

中南大学考试试卷答案

2001 —— 2002 学年第二学期 时间 110 分钟
材料科学与工程 课程 64 学时 4 学分 考试形式：闭卷
专业年级材料 1999 级 总分 100 分，占总评成绩 70%

一、名词解释（5分×8）

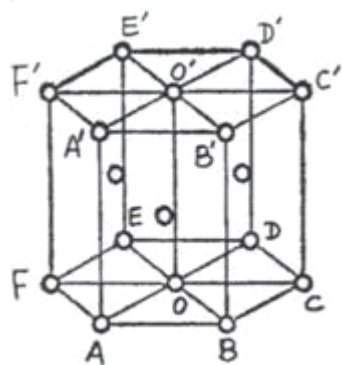
- 1、金属玻璃
- 2、金属间化合物
- 3、离异共晶
- 4、晶界偏聚
- 5、科垂尔气团（Cottrell Atmosphere）
- 6、孪生
- 7、反应扩散
- 8、变形织构

参考答案：

- 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、问答题

- 1、（10分）标出 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，那些可构成滑移系？指出最容易产生滑移的滑移系。



参考答案：

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、（10 分）判断 $\frac{a}{6}[2\bar{1}\bar{1}] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}] \rightarrow \frac{a}{6}[1101]$ 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。

参考答案：

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、（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。

参考答案：

非稳态扩散方程的表达式为 $\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(D \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x}$ ，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、（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，有那些主要措施，为什么？

参考答案：

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。

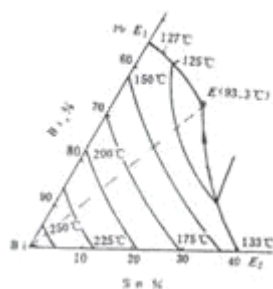
5、（15 分）试述针对工业纯铝、Al—5%Cu 合金、Al—5%Al₂O₃ 复合材料分别可能采用那些主要的强化机制来进行强化。

参考答案：

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%Al₂O₃ 复合材料的强化机制为加工硬化、细晶强化、弥散强化。

6、（15 分）请在如下 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。



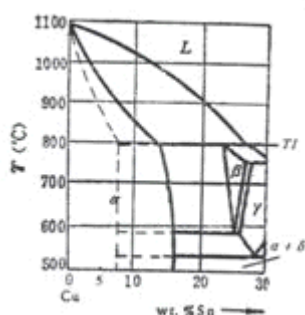
参考答案：

（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 初晶 + (Bi + Sn) 二元共晶 + (Bi + Sn + Pb) 三元共晶，室温下的组织示意图（略）。

7、（20 分）Cu—Sn 合金相图如图所示。

- （1） 写出相图中三条水平线的反应式，并画出 T1 温度下的成分—自由能曲线示意图；
- （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？



参考答案：

(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 $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$ ；T1 温度下的成分—自由能曲线示意图（略）；

(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 $(\alpha + \delta)$ 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在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。

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，最后工序中可采用那些方法，为什么？

参考答案：

(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。

中南大学考试试卷答案

2002 ——— 2003 学年第二学期 时间 110 分钟
材料科学与工程 课程 64 学时 4 学分 考试形式: 闭卷
专业年级材料 2000 级 总分 100 分, 占总评成绩 70%

一、填空

- 1、[110]; (111); ABCABC.....; 0.74; 12; 4; $r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$
- 2、异类原子之间相互吸引力大于同类原子之间吸引力; 一定的化学成分; 较慢的冷却速度
- 3、升高; 降低; 降低
- 4、2.11%C; 2.11%C; 铁素体和渗碳体 (α 和 Fe_3C); fcc; 2.11%; 0.77%; 4.3%; 铁素体珠光体; 珠光体和 Fe_3C_{II} ; 液相; 先共晶奥氏体; 铁素体; 6.69%
- 5、(101); $[\bar{1}11]$
- 6、20%A-40%B-40%C

二、名词解释 (6X5=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

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它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它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、(10 分) 试根据凝固理论, 分析通常铸锭组织的特点。

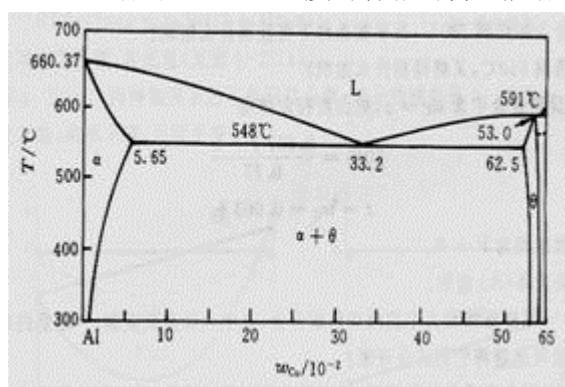
根据冷却速度对金属组织的影响，现要获得非晶，亚稳相，请指出其凝固时如何控制。

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。

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；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；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，而纯金属则需要负温度梯度下才能得到树枝状晶。

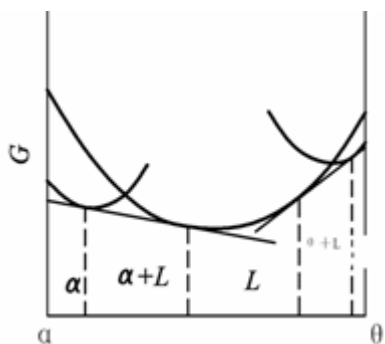
四、（20分）如图3的二元合金相图，

- (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；
- (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做变形合金何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。



- (1) 5.6%Cu 合金在平衡结晶时室温组织为，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 $(\alpha + \theta)_{\text{共晶}}$ ；5.7%Cu 合金在平衡结晶时室温组织为 $\alpha + \theta_{\text{II}} + (\alpha + \theta)_{\text{共晶}}$ ，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；
- (4) $k_0=0.17$
- (5) 9.7%
- (6) $T=560^\circ\text{C}$ 温度时各相的自由能-成分曲线示意图如图。

【答案 6】



五、（10分）图4为Fe-W-C三元系的液相面投影图。写出1700℃，1200℃，1085℃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4

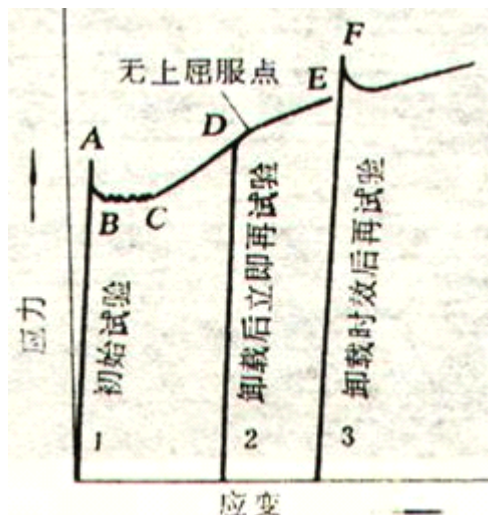
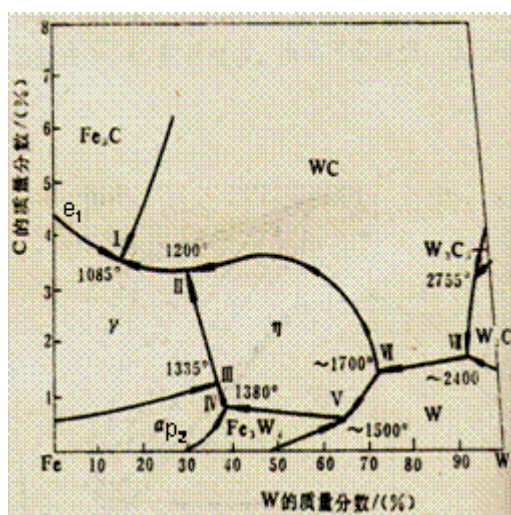


图5

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

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

- 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 屈服现象对冲压制件表面质量有何不利影响。
- 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、（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？

不能采用相同的最终热处理工艺，户外用的架空铜导线一般用回复退火，户内电灯用花线采用再结晶退火。

八、（10分）如何提高固溶体合金的强度

固溶强化，加工硬化，细晶强化，沉淀强化

九、（10分）试说明晶界对材料性能及变形的影响。

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、（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。

原子扩散对材料的影响如铸中晶粒形核和长大、晶界运动、氧化……等许多过程均牵涉到原子扩散；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、（15分）工业纯铜的熔点为 1083℃，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℃，第二个试样加热到 500℃，第三个试样加热到 800℃，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。

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。

中南大学考试试卷答案

2003 —— 2004 学年第二学期 时间 110 分钟

材料科学与工程 课程 64 学时 4 学分 考试形式：闭卷

专业年级材料 2001 级 总分 100 分，占总评成绩 70%

1.名词解释（3分/个=18分）

变温截面：三元相图中垂直成分三角形的截面；

过冷度： ΔT 指 T_m 与 T_n 的差值二维平面长大；

偏析反应： $\alpha+\beta\rightarrow\gamma$ 称为包析反应；

固溶体：一个固体组元（溶质）溶解在另外一个组元（溶剂）晶格中，保持溶剂晶格特点的物质；

成分过冷：合金凝固中由于溶质原子再分配形成的过冷；

形核功：金属凝固过程中形成晶核需要的额外能量。

2. 写出固溶体的分类（10分）：

置换、间隙固溶体；有限、无限固溶体；有序、无序固溶体；一次、二次固溶体；

3. 试根据凝固理论，分析通常铸锭组织的特点及成因。

解答：根据金属结晶过程的形核和长大理论以及铸锭的散热过程，可以得出通常铸锭组织的特点为最外层为细小等轴晶，靠内为柱状晶，最内层为粗大等轴晶。

4. 根据铁碳亚稳平衡相图回答下列问题：

解答：Fe-Fe₃C 亚稳平衡相图如图。

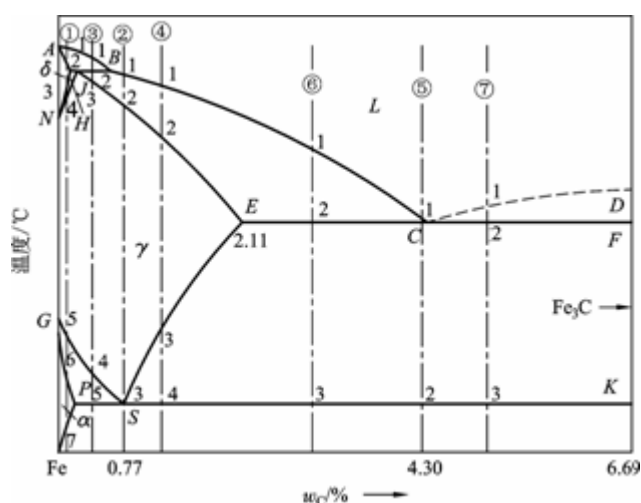


图 Fe-Fe₃C 亚稳平衡相图

1) Fe₃C_{II} 含量最多的合金、珠光体含量最多的合金、莱氏体含量最多的合金的合金成分分别为含碳量 2.11%，0.77%，4.3%。

2) 平衡反应的成分及温度，反应式为：1495℃，L_{0.53} + δ_{0.09} → A_{0.17}，包晶反应；1148℃，L_{4.3} → A_{2.11} + Fe₃C，共晶反应；727℃，A_{0.77} → F_{0.0218} + Fe₃C，共析反应；

3) 凝固过程：935℃：L → γ，γ → Fe₃C II，γ → F + Fe₃C II (P)

室温下相组成为 F + Fe₃C II，其中

$$F\% = \frac{6.63 - 1}{6.63 - 0.0008} \times 100\% = 84.9\%, Fe_3C\% = 1 - F\% = 15.1\%$$

；室温下组织组成为 P

$$+ Fe_3C II, \text{ 其中 } F\% = \frac{6.69 - 1}{6.69 - 0.77} = 98.1\%, Fe_3C II\% = 1 - P\% = 1.9\%.$$

4) 三种钢在给定温度下的显微组织如表。1200℃时各相的自由能---成分曲线示意图如图

含碳量	温度	显微组织	温度	显微组织
0.4	770℃停留一段时间	P+F	900℃	A+F

0.77	680℃	P	刚达到 770℃	A
1.0	700℃	P+Fe ₃ C II	刚达到 770℃	A+Fe ₃ C

5 Cu-Zn-Al 合金室温下的等温截面和 2%Al 的垂直截面图，回答问题：

解答：1) Cu-30%Zn-10%Al 合金的成分点见图中 X 点。

2) Cu-20%Zn-8%Al 合金，位于 $\alpha + \gamma$ 两相区边界线上，由 $\alpha + \gamma$ 两相组成。Cu-25Zn-6Al

合金位于 $\alpha + \beta' + \gamma$ 的三相区中，由 $\alpha + \beta' + \gamma$ 的三相区组成，可以从图中读出各相成分点：

α : Cu-22.6Zn-3.45Al, γ : Cu-18Zn-11.5Al, β : Cu-30Zn-4Al

故 Cu-20Zn-8Al 合金中 $\alpha \% = \frac{11.5 - 8}{11.5 - 3.45} \times 100\% = 43.50\%$, $\gamma \% = 1 - \alpha \% = 56.5\%$

Cu-25Zn-6Al 合金中 $\beta' = \frac{25 - 20}{30 - 20} \times 100\% = 50\%$

$\alpha \% = (1 - \beta') \times 43.5\% = 21.75\%$, $\gamma \% = (1 - \beta') \times 56.5\% = 28.25\%$

3) Y 合金凝固过程：L - α , L - $\alpha + \beta$, $\beta - \alpha$

中南大学考试试卷答案

2004 —— 2005 学年第二学期 时间 110 分钟

材料科学与工程 课程 64 学时 4 学分 考试形式：闭卷

专业年级材料 2002 级 总分 100 分，占总评成绩 70%

1. (10 分) 画出 fcc 晶胞中 (111) 晶面上的所有 [110] 晶向；在 hcp 晶胞中画出 $[11\bar{2}0]$

晶向和 $(1\bar{1}00)$ 晶面。

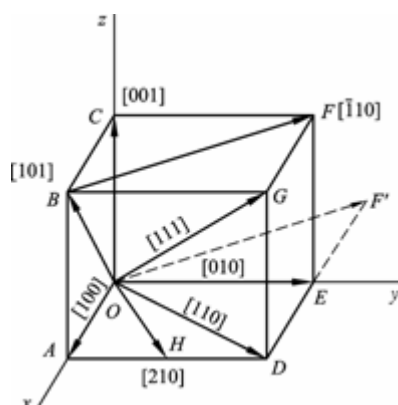


图 1 fcc 晶胞

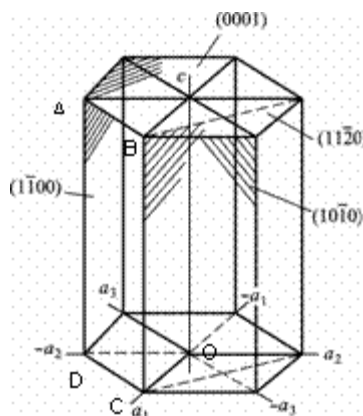


图 2 hcp 晶胞

参考答案：

fcc 晶胞如图 1，ACE 所在晶面为 (111) 晶面，[110] 晶向为 OD 方向。

hcp 晶胞如图 2, $[11\bar{2}0]$ 晶向为 Oa_3 反方向, $(1\bar{1}00)$ 晶面为 ABCD 面。

2. (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。

参考答案: 铸锭组织控制、单晶体制备、非晶体制备等.....。

3. (10 分) 画出 Fe-Fe₃C 亚稳平衡相图, 根据相图回答下列问题:

- 标出合金在室温下的组织组成;
- 写出相图中三个等温反应式;
- 分析含碳量为 0.45% 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;
- 画出 0.45% C 的合金在 1148℃ 时的成分-自由能曲线示意图;
- 试分析元素 C 及 Cr 在 Fe 中的可能存在形式及其作用。

参考答案

- 画 Fe-Fe₃C 亚稳平衡相图如图 3 所示。

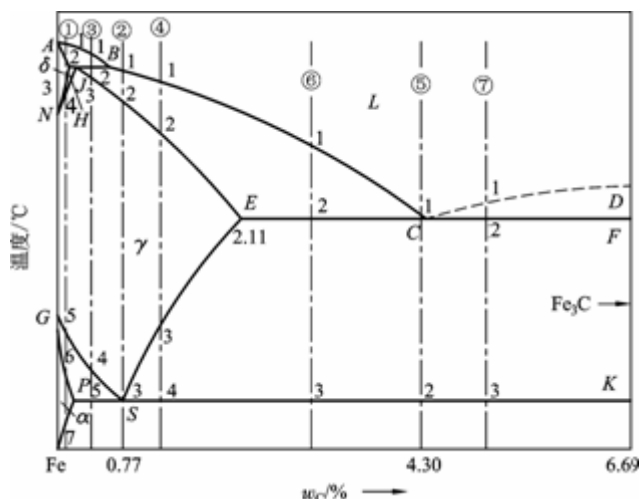


图 3 Fe-Fe₃C 亚稳平衡相图

- 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;
- 含碳量为 0.45% 的合金的平衡冷却过程为: L, L → A, A, A → Fe₃C_{II}, A → P, 室温下得到 P + Fe₃C_{II} 组织;
- 略
- 元素 C 在 Fe 中可以固溶 in 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 in Fe 中, 起到强化作用, Cr 也可与 Fe、C 形成合金碳化物。

4. (10 分) 试总结位错在金属材料中的作用。

参考答案要点

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。

5. （10分）分析原子扩散在金属材料中的作用。

参考答案要点

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。

6. （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。

参考答案要点

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。

7. （10分）分析层错能对金属热塑性变形的影响。

参考答案要点

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。

8. （10分）提高金属材料强度的途径有哪些？

参考答案要点

细晶强化、固溶强化、加工硬化、沉淀强化、弥散强化等。

9. （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

参考答案

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；

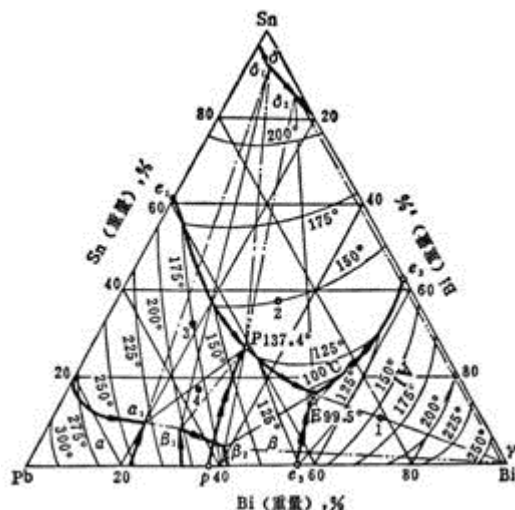
离异共晶：有共晶反应的合金中，如果成分离共晶点较远，由于初晶数量多，共晶数量很少，共晶中与初晶相同的相依附初晶长大，共晶中另外一个相呈现单独分布，使得共晶组织失去其特有组织特征的现象；

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位的不可动位错组态；

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；

10. （10 分）如图 Pb-Sn-Bi 三元合金相图，试写出图中五条单变量线及 P 点、E 点反应的反应式；分析图中合金 2 的平衡结晶过程，指出它的开始凝固温度。



参考答案

图中五条单变量线的反应式分别为，

$e_1P: L \rightarrow \alpha + \delta$;

$e_2P: L \rightarrow \gamma + \delta$;

$e_3P: L \rightarrow \gamma + \beta$;

$pP: L + \beta \rightarrow \alpha$;

$PE: L \rightarrow \delta + \beta$

P 点反应: $L + \alpha \rightarrow \delta + \beta$;

E 点分反应: $L \rightarrow \delta + \beta + \gamma$ 。

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℃。

中南大学考试试卷答案

2005 —— 2006 学年第二学期 时间 110 分钟

材料科学与工程 课程 64 学时 4 学分 考试形式: 闭卷

专业年级材料 2003 级 总分 100 分, 占总评成绩 70%

1. 名词解释

螺型位错: b 与位错线平行的位错

非平衡偏聚: 由于空位引起的位错

小角晶界: 相邻晶粒之间同一个晶面间夹角低于 10 度的晶界

滑移系: 滑移面与其上的一个滑移方向的总称

变形织构: 变形中形成的大部分晶粒位向取向相同的现象

再结晶温度：75%变形量下保温 1h 后开始再结晶的温度

动态再结晶：高层错能金属在再结晶温度以上进行变形时，发生的软化过程

二、简答题

1. (图略)

分别为：200℃变形组织，强度高，塑性低；

500℃：再结晶起始形核组织，仍为纤维组织，强度较高，塑性较好；

800℃：再结晶组织，强度低，塑性高；

2. 户外用的架空铜导线采用回复退火软化，只去应力，保留强度；户内电灯用花线采用再结晶退火软化

3. 纤维组织，流线，亚结构为胞状组织；加工硬化，内应力，织构

4. 屈服是试样拉伸中在不变应力下继续延展的现象，由于 Cottrell 气团引起

5. 根据硬度变化，高变形量金属保温 1h 后测量硬度变化

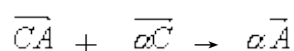
6. 位错反应几何条件：

$$b_1 + b_2 = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \right) a + \frac{2}{6} b + \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \right) c = \frac{1}{3} a + \frac{1}{3} b - \frac{1}{3} c = \frac{a}{3} [1\bar{1}\bar{1}]$$

$$\text{能量条件: } \left| \frac{a}{2} \sqrt{2} \right|^2 + \left| \frac{a}{6} \sqrt{6} \right|^2 = \left(\frac{a^2}{2} + \frac{a^2}{6} \right) > \frac{a^2}{3}$$

$$\text{因此 } \frac{a}{2} [10\bar{1}] + \frac{a}{6} [\bar{1}21] \rightarrow \frac{a}{3} [1\bar{1}\bar{1}] \text{ 位错反应能进行。}$$

对照汤姆森四面体，此位错反应相当于



(全位错) (肖克莱) (弗兰克)

新位错 $\frac{a}{3} [1\bar{1}\bar{1}]$ 的位错线为 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 和 $(1\bar{1}\bar{1})$ 的交线位于 (001) 面上，且系纯刃型位错。由于 (001) 面系 fcc 非密排面，故不能运动，系固定位错。

第一章 原子排列与晶体结构

1. $[110]$, (111) , ABCABC..., 0.74, 12,

$$4, \quad r = \frac{\sqrt{2}}{4} a; [111], (110), 0.68, 8, 2, \quad r = \frac{\sqrt{3}}{4} a; [11\bar{2}0], (0001),$$

$$ABAB, \quad 0.74, \quad 12, \quad 6, \quad r = \frac{a}{2}.$$

2. 0.01659 nm^3 , 4, 8。

3. FCC, BCC, 减少, 降低, 膨胀, 收缩。

4. 解答：见图 1-1
5. 解答：设所决定的晶面为 (hkl)，晶面指数与面上的直线 [uvw] 之间有 $hu+kv+lw=0$ ，故有：
 $h+k-l=0, 2h-l=0$ 。可以求得 (hkl) = (112)。

- 6 解答：Pb 为 fcc 结构，原子半径 R 与点阵常数 a 的关系为 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ ，故可求得 $a = 0.4949 \times 10^{-6} \text{mm}$ 。则 (100) 平面的面积 $S = a^2 = 0.244926011 \times 10^{-12} \text{mm}^2$ ，每个 (100) 面上的原子个数为 2。

所以 1 mm^2 上的原子个数 $N = \frac{1}{S} = 4.08 \times 10^{12}$ 。

第二章 合金相结构

一、填空

- 1) 提高，降低，变差，变大。
- 2) (1) 晶体结构；(2) 元素之间电负性差；(3) 电子浓度；(4) 元素之间尺寸差别
- 3) 存在溶质原子偏聚 和短程有序。
- 4) 置换固溶体 和间隙固溶体。
- 5) 提高，降低，降低。
- 6) 溶质原子溶入点阵原子溶入溶剂点阵间隙中形成的固溶体，非金属原子与金属原子半径的比值大于 0.59 时形成的复杂结构的化合物。

二、 问答

1、解答： $\alpha\text{-Fe}$ 为 bcc 结构，致密度虽然较小，但是它的间隙数目多且分散，间隙半径很小，四面体间隙半径为 $0.291R_a$ ，即 $R = 0.0361 \text{nm}$ ，八面体间隙半径为 $0.154R_a$ ，即 $R = 0.0191 \text{nm}$ 。氢，氮，碳，硼由于与 $\alpha\text{-Fe}$ 的尺寸差别较大，在 $\alpha\text{-Fe}$ 中形成间隙固溶体，固溶度很小。 $\alpha\text{-Fe}$ 的八面体间隙的 [110] 方向 $R = 0.633 R_a$ ，间隙元素溶入时只引起一个方向上的点阵畸变，故多数处于 $\alpha\text{-Fe}$ 的八面体间隙中心。B 原子较大，有时以置换方式溶入 $\alpha\text{-Fe}$ 。

由于 $\gamma\text{-Fe}$ 为 fcc 结构，间隙数目少，间隙半径大，四面体间隙半径为 $0.225 R_a$ ，即 $R = 0.028 \text{nm}$ ，八面体间隙半径为 $0.414 R_a$ ，即 $R = 0.0522 \text{nm}$ 。氢，氮，碳，硼在 $\gamma\text{-Fe}$ 中也是形成间隙固溶体，其固溶度大于在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶度，氢，氮，碳，硼处于 $\gamma\text{-Fe}$ 的八面体间隙中心。

2、简答：异类原子之间的结合力大于同类原子之间结合力；合金成分符合一定化学式；低于临界温度（有序化温度）。

第三章 纯金属的凝固

1. 填空

1. 结构和能量。

$$r = \frac{-2\sigma T_m}{L_m \Delta T}, \quad \Delta G_k = \frac{16\pi}{3} \cdot \frac{\sigma^3 T_m^2}{(L_m \Delta T)^2}.$$

2 表面，体积自由能，

3 晶核长大时固液界面的过冷度。

4 减少，越大，细小。

5. 快速冷却。

二、问答

1 解答：__凝固的基本过程为形核和长大，形核需要能量和结构条件，形核和长大需要过冷度。细化晶粒的基本途径可以通过加大过冷度，加入形核剂，振动或搅拌。

2 解答：__根据金属结晶过程的形核和长大理论以及铸锭的散热过程，可以得出通常铸锭组织的特点为最外层为细小等轴晶，靠内为柱状晶，最内层为粗大等轴晶。

3 解答：__液态金属结晶时，均匀形核时临界晶核半径 r_k 与过冷度 ΔT 关系为

$$r = \frac{-2\sigma T_m}{L_m \Delta T}, \quad \Delta G_k = \frac{16\pi}{3} \cdot \frac{\sigma^3 T_m^2}{(L_m \Delta T)^2}.$$

临界形核功 ΔG_k 等于

$$\Delta G_k^* = \frac{2-3\cos\theta+\cos^3\theta}{4} \frac{16\pi}{3} \cdot \frac{\sigma^3 T_m^2}{(L_m \Delta T)^2} = \frac{2-3\cos\theta+\cos^3\theta}{4} \Delta G_k,$$

θ 为液相与非均匀形核核心的润湿角。

形核率与过冷度的关系为：
$$N = C \exp\left[-\left(\frac{\Delta G_A}{kT} + \frac{\Delta G_k}{kT}\right)\right]$$
，其中 N 为形核率， C 为常数， ΔG_A 、 ΔG_k 分别表示形核时原子扩散激活能和临界形核功。在通常工业凝固条件下形核率随过冷度增大而增大。

4 解答：__在金属凝固时，可以近似认为 $L_m = vH_m$ ，根据均匀形核时临界晶核半径 r_k 与过冷度 ΔT 关系为

$$r = \frac{-2\sigma T_m}{L_m \Delta T},$$

可以计算得到 $r = 0.79 \times 10^{-7} \text{cm} = 0.79 \text{nm}$ 。

5: 解答：__过冷是指金属结晶时实际结晶温度 T_n 比理论结晶温度 T_m 低的现象。过冷度 ΔT 指 T_m 与 T_n 的差值。动态过冷度指晶核长大时的过冷度。金属形核和长大都需要过冷，过冷度增大通常使形核半径、形核功减少，形核过程容易，形核率增加，晶粒细化。

- 6 解答：冷却速度极大影响金属凝固后的组织。冷却快一般过冷度大，使形核半径、形核功减少，形核过程容易，形核率增加，晶粒细化，冷却非常快时可以得到非晶，在一般工业条件下快速冷却可以得到亚稳相。

7、解答：纯金属凝固时

润湿角 $\theta = 0^\circ$ ，形核功为 0，固相粒子促进形核效果最好；

润湿角 $\theta = 180^\circ$ ，异质形核功等于均匀形核功，固相粒子对形核无促进作用；

润湿角 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ ，形核功比均匀形核的形核功小， θ 越小，固相粒子促进形核效果越好。

杂质颗粒的晶体结构与晶核相同或相近时，促进形核效果好，当两者结构不相同时，一般对促进形核效果差或不促进形核。

杂质粒子的表面成凹形时，促进形核效果好，成平面状时次之，凸形时最差。

第四章 二元合金相图与合金凝固

一、填空

- 成分
- 光滑界面,粗糙界面
- 垂直长大机制,二维平面长大,依靠晶体缺陷长大
- 枝晶, 均匀化退火
- 平直状, 树枝。
- 伪共晶。

$$k_0 + (1 - k_0) e^{-\frac{R\delta}{D}}$$

- 共晶, 熔晶, 偏析, 包析

- 0.0218%, 4.3%; P 和 Fe₃C; FCC, 间隙, 间隙固溶

体, BCC, 2.11%; 0.77, 珠光体和渗碳体; 4.3%; P+F, P+Fe₃C, Ld, A+Fe₃C, P+Fe₃C+Fe₃C_{II}, 液相, A, F, 6.69, 硬、脆, P。

2 问答

- 解答：1) 见图中标注。两相区由相邻的两个单相区所构成。水平线代表三相区，见 3) 中的恒温反应式。

- 稳定化合物为 δ 、 ϵ ，不稳定化合物为 β 、 γ 。

- 1455°C, L + $\delta - \epsilon$, 包晶反应;

1387°C, L - ϵ + Ni, 共晶反应;

1135°C, L + $\delta - \gamma$, 包晶反应;

855°C, L + $\gamma - \beta$, 包晶反应;

640°C, L - Al + β , 共晶反应;

4) Ni 30%(重量)的合金在平衡冷却时的相变过程: $L - \gamma$; 855°C , $L + \gamma - \beta$, 包晶反应; $L - \beta$; 640°C , $L - \text{Al} + \beta$, 共晶反应;

室温下相组成为 $\text{Al} + \beta$,
$$\text{Al}\% = \frac{42 - 30}{42} \times 100\% = 28.6\%$$
, $\beta = 1 - \text{Al}\% = 71.4\%$ 。

室温下组织组成为 $\beta + (\text{Al} + \beta)_{\text{共晶}}$,
$$\beta\% = \frac{30 - 0.05}{42 - 0.05} \times 100\% = 71.4\%$$
, $(\text{Al} + \beta)_{\text{共晶}} = 1 - \beta\% = 28.6\%$ 。

5) 含 Ni 89% (重量) 的 Ni-Al 合金其平衡凝固时室温组织为 Ni 和 Ni 中析出的 ε , 非平衡凝固后会出现非平衡共晶组织, 即为 Ni 和少量的 1387°C 反应生成的 $L - (\varepsilon + \text{Ni})_{\text{共晶}}$ 。

6) X 合金平衡凝固完毕时的组织 α 初晶占 80%, 则 $(\alpha + \beta)_{\text{共晶}} = 20\%$, 设此合金中 Ni 组元的含量是 X,

$$80\% = \frac{0.05 - X}{0.05} \times 100\%$$
, 可以求得 $X = 0.01\%$ 。

7) 1500e 时 Al-Ni 合金系的自由能—成分曲线示意图如图。

2 解答: 1) α 相晶体结构与 Cu 的结构保持一致, 为 fcc 结构;

$$k_0 = \frac{C_s}{C_L} = \frac{60.9}{99.3} = 0.61$$

2) 共晶反应前的平衡分配系数 ;

3) Cu-13.47%Sn 合金在正常条件下凝固后, 由于固相平均成分线相对于固相线下移, 在合金凝固过程中剩余少量液相出现非平衡结晶, 发生包晶反应而出现少量 β 相。这些少量 β 相可以通过均匀化退火消除。

4) Cu-70%Sn 合金平衡凝固过程为 $L - \varepsilon$, $L_{92.4} + \varepsilon_{38.2} - \eta_{59.0}$, $L - \eta$, $L_{99.3} - \eta_{60.9} + (\text{Sn})$, $\eta - \eta'$

共晶反应刚完毕时相组成物为 $\eta + (\text{Sn})$, 组织组成物为 $\eta + (\eta + \text{Sn})_{\text{共晶}}$ 。

相组成物的相对含量为:
$$\eta\% = \frac{100 - 70}{100 - 60.9} \times 100\% = 76.7\%, (\text{Sn}) = 1 - \eta\% = 23.3\%$$

和组织组成物的相对含量:
$$\eta\% = \frac{99.3 - 70}{99.3 - 60.9} \times 100\% = 76.3\%, (\eta + \text{Sn})_{\text{共晶}}\% = 1 - \eta\% = 23.7\%$$
。

5) 合金在 450°C 时各相自由能---成分曲线示意图如图所示。

3 解答: 1) 相区填写如图所示。相图中各等温反应如下:

935°C : $L + \beta (\text{Y}) - \varepsilon$; 780°C : $L + \varepsilon - \delta$; 776°C : $\beta (\text{Y}) - \varepsilon + \alpha (\text{Y})$;

635°C : $L + \varepsilon - \gamma$; 557°C : $L - (\text{Mg}) + \gamma$ 。

Y=5%wt 时的合金 K 在室温时的平衡组织为 (Mg) 固溶体。

2) Mg 为 hcp 结构, 因为 $r=a/2$, 一个 hcp 晶胞中有 6 个原子, 设 $c/a = \sqrt{8/3}$, 则致密度

$$\rho = \frac{V_{\text{atom}}}{V_{\text{cell}}} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{(6 \times \frac{1}{2} a \times \frac{\sqrt{3}}{2} a) c} = 0.74$$

为

3) 提高合金 K 强度的可能方法有细化晶粒, 加工硬化。

4) Y=10%wt 之合金可能的强化方法有细化晶粒, 加工硬化和固溶时效。

4 解答: 相同点: 均需要形核与长大, 形核要满足一定热力学条件, 形成一定临界晶核半径, 即需要能量起伏和结构起伏。

不同点: 固溶体合金形核除需要能量起伏和结构起伏外, 还需要成分起伏, 非平衡结晶时产生偏析, 一般会产生成分过冷, 凝固过程是在一个温度区间进行, 而纯金属凝固在等温进行。

5 解答: 1) Fe_3C_{II} 含量最多的合金、珠光体含量最多的合金、莱氏体含量最多的合金的合金成分分别为含碳量 2.11%, 0.77%, 4.3%。

2) 二元系中比较适合做变形合金和合金为单相固溶体, 适合作为铸造合金的成分范围为含有较多共晶体的合金。故在含碳量小于 2.11% 的合金可以经过加热得到单相合金适合作为变形合金, 含碳量大于 4.3% 的合金有共晶反应适合作为铸造合金。

3) 提高压力加工合金的强度的方法主要有加工硬化, 合金元素固溶产生的固溶强化, 细化晶粒强化, 热处理强化, 第二相强化, 弥散质点的弥散强化。

4) 平衡反应的成分及温度, 反应式为

1495°C, $\text{L}_{0.53} + \delta_{0.09} \rightarrow \text{A}_{0.17}$, 包晶反应;

1148°C, $\text{L}_{4.3} \rightarrow \text{A}_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C}$, 共晶反应;

727°C, $\text{A}_{0.77} \rightarrow \text{F}_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C}$, 共析反应;

5) 凝固过程: 935°C: $\text{L} \rightarrow \gamma$, $\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{II}$, $\gamma \rightarrow \text{F} + \text{Fe}_3\text{C}_{II}$ (P)

室温下相组成为 $\text{F} + \text{Fe}_3\text{C}_{II}$, 其中

$$F\% = \frac{6.63-1}{6.63-0.0008} \times 100\% = 84.9\%, \text{Fe}_3\text{C}\% = 1 - F\% = 15.1\% ; \text{室温下组织组成为 P}$$

$$+ \text{Fe}_3\text{C}_{II}, \text{其中 } F\% = \frac{6.69-1}{6.69-0.77} = 98.1\%, \text{Fe}_3\text{C}_{II}\% = 1 - P\% = 1.9\%.$$

6) 亚稳转变后组织为 $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{II}$, 淬火冷却后 C 在 Fe 中形成过饱和固溶体 (马氏体相变)。

7) 三种钢在给定温度下的显微组织如表。

8) 1200℃时各相的自由能---成分曲线示意图如图。

6: 解答: 1) II 合金的平衡冷却曲线和组织如图; 室温下相组成物为 $\alpha + \beta$, 其中

$\alpha\% = \frac{90-80}{90-5} \times 100\% = 11.8\%$, $\beta = 1 - \alpha\% = 88.2\%$, 组织组成为 $\beta + (\alpha + \beta)$ 共晶,

$\beta\% = \frac{80-50}{90-50} \times 100\% = 75\%$, $(\alpha + \beta) \text{ 共晶}\% = 1 - \beta\% = 25\%$;

2) I 合金在平衡凝固时室温组织为 $\alpha + \beta$ II, 工业条件冷却时出现少量非平衡共晶组织, 室温组织为 $\alpha + \beta$ II + 少量 $(\alpha + \beta)$ 共晶。

3) 可以根据相图估计, 在共晶温度下尽可能高的温度进行退火。

7: 解答: 1) 金属固液界面的微观结构为粗糙界面, 长大机制为垂直长大方式, 在正温度梯度下固液界面保持平直, 在负温度梯度下成长时固/液界面不稳定, 结晶后容易长成树枝状晶。

8: 解答: 1) 相区填充如图;

2) 设 X 合金中 Bi 组元的含量是 x, 依题意有 $80\% = \frac{100-x}{100-41.8} \times 100\%$, 可以解得 $x = 53.44$, 即 Bi 组元的含量是 53.44%。

3) 设 Y 合金中 Bi 组元的含量是 y, 依题意有共晶含量 $50\% = \frac{100-y}{100-56.1} \times 100\%$, 可以解得 $y = 78.15$, 即 Pb 组元的含量是 21.85%。

4) Pb-30%Bi 合金平衡凝固过程为 $L \rightarrow \alpha$, $L + \alpha \rightarrow \beta$, $L \rightarrow \beta$, $\beta \rightarrow \text{Bi}$, 室温下平衡组织为 $\beta + \text{Bi}$, 非平衡凝固下由于 $L + \alpha \rightarrow \beta$ 包晶反应很难进行完全, 故在 β 晶粒内部会保留部分 α , 室温下组织为 $\beta + \text{残留 } \alpha + \text{Bi}$ 。

第五章 三元合金相图

1 解答: 0.8%C 的 Fe-C-Si 三元合金在平衡冷却时的相变过程为 $L \rightarrow \alpha$, $L + \alpha \rightarrow \gamma$, $L \rightarrow \gamma$, 1100℃时的平衡组织为 γ 。

2 解答: 1) Cu-30%Zn-10%Al 合金的成分点见图中 X 点。

2) Cu-20%Zn-8%Al 合金, 位于 $\alpha + \gamma$ 两相区边界线上, 由 $\alpha + \gamma$ 两相组成。Cu-25Zn-6Al

合金位于 $\alpha + \beta' + \gamma$ 的三相区中, 由 $\alpha + \beta' + \gamma$ 的三相区组成, 可以从图中读出各相成分点:

α : Cu-22.6Zn-3.45Al, γ : Cu-18Zn-11.5Al, β : Cu-30Zn-4Al

故 Cu-20Zn-8Al 合金中 $\alpha\% = \frac{11.5-8}{11.5-3.45} \times 100\% = 43.50\%$
 $\gamma\% = 1 - \alpha\% = 56.5\%$

Cu-25Zn-6Al 合金中 $\beta' = \frac{25-20}{30-20} \times 100\% = 50\%$

$\alpha\% = (1 - \beta') \times 43.5\% = 21.75\%$, $\gamma\% = (1 - \beta') \times 56.5\% = 28.25\%$

3) Y 合金凝固过程: $L - \alpha$, $L - \alpha + \beta$, $\beta - \alpha$

3 解答: 1) $P^{tP'}$: $L + \alpha - \beta$

$E_1^{P'}$: $L - \beta + \gamma$

$E_2^{P'}$: $L - \alpha + \gamma$

2) $L + \alpha - \beta + \gamma$

3) O 合金凝固过程: $L - \alpha$, $L + \alpha - \beta$, $L + \alpha - \beta + \gamma$, α , β , γ 同析。

4 解答: $e^1 - 1085^\circ\text{C}$: $L \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \gamma$; $P^1 - 1335^\circ\text{C}$: $L + \alpha - \gamma$; $\gamma^2 - 1380^\circ\text{C}$: $L + \text{Fe}_3\text{W}_2 - \alpha$

1700°C $L + \text{WC} + \text{W} - \eta$

1200°C $L + \eta - \gamma + \text{WC}$

1085°C $L - \gamma + \text{Fe}_3\text{C} + \text{WC}$

5 解答：1) 2Cr13.不锈钢的淬火加热在 γ 相区，从图上估计为 $1050^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$ ；

2) 2%C, 13%Cr 刚的平衡凝固过程为： $L - \gamma, L - \gamma + C^1$ ；

$\gamma \rightarrow \alpha + C^3 (P)$ ； $\alpha \rightarrow C^3$ ；室温下组织为 $C^1 + P$ 。

3) 1 区的三相反应是： $L + \delta - \gamma$

795°C 的四相平衡的反应式： $\gamma + C^1 - \alpha + C^3$

6 解答：IV 区合金凝固过程为： $L - \alpha, L - \alpha + \beta$ ， $\alpha - \beta$ 互析；

VI 区合金凝固过程为： $L - \alpha, L - \alpha + \beta$ ， $L - \alpha + \beta + \gamma$ ，随后 α ， β ， γ 同析；

四相反应式为： $L - \alpha + \beta + \gamma$

7 解答：四相反应式为 137.4°C 时 P 点： $L_p + \alpha^1 - \beta^1 + \delta^1$

99.5°C 时 E 点 $L_E - \beta_2 + \delta_2 + \gamma$

三元系初晶面有 δ 、 α 、 β 、 γ 的四个初晶面；

2) 三元合金中合金 1 的结晶过程为： $L - \gamma$ ， $L - \gamma + \delta + \beta$ ；

合金 2 的结晶过程为： $L - \delta$ ， $L - \delta + \beta$ ， $L - \gamma + \delta + \beta$ ；

合金 3 的结晶过程为： $L - \alpha$ ， $L - \delta + \alpha$ ， $L + \alpha - \beta + \delta$ ；

合金 4 的结晶过程为： $L - \alpha$ ， $L + \alpha - \beta + \delta$ 。

3) 由题意分析可知改合金成分位于 γ (Bi) 与 E 点的连线上，设其 Bi 含量为 x ，

故有 $50\% = \frac{100 - x}{100 - 55} \times 100\%$ ，故 Bi 含量为 77.5%，

即 $Pb\% + Sn\% = 22.5\%$ 。由于成分线过 Bi 的顶点，故所求合金中 $\frac{Pb\%}{Sn\%} = \frac{18}{27}$
可求得 $Pb\% = 9\%$ ， $Sn = 13.5\%$ 。