

4 韧化原理



● 材料力学角度

假设材料是无裂纹的，断裂过程必然包含着裂纹萌生阶段，因此以**静力韧度**作为韧化评价参数，需要强度和塑性的配合，强度与塑性的乘积近似为静力韧度，所以也可以**强塑积**作为韧化评价参数（**强韧化**）。

● 断裂力学角度

对大型构件或重要构件，需要假设材料或结构中存在固有裂纹，以**断裂韧度**作为韧化的评价参数。由于材料强度多与断裂韧度呈反比，为区分强韧化的概念，可将提高断裂韧度的韧化称为**增韧**。

● 断裂过程角度

光滑试样有裂纹形核及裂纹扩展两个阶段，静力韧度包含了裂纹形核功及裂纹扩展功两部分。静力韧度即表征了裂纹形核抗力，也表征了裂纹扩展抗力。裂纹试样的断裂只存在裂纹扩展，断裂韧度表征了裂纹扩展抗力。

4 韧化原理



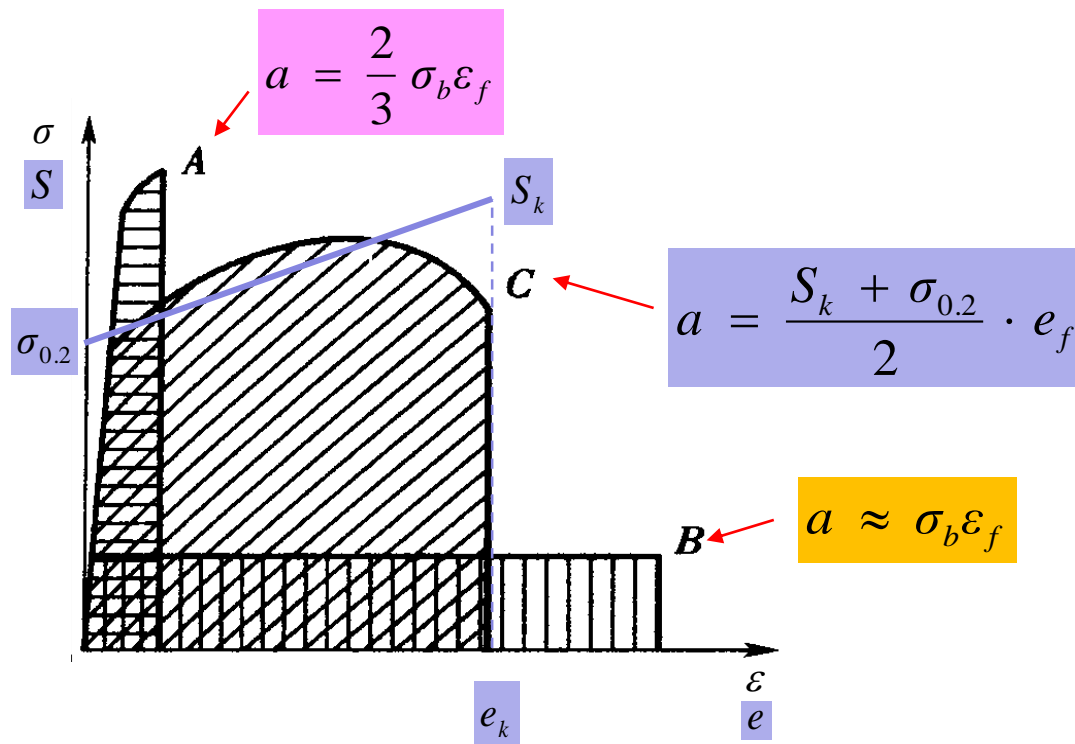
韧性表征	静力韧度 a	冲击韧度 a_K	断裂韧度 K_{IC}
试样类型	光滑试样	缺口试样	裂纹试样
试验方法	拉伸	一次冲击	拉伸或弯曲
力学响应	准静态	动态响应 缺口效应	裂纹扩展
断裂过程	裂纹萌生+裂纹扩展	裂纹萌生+裂纹扩展	裂纹扩展
韧性本质	断裂功	断裂功	裂纹扩展抗力
韧化原理	材料力学 (基于强度设计)		断裂力学 (基于断裂设计)

强韧化

增韧



4.1 基于强度设计的韧化原理



$$a = \alpha \cdot (\sigma_b \cdot \varepsilon_f) \quad (\text{强塑积})$$

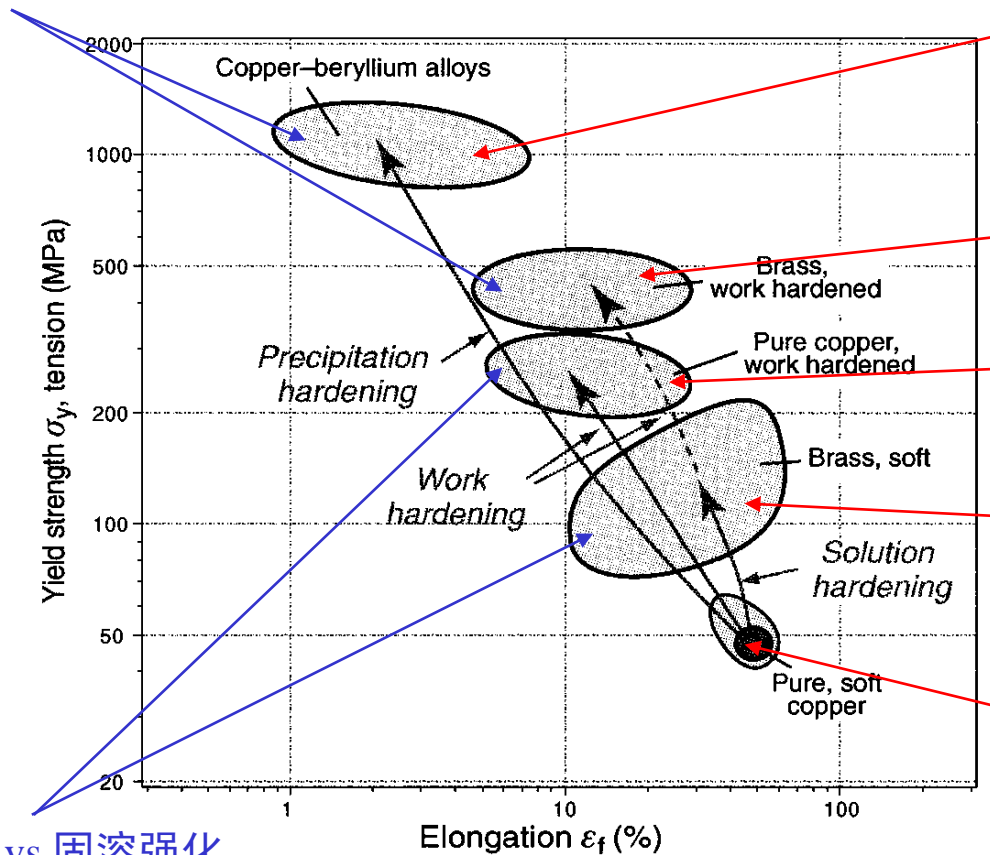
基本思路:

- 保证塑性的前提下, 尽量提高强度
- 保证强度的前提下, 尽量提高塑性



强化机制与塑性的关系

颗粒强化 vs 加工硬化



铍青铜：固溶强化+颗粒强化

黄铜：固溶强化+加工硬化

纯铜：加工硬化

黄铜：固溶强化

纯铜：无强化

加工硬化 vs 固溶强化

铜在不同强化机制下的强度和塑性

强度提升效果
对塑性的损害

颗粒强化 > 加工硬化 > 固溶强化

不同强化机制下强度增量与结构参量的关系



加工硬化:

$$\Delta\sigma_s \propto \sqrt{\rho}$$

位错密度

固溶强化:

$$\Delta\sigma_s \propto \sqrt{c}$$

溶质浓度

颗粒强化:

$$\Delta\sigma_s \propto \frac{Gb}{d_T}$$

晶粒直径

细晶强化:

$$\Delta\sigma_s \propto k d^{-\frac{1}{2}}$$

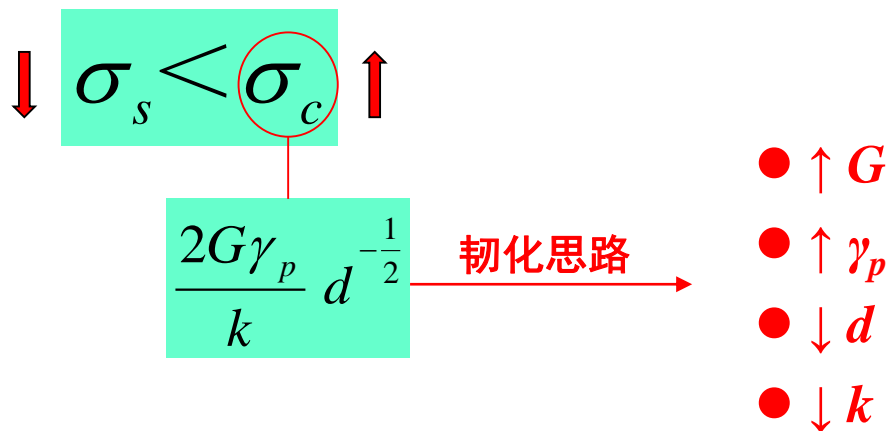
晶粒直径

塑性↓

塑性↑

- 晶界杂质偏聚浓度↓
- 晶界夹杂物尺寸（厚度）↓
- 塑性变形均匀化程度↑
- 裂纹沿晶扩展路程↑

韧化思路



各种强化机制下的材料参数变化趋势

强化机制	G	γ_p	d	k	σ_c
加工硬化	—	↓	—	—	↓
固溶强化	—	↓	—	—	↓
颗粒强化	—	↓	—	—	↓
细晶强化	—	↑	↓	—	↑

脆化

韧化

塑性技术指标



●**极限塑性**：以**伸长率** ($\delta\%$) 或**断面收缩率** ($\varphi\%$) 来表征，反映了材料塑性变形容量。

●**均匀塑性**：对于延性较好的材料，拉伸塑性变形过程存在均匀应变硬化和颈缩两个阶段，则达到应变硬化终点（即颈缩起点）时的**均匀伸长率** ($\delta_b\%$) 或**均匀面缩率** ($\varphi_b\%$) 表征了材料均匀塑性变形能力。

●**应变硬化能力**：以**应变硬化指数** (n) 表征，代表材料抵抗继续塑性变形的能力。 n 值在数值上等于均匀塑性变形终了时的真实伸长率所以 n 值高低表示了材料发生颈缩前的依靠硬化使材料均匀变形能力的大小，也意味着因硬化而使应变分配均匀能力的大小。一般来说，材料强度越高， n 值越小。

影响塑性的结构因素因素



● 原子结构

- 电子排布
- 化学键（共价键、离子键、金属键、分子键）

决定了键合类型、键合强弱以及变形本征特性

● 晶体结构

- 滑移系、滑移特征
- 晶格阻力
- 晶体对称性
- 非晶体

决定了材料借滑移实现塑性变形的潜力和能力

● 组织结构

- 晶粒尺寸
- 晶界、相界
- 有序、无序
- 第二相（性质、大小、数量、分布、界面结合）

决定了材料借滑移实现塑性变形的程度和效果

● 化学成分

- 溶质原子（强化晶格；改变变形机制；引起组织改变）
- 杂质原子（晶界偏聚；形成脆性夹杂物）

4.2 基于断裂设计的韧化



韧化研究的宏观层次在于探讨断裂过程能量消耗的分割。裂纹扩展过程时，构件中蕴含的能量流入裂纹尖端区，该能量可转化为三部分耗散功：

- ① 断裂过程功（裂纹表面能） ————→ 阀门控制作用
 - ② 裂尖区塑性变形功
 - ③ 断裂牵连过程额外耗散的功
- } 主要增韧项

材料断裂能 J 积分的变化可作为增韧的衡量指标。材料的增韧可以归纳为起裂韧度（ J_{IC} ）与扩展韧度（ J_{∞} ）两个方面。

4.2.1 起裂韧度的增值



对于脆性和准脆性断裂，起裂韧度 J_{IC} 即等于临界裂纹扩展能量释放率 G_{IC} ，也等效于断裂韧度，三者之间有下列关系：

$$J_{IC} = G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E'}$$

$$J_{IC} = G_{IC} = 2\gamma_s + \gamma_p$$

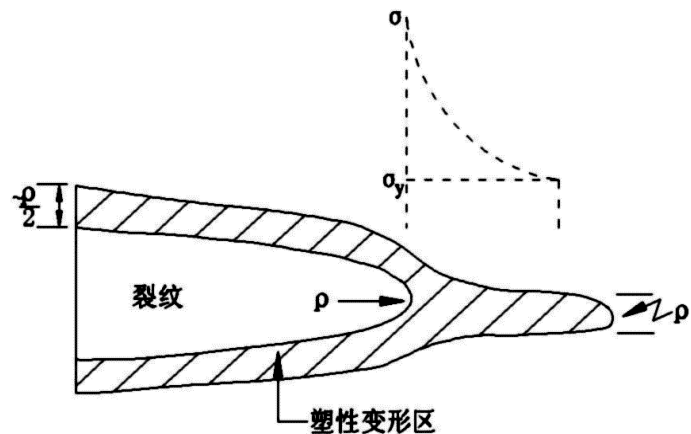
$$K_{IC} = \sqrt{E'(2\gamma_s + \gamma_p)}$$

忽略表面能

$$J_{IC} = \gamma_p$$

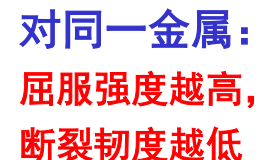
再假设裂尖前沿塑性区为高度等于裂尖曲率半径的窄条状，则有：

$$G_{IC} = B\sigma_{yf}\varepsilon_{fr}\rho$$



裂纹扩展过程中塑性区示意图

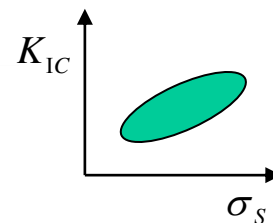
传统陶瓷



对不同金属:
在塑性相近时,
屈服强度越高,
断裂韧性越高

对不同陶瓷：
强度越高，
断裂韧性越高

各种材料的强度-断裂韧性相关性图





4.2.2 扩展韧度的增值

裂纹起裂后的稳态扩展这一过程中所产生的韧度增值为：

$$\Delta J = J_{\infty} - J_{IC}$$

稳态扩展的 J 积分值

ΔJ 可通过能量积分来计算。选择一条围绕裂尖的闭合回路，其对能量积分的贡献有四部分：

① 围绕裂尖的积分 J_{IC}

② 外围道积分 J_{∞}

③ 桥联面上的积分

④ 尾区的积分

ΔJ

$$\Delta J = 2 \int_0^H U(y) dy + \int_L \sigma_B(x) d\delta(x)$$

Diagram labels: 尾区高度 (Tail zone height), 桥联应力 (Bridge stress), 裂纹张开位移 (Crack opening displacement), 残余应变能密度 (Residual strain energy density), 裂纹桥联段 (Crack bridge segment).

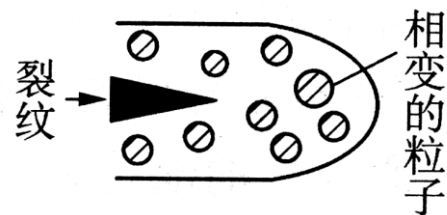
尾区积分对增韧的贡献

桥联面积分对增韧的贡献

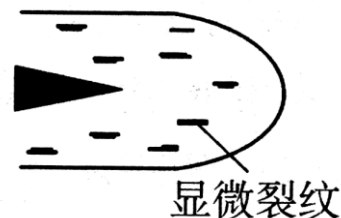
4.2.3 增韧机制 - 裂尖屏蔽



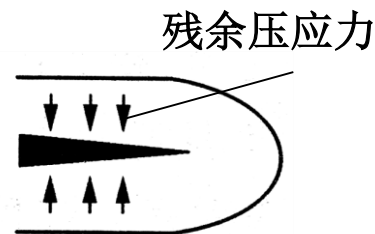
① **相变屏蔽**：相变屏蔽是指裂纹尖端应力诱发相变，吸收大量能量，并且因体积膨胀对裂纹表面产生压应力，降低了裂纹扩展驱动力。（TRIP钢、陶瓷）



② **显微裂纹屏蔽**：在主裂纹尖端过程区内，分散的微裂纹张开而吸收能量，使主裂纹扩展阻力增大，起到增韧效果。（陶瓷、高聚物）



③ **残余应力屏蔽**：当主裂纹扩展进入残余应力区时，残余应力将释放，同时有闭合主裂纹、阻碍其扩展的作用，而产生增韧效果。（金属、陶瓷、高聚物）

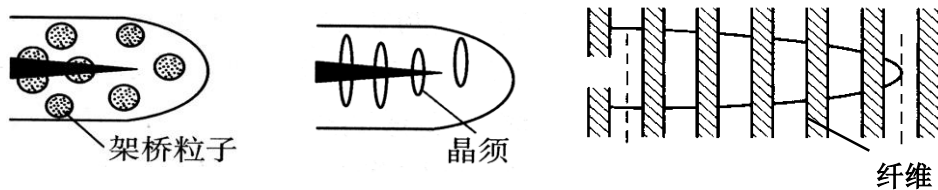


4.2.3 增韧机制 - 尾区耗能



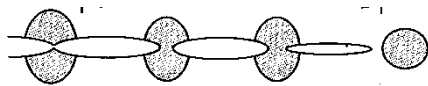
① **塑性变形**：消耗变形功、松弛裂尖应力集中，降低应力强度因子。（金属）

② **裂纹面桥联**：裂纹绕过障碍物并使障碍物保持原状，障碍物在裂纹尖端尾部构成一条韧带（未断裂带），产生裂纹桥接作用。（陶瓷、复合材料）

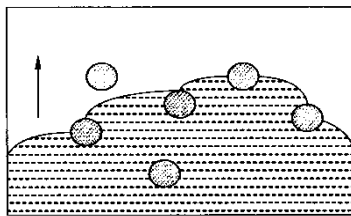


复合材料中裂纹桥联示意图

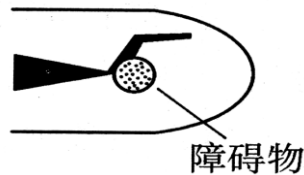
③ **裂纹扩展路径控制**：在裂纹扩展途径上设置一些障碍物（韧性相、颗粒、晶须、纤维等），抑制裂纹扩展。（金属、陶瓷、高聚物、复合材料）



韧性相阻止裂纹扩展



裂纹前缘弓形化



裂纹偏转方向

总结：脆性材料增韧途径

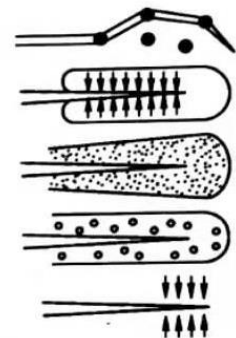


1. 裂纹的偏转现象



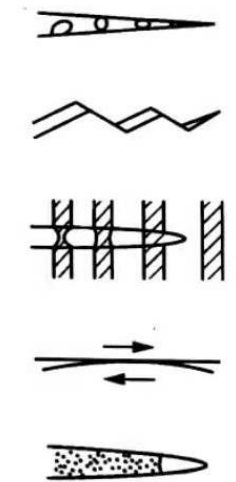
2. 局部封闭, 屏蔽现象

- 相变增韧
- 显微裂纹增韧
- 裂纹墙形成的塑性
- 裂纹应力场内的空洞生成
- 残余应力场
- 裂纹尖端的位错形成的屏蔽



3. 相接触形成的屏蔽现象

- 楔子效应
- 腐蚀产物引起的裂纹闭合
- 裂纹表面粗糙引起的裂纹闭合
- 架桥效应
- 由韧带或纤维产生的韧化
- 滑动效果
- 裂纹面滑动形成的干涉
- 楔子+桥接效果
- 流体压引起的闭合



4. 局部区域的屏蔽与接触屏蔽

- 现象的复合
- 塑性引起的闭合
- 相变引起的闭合

