

## 第 10 章 固态转变习题

1. 由内耗法测出  $\text{Fe}_3\text{C}$  在  $\alpha\text{-Fe}$  中的平衡溶解度为

$$C = 0.736 \exp\left(\frac{-4850}{T}\right)$$

其中  $T(\text{K})$  为温度。求在 627  $\text{Fe}_3\text{C}$  的颗粒半径为 10nm、100nm 以及 1000nm 时它在  $\alpha\text{-Fe}$  中的溶解度。问颗粒的曲率半径多大才对溶解度有实质性的影响。 $\alpha/\text{Fe}_3\text{C}$  的界面能为  $0.71\text{J/m}^2$ ， $\text{Fe}_3\text{C}$  的摩尔体积为  $23.4\text{cm}^3/\text{mol}$ 。

2. 纯金属多形性转变  $\alpha \rightarrow \beta$  在某一过冷度下两相体积吉布斯自由能差为  $7 \times 10^5 \text{kJ/m}^3$ ， $\alpha/\beta$  界面能为  $0.6\text{J/m}^2$ 。若忽略形核的应变能，求形成球状、立方体以及直径( $D$ )和厚度( $t$ )比( $D/t$ )为 20 的圆盘状核心的临界核心尺寸和临界核心形成功。

3. 导出二元合金中母相  $\alpha$  和析出相  $\beta$  均为理想溶体以及规则溶体的相变总驱动力和形核驱动力 (以  $\text{J/mol}$  表示)。设原始成分为  $x_0$ ，在脱溶温度  $\alpha$  相平衡成分为  $x_\alpha$ ，脱溶物核心成分和  $\beta$  相平衡成分近似相等为  $x_\beta$ ，交互作用系数为  $\Omega$ 。

4. 本题讨论符号和上题相同，现讨论  $\alpha$  和  $\beta$  均为理想溶体的情况。在 600K， $x_0=0.1$ ， $x_\alpha=0.02$ ， $x_\beta=0.95$ ， $\alpha/\beta$  界面能为  $0.5\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ，两相偏摩尔体积同为  $10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

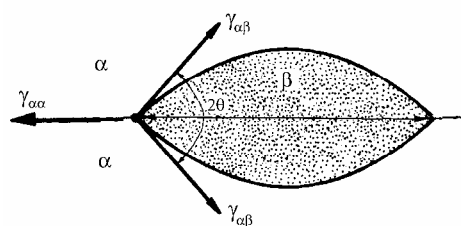
- (1)求相变总驱动力和形核驱动力（以单位体积的吉布斯自由能表示）
- (2)求均匀形核的临界核心尺寸（球状）。
- (3)脱溶后，脱溶粒子间距为 50nm，问粒子平均半径为临界核心半径  $r^*$  的多少倍？
- (4)转变前后总吉布斯自由能降低多少？还有多少以界面能形式保留下来？

5. Al-Mg 置换固溶体，估计溶质原子 Mg 产生的错配应变能，以  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$  和 eV/原子表达。说明你估算时所用的假设。Al 的原子半径为 0.143nm、切变模量  $G=2.5 \times 10^{10}\text{Pa}$ ，Mg 的  $a$  轴长 0.32nm。

6. 设母相和析出相的切变模量  $G$  相同，母相是各向同性连续介质。若形成共格的核心，导出球状和圆盘状核心长大丧失共格时的尺寸的表达式。

7. Al-Ag 和 Al-Cu 合金中，从以 Al 为基的固溶体中分别析出富 Ag 和富 Cu 的析出物。Al、Ag 和 Cu 的原子半径为 1.43nm、1.44nm 和 1.28nm。若简单地由原子半径估计错配度  $\delta$ ，并简单地认为析出物的非共格界面能为  $0.5\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ，共格界面能为  $0.05\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。Al 的切变模量  $G=2.6 \times 10^{10}\text{Pa}$ ，又设析出物的切变模量和 Al 的相同，估计这两种析出物丧失共格的尺寸。

8.  $\alpha$  为母相， $\beta$  为析出相， $\alpha/\beta$  界面能为  $0.5\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ， $\alpha/\alpha$  界面能为  $0.6\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。
- (1) 求  $\beta$  相在  $\alpha$  相界面上形核（双球冠状）的接触角  $\theta$  以及在界面上形核的  $f(\theta)$  因子。
  - (2) 利用第 4 题中数据的结果，设  $\alpha$  相界面厚度  $\delta$  和晶粒直径  $D$  之比  $\delta/D=10^{-5}$ ，求  $\ln(I_2/I_3)$ 。（ $I_2$  和  $I_3$  分别为在界面和在晶粒内形核的形核率）



9.  $\gamma$ 相晶粒直径为 1mm，晶界厚度为 1nm，在 1000K 析出  $\alpha$ 相， $\gamma/\alpha$ 非共格界面能为  $0.5\text{J/m}^2$ ，共格界面能  $0.05\text{J/m}^2$ ， $\alpha$ 相在 $\gamma$ 晶界上接触角为  $60^\circ$ ，形核驱动力  $\Delta G_1^\gamma = 5 \times 10^8 \text{J/m}^3$ ， $\alpha$ 和 $\gamma$ 相的摩尔体积约为  $10^{-5} \text{m}^3$ 。问若在晶内以共格圆盘状（直径  $D$  和厚度  $t$  之比  $D/t=10$ ）均匀形核以及在晶界上非均匀形核（双球冠状，界面都是非共格），哪一种情况的形核率大？

10. 利用第 4 题的结果，设母相（fcc 结构）的  $G=5 \times 10^{10} \text{Pa}$ ， $\nu=0.3$ ，最近邻原子间距 0.14nm。若在刃位错上形核，如果简单地假设核心是圆柱状，长度为直径的两倍，又设位错密度为  $10^6 \text{cm}^{-2}$ （简单地认为都是刃位错），位错线上每原子面包含 10 个原子，大约估计  $\ln(I_{\text{位错}}/I_{\text{均匀}})$ ，求核心临界直径。

11. 纯铁发生  $\gamma \rightarrow \alpha$  多形性转变，界面是非共格的，估计在 1150K 以及 900K 时  $\alpha$ -Fe 界面迁移速度。晶界扩散激活能近似为  $120 \text{kJ/mol}$ ，原子间距  $\approx 0.248 \text{nm}$ 。

$$\Delta G^{\alpha \rightarrow \gamma} = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (\text{J/mol})$$

其中系数:

温度范围/K	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
740 < <i>T</i> 860	-269693	1294.373	-2.288242	$1.7794 \times 10^{-3}$	$-5.156663 \times 10^{-7}$
860 < <i>T</i> 940	5442896	-24104.31	40.02958	$-2.953537 \times 10^{-2}$	$8.167968 \times 10^{-6}$
940 < <i>T</i> 1080	243631.7	-932.2832	1.350039	$-8.736977 \times 10^{-4}$	$2.126265 \times 10^{-7}$
1080 < <i>T</i> 1240	587297	-1967.562	2.473726	$-1.382798 \times 10^{-3}$	$2.898708 \times 10^{-7}$

12.  $w(C)=0.25\%$  的 Fe-C 合金， $\gamma$  相在  $800^{\circ}\text{C}$  保温析出  $\alpha$  相， $\alpha$  相只在  $\gamma$  相的晶界形核，很快形核位置饱和，即  $\alpha$  铺满了所有  $\gamma$  相的晶界，再增厚长大。 $\alpha/\gamma$  界面是非共格界面， $\gamma$  相的晶粒直径为  $0.04\text{mm}$ ，平衡成分为  $C(\gamma)=0.32\%$ ； $C(\alpha)=0.02\%$ 。在  $800^{\circ}\text{C}$  时，碳在  $\gamma\text{-Fe}$  中的扩散系数为  $1.34 \times 10^{-8}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ， $\alpha$  长大时以  $\gamma$  相中浓度梯度为线性近似，求平衡时  $\alpha$  相的厚度以及达到平衡时的时间（忽略形核饱和的时间）。

13. 锰在 282°C 时  $\beta \rightarrow \alpha$  等温转变的转变量摩尔分数  $x$  和转变时间的关系如下所列

$x$	0.04	0.18	0.49	0.89
$t/s$	1260	2000	2820	3900

假设转变动力学服从 Avrami 关系，求出其中指数  $n$ ，并推断可能的形核及长大的方式。

14. 当转变时间很短时，Avrami 方程可作怎样的简化？

(1) 若形核都是在晶粒角上，并且假设晶核都是在转变开始瞬间形成，形核位置饱和，核心以恒速长大，以简单的模型，利用 Avrami 简化式子，证明指数  $n=3$ 。

(2) 若在晶界形核，并且假设晶核都是在转变开始瞬间形成，形核位置饱和，核心以恒速长大，以简单的模型，利用 Avrami 简化式子，证明指数  $n=1$ 。

15. A-B 二元系相图如图下所示，在 500K 发生  $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$  共析转变。设共析长大是由体积扩散控制的，求共析片层间距及共析体的长大速度。共析转变的熵变  $\Delta S = 10^5 \text{ J/m}^3$ ， $\alpha/\beta$  界面能  $0.5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ ，扩散系数  $D = 5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。

16. A-B 二元系，富 B 的  $\beta$  相颗粒分布在  $\alpha$  相中，颗粒尺寸不均匀，平均半径为  $0.1\mu\text{m}$ 。 $\alpha/\beta$  界面能为  $0.5\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ，在  $1000\text{K}$ ，在  $\alpha$  相中扩散系数为  $10^{-11}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ，两相的摩尔体积近似为  $2\times 10^{-7}\text{m}^3$ ，在  $1000\text{K}$ ， $\alpha$  相和  $\beta$  相的平衡浓度分别为 2% 和 90%。
- (1) 在此时，半径为  $0.05\mu\text{m}$  及  $1.5\mu\text{m}$  的颗粒的界面移动速度是多大？
- (2) 求平均半径从  $0.1\mu\text{m}$  长大到  $0.3\mu\text{m}$  所需要的时间？

17. A-B 二元系固态完全互溶（ $\alpha$  相），并存在溶解度间隙，间隙的  $T_c=800\text{K}$ 。在  $550\text{K}$  的摩尔分数  $x_B=0.4$  时，自由能-成分曲线  $d^2G/dx^2 = -95.32\text{J}$ ，测得在该成分下  $D_A^{AB}=9\times 10^{-12}\text{cm}^2/\text{s}$ ， $D_B^{AB}=2\times 10^{-12}\text{cm}^2/\text{s}$ 。若调幅分解的  $\lambda_m=100\text{nm}$ ，问以多大的冷却速度从高温  $850\text{K}$  冷却下来才可以避免在  $550\text{K}$  发生调幅分解？