

非均匀性对纤维增强复合材料力学性能的影响

张亚芳¹, 齐雷¹, 唐春安²

(1. 广州大学土木工程学院, 广州 510006; 2. 大连理工大学土木水利学院, 大连 116024)

摘要: 研究了材料介质细观非均匀性对纤维增强脆性基复合材料在单轴拉伸荷载下的力学性能的影响。结果表明, 材料介质越均匀, 复合材料的弹性模量就越接近理论值, 其峰值强度也越大。同时, 复合材料的非线性行为降低, 破坏前的预兆现象减少, 并得到相应的声发射结果。

关键词: 非均匀性; 纤维增强; 复合材料; 数值模拟; 声发射

中图分类号: 文献标志码: A

文章编号: 1671-4431(2007)04-0014-03

Numerical Simulation on Influence of Heterogeneity on Mechanical Behavior of Composites Reinforced with Fibers

ZHANG Ya-fang¹, QI Lei¹, TANG Chun-an²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The influence of heterogeneity on mechanical behavior of composites reinforced with fibers was researched by using the different homogeneity indexes. The simulation results showed that the fiber reinforcement with higher homogeneity index (which represented that the material was more uniform) could bring out not only higher elastic modulus, but also higher strength. In addition, less nonlinear behavior of the failure process and less portent before the fracture can be observed. Furthermore, the figures of acoustic emission were also presented.

Key words: homogeneity indexes; fiber reinforcement; composite; numerical simulation; acoustic emission

陶瓷、混凝土、玻璃等材料因其分别具有的高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀等优良特性在越来越广的领域有着广阔的应用前景, 但这类材料的强脆性却制约了其应用。往其中复合纤维而成为纤维增强复合材料, 是该类材料增加韧性的有效措施。人们对于纤维增强复合材料的力学性能和断裂研究方面在假设材料均匀或具有周期性均匀微结构的基础上取得了诸多成果^[1-3]。严格说来自自然界的一切材料都是非均匀的, 纤维增强脆性基复合材料也是一种非均匀材料, 在外载作用下, 材料介质的细观非均匀性及材料内部存在的微缺陷对复合材料微裂纹的成核、扩展以及材料宏观力学性能和破坏过程都有显著的影响。近年也有考虑非均匀性基础上对纤维增强复合材料性能进行研究的文献^[4-5]。从细观角度出发, 利用数值模拟的方法并采用 RFPA^{2D}分析系统, 分析材料介质的细观非均匀性对复合材料力学性能与断裂劣化过程的影响。

1 数值模型简介

该文采用两参数的 Weibull 分布函数来反映材料的非均匀性, 其概率密度函数如式(1)所示。

收稿日期: 2007-01-25.

基金项目: 广东省科技计划项目(2006B14601004), 广州市教育局科技项目(62047)和广东省自然科学基金(05001885).

作者简介: 张亚芳(1966-), 女, 博士, 副教授. E-mail: zhangyafang2004@163.com

$$\varphi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{m-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中, α 为材料细观单元力学特性参数(弹性模量、强度、泊松比等); α_0 为材料细观单元力学性质的平均值; m 为反映 Weibull 分布密度函数的形状参数,也叫均质度,其物理意义反映了材料细观力学性质的均匀性, m 值越大,材料的细观力学特性参数分布越均匀; $\varphi(\alpha)$ 为材料具有某一力学性质 α 的细观单元的概率统计分布密度。

RFPA^{2D}的一个显著特点是可以模拟材料在荷载作用下从缺陷劣化萌生裂纹再到裂纹扩展直至宏观破坏的整个过程,细观单元体选用简单的本构关系与断裂准则来反映材料整体宏观的复杂力学行为。RFPA^{2D}包括 2 个方面的功能:应力分析和破坏分析,其中应力分析运用有限元方法;破坏分析中细观单元采用的破坏准则是修正的 Coulomb 准则。关于该部分理论介绍可见文献[6—7]。

采用位移方式对材料进行加载,初始位移置零,并给一个位移增量。对每一步给出的位移增量,首先进行应力计算,并根据破坏准则检查模型中是否存在破坏单元,若没有则继续增加一个位移增量,进行下一步应力计算;若存在破坏单元,则对破坏单元进行刚度退化处理后重新迭代计算当前步的应力。不断重复上述过程,直至材料产生宏观破坏。

采用的模拟试件如图 1 所示,尺寸为 15 mm × 40 mm,每组模拟分析了 5 个试件,其纤维的间距分别为 3 mm、2.4 mm、2 mm、1.5 mm、1.2 mm,即试件复合的纤维数分别为 4 根、5 根、6 根、8 根、10 根,且每根纤维的尺寸为 0.2 mm × 40 mm。试件在单边切口,切口形状为三角形,其角度为 60°,深为 1.2 mm。将模型试件划分为 150 × 400 共 60 000 个矩形单元。

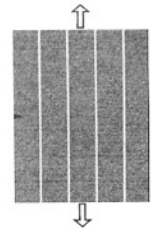


图1 含4根纤维的复合材料数值模拟计算模型

2 数值模拟结果与讨论

长纤维增强复合材料有效弹性性能的理论研究较为成熟,其中运用较多的是对纤维增强复合材料沿纤维方向弹性性能估算的 Voigt 算法,通常也称为混合定律(The Rule of Mixture, ROM)^[8]。该定律采用并联模型表示复合材料的弹性模量

$$E_c = E_f V_f + E_m(1 - V_f) \quad (2)$$

式中, E_f 和 E_m 分别为纤维与基体的弹性模量; V_f 和 V_m 分别为纤维与基体的体积分数; E_c 为复合材料的弹性模量。值得注意的是,式(2)是在假设材料均匀的前提下得到的,且该方程假定复合材料两组元的泊松比相同,并忽略了由不同侧向收缩引起的弹性约束,这与实际情况不完全相符。

为研究材料的非均匀性对纤维增强复合材料弹性性能的影响,选取 6 组、每组 5 个共 30 个模型试件,其基本力学性质参数保持不变,纤维与基体材料的弹性模量比为 5.7:1,强度比为 10:1。仅仅改变纤维和基体的均质度系数,其参数值见表 1。

表 1 纤维和基体的均质度参数表

均质度参数	参数值 $m_f(m_m)$
纤维(基体)均质度	100(100), 20(16), 10(8), 5(4), 3(2.5), 2(1.5)

图 2 为 ROM 理论值与采用不同均质度系数时纤维增强复合材料有效弹性模量值的曲线图。可以看到,随着基体和纤维均质度的下降(即材料越来越不均匀),复合材料的弹性模量越来越偏离 ROM 理论值,且每组 5 个试件的计算值与理论值的误差趋势基本相同。非均匀性越强,材料有效弹性模量降低越多,说明复合材料的非均匀性对材料的有效弹性性能影响较大,这与实际情况是吻合的^[9]。表 2 列出了纤维和基体的均质度均为 100 时(对应于材料近似均匀分布的情况)的该组 5 个试件有效弹性模量的理论值和数值模拟值以及它们之间的误差。该组模型的最大误差为 4.2%,可见数值模拟结果与理论值非常接近。该结果表明运用 RFPA 方法对纤维增强复合材料进行有效弹性分析的有效性。

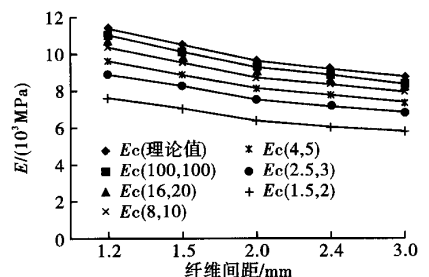


图2 复合材料有效弹性模量的理论值和在不同均质度下的数值模拟值

图3为增强纤维是4根时复合材料性能随不同均质度变化的荷载-加载步-声发射曲线。纤维增强复合材料在均匀度系数低、即材料非均匀性剧烈时(以图3(a)为例),构成基体和纤维单元体的力学性能离散性大。由于材料内部应力

场的分布不均匀,在局部较强应力作用下,强度低的单元首先发生破坏,并随外载荷的增加萌生微裂纹。微裂纹的产生更加剧了应力分布的局部化,破坏单元数量不断增加,裂纹不断发展,材料的宏观强度也随之降低。此时复合材料的荷载-加载步曲线在弹性阶段具有明显的宏观非线性特性。同时声发射现象在加载初期就频繁发生,且较为均匀地分布于复合材料的加载过程中,直至材料达到峰值强度。随后材料试件相继出现了3次相对集中的声发射事件,复合材料表现出韧性破坏的特征。

随着均质度的提高,材料宏观破裂前变形的线性特征增强,非线性特征减弱,声发射现象出现较晚,且声发射的数量相对比较集中。模拟结果还表明,试件的宏观强度明显受复合材料非均匀性的影响,均质度降低,试件的宏观强度也降低。非均匀材料在主破坏发生后,宏观强度的降低是梯度下降的,表现出显著的非线性波动。均匀材料在达到峰值强度后随即发生失稳破坏,破坏后的声发射极少或没有,表现出极强的脆性破坏特征。这些结论与傅宇方等^[10]对细观非均匀性对岩石的宏观破裂过程的影响相似。如图3(f)中当纤维和基体的均质度 m 均为 100 时,纤维和基体的力学参数可看作是近似均匀分布的,此时荷载-加载步曲线有一个显著的“荷载降”,声发射数量非常集中,在主破坏前几乎没有声发射现象产生。即当材料的力学参数接近均匀分布情况下,复合材料的破坏是明显的脆性破坏,此时加入增强纤维没有改善材料的脆性,只是提高了复合材料的强度。

表2 纤维增强复合材料弹性模量理论值和模拟值 ($m_f = m_m = 100$)

	4根纤维	5根纤维	6根纤维	8根纤维	10根纤维
理论值/MPa	8 759.9	9 200.1	9 640.0	10 520.1	11 398.9
模拟值/MPa	8 387.1	8 873.5	9 314.3	10 138.3	11 069.5
误差/%	4.2	3.5	3.4	3.6	2.9

图3 不同均质度下含4根纤维增强复合材料的荷载-加载步-声发射曲线图

3 结论

利用材料破坏过程数值模拟系统 RFPA^{2D}分析了材料介质的细观非均匀性对纤维增强复合材料在单轴拉伸荷载作用下的力学特性的影响,可得到以下几个结论:

a. 复合材料的有效弹性模量与纤维和基体介质的非均匀性有着密切的联系,非均匀性增加,复合材料的有效弹性模量减小。

(下转第 54 页)

图4是不同衬底温度下沉积的ZAO薄膜在可见光范围内的可见光谱。所有条件下沉积的薄膜在可见光区的透射率均超过80%。随着沉积温度的升高,光吸收边界有着轻微的“蓝移”现象,这种现象称为Burstein-Moss迁移,即薄膜中载流子浓度的升高使Fermi能级移向导带。

3 结 语

通过直流磁控溅射导电率良好的ZnO:Al靶制备了ZAO透明导电薄膜,并研究了在不同的溅射温度下所得到的薄膜的结构、电学性能和光学性能。结果表明:随着温度的升高薄膜的电阻率在下降,当温度为300℃时,有最低的电阻率为 $6.33 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 。薄膜在可见光部分的透射率都在80%以上。

参考文献

- [1] 杨兵初,李雪勇,聂国政. 掺铝氧化锌薄膜的光电性能[J]. 中南大学学报:自然科学版,2006(6):124-128.
- [2] 王子健,王海燕,郜小勇,等. 电子束蒸发制备ZnO:Al透明导电膜及其性能研究[J]. 人工晶体学报,2006(6):199-202.
- [3] 余萍,邱东江,樊瑞新,等. Al掺杂ZnO薄膜的微结构及电学特性[J]. 浙江大学学报:工学版,2006(11):39-43.
- [4] 李微,孙云,何青,等. 孪生对靶直流磁控溅射制备ZnO:Al薄膜及其特性研究[J]. 人工晶体学报,2006(4):95-98.
- [5] 徐自强,邓宏,谢娟,等. 掺Al对ZnO薄膜发光性能的调控作用[J]. 光电子·激光,2006(3):5-8.

(上接第16页)

- b. 随着非均匀性增加,纤维增强复合材料的峰值强度也随之降低,但材料的韧性却相应增加。
- c. 非均匀性增加,纤维增强复合材料峰值强度前的线性行为减少,但材料破坏前的预兆大大增加。
- d. RFPA^{2D}还可模拟复合材料试件的声发射行为,复合材料中裂纹的萌生和扩展都和相应的声发射事件密切相关,是物理实验的重要补充。

参考文献

- [1] 杨庆生,杨卫. 纤维复合材料损伤过程的数值模拟[J]. 计算力学学报,1998,15(2):154-160.
- [2] Gaffney K M, Botsis J. Deformation and Fracture of a Uniaxially Reinforced Composite Material[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59: 1847-1859.
- [3] Studer M, Peters K, Botsis J. Method for Determination of Crack Bridging Parameters Using Long Optical Fiber Bragg Grating Sensors[J]. Composites: Part B, 2003, 34: 347-359.
- [4] 张亚芳,唐春安,陈树坚,等. 纤维增强脆性基复合材料的力学性能和断裂过程研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2006,45(1):46-49.
- [5] 李红周,贾玉玺,姜伟,等. 纤维增强复合材料的细观力学模型以及数值模拟进展[J]. 材料工程,2006(8):57-65.
- [6] 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[J]. 力学与实践,1999,21(2):21-24.
- [7] 张亚芳. 脆性基复合材料破坏过程细观力学研究[D]. 沈阳:东北大学,2006.
- [8] 布赖恩·哈里斯. 工程复合材料[M]. 陈祥宝,张宝艳,译. 北京:化学工业出版社,2004.
- [9] 杨卫. 细观力学和损伤力学[J]. 力学进展,1992,22(1):1-9.
- [10] 傅宇方,梁正召,唐春安. 岩石介质细观非均匀性对宏观断裂过程的影响[J]. 岩土工程学报,2000,22(6):705-710.

非均匀性对纤维增强复合材料力学性能的影响

作者: [张亚芳](#), [齐雷](#), [唐春安](#), [ZHANG Ya-fang](#), [QI Lei](#), [TANG Chun-an](#)
 作者单位: [张亚芳, 齐雷, ZHANG Ya-fang, QI Lei \(广州大学土木工程学院, 广州, 510006\)](#), [唐春安, TANG Chun-an \(大连理工大学土木水利学院, 大连, 116024\)](#)
 刊名: [武汉理工大学学报](#) **ISTIC|PKU**
 英文刊名: [JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY](#)
 年, 卷(期): 2007, 29(4)
 引用次数: 1次

参考文献(10条)

1. 杨庆生, 杨卫. 纤维复合材料损伤过程的数值模拟[期刊论文]-[计算力学学报](#) 1998(02)
2. Gaffney K M, Botsis J. [Deformation and Fracture of a Uniaxially Reinforced Composite Material](#) 1999
3. Studer M, Peters K, Botsis J. [Method for Determination of Crack Bridging Parameters Using Long Optical Fiber Bragg Grating Sensors](#) 2003
4. 张亚芳, 唐春安, 陈树坚. 纤维增强脆性基复合材料的力学性能和断裂过程研究[期刊论文]-[中山大学学报\(自然科学版\)](#) 2006(01)
5. 李红周, 贾玉玺, 姜伟. 纤维增强复合材料的细观力学模型以及数值模拟进展[期刊论文]-[材料工程](#) 2006(08)
6. 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[期刊论文]-[力学与实践](#) 1999(02)
7. 张亚芳. 脆性基复合材料破坏过程细观力学研究 2006
8. 布赖恩 哈里斯, 陈祥宝, 张宝艳. [工程复合材料](#) 2004
9. 杨卫. [细观力学和损伤力学](#) 1992(01)
10. 傅宇方, 梁正召, 唐春安. 岩石介质细观非均匀性对宏观断裂过程的影响[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2000(06)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [齐雷](#), [张亚芳](#), [陈树坚](#), [QI Lei](#), [ZHYAN Ya-fang](#), [CHEN Su-jian](#) 纤维增强脆性基复合材料界面脱粘过程的数值模拟 -[中山大学学报\(自然科学版\)](#) 2007, 46(6)
2. 期刊论文 [张亚芳](#), [齐雷](#), [刘浩](#), [何娟](#) 界面强度对纤维增强复合材料宏观韧性的影响 -[中山大学学报\(自然科学版\)](#) 2008, 47(4)
3. 期刊论文 [刘浩](#), [齐雷](#), [张亚芳](#), [吴庆华](#), [LIU Hao](#), [QI Lei](#), [ZHANG Ya-fang](#), [WU Qing-hua](#) 界面弹性模量对纤维增强复合材料力学性能的影响 -[武汉理工大学学报](#) 2008, 30(10)

研究了纤维增强脆性基复合材料界面脱粘过程中剪应力的变化规律. 采用基于细观损伤力学基础上开发的针对材料破坏过程的数值模拟程序, 考虑材料物理力学参数在细观尺度上的非均匀性, 对界面脱粘过程进行了模拟. 结果表明, 材料的非均匀性条件对界面脱粘过程有很大的影响.

4. 学位论文 [魏玉卿](#) 缝绉复合材料细观结构表征及面内力学性能的理论 and 模拟 2007

传统纤维增强复合材料层合板的不足之处在于相对较低的层间断裂强度和韧性以及较低的冲击损伤容限, 在横向载荷尤其是低速冲击载荷作用下很容易发生分层破坏. 缝绉作为一种能有效提高复合材料层间力学性能的低成本方法一直得到人们的广泛关注. 厚度方向上的纤维直接增强可以充分提高层合板层间的断裂韧性、低速冲击损伤容限和冲击后压缩强度. 也就是说, 对于缝绉复合材料层合板, 分层破坏已不再是破坏的主要形式. 一个值得关注的问题是: 缝绉过程中缝绉线的加入迫使原来均匀分布的面内纤维发生弯曲变形和聚集现象, 造成面内结构的严重非均匀性, 并使层合板面内产生局部损伤, 在一定程度上影响层合板的面内力学性能. 本文旨在对缝绉诱导的局部细观结构进行参数化、定量化的表征, 深入地研究缝绉造成的结构和性能的严重非均匀性, 探寻缝绉复合材料在拉伸载荷作用下的面内力学行为, 发展一套预测缝绉复合材料面内力学性能的理论体系和模拟方法, 揭示面内宏观力学性能与缝绉引起的纤维扰动之间的内在关系, 力图将缝绉复合材料层合板在拉伸载荷作用下的面内刚度和强度与材料体系、体积分数、缝绉线直径以及缝绉密度等定量地联系起来.

基于对缝绉孔附近的局部细观结构的试验研究, 本文将代表性单元体按材料性质的不同划分为四个不同的区域, 即未变形区、纤维变形区、树脂富集区和厚度增强区. 提取四个细观结构参数: 包括变形区长度、变形区宽度、缝绉孔短轴和缝绉孔长轴, 来表征缝绉诱导的局部细观结构. 对细观结构的数字照片进行图像处理, 进而对细观结构参数进行定量测量, 测量结果表明细观结构参数的测量值服从正态分布. 并且找到四个细观结构参数之间的定量关系, 即: 变形区长度约是缝绉孔短轴的12-20倍, 变形区宽度和缝绉孔长轴约是缝绉孔短轴的3-4倍, 缝绉孔短轴约是缝绉线直径的80%. 在此基础上, 发展了新型纤维弯曲模型, 得到纤维偏转角和纤维体积分数的解析表达式, 给出了缝绉引起的纤维偏转角和纤维体积分量在代表性单元体内的空

间非均匀分布。

设计了六种复合材料单向板的拉伸试验件,包含不同的缝织密度和缝织线直径以及未缝织的情况。对各试验件在单向准静态载荷下进行拉伸试验,记录其破坏模式和拉伸强度。研究表明:中低缝织密度的复合材料单向板的主要破坏模式为纤维断裂,而内拉伸强度较高,约为未缝织复合材料单向板拉伸强度的85-90%。拉伸强度随缝织密度和缝织线直径的增加而降低。当缝织密度过高时,相邻缝织孔之间相互干涉造成树脂富集区之间彼此联接贯通,复合材料的破坏模式为复合材料撕裂破坏,拉伸强度较低,约为未缝织复合材料单向板拉伸强度的70%。缝织线的加入造成面内纤维的偏转变形,在单向拉伸载荷作用下,纤维不仅产生轴向位移,还产生横向位移。为此,采用欧拉-贝努利曲梁来描述单根纤维的力学行为,建立相互作用的微曲梁模型。采用有限差分法对控制微分方程进行数值求解,得到与有限元模型相吻合的结果,表明该模型可以很好的预测缝织诱导的局部应力集中。

由于纤维拉伸强度的分散性,采用双参数韦伯分布来描述纤维强度的统计分布。考虑纤维的随机断裂及基体剪切破坏两种破坏模式,建立了统一型微曲梁相互作用模型。发展了复合材料拉伸破坏过程的模拟方法,结合蒙特卡罗模拟技术,对缝织复合材料单向板在单向拉伸载荷作用下的破坏过程进行数值模拟,得到与理论相吻合的结果,表明该模型和模拟方法的正确性。

研究了缝织密度以及微观结构参数包括变形区长度、变形区宽度和缝织孔短轴对复合材料单向板拉伸强度和弹性模量的影响。研究表明当纤维强度服从双参数韦伯分布时,缝织复合材料单向板的拉伸强度也服从双参数的韦伯分布,且其形状参数与纤维强度韦伯分布的形状参数在数值上基本相当。拉伸强度随缝织间距的增加而减小,随针距的增加而增大;拉伸强度随变形区宽度和缝织孔短轴的增加而减小;变形区长度对拉伸强度的影响不是单调的,存在最优值。缝织密度和微观结构参数对面内弹性模量的影响很小。

5. 期刊论文 [唐春安,傅宇方,林鹏,孙旭东, Tang Chunan, Fu Yufang, Lin Peng, Sun Xudong](#) [短纤维增强复合材料破坏过程的数值模拟-力学学报](#)2000, 32(3)

利用一个材料破坏过程分析程序MPPA2D系统,研究了短纤维增强复合材料的破坏过程。研究表明,对于非均匀脆性材料而言,纤维与基体的强度、弹性模量比及纤维的弹塑性性质对宏观材料的强度和韧性有很大的影响,数值模拟再现了短纤维增强复合材料的变形、破坏全过程,包括纤维的止裂与桥连作用及微裂纹的萌生、扩展直至最终宏观破坏。

6. 期刊论文 [黄俊,姜弘道, HUANG Jun, JIANG Hongdao](#) [短纤维水泥基复合材料的拉伸数值分析-岩石力学与工程学报](#)2007, 26(9)

提出软弱区的概念,并定义该软弱区为砂浆试件中包含微裂隙、微裂缝或缺陷的一个局部区域,采用细观力学的方法,假定砂浆试件是由砂浆基体和许多随机分布于基体中的软弱区所组成,基于蒙特卡罗随机抽样原理,实现软弱区单元在砂浆基体中的随机分布,基体单元和软弱区单元材料的非均匀性由Weibull参数表征,同时假定基体单元和软弱区单元均符合低拉伸材料开裂准则,建立砂浆拉伸数值模型,考虑软弱区分布、Weibull分布参数、细观单元力学参数等对数值试验的影响,全面分析砂浆区开裂的力学行为,在砂浆数值模型的基础上,系统研究短纤维增强砂浆的拉伸开裂及纤维细观力学参数、分布特征等对数值拉伸结果的影响。最后,将数值结果与试验结果进行对比,结果表明,数值模型能较好地模拟砂浆的拉伸开裂和短纤维对砂浆的增强效果,同时由数值模拟得到的砂浆单向拉伸应力-应变全过程曲线与试验结果较为吻合。

7. 学位论文 [戴新进](#) [复合材料结构随机振动的虚拟激励法及在航空航天领域的应用](#) 2007

纤维增强树脂基复合材料层合结构具有比强度高、比刚度大、阻尼特性好、疲劳寿命长、结构可设计性强等优点,在航空、航天及一些特殊领域中被广泛使用。然而,复合材料的各向异性,非均匀性等特点给复合材料结构的力学分析带来了一系列的挑战。尤其在航空航天领域,飞行器在运行过程中所处的环境和所受的载荷都非常复杂。除了考虑飞行器在这些复杂环境下的自振特性和确定性外载作用下的动力响应外,考虑随机性外载的影响也不容忽视。随机振动理论和方法就是处理这类问题的先进思想和重要手段,但在国内外航空航天领域中还很少实际应用,主要原因之一就是现有随机振动分析方法复杂而且低效,这在很大程度上限制了飞行器设计水平的提高。虚拟激励法是高效精确的随机振动分析方法,迄今已经在跨大尺度结构抗震、抗风,海洋平台和汽车随机振动等多个工程领域被数以百计的专家针对各工程领域的特点予以发展并取得很多实际效果。但是迄今为止,这一有力的工具却并未在航空航天领域被充分认可和应用,在这些具有战略意义的重要领域中,所应用的随机振动分析方法依然复杂低效,缺乏创新意识。本文针对这一现状,依据航空航天领域材料和结构的复杂性,以及飞行器所处环境的复杂性,将虚拟激励法作了有针对性的发展,以完全自主知识产权的DDJ有限元程序系统为开发平台,完成了求解复合材料结构随机振动的高效精确分析程序。本文中,着重对如下问题进行了研究:

1. 建立了基于Mindlin一阶剪切变形理论的复合材料层合板有限元分析模型,推导了层合板的有限元列式,在DDJ程序平台上对复合材料层合板的自振频率和模态进行了分析。将虚拟激励法引入到航空航天领域广泛使用的复合材料层合结构的随机振动分析中,针对复杂的复合材料结构有限元模型和非经典阻尼体系,发展了包含全部参振振型和随机激励点之间耦合项的随机振动高效求解方法,比较圆满地解决了传统计算方法精度差、效率低的应用障碍。

2. 本文推广虚拟激励法于敷设粘弹性阻尼层的复合材料层合结构的平稳和非平稳随机振动分析,建立了高效精确计算方法。尤其是综合考虑了粘弹性阻尼材料的性能参数随频率变化的特点以及复合材料层合结构本身的模态阻尼,建立了组合系统的非经典阻尼表达。为了解决随频率变化的非经典阻尼体系的平稳/非平稳随机响应,本文结合精细积分方法提出了一种直接解法,只需用原系统的实模态对虚拟激励法做出相应的发展,就可精确地求解非经典阻尼体系的随机振动。据此对飞机水平尾翼的复合材料固定面结构进行了模拟研究,从精细的计算模型及合理的计算结果可以看出,本文所提出的方法对于这类相当复杂的复合材料结构的随机振动分析十分有效。

3. 研究飞机对大气紊流响应的主要方法是随机功率谱法。用高效、精确的分析方法计算不同飞行环境下飞机的响应,以预测飞机疲劳寿命和可靠度等是航空工程领域研究热点。本文在考虑了二维平面流中简谐振动平板产生的非定常力基础上,又按照虚拟激励法的特点同时考虑了竖向简谐风的影响,进而研究了复合材料二维机翼的大气紊流响应。随机激励谱选用了Dryden紊流频谱模型。结果表明,在处理二维机翼在大气紊流响应的随机问题中,基于简谐响应的虚拟激励法不但是精确算法,而且效率非常高,具有很大的实用优势。发展这一方法对于该领域的数值计算是很有价值的。

4. 计算流体力学(CFD)是研究流体力学的有力工具。本文为计算机翼颤振/抖阵分析中的气动参数,首次使用雷诺平均湍流模型对二维翼型截面的颤振导数进行了求解。基于D. K. Sun等最新提出的CFD网格控制算法以及所建立的数值风洞,计算了结构简谐运动下的气动力,并识别了湍流场中NACA0012翼型的颤振导数。将由此得到的颤振导数和气动力应用到大气紊流引起的随机振动计算中,并将计算结果与基于Theodorsen函数得出的响应解析解进行比较,得到了相当满意的一致。

本文计算的CFD气动参数充分考虑了气体的分子粘性和紊流粘性,其作用相当于附加阻尼,因此比Theodorsen函数方法限制更少、应用范围更广,而且在此基础上还可以考虑三维流和可压缩性。因此本文实施的基于CFD的气动力计算方法具有广阔的应用前景,将成为应用虚拟激励法于航空航天结构时确定气动参数的有力工具。可以说,这一成功的尝试为随机振动方法更广泛地应用于航空航天工程走出了很重要的一步。

8. 期刊论文 [刘浩,张亚芳,齐雷, LIU Hao, ZHANG Ya-fang, QI Lei](#) [短纤维增强脆性基复合材料破坏过程和力学性能](#)

研究-中山大学学报(自然科学版)2008, 47(6)

研究短纤维增强脆性基复合材料在单轴拉伸荷载下的力学性能和破裂机理。采用基于细观损伤力学基础上开发的针对材料破坏过程的数值分析软件,考虑材料细观非均匀性,对复合材料的变形、损伤直至失稳破坏的全过程进行数值模拟。结果表明,加入短纤维后,材料试件的强度和韧性都比基体材料显著提高。短纤维强度的变化对复合材料试件的强度和刚度没有明显影响;而短纤维弹性模量的变化对复合材料试件的强度、刚度和韧性均影响明显,随着短纤维弹性模量的增加,复合材料试件的强度和刚度不断增加,但韧性却逐步降低。

9. 会议论文 [高成强,王汉功,刘小方,阳能军](#) [大型复合材料构件的无损检测方法研究](#) 2008

纤维增强型复合材料以其比强度高及比模量大、制造工艺整体性强等优点,在武器装备上得到了广泛应用。但由于复合材料的多相性、非均匀性、各向异性,以及装备用复合材料结构复杂、体积庞大等特点,对其进行无损检测及寿命评估的难度非常大。本文分析了纤维增强型复合材料的特点及常见缺陷,针对单一检测手段的局限性,提出了综合运用声发射和超声两种方法对大型复合材料构件进行现场检测的思路。

10. 学位论文 [冯鹏](#) [新型FRP空心桥面板的设计开发与受力性能研究](#) 2004

纤维增强复合材料(fiberreinforcedpolymer,简称FRP)是近年来在土木工程中开始应用的新型结构材料。FRP空心板是一种常用的FRP构件,可用于桥面、墙板和楼面,其中FRP空心桥面板是最具有前景的应用形式之一。本文提出一种新的构造方法,并以此设计制作出一种新型FRP空心桥面板,研究

了其静力性能和疲劳性能,研究了其构造增强的机理。论文还对FRP受弯构件的设计理论进行了研究,建议了FRP空心板的设计步骤和方法。

由于FRP具有各向异性、非均匀性等材料特性,在FRP空心桥面板中,各组件间连接和截面的构造形式成为影响其力学性能的主要因素。本文首先通过试验,研究了两种FRP空心板的变形性能和破坏特征,总结了文献中各种FRP空心板的破坏特征。在此基础上,提出了一种新的构造方法——外部纤维缠绕增强(outside filament-wound reinforcement,简称OFR),用以增强FRP空心桥面板中各组件间连接的受力性能。试验研究表明,OFR明显改善其变形能力和承载力,并使破坏过程变缓。随后,通过对已有FRP桥面板构造的研究和对不同截面构造形式的FRP空心板的有限元分析,设计了一种新型FRP空心桥面板——HD板:由2块拉挤面板、4个缠绕芯管以及OFR构成,并经优化设计,最终研制成定型产品。论文进一步对带有不同厚度和不同角度OFR的HD板进行了静载和疲劳试验,试验研究表明:HD板在汽超20级荷载下满足变形要求,承载力为设计荷载的4倍以上;经过200万次的疲劳加载,构件刚度的变化小于10%。论文还通过有限元分析,研究了OFR在FRP空心板中的作用,揭示了其局部增强和抑止组件间界面裂纹开展的机理。

根据FRP与传统结构材料受力性能的差异,论文对受弯构件的性能指标和安全储备问题进行了研究。指出结构安全储备包括:变形储备和承载力储备,并提出4个适用于各类材料的受弯构件的性能指标,以统一考虑变形储备和承载力储备,使FRP构件与传统材料构件具有一致的安全储备。最后,基于本文的试验研究和理论分析,构建了FRP空心板设计分析体系,并为其中各步骤建议了相应的分析计算方法。

引证文献(1条)

1. 罗忠, 朱锡, 简林安, 梅志远 承载/隔振夹芯复合材料基座设计[期刊论文]-武汉理工大学学报 2009(16)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_whgydxxb200704005.aspx

下载时间: 2010年6月18日