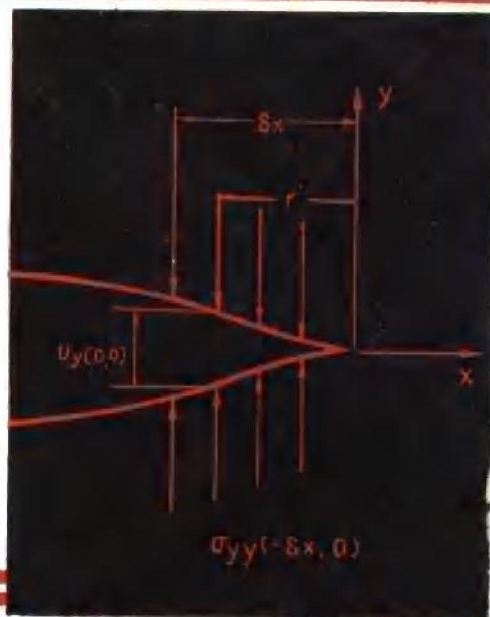


断裂力学 试验技术



[美] A. S. Kobayashi 主编
孙燕君 程育仁 吴鸿遥译

中国铁道出版社

断裂力学试验技术

[美]A.S.Kobayashi主编

孙燕君 程育仁 吴鸿遥译

中国铁道出版社

1983年·北京

内 容 简 介

《断裂力学试验技术》是美国试验应力分析学会编辑出版的《断裂力学丛书》的第一集。它介绍了断裂力学的基本概念和一些基本试验技术。主要包括：线弹性断裂力学，声发射技术原理和应用，柔度测量法，试验系统和设备以及光测弹性技术在断裂力学中的应用等。

本书可供工程技术人员、科研单位有关人员以及高等院校有关专业师生参考。

断裂力学试验技术

Experimental Techniques in Fracture Mechanics

〔美〕A.S.Kobayashi主编

孙燕君 程育仁 吴鸿遥译

中国铁道出版社出版

责任编辑 何生泰 封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张：5.375 字数：98千

1983年1月第1版 1983年1月第1次印刷

印数：0001—6,500册 定价：0.60元

前 言

传播试验力学领域的情报是“试验应力分析学会”的基本任务之一。过去完成这方面的任务，是通过在学会半年会议上直接交流，或者通过学会的一些出版物，例如试验力学（EXPERIMENTAL MECHANICS）、试验应力分析学会会议录（SESA Proceedings）和试验应力分析手册（Handbook of Experimental Stress Analysis）等来完成的。首批命名的出版物侧重于刊登先进课题的研究论文，或题目极专的应用论文。虽然有些对试验力学某些领域进行系统地论述的优秀课本我们可以加以利用，但其中还存在一些脱节现象，许多重要课题还没有用一种前后一致的办法进行深入细致的讨论。

目前正计划出版几类不同的专著丛书，这些丛书最后将囊括试验力学整个领域。在每一类丛书里，第一集通俗易懂，易于为非本专业专家的工程技术人员所接受。此后几集将继续提高论述水平，直到各类丛书的最后一集，能反映出当前的技术水平为止。把题材安排成若干简短而又协调的专著有两个主要优点。首先，它使得早已从事某个方面工作的人员，可以仅购买论及某一专题的专著，而无需购买全部丛书。其次，对有关飞速发展的领域的专著可以及时单独修订。这样学会和个人都无需为修订全部丛书而付出很大的劳动和经费，这是因为丛书的大部分并不需要作很大的修改。除本专著外，有关应变计和光测弹性学的专著丛书进展良好，有关全息摄影和断裂力学的续集正在筹划之中。

《断裂力学试验技术》即将出版，委员会衷心地感谢 Albert S.Kobayashi 教授，他不但承担了制定计划和执行计划的这一重任，而且还亲自写了三章。在编写阶段不管如何细致地计划和周密地协调，仍然需要作者对不同的章节准备好几个草案，以使它能达到预期的连续性和协调性。委员会对所有作者坚韧地工作和密切地合作极为感谢。

由于编写丛书是很重要的，委员会极其希望这一集专著尽可能地完善和可靠。由于 George R.Irwin 博士在这个领域内有卓越贡献，因此特请他审阅全稿并加以评述。他热心地接受了这一请求，他的建议也都为各位作者在他们各自的章节里所采纳。

最后，委员会对试验应力分析学会常务董事 B.E.Rossi 先生的鼓励和合作表示感谢。他不仅担负起编排和出版任务，还做了许多耗费时间的琐事，这是本书得以完成的实质因素。

试验应力分析学会专著委员会

C.E.Taylor 主席

P.H.Adams

J.W.Dally

A.S.Kobayashi

M.M.Lemcoe

M.M.Leven

W.F.Riley

L.J.Weymouth

译者序

《断裂力学试验技术》是美国试验应力分析学会 (S. E. S. A) 编辑出版的《断裂力学丛书》三集中的第一集。本集在 A. S. KOBAYASHI 教授主持下, 由一些知名学者分工写成。内容涉及断裂力学的基本概念和一些基本试验的理论、数值计算、设备和方法, 以及它们在工程中的应用。本书的第二章译自 1979 年的修订稿 (发表在美国刊物《实验力学》1979 年 12 月号 19 卷 12 期上), 其余章节均取自原书 (1973 年版本)。全书实验和理论紧密结合, 论述通俗易懂, 计算图表和实验资料比较丰富, 是一本入门性专著。在美国一些大学已采用它作为高年级学生和研究生的教科书。

断裂力学是近二十多年来发展起来的一门新兴学科。试验技术对于促进断裂力学的形成、推动断裂力学的发展作用很大。目前, 在断裂力学的研究上和工程应用中, 试验技术仍然占有十分重要的地位。近十年来, 断裂力学试验技术虽然有了一些新的发展, 但本书所介绍的试验技术仍是最基本的, 它在断裂力学中的使用比较广泛。我们相信, 本书的翻译出版对于推动我国断裂力学试验技术的发展将会起一定的作用。

本书在翻译出版过程中曾得到原书主编小林教授多方指导, 对此表示衷心感谢。

断裂力学试验技术涉及的学科领域较为广泛。由于译者

水平所限，文中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。
本书由孙燕君、程育仁和吴鸿遥合译，最后由程育仁对全书进行了整理加工。

译 者

1981年9月于北京

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 断裂力学	5
2.1 引 言	5
2.2 二维问题	8
威斯特噶尔德 (Westergaard) 应力函数	8
穆斯海里什维利 (Muskhelishvili) 应力函数	14
有限元法	16
理论基础	16
数值方法	18
承受内压的表面缺陷圆筒	21
单轴向拉伸板中的斜裂纹	21
2.3 断裂力学的三维问题	26
圆形裂纹	26
椭圆形裂纹	28
单轴向拉伸无限实体中的椭圆形裂纹	31
受纯弯曲无限实体中的椭圆形裂纹	32
在一侧表面骤然加热时厚板中的椭圆形裂纹	32
半椭圆形表面缺陷	33
小结	34
有限元法	34
2.4 分析方法的局限性和实验力学的任务	37
第三章 声发射技术	45
3.1 符 号	45

3.2 引 言	46
历史回顾	47
岩石声发射	47
金属声发射	47
3.3 测试仪器	49
概 况	49
传感器	50
电子设备	50
3.4 声发射在缺陷检测方面的应用	51
无缺陷材料的声发射	53
有缺陷材料的声发射	56
3.5 声发射在检测亚临界裂纹扩展方面的应用	63
升载期间亚临界扩展	64
疲劳裂纹扩展的连续监测	65
疲劳裂纹扩展的间歇监测	66
应力腐蚀的研究	72
氢 脆	76
3.6 摘要和结论	79
第四章 柔度测量法	86
4.1 符 号	86
4.2 引 言	87
4.3 在线性断裂力学上的应用	87
4.4 g_I 和 K_I 的关系	89
4.5 方法概要	91
4.6 实 例	92
试样说明	92
柔度传感器	92
实验方法	93

计 算	93
测量注意事项	94
测试仪器	95
摩擦效应	96
数据处理	97
4.7 相关的位移测量	98
4.8 一些已发表的成果	98
4.9 摘 要	105
第五章 试验系统和有关测试设备	110
5.1 引 言	110
5.2 闭路系统	112
拉-压试验	112
加压试验	112
5.3 程序编制	115
5.4 读出装置	116
5.5 试验系统的基本区别	117
引 言	117
硬系统和软系统	118
试验问题 (根据Irwin)	125
裂纹扩展阻力 (根据D.P.Clausing)	127
稳定撕裂	127
失稳撕裂	127
大尺寸试验的需要	128
用共振做特大尺寸试验	131
带有环境箱的断裂力学试验	132
一种简化的断裂力学试验	133
5.6 切口开裂的监测	134
引 言	134

涡流探头（带有发射补偿器）	136
5.7 试验不同组成部分的自动化	138
全自动的计算机控制断裂力学试验	138
采用连续裂纹长度信号的裂纹扩展	139
5.8 摘要和结论	140
第六章 光测弹性技术	142
6.1 引 言	142
6.2 二维静态光测弹性学	143
等温分析	143
热弹性力学分析	145
6.3 动态光测弹性学	149
动态光测弹性装置	149
动态应力强度因子	151
6.4 三维光测弹性学	155
6.5 备 注	158

第一章 绪 论

A.S.Kobayashi

许多世纪以来,虽曾发生过多起结构构件脆性断裂的非常事件,但常被人们援引的一个典型事例,是1919年1月15日中午在麻省波士顿发生的贮糖罐破坏事件¹。2,300,000加仑的糖汁从罐里流出来,肇至12人死亡,40人受伤,并淹死了许多马匹。虽然当时的一些著名科学家曾对这个事件进行了考察,但未获结论。从那时起,一些严重的断裂问题在飞机、大型转子、装甲车、枪炮、贮存罐、压力容器、管道、焊接船舶²和航天结构³中相继发生。

这些可能造成灾难的骤然断裂,关系到财产损失、人类生命,甚至国家的威信和安全,因而引起了人们对断裂现象的研究。在有关断裂研究的学科中,称之为断裂力学的一门技术,已发展到能用来提高构件设计和进行断裂破坏研究的水平。读者可以参考近代断裂力学的一部专著⁴,这部对断裂力学作广泛研究的七卷专著,概括了断裂力学的整个领域。

除本章所引用的参考文献以外,最新的资料发表在下列两种以断裂力学文章为主的期刊里:《International Journal of Fracture Mechanics》(Walters-Noordhoff)和《International Journal of Engineering Fracture Mechanics》(Pergamon Press)。

此外,关于断裂力学的技术论文还经常出现在下列刊物中:《Experimental Mechanics, SESA》;《Journal of

Engineering Material and Technology》;《Transactions of ASME, ASME》;《Materials Research and Standards, ASTM》;和《Journal of Materials, ASTM》。

为了专门研究有关断裂力学的问题,全世界的技术和专业学会建立了各种委员会和专业力量。其中最为活跃的一个是美国材料试验学会 (ASTM) 所属的 E-24 金属断裂试验委员会 (Committee E-24 on Fracture Testing of Metals)。这个委员会分为六个分会,分别研究断裂力学的试验方法、断口组织试验和微观结构、动态试验方法、亚临界裂纹扩展、术语和定义,以及应用等方面的问题。

出版这本实验应力分析学会 (SESA) 专集的目的,在于用几个章节把分散在上述许多刊物和委员会报告中的有关断裂力学实验技术的资料汇编成册。第一集专著所包括的内容,打算提供有关原理、方法、应用方面的知识,并指出在实验断裂力学中,目前所用某些基本试验技术的局限性。标准试验的细节,诸如断裂试样的几何形状和加载方法,在美国材料试验学会 (ASTM) 的专刊^{5~9}中有详细的叙述,因此在这个专集中就不细讲了。当然,我们希望用限制每个专题篇幅的办法,使读者能对断裂力学典型的试验技术获得一个全面了解,然后再到所援引的参考文献中去获得其所需要的细节。因此,这本专集主要是为断裂力学的初学者写的,但也包括了这方面专家所需的先进内容。

本专集包括五个主要方面,即:(1) 断裂力学理论;(2) 声发射技术;(3) 柔度测量法;(4) 试验系统和有关测试设备和(5) 光测弹性技术。顺着这个章节顺序,在第二章中为读者提供了断裂力学的一些理论基础;在第三章中学习试验技术,它表明了 in 监测断裂起始方面存在着巨大潜力。在第四章中研究了确定应变能释放率的试验技术;

在第五章中介绍了在设计断裂试验的试验系统时可能遇到的意外问题；最后，在第六章中介绍确定应力强度因子的光测弹性技术。

在第二章里，也包括了作为一种广义试验工具的有限元法，这也反映了试验应力分析学会（SESA）最近将其任务扩大到关于有限元分析的课题上去了。本专集中强调了这种计算方法同试验技术之间相互补充的作用。

在汇编这个专集时，编辑很荣幸地接到世界各地的著名专家寄来的稿件。实验应力分析学会（SESA）论文协会主席Charles E. Taylor教授和James W. Dally教授（1970～1971年实验应力分析学会的主席）审阅了这个专集，他俩提出了许多有助于提高专集水平的修改意见，作者对此非常感谢。

最后，作者衷心地感谢马里兰大学George R. Irwin教授，他提出许多建设性的评论和修改意见，并详细地审阅了这本专集。

投稿者和编辑的任务并没有因这本第一册专集的出版而终止，为了使它不断地跟上时代的发展，这个专集的内容将不断加以改进。

参 考 文 献

1. Shank, M.E., 'A Critical Survey of Brittle Fracture in Carbon Plate Steel Structure Other Than Ships,' published by Welding Research Council of the Engineering Foundation, New York (1954). See also ASTM STP 158, 45 (1954).
2. Liebowitz, H., ed., Fracture, an Advanced Treatise, 5, Design of Structures, Academic Press (1969) *

3. Tiffany, C.F., and Masters, J.N., Applied Fracture Mechanics, ASTM STP 381, 249-278 (1965).
4. Liebowitz, H., ed., Fracture, an Advanced Treatise, 1-7, Academic Press (1969, 1970).
5. Fracture Toughness Testing and Its Application, ASTM STP 381 (1965).
6. Plane Strain Crack Toughness Testing at High Strength Metallic Materials, ASTM STP 410 (1966).
7. Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 415 (1967).
8. Brown, W.F., Jr., ed., Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing, ASTM STP 463 (1970).
9. Damage Tolerance in Aircraft Structure, ASTM STP 486 (1971).

第二章 断裂力学

A.S.Kobayashi

2.1 引言

结构常常因为存在裂纹或裂纹状的缺陷，而在远低于结构材料屈服应力的加载条件下发生破坏。这种破坏表明，仅用常规的结构强度分析，无论做得怎样精确，都不能充分保证结构在运用状况下的完整性。人们把裂纹扩展的特性，作为作用载荷的函数的这种结构研究方法称为断裂力学。尤其是在裂纹或缺陷的周围不存在大塑性屈服区时，人们把这个方面的研究称为线性断裂力学。

在过去的十年中，由于大力开展研究的结果，现在线性断裂力学已用于解决失效分析、材料选择、预告结构寿命和验收试验等许多实际工程问题。倘若断裂发生在结构构件大范围屈服之前，那么可采用合并成各种塑性修正系数的方法，把线性断裂力学推广到用于解决各种中等塑性屈服的断裂问题。参考文献1对断裂力学的发展作了极好的历史回顾，从1900年Ludwik的论文开始，此后有Inglis, Griffith, Stanton 和 Batson, Doherty, Westergaard, Sneddon, Sach, Fisher 和 Holloman, Irwin, Orowan, Irwin 和 Kies, Wells 以及1957年Williams的论文等。

线性断裂力学的基础是Griffith²的论文，但这篇论文三十年来都没有得到承认。在1921年，最初的Griffith理论作为一个建议指出：在图2.1所示的脆性材料（即玻璃）承

载物体中，当一个表面面积为 A 的裂纹扩展到面积为 $A + \delta A$ 时，而且

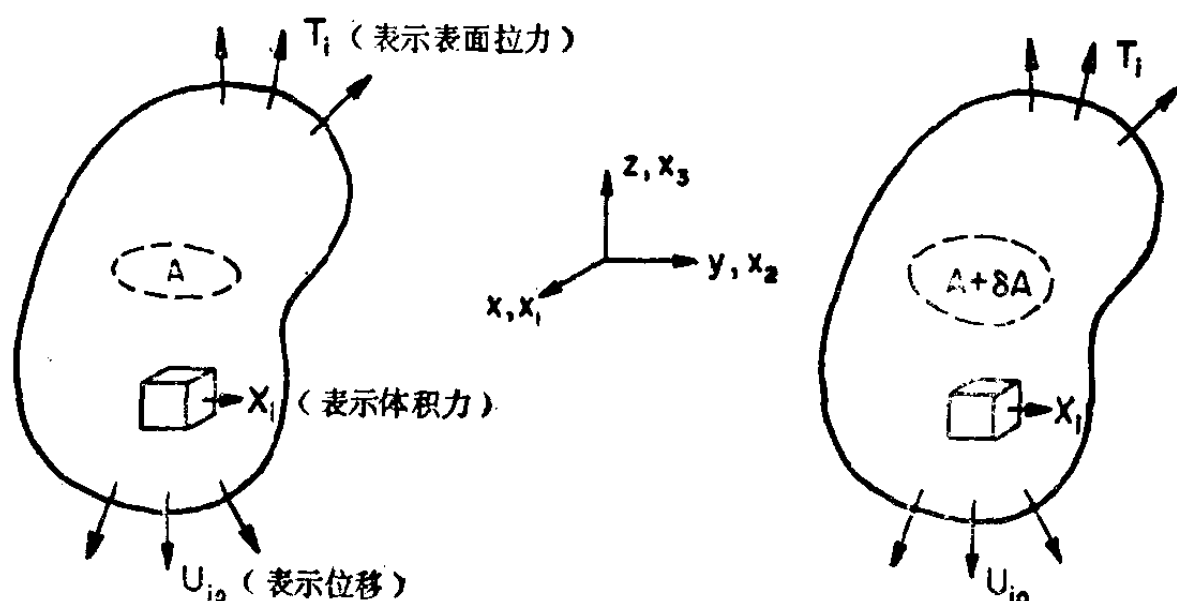


图2.1 具有扩展裂纹的弹性体

$$|\delta U_o| > |\delta U_{s,i}| \quad (2.1)$$

则物体发生断裂。

式中 δU_o = 由于裂纹表面积增加 δA 而引起位能的减少；

$\delta U_{s,i}$ = 由于裂纹表面积增加而引起表面能的增加。

上述能量增加的各项，是相对于增加的裂纹表面 δA 来计算的，从此凡有 δ 的量应视为比率。

Irwin³和Orowan⁴相继修改了最初的Griffith理论，用在裂纹顶端周围的塑性区中增加一项塑性能量耗散率的方法，以使这个理论可以应用于金属。由于裂纹表面积的增加 δA ，而引起输入能量和耗散能量发生变化，这样总的能量平衡的变化可表示为：

$$\delta W + \delta U_o \geq \delta U_{s,i} + \delta P \quad (2.2)$$

式中 δW = 外部功的增加率；

δP = 塑性能耗散的增加率。

Irwin认识到塑性能耗散率要比表面能耗散率大得多，