

断裂力学 第三次作业答案

1、下表为一些金属的解理面及解理正应力，请归纳出几条规律，并作简要阐述。

金 属	晶体结构	解 理 面	试验温度/℃	解理临界正应力/MPa
W	体心立方	(100)		
α -Fe	体心立方	(100)	-100	254.8
			-185	269.5
Zn	密排六方	(0001)	-185	1.76~1.96
Zn(0.03%Cd)		(0001) (10 $\bar{1}$ 0)	-185	1.86
			-185	17.64
Zn(0.13%Cd)		(0001)	-185	2.94
Zn(0.53%Cd)		(0001)	-185	11.76
Mg	密排六方	(0001), (10 $\bar{1}$ 1) (10 $\bar{1}$ 2), (10 $\bar{1}$ 0)		
Te	密排六方	(10 $\bar{1}$ 0)	20	4.21
Sb	菱方	(11 $\bar{1}$)	20	6.47
Bi	菱方	(111)	20	3.14

答：(1) 从晶体结构的角度看，在金属的三种典型结构，即面心立方 (fcc)、体心立方 (bcc) 和密排六方 (hcp) 中，只有 bcc 和 hcp 结构的金属可能发生解理断裂，而 fcc 结构的金属一般不会发生解理断裂。(2) 从晶体学角度看，解理面一般含低指数晶面。对于 bcc 结构，解理面为{100}晶面族；对于 hcp 结构，解理面一般为{0001}晶面族，但当轴比 c/a 合适时，有时也可能产生柱面解理。(3) 对于 bcc 和 hcp 结构，解理发生在室温 (20℃) 以下的较低温度区间，只有复杂结构，例如 Sb 和 Bi 可能在室温发生解理断裂，因此 bcc 和 hcp 结构的金属具有明显的低温脆性。(4) bcc 结构金属相比于 hcp 结构的金属具有较高的解理断裂强度，表明 hcp 金属更容易发生解理断裂，比 bcc 金属的脆性更大。

2、在特定场合下，铁素体钢也会发生解理断裂，它是由于位错滑移受到晶界碳化物阻碍而塞积在碳化物前，高的应力集中导致碳化物开裂，形成解理裂纹，并最终断裂。请利用位错塞积群理论和Griffith断裂条件，证明解理裂纹形核时作用在位错塞积群上的临界名义剪应力为：

$$\tau_c = \tau_i + \sqrt{3E\gamma_c} \cdot d^{-\frac{1}{2}}$$

式中， τ_i 为位错滑移的点阵摩擦阻力； E 为杨氏模量、 γ_c 为碳化物比表面能； d 为晶粒直径。

答：位错塞积于晶界碳化物的模型如图所示，根据位错塞积群理论，位错塞积群

前方 r 距离点的应力为 $\tau_{r,\theta} = (\tau - \tau_i) \sqrt{\frac{d}{2r}}$ ，因解理裂纹是在拉应力下形核的，则

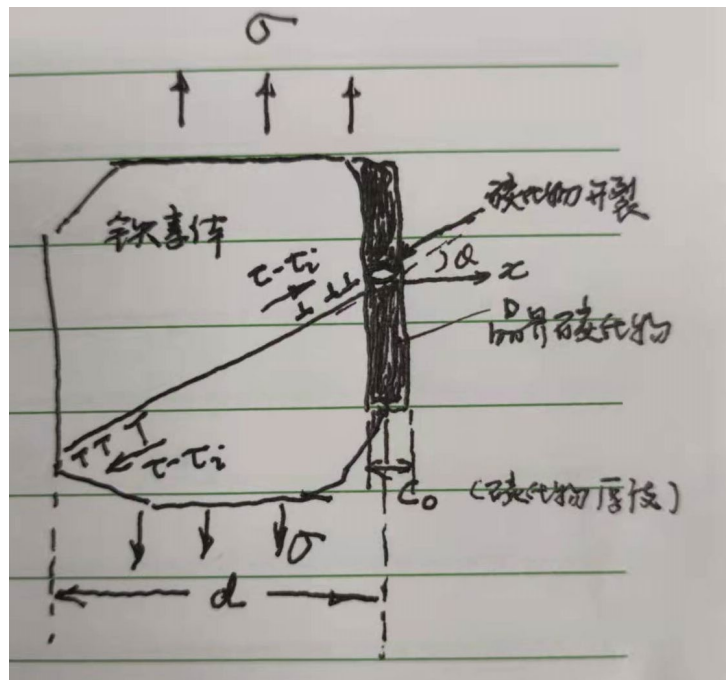
在位错头部 (r, θ) 点的周向应力为 $\sigma_{r,\theta} = \frac{3}{2}(\tau - \tau_i) \sqrt{\frac{d}{2r}} \sin\theta \cos\frac{\theta}{2}$ ，令 $\frac{\partial \sigma_{r,\theta}}{\partial \theta} = 0$ ，

可解得 $\cos\theta = \frac{1}{3}$ ，即 $\theta = 70.5^\circ$ 时，周向应力达到最大 $\sigma_{\theta\max} = \frac{2}{\sqrt{3}}(\tau - \tau_i) \sqrt{\frac{d}{2r}}$ ，取

$r = c_0$ ，得 $\sigma_{\theta\max} = \frac{2}{\sqrt{3}}(\tau - \tau_i) \sqrt{\frac{d}{2c_0}}$ ，当此正应力达到 Griffith 应力时，碳化物断裂

形成解理裂纹，因 $\sigma_{Griffith} = \sqrt{\frac{2E\gamma_c}{c_0}}$ ，因此 $\frac{2}{\sqrt{3}}(\tau - \tau_i) \sqrt{\frac{d}{2c_0}} = \sqrt{\frac{2E\gamma_c}{c_0}}$ ，即可解得 $\tau_c =$

$\tau_i + \sqrt{3E\gamma_c} \cdot d^{-\frac{1}{2}}$ ，证毕。



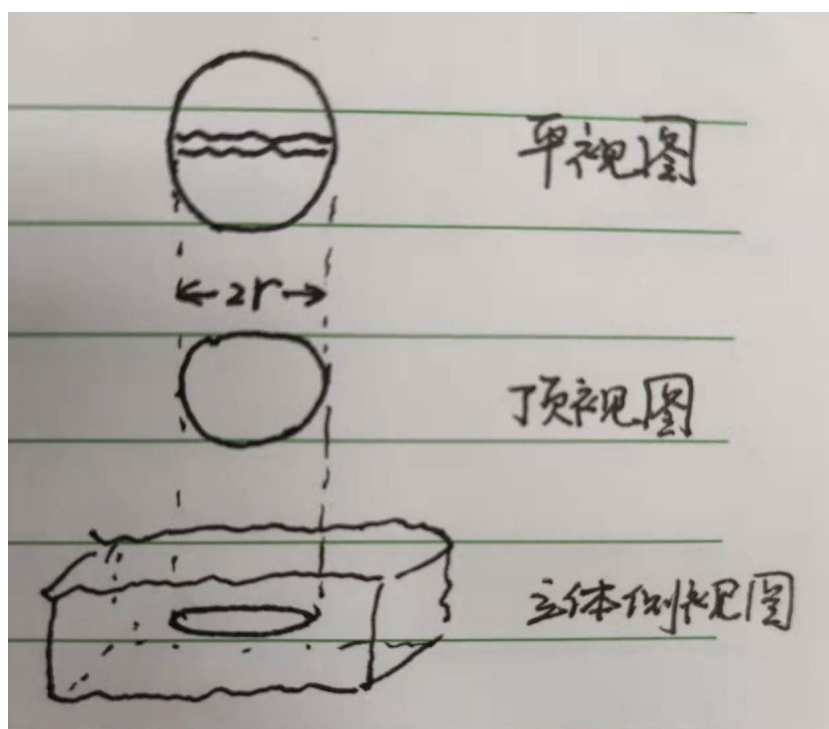
3、对于常用工程金属材料，在室温下最常发生微孔聚集型韧性断裂，微孔萌生有“颗粒/基体界面脱粘”及“颗粒本身碎断”两种可能的方式。假设在某一特定情况下夹杂物颗粒碎断，形成半径为

r 的硬币状微裂纹（应力强度因子表达式为： $K = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi r}$ ），试证明微孔形核的临界应力为：


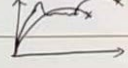
$$\sigma_c = \sqrt{\frac{3E\pi\Gamma_s}{8(1-\nu^2)R_0}}$$

式中， E 为基体杨氏模量； ν 为基体泊松比； R_0 为夹杂物颗粒半径； Γ_s 为颗粒自由比表面能。

答：以颗粒碎断方式形成的微孔可以近似为硬币状裂纹，在断裂力学中可以作为“无限大体内内埋圆盘裂纹受单向拉伸”的问题，如右图所示，此裂纹顶端的应力强度因子为 $K = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi r}$ ，在平面应变状态下，裂纹扩展能量释放率 G 与应力强度因子 K 的关系为 $G = \frac{1-\nu^2}{E} K^2$ ，由此可得 $G = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi E} \sigma^2 r$ ，在颗粒中平面上形成一个硬币状裂纹所需要释放的能量为 $\Delta U_e = \int_0^{R_0} G 2\pi r dr = \frac{8}{3} (1-\nu^2) \frac{\sigma^2}{E} R_0$ ，相应地，形成裂纹表面增加的表面能为 $\Delta U_s = \pi R_0^2 \Gamma_s$ ，根据能量平衡原理应有 $\Delta U_e = \Delta U_s$ ，可以得到颗粒碎断的临界应力 $\sigma_c = \sqrt{\frac{3E\pi\Gamma_s}{8(1-\nu^2)R_0}}$



4. 请简要阐述解理断裂和微孔聚集型断裂在宏观表现、微观机制、以及断口等方面的差异。

4. 答: (1) 宏观表现	解理断裂	微孔聚集断裂
$\sigma \sim \epsilon$ 曲线		
强度	$\sigma_f < \sigma_s$	$\sigma_f > \sigma_s$
塑性	低	高
韧性	低	高
(2) 微观机制		
裂纹形核地点	晶界、低指数晶面	夹杂物、第二相颗粒
裂纹形核方式	不均匀滑移产生的 高应力集中导致沿 解理面拉开	界面脱粘或 颗粒破碎
裂纹扩展方式	裂尖前原子键合 "接力传递"或拉开	微孔横向扩张 聚合
裂纹扩展速度	失稳扩展 接近声速	有个亚稳态阶段
(3) 断口		
宏观断口	杯锥状(拉伸时) 三区: 纤维区、放射区、剪切唇	结晶状 放射状
微观断口	无刃窝	河流花样 解理台阶

答:

5. 简要阐述位错在断裂过程（包括裂纹形核及裂纹扩展两个阶段）中所起的作用。

答: (1) 在裂纹形核中所起的作用: ① 对于脆性解理断裂: 位错的不均匀滑移导致局部区域高度应力集中, 引发微裂纹形核。常是三种机制: (a) stroh 位错塞积机制: 位错运动遇到晶界等强障碍, 在障碍前塞积成位错群, 由于塞积群头部的高应力集中而形成微裂纹。(b) Cottrell 位错反应机制: 不同滑移面上的运动位错相遇后, 在满足结构条件和能量条件的情况下发生位错合成反应, 形成新的固定位错。随着固定位错增多, 发生高应力集中, 形成微裂纹。(c) smith 硬化物

唇裂机制：位错滑移遇到晶界上的碳化物而塞积，高应力集中导致碳化物开裂，成为解理微裂纹核心。②对韧性微孔聚集型断裂：(a) 对高纯度单晶体：随着塑性变形的发展，位错增殖，位错间交互作用变得强烈，在位错缠绕严重区域形成微孔洞。(b) 对工程金属材料：位错在第二相颗粒处塞积，使基体与颗粒的变形严重失配(因颗粒只发生弹性变形而不发生塑性变形)，导致应力的不均匀分配，可引起颗粒与基体产生界面脱粘或颗粒本身碎断，形成微孔洞。

(2) 在裂纹稳态扩展中所起到的作用：①位错在裂纹尖端发射，使裂纹尖端钝化，且在裂纹尖端前沿产生塑性区，吸收塑性变形功，从而障碍裂纹扩展，使韧性提高(从物理机制角度)②位错应力场导致裂纹尖端区域的应力强度因子 K 下降(即位错有屏蔽作用)，降低裂纹尖端应力集中程度，使裂纹扩展驱动力降低(从力学角度)。