

# 华中科技大学

## 二〇〇六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、数字化材料成形

### A 卷

#### 简述题

1. 为什么过冷度是液态合金结晶的驱动力？

结晶过程的发生必须是液相的自由能高于固相的自由能，液相金属与固相金属自由能之差即为结晶的驱动力，要获得结晶过程所必需的驱动力，一定要使实际结晶的温度低于理论结晶温度，即要有一定的过冷度，才能满足热力学条件。

2. 液态合金的流动性和充型能力有何本质区别？

液态金属充满铸型型腔，获得形状完整、轮廓清晰的铸件的能力，称为液态金属的充型能力。液态金属的充型能力首先取决于金属本身的流动能力，同时又受到外界条件，如铸型的性质、浇注条件、铸件结构等因素的影响，是各种因素的综合反映。

液态金属本身的流动能力，称为流动性。由液态金属的成分、温度、杂质含量等决定的，而与外界条件无关。因此，流动性也可认为是确定条件下的充型能力。

3. 什么样的界面才能成为异质形核的衬底？

界面两侧夹杂和晶核的原子排列方式相似，原子间距相近，或在一定范围内成比例，就可能实现界面的共格对应。当点阵的失配度  $\delta \leq 5\%$ ，为完全共格，形核能力强； $5\% \leq \delta \leq 25\%$  为部分共格，夹杂物衬底有一定的形核能力； $\delta > 25\%$  为不共格，夹杂物衬底无形核能力。

4. 何谓析出性气孔，有何特征？

析出性气孔——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；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。

5. 生产中如何防止密度偏析的形成？

防止或减轻密度偏析的方法有以下几种：

- (1) 增加铸件的冷却速度、使初生相来不及上浮或下沉。
- (2) 加入第三种合金元素，形成熔点较高的、密度与液相接近的树枝状化合物，使其首先结晶并形成树枝状骨架，阻止偏析相的沉浮。
- (3) 尽量降低合金的浇注温度和浇注速度。

6. 简述产生焊接应力与变形的原因及消除或减少残余应力与变形的的方法。

温度改变导致“热胀冷缩”，非均匀的温度变化（如局部的加热、冷却）导致金属内部的不均匀“热胀冷缩”从而产生应力。工件冷却后保留在工件内部的内应力称为残余应力。局部的固态相变也能产生内应力。

减小或消除应力方法：结构设计、工艺措施、热处理、机械振动、机械加载等。

变形：残余应力的存在必然导致原工件形状的少量改变，也称为残余变形。

有整体变形、局部变形。

影响因素：材料热物理性能、膨胀系数、导热性、工艺因素、焊接热输入、焊接次序等。

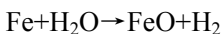
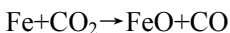
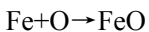
防止方法：结构设计、工艺（反变形、刚性固定、预留收缩量）、矫正（机械、火焰）。

7. 简述低碳钢焊接时氧与金属作用的特点及其对焊接质量的影响。

低碳钢中能有限溶解氧，生成的氧化物能溶于相应的金属中。氧在铁液中以原子氧和FeO两种形式存在。氧对金属有氧化作用。

气体中氧与金属的作用： $2\text{FeO} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{O}_2$

实际焊接电弧区的氧化可以是：



当温度升高，或 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 增多时， $[\text{FeO}]$ 多

影响：氧化物性能变差（强度、塑性、韧性）、气孔

控制：纯化焊材、控制焊接工艺参数、冶金脱氧（脱氧剂）。

8. 下图是不同焊接顺序时焊缝横向收缩引起的横向应力分布。试写出各图的焊接方向或顺序。

a)直通焊 b)从中间向两端焊 c)从两端向中间焊

9. 何谓塑性加工？它有何优点？

材料在一定的外力作用下，利用其塑性而使其成形并获得一定力学性能的加工方法称为塑性成形。

与其他加工方法(如金属的切削加工、铸造、焊接等)相比，金属塑性成形有如下优点：

- (1) 组织、性能好；
- (2) 材料利用率高；
- (3) 尺寸精度高；
- (4) 生产效率高，适于大批量生产。

10. 简述塑性变形的力学方程有哪几种？其作用如何？

有力平衡方程、几何方程、应变连续方程、屈服准则、应力—应变关系(本构关系)五种。

力平衡方程：反映微元体的力平衡，应力分量之间的关系。

几何方程：位移与应变之间的关系。

应变连续方程：应变分量之间的关系。

屈服准则：材料产生初始屈服和后继屈服的判据。

应力—应变关系：应变增量与应力偏量之间的关系。

11. 试写出摩擦应力计算的两种常用公式，并说明在塑性加工中的应用条件。

(1) 库伦摩擦条件

不考虑接触面上的粘合现象，认为摩擦符合库伦定律，即摩擦力与接触面上的正压力成正比，其数学表达式为

$$T = \mu P_n \text{ 或 } \tau = \mu \sigma_n$$

式中  $T$ ——摩擦力；

$\tau$ ——摩擦切应力；

$P_n$ ——接触面上的正压应力；

$\mu$ ——外摩擦系数(简称摩擦系数)。

适用于正压力不太大、变形量较小的冷成形工序

(2) 常摩擦力条件

接触面上的摩擦切应力  $\tau$  与被加工金属的剪切屈服强度  $K$  成正比，即

$$\tau = mK$$

式中， $m$ ——摩擦因子，取值范围为 0~1。

在热塑性成形时，常采用最大摩擦力条件。

12. 试写出摩擦应力计算的两种常用公式，并说明在塑性加工中的应用条件。

Tresca 屈服准则：

$$|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| = \sigma_s = 2K$$

式中， $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别代表最大、最小的主应力。

$K$  为材料屈服时的最大切应力值，也称剪切屈服强度。

意义：当受力物体(质点)中的最大切应力达到某一定值时，该物体就发生屈服。

Mises 屈服准则：

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma_s^2 = 6K^2$$

或

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 = 6K^2$$

式中： $\sigma_s$ ——材料的屈服点；

$K$ ——材料的剪切屈服强度。

意义：在一定的变形条件下，当受力物体内一点的应力偏张量的第二不变量达到一定值时，该点就开始进入塑性状态。

## B 卷 焊 接

### 1. 答题要点：

熔合比：焊缝金属中，熔入母材的金属所占的比例。

$$\theta = \frac{F_b}{F_b + F_d}$$

$$n=3$$

$$C_{wm} = \theta^n C_b + (1 - \theta^n) C_d$$

$$C_{WM} = 0.5^3 * 0.01 + (1 - 0.5^3) * 0.15 = 0.1325 \quad \text{即 } 13.25\%$$

### 2. 答题要点：

氢致裂纹易在中、高碳钢及合金钢、钛及钛合金、BCC 材料有淬硬 M 相变材料等的焊接时产生。主要产生在 HAZ 粗晶区。常具有延迟特征。

裂纹形貌：端部尖锐，断口无氧化、液膜特征；穿晶。

形成机理：淬硬组织、氢、拘束应力。

防止措施：材料成份选择与控制；预热及后热、保温处理；降低扩散氢含量；降低残余应力水平；低强度匹配。

### 3. 答题要点：

与母材焊前热处理状态有关。

焊前为正火或退火状态，焊前母材为 F+P 组织。HAZ 主要由完全淬火区和不完全淬火区组成。完全淬火区，M（或 M+B），靠近焊缝高温区为粗大的 M 组织。不完全淬火区，M+F。

焊前为调质态，母材为回火组织，HAZ 可分为完全淬火区、不完全淬火区和回火区。

性能变化：HAZ 的硬化、脆化、软化及综合力学性能的变化。

调整措施：调整成分与 HAZ 组织状态；合理的焊接工艺（合理的线能量、预热）。

### 4. 答题要点：

在焊接中，根据熔渣的成分和性能可以分为三种：盐型熔渣（主要由金属氟酸盐、氯酸盐和不含氧的化合物组成）、盐-氧化物型熔渣（主要由氟化物和强金属氧化物组成）、氧化物型熔渣（主要由金属氧化物组成）。

作用：

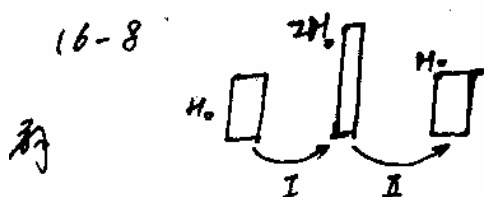
机械保护，与空气隔离，防止液态熔池氧化和氮化，防止高温时金属被氧化。

冶金处理作用，如脱 O、S、P；去 H；去杂质；合金化

改善焊接工艺性能，电弧易于引燃、稳定，易操作易脱渣；保证焊缝成形

## C 卷 金属塑性成形力学

### 1. 答题要点:



$$(1) \quad \epsilon_z^{(1)} = \ln \frac{2H_0}{H_1} = \ln 2$$

$$\epsilon_r^{(1)} = \epsilon_\theta^{(1)}$$

$$\epsilon_r^{(1)} + \epsilon_\theta^{(1)} + \epsilon_z^{(1)} = 2\epsilon_r^{(1)} + \Delta\epsilon^{(1)} = 0 \Rightarrow \Delta\epsilon_r^{(1)} = -\frac{1}{2}\ln 2$$

$$\overline{\Delta\epsilon^{(1)}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta\epsilon_r - \Delta\epsilon_\theta)^2 + (\Delta\epsilon_r - \Delta\epsilon_z)^2 + (\Delta\epsilon_z - \Delta\epsilon_\theta)^2} = \ln 2$$

$$(2) \quad \epsilon_z^{(2)} = \ln \frac{H_0}{2H_1} = -\ln 2$$

$$\Delta\epsilon_r^{(2)} = \Delta\epsilon_\theta^{(2)} = \frac{1}{2}\ln 2$$

$$\overline{\Delta\epsilon^{(2)}} = \ln 2$$

(3) 累积变形

$$\epsilon_r = \epsilon_0 = \Delta \epsilon_r^{(I)} + \Delta \epsilon_r^{(II)} = -\frac{1}{2} \ln 2 + \frac{1}{2} \ln 2 = 0$$

$$\epsilon_z = \Delta \epsilon_z^{(I)} + \Delta \epsilon_z^{(II)} = \ln 2 + (-\ln 2) = 0$$

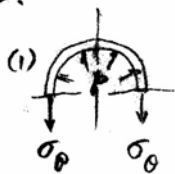
$$\bar{\epsilon} = \Delta \bar{\epsilon}^{(I)} + \Delta \bar{\epsilon}^{(II)} = 2 \ln 2$$

$$\star \quad \bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_r - \epsilon_0)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_0)^2}$$

累积等效应变必须考虑加载变形履歴，

即外力所作的塑性功将转化成晶体内的加工硬化，使内能↑

2.



解 取单元体如图,  $\sigma_1 = \sigma_\theta$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$   
由平衡条件, 得

$$2\sigma_\theta t = Dp$$

$$\sigma_\theta = \frac{Dp}{2t} \quad (1)$$

由 Mises 屈服准则

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (2)$$

$$\therefore \text{屈服时 } \sigma_\theta = \frac{Dp}{2t} = \sigma_s$$

$$p = \frac{2t\sigma_s}{D} = \frac{2 \times 4 \times 200}{80} = 20 \text{ (MPa)}$$



$\sigma_\theta$  的计算同 (1)

$$\therefore \pi d t \sigma_\theta = \frac{\pi}{4} D^2 p \quad \therefore \sigma_\theta = \frac{Dp}{4t} \quad (3)$$

由 Mises 屈服准则 (式1), 得

$$\left(\frac{Dp}{2t} - \frac{Dp}{4t}\right)^2 + \left(\frac{Dp}{4t}\right)^2 + \left(\frac{Dp}{2t}\right)^2 = 2\sigma_s^2$$

$$\text{得, } p = \frac{4t}{\sqrt{3}D} \sigma_s = \frac{4 \times 4}{\sqrt{3} \times 80} \times 200 = 23.1 \text{ (MPa)}$$

3. 应力张量 
$$\begin{bmatrix} -60 & \sqrt{300} & 0 \\ \sqrt{300} & -30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{3} = \frac{-60 - 30}{3} = -30$$

$$\sigma'_x = \sigma_x - \sigma_m = -60 - (-30) = -30$$

$$\sigma'_y = \sigma_y - \sigma_m = -30 - (-30) = 0$$

$$\sigma'_z = \sigma_z - \sigma_m = 0 - (-30) = 30$$

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{\sigma'_{ij}} = \frac{d\varepsilon_x}{\sigma'_x} \Rightarrow d\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{\sigma'_x} d\varepsilon_x$$

$$\therefore d\varepsilon_y = 0, \quad d\varepsilon_z = \frac{30}{(-30)} \times (-\delta) = \delta$$

$$2 \therefore \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad \therefore d\gamma_{yz} = d\gamma_{zx} = 0$$

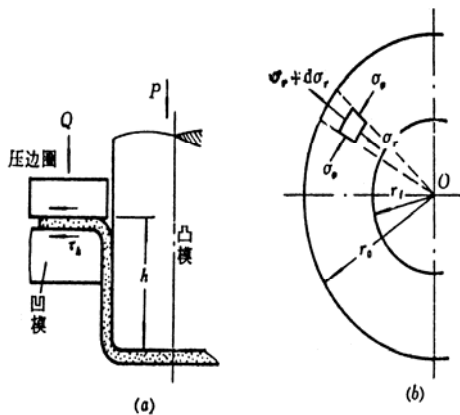
$$d\varepsilon_{xy} = \frac{\sqrt{300}}{(-30)} \times (-\delta) = \frac{\delta}{\sqrt{3}}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2} = 60$$

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} (d\varepsilon_x^2 + d\varepsilon_y^2 + d\varepsilon_z^2 + 2d\gamma_{xy}^2)} = \frac{4}{3} \delta$$

$$dW_P = \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = 60 \times \frac{4}{3} \delta = 80\delta$$





4. 列平衡方程，忽略~阶微量得

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

将弹性条件  $\sigma_r - \sigma_\theta = K_f$  代入上式，得

$$\sigma_r = -K_f \ln r + C$$

若假设外缘外缘处的  $\sigma_r$  与外力 Q 引起的摩擦力作用等效

$$\sigma_r^{\text{外}} = \frac{2\mu Q}{\pi D t}$$

将以上边界条件代入式(1)，得

$$C = K_f \ln \frac{D}{2} + \frac{2\mu Q}{\pi D t}$$

$$\text{于是 } \sigma_r = K_f \ln \frac{D}{2r} + \frac{2\mu Q}{\pi D t}$$

$$\text{内缘处 } \sigma_r^{\text{内}} = K_f \ln \frac{D}{d} + \frac{2\mu Q}{\pi D t}$$

根据体积不变条件，可确定图示瞬时的 D。

$$\pi d h = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D^2)$$

$$\therefore D = \sqrt{D_0^2 - 4dh}$$

$$\text{故 } p = \pi d t \times \sigma_r^{\text{内}} = K_f \frac{\pi d t}{2} \ln \left[ \left( \frac{D_0}{d} \right)^2 - \frac{4h}{d} \right] + \frac{2\mu d Q}{\sqrt{D_0^2 - 4dh}}$$

$$\text{其中 } K_f = 1.1 Y$$

## D 卷 液态金属凝固学

1. 液态合金凝固时的热过冷和成分过冷有何区别？成分过冷对单相合金晶体生长方式有何影响？

答题要点：

热过冷——液态凝固时所需过冷完全由传热所提供。

成分过冷：凝固时由于溶质再分配造成固液界面前沿溶质浓度变化，引起理论凝固温度的改变而在液固界面前液相内形成的过冷。

成分过冷对单相合金晶体生长方式影响：

(1) 无“成分过冷”的平面生长。当单相合金晶体生长条件符合： $\frac{G_L}{v} \geq \frac{m_L C_0 (1-k)}{D_L k}$  界面前方不产生成分过冷。界面将以平向生长方式生长。宏观平坦的界面是等温的，以恒定的平衡成分向前推进。获得成分完全均匀的单相固溶体柱状晶甚至单晶体。

(2) 窄成分过冷区的胞状生长。当单相合金晶体生长符合条件： $\frac{G_L}{v} \leq \frac{m_L C_0 (1-k_0)}{D_L k_0} = \frac{T_0 - T_L}{D_L}$  时，界面前方产生一个窄成分过冷区，晶体生长以胞状晶方式生长。

(3) 较宽成分过冷区的柱状树枝晶生长。随着界面前方成分过冷区加宽，凸起晶胞将向熔体伸展更远；原来胞晶抛物状界面逐渐变得不稳定。晶胞生长方向开始转向优先的结晶生长方向，胞晶的横向也将受晶体学因素的影响而出现凸缘结构，当成分过冷加强时，凸缘上又会出现锯齿结构即二次枝晶。将出现二次枝晶的胞晶称为胞状树枝晶，或柱状树枝晶。

(4) 宽成分过冷区的自由树枝晶生长。当固—液界面前方液体中成分过冷的最大值大于液体中非均质生核所需要的过冷度  $\Delta T^*$  异时，在柱状枝晶生长的同时，界面前方这部分液体将发生新的形核过程，导致晶体在过冷的液体中自由成核生长，并长成树枝晶，这称为自由树枝晶，此后的凝固过程便是等轴晶不断向液体内部推进的过程。

2. 解答步骤

(1) 根据题目提供的相图参数可知：

$$C_{sm} = 30\%, C_E = 60\%$$

$$k_0 = \frac{C_{sm}}{C_E} = \frac{30\%}{60\%} = 0.5$$

(2) 当凝固 10% 时， $f_s = 10\%, f_L = 90\%, C_0 = 40\%$

$$C_s^* = k_0 C_0 (1 - f_s)^{k_0 - 1} = 0.5 \times 40\% (1 - 10\%)^{0.5 - 1} = 21.1\%$$

$$C_L^* = C_0 f_L^{k_0 - 1} = 40\% \times 90\%^{0.5 - 1} = 42.2\%$$

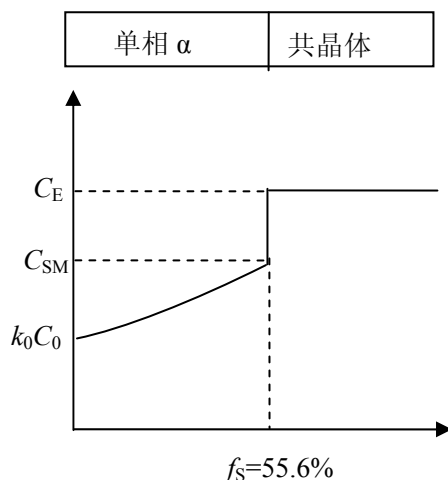
(3) 共晶体所占比例为  $C_s^*$  为  $C_{sm}$  时的  $f_L'$

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

$$\text{故: } f_L' = \left( \frac{C_{sm}}{k_0 C_0} \right)^{\frac{1}{k_0 - 1}} = \left( \frac{30\%}{0.5 \times 40\%} \right)^{\frac{1}{0.5 - 1}} = 44.4\%$$

即凝固完毕时，共晶体所占比例为：44.4%

(4) 成分的分布如图：



3. 铸件典型宏观组织是由哪几部分构成的，它们的特征和形成机理如何？

答题要点：

铸件典型宏观组织是由表面细晶粒区、柱状晶区和内部等轴晶区三个部分构成的，他们的特征分别是：

- (1) 表面细晶粒区。是紧靠铸型壁的激冷组织，也称激冷区，由无规则排列的细小等轴晶所组成。
- (2) 柱状晶区。由垂直于型壁（沿热流方向）彼此平行排列的柱状晶粒所组成。
- (3) 内部等轴晶区。由各向同性的等轴晶组成。等轴晶的尺寸比表面细晶粒区的晶粒尺寸粗大。

各区的形成机理如下：

- (1) 表面细晶粒区的形成。铸型壁附近熔体受到强烈的激冷作用而大量形核，形成无方向性的表面细等轴晶组织，也叫“激冷晶”。此区形成的前提条件是，抑制铸件形成稳定的凝固壳层，凝固壳层形成，界面处晶粒单向散热，则晶粒逆热流方向择优生长而形成柱状晶。
- (2) 柱状晶主要是从表面细晶粒区形成并发展而来的，稳定的凝固壳层一旦形成，处在凝固界面前沿的晶粒在垂直于型壁的单向热流的作用下，便转而以枝晶状延伸生长。由于各枝晶主干方向互不相同，那些主干与热流方向相平行的枝晶，较之取向不利的相邻枝晶生长得更为迅速。它们优先向内伸展并抑制相邻枝晶的生长。

在逐渐淘汰掉取向不利的晶体过程中发展成柱状晶组织。

(3) 内部等轴晶区的形成，是由于剩余熔体内部晶核自由生长的结果。

#### 4. 试分析缩孔、缩松形成条件及形成原因的异同。

答案要点：

缩孔形成原因是合金的液态收缩和凝固收缩值大于固态收缩值。产生的条件，是铸件由表及里地逐层凝固（而不是整个体积同时凝固），缩孔集中在最后凝固的地方。

形成缩松的基本原因也是由于合金的液态收缩和凝固收缩大于固态收缩。但是，形成缩松的条件是合金的结晶温度范围较宽，倾向于体积凝固，缩孔分散，或是在缩松区域内铸件断面的温度梯度小，凝固区域较宽，合金液几乎同时凝固，因液态和凝固收缩所形成的细小孔洞分散且得不到外部合金液的补充而造成的。铸件的凝固区域越宽，就越倾向于产生缩松。