

基于能量法的三维四向编织复合材料细观建模

巩龙东, 申秀丽

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于三维四向编织携纱器运动规律和内部纤维束受力分析, 提出一种基于能量法的细观建模方法, 将建模过程分解为纤维束打紧后控制点的调整、纤维束相互挤压缠绕空间位置的改变和应变能最小时纤维束轨迹的确定。通过单胞模型几何尺寸分析, 建立了单胞模型与编织参数之间的对应关系。该建模方法得到的纤维束模型互不干涉且紧密压实, 纤维束轨迹为空间曲线与其两条相切直线组成, 轨迹接近直线。通过实验对比, 纤维束轨迹、模型横截面图与电镜扫描得到的图像一致, 计算得到的编织结构尺寸与实验测得数据吻合。花节长度最大计算相对误差在5%左右, 特别是编织角在21°左右时, 计算相对误差在2%以下。

关键词: 三维四向编织复合材料; 细观建模方法; 最小应变能; 单胞模型; 能量法

中图分类号: V231.9; TB332

文献标志码: A

Mesoscopic modeling of three-dimensional four-directional braided composites using energy method

GONG Long-dong, SHEN Xiu-li

(School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the motion rules of three-dimensional four-directional braiding yarn carriers and the interior fiber bundle's force analysis, a mesoscopic modeling approach using energy method was established, which divided the modeling process as follows: adjusting the control point after jamming of fiber bundle, changing the position of fiber bundle due to extrusion and interwinding to each other and establishing the fiber bundle trajectory according to the minimum strain energy. By analyzing the geometric dimension of unit cell model, the relationship between unit cell model and braided parameters was provided. The fiber bundle model established by this approach was not interfered but compacted, and the fiber bundle trajectory, composed of a space curve and two tangent lines, was almost a straight line. Compared with the experiment result, the fiber bundle trajectory and cross section of model are consistent with the electron microscope scan images, and braided structure size calculated is in agreement with the measured data. The maximum relative calculation error of pitch length is about 5%, especially when braided angle is 21 degree or so, the relative calculation error is below 2%.

Key words: three-dimensional four-directional braided composites;
mesoscopic modeling approach; minimum strain energy;
unit cell model; energy method

航空发动机要达到推质比为 15~20, 50%~70% 要依靠新材料及相应结构^[1]. SiC_f/SiC 复合材料(CMC)不仅具有高强度、高温抗氧化性、密度低等优良性能,而且具有高温热稳定、热膨胀匹配等优点,被认为是 21 世纪高温部件最有希望的候选材料^[2]. SiC 纤维预制体从非连续结构、一维结构、二维结构发展到三维整体结构. 三维编织复合材料因其整体的纤维空间网格结构显著提高了强度和刚度,避免了传统层合复合材料中的分层,同时具有良好的力学性能和耐烧蚀性能,所以受到工程界的普遍关注,已成为航空航天领域的重要结构材料^[3-6]. 三维四向编织是最常见的编织形式,也是大多数研究者所关注的重点.

复合材料的宏观力学性能由其细观结构决定,宏观载荷响应由其细观响应积累产生,单纯从宏观响应分析复合材料构件难以满足航空发动机高安全性要求,特别是在涡轮热端部件高温、强氧化、复杂载荷情况下. 为了研究复合材料热端部件的强度和寿命,特别是确定复合材料细观应力-应变场,必须建立准确的细观模型,真实反映复合材料细观结构,为复合材料应用于航空发动机热端部件建立基础.

三维四向编织复合材料编织工艺烦琐,纤维束间相互挤压缠绕,细观结构复杂,建模方法尚无统一标准. 目前三维四向编织复合材料细观模型的建模方法大致分为两类^[7]:一类是纯粹几何描述建模方法,该方法一般是基于观察得到的纤维束轨迹人为假设;另一类是力学理论分析下的建模方法,该方法基于纤维束受力和运动平衡分析.

从纤维束轨迹的几何描述进行建模, Ma 等^[8]提出的“米”字型单胞模型将三维编织复合材料单胞简化为 3 根正交的纤维和 4 根对角纤维,这些纤维在中心点处相交. Yang 等^[9]在“米”字型单胞模型基础上,提出“纤维倾斜模型”,将复合材料单元简化为 4 个单向倾斜层板结构,层板间的相互交叉部分影响忽略不计. Kalidindi 等^[10]对“米”字型单胞模型进行了修正,提出了“螺旋纤维模型”,用曲线来模拟纱线的轨迹,避免了纱线在单胞中心的彼此交叉. 以上简化模型由于对纤维束轨迹的过于简化无法满足进行细观强度分析的需要.

为了得到更加精确的细观几何模型,国内外研究者从三维编织复合材料的编织工艺入手,对编织模式和编织原理进行了深入分析,在此基础上确定编织结构纤维束几何结构模型.

Chen 等^[11]在分析三维编织工艺的基础上结合实验观察指出:在预制体内部,单胞模型可以认为是由 3 种亚子胞(内胞、面胞和角胞)构成,纤维束在这些亚子胞中轨迹为直线;在表面处,单胞模型中纤维束轨迹是由螺旋线和直线两部分构成;在边角处,单胞模型中纤维束轨迹是螺旋线. 孙晓强等^[12]将三胞模型中面胞和角胞的纤维束轨迹用折线模拟,取正弦曲线模拟内胞纤维束轨迹. 冯伟等^[13]认为纤维束轴线是弯曲的,将相邻控制点间的中点用圆弧连接,相邻的两条曲线相切,保证了纤维束轴线的光滑转接.

上述建模方法从观察纤维束形状进行纤维束轨迹的几何描述,方法简单直观,发展和应用较为广泛,然而由于缺乏严谨的理论分析,无法形成统一的建模方法.

Lin 等^[14]根据三维编织复合材料纤维束内部受力模型,认为纤维束在编织预制体内的轨迹形状是由弯矩引起,推导得到纤维束轨迹近似为三次多项式,然后根据编织工艺流程,确定每一步纤维束控制点的坐标,利用三次 B 样条曲线拟合得到纤维束轨迹曲线. 王毅强等^[15]分析得到每根纤维束在各自区域内的控制点坐标,利用三次样条曲线模拟纤维束轨迹. 邵将等^[16-17]、周新贵等^[18]和徐翔星^[19]将得到的纤维束控制点利用贝塞尔曲线进行拟合,得到三维编织结构模型. 董纪伟^[20]认为内部单胞的纤维束轨迹为直线,将面胞和角胞的纤维束轨迹用贝塞尔曲线进行拟合.

弯矩分析确立的纤维束轨迹三次拟合方法提供了一种从力学分析到纤维束轨迹的理论分析方法,为建立统一的三维四向编织复合材料细观模型开辟了新的研究思路,纤维束轨迹描述也更加逼近真实结构. 然而,将编织工艺的打紧过程理解为建模当中的曲线光顺假设有一定的局限性,三次插值基函数的选择尚待统一,另外,所建立的模型纤维束间有时会发生干涉.

Jong 和 Postle^[21]基于能量法发展了一种细观纤维束建模方法,该方法将引起纤维束单元应变能的总和控制在最小时得到纤维束轨迹方程. Sinoimeri 等^[7]利用 Jong 和 Postle^[21]提出的能量法分析了单轴纤维的打紧变化. 基于能量法的研究思路,可以最终确立严谨、统一的三维四向编织复合材料细观建模方法.

本文基于现有的研究和编织过程中携纱器的运动规律^[22-24],在对纤维束力学分析和应变能分析的基础上,重点分析了编织复合材料内部区域

的空间构型,提出了一种细观建模方法.该方法利用纤维束打紧后的最小应变能理论同时保证纤维束之间互不干涉.得到的复合材料内部纤维束轨迹近似为直线,在纤维束局部区域有小弯曲变形.对比电镜扫描得到的内部纤维束轨迹和横截面图像表明,该方法建立的内部纤维束轨迹更接近于真实纤维束空间分布.进而给出了编织参数和细观模型参数之间的关系.本文提出的建模方法得到的花节长度和实验数据吻合,最大计算误差在5%左右,特别是当纤维编织角在 21° 左右时,计算误差在2%以下.该建模方法为进一步分析三维四向编织复合材料的细观强度和寿命奠定了基础.

1 基于能量法的纤维束轨迹分析

纤维束在打紧工艺后,由于纤维束内部存在沿纤维束轴向的张力作用,纤维束发生弹性变形.这里,纤维束轴向张力作用下的弹性应变能只考虑纤维束轴向产生的应变能.

单位体积应变能为

$$U_0 = \frac{1}{2} E \epsilon^2 \quad (1)$$

对于受轴向张力 T 作用的恒截面纤维束

$$\epsilon = \frac{T}{EA} \quad (2)$$

得到纤维束总的应变能

$$U = U_0 LA = \frac{T^2}{2EA} L \quad (3)$$

式中 E 为弹性模量, ϵ 为应变, L 为花节长度.

由于轴向张力 T 和纤维束横截面面积 A 都近似为常量,因此,当纤维束处在打紧状态时,其纤维束轴向长度最小即为最小应变能状态.由该结论易知,若纤维束之间不产生挤压,则纤维束轨迹即为直线.由实验数据和计算结果对比可以发现,本文能量法分析时忽略纤维束的扭转和弯曲应变能,对计算结果影响不大.

2 编织工艺和打紧后纤维束控制点的调整

2.1 编织工艺及纤维束走向描述

三维四向编织过程(如图1所示)如下:在第1步和第2步,所有的排和列沿正向交替移动一个位置;在第3步和第4步,所有排和列沿反向交替移动一个位置.经过4步后,携纱器恢复到初始位置,完成一个循环.每一步交替运动的同时,纤维束

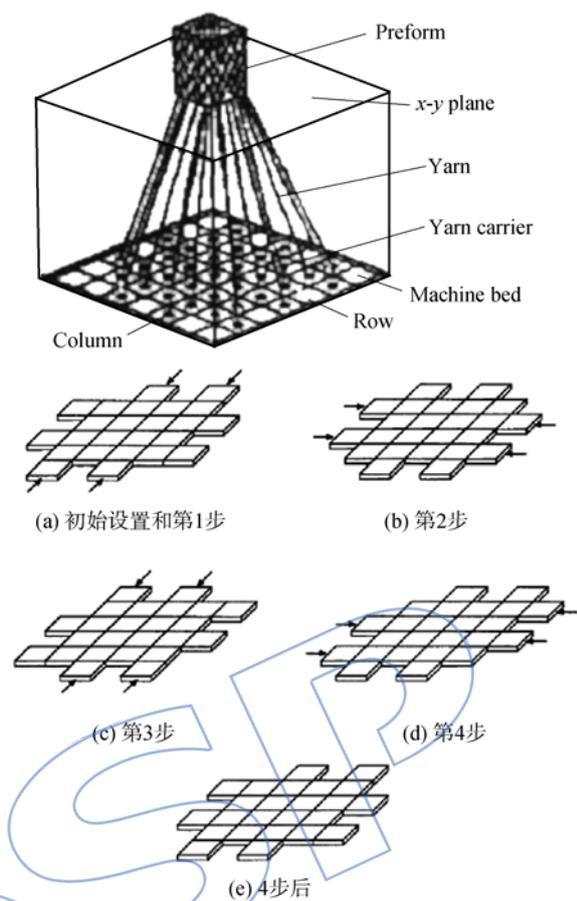


图1 三维四向编织过程

Fig. 1 Three-dimensional four-directional braided process

束沿轴线前进等长一段距离 h (花节长度 L 的 $1/4$), 一个循环编织后纤维束沿轴向移动一个花节长度.

如图2所示,纤维束在携纱器带动下做梯形步进运动,折点位置即为纤维束控制点位置. Chen等^[11]通过电镜扫描得到的内部纤维束轨迹近似为直线,目前大部分的文献将三维四向编织结构内部纤维束轨迹作为直线处理^[11,20,24-28].实际上,由于纤维束之间相互挤压和缠绕,纤维束轴线是弯曲的,孙晓强等^[12]和冯伟等^[13]考虑到纤维束轨迹弯曲,分别采用正弦曲线和圆弧线近似纤维束轨迹.然而,由于缺乏必要的力学分析,轨迹模拟的准确性有待进一步求证.本文根据纤维束打紧后的最小应变能理论,纤维束轨迹在不产生干涉的前提下轴向长度取最小,确立纤维束轨迹,进而得到三维四向编织复合材料单胞模型.

2.2 基本假设和纤维束打紧后控制点调整

本文根据现有的理论与实验研究,做出如下假设:①打紧工序稳定,编织结构均匀一致;②纤维束

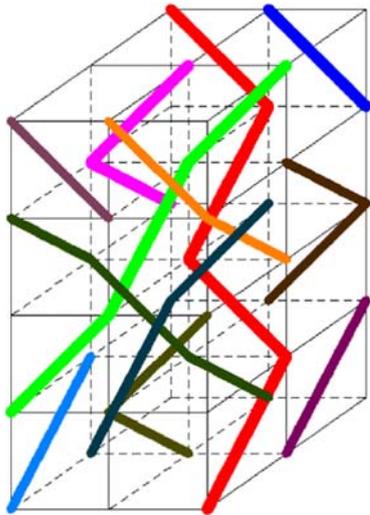


图 2 三维四向编织复合材料内部纤维束轨迹
Fig. 2 Fiber bundle trajectories of three-dimensional four-directional braided composites

纤维束为同一材料,且具有相同的刚度;③打紧前后纤维束由多段等截面圆柱构成,横截面形状不变。

取图 2 中对角线轨迹线进行力学分析,如图 3 所示。纤维束在每个控制点处于对角纤维束相互挤压产生一个反作用力,相邻控制点处的作用力方向相反。从整个纤维束来看,纤维束受到两侧相同的作用力,纤维束轨迹应沿相邻控制点的中点,调整后的纤维束轨迹如图 3 中虚线所示。由于内部纤维束的等效性,在复合材料内部,纤维束打紧后的控制点调整为原相邻控制点的中点。

2.3 内部编织角与编织角的关系

单胞几何结构如图 3 所示,内部编织角 γ 与

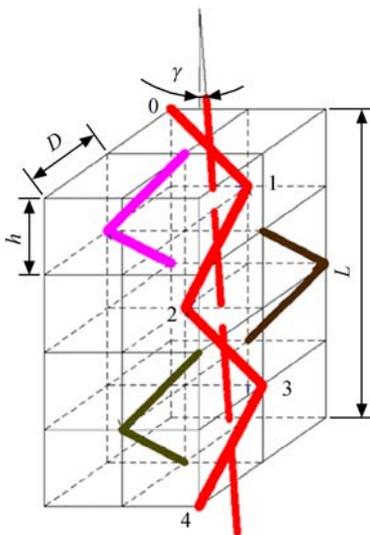


图 3 纤维束相互挤压受力
Fig. 3 Fiber bundle extrusion force to each other

花节长度 L 的关系如下:

$$\tan \gamma = \frac{2\sqrt{2}D}{L} \quad (4)$$

其中 D 为相邻携纱器中心点的距离。

对于三维四向编织复合材料,很难测得内部编织角 γ ,因此经常用编织角 α 表示,即预制体表面纹路线与编织轴线之间的夹角,如图 4 所示^[11],两者之间的关系为

$$\tan \gamma = \sqrt{2}\tan \alpha \quad (5)$$

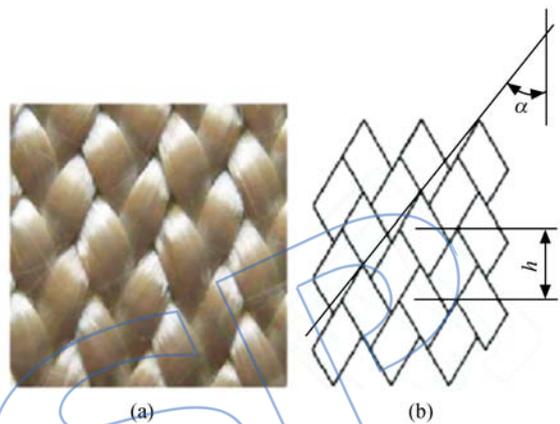


图 4 预制体表面与理想模型表面对比
Fig. 4 Comparison of preform surface and ideal model surface

3 纤维束相互挤压下的位置调整和单胞尺寸与编织参数的关系

纤维束相对位置如图 5 所示,纤维束 A 和纤维束 B 在控制点调整后的空间距离为 $\sqrt{2}D/2$ 。纤维束 B 和纤维束 C 在控制点调整后的空间距离为 $2hD/\sqrt{D^2+4h^2}$ 。纤维束直径大小一般接近相邻携纱器中心点距离 D ,由纤维束之间的空间距离可以得出,在纤维束沿控制点成直线时,纤维束之间会产生挤压移动。相邻挤压缠绕纤维束的相对位置如图 6 所示。

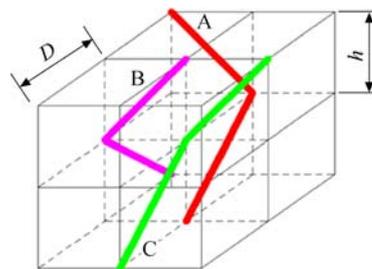


图 5 纤维束相对位置
Fig. 5 Relative position of fiber bundles

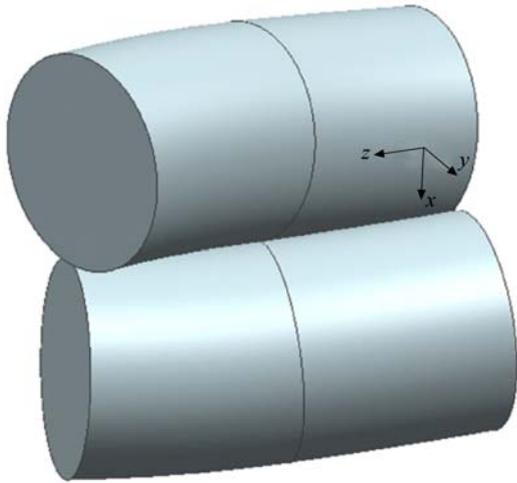


图6 挤压缠绕纤维束的相对位置
Fig. 6 Relative position of extrusion and intertwining fiber bundles

打紧后的预制体内的纤维束成压紧状态,纤维束直径用 d 表示,则

$$\frac{2hD}{\sqrt{D^2 + 4h^2}} - d = d - \frac{\sqrt{2}}{2}D \quad (6)$$

式(6)右边表示纤维束 A 和纤维束 B 恰好接触所需移动的距离,左边表示纤维束 B 和纤维束 C 所允许移动的距离. 挤压后的纤维束之间既要保证纤维束 A 和纤维束 B 不干涉,也要保证纤维束 B 和纤维束 C 不干涉. 得到纤维束直径

$$d = \frac{hD}{\sqrt{D^2 + 4h^2}} + \frac{\sqrt{2}D}{4} \quad (7)$$

结合式(4)和式(5),可以得到单胞模型参数与编织参数之间的关系

$$h = \frac{d}{\frac{\sqrt{2}}{2}\tan\alpha + \sin\alpha} \quad (8)$$

$$D = 2h\tan\alpha \quad (9)$$

本文根据最小应变能理论,即使得纤维束轴向长度取最小,将纤维束轨迹点进行离散,当纤维束轨迹点与相互作用点之间距离小于纤维束直径时,该轨迹点与其相互作用点沿连线方向等距离移动,直至两个点之间的距离等于纤维束直径. 挤压变形后的纤维束轨迹如图7中 a 轨迹线所示,打紧后的纤维束轨迹如图7中 b 轨迹线所示. 打紧后,纤维束轨迹是由中部的螺旋曲线和与其相切的直线组成.

本文利用 VC++6.0,在最小应变能理论基础上,开发了三维四向编织复合材料纤维束轨迹自动生成软件. 实现了三维四向编织复合材料细观建模的自动化. 根据文献[11]提供的编织参数

(纤维束直径为 0.757,编织角为 19°)建立的挤压变形和打紧后的纤维束轨迹如图8所示. 纤维束轨迹接近直线,只在纤维束挤压处产生局部弯曲.



图7 纤维束轨迹挤压变形和打紧示意图
Fig. 7 Sketch of extrusion deformation and jamming of fiber bundle trajectory



图8 计算的挤压变形和纤维束打紧后的轨迹
Fig. 8 Calculated fiber bundle trajectory after extrusion deformation and jamming

4 结果与分析

单根纤维束电镜扫描实物^[11]与本文所提供的建模方法得到的纤维束模型如图9所示. 本文建模方法建立的单根纤维束模型更加真实地反映了三维四向编织复合材料内部纤维束的局部波动.

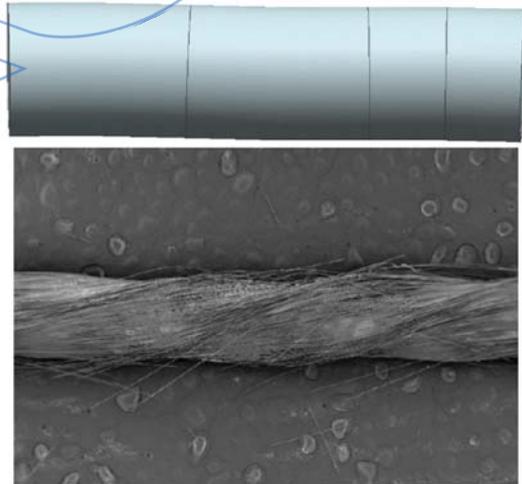


图9 单根纤维束电镜扫描实物与模型对比
Fig. 9 Comparison of electron microscope scan object and model of single fiber bundle

对比文献[19]提供的实物照片,采用本文提供的建模方法得到的三维四向编织复合材料模型内部不同位置的纤维束横截面如图10所示. 纤维束之间没有出现干涉,并且模型不同位置纤维束横截面与实物分布一致.

采用文献[11]提供的三维四向编织复合材料编织参数(如表1所示),利用本文的建模方法得

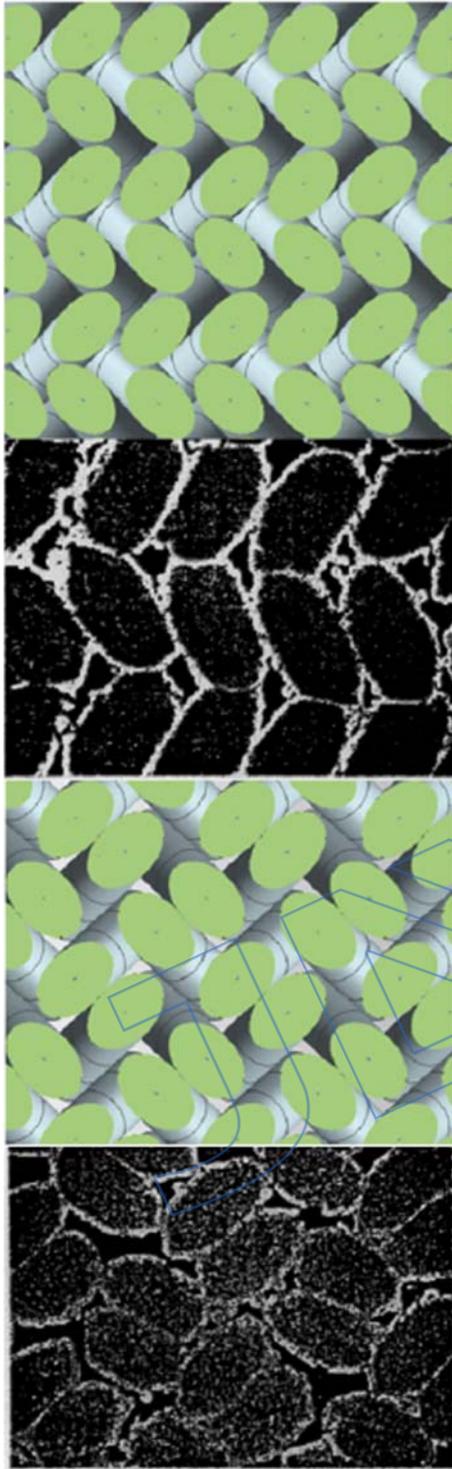


图 10 模型内部纤维束横截面与实物对比

Fig. 10 Comparison of internal cross-section of fiber bundles of model and object

到的三维四向编织复合材料花节长度模型计算与实验测量对比如表 2 所示. 花节长度的计算与实验测量对比最大相对误差在 5% 左右, 当编织角为 21° 左右时, 相对误差在 2% 以下. 从计算结果可以看出: 弯矩和扭矩产生的应变能在纤维束建模分析中可以忽略; 本建模方法适用的编织参数

范围较广.

表 1 三维四向编织复合材料编织参数^[11]Table 1 Braided parameters of three-dimensional four-directional braided composite^[11]

序号	纤维束直径/mm	编织角/ $^\circ$
1	0.757	19.0
2	0.757	21.0
3	0.757	21.5
4	0.757	40.0

表 2 花节长度模型计算与实验测量对比

Table 2 Pitch length comparison of modeling calculation and test measurement

序号	计算长度/mm	测量长度/mm	相对误差/%
1	5.32	5.22	+1.92
2	4.81	4.73	+1.69
3	4.69	4.60	+1.96
4	2.45	2.59	-5.40

以上分析可以发现, 本文所提供的三维四向编织复合材料细观建模方法准确, 模型与真实情况吻合, 并且得到的单胞模型内部纤维束不会出现干涉; 对比实验数据, 编织角为 21° 左右时, 模型非常接近真实结构.

5 结 论

本文提供了一种三维四向编织复合材料细观建模方法, 重点分析了三维四向编织复合材料内部纤维束的相互作用, 在纤维束满足最小应变能和受力平衡前提下, 纤维束之间互不干涉. 模型计算和实验测量结果较为吻合, 表明该建模方法的有效性. 结论如下:

1) 材料内部纤维束轴线空间走向近似为直线, 在局部缠绕处纤维束轴线发生弯曲, 该现象与电镜扫描得到的纤维束轨迹一致, 另外, 纤维束横截面与真实截面形状一致, 反映了本文提供的建模方法有效、准确. 为进一步分析应用于航空发动机热端部件的三维四向编织复合材料的细观强度和寿命奠定了基础.

2) 模型给出了编织参数和模型细观参数之间的对应关系, 可为细观结构的参数化建模提供基础.

3) 三维四向编织复合材料纤维束在打紧工

艺下产生挤压变形,横截面尺寸随纤维束轨迹会产生波动,不同材料纤维束的横截面尺寸变化也不尽相同,还需要进一步的深入分析.能量法所提供的建模方法,可以进一步考虑扭转等产生的应变能,更加真实地还原细观纤维束结构形状.

参考文献:

- [1] 刘大响.高性能航空发动机的发展对材料技术的要求[J].燃气涡轮试验与研究,1998,11(3):1-5.
LIU Daxiang. The requirements for materials technology as the development of high performance aero engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1998, 11(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] 刘伟峰. SiC_f/SiC 复合材料的制备及导热性能研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
LIU Weifeng. Study on the manufacturing process and thermal conductivity properties of the SiC_f/SiC-CMCs [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [3] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials; Part I fabric structure and fibre volume fraction[J]. Composite Structures, 2000, 49(4): 451-459.
- [4] Long A C. Design and manufacture of textile composites [M]. Cambridge: Wood Head Publishing Limited, 2005.
- [5] Crookston J J, Long A C, Jones I A. A summary review of mechanical properties prediction methods for textile reinforced polymer composites[J]. Journal of Materials Design and Applications, 2005, 219(2): 91-109.
- [6] Mouritz A P, Bannister M K, Falzon P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(12): 1445-1461.
- [7] Sinoimeri A, Drean J Y. Mechanical behavior of the plain weave structure using energy methods; fabric uniaxial extension[J]. Textile Research Journal, 1997, 67(5): 370-378.
- [8] Ma C L, Yang J M, Chou T W. Elastic stiffness of three-dimensional braided textile structural composites[J]. Composite Materials; Testing and Design, 1986, 893: 404-421.
- [9] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composites[J]. Journal of Composite Materials, 1986, 20(5): 472-484.
- [10] Kalidindi S R, Franco E. Numerical evaluation of isostrain and weighted-average models for elastic moduli of three-dimensional composites[J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(3): 293-305.
- [11] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided preforms [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(3): 391-404.
- [12] 孙晓强,魏高峰,刘国永.三维编织复合材料几何建模及弹性常数预测[J].山东轻工业学院学报,2011,25(1):41-44.
SUN Xiaoqiang, WEI Gaofeng, LIU Guoyong. Geometric model for three-dimensional braided composites and its elastic constant forecast[J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry, 2011, 25(1): 41-44. (in Chinese)
- [13] 冯伟,王延荣,魏大盛.三维四向编织复合材料细观建模[J].航空动力学报,2013,28(6):1243-1249.
FEND Wei, WANG Yanrong, WEI Dasheng. Meso-scale modeling of 3-D four-directional braided composites [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1243-1249. (in Chinese)
- [14] Lin H Y, Newton A. Computer representation of woven fabric by using B-splines[J]. Journal of the Textile Institute, 1999, 90(1): 59-72.
- [15] 王毅强,张立同,成来飞.三维编织体复合材料空间几何结构的计算机模拟[J].航空材料学报,2008,28(2):95-98.
WANG Yiqiang, ZHANG Litong, CHENG Laifei. Computer geometry simulation of spatial structure three-dimensional braided composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(2): 95-98. (in Chinese)
- [16] 邵将,温卫东,崔海涛.三维纵横步编织预成型件的计算机仿真[J].纺织学报,2008,29(9):129-136.
SHAO Jiang, WEN Weidong, CUI Haitao. Computer simulation of three-dimensional preforms using track and column braiding [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(9): 129-136. (in Chinese)
- [17] 邵将,温卫东,崔海涛.三维四步法编织复合材料结构的计算机仿真[J].南京航空航天大学学报,2009,41(1):36-41.
SHAO Jiang, WEN Weidong, CUI Haitao. Computer simulation of four step three dimensional braided composite structure [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(1): 36-41. (in Chinese)
- [18] 周新贵,游宇,张长瑞,等.编织结构三维仿真及其对 C/SiC 复合材料性能的影响[J].中南大学学报:自然科学版,2007,38(2):200-205.
ZHOU Xingui, YOU Yu, ZHANG Changrui, et al. Fiber fabric 3D simulation and influence on properties of C/SiC composites [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(2): 200-205. (in Chinese)
- [19] 徐翔星. C/SiC 陶瓷基复合材料的 X 射线无损检测研究 [D]. 西安:西北工业大学,2003.
XU Xiangxing. C/SiC composites X-ray non destructive testing [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [20] 董纪伟.基于均匀化理论的三维编织复合材料宏观力学性能的数值模拟[D].南京:南京航空航天大学,2007.
DONG Jiwei. Homogenization-based method for simulating macro and micro mechanical properties of 3D braided composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [21] Jong S, Postle R. A general energy analysis of fabric mechanics using optimal control theory [J]. Textile Research Journal, 1978, 48(3): 127-135.
- [22] 李嘉禄,刘谦.三维编织复合材料中纤维束走向的研究

- [J]. 纺织学报, 1999, 20(4): 7-10.
- LI Jialu, LIU Qian. Research on the fiber bundle trend of 3-D braided composites[J]. Journal of Textile Research, 1999, 20(4): 7-10. (in Chinese)
- [23] 陈利, 李嘉禄, 李学明. 三维编织中纱线的运动规律分析[J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 71-74.
- CHEN Li, LI Jialu, LI Xueming. Analysis of the yarn movement in 3D braids[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(2): 71-74. (in Chinese)
- [24] Byun J H, Chou T W. Process-microstructure relationships of 2-step and 4-step braided composites[J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(3): 235-251.
- [25] Cox B N, Flanagan G. Handbook of analytical methods for textile composites[M]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1997.
- [26] Chen D, Chen L, Sun Y. Performance analysis on equivalent elasticity of 3D 4-directional braided composites[J]. Modern Applied Science, 2007, 1(4): 43-49.
- [27] ZHENG Xitao, YE Tianqi. Microstructure analysis of 4-step three-dimensional braided composite [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(3): 142-150.
- [28] 修英姝, 陈利, 李嘉禄. 三维编织复合材料制件的细观单元分析[J]. 复合材料学报, 2003, 20(4): 63-66.
- XIU Yingshu, CHEN Li, LI Jialu. Analyzing the mechanical properties of 3D braided composite structures by cell element[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(4): 63-66. (in Chinese)

JALSP