ , 而 (100)、(110)、(111) 面上均有 2 个原子, 故这三个晶面的面密度分别为:

$$\eta = \frac{2 \times \pi \left( \frac{\sqrt{2}}{4}a \right)^2}{a^2} = 2\pi \times \frac{1}{8} = \frac{\pi}{4} = 0.785$$

$$\eta = \frac{2 \times \pi \left( \frac{\sqrt{2}}{4}a \right)^2}{\sqrt{2}a \times a} = \frac{2\pi \times \frac{1}{8}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{8}\pi = 0.56$$

$$\eta = \frac{2\pi \left( \frac{\sqrt{2}}{4}a \right)^2}{\frac{1}{2}\sqrt{2}a \sqrt{2}a \sin 60^\circ} = \frac{2\pi \times \frac{1}{8}}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0.90$$

可见 (111) 面致密度最大, 故面心立方晶体的密排面为 (111) 面。

2. 设金属棒横截面积为  $A$ ,  $\theta$  为斜截面与金属棒中心线的夹角, 则:

斜截面积为 
$$A_\theta = \frac{A}{\sin \theta}$$

斜截面的应力为 
$$P_\theta = \frac{P}{A_\theta} = \frac{P}{A} \sin \theta = \sigma \sin \theta$$

将  $P_\theta$  分解成垂直于斜截面的正应力  $\sigma_\theta$  和切于斜截面的切应力  $\tau_\theta$

$$\sigma_{\theta} = P_{\theta} \sin \theta = \sigma \sin^2 \theta$$

$$\tau_{\theta} = P_{\theta} \cos \theta = \sigma \sin \theta \cos \theta = \frac{\sigma}{2} \sin 2\theta$$

当  $\theta = 0^\circ$  时:  $\sigma_{\theta} = 0$ ;  $\tau_{\theta} = 0$

当  $\theta = 30^\circ$  时:  $\sigma_{\theta} = 612500 \text{ Pa}$ ;  $\tau_{\theta} = 1060881 \text{ Pa}$

当  $\theta = 45^\circ$  时:  $\sigma_{\theta} = 122500 \text{ Pa}$ ;  $\tau_{\theta} = 1225000 \text{ Pa}$

$45^\circ$  为最大角 (图略)。

四、

1.

(1)  $\langle 110 \rangle$ :  $[110]$ ,  $[101]$ ,  $[011]$ ,  $[\bar{1}10]$ ,  $[\bar{1}01]$ ,  $[0\bar{1}1]$  共 6 个晶向。

(2)  $\langle 111 \rangle$ :  $[111]$ ,  $[\bar{1}11]$ ,  $[1\bar{1}1]$ ,  $[11\bar{1}]$  共 4 个晶向。

(3)  $\langle 112 \rangle$ :  $[112]$ ,  $[121]$ ,  $[211]$ ,  $[\bar{1}12]$ ,  $[\bar{1}21]$ ,  $[\bar{2}11]$ ,  $[1\bar{1}2]$ ,  $[1\bar{2}1]$ ,  $[2\bar{1}1]$ ,  $[11\bar{2}]$ ,  $[12\bar{1}]$ ,  $[21\bar{1}]$  共 12 个晶向。

(4)  $\langle 123 \rangle$ :  $[123]$ ,  $[132]$ ,  $[213]$ ,  $[231]$ ,  $[312]$ ,  $[321]$ ,  $[\bar{1}23]$ ,  $[\bar{1}32]$ ,  $[\bar{2}13]$ ,  $[\bar{2}31]$ ,  $[\bar{3}12]$ ,  $[\bar{3}21]$ ,  $[1\bar{2}3]$ ,  $[1\bar{3}2]$ ,  $[2\bar{1}3]$ ,  $[2\bar{3}1]$ ,  $[3\bar{1}2]$ ,  $[3\bar{2}1]$ ,  $[12\bar{3}]$ ,  $[13\bar{2}]$ ,  $[21\bar{3}]$ ,  $[23\bar{1}]$ ,  $[31\bar{2}]$ ,  $[32\bar{1}]$  共 24 个晶向。

2. 设位于  $(1\bar{1}1)$  面上的晶向为  $[u, v, w]$ , 按晶带定理有

$$1 \times u - 1 \times v + 1 \times w = u - v + w = 0$$

若  $u = 0$ , 则  $w = v$ , 得  $[011]$   
 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 。

若  $v = 0$ , 则  $u = -w$ , 得  $[10\bar{1}]$   
 $[\bar{1}01]$ 。

若  $w = 0$ , 则  $u = v$ , 得  $[110]$   
 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 。

3. 设晶带轴为  $[u, v, w]$ , 则由晶带轴定理有:

$$\begin{cases} u + v = 0 \\ u + v + 2w = 0 \\ u + v + 3w = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} w = 0 \\ u = -v \end{cases} \text{ 故为}$$

$[1\bar{1}0]$  或  $[\bar{1}10]$ 。

晶面及晶带轴示于图 33-2。

五、

1. 略。

2. 见表 33-1。

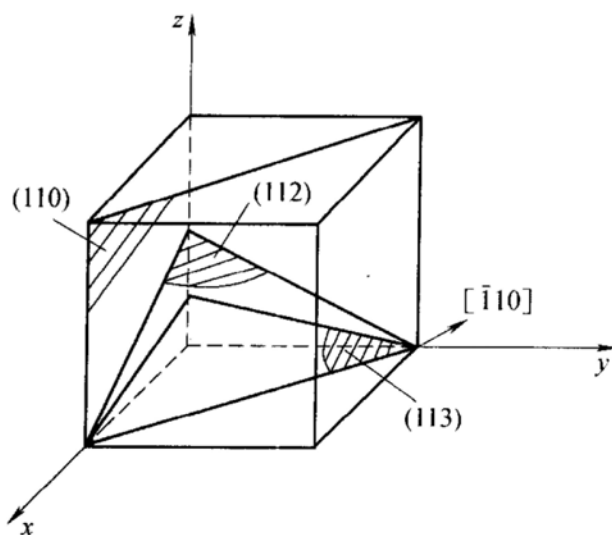


图 33-2 第四题第 3 小题解答图

表 33-1 第五题第 2 小题解答表

特殊点	温度/℃	成分 $w_C$ (%)	物理意义
A	1538	0	纯 Fe 熔点
B	1495	0.53	包晶转变液相的成分
C	1148	4.30	共晶点
D	1227	6.69	$Fe_3C$ 熔点
E	1148	2.11	C 在 $\gamma$ -Fe 中最大溶解度
F	1148	6.69	$Fe_3C$ 成分
S	727	0.77	共析点
P	727	0.0218	C 在 $\alpha$ -Fe 中的最大溶解度

3. 可以通过打硬度、金相观察, 以及将其放在砂轮机上打磨观察火花来区分两种钢。

4.  $w_C = 0.40\%$  的室温组织中 (组成物中) 相组成为  $\alpha$  和  $Fe_3C$ , 其中

$$w_\alpha = \frac{6.69 - 0.40}{6.69} \times 100\% = 94.0\% \quad w_{Fe_3C} = 1 - 94\% = 6.0\%$$

六、

1. I Mn: 20%; Zn: 10%; Cu: 70%

II Mn: 10%; Zn: 10%; Cu: 80%

2. I 880℃; II 960℃

3. 四相共晶反应:  $L \xrightleftharpoons{820^\circ C} Mn + Cu + Zn$

# 试卷三十四

## 2006 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：材料科学基础

适用专业：材料加工工程、材料物理与化学、材料学

### 一、名词解释（每题 2 分，共 10 分）

1. 晶胞原子数 2. 间隙化合物 3. 柯肯达尔效应 4. 过冷度 5. 应变时效。

### 二、是非判断并改错题（每题 4 分，共 20 分）

1. 奥氏体和珠光体都是碳在具有体心立方结构  $\alpha$ -Fe 中的固溶体。
2. 刃型位错和螺型位错的柏氏矢量随着位错线方向矢量的改变而改变。
3. 溶质原子的扩散总是由浓度高的部位向浓度低的部位进行。
4. 铁-碳相图中发生共析的水平线上下都是两相区，不符合相区接触法则。
5. 马氏体相变和贝氏体相变都属于无扩散性固态相变。

### 三、计算题（共 2 题，可任选 1 题，每题 20 分，共 20 分）

1. 画出纯铜晶体的一个晶胞，并完成下列工作：

- (1) 计算 (001)、(110)、(111) 晶面的原子密度，并作以比较。
- (2) 计算 [001]、[110]、[111] 晶向的原子密度，并作以比较。
- (3) 在图上画出发生滑移的一个晶面以及这个晶面上所发生滑移的晶向。

2. 若含碳量为 0.8% 高碳钢的原始晶粒度为 0.05mm，试完成下列工作：

- (1) 计算在 760℃ 和 870℃ 温度下保温 1 小时晶粒的晶粒度及其长大值。
- (2) 说明在这两个温度下晶粒长大的特点以及工程上的应用。

(计算时可采用公式  $D^n - D_0^n = ct$ ，760℃ 和 870℃ 下，常数  $c$  分别为  $6 \times 10^{-16}$  和  $2 \times 10^{-8}$ ， $n$  分别为 0.1 和 0.2， $D$  和  $D_0$  为晶粒度，单位为 mm， $t$  是时间，单位为 min)。

### 四、完成下列各题（每题 15 分，共 30 分）

1. 以晶格常数为单位，计算 BCC、FCC 及 HCP 晶体结构中的原子直径分别为多少。

2. 试在六方晶系的完整晶胞上画出 (10  $\bar{1}2$ ) 晶面的交线，画出 [11  $\bar{2}0$ ]、 $[\bar{1}101]$  晶向交线，并列 {10  $\bar{1}2$ } 晶面族中所有晶面的米勒指数。

## 五、完成下列各题 (每题 10 分, 共 40 分)

1. 画出按组织分区的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 的平衡相图, 并填写相区和组织分区。
2. 具体说明相图中有几个单相区、几个两相区和几个三相平衡反应。
3. 说明相图中各水平线的相变过程, 相变产物及反应条件。
4. 绘图说明含 0.15% C 铁-碳合金平衡冷却到室温时的相变过程和组织示意图, 并计算各个相的相对含量。

## 六、完成下列各题 (每题 15 分, 共 30 分)

1. 试作出低碳钢退火试样的静拉伸曲线, 说明转折点的物理变化, 并用位错理论来说明拉伸曲线的变化机制。
2. 试用相律说明为什么三元合金可以出现四相平衡, 三元平衡相图的水平截面可以使用杠杆定律来分析各个相的相对含量, 而垂直截面却不能。

## 标准答案

## 一、

1. 晶胞原子数: 在晶体的空间结构中, 一个晶胞要与 26 个其他晶胞相邻接, 故晶胞中 8 个顶角、12 个棱边和 6 个侧面上的原子都要与其他晶胞共有, 只有晶胞内的原子才全部属于本晶胞。我们把与其他晶胞共有原子的份额和真正属于本晶胞的原子数之和, 称之为晶胞原子数。

2. 间隙化合物: 小尺寸的溶质原子, 如 C、H、O、N 等分布在溶剂原子结构的间隙之中, 改变了溶剂原子的晶体结构, 且其成分大体上可用一个化学分子式表示的相, 就称之为间隙化合物。

3. 柯肯达尔效应: 在黄铜块体材料上缠上数圈细钼丝作为标记线, 再镀上一层较厚的纯铜, 而后放在高温退火炉中进行长时间退火, 数周后发现标记线向黄铜一侧移动了一定的距离。这个试验结果就称之为柯肯达尔效应。

4. 过冷度: 在较快的冷却速度下, 金属材料冷到其熔点温度时并不立即凝固, 而是要冷到更低的温度时才开始凝固。这时, 实际凝固温度与熔点温度的差值就称之为过冷度。

5. 应变时效: 第一次拉伸后, 再立即进行第二次拉伸, 拉伸曲线上不出现屈服阶段。但第一次拉伸后的低碳钢试样在室温下放置一段时间后, 再进行第二次拉伸, 则拉伸曲线上又会出现屈服阶段。不过, 再次屈服的强度要高于初次屈服的强度。这个试验现象就称之为应变时效。

## 二、

1. 错! 奥氏体是碳在具有面心立方结构  $\gamma$ -Fe 中的固溶体, 而珠光体是由铁素体和渗碳体组合而成的两相组织。

2. 错! 刃型位错的柏氏矢量与位错线方向矢量垂直; 螺型位错的柏氏矢量与位错线方向矢量平行。

3. 错! 确切地说法是溶质原子的扩散总是由化学位高的部位向化学位低的部位进行。只有这样, 才能圆满地解释反应扩散的驱动力问题。

4. 错! 铁-碳相图中发生共析的水平线表示的是三相平衡反应, 实际上就是三相区。这样, 与水平线上线下的两相区的相数差仍然为 1, 仍然符合相区接触法则。

5. 错! 马氏体相变属于无扩散性固态相变, 而贝氏体相变既有无扩散性的切变过程, 又有扩散性的原子传输过程, 两者是不一样的。

### 三、

1. 纯铜晶体具有面心立方结构, 铜晶体的一个晶胞如图 34-1 所示, 其原子半径为  $\frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

$$(1) (001) \text{ 的原子密度} = \frac{2\pi\left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^2}{a^2} = \frac{\pi}{4} = 0.785$$

$$(110) \text{ 的原子密度} = \frac{2\pi\left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^2}{\sqrt{2}aa} = \frac{2\pi}{8\sqrt{2}} = 0.56$$

$$(111) \text{ 的原子密度} = \frac{2\pi\left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^2}{\frac{1}{2}\sqrt{2}a\sqrt{2}a\sin 60^\circ} = \frac{2\pi\frac{1}{8}a^2}{\frac{\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0.91$$

可见, (001)、(110)、(111) 三个晶面中, (111) 面的原子密度最高, 是滑移面; (001) 面次之; (110) 面最低。

$$(2) [001] \text{ 晶向的原子密度} = \frac{2 \times \frac{\sqrt{2}}{4}a}{a} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$$

$$[110] \text{ 晶向的原子密度} = \frac{2 \times \frac{\sqrt{2}}{4}a \times 2}{\sqrt{2}a} = 1$$

$$[111] \text{ 晶向的原子密度} = \frac{2 \times \frac{\sqrt{2}}{4}a}{\sqrt{3}a} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2}{3}} = 0.41$$

可见, [001]、[110]、[111] 三个晶向的原子密度 [110] 最高, 是滑移方

向;  $[001]$  次之;  $[111]$  最低。由此可见, 滑移系由密排面和密排方向构成。

(3) 见图 34-1。

2.

(1)  $760^{\circ}\text{C}$  保温 1h 时:

$$D^{\frac{1}{0.1}} - D_0^{\frac{1}{0.1}} = 6 \times 10^{-16} \times 60$$

$$D^{10} - D_0^{10} = 3.6 \times 10^{-14}$$

$$\begin{aligned} D^{10} &= 3.6 \times 10^{-14} + D_0^{10} = 0.05^{10} + \\ &3.6 \times 10^{-14} = 9.77 \times 10^{-14} + 3.6 \times 10^{-14} \\ &= 13.4 \times 10^{-14} \end{aligned}$$

$$D = (13.4 \times 10^{-14})^{\frac{1}{10}} = 5.16 \times 10^{-2}$$

$$\text{mm} = 0.0516 \text{mm}$$

$870^{\circ}\text{C}$  保温 1h 时:

$$D^{\frac{1}{0.2}} - D_0^{\frac{1}{0.2}} = 2 \times 10^{-8} \times 60$$

$$D^5 - D_0^5 = 1.2 \times 10^{-6}$$

$$D^5 = 0.05^5 + 1.2 \times 10^{-6} = 3.125 \times 10^{-7} + 12 \times 10^{-7} = 15.13 \times 10^{-7}$$

$$D = (15.13 \times 10^{-7})^{\frac{1}{5}} \text{mm} = 0.069 \text{mm}。$$

(2)  $760^{\circ}\text{C}$  保温 1h 时, 晶粒只长大为 0.0516mm。0.0516mm 与 0.05mm 相比, 说明在此情况下, 变化不大, 晶粒基本上没有长大。而  $870^{\circ}\text{C}$  保温 1h 时, 晶粒长大为 0.069 mm。0.069 mm 与 0.05 mm 相比, 晶粒长大了 37%, 说明在此情况下, 出现了明显长大。所以, 在比较高的温度下加热, 特别要注意晶粒长大。

#### 四、完成下列各题 (每题 15 分, 共 30 分)

1. BCC 结构的密排方向为  $[111]$ , 在单位晶胞中,  $[111]$  方向上有两个原子

子, 故原子直径为  $\frac{\sqrt{3}}{2}a$ ; FCC 结构的密排方向为

$[110]$ , 在单位晶胞中,  $[110]$  方向上也有两个

原子, 故原子直径为  $\frac{\sqrt{2}}{2}a$ ; HCP 结构的密排方

向为  $[11\bar{2}0]$ , 在此方向上, 排有一个原子, 故原子直径就为  $a$ 。

2.  $(10\bar{1}2)$  晶面与六方晶系的完整晶胞的交线如图 34-2 所示, 其中画影线的晶面就是  $(10\bar{1}2)$  面, 它与晶胞的交线为  $ABCDEF$ 。

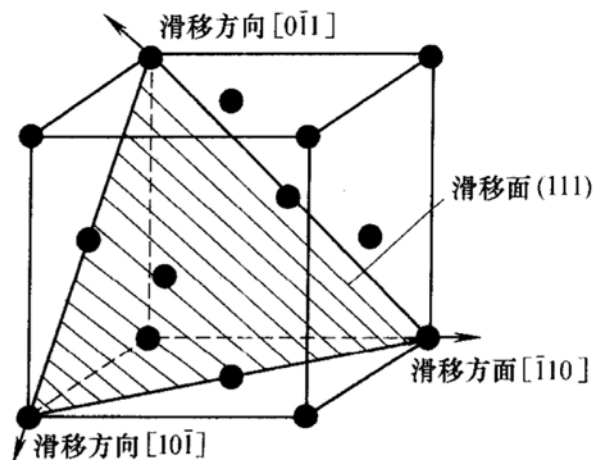


图 34-1 第三题第 1 小题解答图

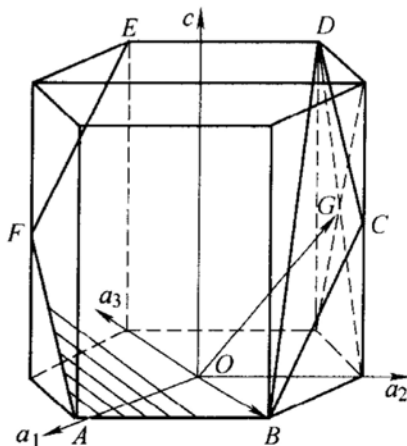


图 34-2 第四题第 2 小题解答图

图中  $OB$  即为  $[11\bar{2}0]$ ,  $[\bar{1}101]$  如图中  $OG$  所示。

$\{10\bar{1}2\}$  晶面族包括有  $(10\bar{1}2)$ 、 $(\bar{1}012)$ 、 $(0\bar{1}12)$ 、 $(01\bar{1}2)$ 、 $(1\bar{1}02)$  以及  $(\bar{1}102)$  六个面。

### 五、

1. 略。

2. 相图中有五个单相区、七个两相区、三个三相平衡反应。

3. 包晶转变线  $HJB$  ( $1495^\circ\text{C}$ ):  $L_B + \delta_H \rightarrow \gamma_J$ , 即  $B$  点成分的  $L$  相与  $H$  点成分的  $\delta$  相, 在  $1495^\circ\text{C}$  反应生成  $J$  点成分的  $\gamma$  相。

共晶转变线  $ECF$  ( $1148^\circ\text{C}$ ):  $L_C \rightarrow \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$ , 即  $C$  点成分的液相在  $1148^\circ\text{C}$  反应生成了由  $E$  点成分的  $\gamma$  相和  $\text{Fe}_3\text{C}$  组成的莱氏体。

共析转变线  $PSK$  ( $727^\circ\text{C}$ ):  $\gamma_S \rightarrow \alpha_P + \text{Fe}_3\text{C}$ , 即  $S$  点成分的  $\gamma$  相在  $727^\circ\text{C}$  反应生成了由  $P$  点成分的  $\alpha$  相和  $\text{Fe}_3\text{C}$  组成的珠光体。

4. 含  $0.15\%$   $\text{C}$  铁-碳合金平衡冷却到室温时的相变过程和组织示意图如图 34-3 所示。

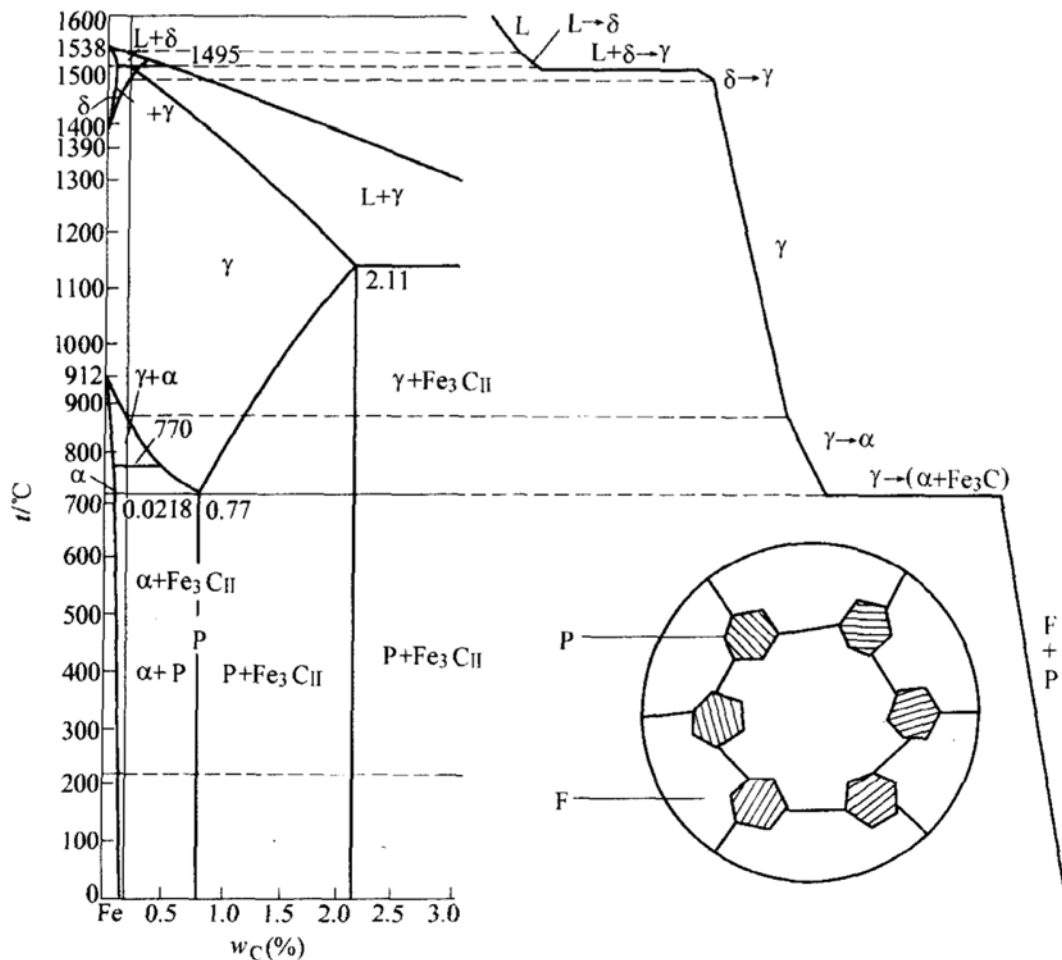


图 34-3 第五题第 4 小题解答图



含 0.15% C 铁-碳合金平衡冷却到室温后, 组织中只有两个相, 即  $\alpha$  相和渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}$  相, 其分别为:

$$\alpha \text{ 相的相对含量} = \frac{6.69 - 0.15}{6.69} \times 100\% = 97.8\%$$

$$\text{渗碳体 } \text{Fe}_3\text{C} \text{ 相的相对含量} = 1 - 97.8\% = 2.2\%$$

六、

1. 低碳钢退火试样的静拉伸曲线示意于图 34-4。曲线上最明显的特点是出现上下屈服点, 这可以用位错理论中的柯氏气团来解释。试样静拉伸时, 一些小尺寸的间隙原子, 如 C、H、O、N 等会聚集在位错线的下方, 形成柯氏气团, 对位错线起着钉扎作用, 故形变材料要在较高的应力下位错线才能脱钉而开始运动, 当位错线脱钉时应力会突然有所下降, 于是就出现了上屈服点。一旦位错线挣脱了柯氏气团的钉扎, 就会在较低的应力下继续运动, 于是就出现了下屈服点。

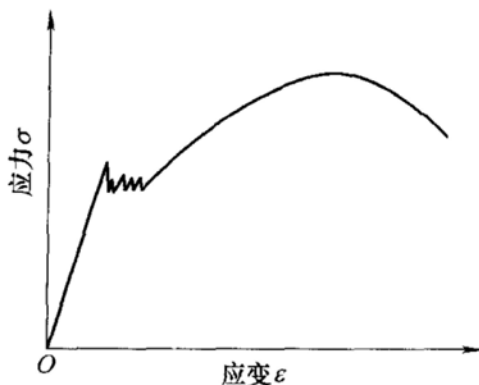


图 34-4 第六题第 1 小题解答图

2. 相律公式是  $f = c - p + 1$ , 式中  $f$ 、 $c$ 、 $p$  分别表示自由度、成分数和相数。对于三元合金来说, 当  $f$  为最小值 0 时, 相数  $p$  为 4, 说明可以出现四相平衡。但这时自由度  $f$  为 0, 表示各个相成分以及温度都是确定的, 故三元平衡相图的水平截面 (即四相平衡面) 可以使用杠杆定律来分析各个相的相对含量。但是, 三元平衡相图的垂直截面是一个伪二元相图, 在此垂直截面上, 无法确定平衡相的成分点。因此, 三元平衡相图的垂直截面上是不能使用杠杆定律进行各个相相对含量计算的。

# 西安工业大学

## 试 卷 十 九

### 2007 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：材料科学基础

适用专业：材料加工工程，材料物理与化学，材料学

#### 一、(每小题 2 分，共 10 分) 名词解释

1. 金属键 2. 间隙固溶体 3. 非稳态扩散 4. 相律 5. 定向凝固

#### 二、(每小题 4 分，共 20 分) 是非判断并改错

1. 在密排六方晶体中， $(110)$ 、 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}01)$ 、 $(101)$ 、 $(011)$  和  $(0\bar{1}\bar{1})$  都是属于同一个晶面族。

2. 中间相只是包括那些位于相图中间且可以用一个分子式表示的化合物相。

3. 低碳钢渗碳处理时，一般都在  $950^{\circ}\text{C}$  的高温下进行，这是因为此时碳原子的活动能力强，有利于扩散的快速进行。

4. 多条刃型位错线堆积在一起就形成了一条滑移线。

5. 采用适当的再结晶退火，可以细化金属铸件的晶粒大小。

#### 三、(每小题 15 分，共 30 分) 完成下列各题

1. 设在简单立方晶体中有一个位于滑移面  $ABCD$  上的位错环  $abcd$ ，其柏氏矢量  $\mathbf{b}$ 、所受切应力  $\tau$  如图 19-1 所示，回答下列问题：

(1) 指出位错环  $abcd$  中各段位错线的类型。

(2) 画出位错环  $abcd$  移出晶体后晶体所产生的滑移量及所产生变形的方向。

2. 有一铝单晶体的试样表面为  $(100)$ ，如该晶体的各个滑移系都可以进行滑移，则在试样表面可能看到的滑移线形貌（即滑移线的取向和它们之间的夹角）是什么？

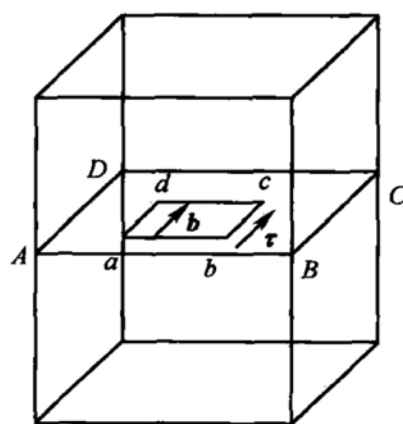


图 19-1 第三题第 1 小题图

#### 四、(共 20 分) 计算题

已知铜原子的原子半径为  $0.25\text{nm}$ ，画出铜晶体的一个晶胞，并完成下列工作：

1. 计算  $(001)$ 、 $(110)$ 、 $(111)$  各个晶面中每单位面积 ( $1\text{mm}^2$ ) 的原子数分别有多少个，并作以比较。
2. 在图上画出发生滑移的一个晶面以及这个晶面上发生滑移的晶向。

#### 五、(每小题 10 分，共 40 分) 完成下列各题

1. 画出  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  的平衡相图，并填写相区。
2. 具体说明相图中有几个单相区、几个两相区和几个三相平衡反应。
3. 说明相图中各水平线的相变过程、相变产物及反应条件。
4. 说明  $w_c = 0.40\%$  的铁-碳合金从液态平衡冷却到室温时的相变过程和最终平衡组织，并计算其中各个相的相对含量。

#### 六、(每小题 15 分，共 30 分) 完成下列各题

1. 有一个铝单晶体试样，在拉伸前的滑移方向与拉伸轴的夹角为  $45^\circ$ ，拉伸后的滑移方向与拉伸轴的夹角为  $30^\circ$ ，试求铝单晶体试样拉伸后所产生的延伸率为多少。
2. 三元合金相图中的垂直截面与二元合金相图有何不同？为什么二元合金相图可以使用杠杆定律来分析各个相的相对含量，而三元合金相图中的垂直截面却不能？

## 标准答案

### 一、

1. 金属键：金属正离子与自由电子之间的相互作用所构成的金属原子间的结合力称为金属键。
2. 间隙固溶体：若溶质原子比较小，就可以进入溶剂晶格的间隙位置之中而不改变溶剂的晶格类型，这样形成的固溶体称为间隙固溶体。
3. 非稳态扩散：在扩散过程中任何一点的浓度都随时间不同而变化的扩散称为非稳态扩散。
4. 相律：在平衡系统中由于受平衡条件的制约，系统内存在的相数有一定限制。这种限制使系统的自由度  $f$  和组元数目  $c$ 、相的数目  $p$  以及对系统平衡状态能够产生影响的外界因素数目  $n$  之间存在一定的关系，这种关系就称之为相律，即  $f = c - p + n$ 。
5. 定向凝固：在凝固过程中，铸件中各个组织全部沿同一方向生长，由此产

生由取向相同的柱状、层片状及棒状所构成的单相或多相纤维状组织，这种凝固技术称为定向凝固。

## 二、

1. 错。在密排六方晶体中若用三指数表示法，则  $(110)$ 、 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}01)$ 、 $(101)$ 、 $(011)$  和  $(0\bar{1}\bar{1})$  所表示的分别是其柱面和锥面，它们不属于同一个晶面族。

2. 错。凡是位于相图中间的各种合金相结构都统称为中间相，这其中当然包括一个分子式表示的化合物相以及一些固溶体相。

3. 错。主要原因是在  $950^{\circ}\text{C}$  的高温下低碳钢的组织为奥氏体，碳在奥氏体的溶解度可以达到最大值。

4. 错。只有当约 1000 条位错线移出晶体表面，才会在晶体表面形成一条滑移线。

5. 错。只有经过一定量塑性变形的金属材料，采用适当的再结晶退火，才能达到细化晶粒大小的目的。金属铸件一般不能经受一定量的塑性变形，所以不能细化其晶粒大小。

## 三、

### 1.

(1) 位错线  $ab$  和位错线  $cd$  的方向矢量都和其柏氏矢量  $\mathbf{b}$  垂直，故它们属于刃型位错；而位错线  $bc$  和位错线  $da$  的方向矢量都和其柏氏矢量  $\mathbf{b}$  平行，故它们属于螺型位错。

(2) 位错环  $abcd$  全部移出晶体后，晶体会产生宽度为一个柏氏矢量的滑移量，所产生变形的方向与切应力  $\tau$  的方向一致，如图 19-2 所示。

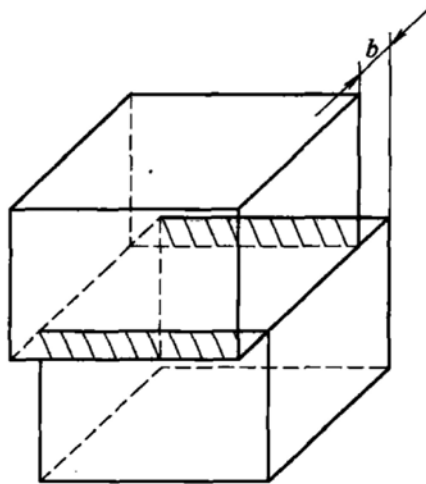


图 19-2 第三题第 1 小题解答图

2. 铝是面心立方晶体，它的滑移系是  $\{111\} \langle 110 \rangle$ ，共有 12 个具体的滑移系。现在，铝单晶体试样表面为  $(100)$ 。当发生塑性变形时，晶体表面所产生

的滑移线应该是既位于各个  $\{111\}$  面上, 又位于  $(100)$  面上, 即位于  $(111)$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$  四个滑移面与  $(100)$  面的交线上, 应该是  $[01\bar{1}]$  和  $[0\bar{1}1]$ , 而这两个方向又互相垂直, 同向的滑移线又互相平行。因此, 可以看到的这些滑移线在  $(100)$  面呈现互相平行或者互相垂直的组态。

#### 四、

铜是面心立方晶体, 其单位晶胞如图 19-3 所示。

1. 现已知铜原子的原子半径为  $0.25\text{nm}$ , 根据面心立方晶体中原子半径与晶格常数之间的关系, 可以求得铜晶体的晶格常数  $a$  为

$$a_{\text{Cu}} = \frac{4r}{\sqrt{2}} = \frac{4 \times 0.25\text{nm}}{1.414} = 0.71\text{nm}$$

面心立方晶体中  $(001)$  面的原子密度

$$\rho_{001} = \frac{2}{a^2} = \frac{2}{(0.71 \times 10^{-6}\text{mm})^2} = 4 \times 10^{12} \text{个}/\text{mm}^2$$

面心立方晶体中  $(110)$  面的原子密度

$$\rho_{110} = \frac{2}{\sqrt{2} a^2} = \frac{2}{1.414 (0.71 \times 10^{-6}\text{mm})^2} = 2.83 \times 10^{12} \text{个}/\text{mm}^2$$

面心立方晶体中  $(111)$  面的原子密度

$$\rho_{111} = \frac{\frac{4}{3}\sqrt{3}}{a^2} = \frac{4\sqrt{3}}{3 \times (0.71 \times 10^{-6}\text{mm})^2} = 4.61 \times 10^{12} \text{个}/\text{mm}^2$$

可见, 这三个晶面中  $(111)$  面的原子密度为最高,  $(001)$  面次之,  $(110)$  面的原子密度为最低。

2. 面心立方晶体发生滑移的一个晶面  $(111)$  以及这个晶面上发生滑移的三个晶向  $[01\bar{1}]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 、 $[\bar{1}01]$  如图 19-3 中所注。

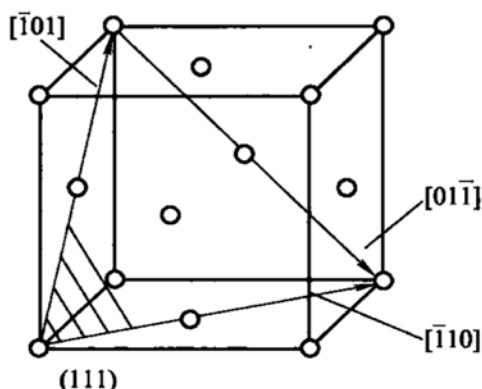


图 19-3 第四题解答图

#### 五、

1. 所画出  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  的平衡相图, 如图 19-4 所示。各个相区的填写, 如图 19-

4 中所注。

2. Fe-Fe<sub>3</sub>C 的平衡相图中有 5 个单相区, 即液相区、高温铁素体区、铁素体区 F、奥氏体区 A 和渗碳体区。

Fe-Fe<sub>3</sub>C 的平衡相图中有 7 个两相区, 即 (L + δ)、(L + A)、(A + δ)、(A + F)、(L + Fe<sub>3</sub>C)、(F + Fe<sub>3</sub>C)、(A + Fe<sub>3</sub>C)。

Fe-Fe<sub>3</sub>C 的平衡相图中有 3 个三相平衡反应。

3. 包晶转变  $L + \delta \rightarrow A$ , 反应产物是奥氏体。发生在 1495℃, 三相的成分  $w_c$  分别为 0.53%、0.09% 和 0.17%

共晶转变  $L \rightarrow A + Fe_3C$ , 反应产物是莱氏体。发生在 1148℃, 三相的成分  $w_c$  分别为 4.30%、2.11% 和 6.69%

共析转变  $A \rightarrow F + Fe_3C$ , 反应产物是珠光体。发生在 727℃, 三相的成分  $w_c$  分别为 0.77%、0.0218% 和 6.69%

4. 在 1495℃ 以上, 液相中析出高温铁素体 δ。

在 1495℃ 时, 发生包晶转变  $L + \delta \rightarrow A$ , 反应产物是奥氏体。

在 1495 ~ 800℃ 之间, 奥氏体冷却。

在 800 ~ 727℃ 之间, 奥氏体中析出铁素体 F。

在 727℃ 时, 发生共析转变  $A \rightarrow F + Fe_3C$ , 反应产物是珠光体。

在 727℃ 以下, 从铁素体 F 中析出三次渗碳体。

室温时,  $w_c = 0.40\%$  的铁-碳合金的最终平衡组织是先共析铁素体 + 珠光体 + 三次渗碳体, 平衡相为铁素体 + 渗碳体, 其相对含量分别为

$$w_F = \frac{6.69 - 0.4}{6.69} \times 100\% = \frac{6.29}{6.69} \times 100\% \approx 94\%$$

$$w_{Fe_3C} = 1 - 94\% = 6\%$$

六、

1. 铝单晶体试样拉伸前、后的示意图如图 19-5 所示。图中 AC 和 A'C' 分别表示试样拉伸前、后晶体中两个相邻滑移面之间的距离, 即滑移面的面间距。

显然, 试样拉伸前、后晶体中两个相邻滑移面之间的面间距是不会改变的, 即 AC 和 A'C' 相等。于是, 铝单晶体试样拉伸后所产生的延伸率应为:

$$\delta = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{\frac{A'C'}{\sin 30^\circ} - \frac{AC}{\sin 45^\circ}}{\frac{AC}{\sin 45^\circ}} = \frac{2 - \sqrt{2}}{\sqrt{2}} = \frac{0.586}{1.414} = 0.414 = 41.4\%$$

2. 三元合金相图中垂直截面的两端并不是纯组元, 而是一端纯组元、另一端二元合金, 甚至两端都是二元合金。另外, 在二元合金相图中纯组元的相变点只有一个, 而在三元合金相图的垂直截面中, 其两端往往是开口的, 即有两个相变点。因此, 它与二元合金相图不同, 是一个伪二元合金相图。

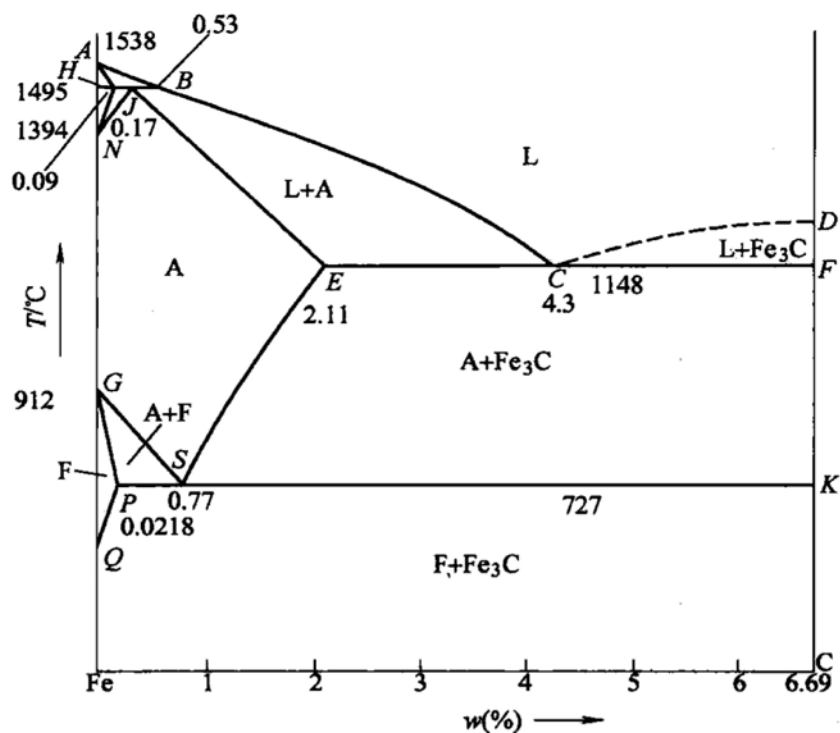


图 19-4 第五题解答图

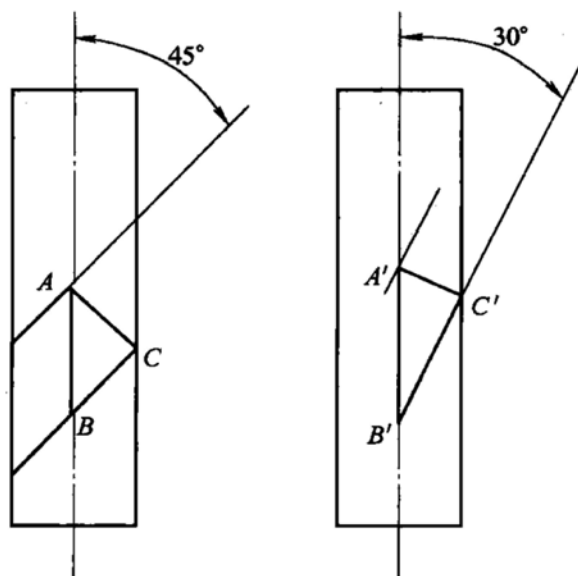


图 19-5 第六题第 1 小题解答图

杠杆定律表示在一定的温度下，合金两个相的相对含量与合金成分点到两个相区线的距离成反比。杠杆定律的应用必须保证自由度为零的条件。在三元合金相图中的垂直截面中，即使温度一定，此时的自由度  $f = c - p = 3 - 2 = 1$ ，也不满足自由度为零的条件。因此，在三元合金相图中的垂直截面中，不能使用杠杆定律来分析各个相的相对含量。

# 试 卷 二 十

## 2008 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：材料科学基础

适用专业：材料加工工程，材料物理与化学，材料学

---

一、(每小题 2 分，共 20 分) 名词解释

1. 配位数 2. 伪共晶 3. 成分过冷 4. 固溶体 5. 稳态扩散  
6. 位错 7. 回复 8. 滑移 9. 非均匀形核 10. 平衡分配系数

二、(每小题 10 分，共 30 分) 完成下列各题

1. 试用位错理论解释低碳钢的应变时效现象。  
2. 说明合金强化的主要机制。  
3. 说明冷变形金属加热时回复、再结晶及晶粒长大的过程和特点。

三、(每小题 15 分，共 60 分) 计算题

1. 已知纯铜的熔化潜热为  $1.88 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ ，熔点为  $1089^\circ\text{C}$ ，点阵常数为  $3.4167 \text{ \AA}$ ，发生均匀形核的过冷度为  $230\text{K}$ ， $\sigma_{\text{SL}} = 1.44 \times 10^{-1} \text{ J/m}^2$ 。求铜的临界晶核半径  $r^*$  及临界晶核中所含的铜原子数。

2. 拉伸铜单晶体时，若力轴的方向为  $[001]$ ， $\sigma = 10^6 \text{ Pa}$ ，求  $(111)$  面上柏氏矢量  $\mathbf{b} = a/2 [\bar{1}01]$  的螺型位错线上所受的力 ( $a_{\text{Cu}} = 0.36 \text{ nm}$ )。

3. 画出常见的金属晶体结构面心立方、体心立方和密排六方的晶胞示意图，并分别计算它们的晶胞原子数、原子半径 (用晶格常数表示)、配位数和致密度。

4. Al-Cu 合金相图如图 20-1 所示，设分配系数  $k$  和液相线斜率均为常数，测得铸铁的凝固速度  $R = 3 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ，温度梯度  $G = 30^\circ\text{C/cm}$ ，求扩散系数  $D = 3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  时，合金凝固时能保持平面界面的最大含铜量。

四、(每小题 10 分，共 30 分) 完成下列各题

1. 画出 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图全图，标注各相区及特征点、线的成分及温度。  
2. 分析  $w_{\text{C}} = 3.6\%$  合金的平衡结晶过程，求出室温下的组织组成物和相组成物的相对量。

3. 将  $w_{\text{C}} = 0.2\%$  的碳钢零件置于含  $1.2\%$  碳势的渗碳气氛中加热至  $930^\circ\text{C}$ ，经  $10\text{h}$  保温后随炉冷却至室温，试分析在  $930^\circ\text{C}$  和室温时零件从表层到心部成分和组织的变化规律，并画出示意图。



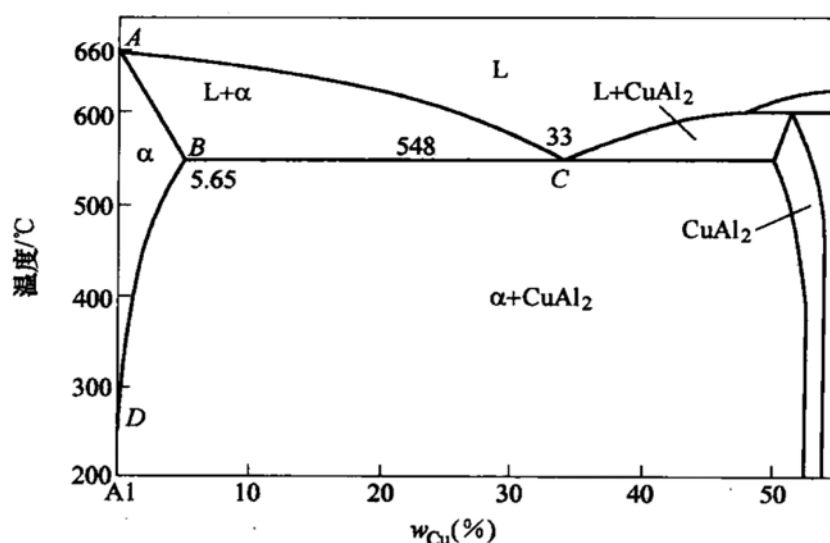


图 20-1 第三题第 4 小题图

五、(共 10 分)  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三组元固态完全不互溶，图 20-2 为其三元相图投影图。已知合金  $O$  的成分为  $w_A = 80\%$ ， $w_B = 10\%$ ， $w_C = 10\%$ ， $a$  点的成分为  $w_A = 60\%$ ， $w_B = 20\%$ ， $w_C = 20\%$ ， $E$  点的成分为  $w_A = 50\%$ ， $w_B = 10\%$ ， $w_C = 40\%$ 。

1. (4 分) 写出图中合金  $I$  和  $P$  的室温平衡组织。
2. (3 分) 简要写出合金  $O$  的结晶过程和室温平衡组织。
3. (3 分) 计算室温下合金  $O$  的组织组成物的相对含量。

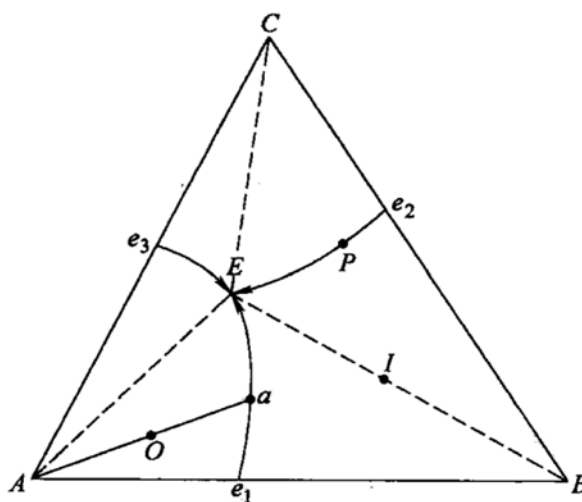


图 20-2 第五题图

## 标准答案

一、

1. 配位数：在晶体结构中，和任意原子邻近且距离相等的原子数。
2. 伪共晶：由非共晶成分的合金所获得的共晶组织称为伪共晶。
3. 成分过冷：合金溶液在凝固时，理论凝固温度不变，过冷度完全取决于溶质成分的分布，这样的过冷称为成分过冷。
4. 固溶体：溶质原子溶入到溶剂中所形成的均一的相，其晶体结构仍然保持溶剂的结构，但由于溶质原子的溶入，会产生晶格畸变。
5. 稳态扩散：质量浓度不随时间而变化的扩散。
6. 位错：晶体中的一维缺陷或线状缺陷，称为位错。
7. 回复：回复是指经冷塑性变形的金属在加热时，在光学显微组织发生改变前（即在再结晶晶粒形成前）所产生的某些结构和性能的变化过程。
8. 滑移：位错线沿着滑移面的运动称为位错的滑移。
9. 非均匀形核：晶核在液态金属中依靠外来物质表面（型壁或杂质）或在温度不均匀处择优形成。
10. 平衡分配系数：一定温度下，两相平衡时固液两相成分之比，即  $k_0 = C_s/C_L$ 。

## 二、

1. 将退火低碳钢进行少量的塑性变形后卸载，然后立即加载，屈服现象不再出现。但是如果卸载后，将试样在室温下放置较长时间或者稍微加热后，再进行拉伸就又可以观察到屈服现象，不过此时的屈服强度会有所提高，这种现象称为应变时效。

低碳钢的应变时效可以用溶质原子与位错交互作用的柯垂尔（Cottrell）气团理论作出很好的解释。一般认为，在固溶体中，溶质或杂质原子在晶体中造成点阵畸变，溶质原子的应力场和位错应力场会发生交互作用，作用的结果是溶质原子将聚集在位错线附近，形成能量更低的溶质原子气团，即所谓的柯垂尔气团。

将低碳钢试验拉伸产生少量预塑性变形，此时试样在外加应力的作用下使位错摆脱碳原子的钉扎，表现为屈服。若卸载后马上重新加载，短时间内碳原子来不及重新聚集在位错周围，所以继续加载时不会出现屈服现象；当卸载后经历较长时间或短时加热后，碳原子又会通过扩散重新聚集到位错线附近而形成气团，所以继续进行拉伸时，又会出现屈服现象，并使强度和硬度升高，这就是应变时效产生的原因。

## 2.

（1）细晶强化：通过增加晶粒数目，提高晶界对移动位错的阻碍作用，从而达到强化的效果。

（2）固溶强化：即将溶质原子溶入基体金属中，使基体金属产生点阵畸变，从而抑制位错源的活动以提高基体金属的强度。

(3) 形变强化：即当晶体经过形变之后，使晶体内部的位错发生塞积或缠结，难以运动，从而达到强化基体的目的。

(4) 第二相强化：即通过第二相粒子均匀弥散分布在基体上，阻止位错的运动或增加位错运动的阻力，提高合金的强度。

3.

(1) 回复过程

1) 组织不发生变化，仍保持变形伸长的晶粒形态。

2) 变形引起的宏观（一类）应力全部消除，微观（二类）应力大部分消除。

3) 一般力学性能变化不大，硬度、强度仅稍有降低，塑性稍有提高；某些物理性能有较大变化，电阻率显著降低，密度增大。

(2) 再结晶过程

1) 组织发生变化，变形伸长的晶粒变为新的等轴晶粒。

2) 力学性能发生急剧变化，硬度、强度急剧降低，塑性提高，恢复至变形前的状态。

3) 变形储存能全部释放，点阵畸变（三类应力）全部消除，位错密度降低。

(3) 晶粒长大过程

1) 晶粒长大。

2) 性能变化，如强度、塑性、韧性下降。

3) 还可能出现再结晶织构等现象。

三、

1. 临界晶核半径

$$r^* = \frac{2\sigma \cdot T_m}{L_m \cdot \Delta T} = \frac{2 \times 1.44 \times 10^{-1} \times (1089 + 273)}{1.88 \times 10^9 \times 230} \text{ m} = 9.07 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\text{临界晶核体积 } V_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (9.07 \times 10^{-10})^3 \text{ m}^3$$

铜为面心立方结构，每个晶胞含有 4 个铜原子。晶胞体积

$$V_2 = a^3 = (3.4167 \times 10^{-10})^3 \text{ m}^3$$

$$\text{故临界晶核中所含的铜原子数 } n = \frac{V_1}{V_2} \times 4 = 313 \text{ 个}$$

2. 设外力拉应力在 (111) 滑移面上沿  $[\bar{1}01]$  晶向的分切应力为

$$\tau = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

式中， $\phi$  为  $[001]$  与  $[111]$  的夹角， $\lambda$  为  $[001]$  与  $[\bar{1}01]$  的夹角。

则

$$\tau = 10^6 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ Pa} = 4.0825 \times 10^5 \text{ Pa}$$

若螺型位错受力为  $F_d$ ，则

$$F_d = \tau b = 4.0825 \times 10^5 \times \frac{\sqrt{2}}{2} \times 0.36 \times 10^{-9} \text{ N/m} = 1.039 \times 10^{-4} \text{ N/m}$$

3. 面心立方、体心立方和密排六方的晶胞示意图如图 20-3 所示。计算得它们的晶胞原子数、原子半径（用晶格常数表示）、配位数和致密度列于表 20-1。

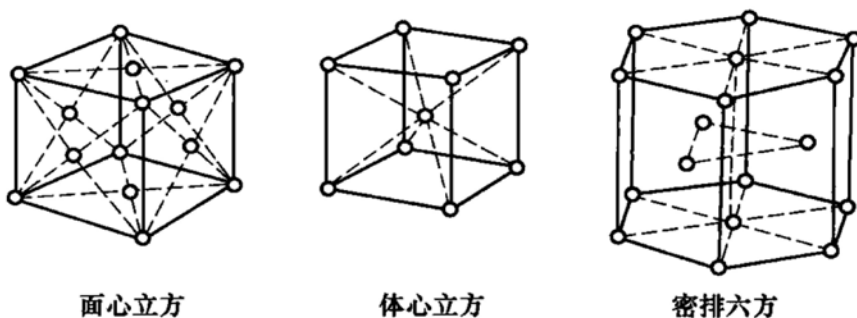


图 20-3 第三题第 3 小题解答图

表 20-1 第三题第 3 小题解答表

	FCC	BCC	HCP
晶胞原子数	4	2	6
原子半径	$R = \frac{\sqrt{2}}{4}a$	$R = \frac{\sqrt{3}}{4}a$	$R = \frac{a}{2}$
配位数	12	8	12
致密度	0.74	0.68	0.74

4. 成分无过冷的临界点公式:  $\frac{G}{R} = \frac{mC_0}{D} \cdot \frac{1-k_0}{k_0}$

$$k_0 = \frac{C_s}{C_L} = \frac{5.65}{33.2} = 0.17 \quad m = \frac{660 - 548}{33} = 3.4$$

$$C_0 = \frac{G}{R} \cdot \frac{D}{m} \cdot \frac{k_0}{1-k_0} = \frac{30 \times 3 \times 10^{-5} \times 0.17}{3 \times 10^{-4} \times 3.4 \times (1 - 0.17)} = 18\%$$

#### 四、

1. Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图如图 20-4 所示。

2. 结晶过程: 液相在 1 点开始析出奥氏体, 到 2 点, 液相开始共晶转变, 产物为莱氏体。继续冷却, 奥氏体开始析出二次渗碳体, 温度降到 727°, 奥氏体转变为珠光体, 室温组织组成物为: 珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体。

$$\text{组织组成物相对量计算: } w_A = \frac{4.3 - 3.6}{4.3 - 2.11} = 32\%$$

$$w_{L'd} = 1 - w_A = 68\%$$

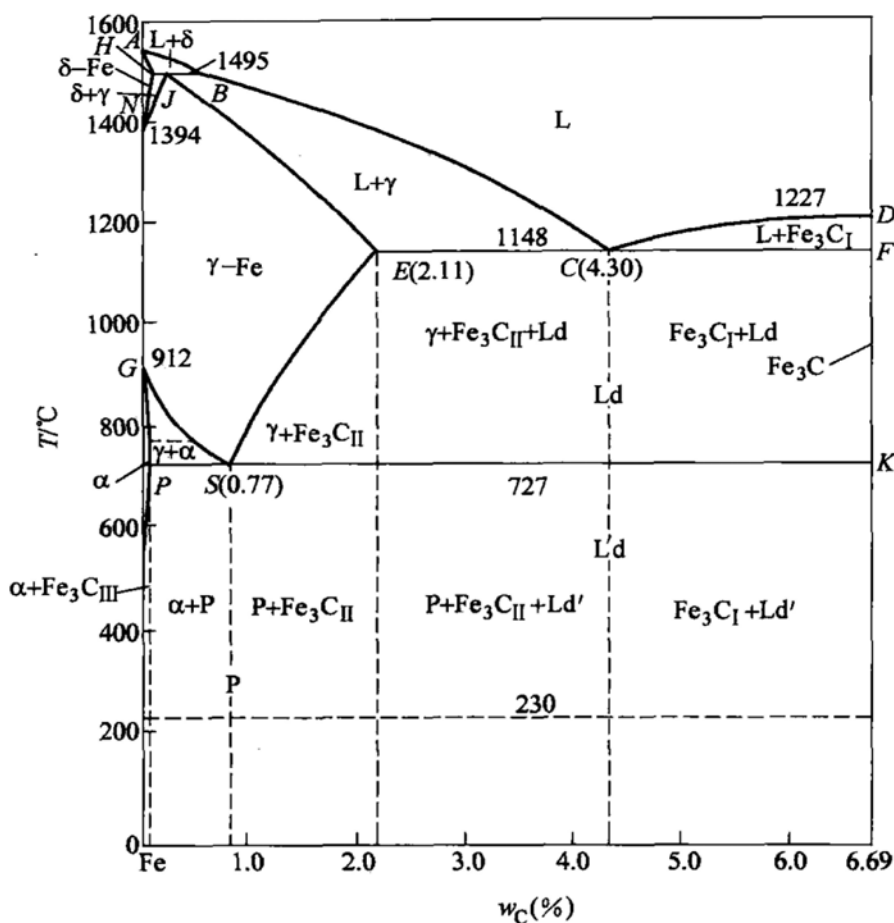


图 20-4 第四题第 1 小题解答图

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}} = w_{\text{A}} \times \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} = 7.2\%$$

$$w_{\text{P}} = 1 - w_{\text{L'd}} - w_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}} = 24.8\%$$

相组成物相对量计算:  $w_{\text{F}} = \frac{6.69 - 3.6}{6.69} \times 100\% = 46\%$

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = 1 - w_{\text{F}} = 54\%$$

3. 如图 20-5 所示。

五、

1.  $I: B + (A + B + C)$

$P: (B + C) + (A + B + C)$

2. 合金 O 加热到液相面温度以上后, 缓慢降温, 首先遇到液相面  $Ae_1Ee_3A$ , 开始结晶出初晶 A, 这时液相的成分等于合金成分, 两相平衡相连接线的投影是 AO 线。继续冷却时, 不断析出初晶 A, 液相中 A 组元的含量不断减少, B、C 组元的含量不断增加, 液相成分沿 AO 的延长线变化。当液相成分到达 a 点时, 开始发生三相共晶转变,  $L \rightarrow A + B$ 。此后在温度继续下降时, 液相中不断凝固出两

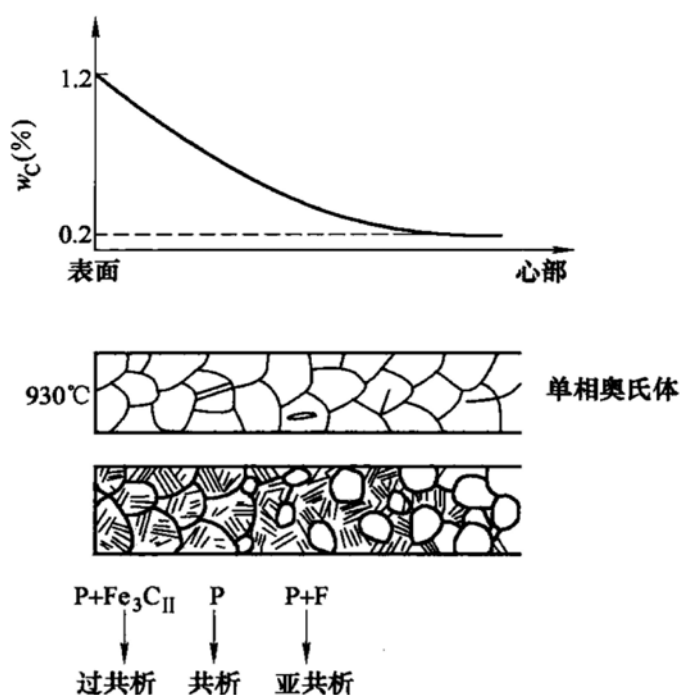


图 20-5 第四题第 3 小题解答图

相共晶 ( $A+B$ ), 液相成分沿  $aE$  线变化, 直到  $E$  点发生四相共晶转变  $L \rightarrow A+B+C$ 。在略低于  $E$  点温度凝固完毕, 不再发生其他转变。故合金在室温下的平衡组织为  $A+(A+B)+(A+B+C)$ 。

3. 作  $aD//BC$ ,  $OF//BC$ ,  $aM//AB$ ,  $EN//AB$ , 延长  $Ea$  交  $AB$  于  $q$ 。

$$w_A = \frac{Oa}{Aa} = \frac{DF}{AD} = \frac{(100-60) - (100-80)}{100-60} \times 100\% = 50\%$$

$$w_{A+B} = \frac{Ea}{Eq} (1 - w_A) = 0.5 \times \frac{MN}{AN} \times 100\% = 0.5 \times \frac{40-20}{40} \times 100\% = 25\%$$

$$w_{A+B+C} = 1 - w_A - w_{A+B} = 25\%$$

# 试 卷 二 十 一

## 2009 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：材料科学基础

适用专业：材料加工工程，材料物理与化学，材料学

### 一、(每小题 2 分，共 10 分) 名词解释

1. 晶带轴定律
2. 非均匀形核
3. 柯氏气团
4. 多系滑移
5. 动态再结晶

### 二、(每小题 4 分，共 20 分) 是非判断题 (对的请打“√”，错的请打“×”，并予以改正)

1. 置换固溶体和间隙固溶体都有可能形成无限固溶体。
2. 密排六方结构是纯金属的基本晶体结构之一，也是布拉菲点阵中的一种。
3. 位错线的滑移和攀移都可以使金属晶体在滑移面产生塑性变形。
4. 高温莱氏体和室温莱氏体都是铸铁中主要组成相，且其组织形貌完全相同。
5. 形变织构是金属材料塑性变形过程中产生的，它对金属材料有着明显的强化作用。

### 三、(20 分) 计算题

一个简单立方晶系的双晶，它们的滑移系原为  $\{100\} \langle 100 \rangle$ ，双晶的取向及力轴的取向如图 21-1 所示 (提示：晶界两侧的取向不同)，试确定哪一个晶体首先开始滑移，所开动的具体滑移系是什么。

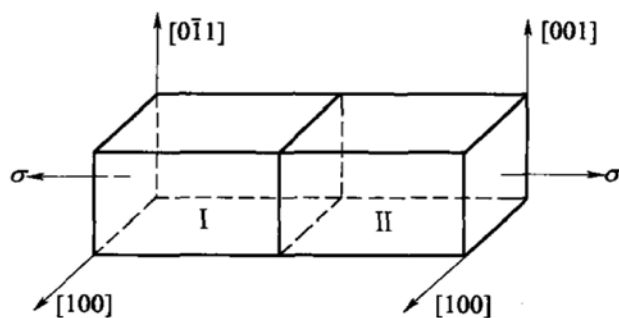


图 21-1 第三题图

## 四、(共 30 分) 完成下列各题

设一长为 200mm、横截面积为  $400\text{mm}^2$  的金属棒，上端固定，下端加以一个与长度方向平行且指向下方、大小为 98kN 的力，如图 21-2 所示。

1. (20 分) 试求出与力轴方向分别成  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  以及  $\theta$  的各截面上的正应力和切应力。

2. (10 分) 画出切应力与  $\theta$  的关系曲线，并求出切应力为最大时的  $\theta$  为多少。

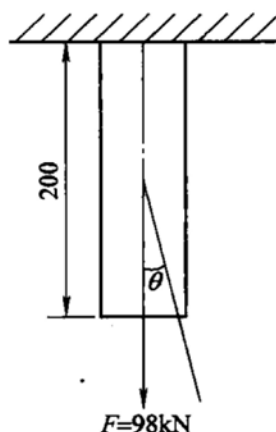


图 21-2 第四题图

## 五、(每小题 10 分, 共 40 分) 完成下列各题

1. 画出 Fe-Fe<sub>3</sub>C 的平衡相图，并填写相区。
2. 说明相图中各水平线上下的相区分布，并用相区接触法则予以解释。
3. 计算  $w_c = 0.20\%$  的铁-碳合金平衡冷却到室温时的相和组织的相对含量。
4. 若上述合金要进行渗碳处理，请确定合适的渗碳温度，并予以解释。

## 六、(每小题 15 分, 共 30 分) 完成下列各题

1. 试分析在具有面心立方结构的金属晶体中，下列位错反应能否进行，说明反应前后的位错各属于什么类型。能否在滑移面上运动。

$$\frac{a}{2}[101] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}] \rightarrow \frac{a}{3}[111]$$

2. 图 21-3 为 V-Cr-C 三元系液相图投影图 (示意图) 的一部分，请列出所有四相平衡反应的反应式，并说明属于什么反应。



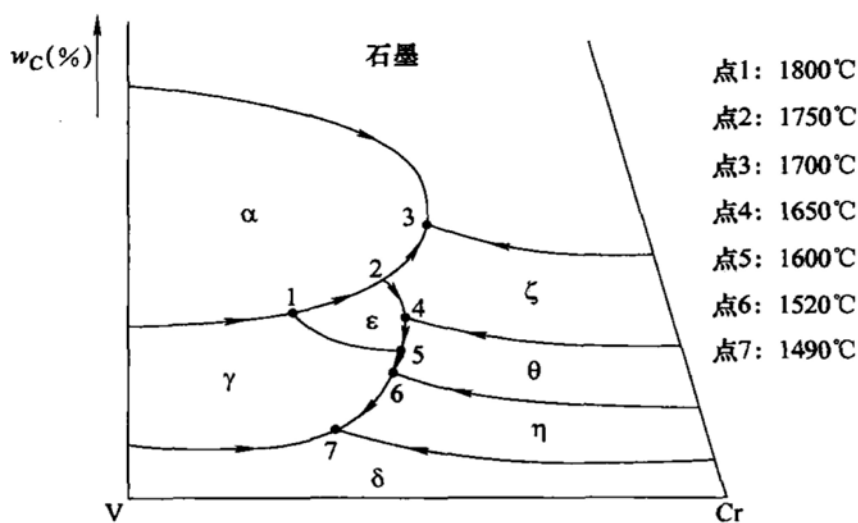


图 21-3 第六题第 2 小题图

## 标准答案

一、

1. 晶带轴定律: 所有平行于同一方向的晶面 ( $hkl$ ) 构成一个晶带, 该方向  $[uvw]$  就称为晶带轴, 则有  $hu + kv + lw = 0$ , 这就是晶带轴定律。

2. 非均匀形核: 如果金属熔体中存在着高熔点的固相夹杂物, 晶胚有可能依附这些固相夹杂物的现成界面形核, 这种现象就称为非均匀形核。

3. 柯氏气团: 间隙原子与位错线进行弹性交互作用时, 间隙原子将在位错线附近聚集, 形成小原子集团, 称为柯氏气团。

4. 多系滑移: 金属晶体在一定方向受力时, 可以使多个等同滑移系同时开动, 这称为多系滑移。

5. 动态再结晶: 金属材料在一定温度下变形加工时, 同时也发生再结晶, 这种与形变同时发生的再结晶就称为动态再结晶。

二、

1. 错。只有置换固溶体才有可能形成无限固溶体, 而间隙固溶体只能形成固溶度很小的有限固溶体。

2. 错。密排六方结构是纯金属的基本晶体结构之一, 但不是布拉菲点阵中的一种, 它属于布拉菲点阵中的简单六方结构。

3. 错。位于滑移面上的位错线在切应力的作用下可以滑移, 从而使金属晶体在滑移面产生塑性变形; 刃型位错在一定条件下可以沿垂直于滑移面的方向运动, 刃型位错的这种运动就称为攀移。刃型位错的攀移将导致多余半原子面的扩

大或缩小，与滑移面产生塑性变形无关。

4. 错。莱氏体不是组成相，而是由几个相组成的组织组成物。高温莱氏体和室温莱氏体的组织形貌是不同的，高温莱氏体由奥氏体和渗碳体组成，而室温莱氏体中没有奥氏体，由铁素体，渗碳体和二次、三次渗碳体组成。

5. 不完全对。形变织构是金属材料塑性变形过程中产生的，但会引起金属材料力学性能和物理性能的明显各向异性，且对金属材料没有明显的强化作用。

三、这是一个双晶体，不是单晶体。左边晶体的取向可由方向  $[100]$  和  $[0\bar{1}1]$  所确定。含有这两个方向的晶面为  $(011)$ ，即施加在左边晶体作用力的方向与  $(011)$  面垂直，其方向为  $[011]$ 。而施加在右边晶体作用力的方向与  $(010)$  面垂直，其方向为  $[010]$ 。

在简单立方晶系中， $(011)$  面和滑移面  $(010)$ 、 $(001)$  以及滑移方向  $[010]$ 、 $[001]$  的夹角均为  $45^\circ$ 。左边晶体作用力  $\sigma$  在滑移系上分力为  $\sigma \sin 45^\circ \cos 45^\circ$ ，而右边晶体作用力  $\sigma$  在滑移系上分力为 0。因此，左边晶体首先开始滑移，所开动的滑移系分别为： $(001)[010]$  和  $(010)[001]$ 。

#### 四、

1. 与力轴方向分别成  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  以及  $\theta$  各截面上的正应力和切应力求解如下：

设试样的原始截面积为  $A_0$ ，与力轴方向分别成  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  以及  $\theta$  后，试样的截面积分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ ，而力  $F$  在这些截面的垂直分量分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ ，水平分量分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 。则：

与力轴方向成  $0^\circ$  时

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_1} = \frac{98\text{kN}}{400\text{mm}^2} = 245\text{N/mm}^2 = 245 \times 10^6\text{N/m}^2 = 245\text{MPa}$$

$$\tau_1 = 0$$

与力轴方向成  $30^\circ$  时

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{F \cos 30^\circ}{\frac{A}{\cos 30^\circ}} = \frac{F}{A} \cos^2 30^\circ$$

$$= \frac{98\text{kN}}{400\text{mm}^2} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 = 183.8\text{MPa}$$

$$\tau_2 = \frac{P_2}{A_2} = \frac{F \sin 30^\circ}{\frac{A}{\cos 30^\circ}} = \frac{F}{A} \sin 30^\circ \cos 30^\circ$$

$$= \frac{98\text{kN}}{400\text{mm}^2} \frac{1}{2} \frac{\sqrt{3}}{2} = 53.0\text{MPa}$$

与力轴方向成  $45^\circ$  时

$$\sigma_3 = \frac{F_3}{A_3} = \frac{F}{A} \cos^2 45^\circ = \frac{98 \text{ kN}}{400 \text{ mm}^2} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = 122.5 \text{ MPa}$$

$$\tau_3 = \frac{P_3}{A_3} = \frac{F}{A} \sin 45^\circ \cos 45^\circ = \frac{98 \text{ kN}}{400 \text{ mm}^2} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = 122.5 \text{ MPa}$$

与力轴方向成  $\theta$  角时

$$\sigma_4 = \frac{F_4}{A_4} = \frac{F}{A} \cos^2 \theta = 245 \text{ MPa} \cdot \cos^2 \theta$$

$$\begin{aligned} \tau_4 &= \frac{P_4}{A_4} = \frac{F}{A} \sin \theta \cos \theta = 245 \text{ MPa} \cdot \sin \theta \cos \theta \\ &= \frac{1}{2} \times 245 \sin 2\theta = 122.5 \text{ MPa} \cdot \sin 2\theta \end{aligned}$$

2. 由上面的计算结果可见, 切应力与  $\theta$  角的关系为  $2\theta$  的正弦函数。显然, 当  $\theta$  为  $45^\circ$  时, 切应力达到最大值。根据这个关系式, 很容易作出切应力与  $\theta$  的关系曲线。(关系曲线省略)

## 五、

1. Fe-Fe<sub>3</sub>C 平衡相图略。该相图由 5 个单相区 (铁素体 F、奥氏体 A、渗碳体 Fe<sub>3</sub>C、液相 L 及高温铁素体)、7 个两相区 (L +  $\delta$ 、L + A、L + Fe<sub>3</sub>C、A +  $\delta$ 、A + F、A + Fe<sub>3</sub>C 和 F + Fe<sub>3</sub>C) 和三个等温反应区 (L +  $\delta$  → A、L → A + Fe<sub>3</sub>C、A → F + Fe<sub>3</sub>C) 组成。

2. Fe-Fe<sub>3</sub>C 的平衡相图中有三条水平线, 分别代表三个三相等温反应区。表面上看, 三条水平线的两侧都是和两相区以线接触的方式相邻, 好像不符合“相邻相区的相数差为 1”的相区接触法则。然而, 三条水平线实际上是三个等温反应区, 是三相区。于是, 这就完全符合相区接触法则了。

3.  $w_C = 0.20\%$  的铁-碳合金平衡冷却到室温时的相为铁素体 F 和渗碳体 Fe<sub>3</sub>C, 其相对含量分别为

$$w_F = \frac{6.67 - 0.2}{6.67 - 0.008} = \frac{6.47}{6.662} = 0.9711 = 97.11\%$$

$$w_C = 1 - 0.9711 = 0.0289 = 2.89\%$$

$w_C = 0.20\%$  的铁-碳合金平衡冷却到室温时的相为铁素体 F 和珠光体 P, 其相对含量分别为

$$w_F = \frac{0.77 - 0.2}{0.77 - 0.0218} = \frac{0.57}{0.7482} = 0.7618 = 76.18\%$$

$$w_P = 1 - 0.7618 = 0.2382 = 23.82\%$$

4. 若上述合金要进行渗碳处理, 合适的渗碳温度应该是  $950^\circ\text{C}$  左右。这是因为在这个温度范围内, 该合金处于单相奥氏体区。奥氏体中碳的最大质量分数可

达 2.11%，是铁素体中最大碳质量分数的 100 倍左右。在这个温度范围下，合金可以溶入更多的碳。而且，这时温度很高，也有利于碳原子的扩散，有利于渗碳过程的顺利进行。

## 六、

1. 首先分析该反应式的几何条件：

反应前  $\frac{a}{2}[101] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}] = \frac{a}{6}[303] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}] = \frac{a}{6}[222] = \frac{a}{3}[111]$  和反应后完全一样，满足位错反应的几何条件。

再来分析该反应式的能量条件：

$$\text{反应前的能量} \quad \frac{a^2}{4}(1+0+1) + \frac{a^2}{36}(1+4+1) = \frac{a^2}{2} + \frac{a^2}{6} = \frac{2a^2}{3}$$

$$\text{反应后的能量能量条件} \quad \frac{a^2}{9}(1+1+1) = \frac{a^2}{3}$$

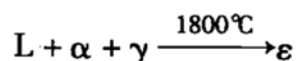
可见，反应前位错体系所具有的能量是反应后位错体系所具有能量的两倍，符合能量减小的原则。因此，从位错反应的几何条件和能量条件来判断，该位错反应是可以进行的。

反应前： $\frac{a}{2}[101]$  是位于滑移面  $(\bar{1}11)$  上的单位位错，而  $\frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}]$  是位于滑移面  $(\bar{1}11)$  上的肖克莱不全位错。这两者都可以在滑移面  $(\bar{1}11)$  上运动，属于可动位错。

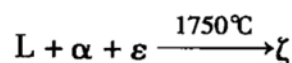
反应后的位错柏氏矢量垂直于  $(111)$  面，属于不可动的弗兰克不全位错。

2.

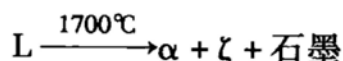
点 1 是四相包晶反应点，其反应式为



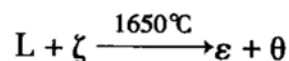
点 2 是四相包晶反应点，其反应式为



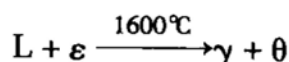
点 3 是四相共晶反应点，其反应式为



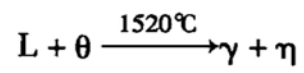
点 4 是四相包共晶反应点，其反应式为



点 5 是四相包共晶反应点，其反应式为



点 6 是四相包共晶反应点，其反应式为



点 7 是四相共晶反应点，其反应式为

