



断裂力学

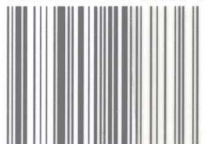
张晓敏 万玲 严波 张培源 编著

大学出版社

清华大学出版社数字出版网站

WQBook  
www.wqbook.com

ISBN 978-7-302-29683-6



9 787302 296836 >

定价：15.00元



断裂力学

张晓敏 万玲 严波 张培源 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

断裂力学又称为裂纹体力学,通常包含裂纹体断裂原理和裂纹体应力分析两个方面。从工程角度讲,断裂力学是研究裂纹构件强度的工程科学。它是20世纪60年代以来随高强度材料在工程中大量应用而产生和发展起来的,涉及金属物理、冶金和力学等多门类学科的边缘科学。断裂力学是研究裂纹体强度和破坏的主要工具,又是将它的研究成果和工程实践应用相结合的桥梁。本书从宏观连续体力学的角度概述裂纹体强度计算原理和方法,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。本书针对高等学校工程力学、机械工程、土木工程和材料工程类专业的20~30课内学时的断裂力学课程而撰写,也适用于需要处理裂纹体强度问题的工科其他专业本科生及研究生自学之用,对相关工程技术人员亦有实用的参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

断裂力学/张晓敏等编著.--北京:清华大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-302-29683-6

I. ①断… II. ①张… III. ①断裂力学 IV. ①O346.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第184720号

责任编辑:佟丽霞 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京鑫丰华彩印有限公司

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:140mm×203mm 印 张:6.125 字 数:157千字

版 次:2012年9月第1版

印 次:2012年9月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:15.00元

产品编号:045031-01

序 言

断裂力学又称为裂纹体力学,通常包含裂纹体断裂原理和裂纹体应力分析两个方面。从工程角度讲,断裂力学是研究含裂纹构件强度的工程科学。它是 20 世纪 60 年代以来,随高强度材料在工程中大量应用而产生和发展起来的,涉及金属物理、冶金和力学等多门类学科的边缘科学。断裂力学是研究裂纹体强度和破坏的主要工具,又是将它的研究成果和工程实践应用相结合的桥梁。

本书从宏观连续体力学的角度概述裂纹体强度计算原理和方法,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。

本书的论述以弹性力学和塑性力学的基本原理为起点,编写力求简明又概括工程中应用断裂力学所需要的基本原理、方法、技能和数据,以形成本书的个性。

全书共 6 章。第 1 章引论,介绍什么是断裂力学、断裂力学的内容和方法、断裂力学的由来、断裂力学的模型和应用范围。第 2 章线性断裂力学原理,讲述 Griffith 准则、裂纹前缘的应力场和位移场与应力强度因子、应力强度因子判据、线性断裂力学的适用范围、 K_{Ic} 测试原理和复合裂纹断裂理论。第 3 章应力强度因子的计算,介绍

二维裂纹问题的复变函数解法、边界配位法、三维裂纹应力强度因子的解析方法、数值方法和交替算法。第4章线性断裂力学的应用,讲述裂纹体与压力容器的一次性抗断设计、裂纹体的疲劳寿命和应力腐蚀,这是线性断裂力学应用的三鼎足。第5章弹塑性断裂力学和 J 积分,讲述线弹性断裂力学的 Irwin 修正、 J 积分的测试和 COD 理论。第6章裂纹体的弹塑性分析,简介Ⅲ型裂纹问题的弹塑性分析、滑移线场及极限分析和带状屈服模型。前5章附习题,全书共含51道习题。这些内容和习题适合于课内20~30学时的教学安排。

本书针对高等学校工程力学、机械工程、土木工程和材料工程类专业断裂力学课程而撰写,也适用于需要处理裂纹体强度问题的工科其他专业本科生及研究生自学之用,对相关工程技术人员也有实用的参考价值。

张晓敏完成了全书第一稿并应用于本科工程力学专业27学时教学多次;万玲编写了第6章、附录和习题及其解答;严波对本书进行了详细的审阅与修订;张培源编制了本书内容体系,修改第一稿文字和插图。

囿于作者学识所限,错误之处难免,敬请读者指正。

编 者

2012年5月28日于重庆大学

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 断裂力学	1
1.1.1 什么是断裂力学	1
1.1.2 断裂力学的内容和方法	2
1.2 断裂力学的由来	2
1.3 断裂力学的模型	4
1.3.1 介质模型	4
1.3.2 裂纹模型	4
1.3.3 线性和非线性断裂力学	6
1.4 应用	8
习题	8
第 2 章 线性断裂力学原理	10
2.1 Griffith 准则	10
2.1.1 能量平衡准则	10
2.1.2 能量平衡准则的普遍叙述	12

2.1.3	Irwin-Kies 公式	13
2.1.4	组合梁模型	15
2.2	裂纹前缘的应力场和位移场与应力强度因子	16
2.2.1	前缘邻域局部坐标系	16
2.2.2	裂纹前缘邻域应力场、位移场的渐近 展开式	17
2.2.3	应力强度因子	20
2.3	应力强度因子判据	22
2.3.1	Bueckner 公式	22
2.3.2	应力强度因子与裂纹扩展力的关系	25
2.3.3	K 判据及其与 G 判据的等价性	26
2.3.4	平面应变断裂韧性	27
2.3.5	三维问题中能量释放率与应力强度因子的 关系	27
2.4	线性断裂力学(LEFM)的适用范围	28
2.4.1	线弹性断裂力学的误差及其适用的 必要条件	29
2.4.2	误差相容性与小范围屈服条件	30
2.4.3	常用试样平面应变线性断裂力学的 适用条件	31
2.5	K_{Ic} 测试原理	31
2.5.1	柔度标定	31
2.5.2	K_{Ic} 的直接测定方法	32
2.6	复合裂纹断裂理论	35
2.6.1	什么是复合裂纹断裂理论	35
2.6.2	最大正应力理论	36
2.6.3	能量密度因子理论	37
2.6.4	纯 II 型的 θ_c 和临界 SIF	39

2.6.5 实验验证	40
习题	42
第3章 应力强度因子的计算	47
3.1 应力强度因子的性质	47
3.1.1 应力强度因子基本含义	47
3.1.2 与 G (裂纹扩展力)的关系	47
3.1.3 与载荷的线性齐次关系	48
3.1.4 裂纹面上的等效载荷	49
3.1.5 SIF 与 J 积分的关系	50
3.2 二维裂纹问题的复变函数解法	51
3.2.1 穆什海利希维利复变函数方法	51
3.2.2 Westergard 应力函数解法	53
3.2.3 III型裂纹问题的复变函数方法	55
3.3 二维裂纹问题的傅里叶变换解法	57
3.3.1 傅里叶变换	57
3.3.2 弹性力学平面问题的傅里叶变换解	58
3.3.3 半平面上边裂纹的 I 型问题	61
3.4 二维裂纹问题的边界配位法	65
3.4.1 二维裂纹问题的基本解	65
3.4.2 边界配位法	67
3.5 三维裂纹应力强度因子的解析方法	67
3.5.1 轴对称问题的 Hankel 变换解	67
3.5.2 内埋椭圆片状裂纹的 I 型问题	71
3.6 数值方法	76
3.6.1 有限元法	76
3.6.2 边界积分方程(BIE)和边界元方法	78
3.7 交替计算方法与近似方法	80

3.8 应力强度因子表	81
3.8.1 常见的应力强度因子手册	81
3.8.2 应力强度因子表的应用例	81
习题	82
第 4 章 线性断裂力学的应用	86
4.1 一次性抗断设计	86
4.1.1 一次性抗断设计 4 类提法	86
4.1.2 圆筒形薄壁压力容器的漏泄-断裂理论	87
4.2 疲劳裂纹扩展和 Paris 公式	88
4.3 裂纹体的疲劳寿命	92
4.3.1 裂纹体的永久寿命	92
4.3.2 裂纹体的剩余寿命	93
4.4 应力腐蚀	97
习题	99
第 5 章 弹塑性断裂力学和 J 积分	101
5.1 弹塑性断裂力学概述	101
5.2 线弹性断裂力学的 Irwin 修正	102
5.2.1 塑性区的近似估计	102
5.2.2 应力松弛的修正	103
5.2.3 线性断裂力学的 Irwin 修正	104
5.3 守恒积分和 J 积分	105
5.3.1 连续介质力学中的守恒积分	105
5.3.2 J 积分的 Rice 定义	106
5.4 J 积分的性质	107
5.4.1 J 积分的守恒性	108

5.4.2	线弹性情况下与应力强度因子的关系	109
5.4.3	J 积分与能量释放率	110
5.4.4	常用试样的 J 积分	112
5.5	J 积分的测试和临界性	113
5.5.1	J 积分的单试样测试	113
5.5.2	J 积分的多试样测试	113
5.5.3	J_{IC} 及其测试的有效性	114
5.6	COD 理论	115
5.6.1	COD 的含义	115
5.6.2	小范围屈服条件下与 J 积分的关系	116
5.6.3	弹塑性条件下与 J 积分的单值对应关系	117
5.7	弹塑性断裂力学的其他问题	120
5.7.1	J 积分的进一步研究	120
5.7.2	关于弹塑性断裂力学的判据	121
	习题	121
第 6 章	裂纹体的弹塑性分析	124
6.1	Ⅲ型裂纹问题的弹塑性分析	124
6.1.1	模型和基本方程的相平面描写	124
6.1.2	控制方程和边界条件	126
6.1.3	线弹性渐近解	126
6.1.4	小范围屈服的塑性解	127
6.1.5	幂硬化材料的情况	129
6.2	滑移线场和极限分析	129
6.2.1	滑移线场和极限载荷	129
6.2.2	三点弯曲试样的极限载荷	132
6.3	带状屈服模型	134
6.3.1	D-M 模型	134
6.3.2	Griffith 裂纹的 D-M 模型分析	135

附录 A 应力强度因子表	138
A.1 无限域的平面问题	138
A.2 半平面上平面问题	140
A.3 条形域的平面问题	142
A.4 三维裂纹问题	150
附录 B 椭圆函数表	159
习题参考答案	161
索引	178
参考文献	179

第 1 章

引 论

1.1 断裂力学

1.1.1 什么是断裂力学

断裂力学是研究带缺陷或裂纹的物体或构件强度的学科。

构件的几何缺陷和组织缺陷对强度有至关重要的影响。20 世纪 30 年代以来,金属物理学家讨论了晶体的缺陷对晶体强度的影响,引入位错的概念,解释了晶体的实际强度大大低于理论强度的现象,这标志着缺陷对强度的影响从此纳入了科学的研究范畴。

传统的强度设计,例如许用应力法,不能计入裂纹的影响,因为裂纹尖端处具有极大的应力集中,应力有趋于无穷大的理论解,用屈服强度、强度极限、延伸率及冲击韧性等常规指标评价材料的优劣和评估构件的强度便显得无能为力。

断裂力学将讨论的缺陷模型简化为裂纹。研究裂纹对物体或构

件强度的影响,就是讨论裂纹体的强度规律和裂纹在物体中运动规律。从这个意义上讲,断裂力学又可以称为裂纹体力学,弥补了常规强度设计方法不能处理裂纹的不足。

1.1.2 断裂力学的内容和方法

不同的工程领域,对断裂力学的内容有不同的理解。机械工程师与结构工程师认为断裂力学研究缺陷构件的强度;金属物理学者认为断裂力学研究材料断裂的机理;冶金和材料学者认为断裂力学用以评价材料的抗断性能;力学家认为断裂力学研究物体中裂纹的运动规律。将这些方面汇总,就是断裂力学的内容。

作为力学的一个分支,断裂力学的方法基本上属于宏观的唯象方法,即从现象学的角度研究断裂现象和其他现象之间的联系,得出相应的规律,然后将之用于工程问题,演绎出具体的结论以指导工程实践。

1.2 断裂力学的由来

20 世纪 40 年代以来,一系列所谓“低应力脆性断裂”的工程事故催生了断裂力学的确立。

所谓低应力脆性断裂是名义应力远小于屈服应力、无显著变形为特征的断裂现象,最典型的工程实例如以下 3 组系列的工程事故。

1) 阿尔伯特运河上的系列钢桥断裂

比利时阿尔伯特(Albert)运河上约 50 座用转炉沸腾钢材、全焊接方法建造的无斜撑杆空腹型桥梁,自 1938 年起的十余年时间里,发生了 14 起破坏事故,其中 6 起发生在低温下。

2) 自由轮系列断裂

“二战”期间,为支援欧洲战场,美国大量建造了全焊接钢船,命

名为自由轮。战争期间及战后,发生了千次以上的系列断裂事故,有的断裂发生在海面平静的停泊状态。这一系列事故大大促进了抗断设计研究工作的进展。

3) 压力容器

因缺陷存在导致压力容器失效的工程事故甚多。1980年12月1日,加拿大木斯息城 15900m^3 油罐发生破坏,仅直接损失就达850万美元,时值全年最低温。

此外,在飞机(含F-111,DC-10)、火箭发动机、北极星潜艇和海上石油钻井平台等领域也有较多的事故报道。研究表明,这些事故的共同点是材料的常规强度指标,如抗拉强度属正常范围,但焊接区内存在微裂纹,且发生断裂的环境温度较低。

这些低应力脆性断裂事故的研究中,最重要的成果是断口的形貌转变温度研究,它揭示材料的缺口冲击韧性数值对环境温度的关系曲线表现为两个平台区,两平台之间有一个狭窄的温度带,这就是形貌转变温度(fracture appearance transition temperature, FATT)。由此解释低应力脆性断裂发生在下平台区,工程抗断设计应使构件工作在上平台区。

这些低应力脆性断裂事故的研究中发现的裂纹,使人重新注意到1920年Griffith关于含切口玻璃片强度的论文^[1]。文中利用含微小切口的单向拉伸板平面问题的解,按能量平衡原理,给出了裂纹失稳扩展的临界应力,得出临界应力反比于切口长度平方根的结论。这个工作被后人认定为创始断裂力学的标识。

1948—1952年,Irwin、Orowan对Griffith理论作出了考虑材料塑性的修正。1957年,当断口的形貌转变温度研究真正取得成果,即将在抗断设计中形成以此为基础的规范之时,Irwin提出了应力强度因子理论^[2],完美地形成了线性断裂力学的体系,从此抗断设计进入了可以定量分析的阶段。其后,复合裂纹断裂理论得到有效的研究进展,1974年Sih的能量密度因子理论^[3]是复合裂纹断裂理论得到成功的标识。

在弹塑性范围内断裂力学进展中最重要的成就是赖斯^[4](Rice, 1968)和切聂巴洛夫(1967)提出了 J 积分^[5]。1972年, Begley 和 Landers 完成了 J 积分测试^[6]。

时至今日, 断裂力学已广泛应用于各类工程领域, 形成了断裂力学的所谓“三鼎足”, 即一次性脆断的应用、疲劳裂纹扩展的应用和应力腐蚀裂纹扩展中的应用。

1.3 断裂力学的模型

1.3.1 介质模型

本书主要叙述以连续介质模型为基础的断裂力学。在这个基础上, 连续介质模型为基础的弹性力学和塑性力学都成为处理裂纹体应力分析的理论和方法的基础。本书涉及的介质主要是 Hooke 介质, 即线性弹性、均匀和各向同性的固体介质, 在弹塑性范围内, 主要涉及理想弹塑性固体。

1.3.2 裂纹模型

常用的裂纹模型有如下 3 种。

(1) 数学裂纹, 图 1.1(a)。

将裂纹模型简化为连续体中的间断面, 成为物体新的自由表面, 这个间断面是数学意义下的曲面, 因此, 这个模型又称数学裂纹模型。

(2) 有限锐角裂纹, 图 1.1(b)。

(3) 有限间隔钝形裂纹, 图 1.1(c)。

这些裂纹模型给出了裂纹尖端附近裂纹表面的几何形状。将介质模型与裂纹模型结合, 就组成裂纹体应力分析的连续体力学框架,

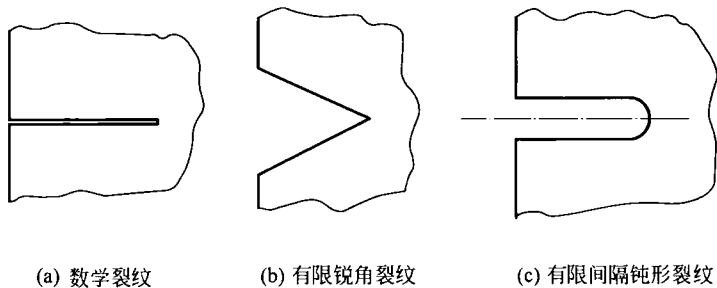


图 1.1 三类裂纹模型

在这个框架下,裂纹体应力分析的特点就是将裂纹作为物体的特殊形式的部分表面,裂纹面上的边界条件是应力边界条件,对应的外加面力为零。

描写裂纹的几何形状需要引入裂纹的几何参数,简称裂纹参数,用以确定裂纹的位置、大小和形状。

可以作为弹塑性力学平面问题处理的裂纹,常称为二维裂纹。例如无限大平面内的裂纹(附录图 A. 1)、半平面上的边裂纹(附录图 A. 5)和内埋于无限体或有限尺寸物体的裂纹(附录图 A. 7)。通常将附录图 A. 1 表示的无限大平面内的裂纹称为 Griffith 裂纹。这种情况下,在讨论平面内将裂纹表示为曲线或直线,对于表现为直线形式的二维裂纹,裂纹由尖端发出的笔直延长线称为裂纹线。

必须作为弹塑性力学三维问题处理的裂纹,常称为三维裂纹。例如内埋于物体中的椭圆片状裂纹,描写裂纹面大小和形状的参数取半长轴 a 和半短轴 b ,如图 1.2 所示。常见三维裂纹的另一例子是有限尺寸物体中的半椭圆边裂纹,其描写裂纹面大小和形状的参数仍取半长轴 a 和半短轴 b ,如图 1.3 所示。

裂纹参数的变化表示裂纹的某种运动。裂纹的运动包含形状和大小的变化,以及位置的变化。例如 Griffith 裂纹中,参数 a 的增加表示裂纹长度的增加、裂纹笔直地扩展,如图 1.2 中椭圆片状裂纹的参数 a 和 b 的增加分别表示外表裂口增加和裂纹深度增加。但是一