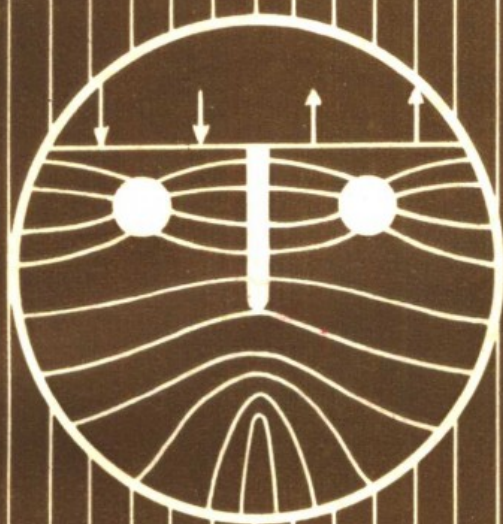




微观断裂力学

伍义生 陈一坚 曾春华

微 观 断 裂 力 学

伍义生 陈一坚 曾春华

一九八七年二月

封面设计：张 树 祥

¥ 3 元 6 角 0 分

微 观 断 裂 力 学

伍义生 陈一坚 曾春华

航 空 工 业 部 科技情报室发行
第六〇三研究所

(西安市七十二号信箱)

西北工业大学印刷厂印刷

序 言

工程结构设计的基本要求是结构在使用期限内不破坏。传统的设计能保证结构不会因弹性失稳、变形过大或屈服而发生破坏，但却保证不了由于材料内部存在的缺陷或裂纹在疲劳载荷的作用下或在低温的环境中扩展而引起的破坏。这种破坏的特点是没有显著的宏观塑性变形，塑性变形集中在裂纹尖端局部的地区，宏观上难以察觉，再加上裂纹扩展极快，往往造成灾难性的破坏。这种破坏可以在机械工程的许多领域中找到，气体管道、压力容器、钢架结构、桥梁、船舶、机车车辆、导弹及飞行器都有这种破坏。钢结构在严重应力集中情况下容易发生脆断，在低温和厚截面的情况下也容易脆断。但这不等于说钢或是铝合金，在十分薄的板材中不会发生灾难性断裂。例如“慧星”号飞机的失事就是因为飞机机身蒙皮上的疲劳裂纹扩展造成的。在任何情况下，工艺制造的缺陷及冶金脆化的产生都会使情况恶化。

正是由于这个原因促进了断裂力学的发展。现在人们已经清楚快速裂纹扩展的发生是由于裂纹尖端达到了某个临界状态引起的。例如在线弹性的情况下，是由于裂纹尖端的应力强度因子 K 达到某个临界值；在弹塑性的情况下，是由于裂纹尖端的张开位移 COD 或裂纹尖端的回路积分 J 达到某个临界值。过去人们只能凭藉缺口试件的冲击试验，通过冲击能量转变曲线对材料的韧性进行定性地评定，现在断裂力学已提供了定量的方法防止脆断的发生，断裂韧性 K_{Ic} 已成为材料韧性的必不可少的指标。

本书的重点在断裂的微观机理方面。因为只有了解了断裂的微观机理才能给断裂力学的发展提供清楚的物理背景。近20年来在宏观断裂力学发展的同时，对断裂的微观机理进行了大量的研究。目前对裂纹尖端的断裂机理和断裂过程已有了一定的认识，根据对断裂机理的了解建立了若干微观力学模型，这些模型已能对材料的宏观特性作出某些估计，并能指导改进断裂韧性的冶金工艺。

现在已经了解到由裂纹快速扩展引起的脆断，从微观的角度来看可以以脆性解理断裂的方式发生，也可以以延性纤维断裂的方式发生。两者都与裂纹尖端的塑性变形，包括晶体内部的滑移分不开，在疲劳裂纹扩展的情况下则与裂纹尖端的循环塑性变形分不开。因此本书所说的工程上的脆断是指构件在低于全面屈服载荷的作用下由快速裂纹扩展产生的断裂，而不是微观意义上的脆断。

由于裂纹尖端的断裂机理和裂纹尖端的变形分不开，例如脆性解理断裂和裂纹尖端塑性区的高度应力强化分不开，延性纤维断裂与裂纹尖端钝化引起的强烈应变也分不开，因此必须掌握裂纹尖端应力应变的特点。只有了解应力应变这些力学因素才能更好地了解断裂的机理，反过来只有了解断裂的机理，才能更好地了解力学因素在裂纹尖端的断裂过程中是怎样发挥作用的，二者密不可分。

本书是在 Knott, J.F. 的 “Fundamentals of Fracture Mechanics” 的基础上，结合近年来在 “Engineering Fracture Mechanics”, “Metallurgical Transactions”, “Metal Science” 等杂志上发表的有关断裂微观机理的论文，及有关断裂的微观基础知识编译和编写的。第一章由曾

春华同志编写，第二、三、四章由陈一坚同志编译，序言、第五、六、七、八、章由伍义生同志编译和编写，全书由伍义生同志统稿。在本书编译和编写过程中，邓蓉英同志曾参加部分翻译工作，并曾得到高桦、王克仁、何明元同志的帮助，在此表示感谢。由于水平所限，错误和缺点请批评指正。

编 译 者

符 号 表

σ	力应
σ_y	屈服应力
σ_b	拉伸强度
σ_f	缺口附近的临界断裂应力
$\bar{\sigma}$	等效应力
σ_m	裂纹顶端塑性区中拉伸流动应力的平均值
σ_{max}	最大应力
σ_a	交变应力幅值
τ	剪应力
τ_y	屈服剪应力
τ_i	位错运动阻力
τ_{eff}	有效剪应力
ϵ	应变
ϵ_T	拉伸失稳应变
ϵ_f	断裂真应变
$\bar{\epsilon}$	等效应变
ϵ_y	屈服应变
$\bar{\epsilon}_r$	缺口尖端塑性应变
ϵ_{nom}	名义应变
ϵ_{true}	真实应变
γ	剪切应变
u	位移
ρ	缺口或裂纹的根部半径

r_y	塑性区半径
r_{ly}	平面应变塑性区半径
d_y	塑性区直径
b	Berger 矢量
B	试件厚度
b_0	原子间距
a	裂纹长或裂纹半长
a^*	有效裂纹长度
a_{cr}	临界裂纹长度
a_{fb}	纤维裂纹长度
L_f	标称应变长度
R_{max}	塑性区的最大范围
R_F	临界塑性区尺寸
W_{mon}	单调加载塑性区
W_{rev}	循环加载反向塑性区
V_f	材料中空穴所占的体积比
d_T	裂纹尖端的特征距离
λ_c	粒子间距
E	弹性模量
n	硬化指数
λ	拉梅常数
μ	剪切模量
ν	泊桑比
γ	表面能
γ_p	裂纹扩展所需的塑性功
C	试件柔度

P_{cy}	全面屈服载荷
M_{cy}	全面屈服弯曲载荷
L	约束系数
Q	强化系数
Q_{cy}	全面屈服强化系数
Φ	应力函数
∇^2	Laplace 算子
W	应变能密度
K	应力强度因子
K^*	名义弹性裂纹的应力强度因子
K_I	I 型应力强度因子
K_{II}	II 型应力强度因子
K_{III}	III 型应力强度因子
K_{cr}	临界应力强度因子
K_{Ic}	平面应变断裂韧性
K_{max}	最大应力强度因子
K_a	应力强度因子的幅值
ΔK	应力强度因子变化范围
ΔK_{th}	门槛应力强度因子
COD	裂纹尖端张开位移
δ	同 COD
δ_i	开裂时裂纹尖端张开位移
δ_{max}	最大载荷时裂纹尖端张开位移
δ_{cr}	临界裂纹尖端张开位移
δ_{Ic}	平面应变状态下的临界裂纹尖端张开位移
δ_{mon}	单调加载下的裂纹尖端张开位移

δ_{rev}	循环加载下的裂纹尖端张开位移
G	应变能释放率
G_{cr}	临界应变能释放率
J	J 积分
J_{Ic}	平面应变状态下的临界 J 积分
ΔJ	J 积分的变化范围
R	应力比
da/dn	裂纹扩展速率
T	温度
NDT	无韧性转变温度
$FATT$	断口形貌转变温度
$T_{0.2}$	全面屈服时产生断裂的温度
T_w	总截面屈服时产生断裂的温度

目 录

第一章 微观断裂的类型

1.1 引言	1
1.2 机械性质的断裂	2
1.2.1 穿晶断裂	2
1.2.1a 穿晶延性断裂	2
1.2.1b 穿晶脆性断裂	7
1.2.1c 疲劳断裂	19
1.2.2 沿晶断裂	33
1.2.2a 沿晶延性断裂	33
1.2.2b 沿晶脆性断裂	34
1.2.2c 沿晶疲劳断裂	36
1.2.3 相界面断裂	38
1.2.4 冲击断裂与过载断裂	39
1.2.5 蠕变断裂	42
1.3 机械物理化学性质的断裂	45
1.3.1 腐蚀疲劳断裂	45
1.3.2 应力腐蚀断裂	50
1.3.3 氢脆断裂	53
1.3.4 低熔点金属接触断裂	57
1.3.5 热疲劳断裂	58
1.4 混合断裂	62
1.5 微观断裂的影响因素	65

1.5.1 应力状态的影响	65
1.5.2 温度的影响	65
1.5.3 金属结构的影响	66
1.5.4 晶粒大小的影响	67
1.5.5 成分和组织的影响	68
1.5.6 介质的影响	70
参考文献	72

第二章 断裂力学的理论基础

2.1 引言	75
2.2 应力	75
2.3 应变	77
2.4 主应力和主应变	79
2.5 弹性体中应力与应变的关系	81
2.6 弹性三轴应力	84
2.7 弹性理论的基础	86
2.8 Airy 应力函数	88
2.9 应力集中的粗略估计	91
2.10 缺口附近的塑性变形	94
2.11 全面屈服载荷	97
2.12 应力强化	108
2.13 复变量	110
2.14 通过复势确定应力和位移	112
2.15 曲线坐标	114
2.16 均匀受力板中的椭圆孔	117
参考文献	120

第三章 裂纹体的应力分析

3.1 引言	122
3.2 裂纹附近的应力	122
3.3 受拉伸的裂纹	125
3.4 受剪切的裂纹	129
3.5 面外应变	130
3.6 应力强度因子	132
3.7 当量弹性裂纹	137
3.8 裂纹尖端的塑性: Dugdal 解	139
3.9 BCS 模型	143
3.10 多项式应力函数	146
3.11 有限差分法	155
3.12 有限元法	161
3.13 缺口试件和裂纹试件在平面应变 状况下的应力分布	165
参考文献	172

第四章 线弹性断裂力学

4.1 引言	175
4.2 理想的断裂强度	175
4.3 Griffith 裂纹	180
4.4 柔度法	189
4.5 应力强度法	191
4.6 准脆性断裂	195
4.7 薄板试验	198

4.8	断裂韧性随厚度的变化	200
4.9	平面应变断裂韧性	204
4.10	影响断裂韧性的一些因素	209
	参考文献	212

第五章 弹塑性断裂力学

5.1	引言	216
5.2	裂纹张开位移的原理	216
5.3	裂纹张开位移的实际测量	219
5.4	裂纹张开位移的测量结果	222
5.5	J 积分的原理	227
5.6	J 积分的定义	231
5.7	裂纹试件的 J 积分	233
5.8	弯曲条件下 J 积分的标定	236
5.9	J_{1c} 断裂准则	238
5.10	结论	239
	参考文献	239

第六章 脆性解理的微观理论

6.1	引言	242
6.2	两种基本的断裂方式	242
6.3	缺口试件的冲击试验和缓慢弯曲试验	243
6.4	脆性解理断裂的临界拉应力准则	246
6.5	临界拉应力的实验测定及临界拉应力 准则的实验验证	252
6.6	解理断裂的微观机理	254

6.7	Petch 的屈服模型	257
6.8	Stroh 的解理断裂理论	258
6.9	Cottrell 的解理断裂理论	260
6.10	Smith 的解理断裂理论	263
6.11	起始于孪晶的解理断裂	265
6.12	研究解理断裂微观理论的意义	266
6.13	Telemen、Wilshaw、Rau 的 K_{Ic} 模型	269
6.14	Ritchie、Knott、Rice 的 K_{Ic} 模型	273
6.15	Curry-Knott 模型	279
6.16	根据临界应力判据估算 K_{Ic} 的广义经验关系	281
6.17	结论	285
	参考文献	285

第七章 延性纤维断裂的微观理论

7.1	引言	288
7.2	从解理断裂向纤维断裂的转变	288
7.3	纤维断裂的形成	290
7.4	空穴的生长	291
7.5	Thomason 模型	294
7.6	纤维断裂的实验观测	296
7.7	纤维断裂的微观机理	302
7.8	Kraft 的应变模型	308
7.9	Thomason 的断裂韧性模型	311
7.10	Rice 和 Johnson 模型	313
7.11	断裂韧性和拉伸性能之间的关系	319

7.12 结论.....	326
参考文献.....	326

第八章 疲劳断裂的微观理论

8.1 前言.....	330
8.2 疲劳破坏的一般特点.....	330
8.3 疲劳破坏的机理.....	332
8.4 疲劳裂纹成核和扩展的模型.....	338
8.5 循环加载下裂纹尖端的塑性区.....	346
8.6 疲劳裂纹扩展和应力强度因子的关系.....	349
8.7 疲劳裂纹扩展与裂纹尖端张开位移的关系.....	355
8.8 疲劳裂纹扩展和 J 积分的关系.....	364
8.9 疲劳裂纹扩展期间的单调断裂模型.....	369
8.10 低应力强度下的疲劳裂纹扩展.....	375
8.11 结论.....	380
参考文献.....	380

第一章 微观断裂的类型

1.1 引言

到目前为止，人们对于金属的断裂大体上是从三种不同尺度去进行研究的：一是原子尺度（ $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 厘米），另一是微观尺度（ $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 厘米），还有一种是宏观尺度（ 10^{-2} 厘米以上）。宏观尺度的断裂研究，是利用连续介质力学来进行的，它把金属看成均匀物体，不考虑其非均质性，一般也不考虑其各向异性，目前宏观断裂力学的研究已取得了较大的进展。微观尺度的断裂研究，是指利用电子显微镜、光学显微镜或其他物理方法（如 x 射线衍射等）来对金属的磨片和断口进行观察和测定，进一步进行分析和计算。这种微观方法可以揭示断裂的许多微观特征和定量参数，它能把原子尺度的位错理论与宏观尺度的连续介质力学联系起来。它可以探索金属的内部组织，如基体的特性和晶粒大小，二相粒子的性质、大小和分布，晶界和相界等对断裂的影响，还能研究受力状况与外部环境对断裂的影响。

断裂现象和造成断裂的原因是十分复杂的，它不仅涉及结构件的形状、尺寸及其在制造、使用和贮存过程中的外部环境、介质和载荷条件，而且还涉及结构件内部裂纹的形状、位置、大小及其所用材料的内部组织和结构等。正因为断裂所涉及的因素很多，所以人们对金属断裂的分类也是多种多样的^[8~10]。