

长江学者论丛

非均匀材料 多场耦合行为的 宏细观理论

■ 秦庆华 杨庆生 著

Macro-micro-theory on Multi-field
Coupling Behavior of
Heterogeneous Materials



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

长江学者论丛

非均匀材料 多场耦合行为的 宏细观理论

■ 秦庆华 杨庆生 著

Macro-micro-theory on Multi-field
Coupling Behavior of
Heterogeneous Meterials



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书主要阐述非均匀材料多场耦合问题的基本理论和研究方法。在宏观和细观层次上研究各种天然材料、复合材料和先进功能材料中的热学、电学、化学和力学效应以及它们之间的相互作用。本书读者对象是物理、力学和材料类相关专业的研究人员和研究生。

图书在版编目(CIP)数据

非均匀材料多场耦合行为的宏细观理论/秦庆华,杨庆生著. —北京:高等教育出版社,2006.7

ISBN 7-04-019253-5

I. 非... II. ①秦...②杨... III. 功能材料—耦合—研究 IV. TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第057836号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 刘剑波 封面设计 王凌波 责任绘图 朱静
版式设计 史新薇 责任校对 杨雪莲 责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2006年7月第1版
印 张	15	印 次	2006年7月第1次印刷
字 数	280 000	定 价	36.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19253-00

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

作者简介



秦庆华教授, 1982年获西安公路学院学士学位, 1984年和1990年获华中理工大学硕士和博士学位。1995 - 1997年在清华大学作博士后研究。1997年获澳大利亚研究理事会设立的 Queen Elizabeth II 奖 来到悉尼大学工

作。现为教育部“长江学者奖励计划”特聘教授。主要研究方向为计算力学、智能材料与结构、生物材料力学、复合材料损伤与断裂力学。近5年来,在国际刊物上发表了50多篇学术论文和2部英文专著。1998年获澳大利亚科学院颁发的 J. G. Russell 奖, 2002年获中国高校自然科学二等奖。

杨庆生教授, 北京工业大学工程力学教授, 中国复合材料学会常务理事。入选北京市优秀人才和骨干教师计划。先后在中国香港、德国、澳大利亚等地进行访问研究。主要研究方向为复合材料细观计算力学、复合材料线性与非线性本构关系和复合材料细观断裂力学。现在研究兴趣为先进材料与生物材料的多物理场耦合理论和数值模拟。承担国家自然科学基金项目、国家自然科学基金国际合作项目和省部级研究项目多项。独立或合作出版学术著作3部, 译著1部。在国内外主要学术杂志和学术会议上发表学术论文100多篇, 被 SCI、EI、ISTP 检索系统收入50多篇。

“长江学者”学术著作出版资助项目

“长江学者论丛”编辑出版指导委员会

主任委员：赵沁平 教育部副部长

副主任委员：金国藩 清华大学教授，中国工程院院士

闵乃本 南京大学教授，中国科学院院士

吴树青 北京大学教授，教育部社科委主任

饶子和 清华大学教授，中国科学院院士，长江学者特聘教授

舒德干 西北大学教授，长江学者特聘教授，长江学者成就奖获得者

“长江学者论丛”编辑出版指导委员会办公室

主任：吴德刚 教育部人事司司长

副主任：刘志鹏 高等教育出版社社长

吕玉刚 教育部人事司副司长，教育部人才发展办公室主任

吴向 高等教育出版社副总编辑

序

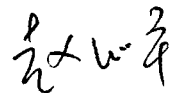
当今世界，科学技术日新月异，知识经济方兴未艾，综合国力竞争日趋激烈。面对日益激烈的国际竞争，立足国情，我国只能走建设创新型国家的发展道路，把提高自主创新能力作为调整经济结构、转变增长方式、提高国家竞争力的中心环节。而科技和人才，特别是创新人才是建设创新型国家和提高自主创新能力的关键。实施科教兴国、人才强国战略，建设创新型国家，构建社会主义和谐社会，高等学校肩负着重大历史使命。教育大计，人才为本。人才问题，始终是高等学校改革与发展的核心问题和头等大事。加快建设高等学校高层次人才队伍，努力培养和造就一批在国际上有重要影响的学术大师、战略科学家和学科带头人，是发展我国高等教育事业的必然要求，也是关系社会主义现代化建设全局的重要任务。

为贯彻落实科教兴国和人才强国战略，推进我国高等学校高层次人才队伍建设，教育部与香港李嘉诚基金会于1998年共同启动了“长江学者奖励计划”。该计划自实施以来，在党和国家领导人的高度重视和关心下，在国家财政等有关部门、高等学校和社会各界的大力支持下，取得了显著成效，在海内外引起了强烈反响。诺贝尔物理学奖获得者杨振宁评价“长江学者奖励计划”是“一个非常了不起的壮举”，“是20世纪末21世纪初中国实施科教兴国战略的一个非常重要的环节。”

长江学者群英荟萃、硕果累累。“长江学者奖励计划”的实施吸引、汇聚和造就了一大批优秀拔尖人才。目前全国88所高等学校聘任727位长江学者，先后有6位优秀学者获得“长江学者成就奖”，31位长江学者被聘为“973”首席科学家，24位长江学者当选为中国科学院、中国工程院院士。在“长江学者奖

励计划”的激励和支持下，长江学者们取得了一批重大科研成果，近年来共有20余篇论文发表在《Nature》、《Science》上，近百项科研成果获得国家自然科学奖、技术发明奖、科技进步奖，其中3项成果获得一等奖，20余项重要成果入选“中国十大科技进展新闻”、“中国基础研究十大新闻”、“中国高校十大科技进展”，有力地支持了国家重大战略的实施，促进了学科建设和科技发展，为培养和造就优秀拔尖创新人才做出了贡献。

编辑出版长江学者学术著作，得到了广大长江学者的积极响应和高等教育出版社的大力支持。希望《长江学者论丛》的出版，进一步提高长江学者在学术领域的影响力，并激励广大学者弘扬长江学者的创新精神，勇攀科学高峰，更好地为促进高校在提高国家自主创新能力、建设创新型国家的伟大事业中，做出更大的贡献。



2006年1月

前 言

随着现代航空航天工业与电子工业的迅速发展,智能复合材料尤其是多场耦合材料已成为学术界和工程界所关注的重要领域之一。它不仅促进了航天智能化的迅速发展,还推动了其他相关领域如造船、汽车、化工、电信、机械等的发展。

众所周知,大多数工程材料尤其是复合材料呈现非均匀性,这种非均匀性有时是为了满足结构特殊功能需要人为加工而成,有时是材料为了适应环境变化经过自然进化而成。前者如人造功能梯度材料,后者如经过长期进化而趋于完美的生物材料。非均匀材料的种类很多,例如各种复合材料、各种含有缺陷的材料以及各种天然材料、生物材料等。非均匀材料因其自身的非连续性、各向异性以及各相的相互作用而表现出复杂的宏观和细观特性。对非均匀材料的研究主要有两种途径:一是将其看成近似均匀、连续的材料,从整体上研究材料的宏观行为,经典的连续介质力学采用的就是这种方法;二是采用非均匀的细观力学模型,从组分材料相互作用的角度,研究材料的变形和受力机理。

目前,关于复合材料宏细观力学领域已有许多优秀论著,但还极少见到有关非均匀多场耦合复合材料宏细观理论方面的专著。为此,作者根据多年从事多场耦合复合材料的研究成果,以及近年来在这一领域所发表的相关结果,写成了本书。书中系统介绍了以线性压电、压磁材料为代表的多场耦合材料的基本理论及近几年来压电、压磁复合材料研究的最新成果。全书共分8章,第1,2,5,7章由杨庆生执笔,第3,4,6,8章由秦庆华执笔。第1章概述非均匀多场耦合复合材料的基本知识及研究方法。第2章简要介绍非均匀材料的各种均匀化理论。第3章和第4章分别讨论线性热-力-电和磁-电-力耦合问题的基本理论和求解方法。第5章讨论热-电-化-力耦合问题并给出其基本方程、变分原理和有限元公式。第6章介绍多场耦合理论在生物材料骨重组分析上的应用。第7章介绍多场耦合非均匀材料均匀化的一般方法。第8章讨论带缺陷压电材料的各种细观力学模型。

本书中的主要内容是作者多年来在此领域内悉心研究的课题。在多项国家自然科学基金项目和其他项目的支持下,作者在压电材料、导电聚合物和生物组织的多场耦合特性方面进行了理论、实验和数值模拟方面的研究工作。今天有机会把这些研究成果和研究体会汇集起来,以学术专著的形式呈现给同行和读者,作者要衷心感谢国家自然科学基金委员会对研究工作的长期支持,感谢“长江学者”学术著作出版资助项目的鼎力支持。同时作者还要感谢那些在书中被引用的专著和相关文献的作者,感谢长江学者奖励计划、天津大学和北京工业大

学对本书工作的支持以及作者的研究生们在本书编写过程中所给予的帮助。

由于作者水平有限,书中不足之处,恳请同行和读者批评指正。

Preface

Intelligent material with multi - field coupling properties is an important aspect of modern science and technology with applications in many industrial fields such as biomedical, electronic and mechanical engineering.

It is well known that most engineering materials, composite materials in particular, are heterogeneous. The heterogeneity is either designed to meet engineering requirements for specific properties and functions or a natural evolution to adapt the historical architecture to changes in long term loadings and environment. Typical examples include gradient function materials and biomaterials. Gradient function materials are designed according to specific functions required by users. Biomaterials, on the other hand, remodel themselves to adapt to changes in the natural environment. Obviously, there are many heterogeneous materials in engineering including composites, defective materials and natural biomaterials. Heterogeneous materials exhibit complex properties at both microscopic and macroscopic level due to their anisotropy and interaction between components. Generally, there are two approaches used in investigating heterogeneous materials. One is the continuum mechanics approach, where the materials are assumed to be approximately homogeneous and continuous media. The other is the micromechanics approach, used for investigating the deformation and stress of heterogeneous materials by considering the interactions of the components in the microscopic scale.

In recent years, research in macro - micro mechanics of composite materials has resulted in a great many publications including journal papers and monographs. Up to the present, however, no systematic treatment of macro - micro theory of heterogeneous multifield composites has been available. The objective of this book is to fill this gap, so that the reader can obtain a sound basic knowledge of the solution methods of multifield composites. This volume details the development of linear theories of multifield materials and presents up - to - date results on magneto-electroelastic composites. The book consists of eight chapters. Chapters 1, 2, 5, and 7 were written by Qing - Sheng Yang, and the remaining four chapters were completed by Qing - Hua Qin. The first chapter describes basic concepts and solution methods of heterogeneous multifield composites. Chapter 2 introduces the essentials of homogenization approaches for heterogeneous composites. Chapter 3 deals with basic equations and solutions of linear piezoelectricity, and extensions to

include magnetic effects are discussed in Chapter 4. Chapter 5 is concerned with basic equations, variational principles, and finite element solution of thermo – electro – chemo – elastic problems. Applications of multifield theories to bone remodeling process are detailed in Chapter 6. Chapter 7 examines general homogenization schemes of heterogeneous multifield composites. In Chapter 8, the final chapter, a detailed discussion of various micromechanics models of defective piezoelectricity is provided.

The main contents of this book were collected from the authors' most recent research outcomes and the research achievements of others in this field. Different parts of the research presented here were conducted by the authors at the Department of Mechanics of Tianjin University, the Department of Engineering Mechanics of Beijing University of Technology, and the Department of Engineering, The Australian National University. Support from the Chang Jiang Scholars Programme, the National Science Foundation of China, the Australian Research Council and Tianjin University is gratefully acknowledged.

We are indebted to a number of individuals in academic circles and organizations who have contributed in different, but important, ways to the preparation of this book. In particular, we wish to extend our appreciation to our postgraduate students for their assistance in preparing this book. Special thanks go to Ms. Jianbo Liu of Higher Education Press for her commitment to the publication of this book. Finally, we wish to acknowledge the individuals and organizations cited in the book for permission to use their materials.

The authors would be grateful if readers would be so kind as to send us reports of any typographical and other errors, as well as their more general comments.

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 非均匀材料	(1)
1.2 非均匀材料的多场耦合性能	(3)
1.3 非均匀材料的研究方法	(3)
1.4 本书的范围和结构	(4)
参考文献	(5)
第 2 章 非均匀材料的均匀化理论基础	(6)
2.1 非均匀材料的细观结构	(6)
2.2 有效场与有效性能的概念	(7)
2.3 直接均匀化方法	(9)
2.4 基于夹杂理论的均匀化方法	(13)
2.4.1 自洽模型与广义自洽模型	(13)
2.4.2 Mori-Tanaka 模型	(14)
2.4.3 自洽有限元法与 M-T 有限元法	(17)
2.5 微分法与变分法	(17)
2.5.1 微分法	(17)
2.5.2 变分法	(19)
2.6 二尺度展开法	(20)
2.6.1 位移场的展开	(21)
2.6.2 细观结构弹性问题的基本方程	(22)
2.6.3 细观结构的有效性能	(23)
2.6.4 变分形式	(23)
2.6.5 有限元公式	(25)
2.6.6 二维问题的详细公式	(25)
2.7 多夹杂混合问题	(32)
2.8 几种均匀化方法的比较	(33)
参考文献	(38)
第 3 章 热-力-电耦合问题	(41)
3.1 引言	(41)
3.2 线性力-电耦合理论	(41)
3.2.1 力-电耦合基本方程	(41)
3.2.2 二维问题的简化	(45)
3.3 力-电方程经典解法	(46)
3.3.1 Stroh 法	(47)
3.3.2 Lekhnitskii 法	(48)

3.3.3 某些恒等式	(50)
3.4 压电材料裂尖场的对数奇异性	(53)
3.4.1 裂尖场的一般解	(53)
3.4.2 p 为重根时的修正解	(54)
3.4.3 η 为重根时的修正解	(54)
3.5 力-电耦合问题的杂交 Trefftz 有限元法	(55)
3.5.1 基本方程与边界条件	(55)
3.5.2 位移场和电场插值函数	(57)
3.5.3 变分原理	(59)
3.5.4 单元刚度方程	(61)
3.5.5 数值算例	(62)
3.6 热-力-电耦合问题的基本理论	(63)
3.6.1 基本方程	(63)
3.6.2 解的唯一性	(65)
3.7 热压电材料中的积分变换法	(67)
3.7.1 积分变换法及一般解	(67)
3.7.2 裂尖场的奇异性	(70)
3.7.3 均匀材料中的有限长裂纹	(73)
3.7.4 裂尖场渐近式及能量释放率	(77)
3.7.5 任意取向的裂纹	(78)
3.8 热压电材料裂纹问题的边界元法	(79)
3.8.1 引言	(79)
3.8.2 温度不连续问题的 BEM 方法	(80)
3.8.3 力-电位错问题的边界元法	(86)
3.8.4 应用边界元方法计算 SED 强度因子	(89)
3.8.5 数值例子	(91)
参考文献	(94)
第 4 章 磁-电-力耦合问题	(98)
4.1 引言	(98)
4.2 磁-电-力耦合问题的基本方程	(99)
4.2.1 磁-电-力耦合的基本方程	(99)
4.2.2 磁-电-力本构模型的八种类型	(100)
4.2.3 横观各向同性材料的基本方程	(101)
4.2.4 热-磁-电-力耦合材料的扩展	(101)
4.3 变分公式	(102)
4.4 三维横观各向同性磁-电-力耦合材料的一般解	(104)
4.5 磁-电-力耦合问题的格林函数	(107)
4.5.1 新坐标变量的引进	(108)
4.5.2 全平面格林函数	(108)

4.5.3 半平面格林函数	(109)
4.5.4 双材料格林函数	(110)
4.5.5 半平面边界或双材料界面为任意取向时的格林函数	(111)
参考文献	(112)
第 5 章 热-电-化-力耦合问题	(115)
5.1 引言	(115)
5.2 热-电-化-力耦合问题的研究历史与现状	(117)
5.3 多孔介质中的守恒定律	(118)
5.3.1 质量守恒	(121)
5.3.2 动量守恒	(121)
5.3.3 能量守恒	(121)
5.4 三相和四相模型	(122)
5.4.1 三相模型	(122)
5.4.2 四相模型	(123)
5.5 化学场	(126)
5.5.1 氧化-还原反应	(126)
5.5.2 电化学势	(126)
5.5.3 唐南渗透	(127)
5.5.4 膜电势	(127)
5.5.5 离子的扩散	(127)
5.6 热-电-化-力耦合问题的基本方程	(128)
5.7 自由能、本构率	(129)
5.8 变分原理	(131)
5.9 有限元公式	(133)
5.10 化-力耦合问题	(136)
5.11 化-力耦合问题的有限元实现及数值结果	(139)
参考文献	(143)
第 6 章 骨质材料重组的多场耦合问题	(147)
6.1 引言	(147)
6.2 骨质材料内部重组多场耦合分析	(148)
6.2.1 骨质材料热压电行为边值描述	(148)
6.2.2 适应性弹性理论	(148)
6.2.3 匀质中空圆柱形骨的解析解	(150)
6.2.4 非匀质柱形骨的半解析解	(153)
6.2.5 楔入销钉后骨内表面的压力	(156)
6.2.6 数值计算例子	(157)
6.3 骨质材料表面重组多场耦合分析	(162)
6.3.1 骨的表面重组理论	(162)
6.3.2 骨的表面重组速率的微分方程	(163)

6.3.3	骨内外表面半径变化很小时表面重组速率的近似微分方程	(165)
6.3.4	匀质骨表面重组问题的理论解	(166)
6.3.5	半解析解在非匀质柱形骨表面重组中的应用	(169)
6.3.6	楔入销钉后骨表面重组的控制方程	(170)
6.3.7	骨表面重组数值算例	(171)
	参考文献	(175)
第 7 章	非均匀材料的有效耦合性能	(177)
7.1	多场耦合问题的基本方程	(178)
7.2	直接法	(180)
7.3	间接法	(182)
7.4	二尺度展开法	(185)
7.4.1	物理场的展开	(185)
7.4.2	磁-电-力耦合系数	(188)
7.5	数值结果	(189)
	参考文献	(192)
第 8 章	热压电材料等效性能的细观力学分析	(195)
8.1	引言	(195)
8.2	带微裂纹热压电材料的细观力学模型	(196)
8.2.1	二相热压电材料的基本公式	(196)
8.2.2	带微裂纹热压电材料的有效热传导系数	(199)
8.2.3	带微裂纹热压电材料的有效力-电系数	(204)
8.2.4	带微裂纹热压电材料的有效热膨胀系数和热-电系数	(207)
8.3	带微孔洞热压电材料的细观力学模型	(208)
8.3.1	孔边温度、位移和电势及其扰动广义应变	(208)
8.3.2	各种细观力学模型中的有效集中因子	(210)
8.4	带夹杂热压电材料的细观力学模型	(212)
	参考文献	(213)