

王 铎 主 编

断裂力学

内 容 提 要

本书阐述断裂力学的基本原理和工程应用。第一、二章阐述线弹性和弹塑性断裂力学；第三章阐述断裂韧度的测试方法；第四、五、六章分别阐述疲劳、蠕变、应力腐蚀和腐蚀疲劳的裂纹扩展规律；第七、八、九、十章为工程应用部分，包括止裂问题，大型焊接结构、旋转构件、压力容器和管子的断裂安全设计。

本书可供工程技术人员阅读，也可作为高等学校动力、机械、宇航和力学等类型专业断裂力学课程的参考书。

断 裂 力 学

王 铎 主 编

☆

广 西 人 民 出 版 社 出 版

(南宁市河堤路14号)

广西新华书店发行 柳州市印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 18 印张 402 千字

1982年2月第1版 1982年2月第1次印刷

印 数 1—1,800 册

书号: 15113·88 定价: 1.92 元

目 录

序.....	(1)
主要字符表	(3)
绪 言	(5)
第一章 线弹性断裂力学	(14)
§ 1—1 能量平衡理论	(14)
§ 1—2 裂纹尖端附近的应力场和位移场	(21)
§ 1—3 脆性断裂的K准则	(37)
§ 1—4 线弹性断裂力学在小范围屈服时的推广	(42)
§ 1—5 复合型断裂准则	(49)
* § 1—6 普遍形式的复变应力函数法求应力强度因子	(66)
* § 1—7 位错连续分布理论求应力强度因子	(72)
§ 1—8 应力集中法计算应力强度因子	(77)
§ 1—9 边界配置法计算应力强度因子	(79)
§ 1—10 有限元法计算应力强度因子	(87)
§ 1—11 埋藏裂纹及表面裂纹的应力强度因子计算 公式	(100)
* § 1—12 薄板和薄壳的应力强度因子的计算	(118)
§ 1—13 求应力强度因子的迭加原理及有关应力强度因子资料	(137)
附录 I 弹性理论基础.....	(157)
附录 II 复变函数的基础知识.....	(163)
附录 III 有限元法基础知识.....	(168)
附录 IV 晶体中位错的应力场.....	(177)

第二章 弹塑性断裂力学	(183)
§ 2—1 塑性区条形简化模型	(185)
§ 2—2 COD 准则	(189)
§ 2—3 J 积分原理及其准则	(204)
§ 2—4 平面应力断裂的 R 阻力曲线	(225)
* § 2—5 非线性断裂韧度 $\bar{G}_c$	(229)
* § 2—6 裂纹尖端的弹塑性应力分析	(234)
* § 2—7 弹塑性断裂分析的有限元法	(244)
第三章 断裂力学实验	(254)
§ 3—1 平面应变断裂韧度 K_{Ic} 的测试 (标准方法)	(255)
§ 3—2 表面裂纹断裂韧度的测试	(267)
§ 3—3 平面应力断裂韧度 K_c 的测试	(272)
§ 3—4 应力强度因子 K_I 的柔度标定法	(279)
§ 3—5 临界裂纹张开位移 δ_c 的测试	(283)
§ 3—6 临界 J 积分值的测试	(289)
附录 I 几种常用试样的应力强度因子	(293)
附录 II 夹式引伸计的设计和制作	(297)
第四章 疲劳裂纹的扩展	(303)
§ 4—1 概 述	(303)
§ 4—2 疲劳裂纹扩展速率	(308)
§ 4—3 影响疲劳裂纹扩展速率的因素	(321)
* § 4—4 应变疲劳	(329)
§ 4—5 疲劳裂纹扩展速率的测试	(343)
第五章 蠕变裂纹的扩展	(348)
§ 5—1 概 述	(348)
§ 5—2 蠕变裂纹扩展速率公式	(353)
§ 5—3 影响蠕变裂纹扩展速率的因素	(361)

* § 5—4	蠕变裂纹扩展速率的解析分析.....	(365)
* § 5—5	求蠕变裂纹扩展速率的有限元法.....	(376)
§ 5—6	蠕变裂纹扩展速率的测试方法.....	(381)
第六章	应力腐蚀与腐蚀疲劳裂纹扩展	(384)
§ 6—1	应力腐蚀裂纹扩展的特征及过程.....	(385)
§ 6—2	应力腐蚀裂纹扩展速率.....	(387)
§ 6—3	在应力腐蚀条件下的安全设计.....	(401)
§ 6—4	腐蚀疲劳裂纹扩展速率.....	(406)
§ 6—5	腐蚀疲劳裂纹扩展速率的近似计算与理论 公式.....	(409)
§ 6—6	腐蚀疲劳裂纹扩展寿命的计算.....	(420)
§ 6—7	应力腐蚀与腐蚀疲劳试验.....	(424)
附录 I	表1 产生应力腐蚀的合金—介质系统表.....	(428)
附录 II	表2 各种材料的 K_{ISCC} 值.....	(433)
第七章	止裂问题	(437)
§ 7—1	止裂的理论基础.....	(437)
§ 7—2	止裂的方法.....	(448)
§ 7—3	止裂的实验.....	(452)
第八章	大型焊接结构断裂安全设计	(457)
§ 8—1	焊接结构脆断的断裂力学分析.....	(457)
§ 8—2	焊接结构的脆断温度设计.....	(475)
第九章	压力容器与管子的断裂安全设计	(481)
§ 9—1	概 述.....	(481)
§ 9—2	压力容器的脆性断裂.....	(483)
§ 9—3	压力容器的韧性断裂.....	(493)
§ 9—4	断裂前渗漏的设计.....	(507)
§ 9—5	剩余寿命的估计.....	(509)

§ 9—6	断裂的传播.....	(516)
§ 9—7	断裂分析图.....	(521)
第十章	大型旋转构件的断裂安全设计.....	(526)
§ 10—1	概 述	(528)
§ 10—2	材料的断裂韧度	(528)
§ 10—3	裂纹尖端名义应力的计算	(536)
§ 10—4	应力强度因子公式	(538)
§ 10—5	缺陷的简化	(547)
§ 10—6	断裂准则的选择与安全校核	(552)
§ 10—7	疲劳寿命的计算	(558)
附 录	表1.几种几何和物理量的单位名称和符号....	(569)
	表2.单位换算表.....	(570)

序

本书是在1976年我们编写的“工程断裂力学”讲义的基础上，经过修改和补充写成的。原“工程断裂力学”讲义侧重讲述断裂力学的基本概念、内容和工程应用。在这次改写中，我们对工程应用的内容，作了一些修改，同时增加了与工程应用有关的两章：蠕变裂纹扩展速率；应力腐蚀和腐蚀疲劳裂纹扩展速率。另外，在理论基础方面，对第一章和第二章作了较多的补充，主要是想使本书除供初学者阅读外，力争能够作为工程技术人员、高等学校的学生、研究生和教师的参考书。为了避免初学者在数学和弹塑性理论上遇到的困难，我们在一些节、段和公式证明上记以星号（*），初学者可以删去，并不影响对断裂力学基础知识的学习。

本书是哈尔滨工业大学力学教研室断裂组同志集体编写的，由王铎同志主编，各章执笔人为：第一章查子初和杜善义同志；第二、五、七章王铎同志；第三章张人洪同志；第四、八章王殿富同志；第六、九章查子初同志；第十章袁祖培同志。查子初同志对全部书稿作了校订工作。本书全部插图的描图工作都由徐和亮同志担任。

在编写过程中，我们参考了北京钢铁研究院编写的“工程断裂力学”上册，西南交通大学、重庆大学、北京航空学院等兄弟院校编写的“断裂力学”讲义，吸取了他们许多宝贵的经验。断裂力学是新近才发展起来的一门学科，一些问题还没有搞清楚，又因为我们水平有限，编写时间仓促，因

此不可避免地会出现一些错误，请读者阅读后，提出批评意见，供以后改正。

编 者

一九七九年三月

、 主 要 字 符 表

字 符	字 符 意 义	字 符	字 符 意 义
a, c, l	裂纹尺寸	K_{min}	最小应力强度因子
a_c	临界裂纹尺寸	ΔK_{th}	门坎值
a_0	初始裂纹尺寸	ΔK_{thcF}	腐蚀疲劳门坎值
$\overline{a}$	当量裂纹尺寸	M	鼓胀系数
$\frac{da}{dN}$	疲劳裂纹扩展速率	M_1, M_2	前、后表面修正系数
$\left[\frac{da}{dN} \right]_{CF}$	腐蚀疲劳裂纹扩展速率	n	蠕变指数、硬化指数
$\frac{da}{dt}$	腐蚀（蠕变）裂纹扩展速率	N_i	疲劳裂纹发生循环数
B, t	试样厚度、厚度	N_p	疲劳裂纹扩展循环数
E	杨氏弹性模量	N_f	破断寿命（破断循环数）
e_s	屈服应变	P	势能
G_I, G_{II}, G_{III}	能量释放率	R	塑性区尺寸
G_{IC}	I 型能量释放率临界值	$R(a)$	R 阻力曲线
J	J 积分	r_y	裂纹修正长度
J_{IC}	J 积分临界值	S	应变能密度因子、试样跨度
K_I, K_{II}, K_{III}	应力强度因子	T	绝对温度
K_{IC}	I 型平面应变断裂韧度	T_0	相对温度
K_c	平面应力断裂韧度	$\overline{T}$	边界力
K_{ISCC}	应力腐蚀界限应力强度因子	T_i	边界力分量
K_{max}	最大应力强度因子	t_r	断裂寿命
		U	应变能

主要字符表

字 符	字 符 意 义	字 符	字 符 意 义
$u(\Delta K)$	激活能	$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	直角坐标应变分量
u, v, w	位移分量	$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	应变幅度
V	极限速度	$\Delta \varepsilon$	弹性应变幅度
W	应变能密度、外力功、试样宽度	$\Delta \varepsilon_e$	塑性应变幅度
x, y, z	直角坐标	$\Delta \varepsilon_p$	应变率
Y	形状系数	$\dot{\varepsilon}$	局部应变率
$\sigma_{ij} \left(\begin{smallmatrix} i \\ j \end{smallmatrix} = 1, 2, 3 \right)$	应力分量	$\dot{\varepsilon}_{loc}$	临界应变
$\sigma_i (i = 1, 2, 3)$	主应力分量	ε_f	相当应变
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	直角坐标应力分量	ε_{eq}	应力函数、第二类完全椭圆积分
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	极坐标应力分量	Φ	剪切弹性模量
$\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$	剩余强度 (临界应力)	μ	泊松比、指数
σ_c	无限远处应力	ν	单位表面能
σ_∞	屈服应力	γ	缺口曲率半径
σ_s	强度极限	ρ	I 型裂纹尖端张开位移
σ_b	应力幅度 (名义应力幅度)	δ_I	张开位移临界值
$\Delta \sigma$	屈服时 σ_s 的值	δ_{IC}	张开位移开裂值
σ_s	净断面应力	δ_i	张开位移最大值
σ_{net}	毛断面应力	δ_{max}	积分回路
σ_{gross}	相当应力	Γ	位移 (施力点)
σ_{eq}	参考应力	Δ	连续度
σ_d	应变分量	φ	损伤度
$\varepsilon_{ij} \left(\begin{smallmatrix} i \\ j \end{smallmatrix} = 1, 2, 3 \right)$		ω	破损前沿
		Σ	

绪 言

1. 断裂力学的产生

断裂力学和其他科学一样，是在生产实践中产生和发展的，是近一、二十年才发展起来的一门新兴学科。它应用力学成就，研究含缺陷材料和结构的破坏问题。由于它与材料或结构的安全直接有关，因此尽管它出现的时间很短，但实验和理论均有迅速的发展，并已开始为生产服务。

早在二十世紀初期，人们就已经注意结构的脆性断裂问题。1920年，英国人格里菲斯 (Griffith) 试想解释玻璃的实际强度远低于理论强度的原因。他以材料内部存在缺陷的观点，提出在一定条件下，微小缺陷或裂纹将失稳扩展，导致材料或结构的破坏。他的理论仅适用于象玻璃这样的完全脆性材料，而这种材料在工程中极为少见，所以没有得到推广和发展。

随着现代生产的发展，新材料、新产品和新工艺不断出现，在产品安装、试验和运行过程中，往往发生脆断事故，多数在低于材料的屈服极限时发生，造成的损失特别严重。这些破坏事故用传统的强度观点和方法无法分析和衡量。

从大量破坏事故的研究中，人们发现低应力脆性破坏的主要原因是因为实际结构材料中存在各种缺陷或裂纹，这些裂纹的存在显著地降低了结构材料的实际强度。

从下面几例可看出裂纹对结构破坏的影响：

(1) 1943—1947年间, 美国近500艘全焊船中, 发生1000多起脆性破坏, 其中238艘完全报废, 有的甚至断成两截。为了分析原因, 从100多个损坏处割下试件进行试验, 结论是: 事故总是在焊接缺陷等应力集中处产生; 断裂发生的温度是在气温降到 -3°C 和水温降到 4°C ; 破坏处的冲击韧性 a_k 值低于未破坏处的 a_k 值。

(2) 1947年苏联 4500m^3 的大型石油储罐底部和下部壳连接处, 在气温降到 -43°C 时, 形成大量裂纹, 造成储罐的破坏。事后的分析认为: 在焊接处, 存在由焊裂、焊瘤和未焊透引起的各种应力集中; 在温度降低时, 储罐材料 CT_3 钢的塑性明显下降; 由于焊接和罐的内外温差, 造成效高的内应力。

(3) 五十年代初, 美国北极星导弹固体燃料发动机壳体, 在试验时发生爆炸, 材料用 $\sigma_s=140\text{kg/mm}^2$ 的高强度合金, 传统的强度和韧性指标全部合格, 而且爆炸时的工作应力远低于材料的许用应力。事后多方面研究认为: 破坏由宏观裂纹(深为 $0.1-1\text{mm}$)引起的, 裂纹源可能是焊裂、咬边、杂质和晶界开裂等。

(4) 1969年美国F—111飞机在执行训练飞行途中, 作投弹恢复动作时, 左翼脱落, 招致飞机坠毁。当时的飞行速度、总重量和过载等指标远低于设计指标, 主要因为制造时热处理不当, 机翼枢轴出现缺陷, 漏检后经疲劳载荷作用, 裂纹继续扩展, 最后造成低应力破坏。

从上述几个典型事故看出, 脆断总是由宏观裂纹引起。这种裂纹或由冶金夹杂物、或由加工和装配、或由疲劳载荷、或由工作环境(如介质、高温等)而产生。对于大多数结构和零件来说, 宏观裂纹的存在是不可避免的。有裂纹材

料的强度，取决于材料对裂纹扩展的抗力，这种抗力由材料内部属性决定。应用弹、塑性理论和新的实验技术，研究裂纹尖端附近的应力、应变场和裂纹的扩展规律，就产生了新的力学分支——断裂力学。

2. 断裂力学的研究对象

我们知道，构件的断裂往往可以分成以下几个阶段：

(1) 裂纹的生成——由于环境（疲劳、腐蚀介质、高温和联合作用）的影响，在构件的圆角应力集中处，经过一段时间产生宏观微小裂纹；或材料中原来就存在缺陷；或在加工过程中出现裂纹。

(2) 裂纹的亚临界扩展——由于环境的影响，在工作过程中，宏观微小裂纹逐步缓慢地扩展。

(3) 断裂开始——在工作应力下，裂纹逐渐扩展，达到临界长度，突然失稳。

(4) 断裂传播——失稳的裂纹以高速传播，速度可达在材料中声速的四分之一。

(5) 断裂停止——裂纹失稳后，可以穿过整个结构，使构件破坏；或在一定条件下，裂纹停止。

以上是宏观裂纹发生和发展的几个阶段。断裂一词的含义很广，应包括宏观的断裂现象和微观结构破坏机理。断裂力学从力学侧面研究宏观的断裂现象，包括宏观裂纹的生成、扩展、失稳开裂、传播和止裂。微观结构的破坏机理属于断裂物理的研究范围。但是，近代趋向是宏观断裂现象应该和微观断裂过程联系起来，否则机理不清，许多现象难以解释。因此，目前它们之间的分界线已不那么明显。

从工程应用角度看，断裂力学与材料力学类似，是材料

力学的发展与充实。断裂力学是在大量实验的基础上研究带裂纹材料的断裂韧度（属于广义的材料强度范围），研究带裂纹构件在各种工作条件下裂纹的扩展、失稳和止裂的规律，并应用这些规律进行设计，以保证产品的构件安全可靠。

断裂力学的理论基础是弹性力学、塑性力学和粘弹性力学等。

断裂力学和材料力学的差别在于材料力学研究完整的材料，而断裂力学则研究带裂纹的材料。虽然，断裂力学是材料力学的发展和补充；但是，断裂力学的设计思想与材料力学的设计思想不同，其差别可从以下几方面来看：

a) 静载荷情况

在静载荷作用下，传统的强度条件是要使最大计算应力小于材料强度指标，即

$$\sigma_{max} \leq \frac{\sigma_s}{n_s} \quad (\text{屈服})$$

$$\sigma_{max} \leq \frac{\sigma_b}{n_b} \quad (\text{破坏})$$

式中， σ_s 和 σ_b 分别为材料的屈服极限和强度极限， n_s 和 n_b 为相应的安全系数。

经大量带表面裂纹的高强度钢试件进行拉伸试验，证明其断裂应力与裂纹深度 a 的平方根成反比，即

$$Y\sigma_c\sqrt{\pi a} = K_{IC} \quad (0-1)$$

式中， σ_c 是试件所受的断裂应力； a 是裂纹深度； Y 是形状系数，与试件几何形状、载荷条件和裂纹位置有关；常数 K_{IC} 是材料的断裂韧性，表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的一个物理参量。已知裂纹深度 a ，则上式写成

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{\pi a}} \quad (0-2)$$

或已知工作应力 σ ，则有

$$a_c = \frac{K_{IC}^2}{Y^2 \pi \sigma^2} \quad (0-3)$$

前一式中的 σ_c 称为剩余强度，后一式中的 a_c 称临界裂纹尺寸。

断裂应力和裂纹深度的关系，如图0—1所示。由图看出，随裂纹深度的增加，断裂应力降低很快。

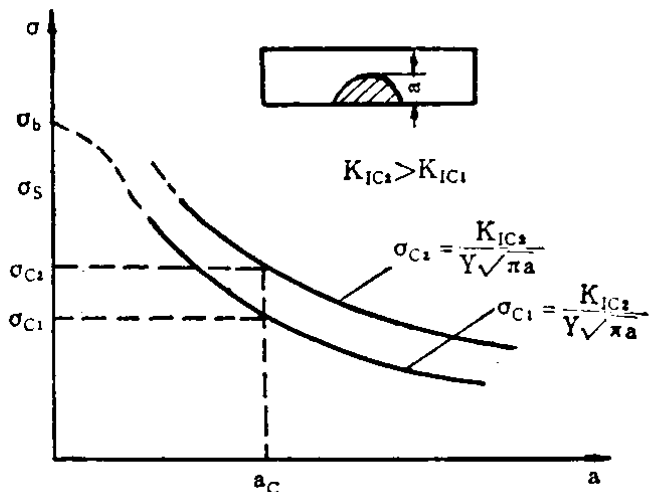


图0—1 σ_c 与 a_c 关系曲线

令式(0—1)中 $Y\sigma\sqrt{\pi a} = K_I$ ，则断裂力学中的裂纹失稳准则是

$$K_I \leq \frac{K_{IC}}{n} \quad (0-4)$$

式中， K_I 称为裂纹尖端的应力强度因子， n 是相应的安全系数。

因为断裂力学考虑了裂纹的存在，根据裂纹失稳准则得出的断裂应力，与传统的强度条件得出的结果不一定相同。例如，有两种材料：第一种材料 σ_s 和 σ_b 较高，但是断裂韧度 K_{IC1} 比较低；第二种材料 σ_s 和 σ_b 较低，但是断裂韧度 K_{IC2} 较高，如图0—1所示。则在相同的裂纹深度情况下，后一种材料的断裂应力较高，选用这种材料有利。所以，盲目地追求高强度材料，对构件并不能保证安全可靠。

b) 循环载荷情况

传统的疲劳设计，是用光滑试件作 $S-N$ 曲线，求出下界限应力 σ_{-1} ，称为疲劳极限，如果最大工作应力满足下式即可

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{-1} / n_{-1}$$

n_{-1} 为循环载荷时的安全系数并且认为凡有缺陷的构件一件也不能应用。

断裂力学的观点是：带裂纹的构件，只要裂纹不到临界长度（或深度），仍可使用；在循环载荷作用下，裂纹缓慢扩展，直至达到临界长度时，构件才失稳破坏。作用载荷每循环一周，裂纹的扩展量 $\frac{da}{dN}$ 是材料的一个指标，表示材料

抵抗裂纹扩展的能力。

断裂力学区分两种寿命，认为材料的破断寿命为

$$N_f = N_i + N_p$$

式中， N_i 为裂纹发生寿命， N_p 为剩余寿命。如初始裂纹深度 a_i 、临界裂纹深度 a_c 和裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 已知，则剩余寿命由以下积分

$$N_p = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{\left(\frac{da}{dN}\right)}$$

求出。大量试验证明

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

其中， C 与 m 是材料常数， $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 是循环载荷的最大与最小应力强度因子的差，或称应力强度因子幅度。

在断裂力学中，与疲劳极限相当的是循环载荷的门坎值 ΔK_{th} ，当应力强度因子幅度小于门坎值时，裂纹不扩展。

这两个材料指标 $\frac{da}{dN}$ 和 ΔK_{th} 都可供设计应用。

由此可见，断裂力学对在循环载荷作用下的研究，充实和深化了材料力学中的疲劳理论。

c) 腐蚀介质下的情况

在腐蚀介质中，受拉应力构件，传统设计是用光滑试件在腐蚀介质中作实验，记录作用的应力和破断时间曲线，即 $\sigma-t$ 曲线，以曲线的下界限应力值作为设计标准。只要工作应力小于这一临界应力，构件是安全的。在应力腐蚀情况下，传统设计不允许构件存在裂纹。

断裂力学从带裂纹构件的实验研究出发，认为在腐蚀介质中，受拉应力构件是否安全，要看裂纹的应力强度因子 K_I 是否达到或超过应力腐蚀界限应力强度因子 K_{ISCC} ，即裂纹稳定条件为

$$K_I \leq K_{ISCC}$$

K_{ISCC} 是材料在应力腐蚀条件下，抵抗裂纹失稳断裂的能力的指标。

材料的另一指标是应力腐蚀裂纹扩展速率 $\frac{da}{dt}$ ，表示材料抵抗应力腐蚀裂纹扩展的能力。与疲劳中剩余寿命的求法相同，在应力腐蚀情况下，构件的剩余寿命为

$$t_r = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{\left(\frac{da}{dt}\right)}$$

综上所述，断裂力学出现以后，我们对宏观的断裂规律有了进一步的认识，对传统的设计思想进行了改善与补充。不仅对有缺陷构件进行剩余强度和寿命的分析，以保证产品安全可靠，或制定正确合理的验伤标准。而且，在选材、改善工艺、制造新材料等方面的研究，也逐渐地在发挥其作用。