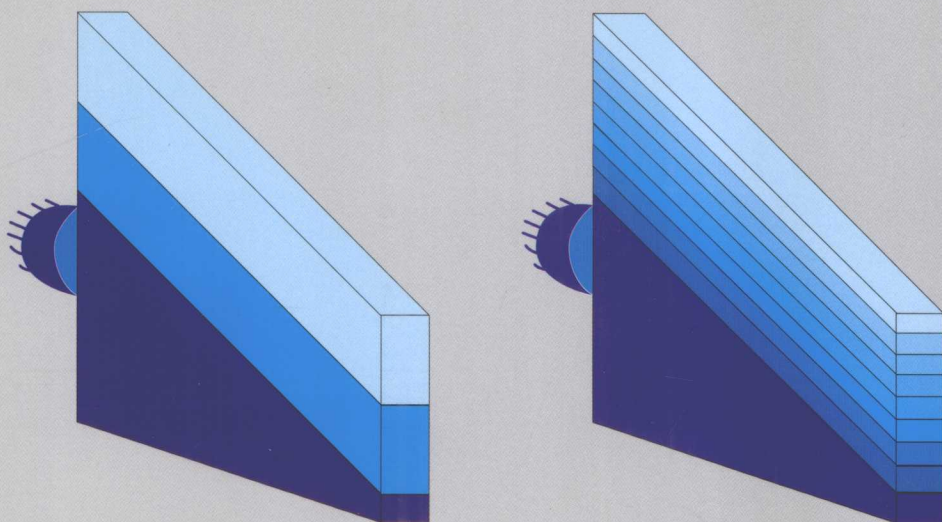


非均质材料电磁 力学与功能设计

Heterogeneous Materials Electromagnetic
Mechanics and Functional Design

李 永 宋 健 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书的研究工作得到国家自然科学基金
(批准号 10972037 和批准号 10702005) 等项目的资助

非均质材料电磁 力学与功能设计

Heterogeneous Materials Electromagnetic
Mechanics and Functional Design

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统而全面地阐述了作者研究的非均质材料电磁力学新理论及其在现代工程中的功能设计,是非均质(梯度)材料电磁力学方面的一部学术专著。全书共8章,分上、下两篇。上篇(前4章)完整论述非均质(梯度)材料电磁力学的理论体系,包括学术思想、理论模型、求解方法;下篇(后4章)介绍非均质(梯度)材料电磁力学仿真方法、功能设计、实验方法及工程应用等,以非均质材料电磁设计为主线,重点围绕功能设计问题,阐述电磁理论在新材料及科学工程中的应用,并选取有代表性的若干个具体工程应用实例予以重点介绍。有关电磁力学和材料功能设计的研究是目前力学、宇航、控制及材料科学等学科的研究热点之一。本书以作者近年来在这方面的系列化研究成果为主要内容,是具有较为完整理论体系和实验验证的非均质材料电磁力学方面的专著,可以为电磁力学问题的分析和评价提供基本理论和方法。

本书不仅理论方法先进,而且工程应用性强,适合于力学、宇航、车辆和机电等专业的科研、设计人员及工程技术人员阅读参考,并可兼作高等院校相关专业相关方向的教师、博士研究生、硕士研究生教学用书,也可作为力学、宇航、车辆、机电和其他相关专业本科生的学习参考书和工具书。

图书在版编目(CIP)数据

非均质材料电磁力学与功能设计 / 李永, 宋健著.

—北京:国防工业出版社, 2010. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 06652 - 4

I. ①非... II. ①李... ②宋... III. ①电磁力学
效应 - 材料力学 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 242904 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 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 14 1/2 字数 333 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.80 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书的主要读者是力学、宇航、电磁和车辆等专业高年级的本科生和攻读工学博士、硕士学位的研究生以及企事业单位的科技人员,这些群体大多首次接触非均质材料电磁力学问题,该领域系统文献并不多见,科研起步需要借鉴资料。近十年来,国内外诸多研究学者对该领域研究均做出了贡献,作者对该领域也进行了较为系统的研究,考虑到国内外关于非均质材料电磁力学与功能设计方面的专著尚未见报道,故决定完成这部汇总作者课题组和国内外本方面研究成果的专著。本书结合了非均质材料电磁力学与功能设计理论等编著而成,总结了课题组最新研究成果,提炼出解决非均质材料电磁力学与功能设计问题的理论、方法和程序仿真等。

在本书选材和编排上的首要考虑就是要精,易入门;其次是压缩经典内容,使读者尽可能多地接触该学科的最新发展方向,为从事非均质材料电磁力学研究架设桥梁。期望本书能增加读者今后处理实际问题时成功的机会和动手能力。研究非均质材料电磁力学问题的第一步是通过理论建立研究对象的模型。在现有的教科书和专著中,通常不涉及非均质材料电磁力学,而将其归于材料力学等前期课程或复合材料力学等专门课程。实验建模则散见于文献中。随着学科交叉,近年来实验建模发展,本书建立了新型非均质材料模型的方法。

本书的上篇(第1章~第4章)属于非均质材料电磁力学基本研究内容,一是分门别类介绍分析方法,二是介绍电磁特有的现象。下篇主要介绍非均质材料电磁力学在各个领域的工业应用、实验、功能设计等,分别介绍了定性方法和常用的几种定量分析方法,将目前功能设计方法推广到电—磁—热—力耦合系统,比较全面地介绍非均质材料特有的现象。可以说,上篇侧重于介绍基本原理理论体系,下篇侧重于介绍非均质材料电磁力学实验方法、功能设计和工业应用体系。

本书着重介绍非均质材料的电磁力学理论和功能设计方法,这是经典内容向现代研究内容的转折。为了与近代文献相衔接并使读者接受必要的科研实例,叙述做到言简意赅,并且有一些重要数学证明和控制方程研究,这是本书的难点。以尽可能通俗的语言介绍了电磁现象以及如何控制,这是近年来非均质材料电磁力学研究的重点。

本书将介绍一些重要的计算与实验方法。随着计算机的普及,计算与实验方法在研究复杂非均质材料的行为,特别在研究系统的长时间历程行为中正起着重要作用

用。为了使读者查阅方便,每章后面均列出了与该章内容有关的参考文献。

在此,特别感谢国家自然科学基金项目(批准号 10972037,批准号 10702005)、清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(批准号 KF09041)、北京理工大学基础研究基金(批准号 20080142002)的资助,本书的研究成果是在这四项科学基金的资助下顺利完成的。

非均质材料电磁力学是一门正在发展中的学科,书中部分内容并不是完全成熟的。作者衷心希望读者在阅读本书的过程中能够解决已指出的一些遗留问题,并期盼读者能发现和提出有意义的新问题。由于作者水平有限,又无本方面的专著可以借鉴和参考,不当之处在所难免,希望读者不吝指正。

作者

2009 年 3 月于北京理工大学

目 录

上篇 非均质材料电磁力学

第1章 绪论	1
1.1 非均质材料电磁力学简介	1
1.2 非均质梯度材料结构分析方法	5
1.3 实验方法	7
1.4 非均质材料器件电磁计算力学与数字化平台设计	10
1.5 非均质材料电磁结构仿生力学	16
参考文献	21
第2章 热—磁—沙—电非均质材料耦合动力学理论	22
2.1 非均质材料多场耦合动力学简介	22
2.2 多场耦合动力学的基本理论	25
2.3 沙电耦合力学机理	28
2.4 损伤分析技术	34
参考文献	35
第3章 非均质梯度材料宇航承载设计和动态特性研究	39
3.1 宇航承载功能设计	39
3.2 非均质梯度材料阻抗渐变与电磁耗散机制	45
3.3 非均质材料板结构的计算方法	51
3.4 非均质材料的渐变折射性质	55
参考文献	57
第4章 非均质材料波/电耦合效应研究	61
4.1 波/电耦合效应简介	61
4.2 非均质材料波动实验平台	72
参考文献	76

下篇 非均质材料功能设计

第5章 非均质材料微电子功能设计	80
5.1 非均质模型的层次结构	80
5.2 非均质材料微电子结构抗冲击设计	81
5.3 非均质结构抗疲劳功能设计	85
5.4 仿真分析技术研究	87
参考文献	96

第 6 章 非均质材料车载电磁功能设计	97
6.1 基于模糊推理的电磁识别	97
6.2 模糊控制与模糊推理简介	101
6.3 基于模糊推理的电磁验证	104
6.4 基于电磁识别的 FGM 器件综合控制策略	105
6.5 FGM 器件综合控制策略仿真验证	110
参考文献	117
第 7 章 非均质材料器件电磁制动功能设计	119
7.1 电磁系统建模	119
7.1.1 高速开关控制阀模型	120
7.1.2 电磁泵模型	121
7.1.3 控制器模块数学模型	121
7.1.4 蓄能器模块力学模型	122
7.1.5 制动管路模型	122
7.1.6 制动轮缸模型	124
7.2 主动压力控制仿真系统搭建	124
7.3 测试系统搭建	126
7.4 电磁系统动态特性分析	127
7.5 电磁模型仿真分析	129
7.6 在线模型电磁估算	132
参考文献	134
第 8 章 非均质材料电磁器件功能设计	136
8.1 非均质材料电磁器件设计简介	136
8.2 基于非均质材料器件的电磁力设计	144
8.3 器件特性参数估算和电磁力观察	147
参考文献	150
附录 A 电磁功能设计与分析领域仿真算法简介	152
附录 B 电磁仿真计算简介	182
附录 B1 仿真模型控制方程简介	182
附录 B2 静电场计算步骤	183
附录 B3 微带传输线电场计算步骤	186
附录 B4 静磁场计算步骤	189
附录 C 非均质材料电磁物理力学概念简介	194
附录 D 移动电话计算分析实施技术路线	199
附录 D1 导入计算的技术路线	199
附录 D2 仿真分析的具体流程	208
附录 D3 翻盖移动电话仿真网格	224

上 篇

非均质材料电磁力学

第 1 章 绪论

第 2 章 热—磁—沙—电非均质材料耦合动力学理论

第 3 章 非均质梯度材料宇航承载设计和动态特性研究

第 4 章 非均质材料波/电耦合效应研究

第 1 章 绪 论

1.1 非均质材料电磁力学简介

非均质材料(非均质梯度材料)是 1987 年由日本科学家新野正之等首先提出的新概念和新思想,其两侧由不同性能的材料组成,以对付苛刻的使用环境;而中间部分的组成和结构又是连续变化的,使其内部界面消失,以减小和克服结合部位的性能不匹配因素。现今国际上通称这类材料为 Functionally Graded Materials(FGM)。由于具有均质和复层材料所不具备的许多优点,故 FGM 已引起了国内外材料业和研究机构的极大兴趣和密切关注。近年来,世界上许多国家相继开展了对 FGM 的研究工作并取得了一定的进展。在光学领域,非均质梯度材料已经用于非线性光电子材料,通过把具有电光学、磁光学效果的材料加入到光学材料中的办法,可以使新的光学部件和光记忆材料的制造成为可能。动物的牙齿、骨头、关节等都是无机材料和有机材料的完美结合,重量轻、韧性好、硬度高。用非均质梯度材料制作的牙齿、关节等,可以较好地接近上述要求。现在,利用高性能的分离膜和催化剂,将构造比较简单的化合物合成化学工业原料的研究已经开始,研究中所使用膜、催化剂及反应容器,都可以用非均质梯度材料来制造。非均质梯度材料也非常适合制造电子元件,通过调整材料的组成,使其梯度化,压电系数和温度系数等性能可以得到最恰当的分配,漂移和噪声问题也可解决,使性能得到提高。更重要的是它将性能各异的材料按照设计的意愿在结构内部非均匀、连续地合成新型材料,将新材料的研制带入了材料设计的更高层次。由于高速飞行器要求材料具有高强度、耐热、耐腐蚀、耐氧化,又要求有良好的热传导和易加工性,过去解决的办法是在金属表面镀上陶瓷膜来满足这种性能要求,但镀膜时两种材料结合处存在严重的界面效应。而 FGM 是指沿着某一方向其物理、化学、生物等单一或复合性能发生连续或阶梯变化,以适应不同环境,实现某种特殊功能的先进材料。FGM 这种非均匀材料一般由分别能承受极高温度的工程陶瓷和能承受机械载荷的金属复合而成,构成 FGM 组分的显微结构(陶瓷、金属、无机或有机物,纤维和显微气孔等)不仅是连续分布,而且是可以控制的。从宏观上看,各组分材料的体积含量在空间位置上是连续变化的,因此其复合材料的热物性参数是空间位置的函数,与传统的复合材料层合板相比,由于这类材料的力学和热学参数没有突变,可缓解应力集中并优化热应力分布。刘书田等提出了基于均匀化理论的 FGM 优化设计方法,其利用均匀化理论建立复合材料宏观性能与微结构表征量之间的关系,通过数学规划技术确定微结构表征量沿梯度方向的分布规律。结果表明:在 FGM 设计与制备中,分层数量对材料功能(应力缓和)有较大影响,但存在一个使得这种影响饱和的数值。因此,FGM 可适当分层,而不必选用很多层。

FGM 的设计过程为:由指定的材料结构形式及受热环境,得出热力学边界条件;从已

有材料合成及性能的数据库中,选择有可能合成的材料组合体系及制备方法;假定金属相、陶瓷相及气孔间的组合比与分布规律,用材料微观组织混合数值算法得出材料结构的等效物理参数;利用热弹性理论及计算数学方法,对选定材料结构组成的梯度成分分布函数进行温度分布模拟和热应力模拟并加以校核,寻求最优设计的成分分布形状及材料体系。获得的结果提交材料制作部门进行梯度材料合成,合成的材料经过性能评价再反馈到材料设计部门。图 1.1 是 FGM 的研制及设计流程图。

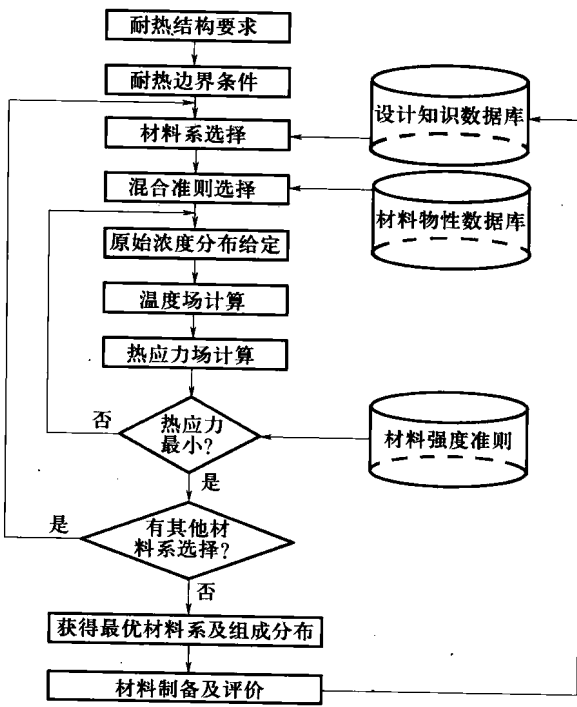


图 1.1 FGM 的研制及设计流程图

- 从图 1.1 可以看出,设计的核心工作内容主要有以下三部分:
- (1) 选择适当的梯度函数使 FGM 烧蚀规律满足总体控制要求。
 - (2) 对 FGM 进行特性估算。
 - (3) 计算 FGM 温度场及热应力。

由于在 FGM 中热传导机理是极其复杂的,对于热导率的定量分析是必要的。范秋林等提出了 FGM 当量热导率的概念,并推导了当量热导率的计算方法,研究了 FGM 的成分、组织和结构设计,得到成分分布曲线为 $p(x)$ 的单位厚度的 FGM 的当量热导率的计算公式。该公式的确立在一定程度上可以指导 FGM 的成分、组织和结构设计,以及性能评价。日本学者若岛健司等假定 FGM 结构为一薄平板,考虑其一维非定常热传导热应力,薄板的中面为基准面,即 x 轴- y 轴平面,板厚方向为 z 轴。假定结构为平面应力状态,结构面内为各向异性的情况。当该热应力问题的弹塑性解析微分形式为线性时,且热膨胀变形为塑性,可以得出一维的热传导方程。储双杰对无限大平板采用有限元法做离散化处理计算,对于平板在热应力作用下的弯曲变形、服从 Kirchhoff 假定时,FGM 平板内部的

应力分布,特别是当把面内变形和面外变形作为自由变形时,可得到与经典层压板理论相同的解。冉均国等针对 FGM 的不均匀性,在平面应力基础上进行热弹性理论推导,提出了梯度薄膜材料的设计原则。翟鹏程等研究了 FGM 在承受热冲击载荷作用时的动态热应力分析模型问题。研究结果表明:

(1) FGM 的热学性能(热导率和热容)随温度变化的特性对材料动态响应的影响比对动态温度的影响更大,即使在低强度热冲击、对温度相应的影响较小的情况下,它对动态热应力的影响也是不可忽略的。因此,在进行 FGM 的优化设计时,必须采用变物性动态温度响应分析模型进行分析。

(2) FGM 的力学性能(弹性模量、泊松比、热膨胀系数)随温度变化的特性对材料的动态热应力相应的影响(包括最大热应力、最大拉应力及其的发生位置等)极为显著,由于 FGM 本身的特点决定了它的力学性能必然与温度相关,因此,FGM 的优化设计必须建立在变物性动态热应力响应分析模型的基础上。

日本东北大学教授川崎亮和渡边龙三用有限元法分析了线弹性条件下不锈钢 - Si_3N_4 和 $\text{W} - \text{ZrO}_2$ 系 FGM 的残余热应力。Drake 和 Williamson 应用该模型研究了圆柱状 FGM 试样的梯度层厚度和成分分布的变化对应力、应变的大小及分布的影响。随梯度层厚度的增加,应力、应变的峰值呈线性下降趋势;梯度指数 p 增大,轴向应力降低,当 p 达到 3.0 时,轴向应力降至最低值,最优梯度层厚度和梯度指数分别应为 8mm 和 3.0。美国犹他大学学者 Ravichandran 依据经典弹性力学理论导出了线弹性条件 FGM 残余热应力的解析计算式,并对 $\text{Ni} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 系 FGM 的残余热应力进行了研究。由于 FGM 材料参数的非均匀性,使得描述问题的控制方程为非线性,对于一些比较典型的结构(如板、壳),其材料参数沿厚度方向变化,在进行热应力分析时,通常采用层合结构模型,例如,Thangjitham 等人对各向异性多层介质的稳态热应力分析,Tanigawa 对无限长的非均质梯度材料板沿厚度方向的一维非定常热应力进行非线性弹塑性分析,他们假设板水平方向无限长,应变沿厚度方向的变化为线性的,求出了应力分布的近似解。

王保林等研究了非均质 FGM 中含有多个裂纹的非线性动态断裂力学问题,他们应用刚度矩阵法和傅里叶变换,在拉普拉斯域内得到了裂纹尖端的动态热应力强度因子和能量释放率,从而分析了材料参数对热应力强度因子的影响。其方法具有以下特点:

- (1) 具有多个垂直于厚度方向的裂纹。
- (2) 材料可以为正交各向异性。
- (3) 考虑了惯性效应。

Erdogan 等对稳态热载下平行于梯度方向的裂纹的断裂力学分析,Jin 和 Noda 等对垂直于梯度方向的裂纹的热应力分析,以及 Nemat - Alla 对热膨胀系数具有二维不均匀性的介质的边缘问题的研究,均将热物性参数假设为坐标方向的指数函数,由此得出的控制方程仍为常系数,可以用傅里叶变换法化为奇异积分方程。Hata 对半无限体的热应力分析将材料参数假定为坐标的幂函数。王继辉等用非线性有限元法分析 FGM 的热弹塑性行为时,得出了梯度层的热弹塑性应力—应变关系,为了计算耐热 FGM 的热应力,首先需要根据梯度层的微观结构特征用微观力学方法计算梯度层的等效性质。对于颗粒增强弥散型复合材料,Weng 最近发展了一种微观力学理论预测复合材料的宏观弹塑性性质。该理论基于 Mori - Tanka 平均场理论、Eshelby 等效原理和 Hill 的多晶体塑性理论,假定金

属基体服从塑性变形理论。该理论给出了 FGM 的割线体积模量、割线剪切模量的预测公式。Nan 等用近期发展的自洽弹塑性微观力学方法研究了 FGM 的热弹塑性性能。该理论假定金属基体的弹塑性性能服从塑性变形理论,由此导出 FGM 的割线体积模量、割线剪切模量的预测公式。FGM 的热弹塑性可以改变 FGM 中的热应力分布规律和最大拉应力位置,因此可根据热弹塑性分析结果,合理进行 FGM 设计与制备。张宝生等推导出基于脆性材料临界应力理论的 FGM 抗热冲击阻抗的数值表达式,利用非线性有限元分析程序对 Al-Ti 系金属间化合物 FGM 耐热冲击性进行了数值模拟。结果表明:激光热冲击下热应力的变化是由压应力向拉应力的转变过程,裂纹产生是由于拉应力超过材料极限强度所致,通过优化设计,改变梯度分布,可以提高材料抗热冲击性能。

(1) 建立了非均质梯度材料三维本构关系和宏观结构分析方法。

(2) 根据非均质梯度材料结构特性,基于成熟的板壳理论和复合材料层合理论,提出一种用于 FGM 结构特性分析的理论。

(3) 考虑了三个广义力学因素和 FGM 宏观非均质性,提出理论初值问题化为半解析边值问题精化求解的新概念,研究了梯度应力场的参加效应。

非均质梯度材料被认为是高温应用下最有前途的新型材料之一,非均质梯度材料的多场耦合分析是航空航天、核反应堆和内燃机机体等领域中的关键技术问题,属于前沿学科之一,它涉及多学科的相互渗透,包括核物理、力学、电磁、材料科学等学科。下列课题需要进一步的研究:

(1) 基础力学理论方面。

① FGM 的宏观性能与细观结构之间的关系,耦合热弹性分析方法的研究。

② FGM 的热损伤力学、损伤发展和材料性能降低的演化关系。

③ FGM 的热弹性优化理论、优化准则问题的研究。

(2) 结构分析方面。

① 含缺陷的 FGM 大型扁壳等特殊结构的热缓和析。

② FGM 结构的热力学的优化分析模型研究,动态热载作用下的模型研究。

③ FGM 结构的热界面研究,界面反应层形成机理。

另外,在进行 FGM 多场耦合分析和结构设计时,还应该考虑材料的制备以及结构成型过程中的工艺力学问题,测试方面应解决高温测试技术问题以及损伤检测问题,系统分析方面应解决针对性强的专用分析评价系统的开发问题。

1.2 非均质梯度材料结构分析方法

为了研究 FGM 细观结构,必须分析 FGM 的细观热应力。把单层单胞、单层层间双胞引入对 FGM 细观结构分析,建立含椭球形增强相 FGM 的细观力学本构关系。研究在于揭示梯度宏、细观结构的内在力学机理。根据需要选取合理的组分材料、梯度分布函数,设计最优的 FGM 结构,建立考虑多场耦合的非均质梯度材料优化设计理论。着重研究含椭球夹杂 FGM 细观结构热应力,FGM 中每个梯度过渡单层中两相材料的体分比是变化的,在研究细观结构热应力时,必须考虑体分比的影响。同时,把 FGM 细观单胞、层间单胞及双胞模型引入含椭球夹杂 FGM 的细观热应力研究中,可根据 FGM 每个梯度单层的

结构特点,对任一单层材料进行分析。进一步分析单、双胞模型,对 FGM 热膨胀系数进行预测,从而得到因 FGM 的温度改变而引起的应力。FGM 细观结构热特性分析可以归结为在远场均匀边界条件下求其内部各离散相的应力与应变的平均值问题。建立适合非均质梯度材料复合结构特性的非线性理论,研究出相应的数值分析解法,将繁难的理论问题化为数值计算问题求解,研究对象包括热释电材料及压电材料等。根据非均质梯度材料的组成及含椭球夹杂的细观结构分布形态与材料宏观性能的定量关系,建立基于广义当量反对称结构的考虑多场耦合的非均质梯度材料优化设计理论提出非均质梯度材料的非线性的基本力学理论,复合结构在多场耦合、复杂载荷下的热弹性力学特性分析方法,寻找思路和恰当的方法予以拓展和推广。通过实验分析,对非均质梯度材料如何进行细观数值模拟和建立模型,直接影响到多场耦合的非均质梯度材料优化设计理论,编制出相应的非均质梯度力学特性优化设计理论计算软件和源程序。

非均质梯度材料反对称悬臂结构力学边界条件非常复杂,数学求解推导繁难,然而 FGM 反对称悬臂结构在实际工程中应用甚广,故 FGM 反对称悬臂结构的研究分析一直是学术界关注的内容。FGM 反对称悬臂结构控制方程的级数形式不能满足全部边界条件,代入广义边界条件后,各项不能成为同类型级数形式,换言之,不能使变量分离,其容许函数满足几何边界条件。将傅里叶级数作为容许函数,利用最小势能原理和二类独立变量广义变分原理得到了非均质梯度材料悬臂结构的非线性控制方程组。在求解过程中,引入广义自然边界条件,在解决板的弯曲问题时,这种半解析法不仅可以节省大量的计算时间,适用于各种载荷情况,而且便于分析各种参数对结构物理特性的影响,运算方便,特别是具有正交性,可以使计算简化。

针对非均质梯度材料的结构特点,在非均质梯度材料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。将 FGM 宏观厚层压结构模型与 FGM 细观椭球增强单胞、双胞模型有机地结合,解得了含有梯度指标的 FGM 宏、细观结构弹性系数之间的定量关系。与传统复合材料本构方程区别的是,FGM 本构弹性系数含有表征结构梯度本质的梯度指标,这将使得 FGM 结构的位移、应力分析中含有非均质、各向异性和梯度变化的材料特色。为了解决结构计算问题,将严格的理论转化为实际的数值计算,将难度很大、极其繁琐的数值计算用计算机来解决,我们编制了 FGM 复合结构的本构、弯曲热弹性理论的半解析法计算程序。该程序设计自然流畅、可读性强,为分析结构的性能特征打下了一个坚实的基础。同时,由于这个程序设计采用了分解模块化的编程新思想,它省时、简便、精确,具有很强的可组装性、可操作性、可调控性、可移植性和可扩充性,这为以后的研究工作提供了方便。由于它融求解热弹性位移场和应力场问题于一体,拓宽了程序的求解范围,在程序设计中独具特色。耐热耐磨材料实验台是对非均质梯度复合结构进行实验测试和研究的实验平台,配备有柔性控制器件、传感器件、实验工作站、飞轮装置和直流电机驱动单元。实验工作站用来装配 FGM 板进行测试,它主要用来装夹 FGM 固支板和 FGM 悬臂板。力矩的测试是通过水平装配的压力传感器,测出试件和实验台所产生的力矩。飞轮装置是用来模拟温度载荷,从而模拟复合结构的实际情况,它的传动轴上连有一个用来装夹 FGM 板的法兰。飞轮装置在加速或减速作用的过程中,会产生很高的温升,设置飞轮模拟质量要依据该 FGM 结构的有关参数计算出被试 FGM 材料所承受的温度载荷来确定。

1.3 实验方法

云纹干涉法应用高密度衍射光栅和激光干涉技术进行位移和变形测量,具有高灵敏度、全场分析、实时观测、高反差条纹和非接触测量等优点。近年来,已经在材料科学、微电子封装、断裂力学、细观力学等方面获得了成功的应用。衍射光栅是由很多平行、等宽、等间距的狭缝组成的(图 1.2),为平行光栅。两组互相垂直的平行光栅可组成正交光栅,如图 1.3 所示。为了能测量二维位移场,云纹干涉法用的为正交光栅。当波长为 λ 的平行光束,以 φ 角为入射角入射节距为 p 的光栅时,根据两相邻狭缝的光束之间的光程差为 $m\lambda$ 可计算出第 m 级光谱与对应衍射角 θ_m 之间的关系式,即光栅方程为

$$p(\sin\varphi + \sin\theta_m) = m\lambda \quad (1.1)$$

上式也可用光栅频率 f (线/mm)来表示,因 $f=1/p$,则

$$\sin\varphi + \sin\theta_m = m\lambda f \quad (1.2)$$

当衍射光方向与入射光方向处于光栅平面法线方向同一侧时,式中的 θ_m 取正号,反之取负号。光栅方程是用来确定光波入射角与不同级次光谱衍射角之间的关系,如图 1.4 所示。两束准直的激光束 A 和 B 以一定的角度 2α 在空间相交时,如图 1.5(a)所示,在其相交的重叠区域将产生一个稳定的具有一定空间频率 f 栅距为 p 的空间虚栅,虚栅的频率 f 与激光波长 λ 和两束激光的夹角 2α 有关,并由下式决定:

$$f\lambda = 2\sin\alpha \quad (1.3)$$

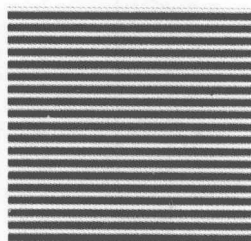


图 1.2 平行光栅

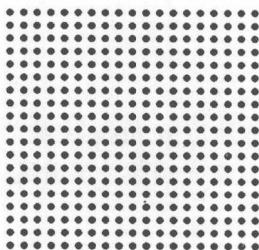


图 1.3 正交光栅

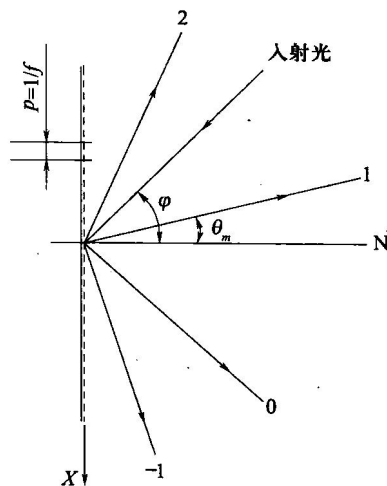


图 1.4 光栅衍射

将涂有感光乳胶的全息干板置于空间虚栅光场中,经曝光后,干板上将记录下频率为 f 的平行等距干涉条纹。经过显影以后的底板,将形成图 1.5(b)所示的波浪形表面,这个波浪形表面便构成了频率为 f 的位相型全息光栅,将这块光栅作为模板,便可用它在试件上复制相同频率的位相型试件栅。云纹干涉法采用的光栅频率 f 通常为 1200 线/mm,也

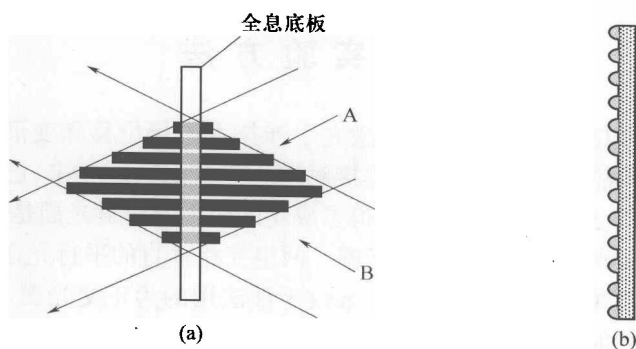


图 1.5 全息位相型光栅

(a) 空间相交; (b) 波浪形表面。

有采用 600 线/mm 和 2400 线/mm 的。通过使全息干板转动 90° 进行二次曝光可获得正交型光栅,则可用于二维面内位移场和应变场测量。将复制好云纹光栅的试件置于云纹干涉光路系统中可测量全场面内位移。云纹干涉光路系统的原理如图 1.6 所示。

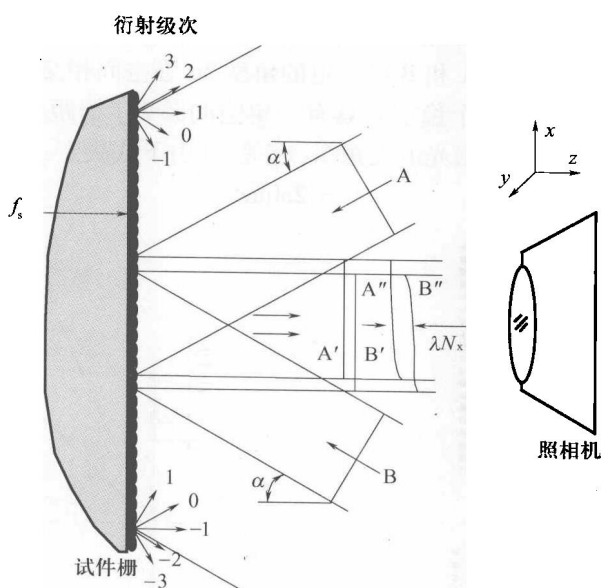


图 1.6 云纹干涉法原理图

两束经过准直的波长为 λ 的平面波 O 光和 R 光对称地以 α 角投射到光栅频率为 f 的试件栅上。根据上述光栅衍射方程,当入射角 α 、波长 λ 和光栅频率 f 满足以下方程关系时,两束光的一级衍射光波将沿试件栅的法线方向衍射。

$$\sin \alpha = \lambda f \quad (1.4)$$

两束对称入射的光波为准直光,试件栅十分规整,试件也未受力,则两个一级衍射波 O 及 R 可视为平面波。此时,成像面上将不出现干涉条纹,仅为均匀的光强分布。如试件栅为正交型光栅,将试件或光路系统围绕法线方向旋转 90° ,则可获得沿 y 方向的面内位移干涉条纹图。通常的云纹干涉仪同时具有 x 和 y 方向两套光路系统,因而很容易获得沿 x 和 y 方向的两组干涉条纹图。令 N_x 和 N_y 分别代表 x 和 y 方向的面内位移干

涉条纹图的条纹级数,则可由下式求得面内位移 U 和 V :

$$U = \frac{N_x}{2f} \quad (1.5)$$

$$V = \frac{N_y}{2f} \quad (1.6)$$

在云纹干涉法实验中所用的光栅频率通常为 1200 线/mm,或光栅节距为 $0.833\mu\text{m}$,代入式(1.5)和式(1.6),得

$$U = \frac{p}{2} N_x = 0.417 N_x (\mu\text{m}) \quad (1.7)$$

$$V = \frac{p}{2} N_y = 0.417 N_y (\mu\text{m}) \quad (1.8)$$

上式表明当试件栅的频率 f 为 1200 线/mm 时,一级干涉条纹代表 $0.417\mu\text{m}$ 的位移量。云纹干涉法的灵敏度通常为试件栅光栅节距的一半。根据面内位移干涉条纹图可以求得试件表面的应变分布。

图 1.7 所示为云纹干涉法实验获得的两端简支、中点受集中力 P 作用的三点弯曲梁的 U 场和 V 场云纹干涉条纹图。从 U 场条纹不难看出,沿着梁的中性层位置条纹的走向是与 x 方向平行的,这表示 U 场条纹沿 x 方向的梯度为零,即 $\varepsilon_x = 0$ 。从 V 场条纹不难由中性层的条纹级数 N_y 获得梁的挠度曲线。从条纹级数 N_y 沿 x 方向的梯度或条纹间距也不难求梁的转角曲线。

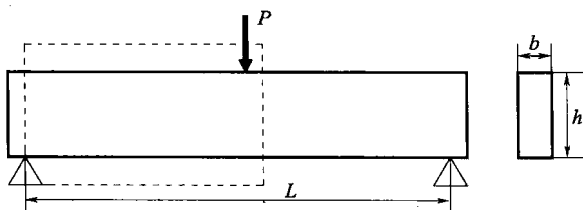


图 1.7 三点弯曲试件

将已转移好试件栅的试件置于云纹干涉仪的光路系统中,调整好光路,便可对试件的位移场和变形进行测量。云纹干涉仪光路系统如图 1.8 所示,所用激光器通常为氦氖激光器,其波长 $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ 。为了能方便地测得 U 和 V 两组位移场,仪器中包含用以测量 x 方向水平位移场(U 场)的水平光路系统和用以测量 y 方向垂直位移场(V 场)的垂直光路系统。两组光路可分别独立使用。

由激光器产生的激光束经分光器和光纤耦合器并经准直镜分成四束准直光,分别投射到 4 个反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 上。调节反射镜 M_1 和 M_2 可使两束准直光 O_1 和 O_2 按要求投射到试件栅上,并调节安装试件的多维调节架,使试件栅的法线方向正好平分两束准直光 O_1 和 O_2 的夹角。此时 O_1 和 O_2 的一级衍射波将沿试件栅的法线方向传播,并经成像透镜 L 将试件栅和两束衍射波的干涉条纹成像在 CCD 摄像机的靶面上,实时地在显示器上显示,并由计算机存储和处理。当然,当试件未受力,试件栅比较规整时,屏幕上应不出现条纹。如果干涉条纹较多,说明光路没有调节好。经过反复调节反射镜和试件调节座,可以使干涉条纹达到最少。此时的干涉条纹图称作零场条纹图。零场条纹图的条纹越少表

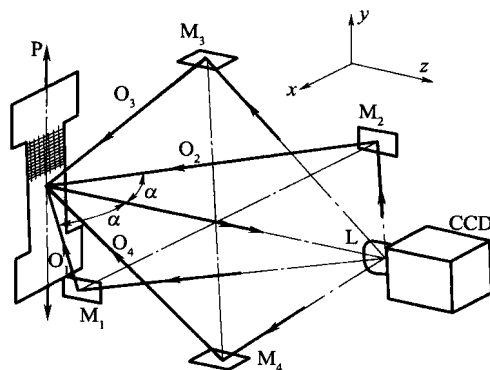


图 1.8 云纹干涉仪光路系统

明光路调节得越好,实验结果也将越准确。同理,通过调节垂直方向的两个反射镜 M_3 和 M_4 可以使入射光 O_3 和 O_4 调节到正确方向,使垂直方向的零场干涉条纹图的干涉条纹也最少。

光路系统调节好以后,对试件施加载荷并产生变形。屏幕上将实时地出现与试件相对应的位移条纹图。由于加载时试件有时会产生刚体位移,包括刚体平移和刚体转动,由此而产生的干涉条纹是不需要的。通过调节夹持试件的多维调节座,可以将与刚体位移有关的干涉条纹消除。需要注意的是,加载以后,光路系统中的 4 个反射镜的调节旋钮不能再调节,否则将改变原已调节好的光路,所获得的干涉条纹图将会是不准确的。特别是与两束对称入射光的夹角有关的调节旋钮,在零场条纹图已经调好以后是绝对不能再调节的。

1.4 非均质材料器件电磁计算力学与数字化平台设计

在科学技术领域里,对新材料器件综合质量的要求越来越高,新设计不断涌现,非均质梯度材料器件以其独特的优势在航天飞机、内燃机、燃气舵、机床刀具及防护装甲等领域得到了非常广泛的应用,目前,其作用是其他材料器件暂时无法替代的。FGM 具有均质材料和传统机械器件所不具备的优点,引起了国内外学者的兴趣。其设计思想是:根据具体要求,选择两种(或多种)具有不同性能的材料组成器件,以适应苛刻环境,使其材料内部界面模糊以至界面消失,从而得到功能逐渐变化的非均质器件,以克服结合部位的性能不匹配因素,从而使器件总体呈连续梯度变化,既有高强度又有好的力学特性等,以提高器件力学性能。国内外研究表明,FGM 对提高复杂产品的性能指标有重要影响。随着信息化和网络技术的发展,近年来,许多国家相继开展对 FGM 数字化理论的研究工作。FGM 数字化设计核心问题就是如何将传统 CAD/CAE/CAM/PDM(C3P)技术与 FGM 设计理论有机地结合起来,根据要求给几何模型内部赋予材料和功能信息,以达到按需求设计 FGM。由于 FGM 性能沿梯度方向变化及功能的多样性,很难采用传统方法来分析其性能,需建立 FGM 专家系统和知识库。建立器件与材料的知识管理(Knowledge Management, KM)的平台,将 FGM 外部形状信息、内部材料信息、结构信息、设计知识和功能信息