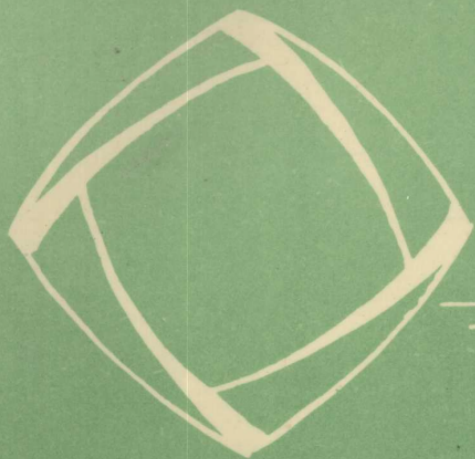


断裂力学理论和应用

方树德 编著



河南科学技术出版社

封面设计：大 愚

ISBN7—5349—1157—0/T • 310
定价：6.00 元

断裂力学理论和应用

方树德 编著

河南科学技术出版社

豫新登字 02 号

断裂力学理论和应用

方树德 编著

* * *

河南科学技术出版社出版发行

(郑州市农业路 73 号)

河南医科大学印刷厂印刷

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 6 · 25 字数 135 千字

1993 年 10 月第 1 版 · 1993 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—1000 册

ISBN7-5349-1157-0/T · 310

定价: 6.00 元

内 容 简 介

本书简明系统地对线弹性断裂力学及弹塑性断裂力学进行了介绍,反映了断裂力学近年来的新进展。考虑到工程技术人员(或工科学学生)的特点,本书列举了大量的工程实例,对断裂力学在缺陷评定、疲劳寿命估算、抗断裂设计计算、结构安全分析等方面作了较详细的讨论。

本书供从事机械设备研究、设计和制造工作的工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

前 言

近十几年来,断裂力学在工程中的应用日益受到人们的重视,作者将近 10 年来从事断裂力学课程教学及科研的体会,汇编成此书,目的是为有关专业工程技术人员提供一种简明实用的讲义,使他们能够以较少时间掌握断裂力学的基本内容,并且能够运用它去分析和解决有关工程问题。同时,本书对其他有兴趣的读者也不失为一本适宜的参考书。

本书包括线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学及断裂力学在工程中的应用三个部分。叙述中力求基本内容系统清楚,基本概念物理意义明确,必要的数学推导详细,尽量反映最新水平。在内容取舍及安排上,尽量考虑到工科学生的基础及作为一个工程技术人员的实际需要,力图做到深入浅出。

编写中参阅了数十种书刊杂志,作者在此对参阅文献的作者们表示衷心的感谢。机械工业部第六设计研究院高级工程师(研究员)黄存汉先生对书稿进行了审阅,给予了具体的指导,在此深表感谢。

限于作者水平,书中会有不少缺点或错误,诚恳欢迎读者批评指正,在此预先致谢。

方树德

一九九二年十二月

目 录

第一章	绪论	(1)
§ 1-1	断裂力学和材料力学	(1)
§ 1-2	无延性转变温度	(4)
§ 1-3	断裂现象的分析方法	(5)
第二章	线弹性断裂力学的理论	(8)
§ 2-1	弹性体平面问题的应力与应变	(8)
§ 2-2	两类不同的平面状态	(10)
§ 2-3	平面问题的应力弹性解	(13)
§ 2-4	平面问题应力位移场参量的复变函数表达	(15)
§ 2-5	带椭圆孔平板的应力函数结构	(19)
§ 2-6	裂纹前缘应力场普遍情况分析	(38)
§ 2-7	应力强度因子的计算	(45)
§ 2-8	脆性断裂的 K 准则	(63)
§ 2-9	塑性区轮廓和尺寸的估计	(65)
§ 2-10	复合型断裂准则	(71)
第三章	非线性断裂力学	(83)
§ 3-1	裂纹张开位移与 $D-M$ 模型	(83)
§ 3-2	J 积分原理及其准则	(91)
§ 3-3	大屈服和全面屈服	(96)
第四章	断裂韧度值的测定	(99)
§ 4-1	测定 K_{Ic} 的 E-399	(99)

§ 4-2	裂纹张开位移的测定方法	(102)
§ 4-3	单试件测定 J_{Ic} 值的普遍方法	(106)
§ 4-4	测定 K_{Ic} 的非标准试件	(109)
第五章	裂纹的疲劳扩展	(112)
§ 5-1	裂纹疲劳扩展速率的测定	(112)
§ 5-2	裂纹扩展速率的方程式	(114)
§ 5-3	关于疲劳实验数据的处理	(117)
§ 5-4	构件疲劳寿命的估算	(122)
§ 5-5	关于应变疲劳问题	(125)
§ 5-6	变载荷循环下的疲劳强度计算及寿命预测	(128)
第六章	应力腐蚀	(134)
§ 6-1	概况	(134)
§ 6-2	悬臂梁弯曲试样法	(136)
§ 6-3	楔形张开自加载法	(140)
第七章	断裂力学的工业应用	(143)
§ 7-1	大型焊接结构的断裂安全设计	(143)
§ 7-2	焊接结构的疲劳安全设计	(154)
§ 7-3	压力容器的安全设计	(159)
§ 7-4	大型旋转构件的断裂安全设计	(175)
附录		(185)
I	压力容器外壳偏离正圆的力学效应	(185)
II	焊缝冷却收缩所造成角变形的分析	(188)
参考文献		

第一章 绪 论

§ 1-1 断裂力学和材料力学

从工程应用角度看,断裂力学与材料力学相类似,都是为工程构件的安全设计提供理论和方法,因而断裂力学是材料力学的发展和充实。

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,而断裂力学是研究带裂纹的材料。两者的设计思想不同。

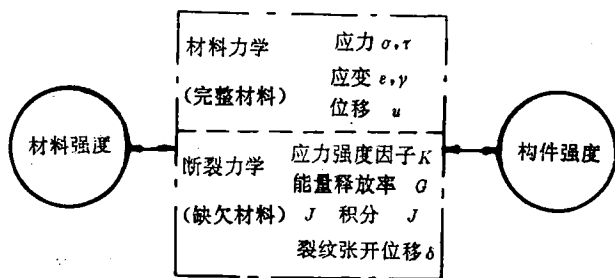


图 1-1

(1) 静载情况

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

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} &\leq \frac{\sigma_{ys}}{n_s} && \text{(屈服)} \\ \sigma_{\max} &\leq \frac{\sigma_b}{n_b} && \text{(破坏)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, σ_y 和 σ_b 分别为材料的屈服极限强度和强度极限, n 和 n_b 为相应的安全系数。

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

$$Y\sigma_c \sqrt{\pi a} \leq K_{Ic} \quad (1-2)$$

式中, σ_c 是试件所受的断裂应力; a 是裂纹深度(或裂纹半长); Y 是构件形状系数, 它与构件的几何形状, 载荷条件和裂纹位置有关; 常数 K_{Ic} 是断裂韧度, 表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的一个物理量(材料的固有值)。已知裂纹深度 a , 则上式可改写成 $Y\sigma \sqrt{\pi a} = K_I$, 断裂力学中的裂纹失稳准则是

$$K_I \leq \frac{K_{Ic}}{n} \quad (1-3)$$

式中, K_I 称为裂纹尖端应力强度因子, n 是相应的安全系数。

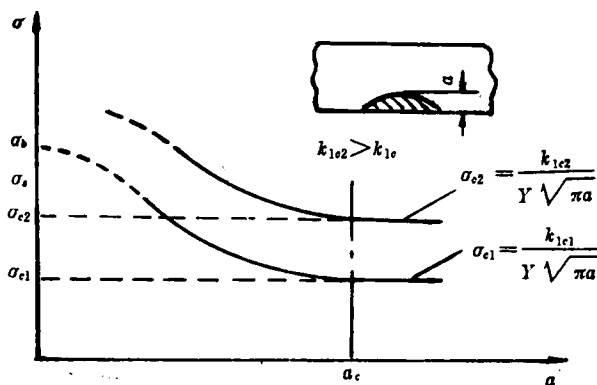


图 1-1

因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：一种是 σ_s 和 σ_b 较高，但断裂韧性 K_{Ic} 较低；另一种 σ_s 和 σ_b 较低，但断裂韧性 K_{Ic} 较高(图 1-2)。

在相同裂纹深度下，则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。

(2) 循环载荷情况

传统疲劳设计是用光滑试件作出 $S-N$ 曲线，求出疲劳极限 σ_{-1} 值，只要满足下式：

$$\sigma_{\max} \leqslant \sigma_{-1}/n_{-1} \quad (1-4)$$

就认为构件不会疲劳破坏， n_{-1} 为疲劳安全系数，构件必须是光滑完整的。断裂力学认为，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，裂纹会缓慢扩展，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，裂纹的扩展速率是 $\frac{da}{dN}$ ，它是材料的一个指标。

$$\text{材料的破坏寿命: } N_f = N_m + N_s \quad (1-5)$$

式中， N_m 是裂纹发生寿命； N_s 是构件的剩余寿命。若初始裂纹深度为 a_0 ，临界裂纹深度 a_c 和裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 已知，则

$$N_s = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{(da/dN)} \quad (1-6)$$

大量的实验证实，裂纹扩展速率有下列经验式：

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^n$$

式中， c, n 是材料常数， $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ 为应力强度因子幅。

在断裂力学中与疲劳极限相当的是循环载荷的门槛值 ΔK_{th} ，它也是材料的一个指标，当 $\Delta K < \Delta K_{th}$ 时裂纹不会扩

展,这两个材料指标 $\frac{da}{dN}$ 和 K_{Ic} 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的疲劳理论。

(3) 腐蚀介质下的情况

传统设计是用光滑试件在腐蚀介质中作实验,作出 $\sigma-t$ 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,构件就被认为是安全的,在应力腐蚀情况下,传统设计不允许构件存在裂纹。

从带裂纹构件的实验研究出发,认为在腐蚀介质下构件失稳准则, $K_I \leq K_{Isc}$, K_{Isc} 是材料在应力腐蚀下抵抗裂纹失稳断裂能力的指标,另一个指标是应力腐蚀下的裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$, 其剩余寿命为:

$$t_r = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{da/dt} \quad (1-7)$$

综上所述,断裂力学的设计思想对传统设计思想进行了改善与补充,断裂理论不仅对缺陷构件进行剩余强度和寿命分析,以保证产品安全可靠或制定合理的验伤标准,而且在构件选材,改善工艺、制造新材料等方面的研究中也不断地发挥作用。

§ 1-2 无延性转变温度

材料有缺陷存在是否就会导致断裂,这决定于材料对缺陷存在是否敏感(材料的缺口效应)。脆性材料对缺陷的存在十分敏感,而韧性材料对缺陷的存在不敏感,决定材料显脆、韧性,使用温度是一个关键。

美国海军研究所的 W. S. Pehini 通过落锤试验首先提出无延性转变温度的概念(简称为 NDT),他认为每一种材料都有一个无延性转变温度 NDT(图 1-3)。

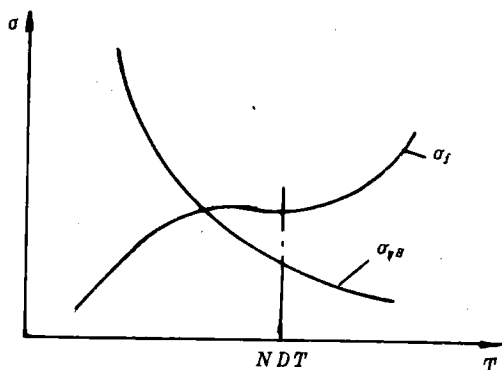


图 1-3

例如,钢材 16MnR 的转变温度约为 -40°C , 20 号钢的转变温度约为 -25°C , 高于这个温度时,断裂是弹性以至延性的,而低于这个温度时断裂是完全脆性的,延、脆性转变温度在实际应用中有重大指导意义。很明显,若材料的操作温度能保持在 NDT 以上,则材料具有韧性,能容许较大缺陷不致扩展造成断裂;若材料的操作温度在 NDT 以下,则材料呈脆性状态,对缺陷的存在很敏感,容易扩展而造成断裂,为了保证安全,避免断裂事故的发生,测定材料的转变温度并选用转变温度低于操作温度的材料,是重要的有效措施。

§ 1-3 断裂现象的分析方法

现代断裂力学所采用的力学模型,是在各向同性的均匀

介质中安置一条或几条裂纹,目前还没有考虑到用较为真实的金相组织模型或带有位错的金属模型。在裂纹尖端产生塑性区之前,整个带裂纹物体中的应力分析可用弹性力学方法,采用复变函数保角变换,把一条裂缝映射到一个正圆周线上,使应力和应变的分析大为简化,此种方法经 N. I. Muskhelishvili 加以发展而成为一种强有力的工具,对于裂纹问题的分析特别有效,但不适于三维问题。普遍有效的解是无限大平板中存在一个椭圆孔,椭圆孔的极限情况就是具有尖锐末端的一条裂纹,在裂纹尖端附近的极小范围内,精确解可简化为一种近似解,由此得出国际上沿用的线弹性断裂韧度 K_{Ic} 的定义。

为无限大平板中存在一条裂纹或缺口得出精确解的另一数学方法是曲线坐标法。此法为无限大平板中存在椭圆孔的问题得出与复变函数法完全一致的答案。此外还便于解出外缺口问题,并可获得若干三维问题的解。

若材料具备一定的韧性,则在裂纹扩展以前先在裂纹尖端出现塑性区,塑性区的存在使线弹性断裂力学的分析失去一定程度的精确性,但若塑性区尺寸远比裂纹本身尺寸为小(裂纹尺寸的 $1/50$),则线弹性断裂力学的分析结果仍不失为近似解。若材料裂纹扩展前在其尖端存在着较大的塑性区,人们自然会想到用塑性区某一尺寸作为材料断裂韧性的指标。1963 年 A. A. Wells 和 A. H. Cottrell 建议用裂纹尖端的张开位移(COD)作为屈服断裂韧性指标,此后英国焊接研究所进行了大量的宽板试验,并在此基础上建立了 Burdekin 设计曲线。这条曲线提供了小屈服到大量屈服到全面屈服各种屈服状态下,裂纹安全性分析和安全性设计的依据。

J. D. Eshelby 在 1949 年提出了分布位错的思想,实质

上是断裂力学的一种分析方法。1963年 B. A. Bilby, A. H. Cottrell, 和 K. S. Swinden 根据这种设想推出了条状模型的裂纹张开位移公式。这一公式对裂纹扩展前产生小塑性区的状态分析是有效的, 因为条状模型首先是由 D. S. Dugdale 提出且可用 Muskhelishvili 方法得出与分布位错分析相同的结果, 故称之为 $D-M$ 模型。

适于大量屈服和全面屈服状态分析的根据是 Burdekin 设计曲线, 它的基础是 Wells 公式:

$$\delta = 2\pi ea \quad (1-8)$$

式中, δ 为裂纹尖端张开位移; a 为穿透性裂纹半长, e 为平均应变。Wells 公式原是由实验数据中得出的经验公式, 但可能带有较大的安全系数, 可认为它偏于安全的估计公式。

近年, J. R. Rice 提出的 J 积分与早在 1956 年由 J. D. Eshelby 提出的能量、冲量、张量是一致的, J 积分为线积分, 在弹性范围内可证明其值和所取积分的中间途径无关, 故材料的 J 积分值也是一个固有的常数, 可作为断裂韧性的指标, 至于它的应用需借用 Burdekin 设计曲线和 Wells 公式。

总之, 一般材料力学的对象是均匀介质, 所能分析的问题是材料的平均性能问题, 而断裂现象则明显地决定于材料的局部性能。故其分析方法是截然不同的。

第二章 线弹性断裂力学的理论

§ 2-1 弹性体平面问题的应力与应变

(1) 应力分量

单位面积上的力叫应力,它是构件强度大小的标志。因为力是有方向的,故应力也有方向性。通常力和作用面不一定垂直,我们可以将其分解为两个互垂的分量,即垂直于作用面的正应力 σ 和平行于作用面的剪应力 τ ,如果作用面上只有正应力而无剪应力,则此正应力又称为主应力,该平面称为主平面。若在弹性体内任取一点 P 单元体(图 2-1),则作用在单元体各面上的应力分量有:

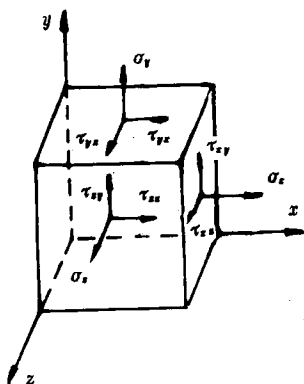


图 2-1

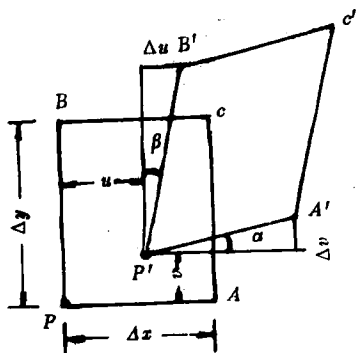


图 2-2

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 六个独立的应力分量。

(2) 应变分量

弹性体受力后要发生弹性变形(尺寸和形状的改变,图 2-2),取一矩形小单元体 $ABCP$ 。变形前 $PA = \Delta x$,变形后 $P'A' = \Delta x + \Delta u$,其中 u 是质点沿 x 向的位移, x 向单位长度的伸长量为:

$\bar{\epsilon} = \frac{\Delta u}{\Delta x}$,在极限条件下用微分表示,则 $\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$,其中 ϵ_x 就

是 P 点沿 x 向的线应变,同理: $\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$ 。

如果在单元体上不仅作用有正应力,还有剪应力,则单元体产生形状改变, $\angle APB$ 变为 $\angle A'P'B'$,两者之差为:

$\alpha + \beta = \frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{\Delta u}{\Delta y}$,在极限条件下用微分表示,称为剪应

变,用 $2\gamma_{xy}$ 表示,即 $\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ 。

同理: $\gamma_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right), \gamma_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$ 。

归纳起来,应变分量和位移分量的关系为:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$