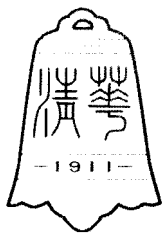
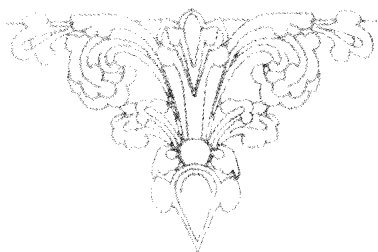


梯度功能力学

李永 宋健 张志民 著



清华大学出版社



梯度功能力学

李永 宋健 张志民 著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

北京

内 容 提 要

本书是有关梯度功能材料(FGM)宏细观力学理论的学术专著,是作者在多年研究工作成果的基础上参考国内外有关研究文献撰写成的,从学科理论体系出发,介绍了FGM及其结构力学的理论方法。

本书主要内容涉及:非均质 FGM 的三维热弹性本构理论、FGM 宏细观结构力学、FGM 广义当量反对称弯曲理论、FGM 康托洛维奇宏细观精化解法、FGM 结构的特性分析等。全书分两篇:第 1 篇为梯度功能材料力学;第 2 篇为梯度功能结构力学。每章后均列有参考文献供读者查阅。

本书可供工程技术科学领域的科研和设计人员使用,也可作为汽车工程、复合材料、物理及力学等专业的研究生教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

梯度功能力学/李永,宋健,张志民著. —北京:清华大学出版社,2003

ISBN 7-302-06857-7

I. 梯… II. ①李… ②宋… ③张… III. 功能材料—材料力学 IV. TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 053937 号

出 版 者:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客 户 服 务:010-62776969

责任编辑:张秋玲

印 刷 者:清华大学印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

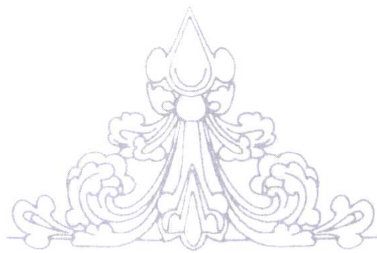
开 本:153×235 印张:21.75 插页:4 字数:368千字

版 次:2003年10月第1版 2003年10月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-06857-7/O·306

印 数:1~2000

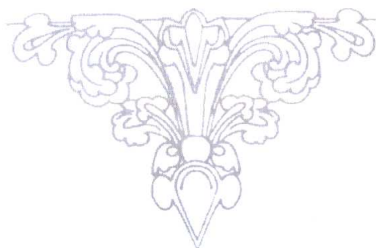
定 价:68.00元

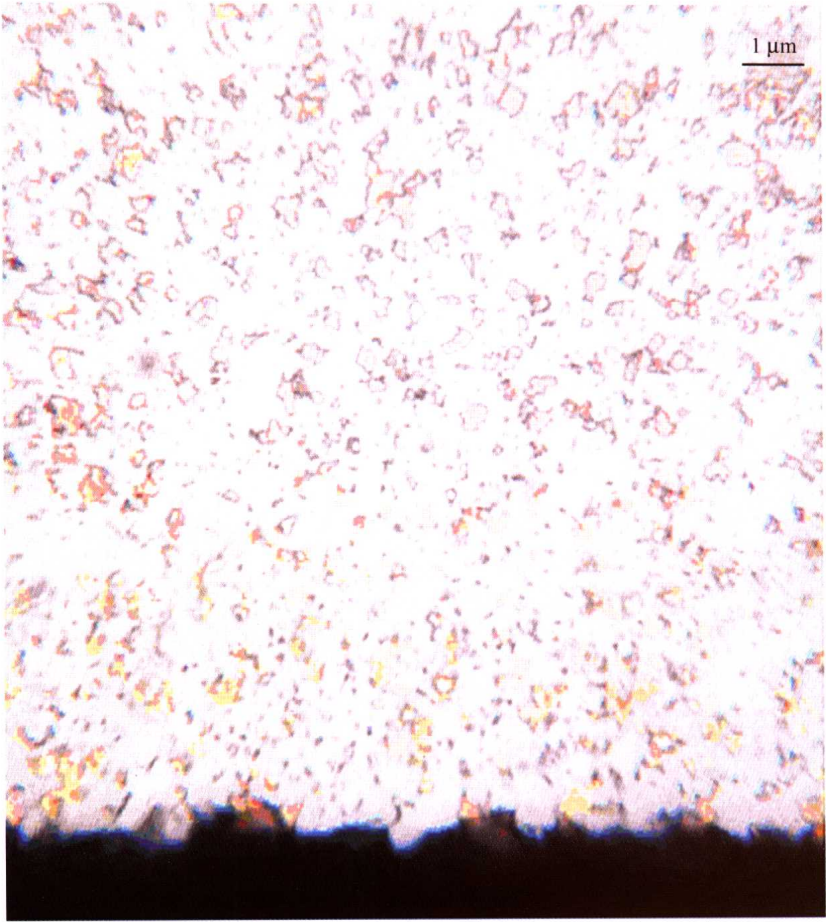


作者简介



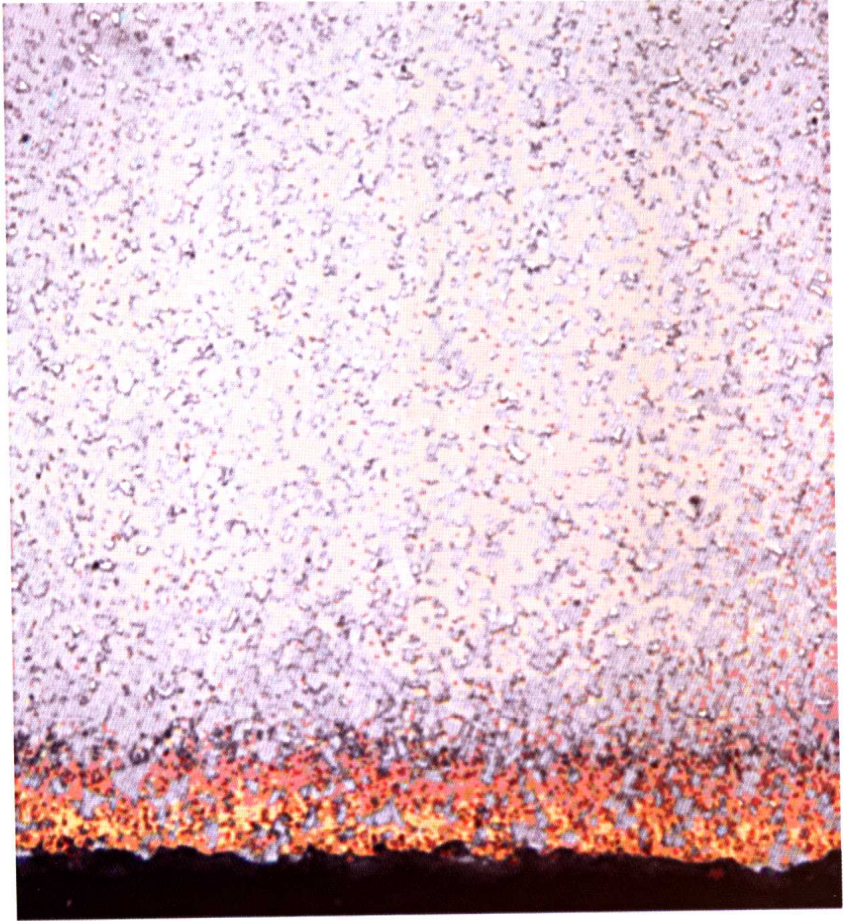
李永 1972年生，四川省德阳市人。2001年在北京航空航天大学获得博士学位，同年为清华大学汽车工程系汽车安全与节能国家重点实验室博士后，主要学术方向为梯度功能力学、复合材料力学、非均质力学、汽车工程、自动控制及系统仿真。在国际上首次提出广义当量反对称理论及新康法，分别发表于英国皇家物理学会核心期刊“C.P.L”2003年第8期首页、国家权威学术期刊《中国科学》2002年第4期首页及“Science in China”2003年第1期第1页，已被国际同行广泛关注、引用，受到学术界的高度评价，现已应用于汽车工程专业。2001年获得北京航空航天大学博士生论文最高荣誉奖——霍尼韦尔奖。在梯度功能力学领域，在国内外权威杂志“K.E.M”、“M. S. F”、“C.P.L”、“Intermetallic”、《中国科学》、《科学通报》等发表学术论文40余篇，申请国家发明专利2项，撰写学术研究报告5册，在国际学术大会上宣读论文6次。负责完成的国家航天重点预研项目得到中国航天二院专家组的验收，居于国际先进水平。学术兼职为美国SAE会员、中国物理学会及英国皇家物理学会核心期刊“C.P.L”特约评审、中国复合材料学会理事、中国汽车工程学会高级会员、《中国博士后》杂志编委、国际权威期刊“In. J. Sol. & Str”、“Comp. Sci. & Tech”、“Mat. Sci. & Eng”及“C.P.L”的审稿人。





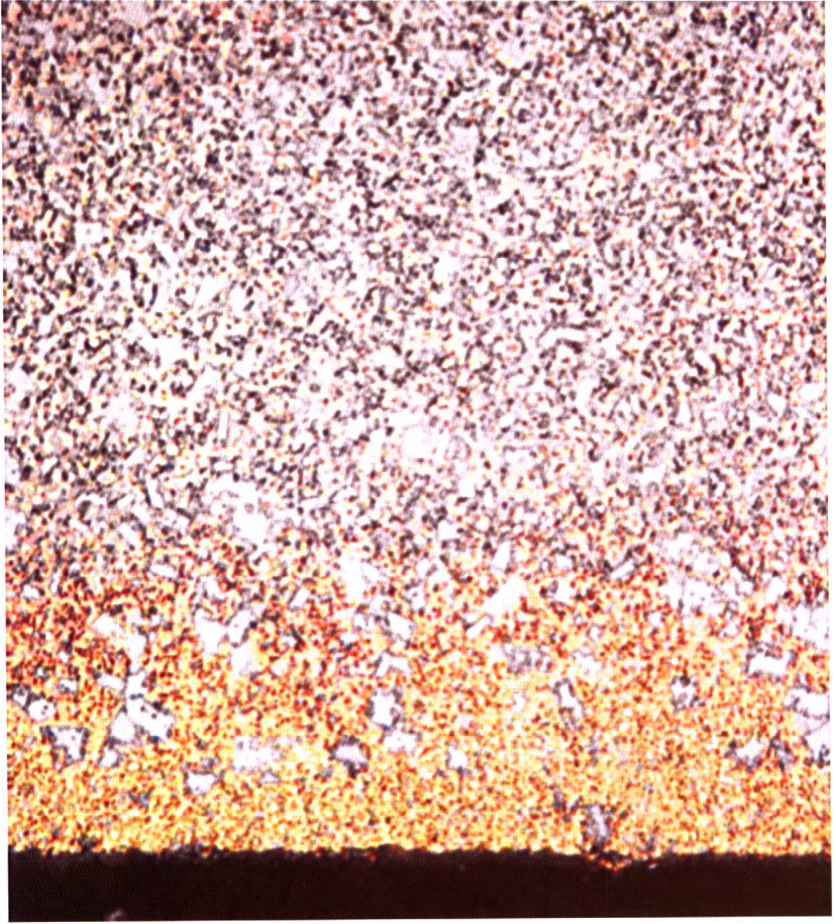
(a)

图 7-4 梯度夹层的 SEM 形貌



(b)

图 7-4 (续)



(c)

图 7-4 (续)

前 言

梯度功能材料作为先进材料有许多传统材料无法比拟的优越性,它的研究和应用得到迅速发展。从航空航天、国防推广到汽车产业,从主要是功能材料转到既是功能又兼有特殊结构的综合性材料,是材料、物理和力学工作者非常感兴趣的研究领域,是当前国内外关注的前沿课题。梯度功能力学是力学领域一个新的分支,是复合材料科学的新发展,作者希望并且相信本书不只是作为一种 FGM 宏观方面填补学术空白的专著,而且能够成为从事 FGM 研制和应用人员、设计人员、FGM 力学工作者以及相关专业的研究生的参考书。

本书对 FGM 复合结构本构、弯曲和特性分析问题进行了系统的理论研究,内容丰富,主要包括:针对 FGM 的结构特点,在非均质、各向异性 FGM 结构的新型三维热弹性本构理论研究中,采用宏、细观相结合的分析方法来揭示梯度结构的内在力学机理,解得了含有梯度指标的 FGM 宏观结构弹性系数之间的定量关系;根据 FGM 构造特性,在复合材料层合理论的基础上,建立了广义当量反对称理论,经实验证实,对材料与结构具有普遍指导意义,提出广义当量反对称结构和梯度云的新思想和新概念,将 FGM 复合结构与层板正负铺设角的特性相对应派生出将 FGM 两种基本材料定义为正负材料并推论到 FGM 结构当量材料不同体分比的新概念;对于 FGM 复合结构,在康托洛维奇解法的基础上解决了在自由边作用复杂外力及在局部固支端考虑限制效应的问题,并运用先进的计算技术将繁难的理论问题化为数值求解,发展为康托洛维奇宏观细观精化方法。

本书提出两个力学理论——三维本构宏观细观理论和广义当量反对称理论;两个力学方法——康托洛维奇宏观细观精化解法和广义傅里叶拓展解法。它们为 FGM 的本构、弯曲、特性分析等一系列问题找出解决方法。书中包括作者近 10 年来在研究和教学工作中的成果和心得,援引了近期文献中的最新成果,为了使读者查阅和引用方便,每章后面均列出与该章内容相关的

参考文献。

作者特别感谢中国航天二院的马淑雅教授的支持和帮助。

由于作者水平有限,又无本方面专著可借鉴,不当之处在所难免,欢迎读者不吝指正。

作 者

2003 年元月于清华园

目 录

前言	3
----------	---

第 1 篇 梯度功能材料力学

1 绪论	3
1.1 梯度功能材料力学研究概况	3
1.2 梯度功能力学的研究任务及研究方法	5
1.2.1 FGM 的一般力学理论	5
1.2.2 非均质、各向异性、反对称层合板 结构热弯曲问题	9
1.2.3 求解悬臂板弯曲问题的各种形式的 康托洛维奇方法	10
1.3 FGM 宏观细观复合结构的概念	11
1.3.1 FGM 复合结构基本概念	11
1.3.2 FGM 广义当量反对称结构的新概念	12
1.4 FGM 复合结构的基础理论研究	13
1.4.1 宏观理论	13
1.4.2 细观理论	14
1.5 FGM 结构机理研究	15
1.6 FGM 结构分析中解法的研究	16
1.7 FGM 的制备与实验研究	18
1.8 研究动态	20
1.9 本书内容安排	21
参考文献	24
2 非均质、各向异性梯度功能材料结构三维热弹性本构理论	29
2.1 非均质、各向异性 FGM 复合结构的 三维热弹性本构方程	29
2.2 FGM 弹性系数的细观力学分析	34

2.3	三维 FGM 结构层间力学模型与应力研究	38
2.3.1	FGM 宏观三维结构的层间应力分析	39
2.3.2	FGM 结构层间应力细观力学分析	42
2.3.3	层间应力场性质问题的讨论	43
2.4	FGM 单胞的细观性能分析	45
	参考文献	49
3	梯度功能材料层梁受机械/热载作用的优化分析理论	51
3.1	FGM 层梁的分层剪切理论	51
3.2	FGM 层梁数值分析与优化	54
3.3	FGM 悬臂梁的弹性性能与应力分析	58
3.3.1	对偶对称 FGM 层合梁的弹性性能	59
3.3.2	FGM 悬臂梁的剪切变形理论	61
3.4	FGM 悬臂梁剪切刚度的半解析计算	63
3.5	含椭球夹杂耐热 FGM 细观优化应力方程	66
3.5.1	含热载、非均质、各向异性 FGM 细观 热应力分析	66
3.5.2	FGM 细观应力场分析	69
3.5.3	结论	73
	参考文献	73

第 2 篇 梯度功能结构力学

4	梯度功能复合结构的广义当量反对称理论	81
4.1	FGM 复合结构分析	81
4.2	FGM 广义当量反对称结构新概念的提出与分析	82
4.3	FGM 结构弯曲弹性特性与本构弹性特性对应关系	84
4.3.1	单胞有效弹性系数转换	85
4.3.2	FGM 宏细观弹性系数转换	85
4.3.3	组装 FGM 三维本构层合结构	86
4.3.4	弯曲理论与本构理论弹性系数的对应关系	87
4.3.5	弯曲理论坐标中的二维正轴模量	90
4.3.6	弯曲理论坐标中的二维偏轴模量	90

4.3.7	广义当量反对称结构的弹性特性	93
4.3.8	本构方程的半逆形式	93
4.4	FGM 结构广义当量反对称弯曲理论	94
4.4.1	广义当量反对称短板的热弹性本构方程	94
4.4.2	FGM 广义当量反对称弯曲 理论中泛函形式的确定	96
4.4.3	无因次化广义变分泛函形式	98
4.5	等拉伸应变 FGM 结构的宏观分析	100
	参考文献	105
5	梯度功能结构的广义傅里叶级数解法	107
5.1	广义双重傅里叶级数形式的相依容许函数选取	108
5.1.1	广义双重傅里叶级数的定义与特性	108
5.1.2	广义双重傅里叶级数的选择	109
5.2	矩阵形式的总势能变分方程	111
5.3	增量形式的无因次总势能广义变分控制方程组	115
5.4	固支边边界力的广义边界值解	116
5.5	作用于 FGM 悬臂板复合结构基底的当量温度载荷	118
5.5.1	当量截面参数	118
5.5.2	当量温度载荷	119
5.6	FGM 复合结构的弹性支承整体剪切理论	120
	参考文献	126
6	梯度功能结构的康托洛维奇宏微观精化方法	128
6.1	康托洛维奇解法的基本原理与特征	132
6.2	二类独立变量广义变分原理	132
6.3	温度等效载荷	133
6.4	两自由边界(含斜边)广义外载荷	134
6.5	角点集中力	136
6.6	欧拉方程	138
6.7	FGM 悬臂结构的约束扭转	140
6.8	悬臂 FGM 板结构分析的普通康托洛维奇法	144
6.8.1	普通康法基本原理及控制方程	145

6.8.2	求常系数齐次方程的通解	149
6.8.3	求特解	149
6.9	三角形板的限制扭转-弯曲参加效应的基本概念	152
6.10	三角形板的康托洛维奇宏细观精化推广新解法	153
	参考文献	163
7	梯度功能复合结构热弹性的实验研究	166
7.1	FGM 复合结构燃烧合成实验研究	166
7.1.1	实验方案	166
7.1.2	FGM 燃烧合成物的组织机理	167
7.1.3	FGM 燃烧合成物的性能测试	167
7.2	模拟实际热力学工况的 FGM 燃气舵样件风洞实验	168
7.2.1	实验条件数据	168
7.2.2	测试要求	168
7.3	模拟实际热力学工况的 FGM 试件电弧加热实验	169
7.3.1	实验模型	169
7.3.2	实验环境参数的评定	170
7.3.3	FGM 烧蚀前后外观状态的评定	170
7.3.4	实验结果讨论	171
7.4	SHS/HP 法合成 TiC-Ni/Mo/W 体系大尺寸 耐热梯度夹层	173
7.4.1	基本考虑	175
7.4.2	梯度夹层燃烧合成物的组织机理	175
7.4.3	实验结果与讨论	179
	参考文献	180
8	梯度功能复合结构热弹性特性分析	181
8.1	第一类子结构——悬臂短板特性分析	181
8.2	第二类子结构——金属基底三角形板热特性分析	205
8.3	复合整体结构热特性分析	212
	参考文献	218

9 梯度功能结构力学专题研究	221
9.1 多墙式 FGM 结构的非线性稳定性分析	221
9.1.1 理论分析	222
9.1.2 数值计算	227
9.1.3 结论	229
9.2 含湿热问题的 FGM 夹层板面芯分层屈曲	229
9.2.1 分析模型	230
9.2.2 湿热问题的考虑	233
9.2.3 瑞利-里兹分析	235
9.2.4 数值计算和结果分析	237
9.3 PCM 发动机缸体的弹性半解析研究	238
9.3.1 PCM 内燃机缸体概况	238
9.3.2 PCM 缸体的数学物理模型	238
9.3.3 PCM 缸体分层本构研究	240
9.3.4 典型算例数值分析	244
9.3.5 PCM 缸体试验与理论对比分析	245
9.3.6 结论	246
9.4 FGM 结构在绿色内燃机上的应用研究	246
9.4.1 绿色内燃机 FGM 的制备	247
9.4.2 FGM 的设计	249
9.4.3 典型算例数值分析	249
9.4.4 FGM 结构表面粗糙度对性能的影响	252
9.4.5 发动机转速对 FGM 磨合的影响	253
9.4.6 结论	253
9.5 FGM 单一遮热基本模型	254
参考文献	256
10 梯度功能力学研究的结论与展望	259
10.1 本书的工作评述	259
10.2 第一类子结构——热特性问题结论	259
10.3 第二类子结构——热特性问题结论	261
10.4 整体复合结构的热特性问题结论	263

10.5 本书的创造性成果条目·····	264
10.6 对 FGM 力学研究的展望·····	266
参考文献·····	268
附录 A 梯度因子系数·····	274
附录 B 梯度单层位移·····	277
附录 C 梯度模型系数·····	279
附录 D 欧拉方程通解·····	280
附录 E 余能原理系数·····	281
附录 F 剪切余能密度·····	284
附录 G 程序原理结构思路框图·····	286
附录 H 源程序·····	287
外国专家人名译名对照表·····	323
索引·····	325

Contents

Preface	3
Part 1 Mechanics of Functionally Gradient Materials	
1 Introduction	3
1.1 Brief Introduction of FGM Mechanical Research	3
1.2 Tasks and Method of Functionally Gradient Mechanical Research	5
1.2.1 The General Mechanical Theory of FGM	5
1.2.2 Thermal-bending Problem of Heterogeneous Anisotropic Antisymmetrical Laminate Structure	9
1.2.3 Kantorovich Approach in Various Forms in Solving Cantilever Bending	10
1.3 Concepts of FGM Macro-or-meso Scopic Complex Structure	11
1.3.1 Basic Concept of FGM Complex Structure	11
1.3.2 New Concept of FGM Generalized Equivalent Antisymmetry Structure	12
1.4 Fundamental Theoretical Research on FGM Complex Structure	13
1.4.1 Macro-sopic Theory	13
1.4.2 Meso-sopic Theory	14
1.5 Research on FGM Structural Mechanism	15
1.6 Research on the Solution in FGM Structural Analysis	16
1.7 Preparation and Experimental Research on FGM	18
1.8 Research Situation	20
1.9 Arrangement of Contents	21
References	24

2 Three-dimensional Thermal-elasticity Constitutive Theory of Heterogeneous Anisotropic FGM Structure	29
2.1 Three-dimensional Thermal-elasticity Constitutive Equation of Heterogeneous Anisotropic FGM Complex Structure	29
2.2 Meso-scopic Mechanical Analysis of FGM Elasticity Coefficient	34
2.3 Interlaminar Mechanical Model and Stress Study of Three-dimensional FGM Structure	38
2.3.1 Macro-scopic Analysis of Interlaminar Stress of FGM Three-dimensional Structure	39
2.3.2 Meso-scopic Mechanical Analysis of FGM Interlaminar Stress	42
2.3.3 Discussion of the Performance of Interlaminar Stress Field	43
2.4 Meso-scopic Performance Analysis of FGM Single Cell	45
References	49
3 Optimal Analysis Theory of FGM Laminated Beam under Mechanical/Thermal Loads	51
3.1 Delaminated Shearing Theory of FGM Laminated Beam	51
3.2 Analysis and Optimization of Numerical Values of FGM Laminated Beam	54
3.3 Analysis of Elasticity Performance and Stress of FGM Cantilever Plate	58
3.3.1 Elasticity Performance of Dual Symmetrical FGM Laminated Beam	59
3.3.2 Shearing and Deformation Theory of FGM Cantilever Beam	61
3.4 Semi-analytical Calculation of Shearing Rigidity of FGM Cantilever Beam	63
3.5 Meso-scopic Optimized Stress Equation of Ellipsoid Heat-bearing FGM	66