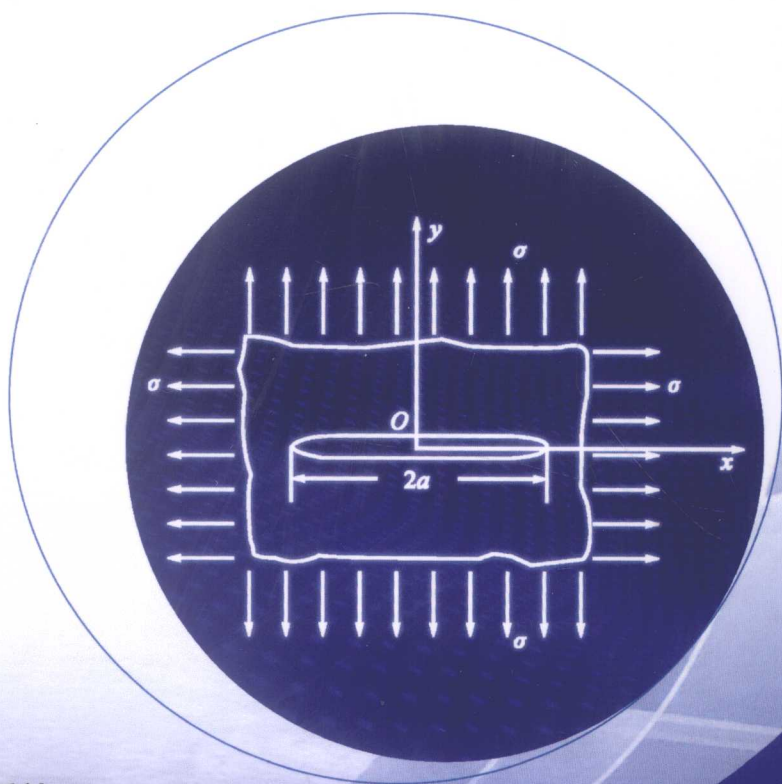




普通高等教育力学系列“十三五”规划教材

工程断裂力学

曹彩芹 华 军 主编



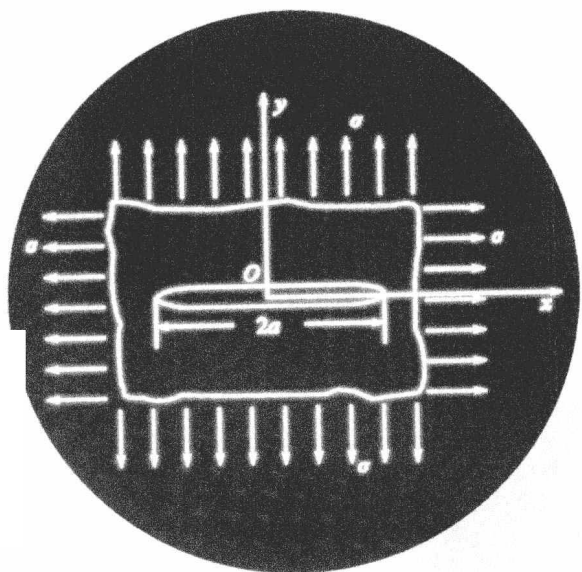
西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育力学系列“十三五”规划教材

工程断裂力学

曹彩芹 华军 主编



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程断裂力学/曹彩芹,华军主编. —西安:西安交通大学出版社,2015.8
ISBN 978-7-5605-7674-9

I. ①工… II. ①曹… ②华… III. ①工程力学-断裂力学 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 165582 号

书 名 工程断裂力学
主 编 曹彩芹 华 军
责任编辑 王 欣

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 10.875 字数 260 千字
版次印次 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-7674-9/TB·94
定 价 25.00 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82669097
读者信箱:lg_book@163.com

版权所有 侵权必究

前 言

断裂力学作为固体力学的一个分支,在结构强度设计、安全可靠性分析和缺陷评定规范与标准中得到广泛应用,并在迅速发展。断裂力学将力学、工程学和材料学三者紧密结合起来,是一门涉及工科多专业的课程,是力学专业和相关专业的一门重要专业课。

传统的断裂力学教学内容主要注重的是在力学知识的基础上对经典的基础理论的介绍,忽视了近年来断裂力学的新理论、新方法和新成果,跟不上前沿学科的新发展。同时,学生在学习的过程中陷入繁琐的理论推导过程中,易对断裂力学课程产生畏难情绪,而多数专业的学生学习断裂力学的主要目的是应用于工程实践,解决工程实际问题。因此,在断裂力学的教学中,作者认为要解决好三个方面的问题:

- (1)要培养学生掌握学科的基本知识、基本理论和基本方法;
- (2)要紧跟学科新发展,对学生传授较新的成熟的理论、方法和成果;
- (3)培养学生解决实际工程问题的能力,力图在力学研究成果和工程实践应用二者间架设一座桥梁。

本书在编写的过程中,力图做到解决上面的三个问题。本书分为两部分,第一部分为基础知识,重点阐述传统断裂力学的基本理论和方法,主要内容有:能量释放理论、应力强度因子理论、复合型裂纹断裂理论、弹塑性断裂力学以及疲劳与裂纹扩展;第二部分为专题部分,重点介绍了反映断裂力学最新发展的理论、研究方法和数值计算以及断裂力学的工程应用,主要内容包括断裂力学中常用的数值方法及计算机软件应用、板壳断裂力学和岩石断裂力学,数值方法中包括边界元法、有限元法、扩展有限元法和分子动力学方法。

在本书理论阐述方面,作者有意识强化基本概念、基本理论和基本方法,在不影响内容完整性的前提下,对繁琐的数学推导与数学运算加以淡化,以便于读者用更多的精力掌握主要内容。

本书针对高等学校工程力学专业、土木工程专业、材料冶金工程类专业断裂力学课程而编写,基础部分内容适合本科生和研究生学习,专题部分内容适合研究生学习,建议结合学校的专业特色,选取两部分中的相关内容进行讲授,比如第二部分中的用有限元法计算应力强度因子,也可以作为本科生的教学内容并上机实习。本书也可供工科其他相关专业本科生和研究生自学使用,对相关专业的工程技术人员也有实用的参考价值。

本书第一部分和附录 A、附录 C 由曹彩芹编写,其中,李华参与附录 C 的部分内容和第 6 章的部分内容的编写;第二部分和附录 B 由华军编写。感谢硕士研究生王超、刘秦龙、张宇辉、武霞霞、侯燕等在文字录入和绘图等方面做的大量工作。本书在编写的过程中,参考、借鉴和引用部分国内外教材、公开发表的专著和期刊文献上的研究资料,特别是陆毅中编写的《工程断裂力学》,程靳、赵树山编写的《断裂力学》,柳春图、蒋持平编写的《板壳断裂力学》和李世愚、尹祥础编写的《岩石断裂力学》,在此对所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平和经验有限,疏漏之处在所难免,对于读者和专家的指正,作者深表谢忱。

作 者

2015 年 5 月 8 日于西安建筑科技大学

目 录

第一篇 基础知识

第 1 章 绪论	(1)
1.1 材料力学中的构件安全设计准则	(1)
1.2 断裂力学的发展	(3)
1.3 断裂力学主要内容	(5)
1.4 断裂力学的任务和方法	(6)
第 2 章 能量守恒和断裂判据	(8)
2.1 固体的理论断裂强度	(8)
2.2 裂纹对材料强度的影响.....	(10)
2.3 格里菲斯断裂理论.....	(11)
2.4 能量平衡理论.....	(14)
习题	(18)
第 3 章 裂纹尖端区域的应力场及应力强度因子	(19)
3.1 裂纹的类型和基本概念.....	(19)
3.2 裂纹尖端区域的应力场和位移场.....	(20)
3.3 应力强度因子断裂判据.....	(32)
3.4 常见裂纹的应力强度因子.....	(34)
3.5 应力强度因子和能量释放率的关系.....	(39)
3.6 确定应力强度因子的柔度法.....	(41)
3.7 阻力曲线.....	(42)
3.8 平面应变断裂韧度 K_{IC} 的测试	(44)
习题	(49)
第 4 章 复合型裂纹的脆性断裂判据	(50)
4.1 最大周向拉应力理论.....	(50)
4.2 能量释放率理论.....	(53)
4.3 应变能密度因子理论.....	(58)
习题	(62)
第 5 章 弹塑性断裂力学的基本理论	(64)
5.1 Irwin 对裂端塑性区的估计及小范围屈服时塑性区的修正	(64)
5.2 裂纹尖端的张开位移(CTOD)	(69)
5.3 J 积分理论	(73)
习题	(77)

第 6 章 疲劳与裂纹扩展	(79)
6.1 疲劳裂纹的形成及扩展	(79)
6.2 疲劳裂纹扩展速率	(80)
6.3 影响疲劳裂纹扩展速率的因素	(81)
6.4 疲劳裂纹寿命	(83)
习题	(84)

第二篇 专题部分

第 7 章 数值方法及软件应用	(85)
7.1 边界元法(BEM)	(85)
7.2 有限元法(FEM)	(89)
7.3 扩展有限元法(XFEM)	(96)
7.4 分子动力学模拟方法(MD)	(103)
第 8 章 板壳断裂力学	(115)
8.1 引言	(115)
8.2 Kirchhoff 板弯曲断裂理论	(116)
8.3 Reissner 型板壳弯曲断裂理论	(122)
8.4 Kirchhoff 与 Reissner 型板壳弯曲断裂理论的比较	(124)
8.5 有限尺寸板壳断裂分析的局部-整体法	(125)
第 9 章 岩石断裂力学	(127)
9.1 引言	(127)
9.2 岩石的力学特征	(128)
9.3 岩石应力-应变曲线	(128)
9.4 岩石破坏的特殊性	(131)
9.5 格里菲斯受压闭合裂纹模型	(133)
9.6 声发射法研究微裂纹演化	(135)
9.7 岩石断裂判据	(138)
9.8 岩体断裂判据	(140)
附录 A 弹性力学的基本方程	(143)
A.1 直角坐标系下平面弹性理论的基本方程	(143)
A.2 极坐标系下平面弹性理论的基本方程	(144)
A.3 应力函数	(145)
A.4 平面问题的边界条件	(146)
附录 B 用 Abaqus 求应力强度因子	(147)
附录 C 常见的应力强度因子表	(161)
参考文献	(166)

第一篇 基础知识

第1章 绪论

断裂力学是固体力学的一个分支,是研究含裂纹物体强度和裂纹扩展规律的一门学科,也称裂纹力学。

断裂力学萌芽于20世纪20年代格里菲斯(Griffith)对玻璃低应力脆断的研究,20世纪50年代才作为一门真正的学科建立起来。断裂力学的任务是:求得各类材料的断裂韧性;确定裂纹体在给定外力作用下是否发生断裂,即建立断裂准则;研究载荷作用下裂纹扩展规律;研究在腐蚀环境和应力同时作用下物体的断裂(即应力腐蚀)。目前,断裂力学已在航空、航天、交通运输、化工、机械、材料、能源等工程领域得到广泛的应用。

1.1 材料力学中的构件安全设计准则

承载构件的强度破坏可分为两类:一类是以屈服为主的破坏;另一类是以断裂为主的破坏。防止屈服、断裂是材料力学这门学科的主要任务之一。根据材料力学的结论,对于每种材料都要求测定五项力学性能指标:屈服应力 σ_s ,抗拉强度 σ_b ,伸长率 δ ,冲击韧性 a_k 和截面收缩率 ψ ,其中屈服应力 σ_s 和抗拉强度 σ_b 是强度指标,而伸长率 δ 、冲击韧性 a_k 、截面收缩率 ψ 是韧性指标。

材料力学的研究已经清楚地说明,材料光有足够的强度是不行的,必须同时具有足够的韧性,以避免断裂的发生。局部的应力集中可造成数倍于平均应力的峰值应力,对于脆性材料,此峰值应力由于超过材料的强度极限会立即造成断裂;但对韧性材料,峰值应力会造成局部屈服,从而使应力松弛而重新分布,峰值应力被抑制而不超过屈服极限,避免了断裂。

以上述五项力学性能指标为依据的设计方法称为常规设计方法。常规设计方法规定平均应力(或者是强度理论计算的相当应力)不超过某一“许用应力”值,而伸长率和冲击韧性则不低于某些规定值。

一般情况下,按照传统的常规设计方法所设计的构件,绝大多数都能够保证安全使用。但是常规设计方法有时会发生意外的断裂,特别是下面几种情况:

(1) 高强度材料和超高强度材料 $\sigma_s > 1400 \text{ MPa}$ 。

(2) 焊接结构。

(3) 处于低温或者是处于腐蚀环境中的结构。

如 1898 年 12 月 13 日, 纽约市大贮气罐破裂, 导致许多人受伤或死亡, 并毁坏周围大量财物。

1913 年 1 月 3 日, 波士顿一高压水管破裂, 使该地区被淹。

1938—1942 年, 世界上有 40 座全焊接铁桥未见任何异常现象却突然发生断裂而倒塌。

1943—1947 年, 美国制造的 5000 多艘全焊接“自由轮”, 竟发生 1000 多起断裂事故, 其中 238 艘完全毁坏, 有的甚至折成两段。

1943 年 1 月, 一艘油轮在码头交付使用时突然断裂成两段, 当时的气温为 -5°C 。计算表明, 断裂船体所受拉应力仅为 70 MPa , 而船体钢材为低碳钢, 屈服点约为 250 MPa , 抗拉强度为 $400\sim 500 \text{ MPa}$ 。

1949 年, 美国东俄亥俄州煤气公司的圆柱形液态天然气罐发生爆炸, 使周围的街市化为废墟。

20 世纪 50 年代初, 美国北极星导弹的固体燃料发动机壳材料为高强度钢 ($\sigma_s = 1400 \text{ MPa}$), 经传统方法检验合格, 但在试验发射时发生爆炸事故, 然而破坏应力却不到 σ_s 的一半。

以上这些事故发生时工作应力低于屈服应力 σ_s , 按照传统的材料力学观点是无法解释的, 这引起了人们对这些事件的高度重视。

人们对这些事故进行了大量的调查研究后发现, 无论是中、低强度钢, 还是高强度材料都可能发生脆性断裂, 并具有以下几个共同的特点:

(1) 断裂时的工作应力较低, 通常不超过材料的屈服应力, 甚至还低于常规设计的许用应力, 即使是塑性材料也发生脆性断裂。所以通常称这类破坏为低应力脆断。

(2) 脆断总是由构件内部存在宏观尺寸(肉眼可见的、 0.1 mm 以上)的裂纹源扩展引起。这种宏观裂纹源可能是在加工过程或使用过程中产生的。

(3) 裂纹源一旦超过一定尺寸(临界尺寸), 裂纹将以极高速度扩展, 直到断裂。

(4) 中、低强度钢的脆断事故一般发生在较低的温度 (15°C 以下), 而高强度材料则没有明显的温度效应。

研究人员通过广泛而深入的研究, 从根本上去分析常规设计方法, 认识它的不足, 寻找更加合理的设计途径, 分析中发现:

(1) 传统的设计思想存在一个严重的问题, 就是它把材料视为无缺陷的均匀连续体, 这与工程实际中构件的情况是不相符的。

对于工程实际中的构件, 总是不可避免地存在着各种不同形式的缺陷(如气孔、裂纹等), 正是由于这些缺陷的客观存在, 使材料的实际强度大大低于理论模型的强度。

(2) 研究结果还显示,脆性断裂是由于裂纹和应力集中造成的,并且发现低温也往往会导导致常用的各类钢发生脆性断裂。

据此,研究者得到如下的结论:裂纹(缺陷)是造成构件低应力脆性断裂的原因。

传统的设计准则把材料(有缺陷)作为理想化的材料,而实际上材料的缺陷使得这些准则不完全适合。应力集中的出现使得这些准则并不能得到满足,所有的参数不能满足缺陷存在的情况。

显然,这种情况下不承认裂纹存在的传统材料力学以及相关的弹塑性力学的判断强度准则已经不适用了,我们需要研究带裂纹物体的力学性质,因此,一门新型学科——断裂力学诞生了。断裂力学的任务就是找到一种新的参数来研究存在缺陷的构件的安全问题。

1.2 断裂力学的发展

断裂力学的发展最早可以追溯到20世纪20年代,其研究的内容几乎完全是以断裂为主的破坏。

1920年,英国人格里菲斯(Griffith)研究玻璃中裂纹的脆性扩展,成功地提出了以含裂纹体的应变能释放率为参量的裂纹失稳扩展准则,其内容是:结构体系内裂纹扩展,体系内总能量降低,降低的能量用于裂纹增加新自由表面的表面能;裂纹扩展的临界条件是裂纹扩展力(即应变能释放率)等于扩展阻力(裂纹扩展增加自由表面能而引起的阻力)。该准则很好地解释了玻璃的低应力脆断现象。格里菲斯理论可用于估算脆性固体的理论强度,并给出了断裂强度与缺陷尺寸之间的正确关系。

1944年,泽纳(Zener)和霍洛蒙(Hollomon)首先把格里菲斯理论用于金属材料的脆性断裂。1949年,欧文(Irwin)指出格里菲斯的能量平衡应该是体系内储存的应变能与表面能、塑性变形所做的功之间的能量平衡,并且还指出,对于延性大的材料,表面能与塑性功相比一般是很小的。同时把 G 定义为“能量释放率”或“裂纹驱动力”,即裂纹扩展过程中增加单位长度时系统所提供的能量,或裂纹扩展单位面积系统能量的下降率。格里菲斯的断裂判据和欧文能量平衡理论都是基于能量守恒理论而建立的断裂判据,被称为经典的断裂理论。

1957年,欧文提出表征外力作用下,弹性物体裂纹尖端附近应力强度的一个参量——应力强度因子,建立以应力强度因子为参量的裂纹扩展准则——应力强度因子准则(即 K 准则)。其内容为:裂纹扩展的临界条件为 $K_I = K_{Ic}$,其中 K_I 为应力强度因子,可由弹性力学方法求得; K_{Ic} 为材料的临界应力强度因子或平面应变断裂韧度,可由试验测定。采用弹性力学的方法得到应力强度因子的断裂判据的理论,称为现代断裂力学。

欧文对于断裂力学的重要贡献是将格里菲斯理论的能量释放率概念与一个更便于计算的裂纹尖端的参量——应力强度因子 K 联系起来,从而为线弹性断裂力学奠定了理论基础。因为应力强度因子和能量释放率概念的建立及应用都是以线弹性力学为基础的,故这两部分理

论被称为线弹性断裂力学,其为分析含裂纹结构的强度提供了新的有力工具。

线弹性断裂力学着重研究出现断裂时在裂纹尖端附近具有线弹性变形和小范围塑性变形的情况,也就是说,外加应力要低于净截面屈服应力。但是随着生产技术的发展,许多工程结构由于材料的韧性足够大,在载荷增大时,伴随着裂纹扩展的塑性区已经达到裂纹尺寸、试件尺寸的另一数量级,显然,线弹性变形或者小范围塑性变形条件已不能满足,线弹性的假设已不成立,所以必须发展弹塑性断裂力学。

最早考虑裂纹尖端塑性区效应的方法是在线弹性断裂力学的基础上加以修正。1958年,欧文提出,裂纹尖端塑性区的存在使结构的刚度比完全按线弹性分析所得结果要“弱”一些,这相当于使裂纹长度稍微增大一点,在计算应力强度因子时用增大的当量裂纹长度。用这种修正方法可以扩大线弹性断裂力学的应用范围。

当裂纹尖端大范围内应力与应变呈非线性关系时,裂纹尖端进入大范围屈服和全面屈服的状态,基于线弹性变形的线弹性断裂力学的理论不再适用。

1963年,韦尔斯(Wells)发表有关裂纹尖端张开位移(CTOD)的著名论文,提出以裂纹尖端张开位移作为断裂参量判别裂纹失稳扩展的一个近似工程方法。其内容是:不管含裂纹体的形状、尺寸、受力大小和方式如何,当裂纹尖端张开位移 δ 达到临界值 δ_c 时,裂纹开始扩展。 δ_c 是表征材料性能的常数,由试验得到。此准则主要针对韧性材料短裂纹平面应力断裂问题,特别是裂纹体内出现大范围屈服和全面屈服的情况。

1968年,Rice和Hutchinson等人基于全量塑性理论得到一个与裂纹顶端路径无关的积分,后来被称为 J 积分,此积分值是裂纹顶端应力应变状态的一种综合度量。他们的工作为 J 积分方法奠定了理论基础。随后,Hutchinson、Rice和Rosengren建立了著名的HRR奇性场。HRR奇性场表征了弹塑性材料裂纹尖端应力应变场的主要特征,而 J 积分表示了HRR奇性场强度。Begley和Landes的工作使 J 积分作为弹塑性断裂力学主要参量的体系建立起来。在此基础上, J 积分理论及其应用成为弹塑性断裂力学中一个最为活跃的研究领域,并取得了丰硕的成果。1972年以后,Begley和Landes等人通过实验证实,在一定条件下, J 积分的临界值 J_c 是一个材料常数,当超过这个临界值时,裂纹开始扩展,用此作为韧性材料裂纹起始扩展的判据。至此,弹塑性断裂力学得到快速发展,并且迅速应用于工程实践。

20世纪50年代初期,关于焊接船体断裂事故的分析、关于“彗星号”客机的疲劳断裂分析,以及其他一些重大断裂事故的分析,都明确地表明:大多数材料和工程构件中不可避免地存在宏观裂纹,而宏观裂纹扩展将导致材料破坏。分析裂纹在疲劳载荷下扩展至临界尺寸的过程是非常必要的。在众多的描述裂纹扩展速率的公式中,Paris等在1961年提出的以应力强度因子变程作为控制裂纹扩展速率的主要参量的公式,具有明显的优越性。但由于疲劳裂纹扩展速率受到许多因素的影响,它们不是简单的Paris公式所能概括的,随后的研究工作中,考虑不同因素的影响,又提出了许多改进了的疲劳裂纹扩展速率公式。

1979年, Hutchinson 和 Paris 以 J 积分为控制参量, 分析裂纹扩展, 提出 J_R 阻力曲线概念。在 J 积分作为单参数断裂准则时, 数值计算表明, 裂纹尖端的应力应变场难以用 HRR 场表征, 而 J_c 的测定依赖试样几何尺寸和加载方式。从 1986 年开始, 王自强等人逐渐建立了裂纹尖端弹塑性高阶场的基本方程, 为弹塑性断裂双参数断裂准则提供了理论基础。20 世纪 90 年代, 针对裂纹起始扩展提出了 $J-Q$ 和 $J-K$ 双参数准则。

对动态断裂的定量分析是由 Mott 在 1948 年作出的, 1951 年 Yoffe 提出了裂纹动力学(动态断裂力学)的解。此后, 围绕着裂纹的扩展(如动态载荷下裂纹起始扩展、界面动态裂纹扩展)、动态裂纹止裂、裂纹分叉、快速断裂的起裂点、动态能量释放率、动态断裂韧度等课题进行了大量理论分析和实验工作。近年来, 非线性断裂力学、动态断裂力学和微观断裂力学在理论上有了新的进展, 特别是随着计算机技术的快速发展, 计算断裂力学得到极大的发展, 延伸到断裂研究的各个方面。近年来发展起来的数值方法包括有限元法、边界元法、扩展有限元法, 可以很好地解决断裂力学问题, 如裂纹尖端应力应变场的求解, 应力强度因子、 J 积分的计算, 以及裂纹尖端奇异性计算等问题。1999 年, 由美国西北大学 Belytschko 提出的扩展有限元法, 基于单元分裂的思想, 在常规有限元位移模式中加入一些特殊的函数以反映不连续面的存在, 因此在计算过程中, 不连续场的描述完全独立于网格边界, 这使其在处理断裂问题上具有得天独厚的优势。在国内外, 扩展有限元法已经得到了快速发展和广泛应用。分子动力学方法也是近年来发展起来的一种研究断裂力学的方法, 该方法是一种重要的原子尺度计算机模拟手段, 依靠牛顿力学来模拟分子体系的运动, 抽取样本计算体系的构型积分, 以构型积分的结果为基础, 进一步计算体系的热力学量和其他宏观性质。分子动力学模拟技术既能得到原子运动的轨迹, 又能像做实验一样观察, 所以越来越多的学者应用分子动力学方法, 来研究裂纹萌生和扩展时的规律和机理, 并取得了不少进展。

在断裂力学发展的初期和以后相当长的一段时间内, 研究主要针对金属材料, 但由于大量非金属材料逐渐引入工程结构, 人们也试图将断裂力学理论扩展到非金属材料、复合材料结构的分析中去。近年来, 对纤维增强复合材料、高分子聚合物、陶瓷材料以及岩石等方面的断裂力学的研究, 日益引起研究者的兴趣, 并取得了许多成果, 例如, 各向异性材料断裂力学、界面裂纹问题等, 甚至在采矿、地震和破冰等领域, 断裂力学理论也得到了应用。

但迄今为止, 断裂动力学仍是一门不很成熟的学科, 例如, 它不能处理加载速率很高的动态断裂现象, 也不能处理裂纹传播速度较大的扩展裂纹, 而非线性断裂动力学尚未真正建立起来。断裂力学还是一门年轻的学科, 它还很不成熟, 还有大量问题有待于深入研究和继续探讨。

1.3 断裂力学主要内容

根据研究的观点和出发点不同, 断裂力学可以分为微观断裂力学和宏观断裂力学。微观

断裂力学是研究原子位错等晶体尺度内的断裂过程;宏观断裂力学属于固体物理学的范畴,它是从宏观的连续介质力学角度出发,研究含缺陷或裂纹的物体在外界条件(荷载、温度、介质腐蚀、中子辐射等)作用下宏观裂纹的扩展、失稳开裂、传播和止裂规律。所谓宏观裂纹,是指在材料制造或在加工和使用过程中形成的宏观尺度(10^{-2} cm 以上)的裂纹缺陷。在实际结构中,这种裂纹的存在是不可避免的。本书第一部分基础知识主要研究的是宏观断裂力学。第二部分主要内容除分子动力学方法外也都属于宏观断裂力学范畴。断裂力学发展至今,越来越需要深入到微观,在原子或者分子尺度上研究裂纹萌生和扩展的微观特性,并建立起微观特性与宏观行为的联系,解释裂纹萌生和扩展的内在本质规律。第二部分中介绍的分子动力学模拟技术,既能得到原子运动的轨迹,还能像做实验一样观察微观细节,是研究微观断裂力学现象的有力工具。

宏观断裂力学通常又分为线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学。

线弹性断裂力学是应用线性弹性理论研究物体裂纹扩展规律和断裂准则。线弹性断裂力学可用来解决材料的平面应变断裂问题,适用于大型构件和脆性材料的断裂分析。线弹性断裂力学主要用于宇航工业,因为在宇航领域减轻重量是非常重要的,所以必须采用高强度低韧性的金属材料。实际上金属材料裂纹尖端附近总存在着塑性区,若塑性区很小(如远小于裂纹长度),经过适当的修正,仍可以用线弹性断裂力学进行断裂分析。线弹性断裂力学主要内容有:能量守恒与断裂判据,应力强度因子,复合型裂纹的脆性断裂理论。

弹塑性断裂力学是应用弹性力学、塑性力学研究物体裂纹扩展规律和断裂准则,适用于裂纹尖端附近有较大范围塑性区的情况。由于直接求裂纹尖端附近塑性区断裂问题的解析解十分困难,目前多采用 J 积分法、CTOD 法、 R 曲线法等近似或实验方法进行分析。塑性断裂力学在焊接结构缺陷的评定,核电工程的安全性评定,压力容器、管道和飞行器的断裂控制,以及结构物的低周疲劳和蠕变断裂的研究方面起重要作用。弹塑性断裂力学主要内容有:裂纹尖端张开位移 CTOD, J 积分理论。

1.4 断裂力学的任务和方法

断裂力学是研究含裂纹物体的变形体力学。一方面,运用弹性力学、塑性力学以及试验力学的方法,获得各种结构在外荷载作用下裂纹尖端的力学参数;另一方面,通过实验的方法测量各种材料在不同的热处理条件下各力学参数的临界值和裂纹在重复荷载作用下的扩展规律。

断裂力学的任务是:

- (1) 研究裂纹体的应力场、应变场与位移场,寻找控制材料开裂的物理参量。
- (2) 研究材料抵抗裂纹扩展的能力——韧性指标的变化规律,确定其数值及测定方法。
- (3) 建立裂纹扩展的临界条件——断裂准则。

(4)含裂纹的各种几何构形在不同荷载作用下,控制材料开裂的物理参量的计算。

断裂力学的研究方法是:从弹性力学方程和塑性力学方程出发,把裂纹作为一种边界条件,考察裂纹顶端的应力场、应变场和位移场,设法建立这些场与控制断裂的物理参量的关系和裂纹尖端附近的局部断裂条件。

掌握断裂力学的任务和方法,可以解决以下问题:

(1)剩余强度的计算问题。结构型式已定,裂纹情况已知,这个裂纹的承载能力如何?

(2)确定损伤容限。结构型式已定,外荷载情况已知,容许最长的裂纹是多少?

(3)损伤容限设计。已知结构的损伤容限(容许的最长裂纹)和外荷载,如何使结构中各部件的截面满足要求?

(4)寿命计算。在重复荷载作用下,计算初始裂纹长度扩展至容许裂纹长度所需要的加载次数。

(5)选择材料。确定什么材料可以容许比较长的裂纹存在而不发生断裂,什么材料抵抗裂纹扩展的性能比较好,什么材料抗腐蚀性能较好。

目前,用线弹性断裂力学解决脆性和准脆性断裂问题已获得一致的公认,但是对于弹塑性问题,虽然提出不少的理论,但由于问题的复杂性,目前仍然没有获得统一的解决办法,这也是广大力学工作者特别关注的问题。

本书仅阐述断裂力学的基本原理、方法和应用。

第 2 章 能量守恒和断裂判据

在断裂力学建立以前,机械构件是根据传统的材料力学的强度理论进行设计的,对于构件的任何部分,设计应力的水平一般都不得大于材料的屈服应力。

对于含裂纹构件安全设计,采用传统材料力学的设计方法是不能满足要求的。现代断裂力学对含裂纹物体的裂纹端点区进行应力应变分析,从而得到表征裂端区应力应变场强度的参量。然而,在 20 世纪 50 年代以前,用来进行裂纹端区的应力应变分析的手段尚不成熟。本章介绍的是在现代断裂力学建立以前,科学家根据能量守恒定律建立的断裂判据,主要包括 Griffith 的断裂判据和 Irwin - Orowan 能量平衡理论。相对于现代断裂力学,这部分内容称为经典的断裂理论。

2.1 固体的理论断裂强度

为了研究构件因有裂纹而损失的强度,我们首先对无裂纹弹性体的断裂强度进行简单的介绍。

物质是由原子组成的,原子之间靠电磁力结合在一起。固体被拉断,显然是破坏了原子之间的结合。对于晶体固体,其内部原子按一定次序排列,晶体的形状是多种多样的,下面以立方晶格为例。此时,晶格的 8 个原子排列在 8 个定点上,原子间由原子键相连接,如图 2.1.1 所示。

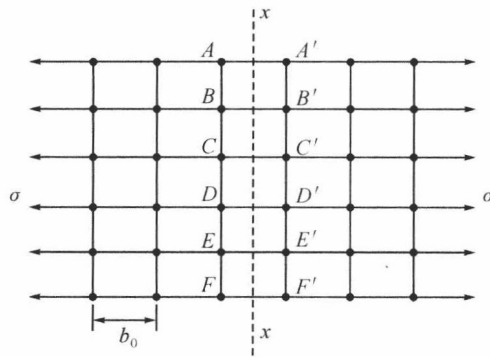


图 2.1.1 原子晶格排列

图中每个小圆点代表一个原子,在材料左右两侧沿原子轴方向施以应力 σ ,加载前原子间距离为 b_0 。假设应力足够大,克服了 $x-x$ 平面两边原子间的吸引力,晶体沿 $x-x$ 断裂。断裂面两边的一对原子,例如 $C-C'$,除它们之间的相互作用力之外,其他原子对它们也有作用力。为了简单起见,只考虑 $C-C'$ 原子之间的相互作用力。

由量子力学可以得到原子间相互结合力 F 与原子之间距离 b 的数学关系

$$F(b) = \alpha b^{-n} - \beta b^{-m} \quad (2.1.1)$$

式中: α, β, m, n 为原子的特征常数, 且 $m > n > 1$, αb^{-n} 为吸引力, βb^{-m} 为排斥力。 $F(b) = 0$ 表示原子本身之间的吸引力与排斥力处于平衡状态, 此时原子之间距离为

$$b_0 = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{1}{m-n}} \quad (2.1.2)$$

$F(b)$ 随着原子之间距离 b 的变化规律如图 2.1.2 所示, 图中纵坐标表示原子间结合力 $F(b)$, 横轴表示两原子间的距离 b , 纵轴上方为吸引力, 下方为排斥力。

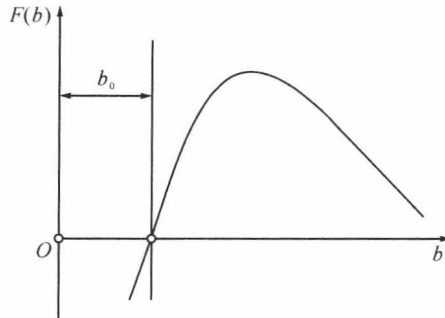


图 2.1.2 原子间结合力随距离变化图

从图 2.1.2 中可以看出, 当两原子间距为 b_0 时, 原子处于平衡位置, 原子间的作用力为零; 离开平衡位置后, 随着原子间的距离的增大, 结合力 F 越来越大, 直到最大, 过最大值后, 随着原子之间距离的增大, 结合力迅速减少。

一对原子之间的结合力可以看成均匀分布、作用在 $b_0 \times b_0$ 的结晶面上的正应力, 即 $\sigma = F(b)/b_0^2$, 现在将图 2.1.2 的纵坐标除以 b_0^2 变成应力轴, 横坐标减去 b_0 变成位移轴 ($x = b - b_0$), 可得应力位移曲线。这条曲线可以近似地看作正弦曲线的半个波, 如图 2.1.3 所示。用数学公式表示应力 σ 和位移 x 的关系为

$$\sigma = \sigma_c \sin(2\pi x/\lambda) \quad (2.1.3)$$

式中: λ 为波长, 当位移达到 x_m 时吸引力最大, 为 σ_c 。拉力超过此值以后, 引力逐渐减小, 在位移达到正弦周期之半 ($\lambda/2$) 时, 原子间的作用力为零, 即原子键已完全破坏, 达到完全分离的程度。可见, 理论断裂强度即相当于需克服的最大引力 σ_c 。

图 2.1.3 中正弦曲线下所包围的面积代表使金属原子完全分离所需的能量。从宏观上看, 物体断裂后将出现断裂面, 断裂面总是成对出现, 分离后形成两个新表面。设 γ 为产生单位断裂面所需要的表面能, 外界对原子所做的功完全用于形成新的断裂面, 所以有

$$2\gamma = \int_0^{\frac{\lambda}{2}} \sigma dx = \frac{\lambda}{\pi} \sigma_c \quad (2.1.4)$$

对于小应变情况, 有 $\sigma = \sigma_c 2\pi x/\lambda$, 引入弹性模量 E , 则 $\sigma = E\epsilon = Ex/b_0$, 可得理论断裂强度

$$\sigma_c = \left(\frac{E\gamma}{b_0} \right)^{1/2} \quad (2.1.5)$$

这个公式是在理想情况下导出的, 具有很重要的意义, 它说明完整晶体的理想断裂强度完全取决于原子间的作用力, 与材料的弹性模量 E 、表面能 γ 以及平衡状态下原子间距 b_0 有关。

若以 $\gamma = 1.0 \text{ J/m}^2$, $b_0 = 3.0 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 代入式(2.1.5)中, 可算出 $\sigma_c \approx E/10$, 这当然是很大的应力值, 实际工程材料的断裂强度要比这个值小得多, 说明了工程实际中材料不可避免地存在裂纹或其他缺陷, 使材料的断裂强度急剧下降。

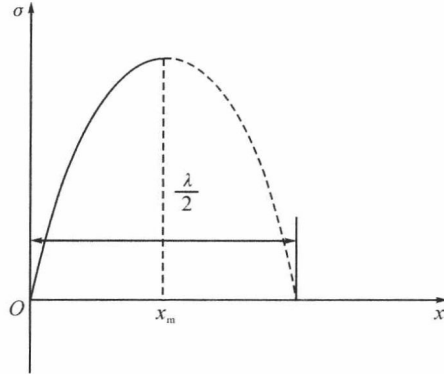


图 2.1.3 原子间应力位移曲线

2.2 裂纹对材料强度的影响

多数固体的理想断裂强度的数量级为 $E/6$, 但是实际上结晶体和玻璃的断裂强度要比理论计算的断裂强度低得多, 至少低一个数量级, 即 $E/100$ 。格里菲斯首先提出理想值和实际值差别的原因, 他认为物体内部可能含有很小的缺陷, 在缺陷的某一部位产生严重的应力集中, 应力集中必然导致材料的实际断裂强度远低于该材料的理论断裂强度。

具有裂纹的弹性体受力以后, 在裂纹尖端区域将产生应力集中现象, 但是应力集中是局部性的, 离裂纹尖端稍远处, 应力分布又趋于正常。

在裂纹尖端区域应力集中的程度与裂纹尖端的曲率半径有关, 裂纹越尖锐, 应力集中的程度越高。

图 2.2.1 所示为无限大薄平板, 存在贯穿的椭圆形切口, 承受单向均匀拉应力作用, 切口长轴为 $2a$, 短轴为 $2b$, 根据 Inglis 的线弹性解, 当长轴端点 A (或 A') 的曲率半径 $\rho \ll a$, 最大拉应力发生在椭圆长轴端点 A (或 A') 处, 其值为

$$(\sigma_y)_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) \quad (2.2.1)$$

该点处的曲率半径为

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (2.2.2)$$