

热载荷对三维编织复合材料拉伸性能的影响

姜黎黎, 王幸东, 刘 恂, 曾 涛

(哈尔滨理工大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对热载荷对三维四向编织复合材料拉伸性能的影响, 基于材料细观结构几何模型, 推导了三维四向编织复合材料稳态热传导分析有限元方程, 建立了三维四向编织复合材料热力耦合行为分析力学模型. 将稳态热传导分析得到的温度场作为热力耦合分析时的热载荷, 并施加相应的机械载荷, 完成了热力耦合强度预报. 研究表明螺旋型纤维等效模型的数值预报结果与实验数据基本吻合, 说明该模型能有效地计算三维编织复合材料的纵向拉伸强度; 边界热流对小编织角三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度影响较大; 该研究为后续的瞬态热传导分析分析奠定了基础.

关键词: 三维编织; 复合材料; 热载荷; 拉伸性能

DOI: 10.15938/j.jhust.2015.01.019

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2015)01-0095-05

Effect of Thermal Loading on Tensile Properties of 3D Braided Composites

JIANG Li-li, WANG Xing-dong, LIU Xun, ZENG Tao

(School of Civil Engineering and Architecture, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: On the issues of the effect of thermal loading on tensile properties of 3D four-directional braided composites, the finite element method of steady state thermal conduction analysis is derived based on the mesoscopic geometry model. The mechanical model of thermo-mechanical coupling behaviors analysis for 3D four-directional braided composites is developed. By applying the thermal loads and the mechanical loads, the tensile strength of 3D braided four-directional composites are analyzed. The numerical calculations of the helix geometry model agree well with the experiment data and this indicated that the present model can compute the longitudinal tensile strength of 3D braided composites effectively. The results indicate that the boundary heat flux has obvious influence on the thermo-mechanical strength of 3D braided composites and lays a foundation for the follow-up transient state thermal conduction analysis.

Key words: 3D braided; composites; thermal loading; tensile properties

收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12521102).

作者简介: 姜黎黎(1975—), 女, 博士, 副教授, E-mail: lljfree@163.com;

王幸东(1989—), 男, 硕士研究生;

曾 涛(1967—), 男, 教授, 博士研究生导师.

0 引言

三维编织复合材料具有优异的综合力学性能,在航空、航天和国防领域中有着广泛的应用,而这些领域多是属于高温、或者是冷热交替的恶劣环境,因而要求编织复合材料具有高度的环境适应性,能在剧烈环境变化中保持结构的高度稳定性。目前,对三维编织复合材料刚度和强度等方面的研究较多,而对其热机械性能的研究则鲜有报道。文[1-6]对三维编织复合材料的热膨胀特性和热传导性能进行了实验研究与数值分析。研究发现,三维编织复合材料具有负的纵向热膨胀特性,其热传导性能同其力学性能一样具有各向异性特征。文[7-10]对三维编织复合材料在不同温度条件下的力学性能进行了实验研究。文[11]用多尺度分析方法预报了低温下编织复合材料的热弹性性能。MEI^[12]等研究了处于氧化环境中的三维编织复合材料承受热循环和机械疲劳时的力学响应。文[13-15]等分别对受到均匀升温作用的三维编织复合材料筒壳进行了屈曲分析和二维瞬态热传导分析。研究结果表明,增强体结构对编织复合材料在高温时的拉伸性能有着重要的影响,温度变化对三维编织复合材料的弯曲性能有较大的影响,且三维编织复合材料的力学性能随温度的升高而降低。文[16-18]基于改进的细观单元力学分析模型,采用多相有限元法研究了三维四向编织复合材料的刚度及其拉伸力学性能。

本文基于三维四向编织复合材料的细观结构几何模型,推导三维四向编织复合材料稳态热分析有限元方程,对材料进行稳态热传导分析,数值预报已知边界热流条件下材料单胞的温度场分布。在稳态热传导分析的基础上,建立三维四向编织复合材料热力耦合行为分析的力学模型,数值预报三维四向编织复合材料的热力耦合强度。

1 细观结构几何模型

合理描述三维四向编织复合材料内部的细观结构是预报材料力学性能的关键。现有的细观结构几何模型均将纱线处理成直线构型,没有考虑纤维束间因打紧工序而造成的纤维束弯曲和截面形状变化以及纤维束的打捻工艺,这显然与真实的三维编织结构存在差异。本文在米字型单胞模型的基础上,通过

计算模型中纤维束的中心迹线方程和纤维束的空间几何方程,建立了能够精确反映三维四向编织复合材料真实细观结构的螺旋型单胞几何模型。用四根螺旋形纤维束的中心迹线来表示单胞内部纤维束的空间构型和主要纱线的拓扑关系(如图1所示),推导了纤维束的数学表达式。纤维束是一个横截面为椭圆形的扭转的圆柱体,真实地描述空间纤维束的相互挤压和扭结而造成的纤维束弯曲和截面形状的变化,克服传统米字型模型纤维束相互交叉的缺点,能够更加精确地反映三维四向编织复合材料内部的细观结构。

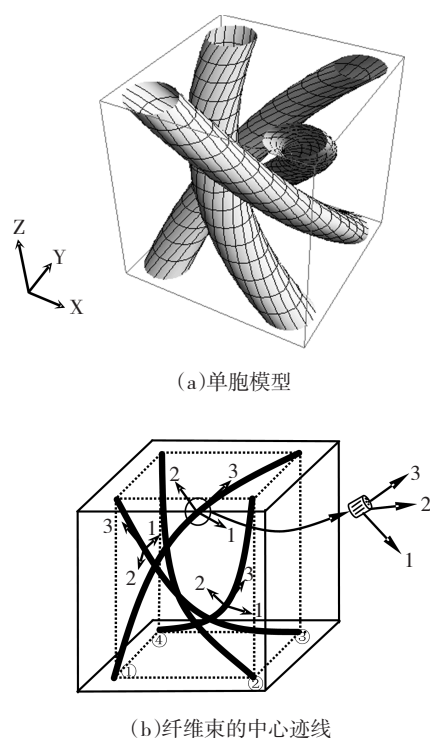


图1 三维四向编织复合材料螺旋型单胞几何模型

基于该细观结构几何模型对三维四向编织复合材料进行稳态热传导及热力耦合分析时,数值分析中如何考虑微结构中纤维与基体之间界面相异构的影响,是求解三维四向编织复合材料界面处应力和位移以及材料的温度场和热力耦合行为研究的关键。因此,本文采用多相有限元方法对单胞模型进行离散化,不需要在不连续处进行网格剖分和重构,计算效率高且数值稳定。根据所包含材料组分的不同,编织复合材料离散体单元可分为三类:仅含基体材料的基体单元,仅含纤维束材料的纤维束单元,既含基体材料又含纤维束材料的混合单元,如图2所示。

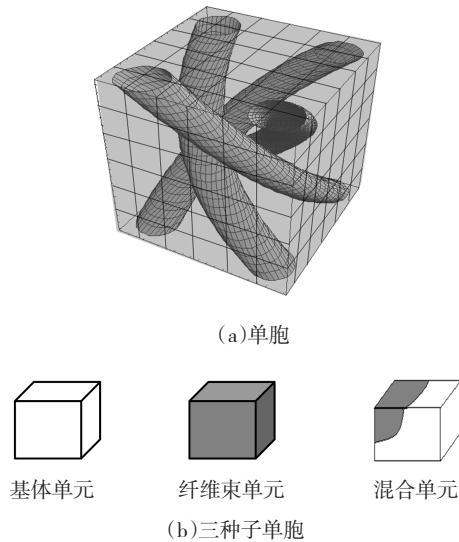


图 2 单胞的划分

2 有限元方程

设三维四向编织结构的整体等效热传导矩阵为 $[H]$, 整体等效结点热流量为 $\{Q\}$, 整体结点温度为 $\{T\}$, 则稳态热传导问题的有限元方程为:

$$\{Q\} = [H]\{T\} \quad (1)$$

在式(1)中, 整体等效结点热流量 $\{Q\}$ 是编织结构中每个单元结点热流量的总和, 由单元的边界条件和施加在单元上的结点热流量决定. 因此, 要求结点温度 $\{T\}$, 必须先确定三维四向编织结构的整体等效热传导矩阵 $[H]$, 其表达式为:

$$[H] = \sum_{e=1}^M [H_M]^e + \sum_{e=1}^N [H_Y]^e + \sum_{e=1}^L [H_{Mix}]^e \quad (2)$$

式中, $[H_M]^e$ 、 $[H_Y]^e$ 和 $[H_{Mix}]^e$ 分别代表基体单元、纤维束单元和混合单元的等效热传导矩阵, M, N 和 L 分别为单胞中基体单元、纤维束单元和混合单元的数量. 根据热弹性问题的有限元理论^[9], 各类单元等效热传导矩阵的表达式为:

$$[H_i]^e = \int [B]^T [k_i] [B] dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [k_i] [B] \det [J] d\xi d\eta d\zeta \quad (i = Y, M, Mix) \quad (3)$$

式中, $[k_i]$ 为材料热传导率矩阵, 而 $[B]$ 为几何矩阵. 采用高斯数值积分的方法来计算单元的等效热传导矩阵, 基体单元的热传导率矩阵 $[k_M]$ 可采用各向同性材料进行分析; 纤维束中既含纤维又含基体, 其热传导率矩阵 $[k_Y]$ 可采用横观各向同性材料进

行分析, 并考虑材料主轴方向进行坐标变换; 混合单元为非均匀材料, 其热传导率矩阵 $[k_{Mix}]$ 随高斯积分点位置的变化而变化. 如果高斯积分点在纤维束上, 则采用纤维束的热传导率矩阵 $[k_Y]$, 否则采用基体的热传导率矩阵 $[k_M]$, 这样, 式(3)可写为:

$$[H_i]^e = \sum_{r=1}^3 \sum_{s=1}^3 \sum_{t=1}^3 W_r \bar{W}_s \bar{W}_t ([B]^T [k_i] [B] \det [J])_{\xi=\xi_r, \eta=\eta_s, \zeta=\zeta_t} \quad (i = Y, M, Mix) \quad (4)$$

式中 ξ_r, η_s, ζ_t 是局部坐标系下高斯积分点的坐标值, $W_r, \bar{W}_s, \bar{W}_t$ 是相应的加权系数.

对已知边界热流的三维四向编织复合材料单胞, 由方程(1)得到其温度场分布, 将该温度场作为热力耦合分析时的热载荷加载, 其等效结点热载荷 $\{F_T\}$ 可根据文^[9]计算. 假设作用在单胞模型上的等效结点机械载荷为 $\{F_p\}$, 结构的总体刚度矩阵和结点位移分别用 $[K]$ 和 $\{\delta\}$ 表示, 则热力耦合作用下结构的整体结点平衡方程组为:

$$\{F_T\} + \{F_p\} = [K]\{\delta\} \quad (5)$$

式中, 总体刚度矩阵 $[K]$ 可根据文^[5]计算. 得到单胞模型的总体结点位移 $\{\delta\}$ 后, 即可求得每一个单元的应变和应力, 从而根据相应的强度准则进行强度计算. 纤维束的强度由 Tsai - Wu 二阶张量多项式失效准则确定, 基体材料的强度由 Von Mises 准则来确定.

3 数值分析与讨论

根据上述有限元理论, 本文应用 Fortran 语言编制了三维四向编织复合材料稳态热传导及热力耦合强度问题的有限元计算程序. 为了验证该数值模型的有效性, 首先分析了三维四向编织复合材料仅在机械载荷作用下的纵向拉伸强度, 并与相应的实验结果进行了对比; 其次, 对已知边界热流条件下的材料单胞进行稳态热传导分析, 得到了单胞模型的结点温度; 最后, 将该结点温度作为热力耦合分析时的热载荷, 并施加相应的机械载荷, 完成了热力耦合强度预报. 所用纤维和基体的弹性性能见表 1, 热物理性能见表 2. 三维四向编织复合材料纵向拉伸强度数值预报与实验结果对比如表 3 所示.

由表中数据可知, 数值预报结果与实验结果取得了较为理想的吻合, 说明本文基于螺旋型单胞几何模型, 应用 Tsai-Wu 多项式失效准则建立的三维四向编织复合材料纵向拉伸破坏强度预报方法可以

有效预报三维四向编织复合材料的纵向拉伸破坏强度.

表 1 组份材料的弹性性能

组份材料	E_{33f}/GPa	E_{22f}/GPa	G_{32f}/GPa	G_{12f}/GPa	E_m/GPa	γ_{32f}	γ_m
碳纤维	220	13.8	9.0	4.8	—	0.25	—
基体	—	—	—	—	4.5	—	0.34

表 2 组份材料的热物理性能

组份材料	$\alpha_{33f}/10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_{22f}/10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_m/10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\lambda_{33f}/(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$	$\lambda_{22f}/(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$	$\lambda_m/(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$
碳纤维	-0.3	3.1	—	8.0	1.0	—
基体	—	—	31.7	—	—	0.18

表 3 三维编织复合材料纵向拉伸强度数值预报与实验结果对比

编号	编织角/ $^{\circ}$	纤维体积含量/ $\%$	纵向拉伸强度/ MPa		
			实验值	数值模拟	误差/ $\%$
1	20	45	539.47	478.9	11.2
2	30	45	—	241.1	—
3	40	45	217.02	182.9	15.7
4	45	45	—	168.8	—

图 3 给出了三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度随边界热流变化的关系曲线, 编织角分别为 26° 和 45° , 纤维体积含量均为 45% . 由图可知, 三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度随边界热流的增大而降低. 对于编织角分别为 26° 和 45° 的三维四向编织复合材料, 当作用在单胞模型边界上的热流 $q=50\text{ W}/\text{mm}^2$ 时, 其纵向拉伸强度比无边界热流作用时的强度分别降低了 65% 和 49.8% , 说明边界热流对三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度影响较大, 而且对于小编织角复合材料的影响较大. 这主要是因为, 在热载荷的作用下, 三维四向编织复合材料各组分之间产生了界面约束作用, 在增强纤维与基体之间产生了相互作用的热应力, 且小编织角复合材料趋向于单向纤维增强复合材料, 纤维束沿纤维方向具有负的纵向热膨胀系数, 在垂直于纤维方向具有正的横向热膨胀系数, 这一特性使得小编织角复合材料纤维束区域的热应力较大, 从而明显降低了小编织角复合材料的纵向拉伸强度.

图 4 给出了当作用在单胞模型边界上的热流 $q=30\text{ W}/\text{mm}^2$ 时, 三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度随编织角变化的关系曲线. 由图可知, 当三维四向编织复合材料的边界受到热流作用时, 其纵向拉伸强度随编织角的增大而降低, 其变化趋势与无

边界热流作用时相同. 当编织角由 20° 增长到 50° 时, 纵向拉伸强度的降低幅度为 70.6% , 小于无边界热流时 74.0% 的降低幅度. 图 5 给出了三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度随纤维体积含量变化的关系曲线. 由图可知, 当单胞模型的边界受到热流作用时, 其纵向拉伸强度随纤维体积含量的增大而呈现线性增长的趋势, 当纤维体积含量由 35% 增长到 55% 时, 纵向拉伸强度的提高幅度为 26.7% , 略小于无边界热流时 28.0% 的提高幅度.

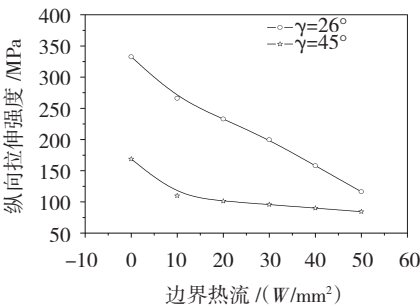


图 3 纵向拉伸强度随边界热流的变化

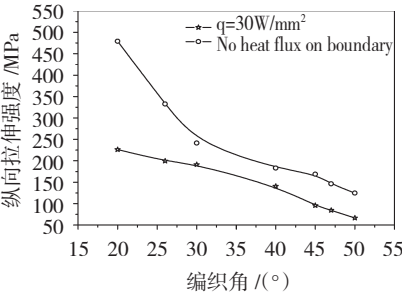


图 4 纵向拉伸强度随编织角的变化

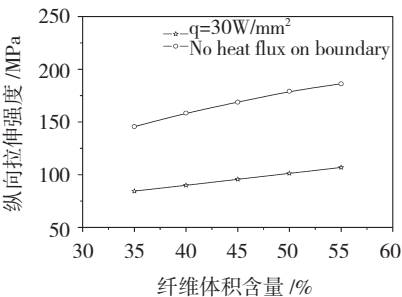


图 5 纵向拉伸强度随纤维体积分量的变化

4 结 论

本文基于螺旋型几何模型和多相有限元方法, 推导了三维四向编织复合材料的稳态热分析有限元方程, 建立了三维四向编织复合材料热力耦合行为分析力学模型, 通过对材料单胞施加纵向拉伸机械

载荷与热载荷,数值预报了三维四向编织复合材料的热力耦合强度。研究结果表明,边界热流对三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度有较大影响,且对小编织角复合材料影响较大;在热力耦合作用下,三维四向编织复合材料的纵向拉伸强度随编织角的增大而降低,随纤维体积分含量的增大而呈现线性增长的趋势。

参考文献:

- [1] MARCOS. GOMEZ. D, CHING. LLOYD. J, et al. Predicting the Thermal Conductivity of Composite Materials with Imperfect Interfaces [J]. Composites Engineering, 2010, 70(16): 2276 - 2283.
- [2] 程伟, 赵寿根, 刘振国, 等. 三维四向编织复合材料等效热特性数值分析和试验研究 [J]. 航空学报, 2002, 23(2): 102 - 105.
- [3] 夏彪, 卢子兴. 三维编织复合材料热物理性能的有限元分析 [J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1040 - 1049.
- [4] MOHAJERJASBI. S. Predictions for Coefficients of Thermal Expansion of Three-dimensional Braided Composites [J]. AIAA Journal, 1997, 35(1): 141 - 144.
- [5] LIU Z G, ZHANG H G, LU Z X, et al. Investigation on the Thermal Conductivity of 3-dimensional and 4 - directional Braided Composites [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(4): 327 - 331.
- [6] 李典森, 卢子兴, 刘振国, 等. 三维五向编织复合材料导热性能的有限元分析 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(8): 1455 - 1460.
- [7] AUBARD X, CLUZEL C, GUITARE L, et al. Modeling of the Mechanical Behaviour of 4D Carbon/carbon Composite Material [J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(5): 701 - 708.
- [8] GUO Y F, YANG J, HE Y, et al. Tensile and Bending Strengths of TR - 30s Carbon Fiber Three - dimensional Braided Composites at Different Temperature [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97(101): 1616 - 1619.
- [9] 李嘉禄, 贺桂芳, 陈光伟. 温度对三维五向编织/环氧树脂复合材料拉伸性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 58 - 63.
- [10] LI J L, HE G F, CHEN G W. Effects of the Temperature on bending Properties and Failure Mechanism of Three-dimensional Braided Composite [J]. Materials&Design, 2012, 41(10): 167 - 170.
- [11] ALZINA A, TOUSSAINT E, BEAKOU A. Multiscale Modeling of the Thermoelastic Behavior of Braided Fabric Composites for Cryogenic Structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(21): 6842 - 6859.
- [12] MEI H, CHENG L F, ZHANG L, et al. Effect of Fiber Architectures on Thermal Cycling Damage of C/SiC Composites in Oxidizing Atmosphere [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 460(15): 306 - 313.
- [13] LI Z M, YANG D Q. Thermal Postbuckling Analysis of 3D Braided Composite Cylindrical Shells [J]. Journal of Mechanics, 2010, 26(6): 113 - 122.
- [14] LI Z M. Thermal Postbuckling Behavior of 3D Braided Beams with Initial Geometric Imperfection under Different Type Temperature Distributions [J]. Composite Structures, 2014, 108: 924 - 936.
- [15] WANG H M, LIU C B. Analytical Solution of Two - dimensional Transient Heat Conduction in Fiber - reinforced Cylindrical Composites [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 69: 43 - 52.
- [16] ZENG T, WU L. Z, GUO L C. A Finite Element Model for Failure Analysis of 3D Braided Composites [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 366(1): 144 - 151.
- [17] 曾涛, 姜黎黎. 三维编织复合材料力学性能研究进展 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1): 34 - 41.
- [18] 姜黎黎, 曾涛, 严实. 三维四向编织复合材料的单胞应力场分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(2): 70 - 73.
- [19] 蔡永恩. 热弹性问题的有限元方法及程序设计 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1997: 70 - 84.
- [20] 郑锡涛. 三维编织复合材料细观结构与力学性能分析 [J]. 西安: 西北工业大学, 2003: 84 - 85.

(编辑: 关 毅)