

文章编号: 1000-8055(2009)11-2251-07

三维四向编织复合材料的弹性性能预测研究

温卫东¹, 邵 将², 崔海涛¹, 徐 颖¹

(11 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

21 中国航空综合技术研究所 航空综合环境重点实验室, 北京 100028)

摘 要: 根据三维四向编织复合材料中纤维束的空间几何结构特征, 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。基于刚度平均化方法建立了相应的刚度预测模型, 得到了三维四向编织复合材料的工程弹性常数。与实验结果的对比表明, 计算结果的预测精度较好。最后讨论了编织角和纤维体积分数对材料等效弹性性能的影响。

关 键 词: 三维编织复合材料; 三细胞模型; 弹性性能; 刚度平均化方法

中图分类号: TB332

文献标识码: A

Evaluation of elastic properties of 3D 4direction braided composites

WEN Weidong¹, SHAO Jiang², CUI Haitao¹, XU Ying¹

(11 College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

21 Aero Combined Environment Laboratory,

China Aerospolytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

Abstract: An improved three-cell model, which includes interior cells, two kinds of surface cells and corner cells, was proposed based on the geometrical characteristic of the yarns for 3D 4directional braided composite. The variation of characteristics for the yarns in the cells was considered in the present model. The average yarn packing factor was proposed to distinguish the different cross-sectional variations of the yarns in different cells. Based on this model, the stiffness prediction model was established with the method of stiffness averaging. By comparing with the available experimental data, it shows the applicability of the present model. At last, the influence of the braiding angle and the fiber volume fraction is discussed.

Key words: 3D braided composite; three-cell model; effective elastic properties; stiffness average method

航空发动机推质比的增加对新材料的性能要求越来越高, 三维编织复合材料因其整体的三维纤维空间网格结构避免了传统层合复合材料中的分层, 显著提高了材料的强度和刚度, 同时具有优良的抗冲击损伤性能, 已成为航空航天领域的重要结构材料。

从 20 世纪 80 年代开始, 国内外许多学者都致力于三维编织复合材料力学性能的研究, 详细分析了编织工艺参数、结构参数和力学性能之间的关系, 建立了不同的单胞模型来反映其微观结构, 大多数研究者倾向于将复合材料分为内部、表面及棱角三种区域的三细胞模型, 但由于单胞模

型是建立在诸多假设的基础上,因此在理论分析方面仍存在诸多缺陷. 部分模型^[25] 仅取内部单胞为代表性体积单元来分析整个结构的有效性能,而实际上只有试件尺寸足够大时,才可以忽略结构表面及棱角对其有效性能的影响; 还有部分模型^[69] 虽然综合考虑了三种单胞模式,但在分析中三种单胞内纱线走向的定义与实际情况不符; 大多数模型均未能正确处理三维编织复合材料细观结构的表面和棱角单胞问题,而且未考虑由编织和成型工艺造成的三种单胞区域部位纤维束不同截面形状所带来的影响.

本文首先把整体结构划分为内部单胞、两种表面单胞和棱角单胞四种类型的子单胞,为考虑空间纤维束的相互扭结和挤压而造成的纤维束弯曲变形,通过引入平均纤维束填充因子来考虑不同子单胞中纤维束截面形状的影响; 为解决螺旋纱线弹性性能难以预测的问题,建立了纤维束螺旋弯曲问题简化算法. 在此基础上,利用刚度平均化方法建立了三维四步编织复合材料的弹性性能预报模型,得到了相关的工程弹性常数. 文中预测得到的数值计算结果与实验结果吻合较好,从而验证了本文模型的有效性. 最后研究了纤维体积分数和编织角对三维编织复合材料弹性性能的影响规律.

1 三维编织复合材料的细观结构

1.1 三维编织复合材料的细观单胞模型

参照文献[10], 三维编织复合材料横截面形状如图 1 所示,三维编织复合材料在宏观上可以划分为四类区域,其中方块 I 为内部单胞、S₁ 为宽度方向的表面单胞、S₂ 为厚度方向的表面单胞、C 为棱角单胞,而内部单胞 I 又可以分成两种内部亚单胞 I₁ 和 I₂. 图中 U 为内部编织纤维束的水平取向角. 复合材料内部、表面以及棱角单胞示意图如图 2 所示.

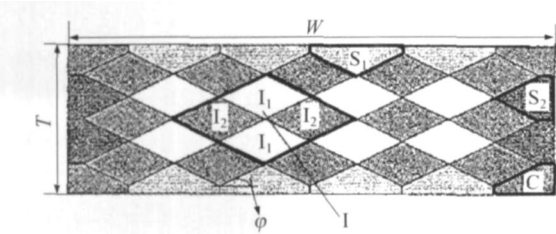


图 1 三维四步法编织复合材料的单胞组成结构

Fig 1 Cell composition structure of 4step 3D braided composite

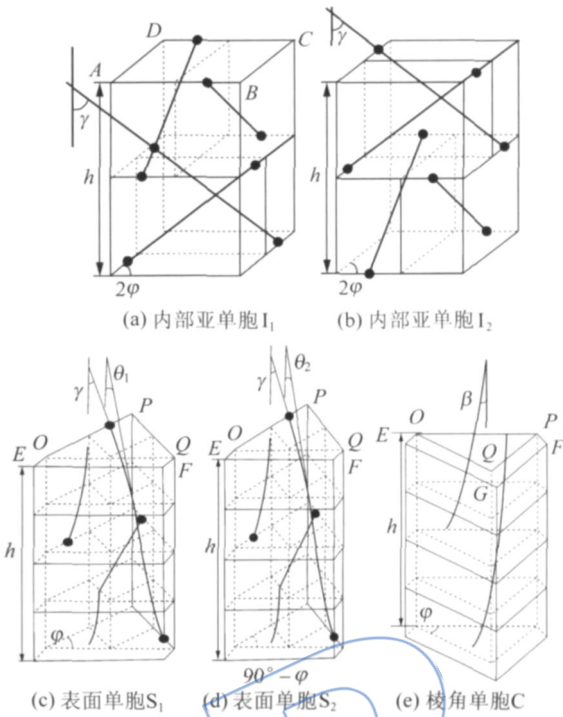


图 2 内部单胞、表面单胞以及棱角单胞
Fig 2 Interior, surface and corner unit cell

1.2 平均纤维束填充因子

根据三维四步法的编织规律,纤维束在复合材料内部呈直线,当遇到表面及棱角时将发生偏转,从而导致在表面及棱角区域内纤维束发生严重的挤压变形^[11],而且不同区域挤压程度的不同造成纤维束填充因子也不同. 本文不考虑挤压造成的横截面形状变化,引入平均纤维束填充因子,定义内部、表面和棱角单胞内的平均纤维束填充因子分别为 E_{int}, E_{sur} 和 E_{cor}.

文献[12] 中试验测定了内部区域、表面区域和棱角区域的纤维束填充因子,经过拟合得到内部区域、表面区域和棱角区域的平均纤维束填充因子具有如下关系:

$$E_{int} = 11.12 E_{sur}, E_{cor} = 11.274 E_{int} \tag{1}$$

进一步推导可以得到内部、表面和棱角区域的纤维束内的平均纤维束填充因子分别为

$$E_{int} = E = \frac{\sqrt{3} D_y^2 (2n + 1)^2 \sqrt{\cos^2 U + \tan^2 A}}{6 W_x^2 \sin 2U \sin U},$$
$$E_{sur} = 11.12 E, E_{cor} = 11.274 E, 0 < E \leq \frac{P}{2\sqrt{3}} \tag{2}$$

其中 $D_y = \frac{\sqrt{4K}}{\sqrt{NPQ}}$ 为编织纤维束的等效直径; K 为编织纤维束的线密度 (g/m); Q 为编织纤维束的体积密度 (g/cm³); n 为列数; U 和 A 分别为内部编织

纱线的水平取向角和宽度方向的编织角; W_x 为三维编织复合材料结构的宽度。

2 弹性性能预测

三维编织复合材料的弹性常数预测的基本流程如图 3 所示。在分析时首先将三种单胞中不同方向的纤维束的弹性张量从各自的局部坐标系转换到整体复合材料坐标系下, 可以得到各单胞的刚度特性, 再对其进行加权平均, 从而得到复合材料的等效弹性性能。

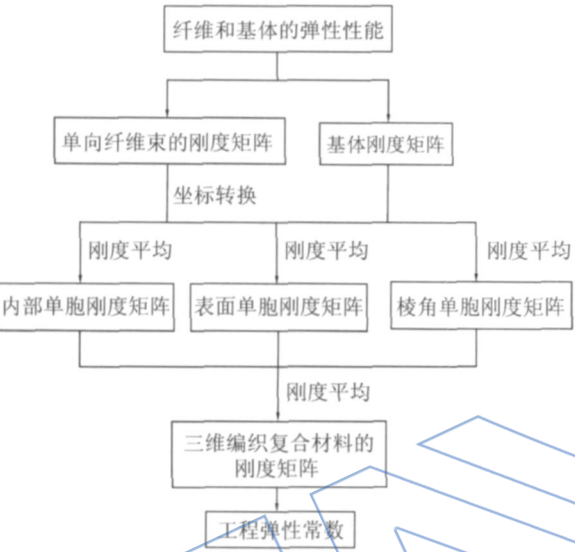


图 3 三维编织复合材料弹性性能预测流程图
Fig 3 Procedure of elastic constants calculation for the 2D braided composite

基体为各向同性材料。单胞中的单向纤维束为横观各向同性材料, 设纤维束与 z 轴的夹角为 C , 在 xy 平面内的投影与 x 轴的夹角为 B 。将纤维束方向的应力和应变转换到编织复合材料的主方向上, 纤维束刚度矩阵为

$$C_f = T_R C_0 T_R^T \tag{3}$$

其中 C_f 和 C_0 分别为纤维束在整体和局部坐标系下的刚度矩阵, $[T_R]$ 为应力空间转换矩阵。

内部单胞 I_1 和 I_2 结构类似, 单胞中纤维束的刚度矩阵即 4 根倾斜纤维束在整体坐标系下的平均刚度矩阵均为

$$C_{fi1} = C_{fi2} = \sum_{j=1}^4 V_{fj} [T_R]_j C_f [T_R]_j^T \tag{4}$$

其中 j 代表取向角分别为 $(C, U), (-C, U), (C, -U), (-C, -U)$ 的 4 根纤维束, V_{fj} 为第 j 段纤维束占单胞中纤维束的体积分数。

因此, 内部单胞的刚度矩阵为

$$C_i = V_{fi} C_{fi1} + (1 - V_{fi}) C_m \tag{5}$$

其中 V_{fi} 为内部单胞中纤维束占整体结构的百分比, C_{fi1} 和 C_m 分别为内部单胞 I_1 纤维束和基体的刚度矩阵。

表面单胞内复合材料杆的路径是直线段和螺旋线段的组合, 如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 表面单胞 S_1 内复合材料杆可以看作是由 2 根倾斜的直线段(图中 a 和 e)和 2 根螺旋线段(图中 b 和 d + c)组成, 直线纱段与编织轴向的夹角为内部编织角 C , 螺旋纱段与编织轴向的夹角为表面编织角 H 。

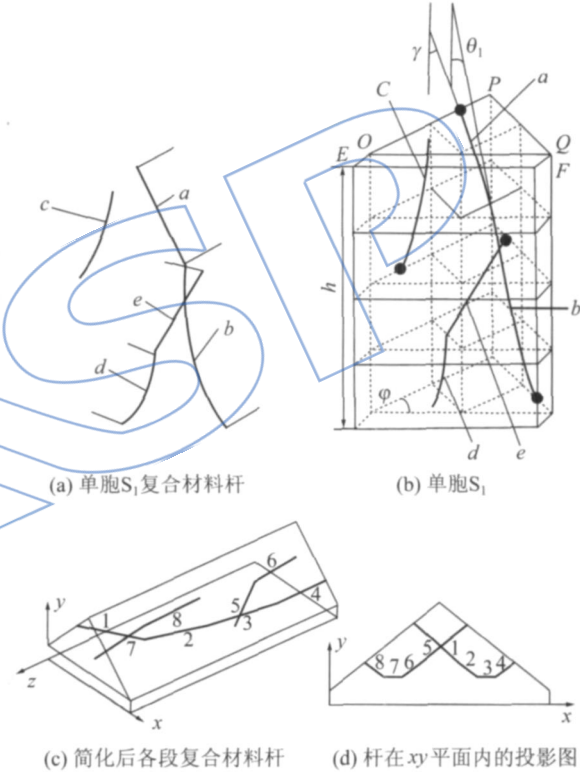


图 4 表面单胞 S_1 及内部复合材料杆简化图
Fig 4 Surface unit cell S_1 and simplified figure of its fiber bundles

对于直线段 a 和 e, 可知取向角分别为 $(C, -U), (C, U)$ 。对于螺旋段 b 和 d + c, 本文建立了纤维束螺旋弯曲问题简化算法, 将单胞内的螺旋线部分复合材料杆分成多段复合材料直杆来处理: 将纤维束以机器循环中的每一步拆分成如图 4(c) 和图 4(d) 所示的折线段, 纤维束在织物表面经过 3 步形成完整的一段, 因此将表面单胞中的每个螺旋复合材料杆分为 3 段直杆, 图 4 中 2, 3, 4 和 6, 7, 8 段杆长度均相同。由此可以推导得到 8 根复合材料杆相应的取向角如表 1 所示。

表 1 表面单胞 S_1 中复合材料杆取向角
Table 1 Directional angles of fiber bundles in surface unit cell S_1

纱段	1	2	3	4
取向角/(b)	(- C_1 , - U_1)	(- H_1 , $15b$ - U_1)	(- H_1 , $45b$ - U_1)	(- H_1 , $75b$ - U_1)
纱段	5	6	7	8
取向角/(b)	(C_1 , U_1)	(H_1 , U_1 - $15b$)	(H_1 , U_1 - $45b$)	(H_1 , U_1 - $75b$)

整体坐标系下表面单胞 S_1 的刚度矩阵即其中 8 根复合材料杆的平均刚度矩阵为

$$C_{S_1} = \sum_{j=1}^8 V_{sj} [T_R]_j C_c [T_R]_j^T \quad (6)$$

其中 $j=1, \dots, 8$ 代表复合材料杆序号, V_{sj} 代表第 j 根复合材料杆占表面单胞所有杆的体积分数.

采用表面单胞 S_1 同样的方法可计算得到表面单胞 S_2 和棱角单胞 C 的刚度矩阵如下所示:

$$C_{S_2} = \sum_{k=1}^8 V_{sk} [T_R]_k C_c [T_R]_k^T$$
$$C_c = \sum_{l=1}^6 V_{cl} [T_R]_l C_c [T_R]_l^T \quad (7)$$

其中 $k=1, \dots, 8$ 代表表面单胞 S_2 复合材料杆序号, V_{sk} 为表面单胞 S_2 第 k 根复合材料杆占有杆的体积分数. $l=1, \dots, 6$ 代表棱角单胞 C 复合材料杆序号, V_{cl} 为棱角单胞 C 第 l 根复合材料杆占有杆的体积分数. 表面单胞 S_2 和棱角单胞 C 相应的复合材料杆取向角如表 2 和表 3 所示.

三维编织复合材料中内部、表面及棱角的编织区域分别占有一定的比例, 复合材料的整体性能由其基本单胞的性能所决定, 对四类单胞的弹性常数作单胞区域按比例加权叠加后, 即可得到整体编织复合材料的刚度矩阵, 进一步可求得其工程弹性常数.

表 2 表面单胞 S_2 中复合材料杆取向角
Table 2 Directional angles of fiber bundles in surface unit cell S_2

纱段	1	2	3	4
取向角/(b)	(- C_2 , $90b$ - U_2)	(- H_2 , $105b$ - U_2)	(- H_2 , $135b$ - U_2)	(- H_2 , - $15b$ - U_2)
纱段	5	6	7	8
取向角/(b)	(C_2 , U_2 + $90b$)	(H_2 , U_2 + $75b$)	(H_2 , U_2 + $45b$)	(H_2 , U_2 + $15b$)

表 3 棱角单胞 C 中复合材料杆取向角
Table 3 Directional angles of fiber bundles in corner unit cell C

纱段	1	2	3	4	5	6
取向角/(b)	(B_1 - $75b$ - U_3)	(B_1 - $45b$ - U_3)	(B_1 - $15b$ - U_3)	(B_1 $15b$ - U_3)	(B_1 $45b$ - U_3)	(B_1 $75b$ - U_3)

3 数值结果与分析

为了验证本文中弹性性能预报模型的有效性, 下面选取两组三维四向矩形编织材料实验数据作为验证算例.

1) 算例 1

材料组分性能参数见表 4. 所用试样几何尺寸为: 内部、表面及棱角编织角分别为 $25b$, $161.02b$, $91.67b$, 纤维横向编织角为 $45b$, 纤维体积分数为 0.159 .

采用本文提出方法对该试样进行弹性性能预报的结果如表 5 所示. 预测结果表明: 三维编织复

合材料试样为横观各向同性, 和文献[13] 预测结果相比, 本文预报值与实验值更加吻合, 从而验证了本文刚度预报模型的有效性.

表 4 组分性能参数^[13]
Table 4 Properties of constituents of composites

	Modulus/ GPa				L_{12}	L_{23}
	E_1	E_2	G_{12}	G_{23}		
T 300 fiber	220	131.8	91.0	41.8	0.2	0.25
TDE285 resin	41.5	41.5			0.134	0.134

表 5 本文模型预报结果与实验结果比较

Table 5 Comparison of prediction results and experiment results

	内部单胞	表面单胞 S ₁	表面单胞 S ₂	棱角单胞	整体复合材料	试验值	文献[12] 预测值
E ₁₁ /GPa	9 20	10 65	10 50	8 50	9 55		9 77
E ₂₂ /GPa	9 20	10 43	10 61	8 50	9 55	8 68	9 75
E ₃₃ /GPa	6 7 29	10 5 1 69	9 7 40	8 6 1 34	7 7 20	7 7 0	8 0 7
G ₁₂ /GPa	4 45	4 44	4 38	3 24	4 46		4 67
G ₁₃ /GPa	12 23	14 20	9 75	6 04	12 20		1 1 65
G ₂₃ /GPa	12 23	9 51	12 42	6 04	12 20		1 1 92
M ₂	0 27	0 25	0 26	0 31	0 27		0 31
M ₃	0 66	0 76	0 31	0 29	0 64		0 57
M ₃	0 66	0 27	0 62	0 29	0 64	0 7	0 61

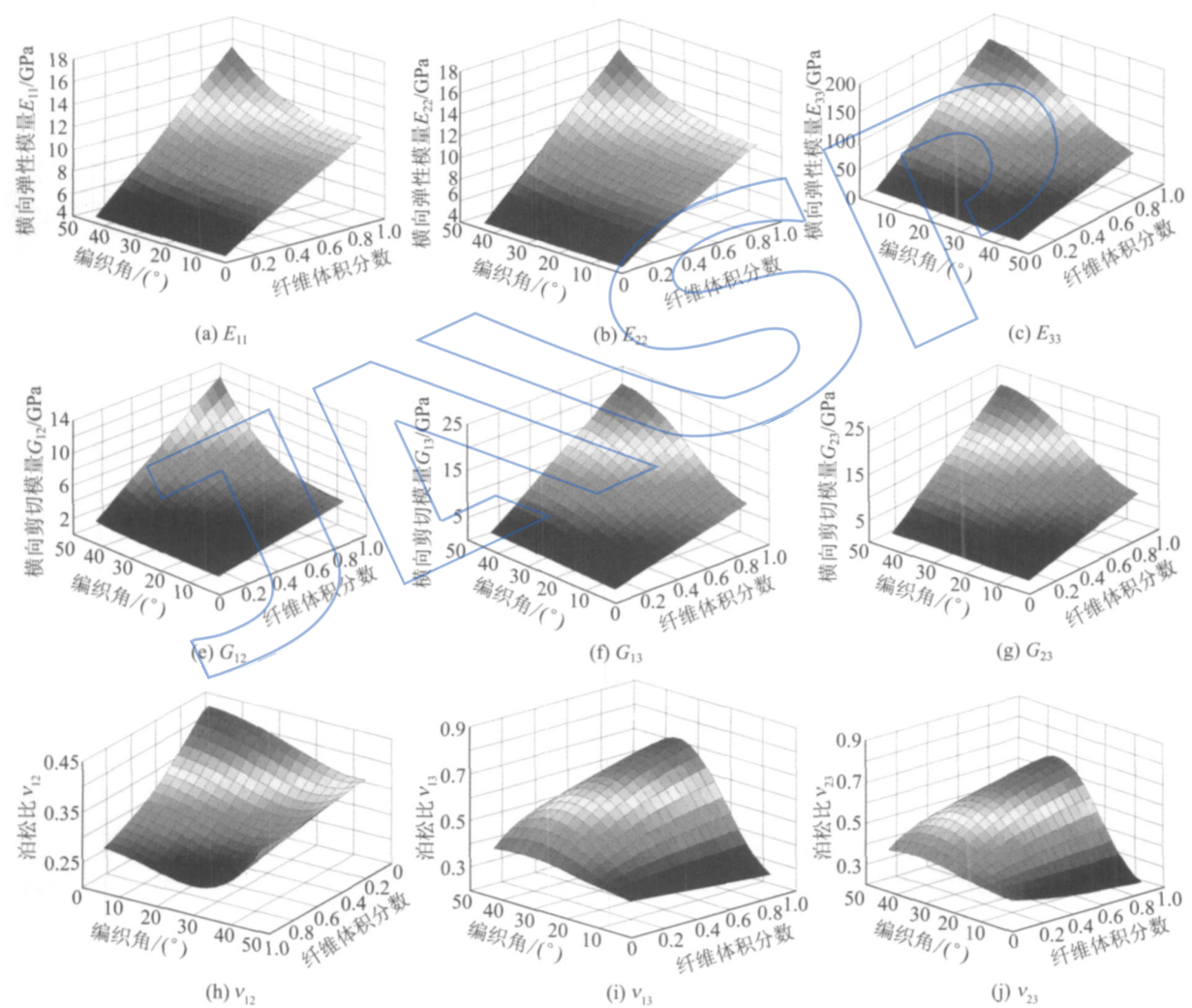


图 5 纤维体积分数和编织角对三维编织复合材料弹性常数的影响曲线

Fig 5 Dependence of effective elastic constants of the composites on the fiber volume fraction and braiding angle

2) 算例 2

采用本文方法对文献[14]采用的不同编织角的几种编织物的等效弹性模量分别进行了计算,

计算结果同文献[14]的实验结果进行比较如表 6 所示. 从表 6 可以看出, 本文计算的纵向拉伸模量及泊松比与实验结果比较吻合.

表 6 本文模型预报结果与实验结果比较

Table 6 Comparison of prediction results and experiment results

编号	内部编织角 $A_i/(^\circ)$	E_{11}/GPa	E_{33}/GPa		M_2	M_3	
		计算	计算	实验	计算	计算	实验
1	21	9.6	68.5	67.3	0.290	0.656	0.648
2	41	13.4	30.2	30.0	0.308	0.623	0.606
3	42	15.2	27.7	27.1	0.311	0.498	0.479
4	48	18.5	22.5	22.1	0.514	0.553	0.382

4 纤维体积分数和编织角对三维编织复合材料弹性性能的影响

根据纤维体积分数和编织角的变化,可以得到三维编织复合材料弹性常数的变化规律,各弹性常数的变化规律见图 5 所示。

由图 5 可以发现:该三维编织复合材料在 1, 2 方向的弹性性能相同,单胞可以看作横观各向同性材料。而且复合材料弹性性能随编织角和纤维体积分数的变化有以下规律:

1) E_{11} , E_{22} 和 E_{33} 均随纤维体积分数的增加而增加;随编织角的增加, E_{33} 减小, E_{11} 和 E_{22} 增加,且纤维体积分数越高,其变化越明显,变化规律呈非线性;

2) G_{12} , G_{13} 和 G_{23} 随着纤维体积分数的增加差不多线性增加;随着编织角的增加, G_{12} , G_{13} 和 G_{23} 的预测值均增加, G_{13} 和 G_{23} 的值增加的速度越来越慢, G_{12} 的值增加越来越快。

3) 泊松比随纤维体积分数以及编织角的变化曲线均为非线性的,随纤维体积分数的增加, μ_1 和 μ_2 的值增加, μ_3 的值减小;随编织角的增加, μ_1 和 μ_2 的值先增加后减小,在编织角为 30° 到 40° 之间达到最大值;随编织角的增加, μ_3 的值先减小后增加,在编织角为 30° 到 40° 之间达到最小值。

5 结 论

本文在改进的三细胞模型基础上建立了三维编织复合材料的弹性性能预测模型,研究了编织复合材料弹性性能与织物细观结构参数之间的关系,并探讨了纤维体积分数和编织角对复合材料弹性性能的影响规律,为编织复合材料的设计和分析提供必需的理论依据。通过分析可以得出以下结论:

1) 提出了一种三维编织复合材料弹性性能预测的新方法。与原方法相比,本文的弹性常数计

算结果与实验值更为符合,说明了该单胞模型及弹性性能预测方法的正确性和可行性。

2) 三维编织复合材料细观模型可以分为内部单胞、两种表面单胞以及棱角单胞 4 个区域,内部区域纤维束为直线,表面和棱角区域纤维束为曲线,正确反映了三维编织复合材料内部的纱线走向,体现了三维编织的空间连续性。

3) 三维编织复合材料的编织角和纤维体积分数是影响材料力学性能的最重要的材料参数,它们也是材料设计时的基本参数,对复合材料的弹性性能具有较大的影响。这些结果将对该材料的工程应用及材料的优化设计具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] Ko F K, Pastore C M I Structure and properties of and integrated 3D fabric for structural composites[C]// Recent Advances in Composites in the United States and Japan, ASTM STP 864. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1985: 4282439.

[2] Ma C L, Yang J M, Chou T W Elastic stiffness of three dimensional braided textile structure composites [C]// Composite Materials: Testing and Design (seventh Conference), ASTM STP 893. Philadelphia: ASTM, 1986 404211.

[3] 陈栋,孙颖,马振杰,等1 三维四向编织复合材料等效弹性性能分析[J] 天津工业大学学报, 2007, 6(3): 629

CHEN Dong, SUN Ying, MA Zhenjie, et al. Microstructure analysis on elastic behavior of 3D 42directional braided composites[J] Journal of Tianjin Polytechnic University, 2007, 6(3): 629 (in Chinese)

[4] Lei C, Cai Y J, Ko F I Finite element analysis of 3D braided composites [J] Advances in Engineering Software, 1992, 14(3): 182194.

[5] 连尉平,崔俊芝1 三维编织复合材料模量的双尺度有限元计算[J] 计算力学学报, 2005, 22(3): 26822731

LIAN Weiping, CUI Junzhi1 The two-scale analysis algorithms for the mechanical prediction of 3D braided composite materials[J] Chinese Journal of Computational Me-

- chanics, 2005, 22(3): 262-273 (in Chinese)
- [6] Du G W, Ko F K Unit cell geometry of 3D braided structure [J] Journal of Reinforced Plastics and Composites 1993, 12: 752-768
- [7] 吴德隆, 郝兆平. 五向编织结构复合材料的分析模型 [J] 宇航学报, 1993, 14(3): 402-511
WU Delong, HAO Zhaoping 5D braided structural composites [J] Journal of Astronautics, 1993, 14(3): 402-511 (in Chinese)
- [8] 徐焜, 许希武, 汪海. 三维四向编织复合材料的几何建模及刚度预报 [J] 复合材料学报, 2005, 22(1): 133-138
XU Kun, XU Xiwu, WANG Hai On geometrical model and stiffness prediction of 3D 4directional braided composites [J] Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(1): 133-138 (in Chinese)
- [9] 杨振宇, 卢子兴, 刘振国, 等. 三维四向编织复合材料力学性能的有限元分析 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 152-161
YANG Zhenyu, LU Zixing, LIU Zhenguo, et al Finite element analysis of the mechanical properties of 3D braided composites [J] Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 152-161 (in Chinese)
- [10] Chen L, Tao X M, Choy C L Mechanical analysis of 3D braided composites by the finite multiphase element method [J] Composites Science and Technology, 1999, 59: 2382-2391
- [11] 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): 92-131
LI Jialu, LIU Qian Study on fiber tows cross section in 3D braided composites [J] Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(2): 92-131 (in Chinese)
- [12] Ito M. Effects of yarn undulation on the stress and deformation of textile composites [D] Newark, DE: University of Delaware, 1995
- [13] 王波. 三维编织复合材料力学行为研究 [D] 西安: 西北工业大学, 2003
WANG Bo Study on the mechanical behavior of three dimensional braided composites [D] Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003 (in Chinese)
- [14] 刘振国, 陆萌, 麦汉超, 等. 三维四向编织复合材料弹性模量数值预报 [J] 北京航空航天大学学报, 2000, 26(2): 182-185.
LIU Zhenguo, LU Meng, MAI Hanchao, et al Numerical prediction of moduli of 3D and 4step braided composites [J] Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(2): 182-185 (in Chinese)