

# 华中科技大学

## 二〇〇五年招收硕士研究生入学考试试题答案

考试科目：材料成形原理

适用专业：材料加工工程

### A 卷

#### 一、名词解释

1. 非均质形核——依靠外来夹杂或型壁界面所提供的异质界面非自发地形核，称为异质形核，或非均质形核。
2. 成分过冷——由固—液界面前方溶质的再分配引起的过冷。
3. 定向凝固——又称定向结晶，是使金属或合金在熔体中定向生长晶体的一种工艺方法。
4. 反应性气孔——金属液和铸型之间或在金属液内部发生化学反应所产生的气孔，称为反应性气孔。
5. 带状偏析——在铸锭或厚壁铸件中出现的和凝固液出界面相平行的偏析，有时是连续出现，有时则是间断的。

#### 二、简述题

1. 影响液态金属界面张力的主要因素是什么？

影响液态金属界面张力的主要因素是：(1)金属的熔点，金属的熔点、沸点越高，则表面张力往往就越大；(2)温度，大多数金属和合金的表面张力随温度升高而降低，但对铸铁、碳钢、铜及其合金则相反。(3)溶质元素，表明活性元素降低界面张力，非表明活性元素增加表面张力、

2. 单相合金平面生长的条件是什么？

单相合金平面生长的条件是：
$$\frac{G_L}{v} \geq \frac{m_L C_0 (1 - k_0)}{D_L k_0}$$

3. 防止凝固组织产生缩孔缩松的途径主要有哪几种？

防止凝固组织产生缩孔缩松的途径主要有：(1)定向凝固或同时凝固；(2)调整浇注温度和浇注速度；(3)冒口、补贴和冷铁的应用；(4)加压补缩。

4. 为什么使用碱性焊条比酸性焊条对工件表面铁锈 ( $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) 更敏感？

碱性焊条属低氢型焊条，这类焊条的熔渣不具备氧化性，一旦有氢侵入熔池，将很难

脱出，而酸性焊条的熔渣有一定的氧化性，可以起脱氢的作用。因此，碱性焊条比酸性焊条对工件表面铁锈 ( $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) 更敏感

5. 如何消除焊件内部的残余应力？

可采用热处理、锤击和振动等方法消除焊件内部的残余应力

6. 熔焊接头和钎焊接头在连接机理上有何区别？

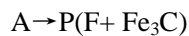
熔焊接头与钎焊接头均采用热能实现不可拆卸的焊接接头，但钎焊时仅钎料熔化，而母材不熔化，在连接处一般不易形成共同的晶粒，只是依靠液态钎料润湿母材表面，二者相互扩散而形成钎焊接头

7. 焊接工艺参数（有效热功率  $q$  和焊接速度  $v$ ）对低碳钢薄板焊接（平对接焊缝）的温度场有何影响？

当热源的有效热功率  $q$  一定时，焊接速度  $v$  越大，某一温度的等温线所包围的范围显著缩小；当焊接速度  $v$  一定，随  $q$  的增大，一定温度的等温线所包围的范围显著增大；当  $q/v$  保持一定，即线能量  $E$  为常数时，同时增大  $q$  和  $v$ ，此时等温线在热源移动方向会伸长，而在宽度方向变化较小。

8. 低碳钢焊缝的室温组织是什么？（5 分）

低碳钢焊缝碳含量较低，高温奥氏体固态相变后得到铁素体加珠光体组织。固态相变时首先沿奥氏体晶界析出共析铁素体，然后发生共析反应



式中的 A 是奥氏体；P 是珠光体；F 是铁素体； $\text{Fe}_3\text{C}$  是渗碳体。焊缝金属过热时，还会出现魏氏组织，即铁素体在奥氏体晶界呈网状析出，或在奥氏体晶内沿一定方向析出的呈长短不一的针状或片条状脆性组织。

三、何谓一阶张量？何谓二阶张量？

① - 阶张量  $u$ ，有三个分量，分量随坐标系变换的规律为

$$u'_i = Q_{ij} u_j, \quad u_i = Q_{ji} u'_j$$

式中， $u'_i$  和  $u_i$  分别是一阶张量  $u$  在新、旧坐标系中的分量，而  $\{Q_{ij}\}$  是坐标变换矩阵。

②二阶张量 $T$ , 它有9个分量, 分量随坐标系变换的规律为

$$T'_{ij} = a_{im} a_{jn} T_{mn}, \quad T_{ij} = a_{ni} a_{mj} T'_{mn}$$

式中,  $T'_{ij}$  和  $T_{ij}$  分别是二阶张量 $T$ 在新、旧坐标系中的分量。

四、何谓塑性指标, 它是否具有普遍与绝对的意义?

为了衡量材料塑性的好坏, 需要有一种数量上的指标, 称为塑性指标。塑性指标用材料开始破坏时的塑性变形量来表示, 借助于各种试验方法来测定。

由于各种试验方法都是相对于特定的受力状态和变形条件的, 由此所测定的塑性指标仅具有相对的和比较的意义。它们说明, 在某种受力状态和变形条件下, 哪种金属的塑性好, 哪种金属的塑性低, 或者对于同一种金属, 在哪种变形条件下塑性好, 而在哪种变形条件下塑性低。

五、试写出计算摩擦应力的两个常用公式。

在金属的塑性加工中，计算摩擦应力的二个常用公式是：

① 库伦摩擦定律，接触面上的摩擦应力  $\tau_f$  为

$$\tau_f = \mu \sigma_n$$

式中， $\mu$  是库伦摩擦系数， $\sigma_n$  是作用在质点上的法向应力。

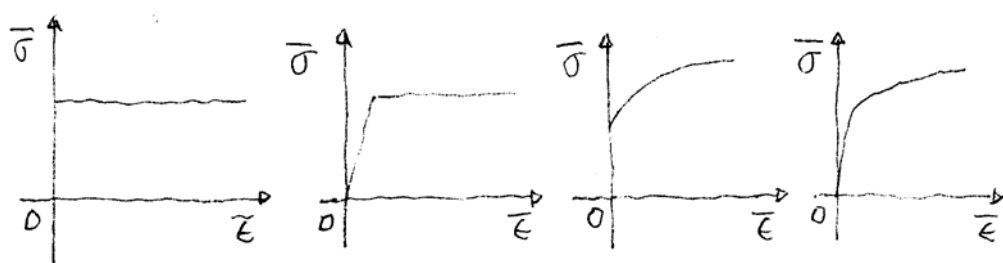
② 常摩擦力条件，接触面上的摩擦应力  $\tau_f$  为

$$\tau_f = mK = m\sigma_s/\sqrt{3}$$

式中， $m$  是摩擦因子， $K$  是剪切屈服应力。

六、在金属塑性加工的理论分析中，常将实际的金属材料分成哪几种材料模型？并画出对应的真实应力—应变曲线的示意图。

在金属塑性加工的理论分析中，常将实际的金属材料分成四种材料模型：理想刚塑性、理想弹塑性、硬化刚塑性及硬化弹塑性。它们的真实应力—应变曲线分别表示如下：



1)理想刚塑性 2)理想弹塑性 3)硬化刚塑性 4)硬化弹塑性

B 卷  
焊 接  
(分析计算题)

第一题  
答题关键点：

设， $C_d$ 为合金元素在熔敷金属中的含量； $C_e$ 为合金元素的原始含量； $C_{ew}$ 为合金元素在焊丝中的含量； $C_{co}$ 为合金元素在药皮中的含量； $K_b$ 为焊条药皮的质量系数，即单位长度焊条中药皮质量与焊芯质量之比。过渡系数为：

$$\eta = \frac{C_d}{C_e} = \frac{C_d}{C_{cw} + K_b C_{co}}$$

若考虑合金元素在焊接中的损失，则焊缝金属中某合金元素的实际浓度  $C_w$  为

$$C_w = \theta \cdot C_b + (1 - \theta) C_d$$

$\theta$ 为熔合比， $C_b$ 为某元素在母材中的质量分数， $C_d$ 为熔敷金属(即真正过渡到熔池中去的那部分焊条金属)中某元素的质量分数。

$$0.2 \times 1.5\% + (1-0.2) \times C_d \geq 12\%$$

$$C_d \geq 14.6\%$$

$$0.8 \times (C_{cw} + 0.4 \times C_{co}) = C_d$$

$$C_{co} \geq 23.2\%$$

含 Mn 量为 75%的锰铁合金粉的量  $\geq (23.2\%) / (75\%) = 31\%$

第二题

答题关键点：

合金化的目的首先是为了补偿在高温下金属由于蒸发或氧化等造成的损失。其次是为了消除缺陷，改善焊缝金属的组织与性能，或为了获得具有特殊性能堆焊金属。如用堆焊的方法过渡 Cr、Mo、W、Mn 等合金元素，使工件表面具有耐磨性、热硬性、耐热和耐蚀等性能。

常用的合金化方式有：

- (1)通过合金焊丝或带极，把所需的合金元素加入焊丝或带极内。
- (2)通过药芯焊丝或药皮(或焊剂)，把所需合金元素以铁合金或纯金属的形式加入药芯焊丝的药芯内或焊条药皮(或焊剂)内。
- (3)通过合金粉末，将合金元素按比例配制成具有一定粒度的合金粉末，把它送入焊接区或直接涂敷在焊件表面。

此外，还可以通过从金属氧化物中还原金属的方式(如锰、硅的还原反应)来合金化，但这种合金化的程度有限，并还会造成焊缝的增氧。

第三题

答题关键点：

16Mn 为不易淬火的低合金钢。HAZ 分为四个区。

(1) 熔合区，是焊缝与母材相邻的部位，最高温度处于固相线与液相线之间。所以又称为半熔化区。此区虽然较窄、但是，由于晶界与晶内局部熔化，成分与组织不均匀分布，过热严重，塑性差，所以是焊接接头的薄弱环节。

(2) 过热区，过热区的温度范围处于固相线到 1100℃左右。由于加热温度高，奥氏体过热，晶粒严重长大，故又称之为粗晶区。焊后冷却时，奥氏体相变产物也因晶粒粗化使塑性、韧性下降，慢冷时还会出现魏氏组织。过热区也是焊接接头的薄弱环节。

(3) 相变重结晶区(正火区)，该区母材已完全 A 化，该区处于 1100℃—Ac3(约 900℃)之间。由于奥氏体晶粒细小，空冷后得到晶粒细小而均匀的珠光体和铁素体，相当于热处理时的正火组织。因此，其塑性和韧性很好。

(4) 不完全重结晶区，Ac<sub>1</sub>—Ac<sub>3</sub>范围内的HAZ属于不完全重结晶区。由于部分母材组织发生相变重结晶F+P→A，且奥氏体晶粒细小，冷却转变后得到细小的F+P，而未奥氏体化的F受热后长大，使该晶粒大小、组织分布不均匀，虽然受热不严重但性能不如相变重结晶区。

第四题

答题关键点：

氢的影响主要体现在 4 个方面，即：氢脆、白点、气孔和冷裂纹。  
减少氢含量的主要措施有：限制氢的来源、冶金处理脱氢、控制熔池存在的时间和冷却速度、焊后加热工件脱氢。

## C 卷(75 分)

### 金属塑性成形力学

第一题:

$$\text{证: } \sigma_x - \sigma_y = (\sigma_x' + \sigma_m) - (\sigma_y' + \sigma_m) = \sigma_x' - \sigma_y'$$

$$\text{同理} \quad \sigma_y - \sigma_z = \sigma_y' - \sigma_z', \quad \sigma_z - \sigma_x = \sigma_z' - \sigma_x'$$

于是有

$$\begin{aligned} & (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \\ &= (\sigma_x' - \sigma_y')^2 + (\sigma_y' - \sigma_z')^2 + (\sigma_z' - \sigma_x')^2 \\ &= 2\sigma_x'^2 + 2\sigma_y'^2 + 2\sigma_z'^2 - 2\sigma_x'\sigma_y' - 2\sigma_y'\sigma_z' - 2\sigma_z'\sigma_x' \\ &= 3\sigma_x'^2 + 3\sigma_y'^2 + 3\sigma_z'^2 - \sigma_x'(\sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z') \\ &\quad - \sigma_y'(\sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z') - \sigma_z'(\sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z') \\ &= 3\sigma_x'^2 + 3\sigma_y'^2 + 3\sigma_z'^2 \end{aligned}$$

由 $\bar{\sigma}$ 的定义式及上式可得

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}^2 &= \frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \\ &\quad + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \} \\ &= \frac{1}{2} \{ 3(\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + \sigma_z'^2) + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \} \\ &= \frac{3}{2} \{ \sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + \sigma_z'^2 + 2(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \} \\ &= \frac{3}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}' \end{aligned}$$

$$\text{故} \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}'} \quad \text{证毕}$$

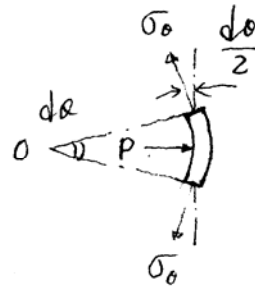
第二题:

解: (1) 圆筒:

沿径向的静力平衡方程

式为

$$p r d\theta - 2 \sigma_{\theta} t \sin \frac{d\theta}{2} = 0$$



设  $\sigma_{\theta} = \frac{r}{t} p$

沿轴向的静力平衡方程式为

$$\sigma_z 2\pi r t - p \pi r^2 = 0$$

设  $\sigma_z = \frac{r}{2t} p = \frac{1}{2} \sigma_{\theta}$

$$\bar{\sigma}^{(1)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + \sigma_z^2}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{\theta}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{\theta}^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_{\theta} = \frac{\sqrt{3} r}{2 t} p$$

半球面:

沿径向的静力平衡方程式为

$$p (r d\theta)^2 - 4 \sigma_{\theta} (r d\theta) t \sin \frac{d\theta}{2} = 0$$

设  $\sigma_{\theta} = \frac{r}{2t} p$

即  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{\theta}, \sigma_3 = \sigma_r = 0$



$$\begin{aligned}\bar{\sigma}^{(2)} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ &\approx \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1^2} = \sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{r}{2t} p < \bar{\sigma}^{(1)}\end{aligned}$$

因此, 圆筒先屈服。这时,  $p = 2t\sigma_s / \sqrt{3}r$ 。

(2) 由  $\dot{W} = \sigma_s \dot{\varepsilon} = C$ , 可设

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C}{\sigma_s}$$

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_\theta + \frac{1}{2}\sigma_\theta) \\ &= \frac{1}{2}\sigma_\theta = \sigma_z\end{aligned}$$

于是有

$$\sigma_r' = \sigma_r - \sigma_m = -\frac{1}{2}\sigma_\theta$$

$$\sigma_\theta' = \sigma_\theta - \sigma_m = \frac{1}{2}\sigma_\theta$$

及

$$\sigma_z' = \sigma_z - \sigma_m = 0$$

$$\text{又} \quad \sigma^{(1)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_0 = \sigma_s$$

$$\text{设} \quad \sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s$$

由此可得

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= \frac{3\dot{\varepsilon}}{2\sigma} \sigma_r' = \frac{3\dot{\varepsilon}}{2\sigma_s} \left( -\frac{1}{2} \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \right) \\ &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} = -\frac{\sqrt{3}C}{2\sigma_s} \end{aligned}$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{3\dot{\varepsilon}}{2\sigma} \sigma_\theta' = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} = \frac{\sqrt{3}C}{2\sigma_s}$$

$$\dot{\varepsilon}_z = 0$$

$$\text{及} \quad \dot{\varepsilon}_{rz} = \dot{\gamma}_{rz} = 0$$

第三题:

解: 用两个夹角为  $d\theta$  的子午面及两个节圆筒作共轴线且垂直工件的圆锥面的圆锥面截取一个单元块  $ABCD$ , 如右图所示。

已知  $OA = r$ ,  $AG = dr$ 。

由几何关系可得

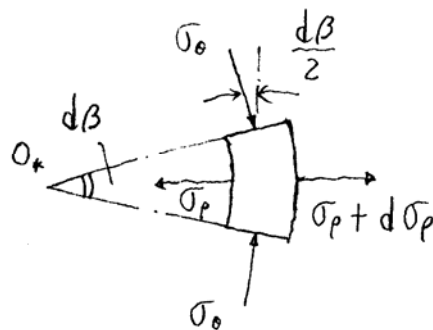
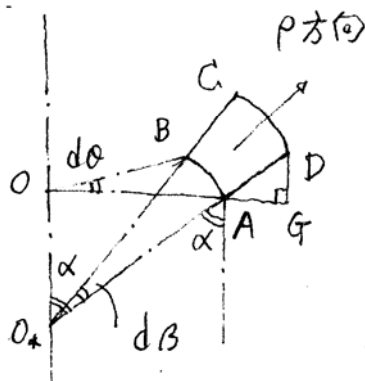
$$O^*A = \frac{OA}{\sin\alpha}$$

$$\widehat{AB} = OA d\theta \approx O^*A d\beta$$

故 
$$d\beta = \sin\alpha d\theta$$

及 
$$AD \approx dl = \frac{AG}{\sin\alpha}$$

$$= \frac{dr}{\sin\alpha}$$



沿  $\rho$  方向的静力平衡方程式为

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) d\theta t - \sigma_r r d\theta t + 2\sigma_\theta \frac{dr}{\sin \alpha} t \sin \frac{d\theta}{2} = 0$$

展开并忽略高阶微量, 可得

$$d\sigma_r r + \sigma_r dr + \sigma_\theta dr = 0$$

即 
$$d\sigma_r = -(\sigma_r + \sigma_\theta) \frac{dr}{r}$$

由于  $\sigma_r$  是拉应力,  $\sigma_\theta$  是压应力, 故  $\sigma_1 = \sigma_r$ ,  $\sigma_3 = -\sigma_\theta$ , 近

似塑性条件为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_r - (-\sigma_\theta) = \sigma_r + \sigma_\theta = \beta S$$

故 
$$d\sigma_r = -\beta S \frac{dr}{r}$$

积分上式得

$$\sigma_r = -\beta S \ln r + C$$

当  $r = D_0/2$  时, 有

$$\sigma_r = -\beta S \ln \frac{D_0}{2} + C = 0$$

设 
$$C = \beta S \ln \frac{D_0}{2}$$

故 
$$\sigma_r = \beta S \ln \frac{D_0}{2r}$$

由此, 拉深力  $P$  为

$$P = \pi d_0 t \sigma_r|_{r=d_0/2} = \pi d_0 t \beta S \ln \frac{D_0}{d_0} \quad \circ$$

## D 卷答案

### 液态金属凝固学

一. 细化凝固组织的生核剂主要有哪几类，其生核作用的机理分别是什么？

答案要点：

加入生核剂的目的是强化非均质形核。根据生核质点的作用过程，生核剂主要有以下四类：

(1) 直接作为外加晶核的生核剂，这种生核剂通常是与欲细化相具有界面共格对应的高熔点物质或同类金属、非金属碎粒。它们与欲细化相间具有较小的界面能，润湿角小，直接作为有效衬底促进非自发生核。

(2) 生核剂中的元素能与液态金属中的某元素形成较高熔点的稳定化合物，这些化合物与欲细化相间具有界面共相对应关系和较小的界面能，促进非均质生核。

(3) 通过在液相中造成很大的微区富集而造成结晶相通过非均质形核而提前弥散析出的生核剂，其余以此为基底形核，易为共晶析出。

(4) 含强成分过冷元素的生核剂，这类生核剂使晶粒根部或分枝，产生缩颈，易于通过熔体流动及冲击产生晶粒的游离；强化界面前沿熔体内部的非均质形核；强成分过冷元素的界面富集对晶体生长具有抑制作用，降低晶体生长速度，也使晶粒细化。

### 二、解答步骤

(1) 根据题目提供的 Al-Cu 相图参数可知：

$$C_{sm} = 5.7\%, C_E = 33\%$$

$$k_0 = \frac{C_{sm}}{C_E} = \frac{5.7\%}{33\%} = 0.173$$

当凝固 20% 时， $f_s = 20\%$ ,  $f_L = 80\%$ ,  $C_0 = 10\%$

$$C_s^* = k_0 C_0 (1 - f_s)^{k_0 - 1} = 0.173 \times 10\% (1 - 20\%)^{0.173 - 1} = 2.08\%$$

$$C_L^* = C_0 f_L^{k_0 - 1} = 10\% \times 80\%^{0.173 - 1} = 12.03\%$$

(2) 共晶体所占比例为  $C_s^*$  为  $C_{sm}$  时的  $f_L'$

$$C_{sm} = k_0 C_0 (1 - f_s')^{k_0 - 1} = k_0 C_0 f_L'^{k_0 - 1}$$

$$\text{故： } f_L' = \left( \frac{C_{sm}}{k_0 C_0} \right)^{\frac{1}{k_0 - 1}} = \left( \frac{5.7\%}{0.173 \times 10\%} \right)^{\frac{1}{0.173 - 1}} = 23.63\%$$

即凝固完毕时，共晶体所占比例为：23.63%

(3) 若凝固条件改为完全平衡凝固，当  $C_s^* = C_{sm} = 5.7\%$  时，未凝固的  $f_L$  即全为共晶体。

$$C_s = \frac{k_0 C_0}{1 - f_s(1 - k_0)}$$

$$5.7\% = \frac{0.173 \times 10\%}{1 - f_s \times (1 - 0.173)}$$

$$f_s = 84.22\%$$

$$f_L = 15.78\%$$

凝固后试棒中共晶体的数量为 15.78%。

三、何谓热力学能障和动力学能障？凝固过程使如何克服这两个能障的？

答案要点：

热力学能障——由被迫处于高自由能过渡状态下的界面原子所产生，能直接影响到体系自由能的大小，界面自由能即属于这种情况。

动力学能障——由金属原子穿越界面过程所引起，原则上与驱动力的大小无关而仅取决于界面的结构与性质，激活自由能即属于这种情况。

热力学能障对生核过程影响很大，动力学能障在晶体生长过程中则具有重要的作用。液态金属凝固过程中必须克服热力学和动力学两个能障。

液态金属在成分、温度、能量上是不均匀的，即存在成分、相结构和能量三个起伏，也正是这三个起伏才能克服凝固过程中的热力学能障和动力学能障，使凝固过程不断地进行下去。

凝固过程中产生的固-液界面使体系自由能增加，导致凝固过程不可能瞬时完成，也不可能同时在很大范围内进行，只能逐渐地形核生长，逐渐地克服两个能障，才能完成液体到固体的转变。同时，界面的特征及形态又影响着晶体的形核和生长。也正是由于这个原因，使高能态的界面范围尽量缩小，至凝固结束时成为范围很小的晶界。

四、试述析出性气孔的特征、形成机理及主要防止措施。

答案要点：

金属液在冷却及凝固过程中，因气体溶解度下降，析出的气体来不及从液面排除而产生的气孔称为析出性气孔。

这类气孔在铸件断面上大面积分布，靠近冒口、热节等温度较高的区域，其分布较密集，形状呈团球形，裂纹多角形，断续裂纹状或混合型。

析出性气孔的形成机理是：合金凝固时，气体溶解度急剧下降，由于溶质的再分配，

在固-液界面前的液相中气体溶质富集，当其浓度过饱和时，产生很大的析出动力，在现成的衬底上气体析出，形成气泡，保留在铸件中成为析出性气孔。

防止措施：

- (1) 减少金属液的原始含气量(减少金属液的吸气量、对金属液进行除气处理)；
- (2) 阻止金属液气体析出(提高冷却速度、提高铸件凝固时的外压)；
- (3) 型(芯)砂处理(减少砂型(芯)在浇注时的发气量、使砂型(芯)易于排气)