

高等学校规划教材 · 材料科学
PROGRAMMING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



材料的断裂与控制

张骁勇 王 荣 编著

西北工业大学出版社

高等学校规划教材·材料科学

材料的断裂与控制

张骁勇 王 荣 编著



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书主要介绍材料断裂的理论基础及其应用,着重从断裂的力学和环境效应角度分析典型加载环境下断裂的现象、机理、规律以及控制因素。全书主要内容分为材料断裂的力学基本原理以及断裂力学参数的应用;材料断裂的物理原理和微观层次分析;疲劳裂纹的形成、扩展的规律及其断裂过程的分析;应力腐蚀开裂的断裂过程及其控制因素;氢脆及其规律等。

本书可作为高等学校材料科学与工程专业本科生或研究生教材,也可作为从事材料断裂及失效分析的专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料的断裂与控制/张骁勇,王荣编著. —西安:西北工业大学出版社,2012.10
ISBN 978-7-5612-3499-0

I. ①材… II. ①张… ②王… III. ①材料—断裂控制 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 240245 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:10.75

字 数:257 千字

版 次:2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

定 价:24.00 元

前 言

断裂、腐蚀和磨损是工程构件或材料的最为主要的三种失效方式,其中断裂是发生频率最高、危险性最大的一种失效形式,在很多情况下可能造成灾难性的后果,因而材料断裂的产生原因和预防控制成为科研工作者和工程技术人员最为关注的问题之一。

断裂是构件或材料在一定的环境中和外加载荷的作用下,由于材料内部产生损伤,难以继续承受外载而分离成两个或两个以上部分的破坏现象。材料在外加载荷的作用下,当应力达到材料的断裂强度时发生断裂,这属于正常的断裂现象。若材料在外加载荷的作用下,当应力低于材料的断裂强度时而发生的断裂,通常称为低应力脆性断裂。实际工程构件发生的过早断裂,绝大多数属于低应力脆性断裂。

材料的断裂是一个很复杂的过程,受到材料本身的性质、环境因素、工作应力状态、构件的形状及尺寸、材料的结构及缺陷等很多因素的影响,并且通常是上述多种因素综合作用的结果,这就使得对材料断裂过程的分析增加了更多不确定因素,同时也增加了断裂控制的难度。

本书从断裂力学、断裂物理基础、断裂微观机制等材料断裂基础理论出发,针对疲劳、应力腐蚀、氢脆等典型的断裂形式,从断裂产生的机理、特点、研究方法和控制措施进行了论述,使得读者能够系统地学习和掌握有关材料断裂的基础知识和工程应用,为以后从事与材料、工程结构断裂相关的工作和学习奠定良好的基础。同时,本书还包括近年来有关材料断裂研究的一些新理论和新的应用技术,突出了材料断裂与控制的学术性和学科研究及应用的前沿性。

本书共分为6章。第1章介绍断裂力学的基本原理和断裂力学参数的应用。第2章和第3章分别从物理原理和微观层次分析断裂过程。第4章论述疲劳断裂过程及其构件疲劳裂纹形成和扩展的规律。第5章介绍应力腐蚀开裂的断裂过程及控制因素。第6章论述氢脆。其中,第1,2,3,5章由张骁勇编写;第4,6章由王荣编写。

本书在出版过程中,得到了国家自然科学基金(项目编号:51174165)及西安石油大学出版社的支持,得到了西北工业大学出版社李恩普、何格夫的指导和帮助,在此一并表示感谢。

由于材料科学处于一个不断发展和完善的过程,有关断裂的知识体系也在深入发展,加之编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2012年8月

目 录

第 1 章 断裂力学基础	1
1.1 断裂的基本概念	1
1.2 线弹性断裂力学	6
1.3 弹塑性断裂力学	15
1.4 强韧化工艺	22
1.5 断裂韧性的工程应用	26
第 2 章 断裂物理基础	30
2.1 断裂类型及断裂强度	30
2.2 韧断和脆断	36
2.3 断口分形理论	50
第 3 章 断裂的微观机制	54
3.1 微裂纹形核方式	54
3.2 位错发射和无位错区	59
3.3 韧脆判据及韧脆转变的位错理论	65
第 4 章 疲劳断裂	72
4.1 疲劳现象	72
4.2 应变疲劳	84
4.3 应力疲劳寿命公式	91
4.4 疲劳裂纹起始寿命	97
4.5 疲劳裂纹扩展	109
4.6 裂纹扩展试验方法	115
第 5 章 应力腐蚀开裂	117
5.1 应力腐蚀开裂概述	117
5.2 应力腐蚀开裂的机理	126
5.3 应力腐蚀裂纹扩展	130
5.4 应力腐蚀敏感性的评价	133
5.5 应力腐蚀开裂的控制	135
5.6 典型的应力腐蚀现象	138

第 6 章 氢脆	145
6.1 氢脆现象与分类	145
6.2 氢脆的机理	149
6.3 第一类氢脆	153
6.4 环境氢脆	155
6.5 氢脆的力学试验方法	159
6.6 氢脆的控制	161
参考文献	162

第 1 章 断裂力学基础

1.1 断裂的基本概念

1.1.1 断裂力学的产生

断裂是构件破坏的重要形式之一。在圆棒试样拉伸过程中,当外载荷在试样中所产生的应力超过材料的抗拉强度时,则试样发生断裂。影响材料断裂的因素很多,如构件的形状及尺寸,载荷的特征与分布,构件材料本身的状态及应用的环境如温度、腐蚀介质等,更重要的还有材料本身的强度水平。为了防止构件的断裂或变形失效,要保证构件所承受的外应力应该小于材料的抗拉强度或屈服强度。

在传统的构件或零件强度设计中,安全设计思想主要立足于外加载荷与使用材料的强度级别的选用,根据常规的强度理论,只要构件服役应力与材料的强度满足

$$\sigma_{\max} = \begin{cases} \frac{\sigma_b}{n_1} \\ \frac{\sigma_s}{n_2} \end{cases} \quad (1-1)$$

则认为使用是安全的。式中, $\sigma_{\max}$ 为构件或零件所承受的最大应力; σ_b, σ_s 分别为材料的强度极限和屈服强度; n_1 与 n_2 分别为按强度极限与按屈服强度取用的安全因数。安全因数是一个大于 1 的数,其含义为扣除了材料中可能存在对强度有影响的诸因素对强度可能造成的损害作用,应当说这种考虑问题的出发点是合理的,也应当是行之有效的,因而多年来这种设计思想在工程设计中发挥了重要作用,而且还会继续发挥其重要作用。

根据常规的强度理论,提高安全因数,构件的安全性会提高。但带来的结果是,材料的用量增加,构件变得笨重。

第二次世界大战以来,发生了大量的金属构件低应力脆断事故。1943—1947 年,美国近 500 艘全焊接船发生了 1 000 多起脆性断裂破坏,有 238 艘报废。调查发现,开裂总是在焊接缺陷等应力集中的区域,环境温度在 $-3 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 。1947 年,苏联 4 500 m^3 石油储罐底部和下部壳体的连接处发现了大量的裂纹,环境温度在 -43°C 。在 20 世纪 50 年代,美国北极星导弹固体发动机壳体试验时,发生了爆炸。在这些断裂事故中,结构是按传统强度理论严格设计的,为什么还会不断出现断裂,这是应用传统强度理论无法解释的。

还有很多按疲劳理论设计构件的断裂事故。1963 年,美国 F-111 飞机训练时,左翼脱落,飞机坠毁,而当时的飞行速度、载荷远低于设计指标。2005 年 2 月,美国停飞了 30 架 E 型 C-130“大力神”飞机,其原因为中央机翼 4 结构在一系列监测中发现有裂纹,而且这些裂纹的数量在增多。同样,这些断裂现象也是应用传统疲劳强度理论无法解释的。

在很多低应力断裂事故中,脆性断裂总是由宏观的裂纹引起的。这些宏观裂纹一种可能是有冶金缺陷或在热处理、加工和装配过程中产生的,另一种可能是在疲劳载荷和环境作用下引起的。对大多数构件和零件来说,宏观裂纹的存在是不可避免的。一般来说,构件的厚度增加,存在裂纹的可能性也增加,同时厚度增加会使构件处于危险的平面应变状态。因此,按传统的强度理论增加构件的安全性,实际上未必安全。

综上所述,传统强度理论认为材料是均匀连续介质,实际的结构或零件发生脆性断裂与材料中存在的宏观裂纹有关,故实际结构可认为是含有一定尺寸裂纹的裂纹体。实际结构或零件的断裂不仅与材料的强度有关,还与构件或零件中存在的裂纹长度有关,从而产生了断裂力学。

断裂力学是研究含裂纹物体的强度和裂纹扩展规律的科学,是固体力学的一个分支,又称裂纹力学。断裂力学研究的内容包括:① 裂纹的起裂条件;② 裂纹在外部载荷和(或)其他因素作用下的扩展过程;③ 裂纹扩展到什么程度物体会发生断裂。

关于断裂力学的最早理论可以追溯到 1920 年。当时为了研究玻璃、陶瓷等脆性材料的实际强度比理论强度低的原因,Griffith 提出了在固体材料中或在材料的运行过程中存在或产生裂纹的设想,计算了当裂纹存在时板状构件中应变能的变化,进而得出了一个十分重要的结果:

$$\sigma_c \sqrt{a} = \text{常数} \quad (1-2)$$

式中, σ_c 为断裂扩展的临界应力; a 为断裂半长度。该理论非常成功地解释了玻璃等脆性材料的开裂现象,但应用于金属材料并不成功,又由于当时金属材料的低应力破坏事故并不突出,因而在很长一段时间内并未引起人们的重视。

1949 年, E. Orowan 在分析了金属构件的断裂现象后,对 Griffith 公式提出了修正。他认为产生断裂所释放的应变能不仅能转化为表面能,也应转化为裂纹前沿的塑性应变功,而且由于塑性应变功比表面能大得多,以至于可以不考虑表面能的影响。他提出的公式为

$$\sigma_c \sqrt{a} = \left(\frac{2EU}{\lambda} \right)^{1/2} = \text{常数} \quad (1-3)$$

式中, E 为金属的弹性模量; U 为形变功; λ 为与应力状态有关的常数。对平面应力, $\lambda = \pi$; 对平面应变, $\lambda = (1 - \nu)^2 \pi$, ν 为泊松比。

Orowan 公式虽然有所进步,但仍未超出经典的 Griffith 公式的范围,而且与表面能一样,形变功 U 也是难以测量的,因而该式仍难以实现工程上的应用。

断裂力学理论的重大突破应归功于 Irwin 应力场强度因子概念的提出,以及以后断裂韧性概念的形成。1957 年, Irwin 应用了 H. M. Westergaard 在 1939 年提出的解平面问题的一个应力函数,求解了带穿透性裂纹的空间大平板两相拉伸的应力问题,并引入了应力强度因子 K 的概念,随后又在此基础上形成了断裂韧性的概念,并建立起测量材料断裂韧性的试验技术,从而奠定了线弹性断裂力学的基础。

1.1.2 裂纹类型

断裂力学中裂纹含有更广泛的意义,除了物体中因开裂而产生的裂纹,还包括材料冶炼过程中的夹渣、气孔,加工过程中引起的刀痕、刻槽等。

按裂纹存在的几何特性,可把裂纹分为穿透裂纹、表面裂纹和深埋裂纹。

如果一个裂纹贯穿整个构件厚度,则称为穿透裂纹,也称为贯穿裂纹。在有些条件下,虽然裂纹并没有穿透构件厚度,仅在构件的一面出现裂纹,但当其深度已达到构件厚度一半以上时,该裂纹也常按穿透裂纹处理。构件中的穿透裂纹常当做理想尖裂纹处理,即裂纹尖端的曲率半径趋近于零,这种简化偏于保守,但在实际应用中比较安全,因此工程上易于接受。

裂纹若位于构件的表面或裂纹的深度与构件的厚度相比较小,则称为表面裂纹。在工程中表面裂纹常简化为半椭圆形裂纹。

裂纹处于构件内部,在表面上看不到开裂的痕迹,这种裂纹称为深埋裂纹。计算时深埋裂纹常简化为椭圆片状或圆片状裂纹。

在断裂力学中,裂纹常按其受力及裂纹扩展途径分为三种类型,即 I, II, III 型,如图 1-1 所示。

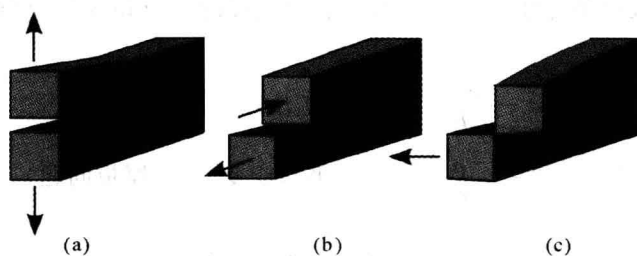


图 1-1 裂纹类型

(a) 类型 I: 张开型; (b) 类型 II: 剪切型; (c) 类型 III: 撕裂型

I 型裂纹即为张开型裂纹。如图 1-1(a) 所示,拉应力垂直于裂纹扩展面,裂纹上下表面沿作用力的方向张开,裂纹沿裂纹面向前扩展。如板中有一穿透裂纹,其方向与板所受拉应力方向垂直,或压力容器中的纵向裂纹等。

II 型裂纹即为剪切型裂纹。其特征为裂纹的扩展受切应力控制,切应力平行作用于裂纹面而且垂直于裂纹线,裂纹沿裂纹面平行滑开扩展,如图 1-1(b) 所示。如齿轮或长键根部沿切线方向的裂纹引起的开裂;受扭转的薄壁圆管上贯穿管壁的环向裂纹在扭转力的作用下引起的开裂等。

III 型裂纹即为撕裂型裂纹。在平行于裂纹面而与裂纹前沿线方向平行的剪应力的作用下,裂纹面产生沿裂纹面的撕开扩展,如图 1-1(c) 所示。

在这三种裂纹中,以 I 型裂纹最为常见,也是最为危险的一种裂纹,因此在研究裂纹体的断裂问题时,这种裂纹是研究最多的。

1.1.3 裂纹体断裂理论

1920 年,Griffith 从脆性材料玻璃的断裂研究中建立了脆性材料的断裂理论。Griffith 提出:①脆性材料中存在微裂纹,在外力作用下裂纹尖端引起的应力集中会大大降低材料的断裂强度;②对应于一定尺寸的裂纹有一临界应力值 σ_c ,当外加应力 σ 大于 σ_c 时裂纹便迅速扩展而导致材料断裂;③裂纹扩展的条件是裂纹扩展所需要的表面能由系统释放的弹性应变能所提供。Griffith 分析了物体中存在的裂纹长度对开裂应力的影响,并首次得出了脆性材料中的这种定量关系。

下面讨论 Griffith 的分析方法。

设有一相当大的板状式样,单位厚度($B=1$),上下端施加均布载荷 σ ,达到稳定状态后把上下端固定起来,构成能量的封闭体系,此时板中储存的初始弹性应变能 U_e 为

$$U_e = \frac{1}{2} \epsilon V = \frac{\sigma^2}{2E} V \quad (1-4)$$

式中, $\frac{1}{2} \epsilon$ 为弹性应变能密度,表示单位体积物体中储存的弹性应变能,在此条件下,应力应变满足胡克定律 $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$; V 为板的体积; E 为弹性模量。

设想在板上割开一个垂直于拉伸方向的穿透裂纹,长度为 $2a$,如图 1-2 所示(若为边缘裂缝时,长度为 a),出现裂纹以后,裂纹的上下表面不再应有应力,所以靠近裂纹表区域的应力、应变被松弛,系统将释放出部分能量,Griffith 从整个试样的应力和应变分布计算了其释放的能量为

$$U_e = -\frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} \quad (\text{平面应力 —— 薄板问题}) \quad (1-5)$$

$$U_e = -\frac{\pi(1-\mu^2)\sigma^2 a^2}{E} \quad (\text{平面应变 —— 厚板问题}) \quad (1-6)$$

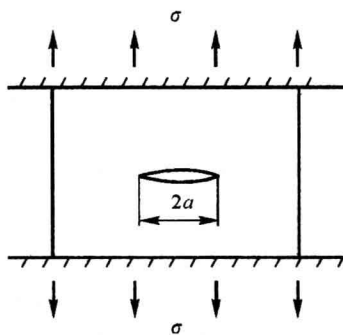


图 1-2 带裂纹的板状试样

割开长度为 $2a$ 的裂纹后,形成了裂纹表面,从而增加了表面能,设 γ 为单位面积的表面能,则新增加的表面能 U_s 为(厚度 $B=1$)

$$U_s = 4a\gamma \quad (1-7)$$

对图 1-2 所示的裂纹体,可以认为外加应力引起的弹性应变能的增加是裂纹伸展过程的驱动力,而形成新表面引起表面能的增加是整个过程的阻力。因此,裂纹体断裂的条件为

$$\frac{\partial}{\partial a} (U_e + U_s) = \frac{\partial U}{\partial a} = 0 \quad (1-8)$$

将式(1-5)和式(1-7)代入式(1-8),则在平面应力条件下应力与裂纹长度的关系为

$$\frac{2\pi \sigma^2 a}{E} = 4\gamma \quad (1-9)$$

这时的 σ 应该为裂纹体的断裂应力 σ_f ,则将式(1-9)可改写为

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (1-10)$$

同理,当平面应变时

$$\sigma_f = \left[\frac{2E\gamma}{\pi(1-\mu^2)a} \right]^{1/2} \quad (1-11)$$

因此,对裂纹体断裂应力随裂纹长度的增加而降低,即裂纹存在时显著降低了断裂强度,可很好解释发生的低应力断裂事故。将式(1-10)和式(1-11)可写成通式,即

$$\sigma_f \sqrt{a} = C \quad (1-12)$$

式中, C 为常数。这就是 Griffith 理论的一个重要结果。玻璃丝的抗拉试验、玻璃球的爆破试验以及大型金属材料的抗拉试验结果,都支持式(1-12)的成立。

Griffith 理论只适用于脆性材料,即裂纹尖端的塑性变形可以忽略不计,如玻璃、石墨、金刚石及超高强度合金。但金属材料在断裂时,裂纹尖端会产生明显的塑性变形。

为了能对塑性材料进行能量分析,在 Griffith 理论中应该考虑裂纹伸展时所做的塑性功 U_p ,它是裂纹伸展单位面积所需要的塑性变形功,也是裂纹伸展过程的阻力,因而在平面应力条件下,裂纹体的断裂应力可写为

$$\sigma_f = \left[\frac{2E(\gamma + U_p)}{\pi a} \right]^{1/2} \quad (1-13)$$

下面讨论裂纹伸展的能量释放率。

式(1-8)可变化为

$$U = U_e + U_s \quad (1-14)$$

式中, U 为裂纹伸展过程中的总能量。在平面应力条件下,该三相能量与裂纹长度的关系如图 1-3 所示。在一定的的外应力下,存在一个临界裂纹长度 a_c 。当 $a < a_c$ 时,任何的裂纹扩展导致系统能量的增加,则裂纹体不会发生断裂;当 $a \geq a_c$ 时,任何的裂纹扩展导致系统能量的降低,则裂纹体会自发地发生断裂。

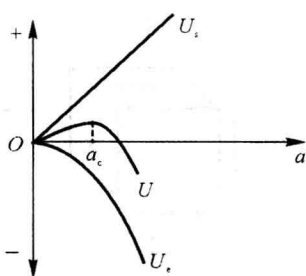


图 1-3 裂纹伸展过程的能量变化

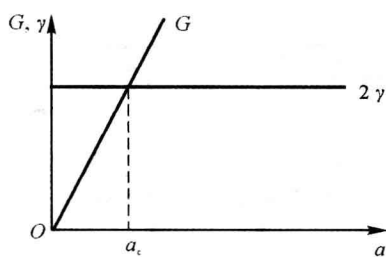


图 1-4 能量释放率随裂纹长度的变化

考虑到裂纹体为单位厚度($B=1$)的情况,裂纹面积的变化 dA 在数值上等于裂纹长度的变化,则裂纹伸展单位面积时弹性应变能和表面能的变化为

$$\frac{\partial U_e}{\partial A} = \frac{\partial U_e}{\partial a} = -\frac{\pi \sigma^2 a}{2E} \quad (1-15)$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial A} = \frac{\partial U_s}{\partial a} = 2\gamma \quad (1-16)$$

图 1-4 给出了这两个能量率的绝对值随裂纹长度的变化关系,这两个直线的交点满足了断裂的临界条件,交点对应的裂纹长度应力为 σ 时的临界裂纹长度 a_c 。只要裂纹长度超过临界裂纹长度,则裂纹伸展时,能量继续降低,过程自发进行。

定义裂纹伸展的能量释放率 G 为

$$G = -\frac{\partial U_e}{\partial a} \quad (1-17)$$

其物理意义是裂纹伸展单位面积时释放的弹性应变能,又可称为裂纹扩展阻力。在裂纹伸展的临界点,即图 1-4 中两曲线的交点, G 的临界值 G_c 为

$$G_c = 2\gamma \quad (1-18)$$

只有当裂纹伸展力 G 大于阻力 2γ 时,裂纹才能继续伸展,从而导致裂纹体发生断裂。

1.2 线弹性断裂力学

1.2.1 裂纹尖端的应力场

线弹性断裂力学认为,材料或构件在断裂以前基本上处于弹性范围内,可以把物体视为带有裂纹的弹性体。Griffith 理论是建立在脆性材料断裂基础上的,研究的脆性材料断裂是处在线弹性范围内的。

线弹性力学问题,可以简化为线弹性的平面问题,根据物体的几何形状特征和力的作用特征,线弹性的平面问题即认为研究的裂纹体为平板。当平板比较薄时,为平面应力问题;当平板为厚板时,则为平面应变问题。

设有一无限大平板,在平板的中央有一裂纹长度为 $2a$ 的穿透裂纹,在与裂纹面垂直的 y 方向施加均匀的拉应力 σ ,属于 I 型加载,即张开型裂纹,如图 1-5 所示。在裂纹尖端前方 r ($r \ll a$) 处取出一个材料元的单元体,材料元的应力状态如图 1-6 所示。

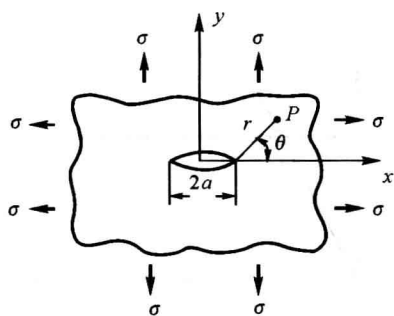


图 1-5 无限大平板穿透裂纹体拉伸

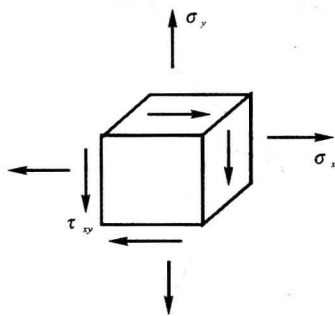


图 1-6 裂纹前方材料元应力状态

裂纹顶端 $P(r, \theta)$ 处材料元应力分量、位移和应变分量为

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{pmatrix} \quad (1-19)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{K_I}{G(1+\nu')} \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{2\pi}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \left[(1-\nu') + (1+\nu') \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - (1-\nu') \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \end{pmatrix} \quad (1-20)$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} \frac{1}{2G(1+\nu')} \left[(1-\nu') - (1+\nu') \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right] \\ \frac{1}{2G(1+\nu')} \left[(1-\nu') + (1+\nu') \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right] \\ \frac{1}{2G} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \end{pmatrix} \quad (1-21)$$

式中, $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$; G 为剪切模量; ν 为泊松比, 在平面应变条件下 $\nu' = \nu, \sigma_2 = 0$; 在平面应力条件下 $\nu' = \nu/(1-\nu), \sigma_2 = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ 。

分析上述各解的表达方式, 其右边包含有三类物理量: 一是由材料本身所决定的常数, 如剪切弹性模量 G 、泊松比 ν 等, 这些量只与材料本身的性质有关; 二是裂纹顶端的位置坐标 r, θ , 当 r, θ 为一确定值时, 则对应裂纹顶端一个确定位置, 注意到 $r \ll a$, 因此上述解答仅适合于裂纹顶端附近区域, 这并不影响对整个物体在应力场作用下开裂行为的分析与讨论, 因为裂纹的发生扩展正是在裂纹顶端附近区域进行的; 三是外加应力与裂纹长度的复合参量 K_I , 即 I 型裂纹。对 II 和 III 型裂纹, 复合参量分别为 K_{II} 和 K_{III} 。

在裂纹的延长线上, 即 x 轴, $\theta = 0$, 则有

$$\sigma_{yy} = \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (1-22)$$

1.2.2 应力强度因子

由式(1-19)和式(1-21)可见, I 型裂纹前端应力、应变场都与 K_I 有关。对裂纹前端任意点 (r, θ) , 该点材料元的应力、应变分量完全由 K_I 所控制。 K_I 是外加应力与裂纹长度的复合参量, 称为裂纹尖端应力强度因子。应力强度因子的定义为

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r \sigma_{yy}}(r, 0) \\ K_{II} &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r \tau_{xy}}(r, 0) \\ K_{III} &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r \tau_{yz}}(r, 0) \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

对无限大平板穿透型裂纹, 应力强度因子由名义应力和裂纹长度决定, 即

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1-24)$$

式中, K_I 的单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。同理, 对于 II 型、III 型裂纹问题, 其应力场强度因子将分别使用 K_{II}, K_{III} 来表示。

由于各种 I 型裂纹的具体情况有差别, 其应力场强度因子的表达式是不同的, I 型裂纹 K_I 的表达式可写成一般形式为

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (1-25)$$

式中, Y 称为几何形状因子, 是一个无量纲的系数, 其值随裂纹形态、试样形状与加载方式的不同而不同, 一般 Y 值在 $1 \sim 2$ 之间。

1.2.3 G-K 关系式

根据裂纹伸展的能量释放率 G 定义式(1-17),对 I 型穿透裂纹在平面应力状态下由式(1-15)和式(1-24)可得

$$G_I = \frac{\pi\sigma^2 a}{2E} = \frac{K_I^2}{E} \quad (1-26)$$

在平面应变状态下, $G-K$ 关系式为

$$G_I = \frac{\pi\sigma^2 a}{2E} = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{E} \quad (1-27)$$

对 II 型、III 型裂纹问题,存在上述类似的关系。

1.2.4 临界应力强度因子

由 Griffith 断裂理论,脆性材料裂纹体发生断裂时, $\sigma_f\sqrt{a}=C, \sigma_f\sqrt{a}$ 项和 K_I 具有相同的形式。因此,当裂纹体发生断裂时, K_I 应该为常数。

由式(1-25)可知,随外应力 σ 的增加,裂纹尖端 K_I 增加。同理当外应力 σ 一定时,随裂纹体中裂纹长度的增加,裂纹尖端 K_I 也增加。当 K_I 增加到足以使裂纹失稳扩展时,裂纹快速扩展,裂纹体发生断裂。这一状态称为临界状态,对应的 K_I 为临界应力强度因子 K_{Ic} ,也称为材料的断裂韧性。

$$K_{Ic} = Y\sigma_c \sqrt{a_c} \quad (1-28)$$

式中, σ_c 和 a_c 分别是临界状态的应力和裂纹长度。同理,对于 II 型、III 型裂纹问题,其临界应力场强度因子将分别使用 K_{IIc}, K_{IIIc} 来表示。

将 K_{Ic} 代入式(1-26)和式(1-27),则将 G_I 改写为 G_{Ic} ,得到断裂韧性与临界裂纹伸展的能量释放率的关系。

断裂韧性可用来判断裂纹体的安全性。

1.2.5 塑性区校正

由式(1-9)裂纹前端应力分量的分布可知,当 $r \rightarrow 0$ 时 $\sigma_y \rightarrow \infty$ 。对实际的金属材料来说,当裂纹尖端的应力等于或大于材料的屈服强度时,材料就要发生屈服,产生塑性变形,裂纹尖端松弛屈服区的实际应力应该恒等于材料的屈服强度(不考虑材料的加工硬化)。换句话说,裂纹尖端的应力不可能无限大。材料一旦屈服,就不遵守线弹性规律,线弹性力学不再适用。但是,如果裂纹尖端的屈服区很小,其周围广大区域仍处于弹性范围,就可以通过对线弹性力学进行修正,以适用小范围屈服的情况。因此,经塑性区修正后,线弹性断裂力学仍然可用来处理在裂纹尖端出现小范围屈服裂纹体的断裂问题。

1. 平面应力

通过承受外力物体内任一点 P ,总可找到一个斜面,在该斜面上的剪应力等于零,这个斜面叫主应力面。在该斜面上的正应力,为 P 点的主应力,可用 σ_1, σ_2 和 σ_3 表示,且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$,由弹性力学,可求出主应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-29)$$

通过 P 点的最大剪应力平面与主应力面成 45° 的夹角,最大的剪应力为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (1-30)$$

对裂纹尖端区任一点 $P(r, \theta)$, 将式(1-9)代入式(1-29)可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\theta(1 + \sin\theta) \\ \sigma_2 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\theta(1 - \sin\theta) \\ \sigma_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

采用屈服的应变能判据 $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2$, 可得到塑性区的大小为

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_s^2} \left[\cos^2 \frac{\theta}{2} \left(1 + 3\sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (1-32)$$

图 1-7 给出裂纹尖端塑性区的形状, r 随 θ 的变化而变化。在 x 轴上, $\theta = 0$, 塑性区的宽度为

$$r_0 = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_s^2} \quad (1-33)$$

如果采用屈服的最大切应力判据, $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_2}{2} = \tau_s$, 也可以得到式(1-33)的结果。

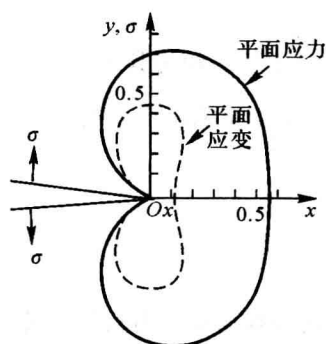


图 1-7 裂纹尖端的塑性区

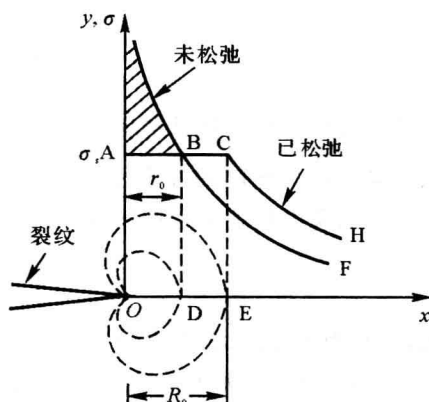


图 1-8 应力松弛对塑性区的影响

式(1-33)计算的是 σ_y 超过 σ_s 的裂纹尖端的距离, 如图 1-8 中的 AB。当考虑应力松弛时, 图 1-8 中超过 σ_s 部分材料面积内, 应力产生松弛效应, 即阴影部分, 这种松弛可以使塑性区由 r_0 扩大到 R_0 , 即 BC。按照能量守恒定律, 图中阴影部分的面积应该等于矩形面积 BCED, 即

$$\int_0^{r_0} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} dr = \sigma_{ys} R_0 = \sigma_s R_0 \quad (1-34)$$

式中, σ_{ys} 是沿 y 方向的屈服强度。在平面应力状态, 可由应变能判据证明 σ_{ys} 等于单向拉伸时的屈服强度 σ_s , 但在平面应变状态 $\sigma_{ys} > \sigma_s$ 。对式(1-34) 积分并代入式(1-33), 可得

$$R_0 = \frac{K_1^2}{\pi\sigma^2} = 2r_0 \quad (1-35)$$

考虑应力松弛后, R_0 等于 r_0 的 2 倍。

2. 平面应变

在平面应变状态, 主应力 σ_1, σ_2 与平面应力的相同, 但 σ_3 不等于零, $\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2)$, 将 σ_1, σ_2 和 σ_3 代入屈服的应变能判据, 得到平面应变状态的塑性区为

$$r = \frac{K_1^2}{4\pi\sigma_s^2} \left[2(1-2\nu)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{3}{2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (1-36)$$

在 x 轴上, $\theta=0$, 塑性区的宽度为

$$r_0 = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_s^2} (1-2\nu)^2 \quad (1-37)$$

平面应变塑性区比平面应力的要小得多, 只有平面应力的 $1/6.2$, 这是由于三向弹性约束比平面应力二向约束大的结果。在图 1-7 中也同时画出了平面应变塑性区的形状。

在平面应变情况下, 将主应力代入应变能判据, 可得

$$\sigma_{ys} = \frac{\sigma_s}{1-2\nu} \xrightarrow{\nu=0.3} 2.5\sigma_s \quad (1-38)$$

σ_{ys}/σ_s 比值的实验值在 $1.5 \sim 2.0$ 。而切口圆棒的 $\sigma_{ys}/\sigma_s = 1.7$ 。

Irwin 建议

$$\sigma_{ys} = \sqrt{2\sqrt{2}} \sigma_s = 1.7\sigma_s \quad (1-39)$$

并采用屈服判据, $\frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} = \sqrt{2\sqrt{2}} \sigma_s$, 确定的塑性区的宽度为

$$r_0 = \frac{K_1^2}{4\sqrt{2}\pi\sigma_s^2} \quad (1-40)$$

与平面应力状态的塑性区宽度式(1-33) 相比, 平面应变塑性区约为其 $1/3$ 。

按照与平面应力相同的方法考虑应力松弛的影响, 式(1-39) 中的 $\sigma_{ys} = \sqrt{2\sqrt{2}} \sigma_s$, 并应用式(1-40), 则考虑应力松弛的塑性区为

$$R_0 = \frac{K_1^2}{2\sqrt{2}\pi\sigma^2} = 2r_0 \quad (1-41)$$

可见, 在平面应变的 R_0 也等于 r_0 的 2 倍。

综上所述, 塑性区的形状和大小与应力状态、所选择的屈服判据和应力松弛有关。

3. 有效裂纹长度

从裂纹尖端的物理图像来看, 塑性区具有松弛弹性应力的作用, 与裂纹长度增加松弛弹性应力的作用是相同的, 因此可以用有效裂纹长度的概念概括实际裂纹长度和塑性区松弛弹性应力的作用。

有效裂纹长度概念的物理模型如图 1-9 所示。设裂纹尖端在 O 点, 考虑到裂纹尖端材料的屈服, 裂纹尖端由 O 点右移到 O' 点, 则裂纹的有效长度由 a 增加到 $a+r_y$, 然后以 O' 为原点即裂纹尖端, 进行线弹性分析, 得到 y 向应力的分布, 如图中虚线所示。如果有效裂纹长度 $a+$

r_y 的确能等值地表示原有裂纹长度和塑性区的作用, 则塑性区松弛应力后 y 向应力的分布曲线(图中实线)在 B 内的区域和 B 外的区域, 应与虚线重合。因此, 在塑性区内 x 轴上任何一点 y 向的应力等于屈服强度, 即

$$\sigma_y(x, 0) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi(R_0 - r_0)}} = \sigma_{ys} \quad (1-42)$$

则

$$r_y = R_0 - \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \quad (1-43)$$

因此, 有效裂纹长度是从原点到塑性区的中心, r_y 又叫塑性区半径。塑性区修正实际上是忽略了塑性区应变能释放率与弹性体应变能释放率的差别。显然, 当塑性区很小时, $r_y \ll a$, 这种差别可以忽略不计。

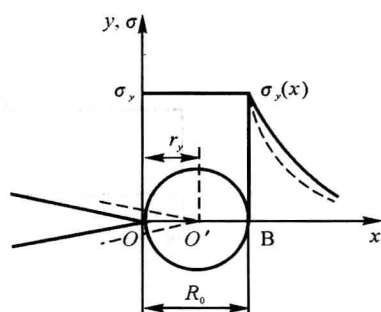


图 1-9 裂纹的有效长度

1.2.6 断裂韧性与测试

裂纹尖端应力强度因子 K_I , 随外应力 σ 或裂纹长度 a 或两者的增加而增加。当 K_I 达到某一临界值 K_{Ic} 时, 裂纹发生失稳扩展, 裂纹体断裂。习惯上, 将这个临界 K_{Ic} 称为断裂韧性。 K_{Ic} 是材料的性能, 并随材料而异。

K_{Ic} 适合于 I 型张开裂纹。与之对应有 K_{IIc} 和 K_{IIIc} 。经常出现的构件或零件的断裂以 I 型裂纹为多, 且是最为危险的裂纹类型, 因此研究的重点多集中在 K_{Ic} 。

K_{Ic} 是平面应变状态下的临界应力强度因子。在测量 K_{Ic} 时, 试样的尺寸必须满足平面应变的要求, 以保证材料的 K_{Ic} 是常数。在应用 K_{Ic} 进行断裂分析时, 构件的尺寸也应该满足平面应变的要求。平面应力的断裂韧性一般记为 K_c , 它与试样的厚度有关, 必须注明试样的尺寸。

K_{Ic} 是一种裂纹断裂韧性, 是材料抵抗裂纹迅速伸展导致断裂的能力。

有关 K_{Ic} 的测试已经标准化, 见 ASTM E399-1972。测试的要点如下:

1. 试样

推荐的标准试样为三点弯曲和紧凑拉伸试样, 如图 1-10 所示。裂纹长度包括缺口长度和疲劳预裂的裂纹长度, 实际的裂纹长度控制在 $a/W = 0.45 \sim 0.5$ 。通常, 把 $W-a$ 称为韧带宽度。试样厚度应满足平面应变的要求。试样的尺寸精度应该在所要求的精度范围内, 在裂纹嘴黏贴位移传感器刀口。

2. 疲劳引发裂纹

试样在断裂力学测试前, 要在缺口前方引发裂纹, 采用疲劳预制裂纹, 预制的裂纹长度不小于总裂纹长度的 5%。在疲劳裂纹预制过程中最大的应力强度因子不超过实际测量 K_{Ic} 的 60%, 这就要求事先估算 K_{Ic} 。

3. 断裂韧性试验

断裂韧性试验可在拉伸试验机上进行。加载速率控制在 $0.55 \sim 2.75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。在试验过程中记录载荷和裂纹嘴的张开位移。一般一种材料需要进行三次试验。