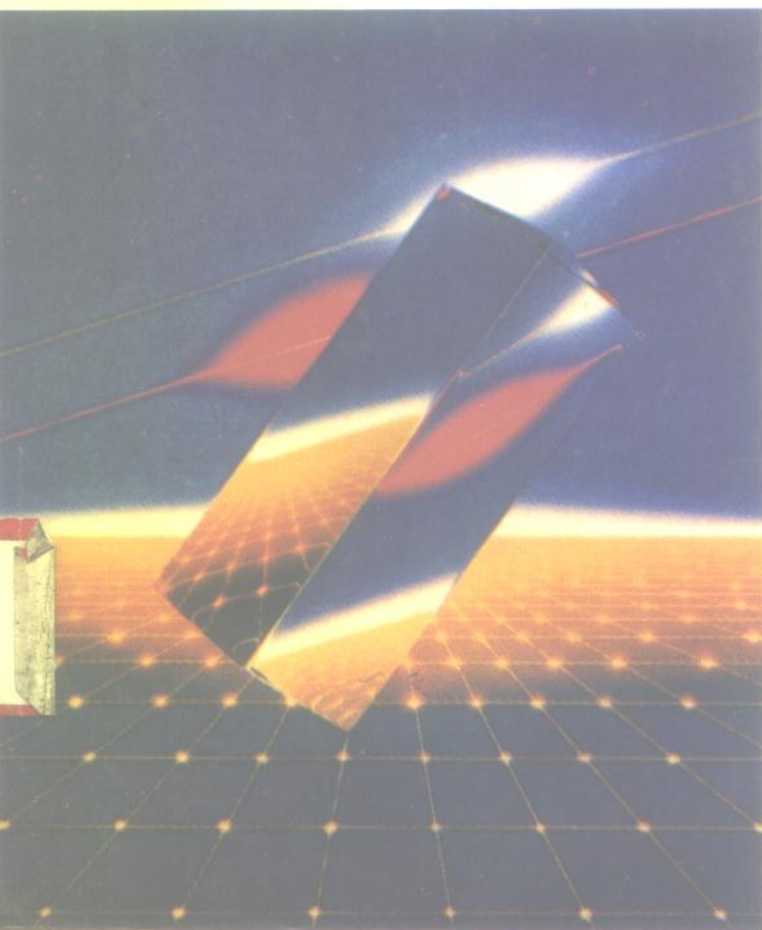


断裂力学应用 实例

〔英〕 J. 诺特 P. 威西 著



科学出版社

断裂力学应用实例

〔英〕 J. F. Knott P. A. Withey 著

张运全 唐国翌 译

科学出版社

1 9 9 5

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了断裂力学理论在工程结构件的安全设计、选材及服役过程中心检测和评估等方面的应用。书中结合大量工程实例向读者说明在防止工程构件失效过程中,断裂力学分析的具体步骤、方法和程序。此外还介绍了断裂韧性的测试以及应用断裂力学理论分析疲劳裂纹生长过程和对含裂纹构件进行寿命评估。

John Knott and Paul Withey

Fracture Mechanics: Worked Examples

The Institute of Materials 1993

断裂力学应用实例

(英) John Knott, Paul Withey 著

张寿然 魏国盛 译

责任编辑 徐宝星

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京朝阳大地印刷厂印刷

蓝地公司激光照排

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年3月第一版 开本:850×1168 1/32

1995年3月第一次印刷 印张:3 5/8

印数:1—2 000

字数:88 000

ISBN 7-03-004459-2/O · 768

定价:6.80元



序 言

当前,断裂力学已迅速地从侧重于理论的研究发展成为在构件设计、服役中的检测以及材料安全使用等领域中的一门重要的实用性学科。

本书的主要目的是通过一系列工程实例向读者介绍断裂力学的概念,阐述断裂韧性值是怎样推导出来的,并指出如何应用断裂韧性数据来防止构件在服役过程中发生失效。

本书不是针对断裂力学专家,而是主要适用于那些希望学习断裂力学学科并掌握其应用方法的人员。

致 谢

作者非常感谢 D. Elliott 博士对本书第一版所做的工作以及对这次第二版所给予的帮助和鼓励。

作者也对 J. T. Barnby 教授, R. S. Brooks 博士, R. S. Pilkington 博士, C. A. Hipsley 博士, E. F. Walker 先生, S. E. Webster 先生以及所有对本书的编辑出版做出贡献的各位朋友致以衷心的感谢。

译者也非常感谢在翻译此书的过程中赵量先生和丁伟先生所给予的帮助。

目 录

第一章	引言	(1)
第二章	背景知识	(4)
第三章	断裂韧性测试	(36)
第四章	屈服断裂力学	(49)
第五章	疲劳裂纹扩展	(84)
第六章	结束语	(98)
参考文献		(101)
附录 1	F.Knott 教授简介	(103)
附录 2	英国材料学会简介	(105)

应用实例

2a. 最小缺陷尺寸的计算	(6)
2b. 断裂应力的计算	(7)
2c. 应力强度因子的推导	(9)
2d. 虚功原理	(10)
2e. G 和 K 的等效性	(11)
2f. 带有中心埋藏裂纹的板材的断裂	(13)
2g. 单边缺口弯曲试样(SEN)的断裂	(16)
2h. 紧凑拉伸试样(CTS)的断裂	(16)
2i. 试样尺寸(1)	(18)
2j. 试样尺寸(2)	(19)
2k. 用柔度法推导 G	(21)
2l. 柔度和断裂韧性	(22)
2m. 无限大板中裂纹的权函数推导	(24)
2n. 含裂纹的弯曲试样的权函数的计算	(25)
2o. 无限大板中的裂纹和孔边裂纹的应力强度因子的比较	(27)
2p. 一个颗粒周围的残余应力	(29)
2q. 晶粒尺寸对屈服应力的影响	(32)
2r. 相变韧化对断裂韧性的影响	(33)
3a. K_{IC} 的测定(三点弯曲试样).....	(41)
3b. K_{IC} 的测定(紧凑拉伸试样)	(41)
3c. 表面裂纹容限尺寸的计算	(46)
3d. 已知缺陷的断裂应力计算	(47)
4a. 裂纹尖端局部塑性区的影响	(50)

4b. 利用夹式引伸计测得的位移值计算 CTOD	(53)
4c. 采用多试样外推法确定 δ_i	(55)
4d. 采用双夹式引伸计法确定 δ_i	(56)
4e. 利用 CTOD 计算临界缺陷尺寸	(57)
4f. 高强焊缝金属的韧性	(59)
4g. 厚壁压力容器钢的韧性估算	(59)
4h. 裂纹尖端最小延性的估算	(61)
4i. 英国焊接研究所设计曲线的应用	(63)
4j. 大范围屈服的应力分析	(67)
4k. 用 R6 方法进行失效评估	(70)
4l. 非线性弹性材料 J 的计算	(74)
4m. 单边缺口弯曲试样 J 值的计算	(80)
5a. 裂纹尺寸对疲劳寿命的影响	(86)
5b. 航空发动机涡轮盘疲劳寿命的计算	(88)
5c. Miner 定律的应用.....	(90)
5d. 最小缺陷尺寸的计算	(91)
5e. 残余应力的影响	(93)
5f. 残余应力对内表层预压强化枪筒疲劳裂纹扩展的影响	(94)

第一章 引 言

常规的工程设计的基本点是避免因全面屈服而导致的失效。在设计标准中所规定的性能是材料的流变应力；通常是取屈服应力或 0.2% 屈服应力（即条件屈服应力 $\sigma_{0.2}$ ），但在早期的设计标准中也偶尔用抗拉强度。这样，设计应力就是用计算得出的引起破坏的作用应力除以一个安全系数。典型的安全系数是：对于制造诸如压力容器或锅炉的材料，锻钢可取 1.5，而铸钢则取 4；对于起重机械上用的钢丝绳，取 5—10。选取安全系数的主要目的是考虑到设备在安装、制造或服役过程中可能出现的附加应力会使作用应力升高而引起塑性塌陷和失效。

正如上面所定义的，安全系数并未考虑到其他失效形式的可能性，例如脆性断裂或快速断裂。曾普遍认为，选用较高的安全系数值就能避免这种类型的低应力断裂。然而，经验证明并非如此，材料中存在缺陷或裂纹的构件或结构，在应力值远低于设计应力的情况下就会发生全面失效，这样的例子很多。此外，对铸件选用更高的安全系数（相对于锻钢而言）是因为担心铸件中会存在更多的内在缺陷，他们可能导致在达到或低于设计应力下裂纹快速扩展。从工程意义上说，这就是脆性断裂。在脆性断裂中，必定存在应力集中，因为驱动断裂机制所要求的塑性应变只能在局部区域发展，而不会引起全面屈服破坏。

在服役中，重要的应力集中产生于“裂纹型缺陷”，特别是那些位于易产生高应力区域，诸如角焊缝、键槽、喷嘴口或舱口附近。

典型的裂纹型缺陷例子有：

焊缝或铸件中的凝固裂纹；

热影响区的氢致裂纹；

轧制板材中夹杂物附近的层状撕裂；

因疲劳或应力腐蚀机制所产生的亚临界扩展的裂纹。

通常用超声波检测或其他无损检测(NDT)技术可以探测这些缺陷并能确定其在有关区域内最大尺寸。

断裂力学的任务就是测算一个给定尺寸的缺陷在服役载荷下是否会以灾难性的方式扩展,从而确定结构对于断裂失效的安全裕度。阻止裂纹快速扩展的性能就是该材料的断裂韧性,它可通过对含有已知长度的尖锐裂纹试样的加载直至断裂的办法测得。

在这个新版本中,在原有篇幅上,加进了 J 积分方法和亚临界裂纹扩展的有关内容。实验程序的细节已作了修正以符合英国新标准 BS7448 (1991)。

单位

在本书中所使用的单位采用国际单位制(SI System)。然而,在断裂力学研究领域,其他单位制也在使用。最常用单位的变换及其换算系数列于下表。

表 1.1

从	变换成	换算系数
英寸	米 (m)	2.54×10^{-2}
磅力	牛顿(N)	4.448
公斤力	牛顿(N)	9.807
公斤力/平方米	帕(Pa)	9.807
磅质量	公斤(kg)	0.4536
ksi	帕(Pa)	6.895×10^5
$\text{ksi} \sqrt{\text{in}}$	$\text{MPa m}^{1/2}$	1.099
$\text{dyn cm}^{-3/2}$	$\text{MPa m}^{1/2}$	1×10^2

在国际单位制的运算中,可能会遇到更多的困难,因为物体内部应力大小的数值通常以 MPa(兆帕)给出。而 MPa 可有两种形式

计算出：一是 MN(兆牛顿)和 m(米)，二是 N(牛顿)和 mm(毫米)。当计算断裂韧性时，麻烦就出来了。如果所用的单位是 N 和 mm，其结果将是用 MN 和 m 的计算结果的 31.623 倍^①。因而必须细心地将数据以恰当的单位代入计算公式，以得到正确的结果。本书中使用 MN 和 m 作计算单位。

这种单位的变化也会在诸如 Paris 公式中引起问题(式 54)

$$da/dN = A\Delta K^m$$

这个公式中的常数项是有量纲的，因而将随单位的变化而变化。 m 的数值以及 K 和 da 的单位随后将会影响 A 的值。因而，这些常数的值必须根据所采用的单位来确定(本书中分别用 MPam^{1/2} 和 m)。

① 译者注：这是因为断裂韧性的量纲中含有长度单位的 $\frac{1}{2}$ 次方，经开平方后两者相差一个系数 31.623。

第二章 背景知识

2.1 Griffith 关系

断裂力学的基础理论最初源于 A. A. Griffith 1920 年的研究工作。它涉及的是计算一个含有尖锐裂纹的脆性体(玻璃)的断裂强度。

图 2.1 是一个模型图, 在一个无限体中, 中心有一个长为 $2a$ 的穿透裂纹, 该裂纹垂直于一个均匀拉伸应力 σ_{app} 。

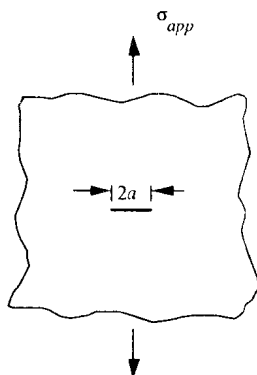


图 2.1

假设它处于平面应变状态: 即在与裂纹长度方向和作用应力方向互相垂直的第三个方向上的应变为零。

当其符合线弹性行为时, 由能量平衡方程可以给出断裂应力 σ_F ,

$$\sigma_F = \left(\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)a} \right)^{1/2} \quad (1)$$

其中, E 是 Young 弹性模量;

ν 是 Poisson 比;

2γ 是断裂功(γ 通常视为表面能)。

如果已知材料的断裂功(2γ), 这个表达式就可给出断裂应力和裂纹长度间的关系。

2.2 Orowan/Irwin 关系

后来 Orowan 和 Irwin 考虑到裂纹开始扩展之前在裂纹尖端会产生塑性变形, 因而对上述的 Griffith 关系进行了修正。他们认为如果塑性区尺寸很小, 作为无限大板整体上可视为符合弹性关系, 则公式可变为

$$\sigma_F = \left(\frac{EG_{IC}}{\pi(1-\nu^2)a} \right)^{1/2} \quad (2)$$

其中, G_{IC} 是材料的平面应变(张开型 I)断裂韧性。在金属中, 从根本上讲 G_{IC} 是裂纹扩展前所作的塑性功的一个量度。它也可用于描述平面剪切(II 型)或非平面剪切(III 型)状态下应力作用于裂纹的情况, 在此断裂韧性分别写作 G_{IC} 和 G_{IC} 。参见图 2.2。

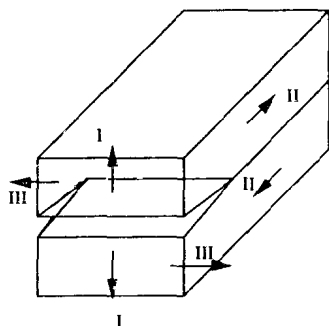


图 2.2

在平面应力变形条件下(很薄的板), 应用公式 2 时, 应在分母中去掉 $(1-\nu^2)$ 因子, 相应的断裂韧性记作 G_C 。

通常, 公式 2 或它的平面应力形式可用于计算在给定的设计

应力下所允许的缺陷的最大尺寸。然而这个方法也可反过来用于估算一个含有已知裂纹尺寸的构件所允许施加的最大应力。

例 2a 最小缺陷尺寸的计算

火箭发动机壳体(可视为薄壁壳体)可以采用下列材料制造:

(a) 屈服应力为 1200MPa 的低合金钢,在适当厚度的薄板上测得其断裂韧性为 24kJm^{-2} ;

(b) 屈服应力为 1800MPa 的马氏体时效钢,其断裂韧性为 24kJm^{-2} 。

在特殊的应用中,设计规范规定设计应力为 $\sigma_y/1.5$,这里 σ_y 是屈服应力。计算这两种材料在服役时引发脆性断裂所需缺陷的最小尺寸(Young 弹性模量在两种材料中都取 200GPa)。

解:对于薄板,可用平面应力型的公式 2:

$$\sigma_F = \left(\frac{EG_{IC}}{\pi a} \right)^{1/2}$$

如果服役中发生断裂,需要计算“a”的临界值。

当 $\sigma_F = \frac{\sigma_y}{1.5}$ 时,我们有

(a) 低合金钢情况(单位用 MN 和 m)

$$\sigma_y = 1200, \sigma_y/1.5 = 800, G_C = 24\text{kJm}^{-2}$$

$$\therefore 800 = \left(\frac{200 \times 10^3 \times 24 \times 10^{-3}}{\pi a} \right)^{1/2}$$

$$64 \times 10^4 = \frac{48 \times 10^2}{\pi a}$$

$$\therefore a = \left(\frac{3}{4\pi} \right) \times 10^{-2}\text{m}$$

$$= 2.40\text{mm}$$

其中, a 是中心裂纹长度的一半,因而最小裂纹长度为 4.8mm。

(b) 马氏体时效钢情况

$$\sigma_y = 1800, \sigma_y/1.5 = 1200, G_C = 24\text{kJm}^{-2}$$

$$\therefore 1200 = \left(\frac{200 \times 10^3 \times 24 \times 10^{-3}}{\pi a} \right)^{1/2}$$

$$\therefore a = \left(\frac{1}{3\pi} \right) \times 10^{-2} \text{m} = 1.03 \text{mm}$$

因而,最小裂纹长度为 2.12mm。

评注:

由上述分析可见,由于给定的设计应力是屈服应力的一部分。为能达到相同的缺陷容限,就必须增大马氏体时效钢的断裂韧性,即乘以一个因子 $(1800/1200)^2$ 使 G_c 值达到 54kJm^{-2} 。

例 2b 断裂应力的计算

一块大的马氏体时效钢板,含有一个长为 40mm 的中心裂纹,其断裂应力为 480MPa,如果在相同的钢板中裂纹长度为 100mm,试计算其断裂应力。

解:(单位用 MN 和 m)由公式 2,

$$\sigma_F = \text{const. } a^{-1/2}$$

其中,

$$2a = 40 \text{mm}$$

因而,

$$480 = \text{const. } (0.02)^{-1/2}$$

$$\therefore \text{const.} = 480(0.02)^{+1/2}$$

当 $2a=100 \text{mm}$ 时,

$$\sigma_F = \text{const. } (0.05)^{-1/2}$$

$$\therefore \sigma_F = 480 \left(\frac{0.02}{0.05} \right)^{1/2}$$

$$= 304 \text{MPa}$$

2.3 裂纹尖端应力的能量释放

大多数实际工件不可能是简单的无限大板形状,因而必须考虑自由表面的存在或因外加应力的复合所产生的偏差。

通常所用的裂纹尖端应力的推导方法是由应力分析计算来确定的。然而,更直接的实验方法是利用柔度技术(见 2.6 节)。

在最简单的形式下,如图 2.3 中所示,在一个无限宽板中,存在着一个尖锐的长为 $2a$ 的贯穿裂纹,裂纹前端的拉应力分布可由下式给出:

$$\sigma = \frac{\sigma_{app}}{(1 - a^2/x^2)^{1/2}} \quad (3)$$

公式中参数要保持在 $-x < -a$ 和 $x > a$ 范围内。为了更好地理解为什么应力分布呈如此形式请参见英文原书附录。

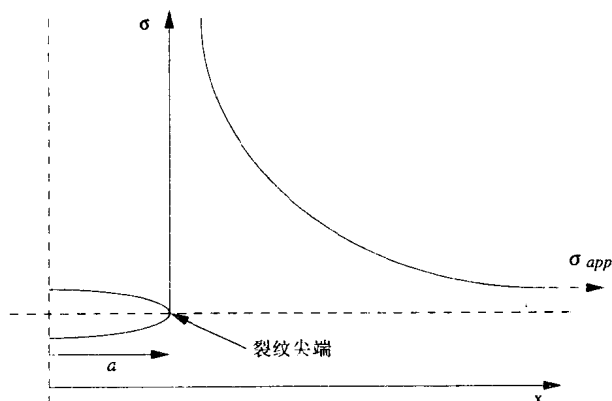


图 2.3

如果参考图 2.3 来分析公式(3),可以看到

在裂纹区附近, $x \rightarrow a$ 和 $\sigma \rightarrow \infty$

在远离裂尖区, $x \rightarrow \infty$, $a/x \rightarrow 0$, $\sigma \rightarrow \sigma_{app}$

如将公式 3 中距裂尖区前沿的距离写作 $r = (x - a)$, 那么靠近裂尖区(即 $r \ll a$)的局部应力为

$$\sigma = \frac{K}{(2\pi r)^{1/2}} \quad (4)$$

这里 K 被定义为应力强度因子, 对于一个长度为 $2a$ 的中心穿透裂纹, 这个应力强度因子值为 $K = \sigma_{app}(\pi a)^{1/2}$ (见后面的表 2.1)。在以 MN 和 m 为基础的国际单位制中 (SI 系统), K 的单位为 $\text{MNm}^{-3/2}$ 或 $\text{MPam}^{1/2}$ (各种单位制之间的换算关系见表 1.1)。

例 2c 应力强度因子的推导

证明公式 4 相当近似于裂尖前沿的应力, 在距裂尖 $r = 0.02a$ 时, 其误差约为 1.5%。

解: 由公式 3,

$$\sigma = \frac{\sigma_{app}x}{(x^2 - a^2)^{1/2}}$$

令 $r = (x - a)$ 并以 $x = (r + a)$ 代入, 则

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\sigma_{app}(r + a)}{[(r^2 + 2ar + a^2) - a^2]^{1/2}} \\ &= \frac{\sigma_{app}(r + a)}{(r^2 + 2ar)^{1/2}}\end{aligned}$$

如果 $r \ll a$, $(r + a) \rightarrow a$, 和 $(r^2 + 2ar) \rightarrow 2ar$, 则有

$$\sigma = \frac{\sigma_{app}a}{(2ar)^{1/2}} = \sigma_{app}\left(\frac{a}{2r}\right)^{1/2}$$

根据惯例, 分子与分母同乘以 $\pi^{1/2}$,

$$\therefore \sigma = \frac{\sigma_{app}(\pi a)^{1/2}}{(2\pi r)^{1/2}}$$

或

$$\sigma = \frac{K}{(2\pi r)^{1/2}} \quad (\text{参看公式 4})$$

在 $r = 0.02a$ 时, x 值为 $1.02a$ 。

由公式 3,

$$\sigma = \frac{\sigma_{app}1.02a}{(0.0404a^2)^{1/2}} = 5.075\sigma_{app}$$

由公式 4,

$$\sigma = \frac{\sigma_{app}}{(0.04)^{1/2}} = 5.000\sigma_{app}$$