

铁磁固体

的变形与断裂

Deformation and Fracture of
Ferromagnetic Solids

方岱宁 裴永茂 / 著



科学出版社

铁磁固体的变形与断裂

Deformation and Fracture of Ferromagnetic Solids

方岱宁 裴永茂 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要研究铁磁固体变形与断裂,从固体力学、材料物理相结合的角度系统论述了铁磁固体在多物理耦合场下的变形本构理论、多物理场耦合断裂理论及其机理,以及多场耦合的实验方法和设备、实验结果和新现象.本书的主要特色是:详细介绍了铁磁固体材料在力电磁热耦合场作用下的复杂力学行为,抓住铁磁固体材料的非线性、滞后效应、各向异性、非均质和畴结构演化等基本特征,强调清晰的物理概念,用简洁的语言解释了铁磁固体在变形与断裂过程中体现的多场耦合效应.这些特征使固体力学、材料科学、电磁学、磁性物理学和机械电子等领域的读者能够很容易地抓住问题的物理本质,了解铁磁固体变形与断裂的研究现状.

本书适合固体力学、材料科学、电磁学、磁性物理学和机械电子等领域的研究生、教师和专业技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

铁磁固体的变形与断裂/方岱宁,裴永茂著. —北京:科学出版社,2011
ISBN 978-7-03-032701-7

I. ①铁… II. ①方… ②裴… III. ①固体-磁性材料-变形 ②固体-磁性材料-断裂 IV. ①O482.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第230469号

责任编辑:刘信力 赵彦超/责任校对:林青梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年11月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年11月第一次印刷 印张:21 1/2

字数:413 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

随着现代航空航天、电子信息等的迅速发展,电磁固体材料在现代科技工业得到了广泛的应用,也促进了电磁固体材料多场耦合效应的研究,铁磁固体力学已成为固体力学领域的一个重要分支.电磁固体的多物理场耦合问题的研究是电磁固体力学的前沿研究领域,尤以压/铁电材料、传统的铁磁材料、超磁致伸缩材料、铁磁形状记忆材料和磁电材料在多场耦合下的变形与断裂力学是其研究热点,该领域的研究促成了多场耦合基础理论的创新,也促进了重大技术改进.《铁磁固体的变形与断裂》从固体力学、材料物理相结合的角度系统论述了铁磁固体在多物理耦合场下的变形行为、多物理场耦合断裂理论及其机理,以及铁磁固体变形与断裂的实验方法、测试技术和设备,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“铁磁固体在多物理场耦合下的变形与断裂”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以及相关的专业技术人员提供了一本颇有价值的参考书.

该书作者方岱宁教授是具有很高学术造诣的青年学者,具有扎实深厚的电磁固体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,取得了一系列创新性成果,在国内外产生了重要的影响.他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铁磁固体变形与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

2011年7月

前 言

在航空航天、电力电子、信息、生物和医学等现代高科技领域,电磁材料和结构作为核心元件获得广泛应用. 在应用中不可避免地涉及到电磁材料和结构在电磁场和机械载荷作用下的力学问题,而电磁学和结构力学的结合,形成了“电磁固体力学”这一新兴的交叉学科. 一方面,电磁结构在电磁环境下的变形、强度、振动以及结构稳定性等力学问题决定着电磁装备的结构是否安全稳定;另一方面,电磁功能材料(包括压电材料、铁电材料、电致伸缩材料、铁磁材料、稀土巨磁致伸缩功能材料、磁致伸缩复合材料、铁磁相变材料及磁电复合材料等)同时具有感知和驱动等许多优越性能,它们的变形与断裂等力学行为与电磁器件的性能和失效行为密切相关. 电磁固体力学丰富了力学学科的研究内容,提出了许多新的基本的力学问题,给力学的发展带来了新的机遇和挑战. 最显著的特点之一是存在电、磁、热、机械运动之间复杂耦合行为. 可变形物体中应力—应变场和电磁场的相互作用是很复杂的,不仅物质的感生电荷、电流、电矩(电极化)、磁矩(磁化),使内外电磁场产生变化,而且电磁场施加力和力矩使物质运动和变形,同时物质的运动和变形进一步引起磁场和磁感应的变化,从而使得磁力分布发生变化. 同时,电磁材料的电磁响应和力学响应表现出明显的非线性、滞后效应、各向异性、非均质和畴结构演化,比如考虑电磁材料和结构动态响应的损耗时,不仅需要考虑机械阻尼带来的损耗,还需要考虑由于畴壁移动克服各种内部阻力的磁滞损耗、涡流损耗,以及磁后效损耗等. 而且电磁功能材料一般较脆,断裂韧性低,容易破坏失效. 这都使得电磁材料和结构的力学行为研究变得具有挑战性. 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铁磁固体的变形与断裂等方面进行了广泛的研究,并取得了相当显著的进展.

作者十余年来一直从事铁磁固体的变形与断裂研究,获得了比较可观的成果和经验. 本书是作者在自己的研究成果的基础上,参考国内外研究者的工作撰写而成的,希望系统地论述铁磁固体的变形与断裂. 全书共 11 章,内容主要侧重电磁材料的变形与断裂研究. 前 4 章介绍了铁磁固体变形与断裂研究的背景和概况,电磁学的基础知识,多场耦合实验方法、技术与设备,以及铁磁固体的变形与断裂实验研究成果;第 5 章和第 6 章分别介绍了磁致伸缩材料的唯象本构模型,以及磁致伸缩材料的畴变本构模型;第 7 章和第 8 章分别介绍了磁致伸缩材料的磁弹性耦合断裂力学,以及软磁材料的磁弹性耦合断裂力学;第 9 章介绍了铁磁复合材料的细观力学分析;第 10 章介绍了磁控形状记忆合金的本构模型;第 11 章介绍了磁力耦合

理论和变形体磁力表达,并讨论了铁磁板在面内磁场下的自由振动问题。

作者期望本书的出版能抛砖引玉,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铁磁固体的变形与断裂等力学行为,不仅侧重于铁磁固体材料的本构模型、断裂力学理论分析,也介绍了多场耦合的实验方法、技术、实验设备以及实验成果。作者力图做到不但自始至终关注理论和实验、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。

书末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,对该领域一些工作也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铁磁固体材料与结构的应用和研发起到促进作用,也为从事固体力学、材料科学、电磁学、磁性物理学和机械电子等领域研究的研究生、教师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。

本书研究工作先后获得国家自然科学基金委员会面上项目、重点项目、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,要完成大量的研究工作,是难以想像的。本书包含了研究组同事、博士后、研究生十余年来辛勤劳动的部分成果,作者对他们在这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、华盛顿大学的 J.Y. Li 教授进行密切的合作,从中受益匪浅,在此表示真诚的谢意。我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,作者特别要感谢我的研究生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协助。

作 者

于北京大学

2011 年 6 月

目 录

序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	铁磁固体变形与断裂的研究背景	1
1.2	研究概况	2
1.2.1	电磁结构力学行为的研究概况	3
1.2.2	电磁功能材料的力学行为研究概况	6
1.3	本书的结构与内容安排	10
第 2 章	电磁学基础知识	13
2.1	电磁场的麦克斯韦方程组	13
2.2	电磁介质的物理方程	14
2.2.1	电介质极化的物理描述	15
2.2.2	磁介质磁化的物理描述	16
2.3	运动介质的麦克斯韦方程组	17
2.4	电磁场的边界条件	19
2.5	电磁能量与坡印亭定理	21
2.6	电磁场位函数	22
2.7	磁性材料的分类	24
2.8	铁磁材料的畴结构与技术磁化	27
2.9	铁磁体的变形机制	28
2.9.1	磁致伸缩的变形机制	28
2.9.2	磁致形状记忆效应的机制	31
2.10	磁学单位与量纲	32
第 3 章	多场耦合实验方法与技术	34
3.1	多场耦合实验原理	34
3.1.1	基本量的测量	34
3.1.2	特征曲线的测量	37
3.2	多场耦合实验设备	43

3.2.1	现有多场耦合实验设备	43
3.2.2	机械传动力磁耦合实验设备	49
3.2.3	液压传动力磁耦合实验设备	52
3.2.4	力磁热耦合实验设备	57
3.2.5	动态力磁热耦合实验设备	59
3.2.6	动态力电磁热耦合实验设备	62
3.3	本章小结	64
第 4 章	铁磁固体的变形与断裂实验结果	65
4.1	铁磁固体材料的多场耦合本构实验	65
4.1.1	锰锌铁氧体的多场耦合本构实验	65
4.1.2	金属软磁材料的多场耦合本构实验	68
4.1.3	超磁致伸缩材料的多场耦合本构实验	73
4.1.4	铁磁形状记忆合金的多场耦合本构实验	86
4.1.5	Galfenol 合金的多场耦合本构实验	89
4.2	超磁致伸缩材料的多场耦合实验新现象	91
4.2.1	畴变“拟弹性”行为	91
4.2.2	巨大的受迫体磁致伸缩	97
4.2.3	多轴力磁耦合场作用下的磁致伸缩和磁滞回线	98
4.2.4	弹性模量的各向异性与阻尼性能	103
4.2.5	路径效应	104
4.2.6	擦除特性	107
4.2.7	同余特性	114
4.3	铁磁固体材料的多场耦合断裂实验	116
4.3.1	磁场下的三点弯断裂实验	117
4.3.2	磁场下的维氏压痕实验	118
4.4	本章小结	120
第 5 章	磁致伸缩材料的唯象本构模型	121
5.1	标准平方型本构	121
5.1.1	热力学本构方程的推导	121
5.1.2	材料参量及本构方程中系数的确定	124
5.1.3	理论与实验结果对比	126
5.2	双曲正切型本构	128
5.2.1	本构方程的推导	128

5.2.2	理论与实验结果对比	129
5.3	基于畴转密度的唯象本构	130
5.3.1	畴转密度概念	131
5.3.2	本构方程的推导	131
5.3.3	理论与实验结果对比	132
5.4	基于 J2 流动理论的唯一象本构模型 I	134
5.4.1	基本假设	134
5.4.2	本构方程的推导	135
5.4.3	一维本构模型	139
5.4.4	理论与实验结果对比	141
5.5	基于 J2 流动理论的唯一象本构模型 II	143
5.5.1	基本假设	144
5.5.2	本构方程的推导	145
5.5.3	一维本构模型	146
5.5.4	理论与实验结果对比	147
5.6	基于内变量理论的各向异性唯象本构模型	150
5.6.1	初始力磁耦合屈服面测量	151
5.6.2	基本方程	152
5.6.3	唯象本构理论框架	153
5.6.4	定向多晶 Terfenol-D 的唯象本构模型	156
5.7	本章小结	164
第 6 章	磁致伸缩材料的畴变本构模型	166
6.1	磁致伸缩的物理机制	166
6.2	各向异性磁畴旋转模型	167
6.2.1	磁畴旋转本构模型的推导	168
6.2.2	非滞后各向异性磁畴旋转模型	170
6.2.3	滞后各向异性磁畴旋转模型	173
6.2.4	基于磁畴旋转机制的力磁热耦合本构模型	176
6.3	磁畴翻转模型	179
6.3.1	基本假设与磁畴的类型	180
6.3.2	磁畴翻转能量准则	183
6.3.3	材料参数的确定	185
6.3.4	宏观本构关系	186

6.3.5	理论与实验结果对比	187
6.4	本章小结	190
第 7 章	磁致伸缩材料的磁弹性耦合断裂力学	191
7.1	磁致伸缩材料的磁弹性耦合断裂	191
7.1.1	基本方程及问题的描述	192
7.1.2	问题的求解	196
7.1.3	裂纹尖端场	198
7.1.4	能量释放率	199
7.1.5	应变能密度因子	201
7.1.6	小结	202
7.2	含裂纹磁致伸缩材料的线性磁化模型	202
7.2.1	软磁材料中椭圆夹杂附近磁感应强度的分布	203
7.2.2	磁体力和磁面力	204
7.2.3	问题的复势表示及问题的解	207
7.2.4	细长椭圆裂纹尖端应力场	209
7.2.5	结果讨论	211
7.2.6	小结	215
7.3	小范围理想饱和磁化断裂模型	216
7.3.1	磁化饱和区的大小和位置	216
7.3.2	磁化饱和区的磁性场分布	219
7.3.3	应力场的叠加法	220
7.3.4	应力场的求解	222
7.3.5	理论与实验结果对比	226
7.3.6	小结	229
第 8 章	软磁材料的磁弹性耦合断裂力学	230
8.1	线性模型分析软磁裂纹问题	230
8.1.1	软磁线性磁弹性理论	230
8.1.2	各向异性裂纹解	232
8.1.3	各向同性裂纹解	236
8.2	软磁体平面中心裂纹的非线性分析	239
8.2.1	基本理论	239
8.2.2	磁弹性平面问题的复势解	240
8.2.3	磁弹性中心裂纹问题	241

8.2.4	耦合场的解	242
8.2.5	裂尖场的分析与讨论	246
8.3	本章小结	251
第 9 章	铁磁复合材料的细观力学理论	252
9.1	压磁夹杂的 Green 函数方法	253
9.2	压磁夹杂的等效夹杂方法	257
9.2.1	夹杂的弹性问题	257
9.2.2	夹杂的磁学问题	258
9.3	压磁复合材料的有效磁弹性质	260
9.3.1	稀疏解	262
9.3.2	Mori-Tanaka 解	263
9.3.3	数值结果分析	264
9.4	磁致伸缩材料的有效性质	266
9.4.1	磁致伸缩的基本方程	267
9.4.2	磁致伸缩复合材料的等效弹性模量	268
9.4.3	磁致伸缩复合材料的等效磁致伸缩	269
9.4.4	理论与实验结果比较	271
9.5	本章小结	275
第 10 章	铁磁相变材料的变形理论	276
10.1	简单的唯象磁致应变模型	276
10.1.1	应变的表示方法	276
10.1.2	相变动力学公式	278
10.1.3	单一磁化曲线假设	280
10.2	理论与实验结果对比	281
10.3	本章小结	283
第 11 章	铁磁固体结构力学分析	284
11.1	磁力耦合理论和变形体磁力表达	284
11.1.1	磁力的基本模型	284
11.1.2	典型实验	285
11.1.3	理论模型	286
11.1.4	问题的提出	291
11.1.5	变形体磁场作用力的推导	292
11.1.6	小结及讨论	294

11.2 铁磁板在纵向磁场中的振动分析·····	295
11.2.1 铁磁板纵向磁场振动问题·····	295
11.2.2 变形后的磁场分布·····	296
11.2.3 板变形状态的磁力·····	298
11.2.4 振动问题的求解·····	299
11.2.5 振动实验·····	301
11.2.6 小结及讨论·····	304
参考文献·····	305
附录 A 各向同性磁弹性系数张量·····	322
附录 B 本构矩阵中的各个系数·····	324
附录 C 线性磁化裂纹尖端位移与面力公式中的系数·····	326
附录 D 复势函数在边界圆两侧的跳变条件中的系数·····	327

Contents

Preface

Foreword

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Research background of fracture of deformation and fracture of ferromagnetic solids	1
1.2	Research overview	2
1.3	Structures and arrangements of this book	10
Chapter 2	Fundamental knowledge of electromagnetism	13
2.1	Maxwell equations of electromagnetic fields	13
2.2	Electromagnetic medium constitutive law	14
2.3	Maxwell equations of moving medium	17
2.4	Boundary conditions of electromagnetic fields	19
2.5	Electromagnetic energy and Poynting theorem	21
2.6	Potential function of electromagnetic fields	22
2.7	Classification of magnetic materials	24
2.8	Domain structure and technical magnetization of ferromagnetic materials	27
2.9	Deformation mechanism of ferromagnetic materials	28
2.10	Unit and dimension of magnetism	32
Chapter 3	Multi-field coupled experimental method and technique	34
3.1	Multi-field coupled experimental principle	34
3.2	Multi-field coupled experimental equipment	43
3.3	Summary of chapter	64
Chapter 4	Experimental results of deformation and fracture of ferromagnetic solids	65
4.1	Multi-field coupled constitutive experiments of electromagnetic solid materials	65
4.2	New multi-field coupled experimental phenomenon of giant magnetostrictive materials	91

4.3	Multi-field coupled fracture experiments of electromagnetic solid materials·····	116
4.4	Summary of chapter·····	120
Chapter 5	Phenomenological constitutive model of magnetostrictive materials·····	121
5.1	Standard square constitutive model·····	121
5.2	Hyperbolic tangent constitutive model·····	128
5.3	Constitutive relations based on the density of domain switching·····	130
5.4	Constitutive model based on the J2 flow theory I·····	134
5.5	Constitutive model based on the J2 flow theory II·····	143
5.6	Anisotropic phenomenological constitutive model with internal variable theory·····	150
5.7	Summary of chapter·····	164
Chapter 6	Domain constitutive evolution model of magnetostrictive materials·····	166
6.1	Magnetostriction mechanism·····	166
6.2	Anisotropic magnetic domain rotation model·····	167
6.3	Magnetic domain switching model·····	179
6.4	Summary of chapter·····	190
Chapter 7	Magnetoelastic fracture mechanics of magnetostrictive materials·····	191
7.1	Magnetoelastic fracture of magnetostrictive materials·····	191
7.2	Linear magnetization model of magnetostrictive materials with a crack·····	202
7.3	A small-scale magnetic-yielding fracture model·····	216
Chapter 8	Magnetoelastic fracture mechanics of soft magnetic materials·····	230
8.1	Linear model analysis of soft magnetic materials with a crack·····	230
8.2	Nonlinear analysis of soft magnetic plane with a central crack·····	239
8.3	Summary of chapter·····	251
Chapter 9	Mesomechanics theory of ferromagnetic composites·····	252
9.1	Green function method of piezomagnetic inclusion·····	253
9.2	Equivalent inclusion method of piezomagnetic inclusion·····	257

9.3	Effective magnetoelasticity of piezomagnetic composites.....	260
9.4	Effective properties of magnetostrictive composites.....	266
9.5	Summary of chapter.....	275
Chapter 10	Deformation theory of ferromagnetic phase transformation materials.....	276
10.1	A simple phonological model of magnetic field induced strain.....	276
10.2	Comparison of theory and experiment.....	281
10.3	Summary of chapter.....	283
Chapter 11	Mechanical analysis of electromagnetic solid structures.....	284
11.1	Magnetomechanical coupled theory and magnetic force for deformation medium.....	284
11.2	Vibration analysis of ferromagnetic plate in longitudinal magnetic field.....	295
References		305
Appendixes		322

第1章 绪 论

1.1 铁磁固体变形与断裂的研究背景

中国是最先应用磁性的国家。公元前 4 世纪我国使用磁石制成了司南,它是世界上最早的指南针。北宋时期的巨著《梦溪笔谈》中,详细记载了指南针的制作和应用方法。然而,磁学作为一门科学,却是 19 世纪初才开始发展。关于铁磁性的研究,开始于 19 世纪末,1881 年 Warburg 和 Ewing 各自独立观测到铁的磁滞回线;到 1907 年,外斯 (Weiss) 在 Langevin 的顺磁性理论基础上,首先提出分子场假说和磁畴假说来解释铁磁性现象,第一次成功建立了铁磁性物理模型,奠定了现代铁磁理论的基础。从此,铁磁理论便分两部分发展:① 解释铁磁体外场行为的磁畴理论;② 解释铁磁性本质的自发磁化理论。任何物质都具有磁性,只是强弱不同,磁性材料一般指磁性较强的材料,而且磁性材料一般存在各种磁物理耦合效应,比如磁光、磁热、磁共振、磁机械、磁电效应、磁电阻等物理效应,由于能量和信息的转换使得磁性材料可以制作各种特殊用途的磁性元件。随着当代科技的迅速发展,磁性材料和磁性理论也不断的发展和完善,推动了磁性材料在航空航天、电力电子、信息、生物和医学等现代技术和工程领域的应用。在国民经济和国防领域中,甚至可以说在社会的许多基本领域,磁性材料占有关键地位,其中最重要的是电力工业和电子工业。电力工业中,从电力的产生、传输到电力的利用,需要大量的磁性材料,软磁和硬磁材料起着能量转换的作用,比如 20 世纪初问世的软磁材料硅钢,对电力行业的发展起到关键作用。电子工业中,从通信 (滤波器和电感器)、自动控制 (继电器、磁放大器和变换器)、广播、电视电影、电子技术和信息技术 (各种磁存储器、读写磁头) 到微波技术 (各种磁性微波器件),可以说没有磁性材料就不可能有电子产品。利用磁性吸附有表面活性剂的磁性微粒在基载液中弥散分布形成的磁性流体,不仅具有强磁性,还具有液体的流动性。由于它在重力和电磁力的作用下能够长期保持稳定,且不会出现沉淀和分层现象而广泛应用于航空航天领域。在交通运输方面,磁悬浮列车无机械接触,噪声低、速度高、不污染环境,是一种理想的绿色交通工具。在医学领域,人们利用磁矩在恒定磁场和高频磁场下对电磁场的吸收现象制作了核磁共振设备。某些磁性材料在高频下具有很大的损耗和磁导率的频散吸收、衰减,可以用来磁性隐身,比如隐身飞机、隐身舰艇和隐身坦克等。在高能武器方面,利用 Lorentz 力通过加速器将电磁能转化为弹丸的动能,可制作电磁炮。利用磁光器件 (磁光隔离器、磁光环形器) 可制作激光炮。利用磁性微波器件

可制作高功率微波武器. 根据磁致伸缩的特性, 铁磁材料已被作为一种重要的功能材料应用于制造声纳、制动器、阻尼器、智能滤波器、控制振动噪声、高功率马达、机器人等.

综上所述, 电磁材料和结构作为核心元件广泛应用在现代高科技领域, 这就不可避免地涉及到电磁材料和结构在电磁场和机械载荷作用下的力学问题, 而电磁学和结构力学的结合, 形成了“电磁固体力学”这一新兴的交叉学科. 一方面, 电磁结构在电磁环境下的变形、强度、振动以及结构稳定性等力学问题决定着电磁装备的结构是否安全稳定; 另一方面, 电磁功能材料 (包括压电材料、铁电材料、电致伸缩材料、铁磁材料、稀土巨磁致伸缩功能材料、磁致伸缩复合材料、铁磁相变材料及磁电复合材料等) 同时具有感知和驱动等许多优越性能, 它们的变形与断裂等力学行为与电磁器件的性能和失效行为密切相关. 电磁固体力学丰富了力学学科的研究内容, 提出了许多新的基本的力学问题, 给力学的发展带来了新的机遇和挑战. 最显著的特点之一是存在电、磁、热、机械运动之间复杂耦合行为. 可变形物体中应力—应变场和电磁场的相互作用是很复杂的, 不仅物质的感生电荷、电流、电矩 (电极化)、磁矩 (磁化), 使内外电磁场产生变化. 而且电磁场施加力和力矩给物质使物质运动和变形, 同时物质的运动和变形进一步引起磁场和磁感应的变化, 从而使得磁力分布发生变化. 诸如电磁材料的磁弹效应, 包括材料沿磁场方向的伸缩变形——Joule 效应 (磁致伸缩效应); 材料垂直于磁场方向的伸缩——横向 Joule 效应; 因磁化使材料发生弯曲现象——Guillemin 效应 (磁致弯曲效应); 磁化引起的体积变化——Barrett 效应 (磁致体积效应); 因纵向磁场和周向磁场而被磁化时产生的轴向扭转现象——Wiedemann 效应 (磁致扭转效应); 已经产生扭曲永久变形的材料在纵向或周向被磁化时的扭曲现象. 与之相对应的磁弹逆效应, 包括材料变形方向的磁化状态的改变——Villari 效应; 垂直于材料变形方向的磁化状态的改变——横向 Villari 效应; 材料弯曲引起的磁化状态的改变——Guillemin 逆效应; 由流体压力引起的磁化状态的改变——Nagaoka 和 Honda 效应; 被周向磁化的棒在扭转时会在周围产生磁化现象——Wertheim 效应, 以及被纵向磁场磁化的棒在扭转时会在同一方向产生磁化的现象——二次扭转磁致伸缩效应, 同时, 电磁材料的电磁响应和力学响应表现出明显的非线性和滞后效应, 比如考虑电磁材料和结构动态响应的损耗时, 不仅需要考虑到机械阻尼带来的损耗, 还需要考虑到由于畴壁移动克服各种内部阻力的磁滞损耗、涡流损耗以及磁后效损耗等. 这都使得电磁材料和结构的力学行为研究变得具有挑战性.

1.2 研究概况

根据研究对象可将电磁固体力学大致分为两类, 一种是针对工程应用中的承载