

断裂及韧化

张 帆


材料科学与工程学院

地 址: 东川路800号, 材料D楼313B

电 话: 13501621296

E-mail: mtsmmc@sjtu.edu.cn



顺风张帆 

中国大陆 上海



扫一扫上面的二维码图案, 加我微信

1 绪论



100 Scientific Puzzles of the 21st Century

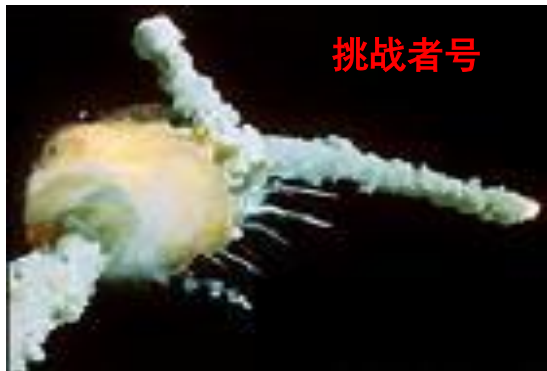
1999年中国118位科学家提出

- 1、对深层物质结构的探索
- 2、协调相对论和量子论的困难
- 3、引力波探测
- 4、质子自旋“危机”及其实验探索
- 5、力学的世纪难题——湍流
- 6、金属微粒中的量子尺寸效应和超导电性
- 7、高温超导电性
- 8、固体的破坏 →
- 9、宇宙结构的形成与星系的起源
- 10、太阳中微子之谜
- 11、活动星核的能量和演化
- 12、星际分子云和恒星的形成
- 13、宇宙常数问题
- 14、太阳活动的起源
- 15、磁元的争辩
- 16、.....

●重要性

●复杂性

断裂研究的重要性



挑战者号



MD11货机



巴哈马油轮



京广线铁轨



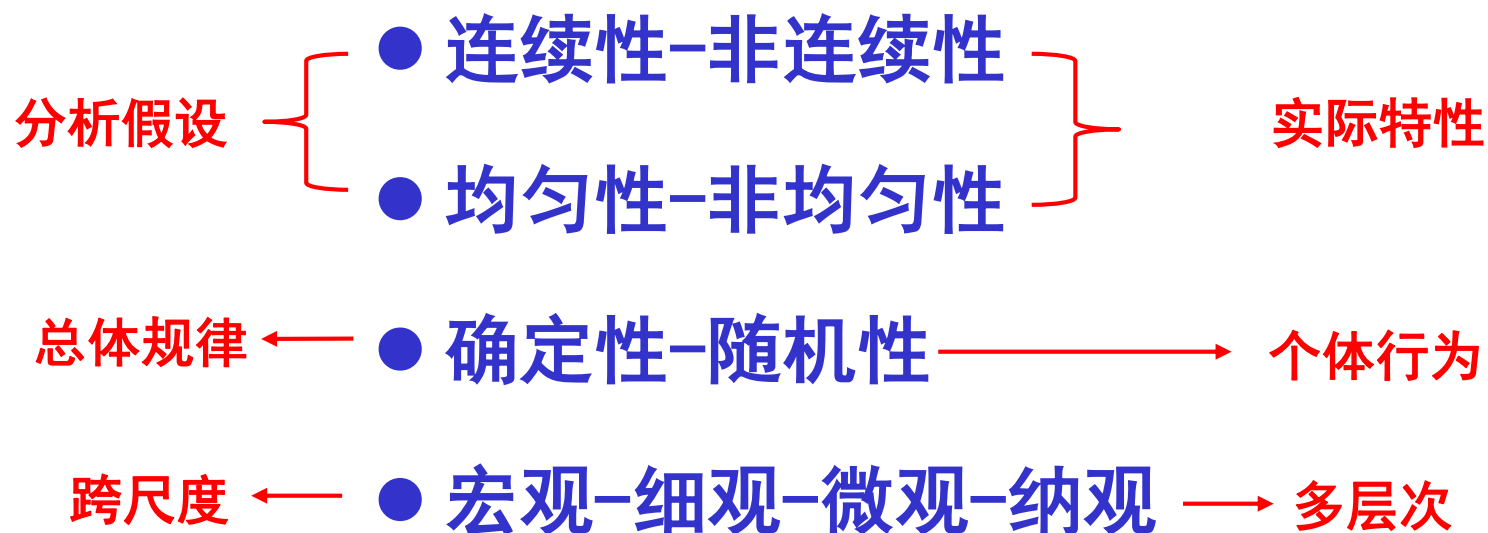
上海楼倒倒



阳明滩大桥

大型工程结构的断裂实例







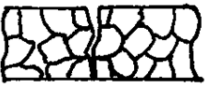
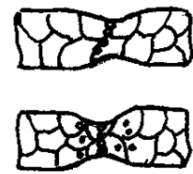
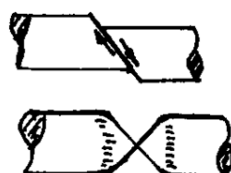
断裂研究的复杂性



1.1 断裂类型

工程学角度
(宏观)

材料学角度
(微观)

分类方法	断裂名称	断裂示意图	断裂特征
按断前变形量	脆性断裂 Brittle fracture		断裂前无明显塑性变形，断口光亮呈结晶状。
	延（韧）性断裂 Ductile fracture		断裂前有明显塑性变形，断口灰暗呈纤维状。
按断裂面取向	正断 Orthogonal fracture		宏观断面垂直于最大正应力。
	切断 Shear fracture		宏观断面平行于最大切应力。
按裂纹扩展路径	穿晶断裂 Transgranular fracture		裂纹在晶粒内部扩展。
	沿晶断裂 Intergranular fracture		裂纹沿晶粒边界扩展。
按断裂机制	解理断裂 Cleavage fracture		属脆性穿晶断裂，断裂面沿解理面分离。
	微孔聚合断裂 Microvoid coalescence fracture		沿晶界微孔聚合导致沿晶韧性断裂； 晶粒内微孔聚合导致穿晶韧性断裂。
	纯剪切断裂 Pure shear fracture		在单晶体中，断裂面沿滑移面分离； 在多晶体和高纯金属中，断裂由缩颈引起。



1.2 断裂强度

完整晶体：

$$\sigma_{th} \approx \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a_0}}$$

弹性模量
比表面能
晶格间距

脆性固体（玻璃、陶瓷）：

$$\sigma_{Griffith} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a_1}} \approx \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a_1}}$$

微裂纹尺寸

延性固体（金属）：

$$\sigma_{Orowan} = \sqrt{\frac{E2(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a_1}} \approx \sqrt{\frac{2E\gamma_p}{\pi a_1}} \approx \sqrt{\frac{E\gamma_p}{a_1}}$$

带裂纹固体：

$$\sigma_c = \frac{1}{Y} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a_2}}$$

断裂韧度
宏观裂纹尺寸
裂纹形状因子
比塑性功

光滑试样：

延性：

$$\sigma_b$$

$$(\sigma_b > S_k)$$

脆性：

$$\sigma_c (= \sigma_b)$$

实验值

1.3 韧性

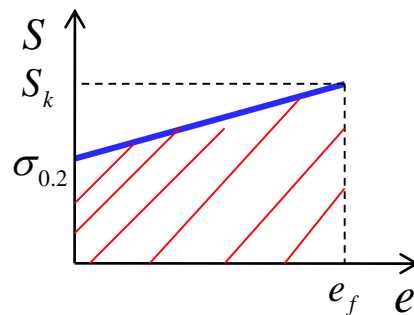


韧性：材料在变形和断裂的过程中所消耗的能量（功）

- 光滑试样

- 静力韧度 (a)

$$a = \frac{S_k + \sigma_{0.2}}{2} \cdot e_f$$



- 缺口试样

- 冲击韧度 (a_K)

$$a_K = \frac{A_K}{F_N}$$

$$A_K = G(h - h')$$

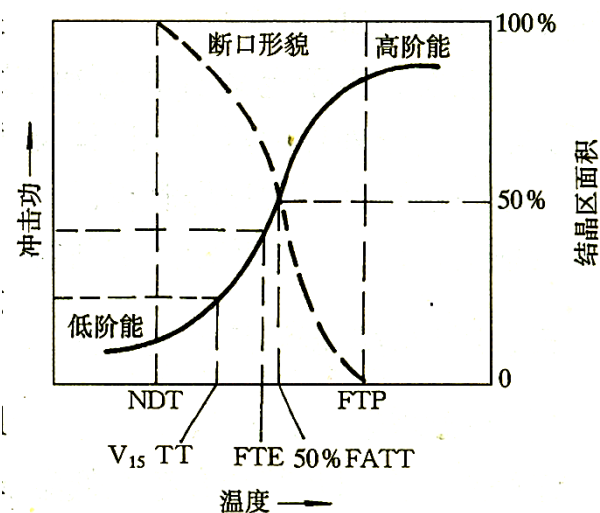
- 韧-脆转变温度 (T_C)

- 缺口敏感度 (NSR)

$$q_e = \frac{\sigma_{bN}}{\sigma_b}$$

- 裂纹试样

- 断裂韧度 (K_{IC} 、 G_{IC} 、 J_{IC} 、 δ_C)



1.4 断裂历程、断裂试验、断裂性能参数



1→5: 光滑试样

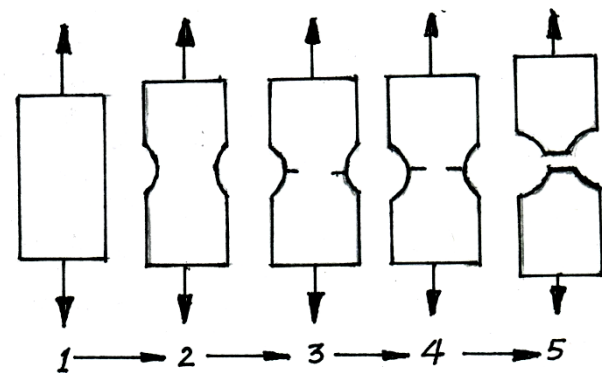
$$\sigma_b \quad S_k$$

2→5: 缺口试样

$$\sigma_{bN} \quad NSR \quad a_K \quad T_C$$

3→5: 裂纹试样

$$K_C \quad G_C \quad J_C \quad \delta_C$$



断裂历程示意图

2→5: 缺口疲劳

2→3: 疲劳裂纹萌生寿命 N_i

3→5: 疲劳裂纹扩展寿命 N_p

$$\left. \begin{array}{l} N_i \\ N_p \end{array} \right\} N_{total} = N_i + N_p$$

3→4: 裂纹扩展

$$\text{疲劳裂纹扩展速率} \quad \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad \Delta K_{th} \quad C \quad n$$

$$\text{SCC裂纹扩展速率} \quad \frac{da}{dt} = C_1 \quad K_{ISCC} \quad C_1$$



1.5 断裂的影响因素-外因

● 受力状态

- 光滑试样、缺口试样（多向应力）
- 厚试样、薄试样（平面应力、平面应变，应变约束）
- 加载方式（应力状态软性系数 α ）
- 循环加载（损伤累积、疲劳）

● 温度

- 高温（回火脆性、蠕变）
- 低温（冷脆）

● 加载速度

- 低速加载（蠕变断裂）
- 高速加载（绝热剪切断裂、剥落破裂）

● 环境介质

- 轻微电化学腐蚀介质（SCC、HIC）
- 液体金属（LMIC）
- 其它介质（原子氧、中子、高能粒子辐照）



1.5 断裂的影响因素-内因

- 原子结构

- 电子排布
- 化学键（共价键、离子键、金属键、分子键）

- 晶体结构

- 滑移系、滑移特征
- 晶格阻力
- 晶体对称性
- 非晶体

- 组织结构

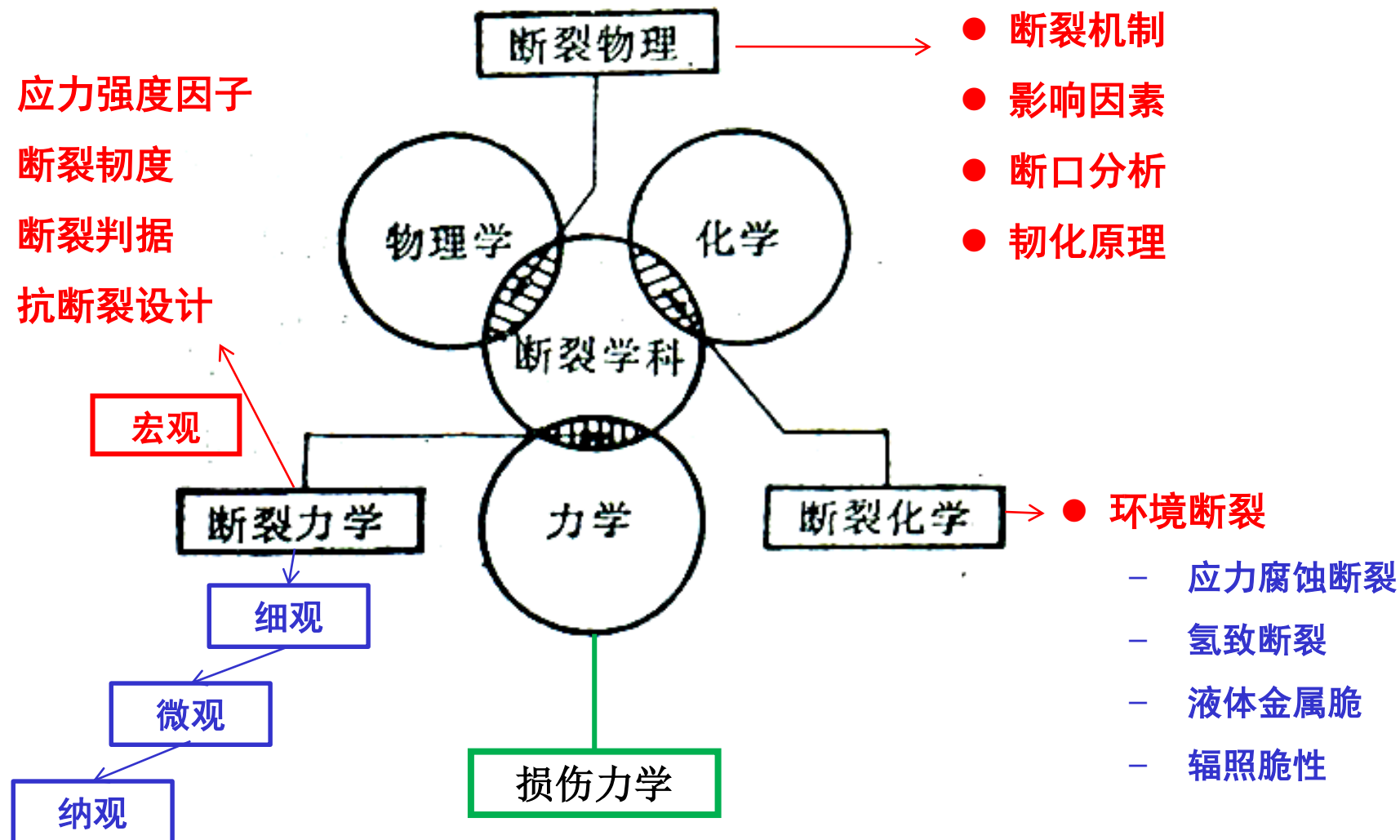
- 晶粒尺寸
- 晶界、相界
- 有序、无序
- 第二相（性质、大小、数量、分布、界面结合）
- 定向组织（织构、纤维化、层状）
- 缺陷（裂纹、气孔）

1.6 断裂科学



- 应力强度因子
- 断裂韧度
- 断裂判据
- 抗断裂设计

- 断裂过程
- 断裂机制
- 影响因素
- 断口分析
- 韧化原理



1.7 关于本课程-教学内容



● 断裂力学

- 断裂力学：线弹性、弹塑性、黏弹性、动态断裂力学
- 损伤力学

● 断裂物理

- 断裂机制：解理断裂、孔聚断裂、韧/脆判据、沿晶断裂
- 断裂进阶：裂纹尖端过程区、裂纹的位错模拟、分形与断裂

● 工程材料的断裂及韧化

- 韧化原理
- 工程材料的韧化：金属材料、陶瓷材料、复合材料

1.7 关于本课程-参考书目



- [1] 张 帆, 讲义 (PDF) ; 课件 (PDF)
- [2] T.L. Anderson, Fracture Mechanics (PDF)
- [3] 范天佑, 断裂理论基础, 科学出版社, 2003
- [4] 酆正能等, 应用断裂力学, 北京航空航天大学出版社, 2012
- [5] 哈宽富, 断裂物理基础, 科学出版社, 2000
- [6] 肖纪美, 金属的韧性与韧化, 上海科学技术出版社, 1980

1.7 关于本课程-考核方式



平时成绩30% + 期末成绩70%

