

文章编号:1000-8055(2013)06-1243-07

三维四向编织复合材料细观建模

冯 伟, 王延荣, 魏大盛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于编织过程中携纱器的运动规律, 重点分析了编织复合材料内部区域的空间构型, 提出了一种改进的细观单胞模型。该模型能够考虑因打紧工艺造成的纤维束轴线弯曲构型以及截面变形, 并可以给出编织参数和模型宏观参数之间的关系。结果表明: 该模型比较接近实际结构, 材料内部纤维束轴线空间走向为曲线, 控制点处纤维束截面为椭圆形假设已接近其真实的截面形状, 并且由该模型得出的胞元几何特征数据与试件实测数据较为吻合, 对花节长度的预测值最大误差保持在 3% 左右。在编织角分别为 19° , 21° 和 21.5° 时, 本模型的预测结果更接近实测结果, 适用于三维编织复合材料尤其是小编织角结构的建模, 可为后续力学性能的分析提供基础。

关 键 词: 三维编织复合材料; 建模; 细观结构; 胞元; 几何模型

中图分类号: V231.9; TB332

文献标志码: A

Meso-scale modeling of 3-D four-directional braided composites

FENG Wei, WANG Yan-rong, WEI Da-sheng

(School of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Based on the motion of yarn carriers on the braiding machine bed, the spatial configuration of interior yarns was analyzed in detail, and a meso-scale model of 4-step three-dimensional (3-D) braided composites was established. In this model, the cross-section deformation, the contact of fiber bundle and the bended centerline due to the mutual squeezing in the braiding process were taken into account. In addition, the structural geometry of the composites was analyzed and the mathematical relationship between the braided parameters and the structure of the unit cell was obtained. The results show that the hypotheses that axis of fiber bundle is curve inside the composites and the section of fiber bundle is oval at control points are close to the real structure and good agreement can be obtained between the calculated and measured values of the geometric characteristics of braided composite samples. The predicted value of unit cell height show that the maximum error remained at about 3%, in addition, when the braided angle is 19° , 21° and 21.5° , the prediction results are more close to the measured results. It is suitable for modeling of 3-D braided composites, especially the structure of small braided angle. Therefore, the model presents a foundation for the mechanical properties prediction of the composites.

Key words: three-dimensional (3-D) braided composites; modeling; meso-structure; unit cell; geometrical model

收稿日期: 2012-06-11

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1243_004.html

作者简介: 冯伟(1988—), 男, 山东德州人, 硕士生, 主要从事复合材料力学性能预测方法研究。

航空发动机推质比的提高对材料性能的要求越来越高,三维编织复合材料以其整体的三维空间结构避免了传统层合复合材料的分层,提高了材料的刚度和强度,同时具有优良的抗冲击性能,已成为航空航天领域的重要结构材料。

鉴于三维编织复合材料的优良性能,国内外许多学者致力于其力学性能方面的研究,侧重点常在于描述编织工艺参数、结构参数和力学性能之间的关系,并建立不同的单胞模型来反映细观结构及力学性能。Ma 等^[1]以四步法编织复合材料为对象,提出了“米”字型单胞模型,纱线在浸胶固化后视为均匀线弹性的复合材料杆,复合材料的强度和刚度主要来自 4 根对角纱线;Yang 等^[2]以经典的层板理论为基础,提出了纤维倾斜模型,四向编织复合材料单胞可看作由 4 个单向斜板组成;吴德隆等^[3]以四步法编织五向复合材料为对象,将复合材料看作由位于结构内部的基元、结构边界表面的面元和结构角点上的角元组成;Tang 等^[4-6]从三维编织复合材料的细观结构入手,建立了纤维体积分量模型,模拟了三维编织结构;徐焜等^[7]建立的模型考虑了内部和表面区域纱线因挤紧状态不同所造成的纱线填充因子变化;LI 等^[8]建立了三维四向单胞模型,假设内胞纤维束为空间直线,给出了编织参数和模型宏观观参数之间的关系;李典森等^[9]根据三维五向编织复合材料的细观结构模型分别假设编织纱线和轴纱具有六边形和正方形横截面,建立了计算三维五向编织复合材料导热性能的有限元模型;温卫东等^[10]提出了改进的三细胞模型,该模型包含内部单胞、两种表面单胞以及棱角单胞四类结构,考虑了各类单胞中纤维束的空间结构,并引入平均纤维束填充因子来描述各类单胞中纤维束的不同截面形状对材料弹性常数的影响。

本文基于现有的研究和编织过程中携纱器的运动规律^[11-13],重点分析了编织复合材料内部区域的空间构型,提出了一种改进的细观单胞模型,该模型可以考虑纱线之间因打紧造成的纤维束截面变形,认为纤维束轴线是弯曲的,进而可以给出编织参数和模型宏观观参数之间的关系。

1 四步法编织工艺和纤维束空间构型

三维四向编织预成型技术是采用四步编织方法来实现的,编织纱束由锭子携带,按照预成型件的截面形态排列,锭子的运动分为 4 步:

- 1) 不同行的携纱器相互交替地运动一个位置。
- 2) 不同列的携纱器相互交替地运动一个位置。
- 3) 运动方向与 1) 相反。
- 4) 运动方向与 2) 相反。

以上 4 步构成了一个机器循环,然后沿纵向打紧,使纱线之间彼此接触并保持稳定,此时经过一个循环后所形成的预成型体的长度为一个编织花节长度 h 。重复上述运动,在编织机机床上形成具有某种截面的三维编织预制件,图 1 展示了三维四向矩形预制件的编织过程^[8]。

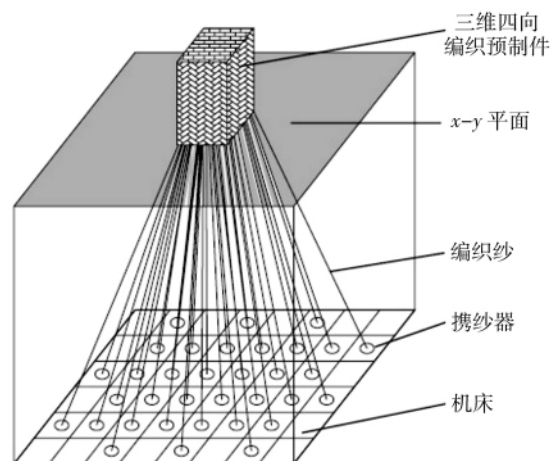


图 1 三维四向矩形预制件编织方案

Fig. 1 Scheme of 3-D four-directional square preform braided process

在编织过程中,携纱器在编织机机床内成阶梯状运动,总体上与机床边缘成 45° 夹角。图 2(a)描绘了携纱器在一个周期内的运动轨迹,但是由于打紧工序,内部纱线在张力的作用下会相互挤压、缠绕,所以纤维束的实际位置会偏离在携纱器牵引下的运动轨迹。丁丹桦采用图像分析技术发现,内部纤维束走向比较平直,整体上可以看作直线^[14],大多数文献中也把内部纤维束轴线简化为直线,而实际上,由于纤维束之间相互挤压、缠绕,纤维束轴线是弯曲的,当在单胞尺度上进行分析时,纤维束的空间构型在一定程度上影响着材料的力学性能。

本文提出的改进模型认为纤维束轴线是弯曲的。图 2(b)描述了纤维束在一个周期内的运动规律,由序列号 0~4 连接的线段表示纤维束在携纱器牵引下的运动轨迹, M, N, O, P 为控制点,即每

个线段的中点,由 MN, NO, OP 连接的圆弧表示经过打紧后纤维束轴线的位置,为一条由控制点连接的曲线,且相邻的两条曲线相切,保证了纤维束轴线的光滑转接。

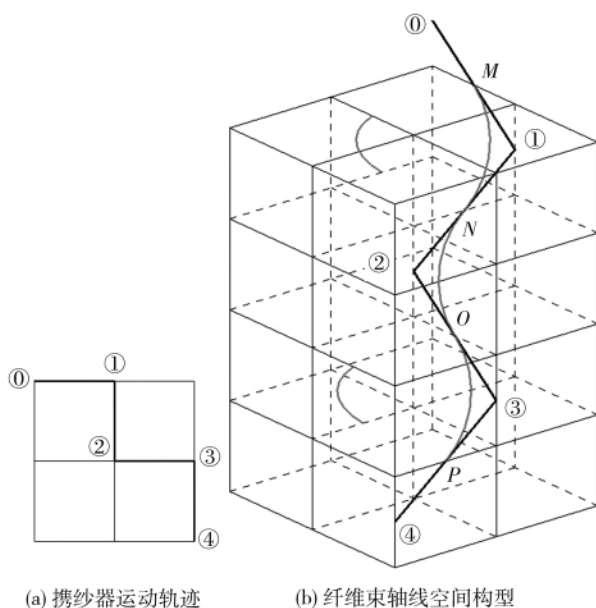


图2 纤维束在携纱器牵引下的空间构型

Fig. 2 Spatial position of fiber bundle with the carriers

2 基本假设与细观模型

实际上,在三维编织过程中打紧工序使纤维束产生了轴线的弯曲和截面的变化。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纤维束为同一材料,且具有相同的刚度;③打紧前纤维束由多段等截面圆柱构成,打紧后纤维束轴线变弯,其空间位置如图2(b)所示,相应的纤维束被压扁,由于挤压后纤维束截面变形较为复杂,假设纤维束横截面的形状由控制点处的截面形状确定,且控制点处的横截面为椭圆,其长轴为 a ,短轴为 b ,如图3所示。

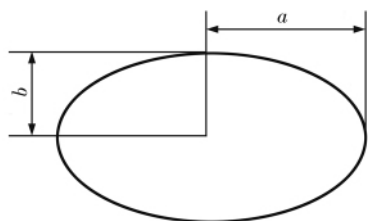


图3 控制点处纤维束横截面形状

Fig. 3 Fiber bundle cross-section on control points

三维编织结构是纱线沿不同方向分布的空间网状结构,在纤维长度方向上,由于不同的控制点处纤维束的接触状态不尽相同,所以纤维束的横截面形状也有所不同。在实际打紧后纤维束之间由于相互挤压会保持面接触状态,并且打紧程度的不同纤维束轴线的弯曲程度和纤维束间的挤压状态也会不同。本文考虑在编织过程中进行轻微打紧后纤维束轴线略弯,并且为了便于建模采用相邻控制点处的椭圆截面之间为端点接触假设。基于以上假设和纱线的空间结构可以确定纤维束的几何参数为

$$2a = d_1 \quad (1)$$

$$d_1 = W_i/2 \quad (2)$$

$$2b = d_2 \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{W_i h}{2\sqrt{4W_i^2 + h^2}} \quad (4)$$

其中 W_i 为胞元的宽度; d_1, d_2 分别为相邻两纤维束沿长度方向在不同位置处轴线的最短距离。

图4给出了控制点处椭圆截面间的两种位置关系。

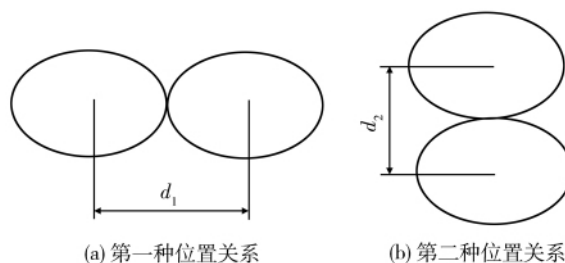


图4 控制点处纤维束截面之间位置关系示意图

Fig. 4 Relative position between cross section of fiber bundles

图5(a)为打紧前纤维束空间构型,由于没有打紧,纤维束截面没有挤压变形,从图上可以看出相邻的纤维束c和纤维束d之间并没有接触。图5(b)为打紧后的纤维束空间构型,由于打紧工序,纤维束由于挤压产生轴线弯曲和截面变形。在建模时,为了保证相邻纤维束之间相互连接,而又不产生重合,基于控制点处椭圆截面的假设,可以确定纤维束c和纤维束d的位置关系,其中,椭圆1和椭圆3的相对位置为图4所示的接触方式的一种。对于纤维束c,可由控制点所对应的椭圆1和椭圆2进行等面积扫掠,扫掠后纤维束的截面为从椭圆1向椭圆2逐渐过渡的不规则形状,这样既体现了由打紧造成的纤维束截面变形又保证了相邻纤维束之间的接触。

胞元的几何结构如图6所示,可以得到内胞编织角的计算公式为

$$\tan \gamma = \frac{\sqrt{2}W_i}{h} \quad (5)$$

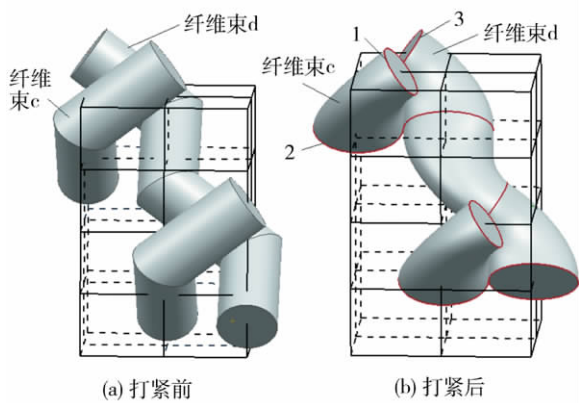


图5 纤维束空间构型

Fig. 5 Spatial configuration of fiber bundle

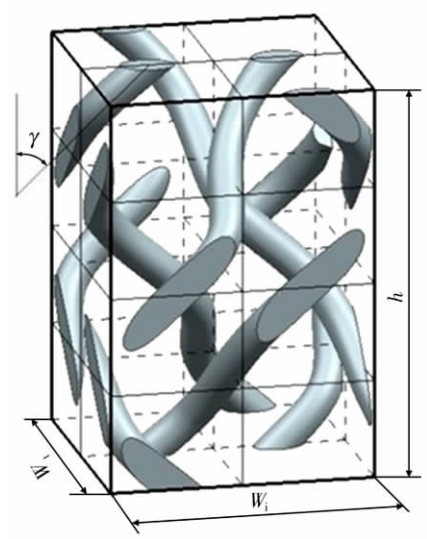


图6 胞元几何结构示意图

Fig. 6 Geometrical structure of unit cell

对于三维编织复合材料,很难测得内胞编织角 γ ,所以经常用编织角 α 表示,即预制件表面纹

路线与编织轴线之间的夹角,如图7所示^[8],两者之间的关系为

$$\sqrt{2}\tan \alpha = \tan \gamma \quad (6)$$

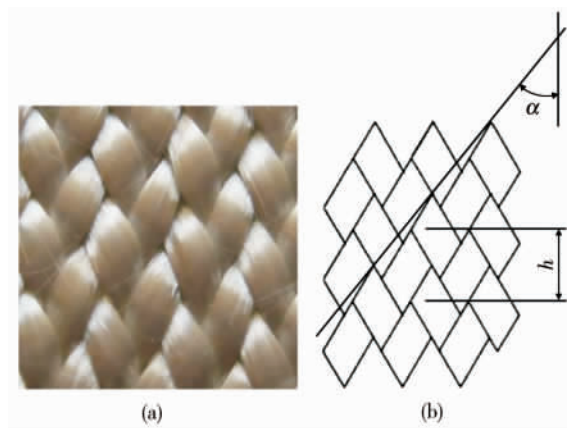


图7 三维四向预制件表面和理想模型表面图对比

Fig. 7 Comparison between preform surface and ideal surface of 3-D four-directional preform

3 胞元几何参数的确定

根据改进的三维四向复合材料胞元模型,可以建立编织参数和材料宏观细观参数之间的关系,即给定复合材料的体积分数和编织角,可以确定胞元的宽度和花节长度,进而预测复合材料的几何尺寸.

纱线的填充因子,即纤维在纤维束内的体积分^[15],可以定义为

$$\xi = \frac{\pi D_y^2}{4\Omega} = \frac{D_y^2}{4ab} \quad (7)$$

其中 $D_y = \sqrt{4\lambda/\pi\rho}$ 为纤维束的等效直径, λ 为纱线的线密度, ρ 为纤维的密度, Ω 为纤维束横截的面积.

纤维在内胞的体积分

$$\varphi_t = \frac{l\pi ab\xi}{W_i^3} \tan \alpha \quad (8)$$

其中

$$l = \frac{W_i \sqrt{2(2\tan^2 \alpha + 1)(4\tan^2 \alpha + 1)}}{\tan^2 \alpha} \cdot \left(\pi - 2\arcsin \frac{\sqrt{2\tan^2 \alpha + 1}}{\sqrt{4\tan^2 \alpha + 1}} \right)$$

为胞元内纤维束轴线的长度.

综合以上公式可得

$$W_i = (D_y K / 2) \sqrt{\pi / \varphi_t} \quad (9)$$

$$h = (D_y K / 2 \tan \alpha) \sqrt{\pi / \varphi_t} \quad (10)$$

其中

$$K = \sqrt{\frac{\sqrt{2(2\tan^2\alpha + 1)(4\tan^2\alpha + 1)}}{\tan\alpha}} \left(\pi - 2\arcsin \frac{\sqrt{2\tan^2\alpha + 1}}{\sqrt{4\tan^2\alpha + 1}} \right)$$

需要说明的是,三维四向编织复合材料由内胞、面胞和角胞构成,纤维束在各自胞元内的体积分数也各不相同。但是,由于内胞是构成复合材料的主要部分,当它在复合材料中所占的比例较大时可将 φ_i 作为复合材料的体积分数。

4 结果与分析

图8给出了在某一编织参数下预制件的胞元实体模型,对沿纤维束轴线方向上的控制点所对应横截面的一组椭圆进行等面积扫略,这样既考虑了纤维束沿轴线方向的截面变化,也保证了纤维束之间相互接触,图9为带基体的胞元模型,通

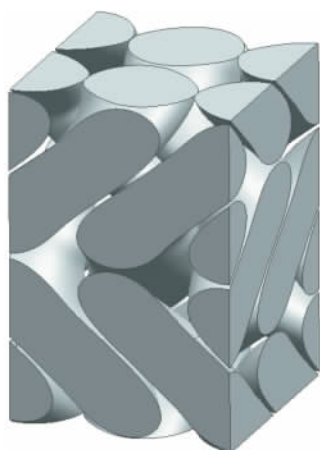


图8 预制件胞元三维实体模型

Fig. 8 Unit cell geometrical model of preform

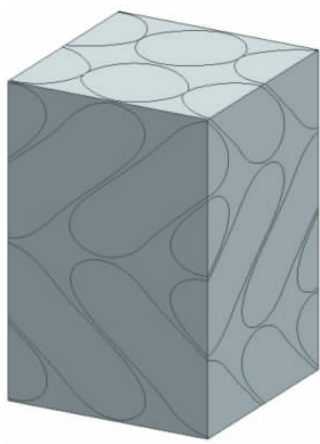
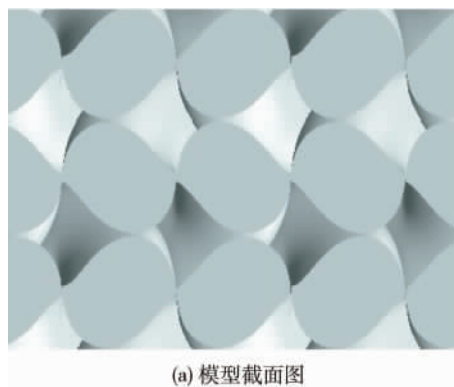


图9 复合材料胞元三维实体模型

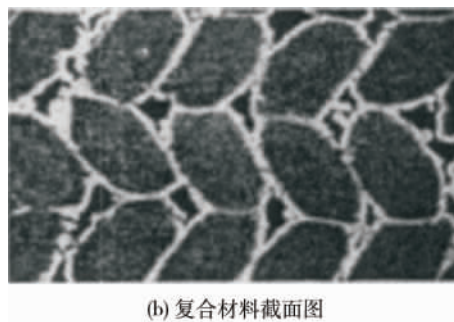
Fig. 9 Unit cell geometrical model of composite

过矩形块与纤维束进行求差,获得基体模型,确保了基体能够充满于纤维束之间的缝隙。

为了证明所建立模型的正确性,提取三维实体模型的截面(图10(a)),并与实际复合材料相对应位置处的截面^[16](图10(b))进行比较,发现模型能够较好地反映复合材料内部纤维束的相互位置和方向。



(a) 模型截面图



(b) 复合材料截面图

图10 模型截面与复合材料截面图对比

Fig. 10 Cross-section comparison between the model and composite

对于四步法 $M \times N$ 编织预制件,即 M 和 N 分别为位于编织机床上的携纱器的行数和列数,当 M 和 N 较大时面胞和角胞对复合材料尺寸的影响较小,本文暂不考虑,根据公式(9)可以得出三维编织复合材料的宽度、厚度

$$W_x = \frac{N}{2} W_i \quad (11)$$

$$W_y = \frac{M}{2} W_i \quad (12)$$

图11为胞元宽度 W_i 随体积分数和编织角的变化规律。从图上可以看出胞元的宽度 W_i 随着编织角的增加而增加,当编织角较大时,变化率也逐

渐变变大;对于给定的编织角,当纤维体积分数增大时,胞元的宽度 W_i 逐渐减小.从式(11)、式(12)可知,对于三维编织复合材料的变化规律和胞元的变化规律一致,并且随着携纱器行数和列数的增加而增加.

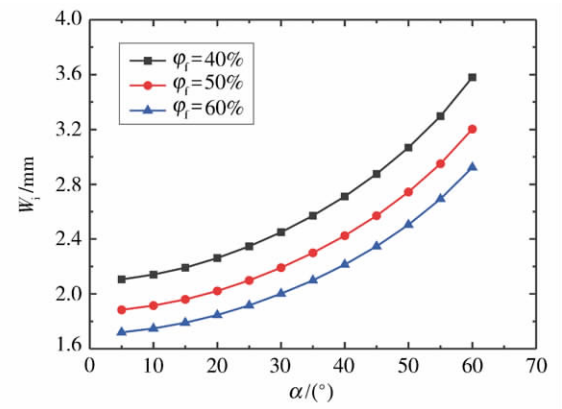


图 11 胞元宽度和编织角之间的关系

Fig. 11 Relationship between unit cell width and braiding angle

图 12 为花节长度 h 随体积分数和编织角的变化规律.可以看出在体积分数一定时,花节长度 h 随编织角的增加而减少,当编织角较小时,花节

长度的变化率较大,当编织角较小时,花节长度变化率较小,且近似收敛;纤维体积分数对花节长度的影响较小,当编织角一定时,花节长度随体积分数的增加而减小.

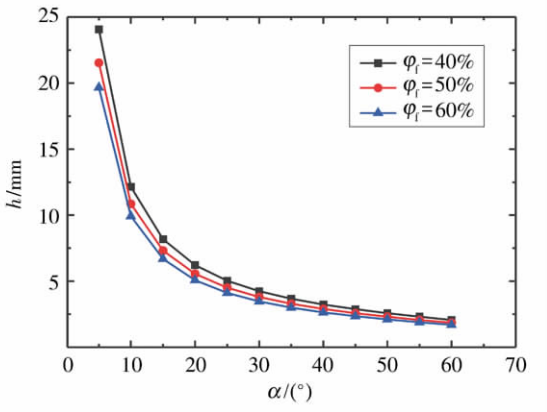


图 12 花节长度和编织角之间的关系

Fig. 12 Relationship between unit cell length and braiding angle

为进一步验证单胞模型的正确性,根据文献[15]所提供的三维四步编织复合材料试验件参数和实测数据(见表 1),运用本文模型计算了试件相应的宏观结构参数,表 2 中对比了计算结果、

表 1 试件工艺参数^[15]

Table 1 Process parameters of the specimen

参数	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
D_y/mm	0.757	0.757	0.757	0.757	0.757	0.757	0.757	0.757
$M \times N$	6×22	6×22	6×22	6×22	5×19	5×19	5×19	5×19
$\alpha/(\text{^\circ})$	19.0	21.0	21.0	21.5	40.0	40.0	40.0	39.0
W_x/mm	20.35	20.35	20.35	20.35	20.35	20.35	20.35	20.35
W_y/mm	6.00	6.00	6.00	6.00	6.16	6.16	6.16	6.16

表 2 复合材料结构参数的预测值和测数据

Table 2 Seructural data of composites from modeling prediction and measure

	$Q_f/\text{‰}^{[15]}$	h/mm					W_i/mm	W_x/mm	误差/ ‰
		测量值 ^[15]	预测值 ^[8]	误差/ ‰	本文	误差/ ‰			
No. 1	65.42	5.22	5.082	-2.64	5.150	-1.34	1.772	19.495	-4.20
No. 2	68.70	4.70	4.499	-4.28	4.570	-2.77	1.753	19.288	-5.22
No. 3	68.33	4.73	4.512	-4.61	4.583	-3.11	1.758	19.340	-4.96
No. 4	69.07	4.60	4.386	-4.65	4.458	-3.09	1.755	19.305	-5.14
No. 5	61.09	2.57	2.549	-0.82	2.641	2.76	2.214	21.037	3.38
No. 6	60.35	2.59	2.565	-0.97	2.657	2.59	2.228	21.165	4.00
No. 7	59.97	2.60	2.573	-1.04	2.665	2.50	2.235	21.232	4.33
No. 8	61.18	2.64	2.613	-1.02	2.704	2.42	2.188	20.790	2.16

实测数据以及文献模型预测值^[8],并且给出了预测值相对于测量值的误差.从表2中可以看出,本文所建立模型的预测值与文献^[15]模型的预测值及实测结果相比都较为吻合.由于本文考虑了纤维束轴线弯曲,预测结果相对于文献模型的预测结果稍大,并且在编织角较小时本文模型的预测结果更接近于实测结果,表明本文模型可适用于三维编织复合材料尤其是小编织角结构的建模,可为后续的力学性能分析提供基础.

5 结 论

本文建立了一种改进的细观单胞模型,重点分析了编织复合材料内部区域的空间构型,模型数值预测结果和实测结果较为吻合,表明该模型的有效性.结论如下:

- 1) 材料内部纤维束轴线空间走向为曲线,控制点处纤维束截面为椭圆形假设已接近其真实的截面形状,反应了纤维束因挤压形成的相互交织关系.
- 2) 模型给出了编织参数和模型宏细观参数之间的关系,可为细观结构的建立提供基础.
- 3) 模型中单胞的取向与材料横截面边界的方向一致,有利于建立材料的力学模型.

参考文献:

- [1] Ma C L, Yang J M, Chou T W. Elastic stiffness of three-dimensional braided textile structural composites [C] // Whitney J M. Composites Materials: Testing and Designing (seventh Conference). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1986: 404-421.
- [2] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composite [J]. Journal of Composite Materials, 1986, 20(5): 472-484.
- [3] 吴德隆, 郝照平. 五向编织结构复合材料的分析模型 [J]. 宇航学报, 1993, 14(3): 69-74.
WU Delong, HAO Zhaoping. Analysis model of five-directional braided composites [J]. Journal of Astronautics, 1993, 14(3): 69-74. (in Chinese)
- [4] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials: I fabric structure and fiber volume fraction [J]. Composite Structures, 2000, 49(4): 451-459.
- [5] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials: II predict on of the elastic moduli [J]. Composite Structures, 2001, 51(4): 451-457.
- [6] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials: III nonlinear finite element deformation analysis [J]. Composite Structures, 2001, 51(3): 307-317.
- [7] 徐焜, 许希武. 四步法三维矩形编织复合材料的细观结构模型 [J]. 复合材料学报, 2006, 23(5): 154-160.
XU Kun, XU Xiwu. On the microstructure model of four-step 3D rectangular braided composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(5): 154-160. (in Chinese)
- [8] LI Diansen, LI Jialu, CHEN Li, et al. Finite element analysis of mechanical properties of 3D four-directional rectangular braided composites: Part 1 microgeometry and 3D finite element model [J]. Applied Composite Materials, 2010, 17(4): 373-387.
- [9] 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.
LI Diansen, LU Zixing, LIU Zhenguo, et al. Finite element analysis of thermal conductivity of three dimensional and five directional braided composites [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(8): 1455-1460. (in Chinese)
- [10] 温卫东, 邵将, 崔海涛, 等. 三维四向编织复合材料的弹性性能预测研究 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2514-2520.
WEN Weidong, SHAO Jiang, CUI Haitao. Evaluation of elastic properties of 3-D 4-direction braided composites [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(11): 2514-2520. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 李嘉禄, 刘谦. 三维编织复合材料中纤维束横截面形状的研究 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 9-13.
LI Jialu, LIU Qian. Study on fiber tows' cross-section in 3D braided composites [J]. Journal of Composite Materials, 2001, 18(2): 9-13. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 丁丹烨. 三维编织复合材料编织几何和力学性能的细观分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
DING Danye. Meso architecture and mechanical models of three-dimensional braided composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [15] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided preforms [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 59(3): 391-404.
- [16] 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): 36-40.
SHAO Jiang, WEN Weidong, CUI Haitao. Computer simulation of four-step three-dimensional braided composite structures [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(1): 36-40. (in Chinese)