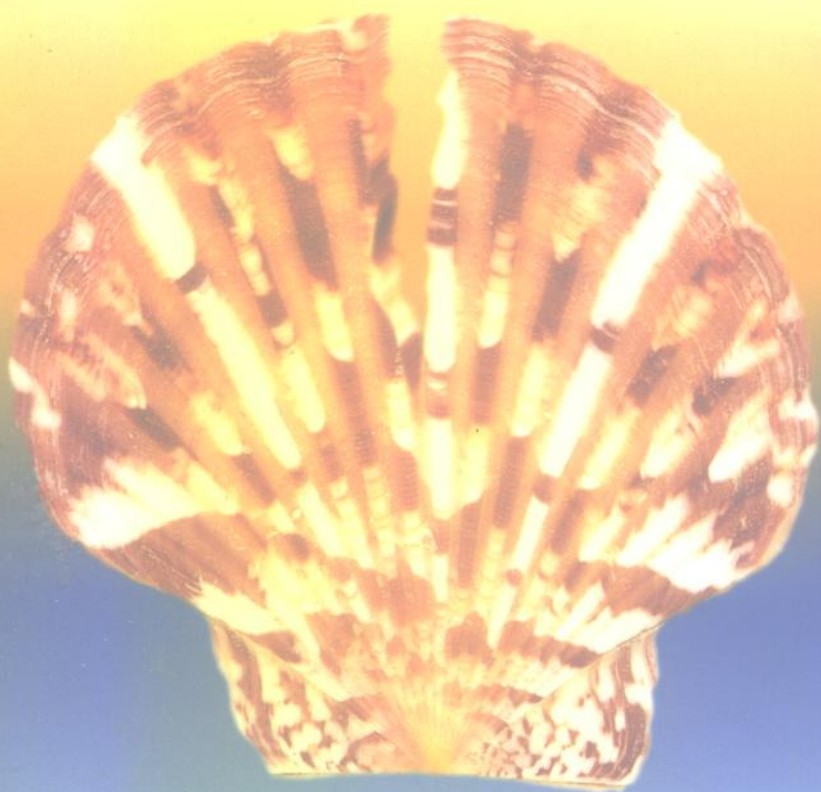


板壳断裂力学

Fracture Mechanics for Plates and Shells

柳春图 蒋持平 著



国防工业出版社

板壳断裂力学

Fracture Mechanics for Plates and Shells

柳春图 蒋持平 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

板壳断裂力学 / 柳春图, 蒋持平著. —北京:国防工业出版社, 2000. 1

ISBN 7-118-02095-8

I. 板… II. ①柳… ②蒋… III. 地壳块断运动-断裂力学 IV. P542

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 06590 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售



*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{3}{8}$ 250 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 19.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员 (以姓氏笔划为序)	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

断裂力学是 20 世纪后半叶固体力学和材料科学领域发展的重要成就。它已经在航空结构、压力容器、机械制造等各重大工程结构的强度设计、安全可靠性分析和缺陷评定的规范与标准中得到广泛应用,大大提高了工业部门的设计与制造水平。

与平面受力状态的结构相比,承受横向载荷的板壳是工程中更为常见的结构形式。然而板壳断裂问题远比平面断裂问题复杂。板壳既存在面内位移,又存在面外位移,其应力应变场沿厚度方向变化。因此板壳问题实质是三维的力学问题,不同的板壳实用理论是对三维问题不同的二维近似。更进一步,已经在工程中广泛应用的 Kirchhoff 经典板壳理论,用于含裂纹板壳却存在严重的理论缺陷。问题的复杂性阻碍了板壳断裂力学的进展,迟滞和限制了它的工程应用。在此之前,关于板壳断裂力学的研究,国内外有关工程手册仅罗列了不同板壳理论对含裂纹板壳的一些简单结果。有关研究仅见诸分散的文献,而且差不多都是按经典理论给出的,作为专门书籍仅有 Sih (1977 年) 编辑的《Plates and Shells with Cracks》一本专题论文集。在板壳断裂力学的领域尚没有系统的学术专著。

本书在国内外首次系统地阐述了板壳弯曲断裂理论及其实用分析方法。它是作者从 70 年代末以来在这方面研究成果的总结,是对国内外这一尚属空白领域的弥补。本书的重要特点综合起来主要有:

1. 详细阐明了板壳断裂理论的基础,分析了常用 Kirchhoff 经典板壳理论与 Reissner 型板壳理论之间的区别与联系,论证了 Reissner 型板壳断裂理论的科学性、经典板壳断裂理论的缺陷及

其仍具有一定的实用价值,并通过研究工作讨论了它们的适用范围。

2. 在国际上首先创造性地提出了分析 Reissner 型板壳裂纹尖端场的方法,系统地获得了各类 Reissner 型板壳裂纹尖端的应力应变场,深入揭示了板壳裂纹尖端附近的力学规律。

3. 在对裂纹尖端场严格的理论分析基础上,提出了对板壳断裂分析的局部-整体法。这个方法是计算板壳断裂参数的既严格又极为有效的方法,成功地解决了一系列问题。本书对经典板壳的断裂分析还发展了有特色和简便有效的复变-主部法。书中给出了一批为实际工程所需要的算例,指出了当前国际工程规范中通常采用的鼓胀系数的适用性和缺陷,并给出了简单又精确的改进公式。

4. 开拓性地对表面裂纹尖端附近的力学规律进行了研究,严格给出了表面裂纹尖端附近的应力应变场,并在此基础上应用局部-整体法获得了有理论依据的简单实用的应力强度因子的结果,比国际公认的 Newman 解更为简单、可靠、有效。本书对作者及合作者分析表面裂纹的实验研究也作了简要介绍。

自 70 年代末以来,作者在板壳断裂力学领域先后主持了一系列国家自然科学基金与工业部门的重大课题,其中包括:国家科委“六五”攻关项目“工程结构的断裂力学分析和安全评定”;国家“七五”攻关项目“核压力容器接管区、大开孔区和曲率影响区各种运行工况下应力强度因子和裂纹扩展规律的分析 and 评定”;国家自然科学基金“七五”重大项目二级课题“含裂纹板壳和表面裂纹的研究”,包括海洋、水电、化工、航空等部门的若干大型工程结构断裂分析、安全性评定等,为工程分析所提供的在严格理论基础上的有效分析方法已经广泛用于核结构、压力容器及海洋结构等工业中。有关项目均被鉴定为或由国家基金委重大项目验收组(1992 年)评价为“国际先进水平”。作者曾于 1989 年在四年一次的国际大规模断裂大会 ICF7 上应邀作有关含裂纹板壳的大会特邀报告,上述成果得到国际断裂力学有关权威的好评。作者还多次在其它重要国际和国内学术会议上作有关本书内容的邀请报告,在北京大学和

北京科技大学研究生断裂力学课程中也讲授了有关内容。

本书是围绕作者研究工作主要成果而撰写的一本专著,由于篇幅限制,国内外有关重要著作可能有所遗漏,在此请予以谅解。限于作者的能力与水平,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

在近 20 年的研究工作中得到了国家自然科学基金委和各工业部门的支持,本书的研究工作主要在中国科学院力学研究所完成,作者在此表示感谢。本书第二章至第五章由蒋持平著写,其余部分由柳春图撰著。

作者 1998 年

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 板壳弯曲断裂问题	1
§ 1.2 Kirchhoff 经典板壳弯曲断裂理论	3
§ 1.3 Reissner 型板壳弯曲断裂理论	7
§ 1.4 Kirchhoff 与 Reissner 型板壳弯曲断裂理论的比较	10
§ 1.5 含裂纹有限尺寸板壳断裂分析的局部-整体法	11
§ 1.6 含表面裂纹板壳	14
第二章 Kirchhoff 板弯曲断裂理论	16
§ 2.1 Kirchhoff 板的基本概念和基本假定	16
§ 2.2 基本公式与弹性曲面微分方程	17
§ 2.3 边界条件	22
§ 2.4 弹性薄板的应变能	26
§ 2.5 极坐标下的挠曲面微分方程与内力公式	26
§ 2.6 裂纹尖端场特征展开式通项公式	29
§ 2.7 Kirchhoff 板弯曲应力强度因子	32
第三章 含裂纹 Kirchhoff 板断裂分析的复变函数方法	34
§ 3.1 基本方程和公式的复变函数表示	34
§ 3.2 所引入函数的确定程度与一般形式	37
§ 3.3 坐标变换与边界条件	41
§ 3.4 运用保角变换方法求解孔口问题	45
§ 3.5 应力强度因子与函数 $\Phi(z)$ 的关系	50
§ 3.6 复变-主部分析法之应用简例	53
§ 3.7 共直线裂纹问题的一般解答	59
§ 3.8 典型弯曲裂纹问题的解答及弯曲应力强度因子公式	64
§ 3.9 共圆曲线裂纹问题的解答及弯曲应力强度因子公式	81
第四章 含裂纹 Kirchhoff 板断裂分析的局部-整体法	90

§ 4.1	裂纹尖端奇异元的位移模式与弯曲应力强度因子	91
§ 4.2	裂纹尖端奇异元的刚度矩阵	92
§ 4.3	裂纹尖端奇异元与常规单元的连接	98
§ 4.4	解析法与数值法的结果比较与讨论	101
§ 4.5	两共线半无限裂纹问题的定解条件及解的实用价值	106
第五章	Reissner 型平板理论及两种平板理论比较	112
§ 5.1	Reissner 型板的基本假定	112
§ 5.2	Reissner 型板的基本公式与平衡微分方程	114
§ 5.3	基本方程的简化	118
§ 5.4	边界条件	121
§ 5.5	极坐标下的基本公式与平衡微分方程	122
§ 5.6	两种平板理论用于无裂纹板时的比较	126
§ 5.7	两种平板理论用于含裂纹板时的比较	133
第六章	由渐近展开法推导 Reissner 型板裂纹尖端场	139
§ 6.1	基本方程和一般求解方法	139
§ 6.2	裂纹尖端场的渐近展开	140
§ 6.3	广义位移和广义内力展开式	145
§ 6.4	几点讨论	149
§ 6.5	应力强度因子与展开式首项系数的关系	150
第七章	Reissner 型板裂纹尖端场展开式的通项公式	152
§ 7.1	标量函数 F 和 f 表示的基本方程和公式	152
§ 7.2	特征展开	154
§ 7.3	函数 F 和 f 的特征展开式	161
§ 7.4	广义位移和内力展开式	163
第八章	含裂纹 Reissner 型板断裂分析的局部-整体法	171
§ 8.1	裂纹尖端奇异元的位移模式	171
§ 8.2	奇异元的刚度矩阵	176
§ 8.3	奇异单元与常规单元的连接	184
§ 8.4	应力强度因子的计算	187
§ 8.5	关于奇异元的形状与应力杂交奇异元	188
第九章	含裂纹 Reissner 型板的典型问题解答及比较	190
§ 9.1	局部-整体法与其它解析和数值法的结果比较	190

§ 9.2	边界对应力强度因子的影响	194
§ 9.3	板的支承条件及长宽比的影响	200
§ 9.4	Reissner 型板理论与 Kirchhoff 板理论所得应力强度因子的比较	202
§ 9.5	计算 Reissner 型板应力强度因子的一组近似方程与近似解法	202
§ 9.6	关于数值计算的几点讨论	209
第十章	含裂纹 Reissner 型球壳的断裂分析	211
§ 10.1	壳体断裂问题概述	211
§ 10.2	Reissner 型球壳的基本方程	213
§ 10.3	Reissner 型球壳裂纹尖端场与应力强度因子	218
§ 10.4	含裂纹 Reissner 型球壳断裂分析的局部-整体法	224
§ 10.5	鼓胀系数	232
§ 10.6	几点结论	234
第十一章	含裂纹 Reissner 型圆柱壳的断裂分析	236
§ 11.1	含轴向裂纹 Reissner 型圆柱壳的基本方程与摄动解	236
§ 11.2	含轴向裂纹 Reissner 型圆柱壳的断裂分析	241
§ 11.3	环向裂纹问题	246
§ 11.4	任意位向裂纹与孔边裂纹问题	248
第十二章	含表面裂纹板壳	251
§ 12.1	基本方程的曲线坐标变换	251
§ 12.2	基本方程的特征函数展开	256
§ 12.3	半椭圆表面裂纹前缘应力应变场	265
§ 12.4	含表面裂纹板的局部-整体分析	268
§ 12.5	表面裂纹的光弹实验	281
参考文献	290

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Problems of plate and shell bending fracture	1
§ 1.2	Kirchhoff classical fracture theory for plates and shells	3
§ 1.3	Reissner fracture theory for plates and shells	7
§ 1.4	A comparison between Kirchhoff and Reissner fracture theories	10
§ 1.5	Local-global analysis of finite-size plates and shells with cracks	11
§ 1.6	Plates and shells with surface cracks	14
Chapter 2	Kirchhoff classical fracture theory for plates with cracks	16
§ 2.1	basic concepts and assumptions in the Kirchhoff theory for plates	16
§ 2.2	Basic formulation and differential equation for the elastic curved surface	17
§ 2.3	Boundary conditions	22
§ 2.4	Strain energy of Kirchhoff plates	26
§ 2.5	Basic equations and formulation in the polar coordinate system	26
§ 2.6	General expressions of the eigenfunction expansions for crack tip fields	29
§ 2.7	Bending stress intensity factors for Kirchhoff plates with cracks	32
Chapter 3	Complex variable method in fracture analysis of Kirchhoff plates with cracks	34

§ 3.1	Complex representation of the basic equations and formulation	34
§ 3.2	The general form of the complex functions	37
§ 3.3	Coordinate transformation and boundary conditions	41
§ 3.4	Solving curvilinear hole problems by the conformal mapping technique	45
§ 3.5	Relations between the bending stress intensity factors and the function $\Phi(z)$	50
§ 3.6	Examples of the complex variable-principal part method	53
§ 3.7	General solutions of collinear crack problems	59
§ 3.8	Solutions of typical problems of plates with cracks and bending stress intensity factors	64
§ 3.9	Solutions for plates with co-circular curvilinear cracks and the related bending stress intensity factors	81
Chapter 4	Local-global analysis for Kirchhoff plates with cracks	90
§ 4.1	Displacement model of a special bending crack tip finite element and bending stress intensity factors	91
§ 4.2	Stiffness matrix of the special crack tip finite element	92
§ 4.3	Coupling between the special element and the adjoining conventional elements	98
§ 4.4	Comparison and discussion on the results of the analytical method and the numerical method	101
§ 4.5	Solutions for collinear semi-infinite crack problems and their applications	106
Chapter 5	Reissner theory for plates and a comparison with Kirchhoff classical theory	112
§ 5.1	Basic assumptions in the Reissner theory for plates	112
§ 5.2	Basic formulation and differential equations of equilibrium in the Reissner theory for plates	114
§ 5.3	Simplification of basic equations	118

§ 5. 4	Boundary conditions	121
§ 5. 5	Basic formulation and differential equations of equilibrium in the polar coordinate system	122
§ 5. 6	A comparison between the two theories for plates without cracks	126
§ 5. 7	A comparison between the two theories for plates with cracks	133
Chapter 6 Asymptotic expansion of the crack tip fields		
	for Reissner plates	139
§ 6. 1	Basic formulation and analytical method	139
§ 6. 2	Asymptotic expansions of the crack tip fields	140
§ 6. 3	Asymptotic expansions of the generalized displacement and stress resultant intensity functions	145
§ 6. 4	Discussions	149
§ 6. 5	Relations between the stress intensity factors and the coefficients of the first terms of the expansions	150
Chapter 7 General expressions of the expansions for the		
	Reissner plate crack tip fields	152
§ 7. 1	Basic equations and formulation expressed by the scalar functions F and f	152
§ 7. 2	Eigenfunction expansions	154
§ 7. 3	Eigenfunction expansions of the functions F and f	161
§ 7. 4	Expansions of the generalized displacement and stress resultant intensity functions	163
Chapter 8 Local-global analysis for the Reissner plates		
	with cracks	171
§ 8. 1	Displacement model of a special crack tip finite element for Reissner plates	171
§ 8. 2	Stiffness matrix of the special crack tip finite element	176
§ 8. 3	Coupling between the special element and the adjoining conventional elements	184
§ 8. 4	Stress intensity factors	187

§ 8.5	The shape of the special element and special mixed elements	188
Chapter 9	Solution and comparison of typical problems for Reissner plates with cracks	190
§ 9.1	A comparison between the results of the local-global method and other analytical and numerical methods	190
§ 9.2	Influence of boundaries on stress intensity factors	194
§ 9.3	Influence of boundary conditions and aspect ratio on stress intensity factors	200
§ 9.4	A comparison between the results of stress intensity factors for Kirchhoff and Reissner theories	202
§ 9.5	A Set of approximate equations and an approximate method	202
§ 9.6	Discussions on numerical method	209
Chapter 10	Reissner spherical shells with cracks	211
§ 10.1	Problems of shell fracture	211
§ 10.2	Basic equations in the Reissner theory of spherical shells	213
§ 10.3	Crack tip fields and stress intensity factors for the Reissner spherical shells	218
§ 10.4	Local-global analysis for Reissner shells with cracks	224
§ 10.5	Bulging factors	232
§ 10.6	Conclusions	234
Chapter 11	Reissner cylindrical shells with cracks	236
§ 11.1	Basic equations and a perturbation solution for Reissner cylindrical shells with axial cracks	236
§ 11.2	Fracture analysis for Reissner cylindrical shells with axial cracks	241
§ 11.3	Cylindrical shells with circumferential cracks	246
§ 11.4	Cylindrical shells with cracks originating from a hole	248
Chapter 12	Plates and shells with surface cracks	251

§ 12.1	Basic equations in curvilinear coordinates	251
§ 12.2	Eigenfunction expansion of the basic equations	256
§ 12.3	Stress-strain fields at the tip of semi-elliptical surface crack	265
§ 12.4	Local-global analysis for plates with surface cracks	268
§ 12.5	Photoelastic experiments for surface cracks	281
参考文献	290