

中南大学

试 卷 十 七

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：材料科学与工程

一、(10 分) 画出 FCC 晶胞中 (111) 晶面上的所有 $\langle 110 \rangle$ 晶向；在 HCP 晶胞中画出 $[11\bar{2}0]$ 晶向和 $(1\bar{1}00)$ 晶面。

二、(10 分) 举出凝固理论在金属材料结晶中的几个应用，加以简单说明。

三、(10 分) 画出 Fe-Fe₃C 亚稳平衡相图，根据相图回答下列问题：

1. 标出合金在室温下的组织组成。

2. 写出相图中三个等温反应式。

3. 分析含碳量为 1.2% 的合金的平衡冷却过程；计算其在室温下的组织组成物的相对百分含量。

4. 画出 Fe-Fe₃C 合金在 1180℃ 时的成分-自由能曲线示意图。

5. 试分析元素 C 及 Cr 在 Fe 中的可能存在形式及其作用。

四、(10 分) 试总结位错在金属材料中的作用。

五、(10 分) 分析原子扩散在金属材料中的作用。

六、(10 分) 分析多晶体金属的变形过程及影响多晶体金属变形的因素。

七、(10 分) 分析层错能对金属热塑性变形的影响。

八、(10 分) 提高金属材料强度的途径有哪些？

九、(10 分) 解释下列名词：成分过冷；离异共晶；反应扩散；面角位错；晶界偏聚。

十、(10 分) Pb-Sn-Bi 三元合金相图如图 17-1 所示。

1. 试写出图中五条单变量线及 P 点、E 点反应的反应式。

2. 分析图中合金 2 的平衡结晶过程，指出它的开始凝固温度。

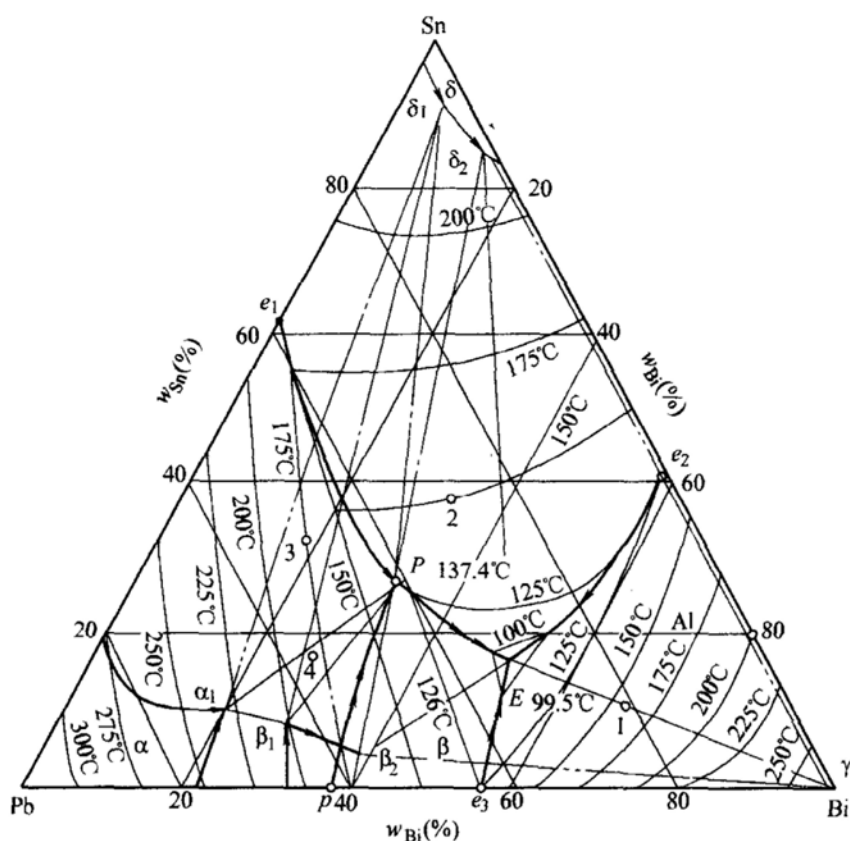


图 17-1 第十题图

标准答案

一、如图 17-2 所示。在图 17-2a 中， ACE 所在晶面为 (111) 晶面，该面内的 \overrightarrow{AC} 为 $[\bar{1}01]$ ， \overrightarrow{AE} 为 $[\bar{1}10]$ ， \overrightarrow{CE} 为 $[01\bar{1}]$ 。在图 17-2b 中， $[11\bar{2}0]$ 晶向为 Oa_3 反方向， $(1\bar{1}00)$ 晶面为 $ABCD$ 面。

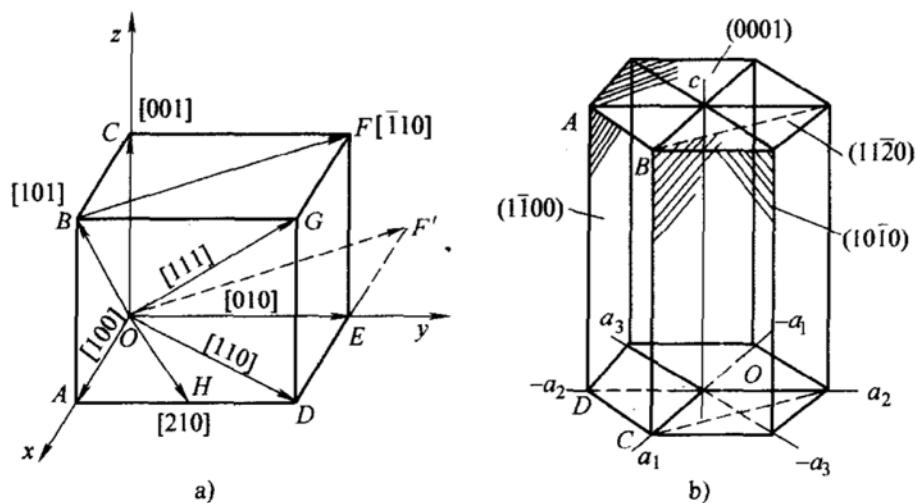


图 17-2 第一题解答图

二、铸锭组织控制、单晶体制备、非晶体制备等。

三、

1. Fe-Fe₃C 亚稳平衡相图 (略)。

2. 合金在室温下的组织组成: 相图中从左到右依次为: F, F + Fe₃C_{III}, F + P, P, P + Fe₃C_{II}, L'd + P + Fe₃C_{II}, L'd, L'd + Fe₃C_I。

3. 含碳量为 1.2% 的合金的平衡冷却过程: L, L → A, A, A → Fe₃C_{II}, A → P, 室温下得到 P + Fe₃C_{II} 组织。其中, $w_P = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0.77} = 92.74\%$; $w_{Fe_3C_{II}} = 7.26\%$ 。

4. Fe-Fe₃C 合金在 1180℃ 时的成分-自由能曲线示意图如图 17-3 所示。

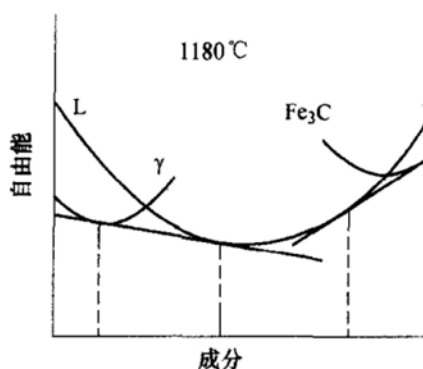


图 17-3 第三题第 4 小题解答图

5. 元素 C 可以固溶在 Fe 中, 起到强化作用, 与 Fe 形成化合物如 Fe₃C, 分布形态不好会降低合金强度与塑性; Cr 可以固溶在 Fe 中, 起到强化作用, Cr 也可与 Fe、C 形成合金碳化物。

四、要点

位错在金属材料中可以起到强化作用, 通过位错运动完成塑性变形, 合金中位错与溶质原子发生作用形成气团造成屈服现象和应变时效, 位错是第二相形核的择优场所, 位错影响扩散速度。

五、要点

液态金属的凝固、成分的均匀化、扩散型固态相变、表面化学热处理、氧化与脱碳、粉末烧结、高温蠕变等。

六、要点

多晶体金属的变形过程中每个晶粒的变形主要是滑移, 还可能出现孪生和扭折, 需要开动多个滑移系, 出现交滑移, 由于晶界的影响还有位向差效应和晶界的阻滞效应。

影响因素主要有晶粒大小、变形温度、变形速度。

七、要点

高层错能金属热塑性变形主要通过回复软化；低层错能金属热塑性变形主要通过再结晶软化，其应力-应变曲线有不同特点。

八、要点

细晶强化、固溶强化、加工硬化、沉淀强化、弥散强化等。

九、

成分过冷：由于在结晶过程中固溶体合金的溶质原子再分配造成固溶体合金在正温度梯度下，其凝固界面前沿的液相中在合适的温度梯度下也有过冷现象出现，称为成分过冷。

离异共晶：有共晶反应的合金中，如果成分离共晶点较远，由于初晶数量多，共晶数量很少，共晶中与初晶相同的相依附初晶长大，共晶中另外一个相呈现单独分布，使得共晶组织失去其特有组织特征的现象。

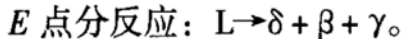
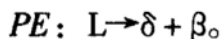
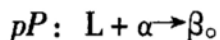
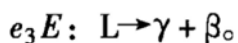
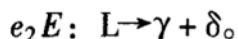
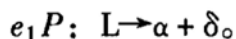
反应扩散：伴随有化学反应而形成新相的扩散称为反应扩散，如从金属表面向内部渗入金属时，渗入元素浓度超过溶解度出现新相。

面角位错：在位错反应中，FCC 晶体中不同滑移面上的全位错分解为不全位错后，领先不全位错反应生成新的不可动位错，导致出现的三个不全位错之间夹杂两个层错的不可动位错组态。

晶界偏聚：由于晶内与晶界上的畸变能差别或由于空位的存在使得溶质原子或杂质原子在晶界上的富集现象。

十、

1. 图中五条单变量线的反应式分别为：



2. 图中合金 2 的平衡结晶过程： $L \rightarrow \delta$ ， $L \rightarrow \delta + \beta$ ， $L \rightarrow \delta + \beta + \gamma$ ；合金 2 的开始凝固温度从图中可以得到为 150°C 。

试 卷 十 八

2003 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：材料科学与工程

一、填空 ($0.5 \times 30 = 15$ 分)

1. FCC 结构的密排方向是 (1)，密排面是 (2)，密排面的堆垛顺序是 (3)，致密度为 (4)，配位数是 (5)，晶胞中原子数为 (6)，把原子视为半径为 r 的刚性球时，原子的半径和点阵常数 a 的关系为 (7)。

2. 形成有序固溶体的必要条件是：(8)、(9)、(10)。

3. 无序固溶体转变为有序固溶体时，合金性能变化的一般规律是：强度和硬度 (11)，塑性 (12)，导电性 (13)。

4. Fe-Fe₃C 相图含碳量小于 (14) 为钢，大于 (15) 为铸铁；铁碳合金室温平衡组织均由 (16) 和 (17) 两个基本相组成；奥氏体其晶体结构是 (18)，合金平衡结晶时，奥氏体的最大含碳量是 (19)；珠光体的含碳量是 (20)；莱氏体的含碳量为 (21)；在常温下，亚共析钢的平衡组织是 (22)，过共析钢的平衡组织是 (23)；Fe₃C_I 是从 (24) 中析出的，Fe₃C_{II} 是从 (25) 中析出的，Fe₃C_{III} 是从 (26) 中析出的，它们的含碳量为 (27)。

5. 图 18-1 为简单立方点阵晶胞，其中 ABC 面的面指数是 (28)，AD 的晶向指数是 (29)。

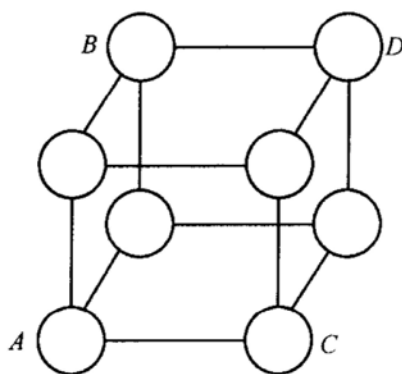


图 18-1 第一题第 5 小题图

6. 图 18-2 是 A-B-C 三元系成分三角形的一部分, 其中 X 合金的成分是 (30)。

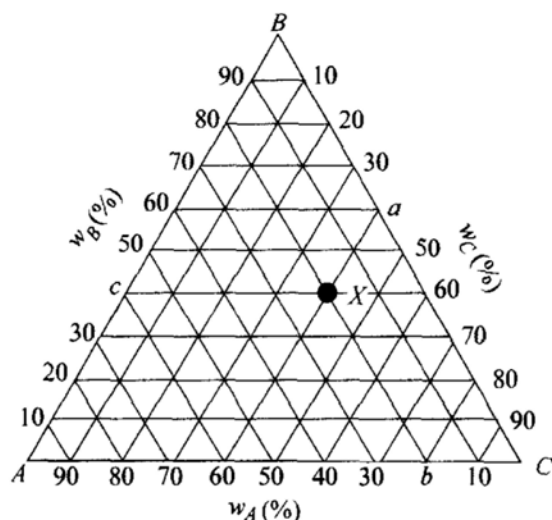


图 18-2 第一题第 6 小题图

二、简答 ($6 \times 5 = 30$ 分)

1. 晶带和晶带轴; 2. 柱状晶和等轴晶; 3. 包析反应和共析反应; 4. 割阶和扭折; 5. 冷加工与热加工。

三、(10 分)

1. 试根据凝固理论, 分析通常铸锭组织的特点。
2. 根据冷却速度对金属组织的影响, 现要获得非晶, 亚稳相, 请指出其凝固时如何控制。

3. 试说明在正温度梯度下为什么固溶体合金凝固时可以呈树枝状方式成长, 而纯金属则得不到树枝状晶。

四、(20 分) Al-Cu 相图的局部如图 18-3 所示。

1. 分析 5.6% Cu 合金和 5.7% Cu 合金在平衡结晶和快速冷却不平衡结晶时室温组织特点。

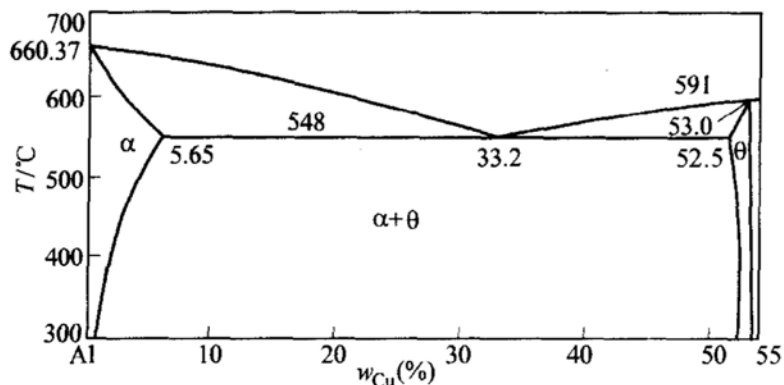


图 18-3 第四题图

2. Al 为 FCC 结构, 图中的 α 相为何种晶体结构?
3. 指出此二元系中比较适合作变形合金和铸造合金的成分范围。
4. 计算出亚共晶合金在温度为 T_E (共晶反应前) 时的平衡分配系数。
5. 设 X 合金平衡凝固完毕时的组织为 α 初晶 + $(\alpha + \theta)$ 共晶, 其中 α 初晶占 80%, 则此合金中刚凝固完毕时 θ 组元的含量是多少?
6. 绘出 $T = 560^\circ\text{C}$ 温度时各相的自由能—成分曲线示意图。

五、(10 分) 图 18-4 为 Fe-W-C 三元系的液相面投影图。写出 1700°C 、 1200°C 、 1085°C 的四相平衡反应式。选择一个合金成分其组织在刚凝固完毕时只有三元共晶。

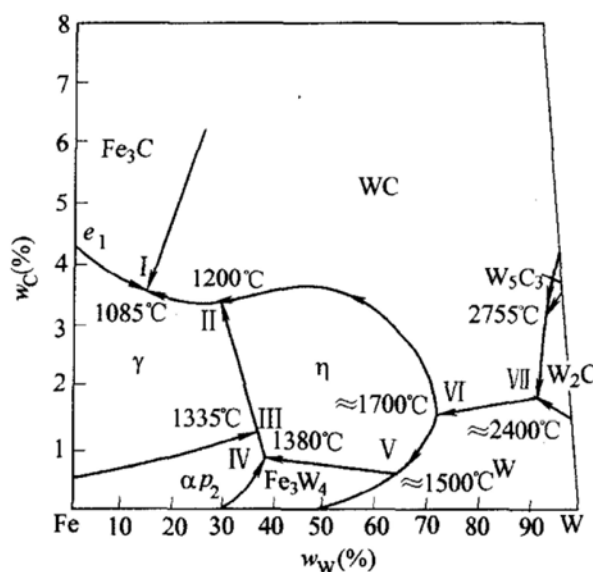


图 18-4 第五题图

六、(10 分) 图 18-5 所示低碳钢的三条拉伸曲线中, a 为塑性变形; b 为去载后立即再行加载; c 为去载后时效后再加载。试回答下列问题:

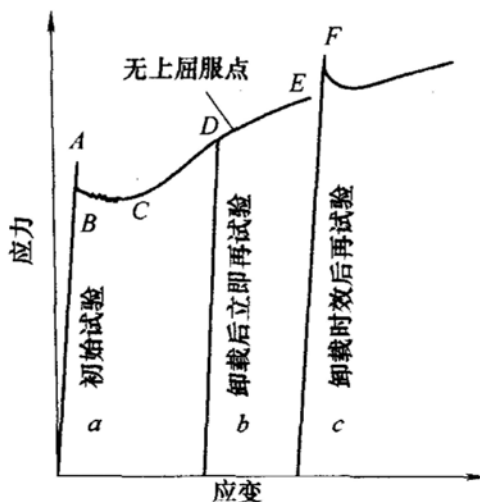


图 18-5 第六题图

1. 解释图示三曲线的屈服现象, 及 b 、 c 中屈服点上升的原因。

2. 屈服现象对冲压件表面质量有何不利影响。

七、(10 分) 户外用的架空铜导线(要求一定的强度)和户内电灯用花线, 在加工之后可否采用相同的最终热处理工艺? 为什么?

八、(10 分) 如何提高固溶体合金的强度?

九、(10 分) 试说明晶界对材料性能及变形的影响。

十、(10 分) 简单说明原子扩散对材料的影响; 举两个实例说明金属中的上坡扩散现象。

十一、(15 分) 工业纯铜的熔点为 1083°C , 在剧烈冷变形后的工业纯铜板上取三个试样, 第一个试样加热到 200°C , 第二个试样加热到 500°C , 第三个试样加热到 800°C , 各保温一小时, 然后空冷。试画出各试样热处理后的显微组织示意图, 说明它们在强度和塑性方面的区别及原因。

标准答案

一、

(1) $\langle 110 \rangle$; (2) $\{111\}$; (3) $ABCABC\cdots$; (4) 0.74; (5) 12; (6) 4; (7) $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$; (8) 异类原子之间相互吸引力大于同类原子之间吸引力; (9) 一定的化学成分; (10) 较慢的冷却速度; (11) 升高; (12) 降低; (13) 降低; (14) 2.11% C; (15) 2.11% C; (16) 铁素体 (α); (17) 渗碳体 (Fe_3C); (18) FCC; (19) 2.11%; (20) 0.77%; (21) 4.3%; (22) 铁素体和珠光体; (23) 珠光体和 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$; (24) 液相; (25) 奥氏体; (26) 铁素体; (27) 6.69%; (28) (101); (29) $[\bar{1}11]$; (30) 20% A-40% B-40% C。

二、

1. 晶带和晶带轴: 许多平行于同一晶向的不同的晶面组的总称为晶带, 而与这些晶面组平行的晶向称为晶带轴。

2. 柱状晶和等轴晶: 金属晶体结晶过程中沿着散热方向优先生长形成的长条形晶粒称为柱状晶, 而如果晶粒长大时没有择优方向, 向各个方向长大速度基本相等所得到的晶粒称为等轴晶。

3. 包析反应和共析反应: 由两个固相反应得到一个固相的过程为包析反应, 而由一个固相分解得到其他两个固相的反应为共析反应。

4. 割阶和扭折: 位错运动过程中与其他位错交截后形成一定的位错交截折线, 若交截后的位错折线在原来位错的滑移面上, 此位错折线称为扭折, 若交截后的位错折线垂直于原来位错的滑移面, 此位错折线称为割阶。

5. 冷加工与热加工：通常根据金属材料的再结晶温度来加以区分，在再结晶温度以上的加工称为热加工，低于再结晶温度又是室温下的加工称为冷加工。

三、

1. 通常铸锭组织的特点为外层的细等轴晶，铸锭表面向里有柱状晶，心部为粗大等轴晶。

2. 要获得非晶可以以极快速度将金属液体冷却，要获得亚稳相也必须使冷却速度远远超过平衡冷却速度。

3. 由于溶质原子再分配造成成分过冷，使固溶体合金正温度梯度下凝固时也可以呈树枝状方式成长；而纯金属则需要在负温度梯度下才能得到树枝状晶。

四、

1. 5.6% Cu 合金在平衡结晶时室温组织为 $\alpha + \theta_{II}$ ，快速冷却不平衡结晶时室温组织还出现少量非平衡共晶组织 $(\alpha + \theta)_{共晶}$ ；5.7% Cu 合金在平衡结晶时室温组织为 $\alpha + \theta_{II} + (\alpha + \theta)_{共晶}$ ，快速冷却不平衡结晶时室温组织出现离异共晶。

2. FCC 结构。

3. Cu 含量少于 5.65% 的合金为变形合金，Cu 含量大于 5.65% 的合金为铸造合金。

4. $k_0 = 0.17$ 。

5. 11.76%。

6. $T = 560^\circ\text{C}$ 温度时各相的自由能—成分曲线示意图如图 18-6 所示。

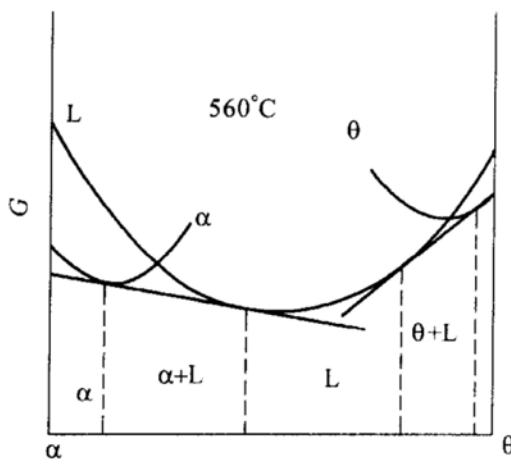


图 18-6 第四题第 6 小题解答图

五、各四相平衡反应式分别为： 1700°C ： $L + WC + W \rightarrow \eta$ ， 1200°C ： $L + \eta \rightarrow WC + \gamma$ ， 1085°C ： $L \rightarrow \gamma + WC + Fe_3C$ ；I 合金成分其组织在刚凝固完毕时只有三元共晶。

六、

1. 由于柯垂耳气团的影响。

2. 屈服现象使得冲压制件表面不平整。

七、不能采用相同的最终热处理工艺，户外用的架空铜导线要求较高的强度，一般用回复退火消除应力同时保留一定强度，户内电灯用花线需要易于变形和高的导电性能，可以采用再结晶退火使之软化，获得高的导电性能。

八、固溶强化，加工硬化，细晶强化，沉淀强化。

九、晶界影响到材料的各个方面，具有晶界能，影响到多晶材料中的第二相的形状，晶界可以运动，有晶界偏聚，晶界电荷变化，承担载荷传递作用，晶界熔点低，易过烧，晶界是易扩散通道，晶界处易形核，晶界易受腐蚀；晶界对金属材料在常温下强化，高温下弱化。

十、原子扩散对材料的影响如铸造中晶粒形核和长大、晶界运动、氧化等许多过程均涉及到原子扩散；金属中的上坡扩散实例如柯垂耳气团的形成，调幅分解过程等。

十一、试样热处理后的显微组织示意图（略，分别为纤维组织、再结晶组织和晶粒长大组织）；200℃ 加热试样强度高，塑性低，500℃ 加热试样强度低，塑性好，800℃ 加热试样强度更低，造成强度和塑性差别的主要原因是剧烈冷变形后的工业纯铜板在随后的加热中温度不同，分别经受回复、再结晶和晶粒长大的过程。

试 卷 十 九

2004 年攻读硕士学位研究生入学考试试题

考试科目：金属学原理

适用专业：材料科学与工程

一、名词解释 (5 分 × 8)

1. 金属玻璃 2. 金属间化合物 3. 离异共晶 4. 晶界偏聚 5. 科垂尔气团 (Cottrell Atmosphere) 6. 孪生 7. 反应扩散 8. 变形织构

二、问答题

1. (10 分) 标出图 19-1 所示 HCP 晶胞中晶面 $ABCDEF$ 面、 ABO' 面的晶面指数, OC 方向、 OC' 方向的晶向指数。这些晶面与晶向中, 哪些可构成滑移系? 指出最容易产生滑移的滑移系。

2. (10 分) 判断 $\frac{a}{6}[2\bar{1}1] + \frac{a}{6}[\bar{1}21] \rightarrow \frac{a}{6}[110]$ 位错反应在面心立方晶体中能否进行? 若两个扩展位错的领先位错发生上述反应, 会对面心立方金属性能有何影响?

3. (10 分) 写出非稳态扩散方程的表达式, 说明影响方程中扩散系数的主要因素。

4. (10 分) 指出影响冷变形后金属再结晶温度的主要因素。要获得尺寸细小的再结晶晶粒, 有哪些主要措施, 为什么?

5. (15 分) 试述针对工业纯铝、Al-5% Cu 合金、Al-5% Al_2O_3 复合材料分别可能采用哪些主要的强化机制来进行强化。

6. (15 分) 请在图 19-2 所示的 Pb-Bi-Sn 相图中:

(1) 写出三相平衡和四相平衡反应式;

(2) 标出成分为 5% Pb、65% Bi 与 30% Sn 合金所在位置, 写出该合金凝固结晶过程, 画出并说明其在室温下的组织示意图。

7. (20 分) Cu-Sn 合金相图局部如图 19-3 所示。

(1) 写出相图中三条水平线的反应式, 并画出 T_1 温度下的成分-自由能曲线示意图;

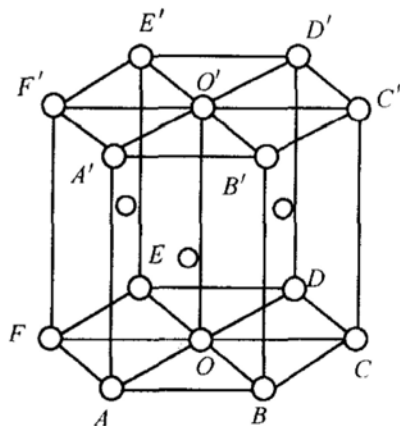


图 19-1 第二题第 1 小题图

(2) 说明 Cu-10wt% Sn 合金平衡和非平衡凝固过程, 分别画出室温下组织示意图;

(3) 非平衡凝固对 Cu-5wt% Sn 合金的组织性能有何影响, 如何消除?

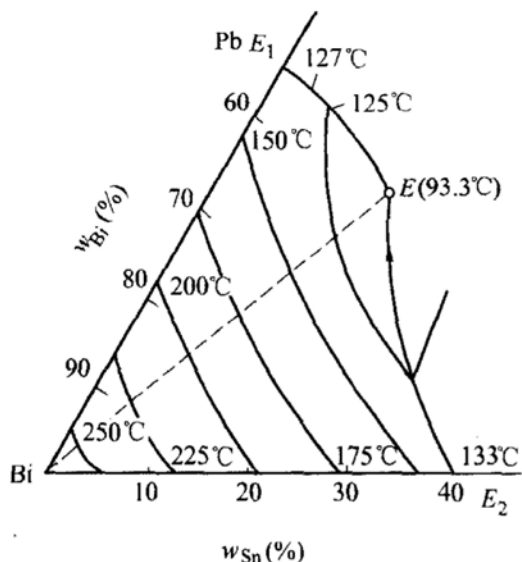


图 19-2 第二题第 6 小题图

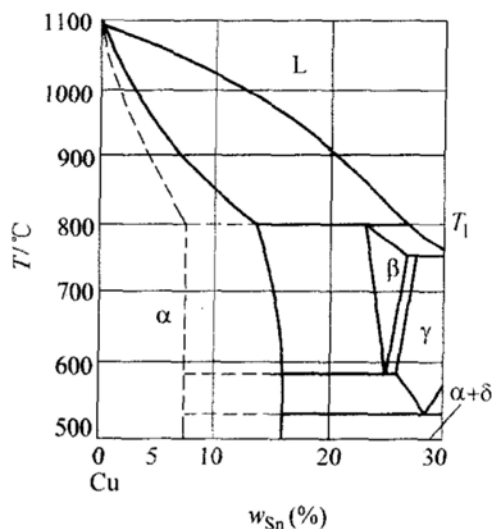


图 19-3 第二题第 7 小题图

8. (20 分) 低层错能的工业纯铜铸锭采用 $T = 0.5T_{\text{熔点}}$ 温度热加工开坯轧制。

(1) 画出该材料分别在高、低应变速率下热加工时的真应力-真应变曲线示意图, 并说明影响曲线变化的各种作用机制。

(2) 开坯后该金属在室温下继续进行轧制, 画出此时的真应力-真应变曲线示意图, 并说明影响曲线变化的机制。

(3) 开坯后该金属要获得硬态、半硬态和软态制品, 最后工序中可采用哪些方法, 为什么?

标准答案

一、

1. 金属玻璃: 指金属从液态凝固后其结构与液态金属相同的固体。

2. 金属间化合物: 金属与金属、金属与某些非金属之间形成的化合物, 结构与组成金属间化合物的纯金属不同, 一般具有熔点高、硬度高、脆性大的特点。

3. 离异共晶: 有共晶反应的合金中, 如果成分离共晶点较远, 由于初晶数量多, 共晶数量很少, 共晶中与初晶相同的相依附初晶长大, 共晶中另外一个相呈现单独分布, 使得共晶组织失去其特有组织特征的现象。

4. 晶界偏聚: 由于晶内与晶界上的畸变能差别或由于空位的存在使得溶质原

子或杂质原子在晶界上的富集现象。

5. 科垂尔气团：溶质原子在刃型位错周围的聚集的现象，这种气团可以阻碍位错运动，产生固溶强化效应等结果。

6. 孪生：是晶体塑性变形的一种重要方式，晶体在切应力作用下，晶体的一部分沿着一定的晶面和晶向相对于另一部分晶体作均匀切变，使得相邻部分晶体取向不同，并以切变晶面（孪晶面）成镜面对称。

7. 反应扩散：伴随有化学反应而形成新相的扩散称为反应扩散，如从金属表面向内部渗入金属时，渗入元素浓度超过溶解度出现新相。

8. 变形织构：经过塑性变形后原来多晶体中位向不同的晶粒变成取向基本一致，形成晶粒的择优取向，择优取向后的晶体结构为织构，若织构是在塑性变形中产生的，称为变形织构。

二、

1. $ABCDEF$ 面的晶面指数为 (0001) 或 (001) ； ABO' 面的晶面指数为 $(10\bar{1}1)$ ； OC 方向的晶向指数为 $[\bar{1}2\bar{1}0]$ 或 $[010]$ ； OC' 方向的晶向指数为 $[\bar{1}2\bar{1}3]$ 或 $[011]$ ； (0001) 与 $[\bar{1}2\bar{1}0]$ 、 $(10\bar{1}1)$ 与 $[\bar{1}2\bar{1}0]$ 可构成滑移系；其中滑移系 $(0001)[\bar{1}2\bar{1}0]$ 容易产生滑移。

2. 参照几何条件和能量条件要求，位错反应可以进行；反应后位错不可动，影响晶体的加工硬化机制和断裂性能。

3. 非稳态扩散方程的表达式为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{\partial x}$$

若扩散系数 D 不随浓度变化，则可以简化为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

影响方程中扩散系数的主要因素有温度、晶体结构、晶体缺陷、固溶体类型、扩散元素性质、扩散组元浓度等。

4. 影响冷变形后金属再结晶温度的主要因素有：变形程度、微量杂质和合金元素、金属晶粒度、加热时间、加热速度；要获得尺寸细小的再结晶晶粒主要措施有：加大冷变形程度，加入微量合金元素，提高加热速度，采用细晶粒金属。

5. 对工业纯铝主要的强化机制为加工硬化、细晶强化； $Al-5\%Cu$ 合金的强化机制为固溶强化、沉淀强化、加工硬化、细晶强化； $Al-5\%Al_2O_3$ 复合材料的强化机制为加工硬化、细晶强化、弥散强化。

6.

(1) 三相平衡反应式: E_2E 线: $L \rightarrow Bi + Sn$; E_1E 线: $L \rightarrow Bi + Pb$; E 点为四相平衡, 其反应式为 $L \rightarrow Bi + Sn + Pb$ 。

(2) 合金所在位置 (略); 该合金凝固过程为: 析出初晶 $L \rightarrow Bi$, 剩余液相析出二元共晶, $L \rightarrow Bi + Sn$, 再从多余液相中析出三元共晶 $L \rightarrow Bi + Sn + Pb$; 室温下的组织为 $Bi_{\text{初晶}} + (Bi + Sn)_{\text{二元共晶}} + (Bi + Sn + Pb)_{\text{三元共晶}}$, 室温下的组织示意图 (略, Bi 初晶为块状, 二元共晶和三元共晶以点表示即可)。

7.

(1) 相图中三条水平线的反应式 (温度由高到低): 包晶反应: $L + \alpha \rightarrow \beta$, 共析反应 $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$, 共析反应 $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$; T_1 温度下的成分-自由能曲线示意图如图 19-4 所示。

(2) Cu-10wt%Sn 合金平衡凝固过程: 析出初晶 α , 凝固后得到单相固溶体 α 。

Cu-10wt%Sn 合金非平衡凝固过程: 析出初晶 α , 发生包晶反应 $L + \alpha \rightarrow \beta$ 形成 β , β 分布在 α 枝晶间隙, 随后还发生共析反应 $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ 和 $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$, 最后形成 α 枝晶之间分布有块状 δ 或 $(\alpha + \delta)_{\text{共析体}}$; 室温下组织示意图 (略)。

(3) Cu-10wt%Sn 合金非平衡凝固时由于溶质原子再分配而产生枝晶偏析; 造成合金铸锭强度低、加工塑性差, 枝晶偏析还使合金耐腐蚀性能降低; 消除枝晶偏析可以采用将铸锭在略低于固相线温度长时间均匀化退火。

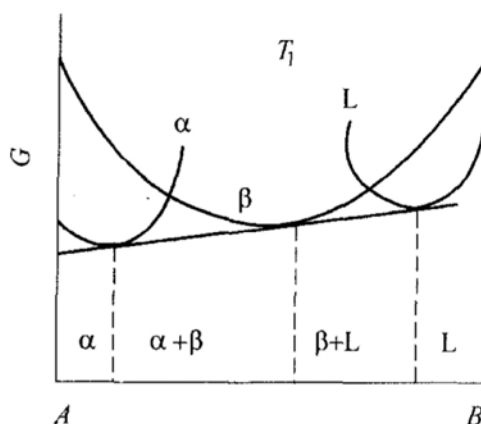


图 19-4 第二题第 7 小题
第 (1) 题解答图

8.

(1) 该材料热加工时的真应力-真应变曲线示意图 (略)。(注意曲线中均应有应力峰值, 在高应变速率下出现应力峰值后曲线基本水平, 在低应变速率下出现应力峰值后曲线呈波浪。)

高应变速率下曲线分三个阶段: 未发生动态再结晶的加工硬化阶段, 动态再结晶加剧阶段, 完全动态再结晶阶段 (此时加工硬化与再结晶软化达到平衡, 曲线接近水平, 达到稳态流变阶段)。

低应变速率下完全动态再结晶阶段呈波浪形, 是反复动态再结晶软化——加工硬化——动态再结晶软化交替进行的结果。

(2) 开坯后金属在室温下继续进行轧制的真应力-真应变曲线示意图 (略); 真应力-真应变曲线一直上升, 直至断裂, 主要机制为加工硬化。

(3) 开坯后要获得硬态金属, 可以进行冷加工, 机制为加工硬化; 获得软态制品, 可采用冷加工后再结晶退火; 获得半硬态制品, 可采用冷加工后回复退火, 或者完全再结晶退火后适当冷变形。

试 卷 二 十

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：材料科学与工程

- 一、(15 分) 说明材料中的结合键与材料性能的关系。
- 二、(15 分) 任意选择一种材料，说明其可能的用途和加工过程。
- 三、(15 分) 针对图 20-1 所示 Mg-Y 相图，回答下列问题：
 1. 已知 Mg 为 HCP 结构，计算 Mg 晶胞的致密度。
 2. 写出相图上等温反应，及图中 Y = 5%wt 的 K 合金在室温下的平衡组织。
 3. 指出提高 K 合金强度的方法。
 4. 计算 Y = 18%wt 的合金在刚凝固完毕时的组织组成百分含量。

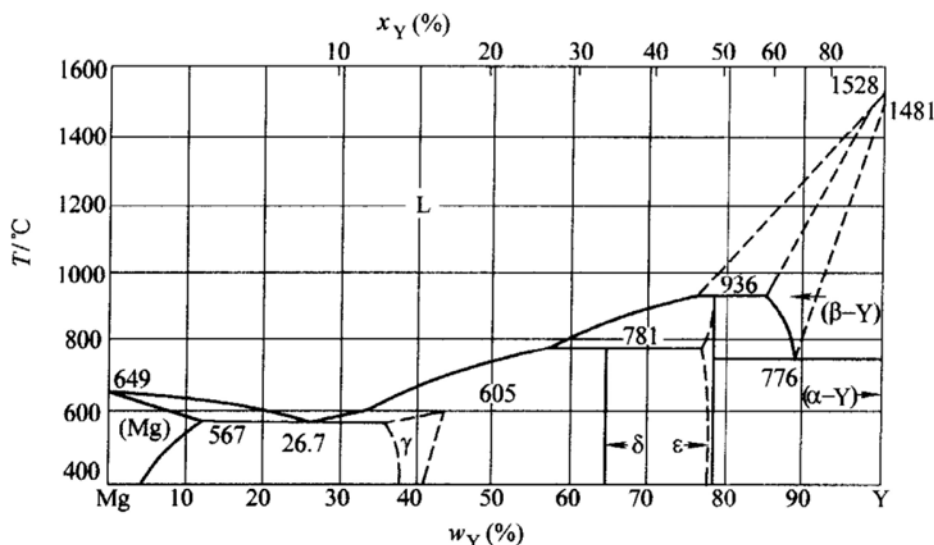


图 20-1 第三题图

四、(15 分) 图 20-2 所示为 A-B-C 三元相图投影，三个组元在液态无限互溶，在固态有限溶解，固溶度随温度变化， e_1p 、 e_2p 、 e_3p 是液相的成分变化线，其他箭头表示固相成分变化，试回答：

1. 合金 1 在常温下的组织组成物。
2. 用数学表达式表示合金 2 在常温下相组成物的百分含量。
3. 画出合金 3 从液相到室温的冷却曲线，写出各温度区间的反应式，并在

三相反应中标明相成分变化趋势。

4. 若 α 、 β 、 γ 均为同等作用的强化相，分析合金 1、2、3 在热处理中的强化效果大小。

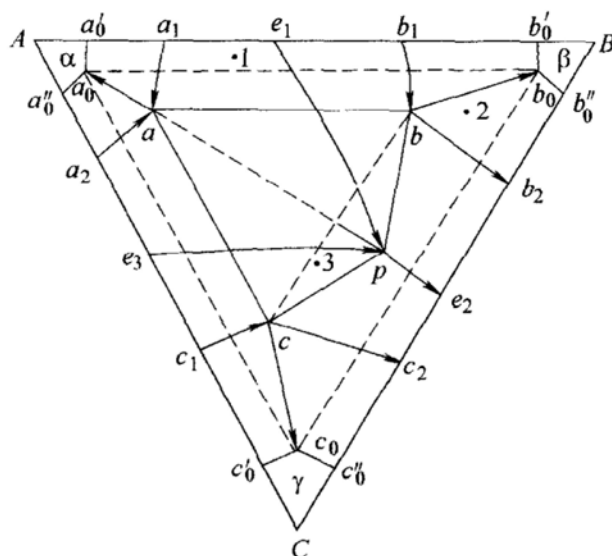


图 20-2 第四题图

五、(15 分) 何谓加工硬化？列出加工硬化的各种可能机制，说明加工硬化在工业上的应用。

六、(10 分) 简要说明第二相在冷塑性变形过程中的作用。

七、(15 分) 如图 20-3 所示，在柏氏矢量为 \vec{b}_1 的位错 1 的应力场中，存在位错 2，其柏氏矢量为 \vec{b}_2 ，位错 1、位错 2 均为刃型位错。问：位错 1 的应力场中哪一个应力分量使位错 2 滑移，哪一个应力分量使位错 2 攀移？写出受力表达式。(不考虑位错运动时受到的阻力)

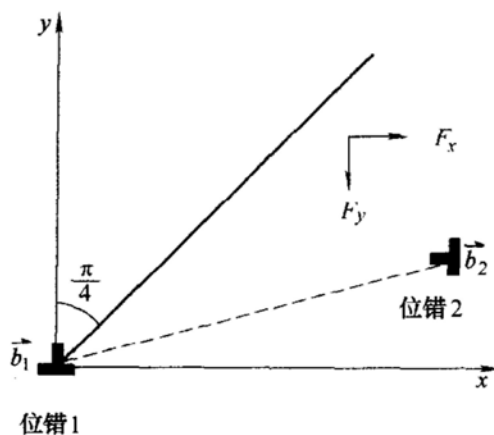


图 20-3 第七题图

八、(15 分) 讨论织构的利弊及控制方法。

九、(15分)

1. 简要说明影响扩散系数的因素。

2. 若已知碳在奥氏体中扩散系数 $D = 0.2 \exp(-138 \times 10^3/RT) \text{ cm}^2/\text{s}$, 问在 927°C 时使试样表面 1mm 深度处碳浓度达到 0.5% 所需时间。试样为纯铁, 927°C 时碳在奥氏体中最大溶解度为 1.3% , 误差函数如表 20-1 所示。

表 20-1 第九题表 $\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$ 与 $\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ 的对应值

$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$
0.0000	0.0	0.7	0.6778	1.4	0.9523
0.1125	0.1	0.8	0.7421	1.5	0.9661
0.2227	0.2	0.9	0.7969	1.6	0.9763
0.3286	0.3	1.0	0.8247	1.7	0.9838
0.4284	0.4	1.1	0.8802	1.8	0.9891
0.5205	0.5	1.2	0.9103	1.9	0.9928
0.6039	0.6	1.3	0.9340	2.0	0.9953

十、(20分) 试说明晶粒大小对金属材料室温及高温力学性能的影响, 在生产中如何控制材料的晶粒度?

标准答案

一、材料结合键的类型及结合能的大小对材料的性能有重要的影响, 特别是对物理性能和力学性能。

结合键越强, 熔点越高, 热膨胀系数就越小, 密度也大。金属具有光泽、高的导电性和导热性、较好的机械强度和塑性, 具有正的电阻温度系数就与金属的金属键有关。陶瓷、聚合物一般在固态下不导电与其非金属键结合有关。工程材料的腐蚀实质是结合键的形成和破坏。

晶体材料的硬度与晶体的结合键有关。一般共价键、离子键、金属键结合的晶体比分子键结合的晶体的硬度高。结合键之间的结合键能越大, 则弹性模量越大。工程材料的强度与结合键能也有一定的联系。一般结合键能高, 强度也高一些。材料的塑性也与结合键类型有关, 金属键结合的材料具有良好的塑性, 而离子键、共价键结合的材料塑性变形困难, 所以陶瓷材料的塑性很差。

二、略

三、

1. 0.74。

2. 相图上等温反应, 936°C : $\text{L} + \beta - \text{Y} \rightarrow \epsilon$; 781°C : $\text{L} + \epsilon \rightarrow \delta$; 776°C : $\beta - \text{Y} \rightarrow \alpha - \text{Y} + \epsilon$; 567°C : $\text{L} \rightarrow (\text{Mg}) + \gamma$ 。图中 $\text{Y} = 5\% \text{ wt}$ 的 K 合金在室温下的平衡组织为 $(\text{Mg}) + \gamma_{\text{II}}$ 。

3. 提高 K 合金强度的方法有加工硬化、细晶强化和沉淀强化。

4. $\text{Y} = 18\% \text{ wt}$ 的合金在刚凝固完毕时的组织组成为 $(\text{Mg})_{\text{初晶}} + [(\text{Mg}) + \gamma_{\text{II}}]_{\text{共晶}}$, $(\text{Mg})_{\text{初晶}}\% = 40.8\%$, $[(\text{Mg}) + \gamma_{\text{II}}]_{\text{共晶}}\% = 59.2\%$ 。

四、

1. $\alpha_{\text{初晶}} + (\alpha + \beta)_{\text{共晶}}$ 。

2. 合金 2 在常温下相组成物为 α 、 β 、 γ , 设 a_02 延长交 b_0c_0 于 D 点, b_02 延长交 a_0c_0 于 E 点, c_02 延长交 a_0b_0 于 F 点, 则 $\alpha\% = 2D/a_0D\%$, $\beta\% = 2E/b_0E\%$, $\gamma\% = 2F/c_0F\%$ (或其他表达式)。

3. 合金 3 从液相到室温的冷却曲线 (略); 各温度区间的反应式为: $\text{L} \rightarrow \gamma$, $\text{L}_{e_3 \rightarrow p} \rightarrow \alpha_{a_2 \rightarrow a} + \gamma_{c_1 \rightarrow c}$, $\text{L}_p + \alpha_a \rightarrow \beta_b + \gamma_c$, $\beta_b \rightarrow b_0$ 与 $\gamma_c \rightarrow c_0$ 互析, α 、 β 、 γ 同析。

4. 合金 1、2、3 在热处理中的强化效果: $2 > 3 > 1$ 。

五、金属在冷加工过程中流变应力随应变的增加而增加的现象称为加工硬化。

加工硬化的机制主要是位错之间的相互作用, 如割阶的形成, 位错交截、缠结, 位错运动中与林位错的作用, 面角位错的形成, 以及溶质原子与位错的作用形成溶质原子气团等。

加工硬化在工业上的应用: 金属在加工过程中塑性变形抗力不断增加, 使金属变脆, 需要进行多次中间退火, 使金属的冷加工需要消耗更多的功率; 加工硬化使金属基体具有一定的抗偶然过载的能力; 加工硬化和塑性变形适当配合可使金属进行均匀塑性变形, 有些加工方法要求金属必须有一定的加工硬化; 加工硬化也是强化金属的重要手段之一, 对某些纯金属加工硬化是提高强度的重要办法; 有些零部件在工作条件下表面会不断硬化, 达到表面耐冲击、耐磨损的要求; 经过加工硬化后材料塑性降低, 可以改善材料如低碳钢的切削加工性能; 可以通过冷加工控制产品的最后性能。

六、复相合金的主要变形方式仍然是滑移和孪生, 由于合金中第二相的种类、数量、大小、形状、分布特点及与基体界面结合的不同, 第二相对塑性变形的影响也很复杂。如果复相合金中两个相都具有塑性, 第二相的尺寸大小、变形能力与基体相差不大, 则合金的变形决定于两相的体积分数; 如果两相中一个是塑性相, 而另一个是硬脆相时, 合金的塑性变形主要取决于硬脆相的存在情况,

第二相粗大或呈大针状, 变形只在基体中进行, 合金的塑性都不会很高; 如果第二相连续分布在固溶体的晶界上, 合金很脆, 几乎不能进行塑性变形。

弥散分布的第二相能够产生显著的强化作用, 使合金获得良好的综合力学性能, 强度很高, 塑性也好, 这类合金的塑性变形主要在基体相中进行。

七、位错 1 的应力场中 τ_{xy} 分量使位错 2 滑移, σ_{yy} 分量使位错 2 攀移。设位错 1 与位错 2 距离为 $r(x, y)$, 则

$$\text{使位错 2 滑移的力 } F_y = \frac{G b_1}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \cdot b_2$$

$$\text{使位错 2 攀移的力 } F_x = \frac{G b_1}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \cdot b_2$$

八、织构引起金属的各向异性, 各向异性在很多情形下对金属的加工和使用带来麻烦。深冲金属杯子可能产生制耳。具有织构的多晶体金属棒经过多次反复加热和冷却后会显著伸长。

但有的情况下要设法获得某种织构, 利用其各向异性, 如变压器用的硅钢片、精密电子电容器的高压电子铝箔以及应用于汽车、机械等部门要求优越的超深冲压性能的无间隙原子钢, 对不可热处理强化的铝合金可以通过冷变形产生加工硬化来强化合金。

控制织构的一种方法是控制加工和热处理制度, 得到只有轻微织构的加工组织, 得到细晶粒的再结晶组织; 还可以改变轧板的生产工艺, 冷加工中的中间再结晶退火和最终回复退火的结合可以控制织构, 可以采用交叉轧制的方法, 铝合金薄板热轧过程的控制和多方向交叉冷轧以及相应退火来减少制耳的形成。

九、

1. 影响扩散系数的因素有: 温度的影响, 随温度的升高, 扩散系数急剧增大; 晶体缺陷的影响, 原子沿线缺陷(位错)和面缺陷(晶界和自由表面等)的扩散速率远比沿晶内的体扩散速率大; 在具有同素异构转变的金属中, 扩散系数随晶体结构的改变会有明显的变化, 溶质原子在 BCC 晶体结构中的扩散系数比在 FCC 中的大。

晶体的各向异性对扩散系数也有影响, 但这种异向性随温度的升高逐渐减小。

间隙原子的扩散激活能比置换式原子的扩散激活能小得多。

扩散元素的性质与溶剂金属的性质差别越悬殊, 则扩散系数越大。

在许多固溶体合金中, 溶质的扩散系数随浓度的增加而增加, 溶质元素能使合金熔点降低的(或引起液相线下降的)均能使扩散系数增加; 反之, 使扩散系数降低。

第三元素对二元合金中组元的扩散也有影响, 与合金中组元形成化合物的第

三元素阻碍溶质原子的扩散，从而降低扩散系数。

2. 略。

十、室温强化，高温弱化。

生产中控制材料的晶粒度有铸造中细化，加工中通过控制轧制细化热加工组织，再结晶退火中依靠合金元素和微量元素阻止晶粒长大，结合再结晶全图综合考虑冷变形加工量和加热温度的关系。

试卷二十一

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：材料科学与工程

说明：第一～第四题中任意选做 3 题（每题 20 分），第五～第十题全做（每题 15 分）

- 一、说说你对材料的成分、组织、工艺与性能之间的关系的理解。
- 二、谈谈你所了解的新材料、新工艺。
- 三、试举例分析材料加工过程对材料使用性能的影响。
- 四、谈谈你对高强度材料的理解。
- 五、试绘出体心立方晶胞示意图，在晶胞中画出体心立方晶体的一个滑移系，标出指数；说明体心立方结构的单相固溶体合金在冷塑性变形中的特点。
- 六、对如图 21-1 所示相图，以富 A 的合金为例：
 1. 指出理论上适合作为铸造合金、变形合金的成分范围，可以热处理强化、不可热处理强化的合金成分范围。
 2. 分析合金 1 的平衡结晶过程，简述强化合金 1 的方法有哪些。

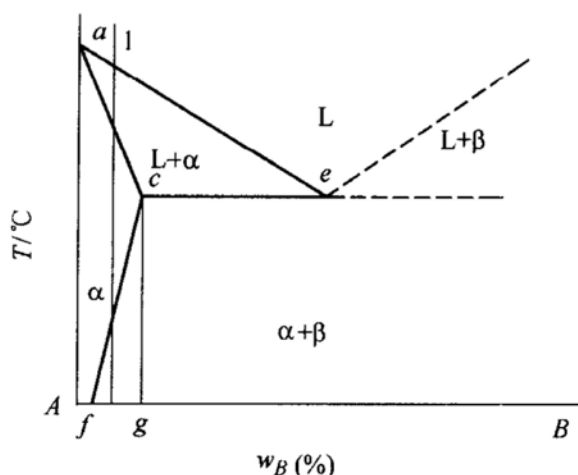


图 21-1 第六题图

- 七、解释位错的基本概念，总结位错在材料中的作用。
- 八、如何通过变形与加热来控制材料的组织和性能？

九、对如图 21-2 所示 Fe-Cr-C 三元相图的变温截面，写出图中合金 1 (Fe-13%Cr-0.2%C) 的平衡结晶过程，比较其室温组织与 Fe-0.2%C 合金室温组织的区别。

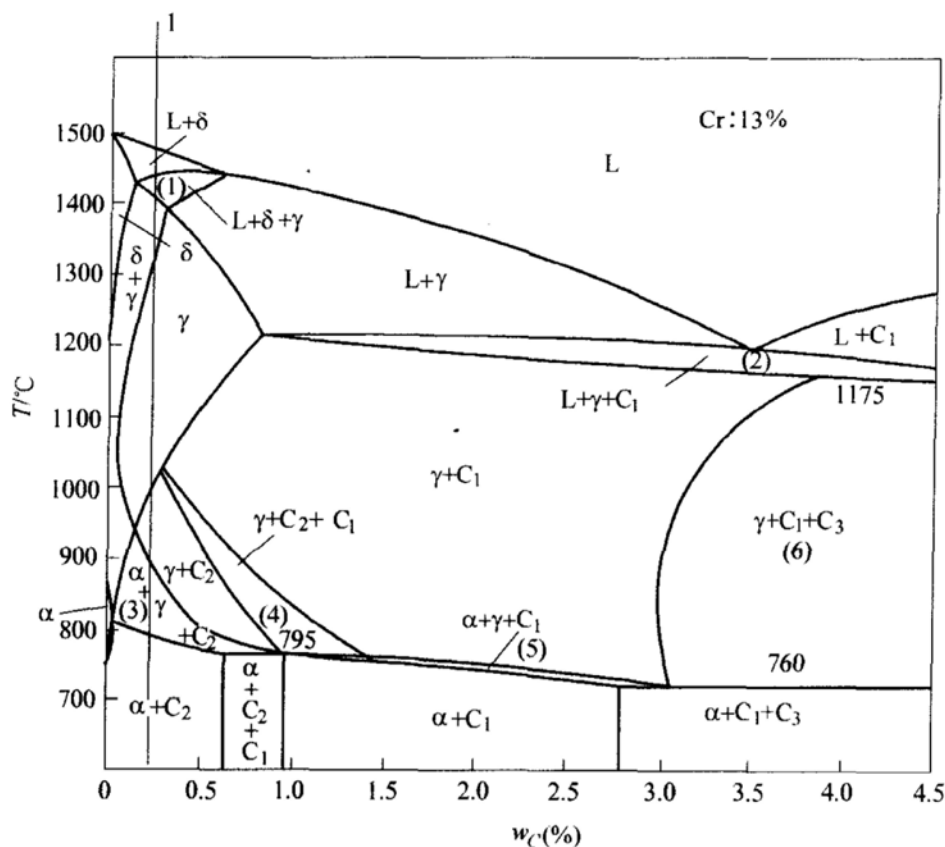


图 21-2 第九题图

十、解释上坡扩散、扩散机制，总结扩散在材料科学中的应用。

标准答案

一、略。

二、略。

三、略。

四、略。

五、体心立方晶胞示意于图 21-3，晶胞中的一个滑移系为 $(111)[\bar{1}11]$ 。

体心立方结构的单相固溶体合金在冷塑性变形表现出的特点为加工硬化、屈服现象和应变时效。

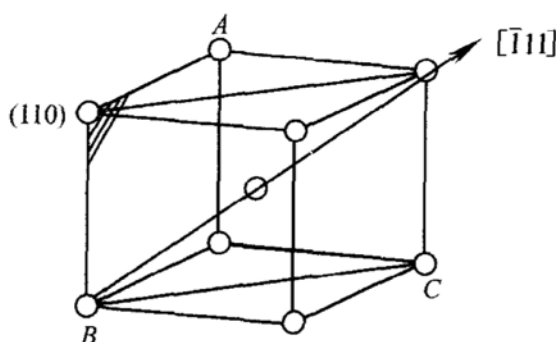


图 21-3 第五题解答图

六、

1. 对如图所示相图，以富 A 的合金为例，理论上适合作为铸造合金的成分范围为 ce 范围的合金，适合作为变形合金的成分范围为 Ag 范围的合金，可以热处理强化合金的成分范围为 fg 范围的合金，不可热处理强化的合金成分范围为 Af 范围的合金。

2. 合金 1 的平衡结晶过程为： L , $L \rightarrow \alpha$, α , $\alpha \rightarrow \beta_{II}$ 。强化合金 1 的基本方法有：细化晶粒、弥散第二相强化、加工硬化。

七、位错是晶体结构中一种排列缺陷，可以分为刃型位错、螺型位错和混合位错。

位错可以极大影响材料性能表现，位错在材料中的作用有多种：

(1) 金属材料的塑性变形是通过位错运动完成的。

(2) 位错周围具有畸变应力场，与第二相粒子，通过切过或绕过机制强化材料，冷加工中位错密度增加也能强化材料，或通过形成科垂尔气团强化材料，以及位错运动中相互交截，或形成割阶、面角位错等使材料强化；可以影响材料的强度。

(3) 影响第二相的析出，对再结晶中的晶核形成机制等固态相变有影响。

(4) 位错周围是优先扩散通道。

八、变形与加热可以作为控制材料的组织和性能的有效手段，如冷变形可以带来加工硬化、纤维组织、内应力、织构及其他物理、化学性能变化，冷变形金属加热后可以通过回复、再结晶中引起的组织、性能变化获得需要的组织与性能。

九、在 Fe-Cr-C 三元相图的变温截面中，Fe-13% Cr-0.2% C 合金的平衡结晶过程为： L , $L \rightarrow \delta$, $L + \delta \rightarrow \gamma$, $\delta \rightarrow \gamma$, $\gamma \rightarrow C_2$, $\gamma \rightarrow C_2 + \alpha$, $\alpha \rightarrow C_2$ ；室温组织为珠光体（共析产物）与碳化物。

Fe-0.2% C 合金室温组织为铁素体和珠光体（共析产物），Fe-13% Cr-0.2% C 合金出现了 Fe-C 在过共析成分才出现的组织。

十、上坡扩散是扩散过程中扩散元素从低浓度向高浓度处扩散；如各种溶质原子气团的形成和共析反应产物的形成均为上坡扩散。

扩散机制主要为：间隙固溶体中溶质原子在间隙中发生间隙扩散，在置换式固溶体中发生原子与空位交换实现扩散的空位机制。

原子扩散在材料中的作用包括：晶体凝固时形核、长大；合金的成分过冷；成分均匀化，包晶反应非平衡凝固时保留高温组织的特点，固态相变时的形核，晶界形核，晶界运动、晶界偏聚、高温蠕变，氧化，焊接，化学热处理（渗 C、N 等），粉末冶金，涂层等各方面。

中南大学

试 卷 十

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：材料学、材料加工

一、(每小题 20 分, 共 40 分) 从以下题中任选 2 道。

1. 说明材料中的结合键与材料性能的关系。
2. 任意选择一种材料, 说明其可能的用途和加工过程。
3. 说说你对材料的成分、组织、工艺与性能之间关系的理解。
4. 谈谈你所了解的新材料、新工艺。
5. 试举例分析材料加工过程对材料使用性能的影响。
6. 谈谈你对高强度材料的理解。

二、(共 70 分) 根据图 10-1 所示的二元相图, 回答下列问题。

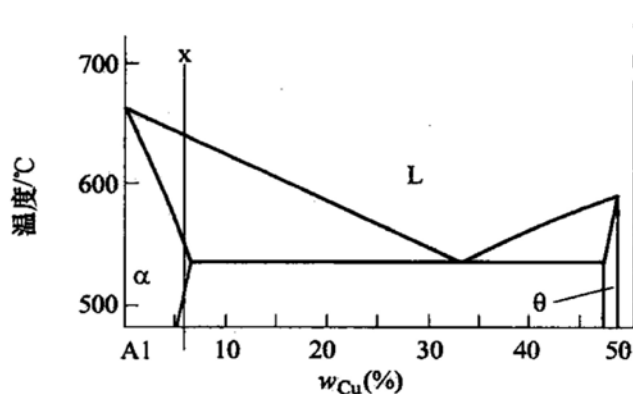


图 10-1 第二题图

1. (15 分) Al 为面心立方金属, 写出单胞中的原子数、致密度、配位数、密排面与密排方向。在单胞中画出密排面与密排方向。指出 α 的晶体结构。 α 与 θ 均是 Al 与 Cu 相互作用的结果, 说明 α 与 θ 的结构差别。

2. (15 分) 何谓再结晶全图和起始再结晶温度? 制订一种测定再结晶温度

的方案，简述原理。

3. (20 分) 比较纯铝平衡结晶时与 x 合金平衡结晶时的异同点。分析 x 合金平衡结晶和非平衡结晶中组织转变的过程。

4. (20 分) x 合金塑性变形后的组织、性能有何变化？用位错理论解释 x 合金的室温强化措施。

三、(共 20 分)

1. 写出图 10-2 中 x 合金的成分。

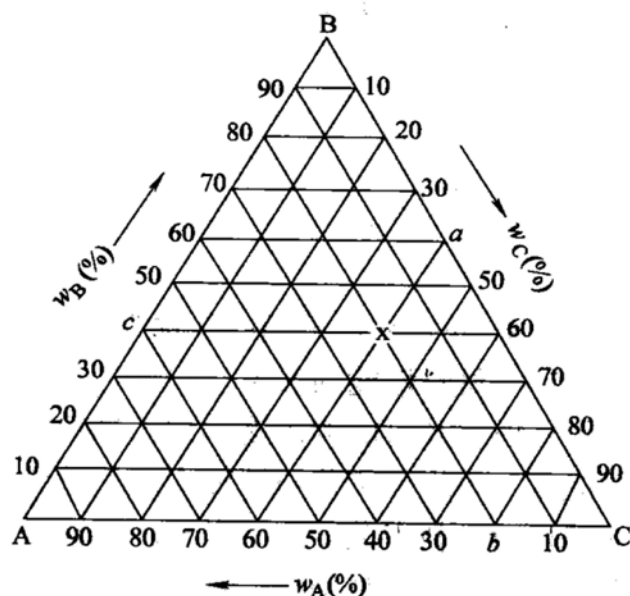


图 10-2 第三题第 1 小题图

2. 分析图 10-3 中 V 合金的平衡结晶过程。

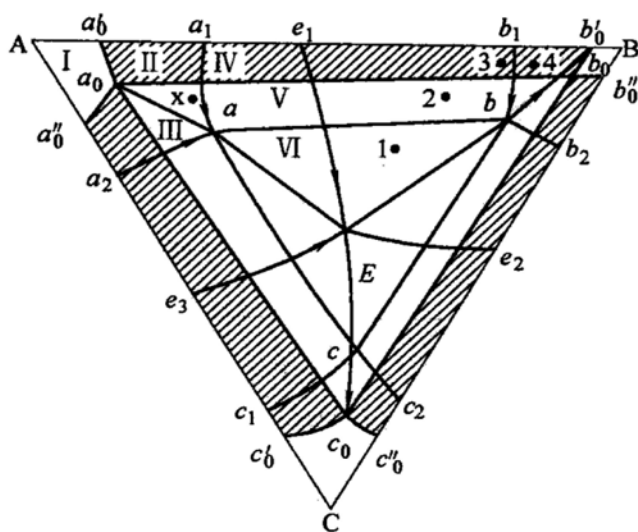


图 10-3 第三题第 2 小题图

四、(20 分) 解释常用的扩散机制。有两种激活能分别为 $E_1 = 83.7 \text{ kJ/mol}$ 和

$E_2 = 251 \text{ kJ/mol}$ 的扩散, 观察在温度从 25°C 升高到 600°C 时对这两种扩散的影响, 并对结果作出评述。

标准答案

一、

1. 参考答案: 材料结合键的类型及结合能的大小对材料的性能有重要的影响, 特别是对物理性能和力学性能。

结合键越强, 熔点越高, 热膨胀系数就越小, 密度也越大。金属具有光泽、高的导电性和导热性、较好的机械强度和塑性, 且具有正的电阻温度系数, 这就与金属的金属键有关。陶瓷、聚合物一般在固态下不导电, 这与其非金属键结合有关。工程材料的腐蚀实质是结合键的形成和破坏。

晶体材料的硬度与晶体的结合键有关。一般共价键、离子键、金属键结合的晶体比分子键结合的晶体的硬度高。结合键之间的结合键能越大, 则弹性模量越大。工程材料的强度与结合键能也有一定的联系。一般结合键能高, 强度也高一些。材料的塑性也与结合键类型有关, 金属键结合的材料具有良好的塑性, 而离子键、共价键结合的材料塑性变形困难, 所以陶瓷材料的塑性很差。

2. 参考答案: 如 Al-Mg 合金。作为一种可加工、不可热处理强化的结构材料, 由于具有良好的焊接性能、优良的耐蚀性能和塑性, 在飞机、轻质船用结构材料、运输工业的承力零件和化工用焊接容器等方面得到了广泛的应用。

根据材料使用目的, 设计合金成分, 考虑烧损等情况进行配料, 如 Al5Mg 合金板材, 实验室条件下可在电阻坩埚炉中 750°C 左右进行合金熔炼, 精炼除气、除渣后 720°C 金属型铸造, $430 \sim 470^\circ\text{C}$ 均匀化退火 $10 \sim 20\text{h}$ 后, 在 $380 \sim 450^\circ\text{C}$ 热轧, 再冷轧至要求厚度, 在电阻炉中进行稳定化处理, 剪切成需要的尺寸或机加工成标准试样, 进行各种组织、性能测试。

3. 参考答案: 材料的成分、组织、工艺与性能之间的关系非常紧密, 互相影响。材料的性能与它们的化学成分和组织结构密切相关, 材料的力学性能往往对结构十分敏感, 结构的任何微小变化, 都会使性能发生明显变化。材料工作者的最终目标是根据最终需求, 设计出合理成分, 制订最佳生产流程, 而后生产出符合要求的材料。

如钢中存在的碳原子对钢的性能起着关键作用, 许多金属材料中一些极微量的合金元素也足以严重影响其性能。然而由同一元素碳构成的不同材料如石墨和金刚石, 也有着不同的性能, 有些高分子的化学成分完全相同而性能却大不一样, 其原因是它们有着不同的内部结构。

材料的内部结构可分为不同层次,包括原子结构、原子的排列方式,以及显微组织和结构缺陷。如果同样的晶体材料,它的晶粒或是“相”的形态和分布改变,就可以大大地改善它的性能。无论是金属、陶瓷、半导体、高分子还是复合材料,它们的发展无一不与成分和结构密切相关。只有理解和控制材料的结构,才能得到人们所要求的材料性能。

而材料的制备/合成和加工不仅赋予材料一定的尺寸和形状,而且是控制材料成分和结构的必要手段。如钢材可以通过退火、淬火、回火等热处理来改变它们内部的结构而达到预期的性能,冷轧硅钢片经过复杂的加工工序能使晶粒按一定取向排列而大大减少铁损。飞机发动机的叶片可以通过铸造的凝固控制做成单晶体叶片,使之没有晶粒边界,大大提高它的使用温度和性能,光纤不仅要拉成微米级的细丝,而且要控制光纤从内到外的折射率的分布,等等。有时候可以说没有一种合成加工上的新的突破,就没有某一种新材料。如有了快速冷却的加工方法,才有了非晶态的金属合金。

4. 参考答案:材料的种类繁多,把那些已经成熟且在工业中已批量生产并大量应用的材料称之为传统材料或基础材料,如钢铁、水泥、塑料等。而把那些正在发展,且具有优异性能和应用前景的一类材料称之为先进材料或新材料。传统材料通过采用新技术、提高性能可以成为新材料,新材料经过长期生产和应用之后也就成为传统材料。目前新材料往往与新的加工技术联系在一起,如通过一种快速冷却或机械合金化等加工方法,可以制备非晶态的金属合金,而在这之前人们不知道金属还可以做成非晶态;其他如喷射沉积技术、半固态加工技术、净形薄带连续铸造技术等都是新的加工技术。某些高分子材料,采用挤压成丝工艺以后,使有机纤维的比强度和比刚度大幅度提高;采用 CVD + 熔融或离子交换制备新型光纤材料等等。

其中铝合金制备新技术有:热顶铸造、气隙铸造及电磁铸造技术,铝合金电磁铸轧技术,大型铝合金型材挤压技术,特宽铝合金中厚板轧制技术,半固态金属成形技术,铝合金显微组织结构预测及性能控制技术。

5. 参考答案:材料加工过程对材料使用性能有重要而复杂的影响,材料也必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实用价值的材料来。通过合理和经济的合成和加工方法,可以不断创制出许多新材料或改变和精确控制许多传统材料的成分和结构,可以进一步发掘和提高材料的性能。

材料的制备/合成和加工不仅赋予材料一定的尺寸和形状,而且是控制材料成分和结构的必要手段。如钢材可以通过退火、淬火、回火等热处理来改变它们内部的结构而达到预期的性能,冷轧硅钢片经过复杂的加工工序能使晶粒按一定取向排列而大大减少铁损。飞机发动机的叶片可以通过铸造的凝固控制做成单晶体叶片,使之没有晶粒边界,大大提高它的使用温度和性能。

6. 参考答案：对于结构材料，最重要的性能指标之一是强度。强度是指材料抵抗变形和断裂的能力，提高材料的强度可以节约材料，降低成本。人们在利用材料的力学性能时，总是希望所使用的材料具有足够的强度，人们希望合理运用和发展材料强化方法，从而挖掘材料性能潜力的基础。

从理论上讲，提高金属材料强度有两条途径：一是完全消除内部的位错和其他缺陷，使它的强度接近于理论强度。目前虽然能够制出无位错的高强度金属晶须，但实际应用它还存在困难，因为这样获得的高强度是不稳定的，对操作效应和表面情况非常敏感，而且位错一旦产生后，强度就大大下降。因而在生产实践中，主要采用另一条途径来强化金属，即在金属中引入大量的缺陷，以阻碍位错的运动，例如金属材料的强化手段一般有固溶强化、细晶强化、第二相粒子强化、形变强化等。综合运用这些强化手段，也可以从另一方面接近理论强度，例如在铁和钛中可以达到理论强度的 38%。一些新型高强铝合金，如 Al-Li 合金、Al-Cu-Mg 系合金和 Al-Zn-Mg 系合金以及高 Zn 含量 Al-Zn-Mg 合金、Al-Mg-Sc 系合金、Al-Zn-Mg-Sc 系合金、铝基复合材料等，应用各种强化方法均获得了很高的强度和其他综合性能。

二、

1. Al 单胞中原子数 4，致密度 0.74，配位数 12，密排面 $\{111\}$ ，密排方向 $\langle 110 \rangle$ 。 α 的晶体结构 FCC。 α 与 θ 均是 Al 与 Cu 相互作用的结果， α 是固溶体，晶体结构与 Al 相同， θ 是化合物，晶体结构与 Al、Cu 均不相同。

2. 再结晶全图是变形金属变形程度、退火温度与退火后晶粒大小的图，起始再结晶温度指大变形金属退火 1h 后开始再结晶的温度。一种测定再结晶温度的方案可以是：大变形金属退火 1h 后，测量硬度变化，硬度大幅下降温度为开始再结晶温度。

3. 纯铝平衡结晶时，需要能量与结构起伏，x 合金平衡结晶时还需要成分起伏，结晶速度快于纯金属，有溶质原子再分配、成分过冷等。x 合金的平衡结晶组织转变过程为： $L \rightarrow \alpha$ ， α ， $\alpha \rightarrow \theta_{II}$ ，非平衡结晶中组织转变过程为： $L \rightarrow \alpha$ ，出现非平衡共晶， α ， $\alpha \rightarrow \theta_{II}$ 。

4. x 合金塑性变形后的组织、性能变化有加工硬化、组织纤维化、加工残余内应力，甚至有加工织构及其他物理化学性能变化。x 合金的室温强化措施有固溶强化、加工硬化、细化晶粒强化、沉淀强化等。位错理论解释为：固溶强化是固溶原子在位错周围形成各种气团，加工硬化是增加位错数目，细化晶粒强化是增加晶界数目，沉淀强化是第二相粒子与位错交互作用导致位错切过或绕过粒子，这些均增加了位错运动难度，使得强度上升。

三、

1. 图 10-2 的 x 合金的成分为： $w_A = 20\%$ ， $w_B = 40\%$ ， $w_C = 40\%$ 。

2. 图 10-3 中合金中 V 的平衡结晶过程为 $L \rightarrow \alpha$, $L \rightarrow (\alpha + \beta)_{\text{共晶}}$, $\alpha \rightarrow \beta_{\text{II}}$, α 与 β 互析。

四、常用的扩散机制有空位机制和间隙机制。两种激活能分别为 $E_1 = 83.7 \text{ kJ/mol}$ 和 $E_2 = 251 \text{ kJ/mol}$ 的扩散在温度从 25°C 升高到 600°C 时, 由 $D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ 得: 当温度从 298K 提高到 873K 时, 扩散速率 D 分别提高 4.6×10^9 和 9.5×10^{28} 倍, 显示出温度对扩散速率的重要影响。激活能越大, 扩散速率对温度的敏感性越大。

试 卷 十 一

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：材料学、材料加工

- 一、(20 分) 叙述你所熟悉的某一类材料的凝固过程。
- 二、(20 分) 叙述你所熟悉的某一类材料的变形行为及其特点。
- 三、(每小题 10 分, 共 70 分) 根据图 11-1 所示铁碳亚稳平衡相图和你所学所有知识, 回答下列问题:

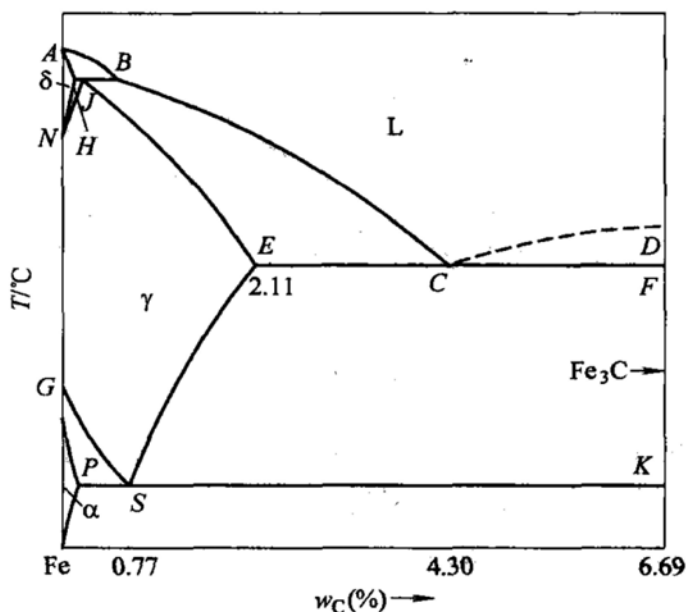


图 11-1 第三题图

1. (10 分) 分析氢、氮、碳、硼在 γ -Fe 中形成固溶体的类型, 进入点阵中的位置和固溶度大小。已知元素的原子半径如下: 氢 0.046nm, 氮 0.071nm, 碳 0.077nm, 硼 0.091nm, γ -Fe 0.126nm。
2. (10 分) 标注相图中平衡反应的成分及温度, 写出平衡反应式。
3. (10 分) 分析 $w_C = 1\%$ 的铁碳合金平衡凝固到室温过程的组织变化。
4. (10 分) 指出 γ 相的晶体结构、密排方向、密排面、致密度、配位数、晶胞中原子数和通常情况下的滑移系; 画出其中一个滑移系, 并标明指数。
5. (10 分) 结合你所学的有关知识, 说明如何提高 Fe-C 合金的强度。

6. (10 分) $w_c = 0.1\%$ 的铁碳合金在拉伸中, 一种情况是在拉伸出现塑性变形后去载, 立即再加载; 另一种情况是去载后时效再加载。试解释前者无屈服现象后者有屈服现象的原因。

7. (10 分) $w_c = 0.1\%$ 的铁碳合金制作成齿轮, 对齿轮气体渗碳强化。画出钢在渗碳后的组织分布示意图; 渗碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中进行而不在 $\alpha\text{-Fe}$ 中进行, 即渗碳温度选择要高于 A_3 温度, 为什么? 渗碳温度高于 1100°C 会出现什么问题?

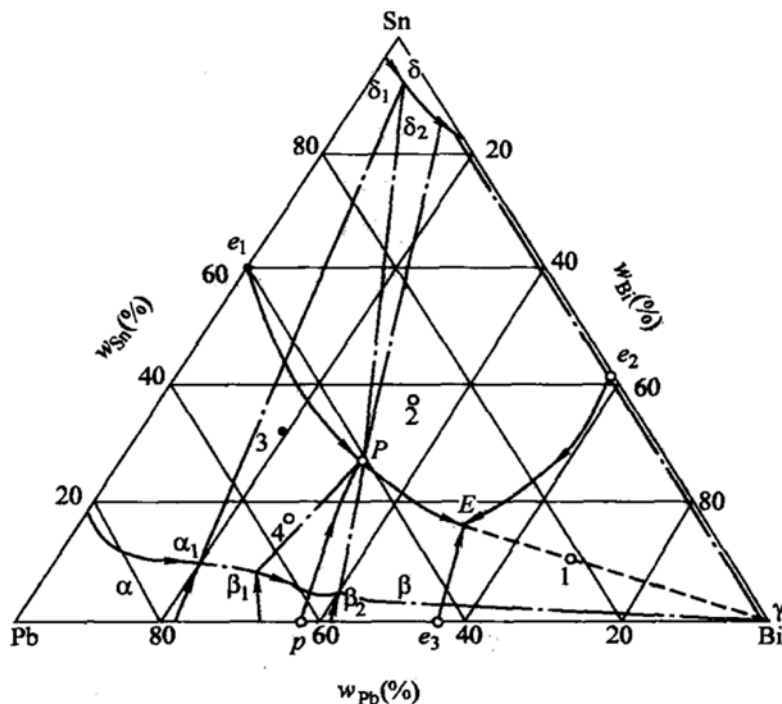


图 11-2 第四题图

四、(10 分) 如图 11-2 所示相图, 写出四相反应; 分析 2 点合金结晶过程。

五、(10 分) 分析位错对金属材料性能的影响。

六、(20 分) 就你所学所有知识, 谈谈如何控制和改善金属材料中的组织。

标准答案

一、(简答, 以金属材料为例)

金属材料在凝固过程后通常得到结晶体, 因此金属材料的凝固过程也称结晶过程。

金属的结晶通常分为两个阶段, 即形核和形核后的长大阶段。

金属的形核通常在金属熔体中的小尺寸有序原子集团 (晶胚) 基础上, 通过原子扩散而形成能够稳定长大的晶核, 即纯金属的形核过程一般需要满足能量

条件和结构条件,而合金的形核还要一定的成分条件。

金属形核后的长大通常需要一个较小的过冷度,原子向晶核扩散而长大,在长大过程中结晶界面是粗糙界面,因此金属长大速度一般很快,而结晶界面结构、温度梯度和结晶速度会影响到长大后的晶粒形状和大小,对于合金通常还会造成合金结晶后出现成分偏析等问题。

二、(简答,以金属材料为例)

金属材料在拉伸变形中通常经历弹性变形、塑性变形阶段,最终可能断裂。

金属材料的每个单晶体中主要变形方式以滑移为主,部分金属在变形中也会出现孪生变形。滑移和孪生变形的微观机制均可以用位错的观点进行解释。

多晶体材料则由于晶界的阻滞作用和相邻晶粒位向差的不同通常会影响位错运动,导致多晶体材料变形相对单晶体材料困难。

单相固溶体合金则因为溶质原子的作用出现固溶强化,体心立方金属在拉伸过程中有屈服现象和应变时效现象。

多相合金的塑性变形特点与第二相的数量、尺寸和分布有关,一般细小弥散、均匀分布的第二相会增强合金强度,使变形困难。

金属材料在变形过程中通常有加工硬化现象,同时微观组织和其他物理化学性能也有改变。

三、

1. γ -Fe 为 FCC 结构,八面体间隙半径 $r = 0.414R_{\text{原子}} = 0.0522\text{nm}$,四面体间隙半径 $r = 0.225R_{\text{原子}} = 0.0284\text{nm}$ 。可见氢、氮、碳原子在 γ -Fe 中一般会溶入八面体间隙中心,形成间隙固溶体,固溶度较小;硼在 γ -Fe 中一般也是位于八面体间隙中心,形成间隙固溶体,但是有时也可以形成置换固溶体。

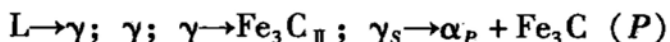
2. 图中平衡反应成分、温度和反应式如下(三条水平线,从上到下):

1495°C , $L_B + \delta_H \rightarrow \gamma_J$, B 、 H 和 J 点成分分别为: $w_C = 0.09\%$, $w_C = 0.17\%$, $w_C = 0.53\%$ 。

1148°C , $L_C \rightarrow \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$, C 、 E 点和 Fe_3C 成分分别为: $w_C = 4.3\%$, $w_C = 2.11\%$, $w_C = 6.69\%$ 。

727°C , $\gamma_S \rightarrow \alpha_P + \text{Fe}_3\text{C}$, S 、 P 点和 Fe_3C 成分分别为: $w_C = 0.77\%$, $w_C = 0.0218\%$, $w_C = 6.69\%$ 。

3. 合金平衡凝固到室温过程的组织变化为:



4. γ 为 FCC 结构,其密排方向、密排面、致密度、配位数、晶胞中原子数分别为 $\langle 110 \rangle$ 、 $\{111\}$ 、0.74、12 和 4;通常情况下的滑移系为 $\{111\} \langle 110 \rangle$,其中一个滑移系为 $(111) [\bar{1}10]$,指数如图 11-3 所示。

5. (简答) 提高 Fe-C 合金的强度方法有多种,主要有加工硬化、微合金强

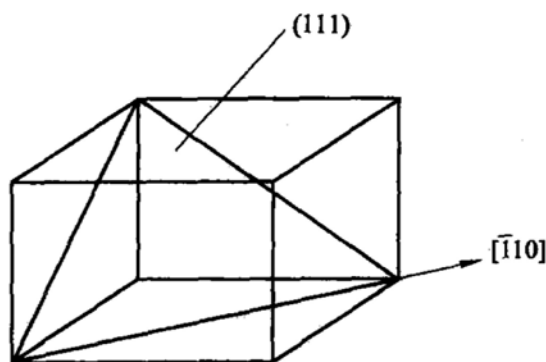


图 11-3 第三题第 4 小题解答图

化、固溶强化、细化晶粒强化、热处理强化（马氏体相变强化等）。

6. $w_c = 0.1\%$ 合金中由于 C 原子与 Fe 的弹性交互作用，形成柯垂尔气团（亦称柯氏气团），柯垂尔气团与位错的交互作用导致合金出现屈服现象，在拉伸出现塑性变形后去载，立即再加载是已经克服了柯垂尔气团对位错的阻碍，立即再加载不会重新出现屈服现象，而卸载后时效再加载会使溶质原子重新聚集形成与位错的新的交互作用，从而使合金再次出现屈服现象。

7. $w_c = 0.1\%$ 合金齿轮渗碳后的组织分布示意图如图 11-4 所示。

渗碳在 γ 温度范围中（ A_3 温度以上）进行而不在 α 温度范围中进行的主要原因是，温度较高，渗碳速度可以较快，同时在 γ 温度范围中进行渗碳，可以得到较大的含碳量，但是渗碳温度高于 1100°C 会导致基体合金晶粒粗大，力学性能下降，同时对渗碳设备也会提出更高要求。

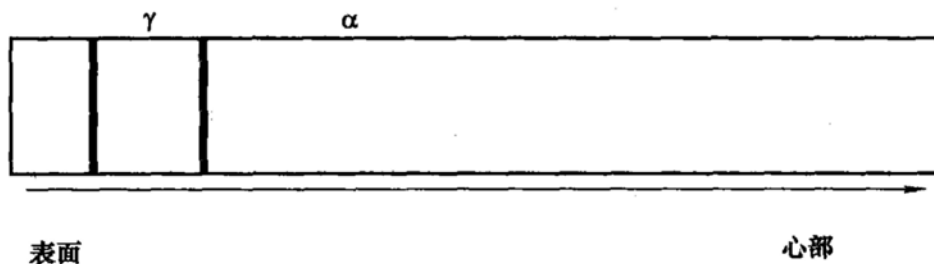


图 11-4 第三题第 7 小题解答图

四、

P 点（包共晶反应）： $L + \alpha_1 \rightarrow \delta_1 + \beta_1$ 。

E 点（三元共晶） $L \rightarrow \delta_2 + \beta_2 + \gamma$ 。

图中 2 点合金凝固过程： $L \rightarrow \delta$ ； $L \rightarrow \delta_2 + \beta_2$ ； $L \rightarrow \delta_2 + \beta_2 + \gamma$ 。

五、（简答）位错对金属材料性能的影响主要有：金属的塑性变形是通过位错的运动实现的，因此金属材料的强化手段可以通过改变材料中的位错数量来实现；合金中位错与溶质原子发生作用形成柯垂尔气团造成屈服现象和应变时效，位错是第二相形核的择优场所，通常第二相在位错处可以优先形核长大；刃型位

错可以看成是一个管道，可以加速扩散速度。

六、（以金属材料为例，简答）材料的组织与其成分和加工过程密切相关。

控制和改善金属材料中的组织可以通过选择成分确定合适的组织，不同成分金属可以得到纯金属、单相固溶体合金和多相合金；可以通过添加剂改变金属的晶粒大小；可以通过不同加工处理手段改变金属材料组织，如铸造过程中的冷却速度和冷却方式、温度梯度、铸造后的压力加工大小和方式；可以通过热处理改变金属材料组织；可以通过快速凝固和粉末冶金等手段获得非平衡组织。

试 卷 十 二

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：材料学、材料加工

一、(共 20 分) 已知铝的空位形成能为 0.76eV/空位 ， 25°C 时铝的点阵常数为 0.405nm 。

1. 计算 25°C 时铝的空位浓度 (空位/ cm^3)。
2. 铝在什么温度下空位浓度是 25°C 时的 1000 倍？

二、(30 分) 根据 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 相图，分析含碳量 $w_{\text{C}} = 1.2\%$ 的铁碳合金从液态平衡冷却至室温的转变过程，并分别计算室温下的相组成物及组织组成物的相对量 (渗碳体含碳量为 6.67%)；如果要使显微组织中渗碳体与珠光体各占一半，那么该合金的含碳量是多少？

三、(30 分) 为什么多元合金凝固时会出现成分过冷？成分过冷对合金的凝固组织有什么影响？

四、(15 分) 什么是变质剂？试简述添加变质剂细化晶粒的基本原理。

五、(20 分) 结合影响金属材料强度的因素，总结位错理论在材料科学中的应用。

六、(20 分) 简述冷变形后金属回复及再结晶退火对材料组织和性能变化的规律，说明哪些地方可能是再结晶优先形核的地点，指出再结晶、结晶、固态相变之间的主要区别。

七、(共 15 分) 解答下列扩散问题。

1. (5 分) 简述影响扩散系数的主要因素。
2. (10 分) 试利用图 12-1 所示 Fe-O 相图分析纯铁在 1000°C 氧化时氧化层内的组织与氧浓度分布规律，画出示意图。

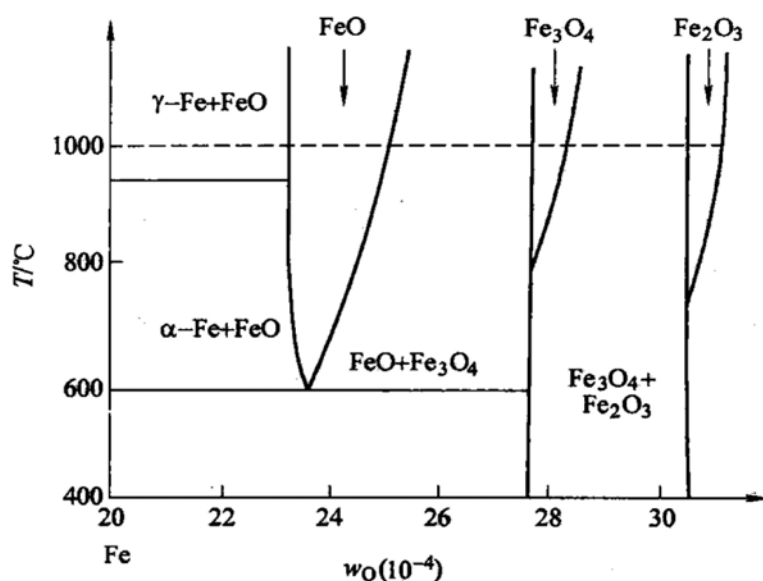


图 12-1 第七题第 2 小题图

标准答案

一、

1. 设铝的点阵常数为 $a = 0.405\text{nm}$, 由题可知单位晶体体积内单胞数为 $\frac{1}{a^3}$, 由于铝为 FCC 结构, 每个单胞内的原子个数为 4, 可知单位体积内结点个数为 $N = \frac{4}{a^3}$ 。空位浓度为

$$C_v = \frac{\text{单位体积内空位数 } (n)}{\text{单位体积内结点数 } (N)} = A e^{-\frac{Q_v}{RT}} \quad (12-1)$$

式中, A 为材料常数, 通常取 $A = 1$; 空位形成能 $Q_v = 0.76\text{eV}$, 而 $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$; $R = 8.31\text{J/mol} \cdot \text{K}$, 为气体常数; T 为热力学温度。

在 25°C 时, $T = (273 + 25)\text{K} = 298\text{K}$, 代入式 (12-1) 得到此温度下的铝中的空位浓度 $n = 8.34 \times 10^9$ 空位/ cm^3 。

2. 由空位浓度计算公式 (12-1), 不同温度下空位浓度与温度有关, $T_1 = 298\text{K}$, T_2 待求, 而依题意有 $\frac{C_{T_1}}{C_{T_2}} = e^{\frac{Q_v}{RT_2} - \frac{Q_v}{RT_1}} = \frac{1}{1000}$, 代入各数据计算可得 $T_2 = 115.7^\circ\text{C}$ 。

二、由 Fe-Fe₃C 相图可知, $w_c = 1.2\%$ 的铁碳合金在冷却过程中先凝固成奥氏体, 当温度达到 A_{cm} 线后, 开始析出渗碳体, 随渗碳体的析出, 奥氏体中的含

碳量降低,当温度达到 738°C 时,奥氏体的含碳量变为 0.68% ,发生共析转变成珠光体。所以最后相组成物为 18% 渗碳体 + 82% 铁素体,组织组成为 13% 的渗碳体 + 87% 珠光体。如果要使显微组织中渗碳体与珠光体各占一半,那么由杠杆定律计算得到该合金的含碳量为 3.675% 。

三、多元合金凝固过程中熔点高的元素先凝固,如果合金搅拌不够充分,将会使低熔点的元素富集在凝固界面前沿,降低凝固界面前沿液相的实际凝固温度,这时即使是正的温度梯度,凝固界面前沿也可能出现过冷度随离开界面距离增加而增大的现象,这种现象称为成分过冷现象。成分过冷现象的出现将使多元合金即使在正的温度梯度下也可能出现胞状组织或枝晶组织。

四、通过少量添加能改变合金铸造组织相组成、相形貌或晶粒度从而改变铸造合金性能的物质称为变质剂。变质剂细化晶粒的基本原理是变质剂本身或变质剂与合金中元素反应能够形成构成合金析出晶核的弥散相,该弥散相与合金凝固相能形成界面能很低的共格界面,合金在该弥散相上非均匀形核从而达到细化晶粒的目的。

五、固溶强化的可能位错机制主要是溶质原子气团对位错的钉扎,增加了位错滑移阻力。如溶质原子与位错弹性交互作用的柯垂尔气团和斯诺克气团,溶质原子与扩展位错交互作用的铃木气团,使层错宽度增加,位错难于束集,交滑移困难;溶质原子形成的偏聚和短程有序,位错运动通过时破坏了偏聚和短程有序使得能量升高,增加位错的阻力;溶质原子与位错的静电交互作用对位错滑移产生的阻力使材料强度升高。

弥散强化也是通过阻碍位错运动强化材料,如位错绕过较硬、与基体非共格第二相的 Orowan 机制和切割较软、与基体共格的第二相粒子的切割机制。

产生加工硬化的各种可能机制有滑移面上平行位错间交互作用的平行位错硬化理论,以及滑移面上的位错与其他滑移面上的位错林切割产生割阶的林位错硬化理论。

晶界强化,按照霍尔-佩奇公式,其实质是位错越过晶界需要附加应力。

有序强化,有序合金中的位错是超位错,要使金属发生塑性变形就需要使超位错的两个分位错同时运动,因而需要更大的外应力。异类元素原子间的结合力大于同类元素原子间的结合力,所以异类原子的有序排列赋予有序合金较高的强度。

六、随退火温度的升高或退火时间的延长,形变组织中的位错缠结演变为亚晶,亚晶进行合并长大;在形变不均匀区内发生再结晶形核及长大,等轴晶取代形变长条晶粒;随后是晶粒正常长大。在性能上,强度、硬度下降,电阻下降;塑性、韧性提高。这些过程在再结晶阶段比回复阶段更显著。

优先形核地点为:原始晶界、形变时形成的新大角晶界处或通过亚晶长大而

逐步形成的大角晶界、第二相粒子附近等。

再结晶只是一种组织变化，没有结构变化，驱动力是形变储能；结晶是非晶态的液相、气相或固态非晶体中形成晶体的过程；固态相变是固/固相的结构变化。后两者的驱动力都是化学自由能差。

七、

1. 影响扩散的因素：①温度的影响。温度越高，扩散越快。②晶体结构的影响。结构不同，扩散系数不同。③固溶体类型对扩散的影响。不同的固溶体，原子的扩散和机制不同。④固溶体浓度对扩散的影响。浓度越大，扩散越容易。⑤晶体缺陷的影响。晶界、位错、空位都会对扩散产生影响。⑥化学成分对扩散的影响。加入化学元素对扩散会产生阻碍。

2. 根据 Fe-O 相图，在 1000℃ 下当表明氧浓度达到 31% 时，则由表面向内依次出现 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、FeO 氧化层，最内侧是 $\gamma\text{-Fe}$ ，如图 12-2 所示。随着扩散的进行，氧化层逐渐增厚并向内部推行。

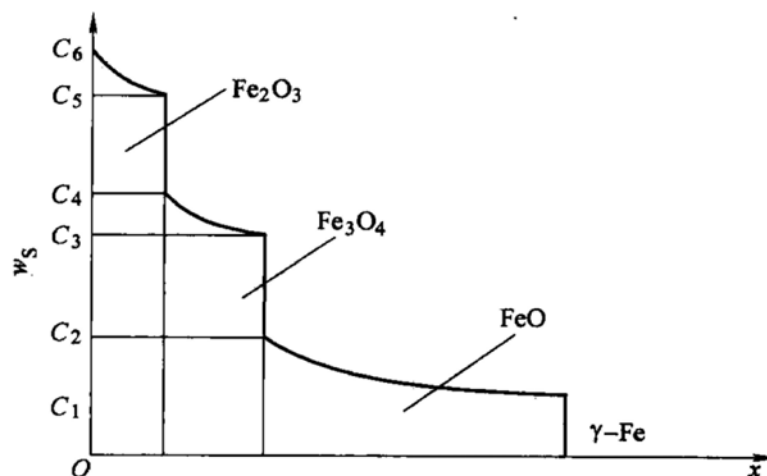


图 12-2 第七题第 2 小题解答图