



第三讲 材料的断裂



一、断裂

1. **断裂**：含裂纹体承载达到临界值时，致使裂纹失稳扩展，最终产生破坏的现象。

2. **断裂的基本形式**：延性断裂和脆性断裂

3. **断裂机理**：

(1) **微孔集结断裂(韧性断裂)**

断口上出现抛物线型的韧窝，主要是金属和高聚物的断裂机理；

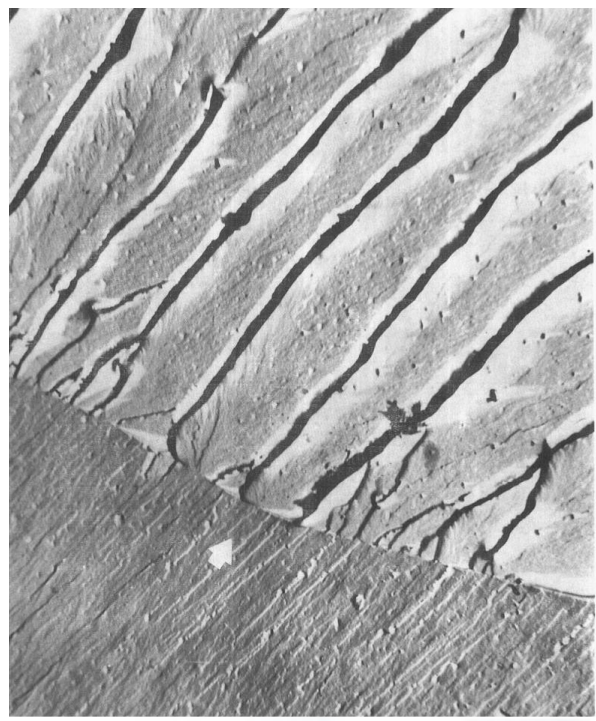
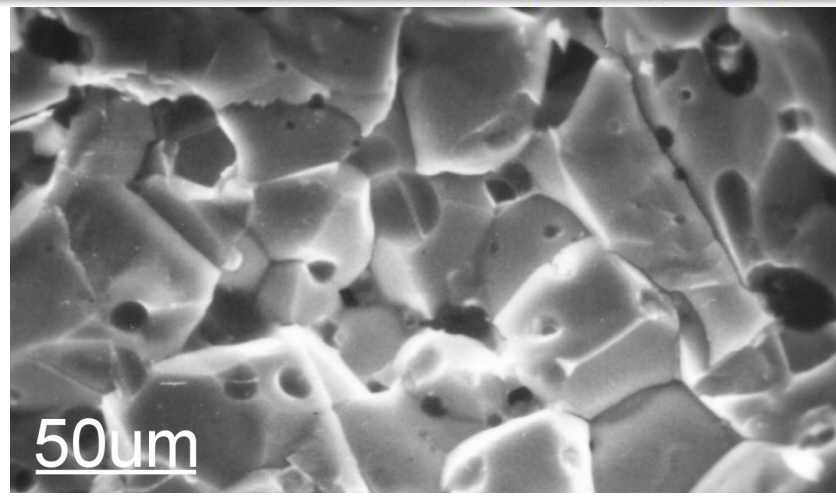
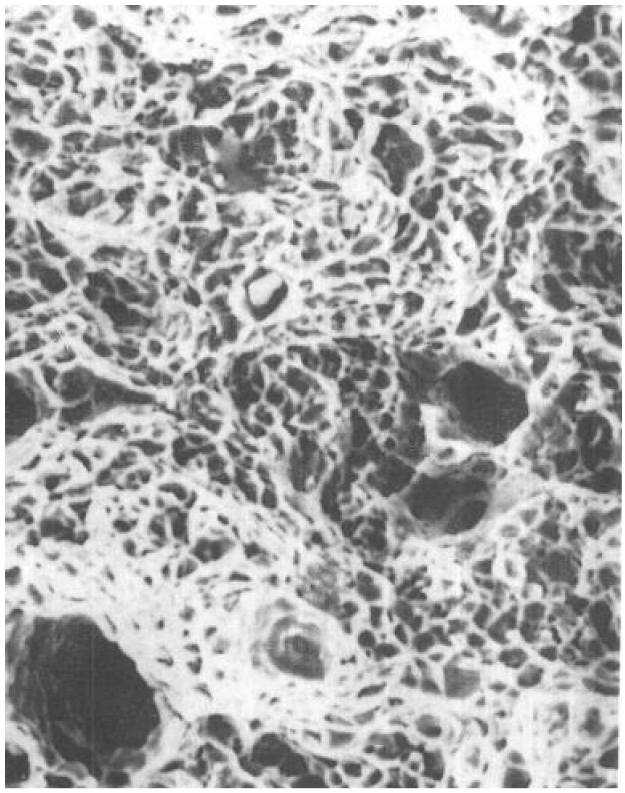


(2) 解理断裂(脆性断裂)

是一种低能量断裂，也是晶体材料中最脆的一种断裂；沿晶体中解理面断开原子键而引起的断裂，非常平坦，一晶粒内的解理裂纹具有平直性；一个晶粒内的一条解理裂纹可同时在两个平行的解理面上扩展，形成解理台阶。

(3) 晶界断裂

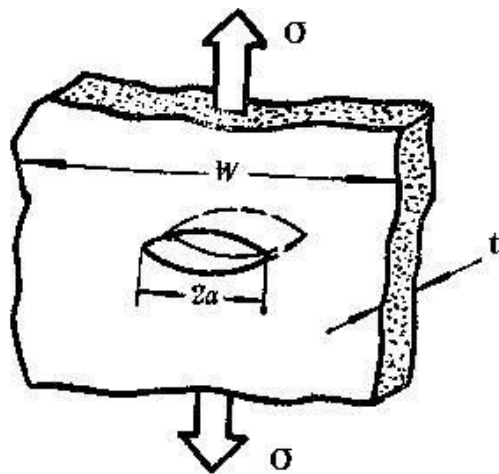
裂纹择优沿晶界扩展而引起的断裂；也是一种低能量脆性断裂，断口呈现颗粒状形貌。





4. 格列菲斯断裂理论:

1912年格列菲斯提出一个断裂理论，材料中存在预裂纹，在拉应力作用下，裂纹尖端附近产生应力集中，局部应力超过材料的屈服强度而引起裂纹扩展，当裂纹长度扩展到临界值时，材料断裂。当材料中预存的裂纹数量减少和长度减短，材料的强度会提高。



格列菲斯判据为弹性应变能的减少等于产生裂纹新表面所需的能量，则裂纹扩展。裂纹扩展所需平板所释放的弹性应变能为：

$$W_e = \frac{\pi \sigma^2 a^2 t}{E} \quad (\text{平面应力情况})$$



平板中含长度为 $2a$ 的裂纹，表面能为：

$$W_s = -2(2a\gamma_s)t = -4a\gamma_s t$$

所释放的弹性应变能看作由系统做功，为正号，表面能增加看作对系统做功，为负号。

裂纹扩展引起系统总能量的变化，可表示为：

$$\Delta U = W_e + W_s = \frac{\pi\sigma^2 a^2 t}{E} - 4a\gamma_s t$$

根据格列菲斯判据，当 $W_e = W_s$ 时，裂纹开始扩展，可得：

$$\sigma = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a}\right)^{1/2}$$

σ 为初始长度为 $2a$ 的裂纹开始扩展所需应力，即临界状态应力值， E 为弹性模量， γ_s 为比表面能， a 为半裂纹长度。

二、材料的断裂过程

(一) 裂纹形成的断裂理论

(二) 裂纹伸展的断裂理论及途径

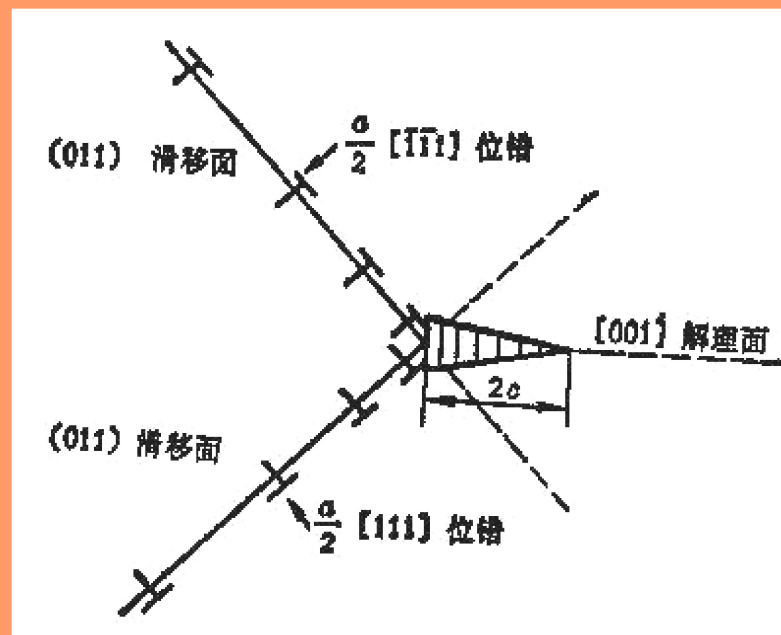
(一) 裂纹形成的断裂理论

断裂的全过程包括裂纹的形成和伸展，当裂纹尺寸和外加应力的组合达到临界值，断裂便会发生。

晶体的滑移是位错在滑移面上的运动引起的。这些位错遇到障碍物(如晶界)，便会堆塞，这些堆塞的位错数(n)增加时，便会产生足够大的应力而形成裂纹。

n 个堆塞位错(柏氏矢量为 b)，形成 $[001]$ 裂纹，其长度为 $2c$ ，可以看作具有柏氏矢量为 nb 的大位错，其能量 U 包含四项：

- (1) 大位错的弹性应变能；
- (2) 表面能；
- (3) 形成裂纹所松弛的弹性应变能；
- (4) 形成裂纹时，外加应力 σ 所作的功。



通过计算，裂纹失稳扩展满足： $\sigma nb \geq 2\gamma$ (γ 为比表面能)
进一步计算 nb ，结合Hall-Petch公式，得：

$$(\sigma_i d^{1/2} + k_y) k_y' \geq 2\mu\gamma \quad (\mu \text{ 为切变模量})$$

可以看出，为使裂纹不易形成，可以采用：

- (1) 提高 μ 及 γ ；
- (2) 降低 σ_i 、 d 、 k_y 及 k_y' 。

(二) 裂纹伸展的断裂理论及途径

对于金属及合金而言，一般具有较高的断裂韧性，其宏观断口呈纤维状，微观断口呈韧窝状，且微孔都伴随着第二相。这种断裂方式包含如下四步：

(1) 基体的塑性变形；

(2) 在基体和第二相界面或第二相本身开裂,形成微孔；

(3) 微孔长大；

(4) 微孔间金属撕裂，使微孔聚合，从而裂纹伸展。

1. 沿晶断裂及晶粒度：

(1) 杂质含量对沿晶断裂及断裂韧性的影响；

(2) 晶界对于力学过程和力学性能的影响。

此外，晶界偏聚了杂质，降低了晶界能，从而易于沿晶断，但通过细化晶粒，增加了单位体积内的晶界面积，则在杂质含量相同的情况下，单位晶界面积偏聚的杂质质量也会相应减少，从而会减小脆性。

晶粒度对断裂韧性的影响，是随断裂途径和方式的不同而有差异的，有时还会出现晶粒增大反而使断裂韧性提高的异常现象。

对于结构材料，各种强化措施的关系式为：

$$\text{固溶强化: } \Delta\sigma_s \propto \sqrt{c} \quad (1)$$

$$\text{加工强化: } \Delta\sigma_s \propto \sqrt{\rho} \quad (2)$$

$$\text{细晶强化: } \sigma_s = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \quad (3)$$

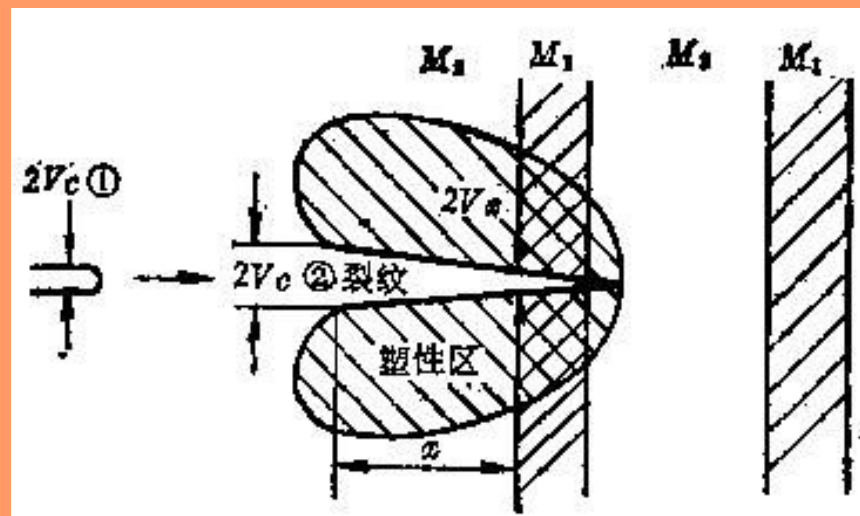
$$\text{弥散强化: } \Delta\sigma_s = \frac{1.2\mu b^2}{d_T} \quad (4)$$

式中： c 是溶质原子的原子%， ρ 是位错密度， d_T 是第二相颗粒间平均距离。这些强化措施在提高强度的同时，韧性也会发生变化：细晶强化，可以提高强度，也会提高韧性，但其它强化措施，在提高强度的同时，往往是韧性下降。

3.2 复相合金

对具有多形性转变的合金，进行适当的合金化和热处理，可以获得复相合金。复相合金中同样存在着韧性相和脆性相，其中韧性相相对提高复相合金韧性有着较大的作用。

对于图中复相合金中的裂纹，要阻止其伸展，韧性相不仅要有足够的韧性，还必须有足够的厚度(x)，即图中的裂纹张开位移 $2V_x$ 必须小于脆性相的临界裂



纹张开位移 $2V_{M_1}^*$ ，才能阻止裂纹继续伸展，因而 x 必须足够大，才能满足这个条件。

为了应用第二相来提高合金的韧性，采用能量分析方法，从形变和断裂的物理图象来理解韧化的措施。假定应力场与第二相尺寸(**a**)在相同的数量级，裂纹的尺寸也与**a**近似相等，则第二相开裂的条件是：

$$\frac{(q\sigma)^2}{E} a^3 = 2\gamma a^2$$

式中：**q**是平均的应力集中系数， σ 是断裂第二相所需的应力，因此：

$$\sigma = \frac{1}{q} \left(\frac{2E\gamma}{a} \right)^{1/2}$$

第二相愈大或易于解理断裂的脆性相，所需 σ 较小。若**a**很小，则即使是脆性相，也不易开裂，位错可在它们之间弯曲而过，消耗较多的能量，从而可以提高韧性。

若第二相易于变形，则上式应该加上塑性变形功 (U_p)；若用 W_p 表示单位体积的塑性变形功，则能量平衡条件为：

$$\frac{(q\sigma)^2}{E} a^3 = 2\gamma a^2 + U_p$$

在一般情况下， $U_p \gg 2\gamma a^2$ ，故：

$$\sigma \approx \frac{1}{q} (EW_p)^{1/2}$$

对于不开裂的第二相， W_p 愈大，则变形所需的 σ 愈大，因而韧性愈高，在此情况下，韧性与第二相的尺度无关。

3.3 复合材料

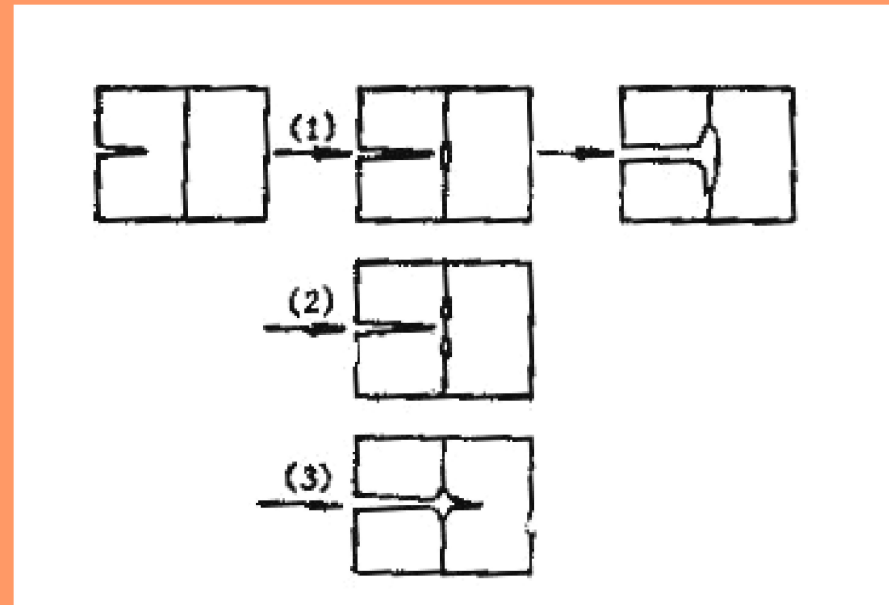
1) 界面结合强度对裂纹伸展的影响:

界面垂直于原始裂纹的情况下,

(a) 如果界面的结合很弱, 则界面开裂, 产生二次裂纹, 使原始裂纹伸展受阻, 并且松弛了应力, 可以提高韧性, 但材料的强度低;

(b) 如果界面的结合合适, 材料的强度也较合适, 则二次裂纹形成较晚, 有利于提高韧性;

(c) 如果界面的结合很强, 则在原始裂纹穿过界面后再形成二次裂纹, 韧化效果较差。



以上的“分层”效应，是提高复合材料韧性的主要原因。垂直于材料横断面的两种分层取向，对提高韧性均有利：

(a) 阻止裂纹伸展取向——分层使裂纹钝化，抑制解理断裂，松弛三向应力；

(b) 划分裂纹伸展取向——将主裂纹划分成许多小裂纹，同样可松弛三向应力，抑制解理断裂。

