



清华大学学术专著

Fracture Mechanics of Piezoelectric and Ferroelectric Solids

压电与铁电体的 断裂力学

方岱宁 刘金喜 著

Fang Daining Liu Jinxi



清华大学出版社



清华大学学术专著

Fracture Mechanics of Piezoelectric and Ferroelectric Solids

压电与铁电体的 断裂力学

方岱宁 刘金喜 著

Fang Daining Liu Jinxi



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是关于压电/铁电固体断裂力学的专著,从理论分析、数值计算和实验观察三个方面比较全面和系统地阐述了压电/铁电固体的断裂问题,强调静态、动态和界面断裂问题的力学提法以及力电耦合效应所导致的电致断裂的物理本质。本书的主要特色是:详细描述了压电/铁电材料的基本方程以及与断裂问题相关的一般解,以图的形式提供了大量的数值计算结果和实验结果,用简洁的语言解释了复杂的力电耦合断裂问题。本书的这些特色使固体力学、材料科学、应用物理和机械工程领域的读者能够很容易抓住问题的物理本质和把握压电/铁电固体断裂力学的研究现状。

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

压电与铁电体的断裂力学/方岱宁,刘金喜著. —北京:清华大学出版社,2008.10
(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-20764-1

I. 压… II. ①方… ②刘… III. ①压电材料—断裂力学 ②铁电体—断裂力学 IV. TM220.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151232 号

责任编辑:陈朝晖

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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 装 者:北京雅昌彩色印刷有限公司

经 销:全国新华书店

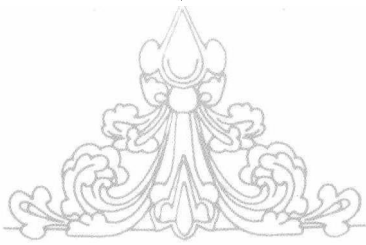
开 本:153×235 印 张:22.5 彩 插:2 字 数:405 千字

版 次:2008 年 10 月第 1 版 印 次:2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:030764-01



作者简介

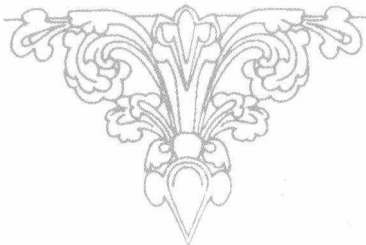


方岱宁，现为教育部“长江学者奖励计划”特聘教授，国家杰出青年基金和教育部跨世纪人才基金获得者，清华大学工程力学系固体力学研究所所长，【破坏力学】教育部重点实验室主任，国务院政府特殊津贴获得者。在先进材料的变形与断裂行为的研究中取得突出的成绩，至今已发表SCI论文一百多篇，获得国家发明专利8项和自主软件著作权1项。2002年获得教育部“推荐国家科学技术奖一等奖（自然科学类）”，2005年获得国家自然科学基金二等奖，2007年获得教育部“推荐国家科学技术奖一等奖（发明技术类）”。

方岱宁教授还担任中国力学学会副理事长，中国仪器仪表学会试验机分会理事长，中国复合材料学会理事，复合材料力学专业委员会副主任，中国力学学会对外交流与合作工作委员会副主任，亚太材料力学协会副主席，《International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation》执行主编，《Acta Mechanica Sinica》副主编，《力学学报》副主编，《计算力学学报》副主编，《力学进展》常务编委，《试验技术与试验机》编委会副主任，《复合材料学报》编委，《工程力学学报》编委，《机械强度》编委，《应用基础科学与工程学报》编委。1999年和2000年分别获得香港Croucher基金会基金资助在香港大学作客座教授，2001年应邀到美国普渡大学作客座教授，2006年应邀到英国剑桥大学作客座教授。作为会议主席多次主办和主持国际和国内学术会议。



刘金喜，1982年毕业于辽宁工程技术大学，1988年和1997年获哈尔滨工业大学工学硕士和工学博士学位。现为石家庄铁道学院工程力学系教授，北京交通大学固体力学博士生导师。2006年获得河北省有突出贡献中青年专家称号。2000~2001年度获香港裘槎基金(Croucher Foundation)在香港大学作客座教授。2003年和2004年分别获得教育部自然科学一等奖和河北省自然科学二等奖。主要研究方向为压电、磁电材料及其结构的力学问题。已发表学术论文六十余篇，其中38篇被Sci收录。



ABSTRACT

This book is a monograph on fracture of piezoelectric/ferroelectric solids. It presents a systematic and comprehensive coverage of the fracture mechanics of piezoelectric/ferroelectric solids, which includes the theoretical analysis, numerical computations and experimental observations. The main emphasis is placed on the mechanics description of various crack problems such as static, dynamic and interface fractures as well as the physical explanations for the mechanism of electrically induced fracture. This is because the main concern for fracture of piezoelectric/ferroelectric solids is the understanding on electrically induced fracture. This book is unique due to the following features; Introducing the fundamental properties of piezoelectric/ferroelectric materials; Giving detailed mathematical descriptions of basic equations and the general solutions relative to typical crack geometry; Providing a lot of both numerical and experimental results in figure form; Using simple mechanics language to explain complex fracture problems due to the coupling between elastic deformation and electric field. The book will be of benefit to all postgraduate students, researchers, professional engineers, and academic scientists requiring an accessible introduction to this subject, and little mathematical knowledge beyond the usual calculus is needed.

序

压电/铁电体的机电耦合特性和各向异性导致其损伤和断裂特性的研究变得异常复杂和困难,因此其断裂力学问题的求解具有一定的挑战性。弄清楚压电/铁电固体断裂的物理力学机制,提高其抗断裂的能力成为近年来固体力学和材料物理领域内的重要研究课题。本书从固体力学和材料物理相结合的角度系统论述压电/铁电固体的材料特征和工程背景、力电耦合所引起的断裂行为和破坏模式以及断裂判据的建立,集中体现了近年来这方面的研究成果和所形成的理论体系,丰富了固体力学的研究内容,具有重要的学术价值。该书颇具特色:以“力电耦合效应是如何影响压电/铁电材料断裂行为”为主题,在强调物理概念清晰、数学力学处理严谨的同时,也非常关注理论方法、实验技术与实际材料的紧密结合,为固体力学和材料物理领域的研究生和研究人员提供了一本颇有价值的参考书。

本书作者方岱宁教授和刘金喜教授是具有很高学术造诣的青年学者,具有扎实深厚的智能材料力学理论基础以及材料物理方面的专门知识,近十年来一直从事压电/铁电材料和铁磁材料的变形与断裂方面的理论与实验研究,取得了系列创新性成果,在国内外产生了重要的影响。他们以自己多年研究工作为基础,并参考国内外的有关文献和新进展,以专著的形式系统地阐明了压电/铁电固体断裂的基本理论和研究方法,内容新颖丰富,文献覆盖面广,论述循序渐进,结构清晰严谨,具有很高的学术水平,是一本优秀的学术专著。为此,我非常愿意向读者推荐并作序。

清华大学

黄克智

2008年9月24日

前 言

自 20 世纪末以来,迅猛发展的信息产业,造就了微电子机械系统(MEMS)、微电子元件与封装、传感、致动与控制的智能结构等技术的崛起和发展。它提出了功能材料多场耦合与细微信息结构力学等科学问题。当应力、应变或热与电磁行为出现强交互作用时,力学的规律对上述 MEMS、电子元件和智能结构的设计就变得极端重要,其使用可靠性引起人们愈来愈大的重视。压电/铁电陶瓷的脆性特征以及制备过程中孔洞、裂纹等缺陷的产生,常常导致压电/铁电器件或压电/铁电类智能结构在力、电载荷单独或协同作用下丧失所期望的功能,甚至遭到破坏。这就迫使人们必须弄清楚压电/铁电材料断裂的物理力学机制,从而为压电/铁电材料的可靠性分析和寿命预报提供理论基础。压电/铁电材料断裂力学就是在这种背景下,始于 20 世纪 80 年代末期而蓬勃发展起来的。在过去的十几年里,国内外的力学、物理和材料研究工作者围绕上述内容进行了广泛的研究,并取得了相当显著的进展。虽然在某些问题上仍有争议,但可以说压电/铁电材料断裂力学的理论框架已经基本建立。

本书的作者十多年来一直从事压电/铁电材料的变形和断裂的力学研究,获得了比较可观的成果和经验。本书是作者将自己的研究成果心得与参考国内、外研究者的工作相结合而撰写的,试图系统地论述压电/铁电材料的断裂力学理论,并以“力电耦合效应是如何影响压电/铁电材料断裂行为”为主题,阐述了压电/铁电材料断裂力学的一些基本问题。全书共 13 章,前 4 章主要介绍压电/铁电材料的应用背景、压电/铁电材料断裂的实验方法与测试技术及其实验结果、力电耦合的材料特征和压电基本方程;第 5 章阐述压电材料力电耦合方程的一般解;后 8 章论述压电/铁电材料的断裂行为,内容涉及:裂纹尖端场的性态、界面断裂、动态断裂、非线性断裂、力电耦合数值方法、电致疲劳裂纹扩展、电极诱致电弹场集中、力电耦合断裂准则等。

本书的宗旨是期望能抛砖引玉,对推动此领域的发展有所裨益。为此,本书试图全方位地描述压电/铁电材料的断裂力学,不仅侧重于断裂问题的理论分析,也介绍数值模拟和实验方面的成果。压电/铁电材料的机电耦合特性和各向异性导致其断裂特性的研究变得异常复杂和困难,因此其力电耦合断裂

力学问题的求解具有一定的挑战性。在本书中,作者自始至终力图做到不但关注理论与实验、原理与应用的紧密结合,而且兼顾评述性。因此,本书具有全面、系统、信息量大、理论联系实际、力求反映本领域的最新进展等特点。

作者所列的参考文献虽然相当广泛,但远不是全部。由于文献浩繁,难免挂一漏万,对该领域一些工作可能令人遗憾地没有提到,对此我们表示歉意。作者殷切地期望本书的出版能够对我国压电/铁电材料的应用和新型功能材料的研发起到促进的作用,也为从事固体力学、材料科学、电介质物理学、机械电子等领域研究的教师、研究生和专业技术人员提供一本高水平的参考书。限于作者的理论水平和实践经验,书中难免有疏误、错讹和不当之处,望能得到专家和读者的垂教和批评指正。

本书研究工作曾先后获得国家自然科学基金委员会面上项目、重点项目、“九五”重大项目、国家杰出青年基金、创新群体项目和国际合作项目的资助,也获得教育部重大项目和博士点基金项目的资助,谨致一并感谢。如果没有这些资助,要完成如此大量的研究工作是难以想象的。本书中一些内容是作者研究组同事/博士后/研究生 12 年来辛勤劳动的部分成果,作者对他们在该项研究工作中所显示的勤劳、智慧、奉献和精诚合作表示感谢和怀念。在研究工作过程中,作者一直与香港大学的 A. K. Soh 教授、美国普渡大学的 C. T. Sun 教授、美国华盛顿大学的 J. Y. Li 教授进行密切有益的合作,从他们博学的专业涵养中受益匪浅,在此表示真诚的谢意。还要衷心感谢我的亲密同事黄克智院士和杨卫院士对我多年的鼓励、帮助和支持。最后,作者特别要感谢研究生毛贯中、魏唯一、何慧晶和赵晓芳在本书手稿的文字输入、图表修订和文献索引等技术性整理方面所给予的大力帮助。

作 者

于北京清华园

2008 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 压电铁电材料断裂力学的研究背景	1
1.2 发展简史与趋势	3
1.3 本书的结构与内容安排	4
第 2 章 电介质物理与材料特性	6
2.1 压铁电材料的一些基本概念	6
2.2 电介质晶体结构	8
2.3 电极化特性与压电特性.....	11
2.3.1 电极化的微观机制	11
2.3.2 电极化的物理描述	12
2.3.3 晶体的介电常数张量与其对称性	14
2.4 铁电畴变理论.....	14
2.4.1 电畴与畴片结构	15
2.4.2 电畴翻转与畴变准则	19
第 3 章 压电、铁电断裂的实验方法与结果	24
3.1 力电耦合场作用下的实验方法与技术.....	25
3.1.1 高压电源	25
3.1.2 高压绝缘问题	26
3.1.3 云纹干涉方法	29
3.1.4 数字散斑相关方法	31
3.1.5 偏振光显微镜方法	32
3.1.6 实验装置	32
3.2 断裂韧性的各向异性.....	33
3.3 电场对断裂韧性的影响.....	35
3.4 纳米复相铁电材料的断裂.....	40

3.5	双层压电陶瓷结构中电极附近变形场测量	43
3.6	电极端部裂纹类型的实验观测	45
3.7	离面极化铁电单晶的实验结果和分析	47
3.7.1	低电场驱动裂尖可恢复的畴变	48
3.7.2	周期电场驱动的周期畴变	50
3.7.3	电致裂纹扩展和裂尖电畴演化	51
3.8	面内极化铁电单晶的实验结果和分析	53
3.8.1	正电场下试件的响应	53
3.8.2	低负电场下的裂尖畴变	53
3.8.3	负电场下裂尖的畴变区	54
3.8.4	交变电场下裂尖电畴演化	56
第4章	压电材料的场方程	59
4.1	基本方程	59
4.1.1	压电方程	59
4.1.2	梯度方程和平衡方程	63
4.2	压电材料电弹常数之间的约束关系	64
4.3	压电材料的电弹常数	65
4.4	力电耦合问题的控制微分方程和边界条件	71
4.4.1	力电耦合问题的控制微分方程	71
4.4.2	力电耦合问题的边界条件	73
第5章	压电材料力电耦合问题的一般解	74
5.1	压电材料力电耦合问题的 Stroh 型一般解	74
5.1.1	Stroh 型一般解	75
5.1.2	压电 Stroh 型解的数学特性和重要关系式	78
5.2	压电材料力电耦合问题的 Lekhniskii 型一般解	82
5.3	横观各向同性压电材料二维问题的一般解	87
5.3.1	横观各向同性压电材料反平面问题的一般解	87
5.3.2	横观各向同性压电材料平面问题的一般解——Stroh 方法	87
5.3.3	横观各向同性压电材料平面问题的一般解——Lekhniskii 方法	90
5.4	横观各向同性压电材料三维问题的一般解	92

第 6 章 均匀压电材料的断裂力学	97
6.1 反平面断裂问题	99
6.2 平面断裂问题	101
6.3 三维裂纹问题	105
6.3.1 问题的描述	106
6.3.2 电弹场的求解	108
6.4 介电椭圆孔的力电耦合问题	111
6.4.1 含介电椭圆孔压电材料的反平面问题	111
6.4.2 含介电椭圆孔压电材料的广义平面问题	116
6.5 裂纹面电边界条件对裂纹尖端场的影响	124
第 7 章 压电材料的界面断裂力学	125
7.1 均匀力电载荷作用下压电材料的界面裂纹	126
7.1.1 界面裂纹的尖端场	126
7.1.2 绝缘界面裂纹的全场解	129
7.2 材料性能对界面裂纹尖端场的影响	132
7.3 含界面裂纹压电材料的 Green 函数	133
7.3.1 压电材料 Green 函数概述	133
7.3.2 反平面界面裂纹的 Green 函数	135
第 8 章 压电材料的动态断裂力学	139
8.1 裂纹压电体的弹性波散射	140
8.1.1 压电体中弹性波传播的基本概念	140
8.1.2 压电体中裂纹对弹性波散射的主要研究工作	143
8.1.3 压电-弹性层状半空间中界面裂纹对 Love 波的散射	144
8.2 压电介质中的运动裂纹	150
8.2.1 运动界面裂纹的反平面问题	151
8.2.2 运动裂纹的平面问题	155
8.3 裂纹压电体对力/电冲击载荷的瞬态响应	161
8.3.1 力/电冲击载荷作用下裂纹压电体的反平面问题	162
8.3.2 条形压电介质中 III-型裂纹的瞬态响应	165
8.3.3 力/电冲击载荷作用下裂纹压电体的平面问题	167
8.4 压电材料的动态裂纹扩展	171

8.4.1	Ⅲ-型导电裂纹的动态扩展	172
8.4.2	Ⅲ-型介电裂纹的动态扩展	177
第9章	铁电材料的非线性断裂力学	181
9.1	非线性断裂力学模型	182
9.1.1	电致伸缩模型	182
9.1.2	Dugdale 模型	188
9.2	畴变增韧模型	192
9.2.1	解耦的各向同性模型	193
9.2.2	力电耦合的各向异性模型	195
9.3	非线性 COD 模型	204
9.3.1	裂纹张开位移(COD)的定义	205
9.3.2	压电效应引起的裂纹张开位移 δ_0	206
9.3.3	畴变对裂纹张开位移的影响 $\Delta\delta$	207
9.4	力载荷下 BaTiO ₃ 单晶的裂尖畴变和裂纹扩展的相互作用	212
9.4.1	实验原理与技术	213
9.4.2	实验现象	214
9.4.3	畴变区分析	216
9.4.4	铁弹畴变增韧	222
第10章	断裂准则	227
10.1	应力强度因子准则	227
10.2	能量释放率准则	228
10.2.1	总能量释放率准则	228
10.2.2	机械应变能释放率准则	230
10.3	能量密度因子准则	234
10.4	应力强度因子准则的进一步讨论	237
10.5	COD 准则	240
第11章	电极诱致压电材料的电弹场集中	243
11.1	表面电极附近的电弹场	244
11.1.1	条形表面电极附近的电弹场	244
11.1.2	圆形表面电极附近的电弹场	251
11.2	界面电极附近的电弹场	257

11.2.1	各向异性压电双材料界面电极问题的一般解	258
11.2.2	横观各向同性压电双材料界面电极附近的 电弹场	260
11.3	压电陶瓷-电极叠层结构的电弹场	262
11.3.1	叠层结构模型、实验装置和有限元计算模型	262
11.3.2	数值计算和实验测量结果	263
第 12 章	电致疲劳断裂	268
12.1	实验观察与结果	269
12.1.1	Cao 和 Evans(1994)的电致疲劳实验	269
12.1.2	含有贯穿裂纹的试件的电致疲劳实验	270
12.2	唯象模型	279
12.2.1	模型一	279
12.2.2	模型二	282
12.3	畸变模型	283
12.3.1	裂尖断裂强度因子的方法研究电致疲劳	283
12.3.2	裂纹张开位移(COD)的方法研究电致疲劳	290
第 13 章	压电与铁电材料断裂分析的数值方法	296
13.1	广义变分原理	298
13.1.1	线弹性力学的广义变分原理	298
13.1.2	力电耦合问题的变分原理	299
13.2	压电材料断裂的有限元方法	301
13.2.1	压电断裂有限元基本格式	301
13.2.2	算例:无限大压电基体内圆孔周围的力电场	304
13.2.3	算例:压电材料双边缺口模型	305
13.3	压电材料断裂的无网格方法	307
13.3.1	力电耦合的无网格法基本格式	308
13.3.2	力电耦合无网格法的若干问题	309
13.3.3	数值算例	313
13.4	铁电材料断裂的非线性有限元分析	313
13.4.1	给定电畴分布求场量	313
13.4.2	由场量来确定新的电畴分布以及有限元迭代过程	319
13.4.3	算例:含绝缘圆孔铁电晶体加竖直电场	321

13.4.4 算例：含绝缘裂纹铁电晶体加垂直于裂纹面方向的 电场($E=0.72E_c$)	323
附录 压电陶瓷的材料常数	326
参考文献	327

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background of fracture of piezoelectric/ ferroelectric materials	1
1.2 Early work of piezoelectric/ferroelectric fracture and its trend	3
1.3 Structures and arrangements of this book	4
Chapter 2 Physical properties of dielectrics	6
2.1 Basic concepts of piezoelectric/ferroelectric materials	6
2.2 Crystal structures of dielectrics	8
2.3 Polarization and piezoelectricity	11
2.4 Domain switch of ferroelectrics	14
Chapter 3 Fracture of piezoelectric/ferroelectric materials: experiments and results	24
3.1 Experimental approaches and techniques under electromechanical coupling fields	25
3.2 Anisotropy of fracture toughness	33
3.3 Effects of electric fields on fracture toughness	35
3.4 Fracture behavior of ferroelectric nano-composites	40
3.5 Measurement of strain fields near an electrode in piezoelectric laminated structures	43
3.6 Observation of cracking types near a tip of electrodes	45
3.7 Domain switching near a crack tip in ferroelectric single crystals with out-of-plane polarization	47
3.8 Domain switching near a crack tip in ferroelectric single crystals with in-plane polarization	53

Chapter 4	Basic equations of piezoelectric materials	59
4.1	Basic equations	59
4.2	Relationships between various electroelastic constants	64
4.3	Electroelastic constants of piezoelectric materials	65
4.4	Governing equations of electromechanical coupling problems and boundary conditions	71
Chapter 5	General solutions for coupling problems of piezoelectric materials	74
5.1	Stroh formalism for two dimensional problems of piezoelectric materials	74
5.2	Lekhniskii formalism for two dimensional problems of piezoelectric materials	82
5.3	General solutions for two dimensional problems of transversely isotropic piezoelectric materials	87
5.4	General solutions for three dimensional problems of transversely isotropic piezoelectric materials	92
Chapter 6	Fracture of homogeneous piezoelectric materials	97
6.1	Anti-plane crack problem	99
6.2	Plane crack problem	101
6.3	Three dimensional fracture of transversely isotropic piezoelectric materials	105
6.4	Electro-elastic problems of piezoelectric materials with an elliptical hole	111
6.5	Effects of electric boundary conditions along the crack surfaces on singularity of crack-tip fields	124
Chapter 7	Interface fracture of piezoelectric materials	125
7.1	Interface cracks in two dissimilar piezoelectric materials under uniform electromechanical loads	126
7.2	Influences of material properties on the singularity of interface cracks	132
7.3	Green's functions for two dissimilar piezoelectric materials with interface crack	133

Chapter 8	Dynamic fracture of piezoelectric materials	139
8.1	Scattering of electro-acoustic waves in a cracked piezoelectric solids	140
8.2	Moving cracks in piezoelectric medium	150
8.3	Transient response of a piezoelectric medium with a crack	161
8.4	Crack extension in piezoelectric materials	171
Chapter 9	Nonlinear fracture of piezoelectric/ferroelectric materials	181
9.1	Nonlinear fracture model	182
9.2	Switch-toughening model	192
9.3	Nonlinear COD model	204
9.4	Interaction between domain switching near crack tip and crack propagation in BaTiO ₃ single crystal	212
Chapter 10	Fracture criteria	227
10.1	Stress intensity factor criterion	227
10.2	Energy release rate Criterion	228
10.3	Energy density factor criterion	234
10.4	More discussion on stress intensity factor criterion	237
10.5	COD criterion	240
Chapter 11	Electro-elastic concentrations induced by electrodes in piezoelectric materials or structures	243
11.1	Electro-elastic fields near a surface electrode in a piezoelectric half-space	244
11.2	Electro-elastic fields near an interfacial electrode in a piezoelectric bimaterial	257
11.3	Electro-elastic fields and fracture in multilayered electrode/piezoelectric ceramic structures	262
Chapter 12	Electrically induced fatigue crack growth	268
12.1	Experimental observations and results	269
12.2	Phenomenological model	279
12.3	Domain switching model	283