

基于细观结构的三维四向复合材料 刚度预测模型

陈波, 温卫东, 崔海涛

(南京航空航天大学 能源与动力学院

江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 考虑纱线截面的变化、相互挤压,建立了三维四向复合材料内部单胞、表面单胞及角胞细观模型。对三种单胞模型施加了相应的周期性边界条件,采用刚度体积平均法,建立了三维四向复合材料刚度预测模型,预测了切边和非切边三维四向碳/碳复合材料纵向弹性模量。结果表明,三单胞预测模型在材料宽度为8、13、16、21 mm的预测值时,与试验平均值的误差分别为18.3%、5.8%、4.2%和5%,模型预测精度在材料宽度增加时,预测精度明显提高,当材料宽度大于13 mm时,能较好的预测三维四向碳/碳复合材料纵向弹性模量,且三单胞模型的预测精度显著优于内部单胞模型。

关 键 词: 三维四向; 内部单胞; 表面单胞; 角胞; 刚度体积平均法

中图分类号: V231.91; TB332

文献标志码: A

A stiffness prediction model for three-dimensional four directional composites based on mesoscopic structure

CHEN Bo, WEN Weidong, CUI Haitao

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The interior unit cell, surface unit cell and corner unit cell of three-dimensional four directional composites were established in mesoscopic scale, and the models considered the changes of the yarn cross section and mutual extrusion. Applying the corresponding periodic boundary conditions, and using the stiffness volume average method, the three-dimensional four directional composites stiffness prediction models were established. The longitudinal elasticity modulus of trimming and non-trimming three-dimensional four directional carbon/carbon composites were predicted. The results show that the predicted values of 8, 13, 16, 21 mm width three-dimensional four directional carbon/carbon composites and experimental values have 18.3%, 5.8%, 4.2% and 5% errors, respectively. The prediction results have a higher precision when widening the specimens, and the three unit cells' model has good precision in longitudinal elasticity modulus which is much better than that of interior unit cell method when the width of specimens is over 13 mm.

收稿日期: 2016-09-13

基金项目: 江苏省高校研究生创新基金(KYLX_0238); 中央高校基本科研基金(1002-56XQA15002)

作者简介: 陈波(1986—),男,博士生,研究方向为先进复合材料结构设计技术。E-mail: chenbocepu@nuaa.edu.cn

引用格式: 陈波,温卫东,崔海涛. 基于细观结构的三维四向复合材料刚度预测模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2721-2728.

CHEN Bo, WEN Weidong, CUI Haitao. A stiffness prediction model for three-dimensional four directional composites based on mesoscopic structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2721-2728.

Key words: three-dimensional four directional; interior unit cell; surface unit cell; corner unit cell; stiffness volume average method

三维编织复合材料作为一种较为新型的复合材料,已广泛应用于航空、航天等领域。三维编织复合材料较层合复合材料,其横向强度和模量更高,抗疲劳性能更好。

目前三维编织复合材料刚度预测方法主要有解析法和数值法两类。解析法基于平均思想进行预测,如取向平均、刚度体积平均、柔度体积平均等。Ko^[1]根据纱线在三维编织体中的走向,对三维编织体建立了单胞模型,预测了树脂基三维四向编织复合材料的弹性常数。Yang 等^[2]建立的由三根相互正交的纱线和四根对角纱线构成的“米”字枝状模型,采用该模型预测了树脂基三维编织复合材料的弹性常数。庞宝君等^[3]采用 19 根纤维来表示单胞中的纤维束方向及位置,其预测精度显著提高。杨振宇等^[4]基于“米”字形模型,采用刚度体积平均法,对三维四向树脂基复合材料进行了刚度预测。袁辉^[5]考虑了纤维束内部编织角的影响,对三维四向碳/碳复合材料进行了刚度预测。数值法模型简单,易于计算,但预测精度不高,且受复合材料结构影响较大。

数值法是对离散后的代表性体积单元(RVE)进行研究。徐焜和许希武^[6-7]假设三维四向编织复合材料中的纤维束截面为八边形,采用有限元软件进行了刚度和强度预测。Kang 等^[8]对三维四向复合材料内部单胞进行了三维建模,通过刚度体积平均法预测了模型的刚度。Wimmer 等^[9]采用均匀化方法对三维编织复合材料内部单胞进行了刚度的预测。冯驰等^[10]应用 Pro-E 软件对三维四向编织复合材料进行了单胞模型的参数化建模,该模型加入了编织角和纱线截面。朱元林等^[11]将纱线截面等效为六边形,建立了相应的刚度模型,预测了三维四向碳/碳复合材料的刚度。以上文献所建立的预测模型只计算内部单胞,忽略表面单胞和角胞,使得预测值偏低。

郑锡涛等^[12]对三维编织复合材料进行刚度预测时,考虑内部单胞、表面单胞和角胞的作用,采用刚度体积平均法得到了复合材料的纵向弹性模量的解析解,但该模型未考虑纱线截面对结果的影响。冯伟等^[13]对三维四向复合材料建立了内部单胞模型,研究了编织角和胞元尺寸之间的关系。徐焜等^[14]对三维五向复合材料单胞进行了有限元建模,通过施加周期性边界条件,预测了

三维五向复合材料的刚度和强度。温卫东等^[15]对三维四向复合材料三种单胞的纤维空间走向进行了研究,预测了三维四向复合材料的纵向刚度。以上文献虽然建立了较为完整的三维编织复合材料的单胞模型,但模型中没有将材料纱线的形状、横截面、编织过程中打紧挤压造成的纤维变形等因素完全考虑,对不同编织工艺和加工后的试验件进行预测时,精度不高。

本文对三维四向复合材料划分为内部、表面和棱角三种细观单胞,考虑单胞内纱线走向和横截面形状,利用刚度平均法,建立了三维四向复合材料的刚度预测模型。通过切边和非切边三维四向碳/碳复合材料的纵向拉伸试验验证了预测模型的有效性。

1 模型处理

1.1 三维四向复合材料结构特点

三维四向编织预成型技术是多采用四步法 1×1 编织工艺来实现的。四步法编织预制件表面纱线的交织情况见图 1, h 为花节长度(即单胞高度), α 为编织角, θ 为表面编织角。根据纱线缠绕工艺的特点,可将织物结构划分为内部、表面以及棱角区域,如图 2 所示。因而在进行细观单胞的建立时,应相应的划分为内部单胞、表面单胞和角胞。

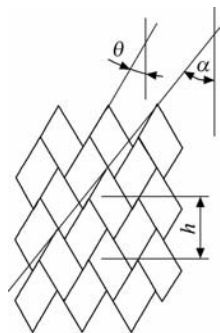


图 1 织物表面结构理想模型

Fig. 1 Idealized model of fabric surface structure

1.2 细观模型的基本假设

根据编织工艺中携纱器的运动规律^[16],本文对模型做出如下假设:

1) 编织工艺足够稳定,以保证一定长度范围内编织结构的均匀一致性。

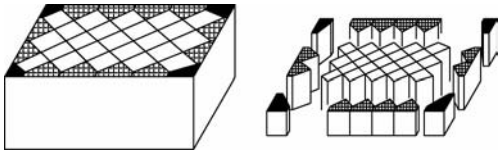


图 2 三维四向织物结构区域划分

Fig.2 Divisions of three-dimensional four directional fabric structures

- 2) 纤维束因打紧工序在空间保持直线走向。
- 3) 纤维束为同一材料,具有相同的刚度。
- 4) 打紧前纤维束截面呈椭圆形,打紧后纤维束相互挤压,纤维束截面呈多边形,这里假设为六边形。

1.3 单胞模型

1.3.1 单胞模型的拓扑结构

通过分析四步法 1×1 编织工艺的纱线走向,可以得到纱线在织物三个区域的拓扑结构^[16],从而得到对应三类单胞的拓扑结构,图 3~图 5 给出了内部单胞、表面单胞以及角胞纱线拓扑结构模型,分别由 16 根、3 根、2 根纱线构成。图中 b 为纱线截面短轴, γ 、 β 分别为内部和棱角编织角。

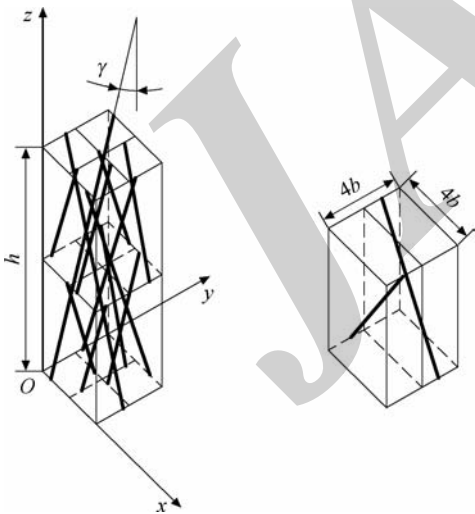


图 3 内部单胞拓扑模型

Fig.3 Topology model of the interior unit cell

1.3.2 单胞模型的纤维体积分数

复合材料的刚度与纱线的纤维体积分数密切相关,纤维体积分数可以由式(1)得到

$$\varphi_f = \frac{m_f}{\rho_f V_c} \tag{1}$$

式中 m_f 为复合材料预制体的质量, ρ_f 为纱线密度, V_c 为复合材料体积。

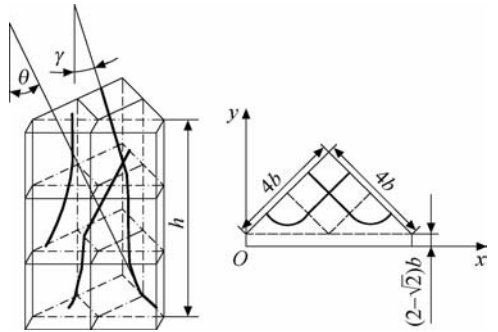


图 4 表面单胞拓扑模型

Fig.4 Topology model of the surface unit cell

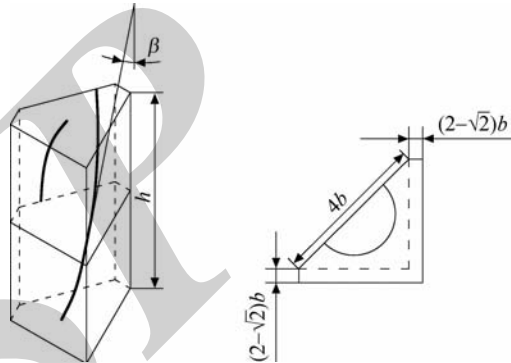


图 5 角胞拓扑结构模型

Fig.5 Topology model of the corner unit cell

对于三维四向编织复合材料而言,内部区域、表面区域以及棱角区域纤维体积分数各不相同,三类单胞的纤维体积分数如式(2)~式(4)所示。

$$\varphi_{if} = \frac{\pi \sqrt{3}}{8} \epsilon_i \tag{2}$$

$$\varphi_{sf} = \frac{\pi \sqrt{3}}{24} \left(1 + 3 \frac{\cos \gamma}{\cos \theta} \right) \epsilon_s \tag{3}$$

$$\varphi_{cf} = \frac{3 \sqrt{3} \pi \cos \gamma}{17 \cos \beta} \epsilon_c \tag{4}$$

式中 φ_{if} 、 φ_{sf} 、 φ_{cf} 分别为内部单胞、表面单胞以及角胞的纤维体积分数, ϵ_i 、 ϵ_s 、 ϵ_c 为相应单胞的纱线填充因子,可根据式(5)~式(7)求得。

$$\epsilon_i = \frac{\pi D^2}{4ab} \tag{5}$$

式中 $D = \sqrt{\frac{4\rho_f}{\pi\rho_l}}$ 为纱线的等效直径, b 为椭圆形纤维束截面的短轴, a 为椭圆形纤维束截面的长轴, ρ_l 为纱线的线密度。

$$\epsilon_s = 1.12\epsilon_i \tag{6}$$

$$\epsilon_c = 1.274\epsilon_i \tag{7}$$

通过式(2)~式(4)求得各单胞纱线体积分数

后,即可通过下式得到三维四向编织复合材料整体的纱线体积分数。

$$\varphi_t = \varphi_i \varphi_{if} + \varphi_s \varphi_{sf} + \varphi_c \varphi_{cf} \quad (8)$$

式中 φ_i 为内部单胞在复合材料中的体积分数, φ_s 为表面单胞在复合材料中的体积分数, φ_c 为角胞在复合材料中的体积分数。通过对比式(1)和式(8)可以验证各单胞纤维体积分数计算是否准确。

1.3.3 单胞的细观结构

采用有限元法建立三维四向复合材料的细观单胞模型。纱线截面形状如图 6 所示,纱线截面在打紧前为椭圆型, a_2 、 b_2 为长轴和短轴;打紧后为六边形, a_1 、 b_1 为内切椭圆长轴和短轴,其中 $a_1 = b_1 \sqrt{3} \cos \gamma$ 。由此两组参数可确定打紧后纱线截面的形状。

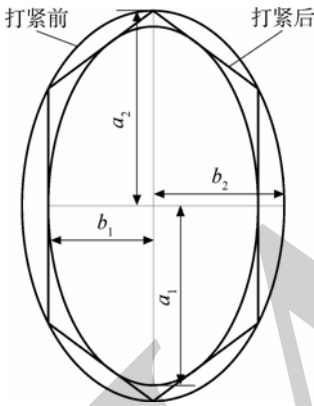


图 6 纱线截面打紧前后形状

Fig. 6 Shape of yarn sections before and after jamming

以椭圆中心为原点,短轴为 x 轴,长轴为 y 轴建立坐标系,则 CD 所在直线的直线与 y 轴夹角为 γ ,其方程为

$$y = x \cot \gamma + a_2 \quad (9)$$

则 C 点坐标为 $(-b_1, -\cot b_1 + a_2)$ 。

文献[16]中给出了复合材料宏观尺寸和纤维束内切椭圆短轴之间的关系为

$$L_x = 2\sqrt{2}mb_1 + (4 - \sqrt{2})b_1 \quad (10)$$

$$L_y = 2\sqrt{2}nb_1 + (4 - \sqrt{2})b_1 \quad (11)$$

式中 L_x 为织物宽度, L_y 为织物长度, m 为主体纱排数, n 为主体纱列数。

花节长度(即单胞高度)为

$$h = \frac{8b_1}{\tan \gamma} \quad (12)$$

通过以上参数可以得到内部单胞、表面单胞

以及角胞的细观几何模型,如图 7 所示。

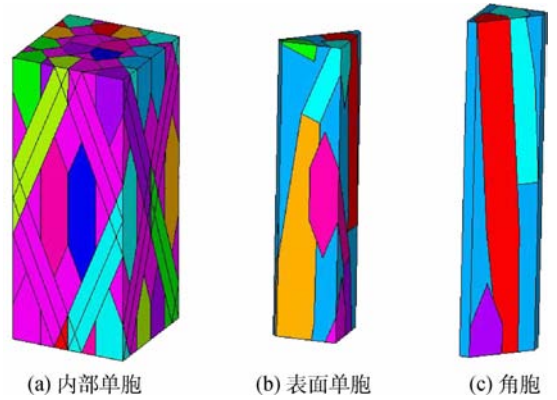


图 7 内部单胞、表面单胞和角胞几何模型

Fig. 7 Geometry models of interior unit cell, surface unit cell and corner unit cell

1.3.4 有限元模型的建立和边界条件的处理

1.3.4.1 网格划分

采用四面体 10 节点单元对几何模型进行划分,相应的几何模型如图 8 所示。

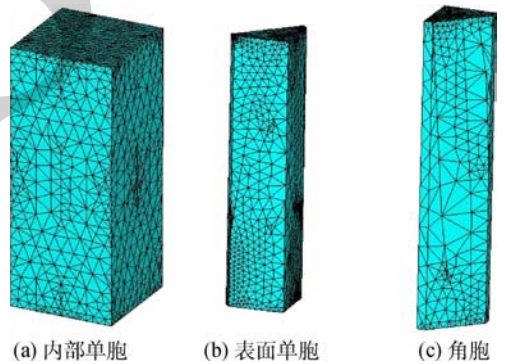


图 8 内部单胞、表面单胞和角胞有限元模型

Fig. 8 Finite element models of interior unit cell, surface unit cell and corner unit cell

1.3.4.2 边界条件的处理

为保证模型在载荷作用下保持空间上的周期性和连续性,施加周期性边界条件。文献[17]提出了一种周期性位移边界条件能够保证模型的变形和应力连续,其表达式为

$$u_i^{j+} - u_i^{j-} = \bar{\epsilon}_{ik} (x_k^{j+} - x_k^{j-}) = \bar{\epsilon}_{ik} \Delta x_k^j \quad (13)$$

式中 $j+$ 和 $j-$ 分别表示单胞的第 j 组相对平行面, $\bar{\epsilon}_{ik}$ 为单胞全场平均应变, Δx_k^j 为沿 x 方向相对平行面的距离,为一个常数。

三维四向编织复合材料内部单胞有三对平行面,根据图 9 可列出约束方程(14)。

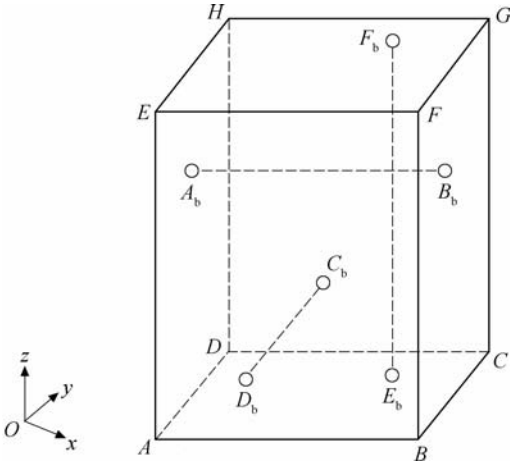


图 9 内部单胞周期性边界条件示意图

Fig. 9 Schematic diagram of periodic boundary conditions of interior unit cell

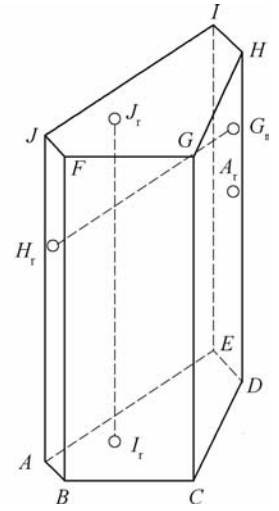


图 10 表面单胞周期性边界条件示意图

Fig. 10 Schematic diagram of periodic boundary conditions of surface unit cell

$$\begin{cases}
 U_{F_b} - U_{E_b} = 0 \\
 V_{F_b} - V_{E_b} = 0 \\
 W_{F_b} - W_{E_b} = \varepsilon h \\
 U_{B_b} - U_{A_b} = \varepsilon \cdot 8b_1 \\
 V_{B_b} - V_{A_b} = 0 \\
 W_{B_b} - W_{A_b} = 0 \\
 U_{C_b} - U_{D_b} = 0 \\
 V_{C_b} - V_{D_b} = \varepsilon \cdot 8b_1 \\
 W_{C_b} - W_{D_b} = 0 \\
 U_A = V_A = W_A = 0 \\
 V_B = W_B = U_E = V_E = U_D = W_D = 0
 \end{cases} \quad (14)$$

式中 U, V, W 为节点沿 x, y, z 方向的位移, $U_{F_b}, U_{E_b}, V_{F_b}, V_{E_b}, W_{F_b}, W_{E_b}, U_{A_b}, U_{B_b}, V_{A_b}, V_{B_b}, W_{F_b}, W_{E_b}, U_{A_b}, U_{B_b}, V_{A_b}, V_{B_b}, W_{F_b}, W_{E_b}$ 为相应面上节点相应方向上的节点位移, $U_A, V_A, W_A, V_B, W_B, U_E, V_E, U_D, W_D$ 为单胞各顶点相应方向上的节点位移, ε 为平均应变。

三维四向编织复合材料表面单胞有两对平行面, 根据图 10 可列出约束方程(15)。

$$\begin{cases}
 U_{J_f} - U_{I_f} = 0 \\
 V_{J_f} - V_{I_f} = 0 \\
 W_{J_f} - W_{I_f} = \varepsilon h \\
 U_{G_f} - U_{H_f} = \varepsilon \cdot 4\sqrt{2}b_1 \\
 V_{G_f} - V_{H_f} = 0 \\
 W_{G_f} - W_{H_f} = 0 \\
 U_A = V_A = W_A = 0 \\
 V_B = W_B = U_E = W_E = U_J = V_J = 0
 \end{cases} \quad (15)$$

式中 $U_{J_f}, U_{I_f}, V_{J_f}, V_{I_f}, W_{J_f}, W_{I_f}, U_{G_f}, U_{H_f}, V_{G_f}, V_{H_f}, W_{G_f}, W_{H_f}$ 为相应面上节点相应方向上的节点位移, $U_A, V_A, W_A, V_B, W_B, U_E, W_E, U_J, V_J$ 为单胞各顶点相应方向上的节点位移。

三维四向编织复合材料角胞有一对平行面, 根据图 11 可列出式(16)约束方程。

$$\begin{cases}
 U_{L_c} - U_{K_c} = 0 \\
 V_{L_c} - V_{K_c} = 0 \\
 W_{L_c} - W_{K_c} = \varepsilon h \\
 U_A = V_A = W_A = 0 \\
 V_B = W_B = U_E = W_E = U_F = V_F = 0
 \end{cases} \quad (16)$$

式中 $U_{L_c}, U_{K_c}, V_{L_c}, V_{K_c}, W_{L_c}, W_{K_c}$ 为相应面上节点

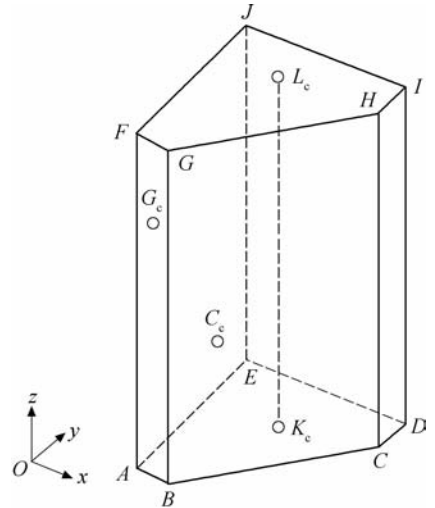


图 11 角胞周期性边界条件示意图

Fig. 11 Schematic diagram of periodic boundary conditions of corner unit cell

点相应方向上的节点位移, $U_A, V_A, W_A, V_B, W_B, U_E, W_E, U_F, V_F$ 为单胞各顶点相应方向上的节点位移。

三维四向编织复合材料的本构模型可由式(17)表示。

$$\bar{\sigma} = k_{ij}\bar{\epsilon}$$

(17)

式中 $\bar{\sigma}$ 为单胞平均应力, $\bar{\epsilon}$ 为单胞平均应变, k_{ij} 为单胞等效刚度。

则单胞平均应力可通过下式求得, 即

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV = \frac{(p_i)_j}{S_j}$$

(18)

式中 V 为单胞体积, σ_{ij} 为单胞内各单元应力, S_j 表示单胞的第 j 个表面面积, $(p_i)_j$ 表示第 j 个表面所有节点在 i 方向上的节点力之和。

2 刚度预测

加载周期性边界条件和位移载荷后, 可求得三种单胞的应力应变场, 得到平均应力 $\bar{\sigma}$, 将平均应力 $\bar{\sigma}$ 除以平均应变 $\bar{\epsilon}$ 可得单胞在该方向上的弹性模量, 得到内部单胞弹性模量 E_i 、表面单胞弹性模量 E_s 和角胞弹性模量 E_c 三种单胞弹性模量后, 可由下式计算得到复合材料整体弹性模量:

$$E_{\text{total}} = \varphi_i E_i + \varphi_s E_s + \varphi_c E_c$$

(19)

2.1 算例 1

对三维四向编织碳/碳复合材料进行纵向刚度预测, 并与只采用内部单胞进行刚度预测的结果对比, 高温热处理温度为 $2\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 纤维体积分数为 50% , 体积密度为 1.81 g/cm^3 , 孔隙率为 8.48% , 基体孔隙率为 16.96% , 内部编织角 $\gamma = 22^{\circ}$, 计算得到 $b_1 = 0.1747\text{ mm}$, $h = 3.46\text{ mm}$, $D = 0.385\text{ mm}$, 材料组分性能如表 1、表 2 所示。

通过式(2)~式(8)得到各单胞以及复合材料总体纤维体积分数, 计算结果如表 3 所示。

三维四向碳/碳复合材料纵向拉伸试验数据如表 4 所示。

表 1 碳纤维性能参数

Table 1 Carbon fiber property parameters

参数	数值
纤维的纵向弹性模量/GPa	230
纤维的横向弹性模量/GPa	40
1,2 面内的切变模量/GPa	24
2,3 面内的切变模量/GPa	14.3
泊松比	0.25

表 2 基体性能参数

Table 2 Carbon matrix property parameters

基体弹性模量/GPa	基体泊松比
7.43	0.12

表 3 总体纤维体积分数理论值与实际值对比

Table 3 Comparison of the theoretical value and practical value for total fiber volume fraction

参数	理论值	实际值
$\varphi_{if}/\%$	46.6	
$\varphi_{sf}/\%$	59	
$\varphi_{cf}/\%$	61	
$\varphi_t/\%$	49.3	50

表 4 三维四向碳/碳复合材料纵向拉伸试验数据

Table 4 Three-dimensional four directional carbon/carbon composites longitudinal tensile test data

试验件 编号	强度/ MPa	平均强度/ MPa	弹性 模量/GPa	平均弹性 模量/GPa
1	387.86		98.36	
2	350.51		89.27	
3	370.63	367.38	96.44	94.61
4	366.06		97.16	
5	362.86		91.82	

通过 Ansys 软件 APDL 程序对三种单胞进行参数化建模, 施加周期性边界条件和位移载荷, 得到三种单胞相应的应力应变场, 表 5 给出了纵向弹性模量模拟预测值和试验值的对比结果。

算例 1 可以看到采用本文所建立的预测模型比内部单胞预测法的精度更高, 且表面单胞、角胞比内部单胞的纵向弹性模量更大, 这与采用内部单胞进行预测时结果偏小一致。

2.2 算例 2

对算例 1 试验件切边处理, 即将试验件沿宽度方向进行机械加工, 组分性能、工艺参数以及材料参数与算例 1 相同。试验件在切边处理后失去角胞以及部分内部单胞和表面单胞, 则可通过切边后试验件尺寸和单胞尺寸求得切边前后试验件内部单胞和表面单胞比率, 由于切边后无角胞, $\varphi_c = 0$, 故切边三维四向复合材料弹性模量由式(20)表示。

$$E_{\text{trim}} = \kappa_1 \varphi_i E_i + \kappa_2 \varphi_s E_s \tag{20}$$

式中 κ_1 、 κ_2 分别为切边前后内部单胞和表面单胞比率。

对试验件进行四种切边尺寸处理,原试验件

截面尺寸为 25 mm×3.5 mm,切边后试验件尺寸为 8 mm×3.5 mm,13 mm×3.5 mm,16 mm×3.5 mm 和 21 mm×3.5 mm。预测结果和试验结果对比如表 6 所示。

表 5 纵向弹性模量预测结果和试验结果对比

Table 5 Comparison of longitudinal elasticity modulus between predicted results and experimental results

方法	纵向弹性模量/GPa					误差/%
	内部单胞	表面单胞	角胞	整体复合材料	试验平均值	
本文预测方法	85.4	118	101.5	92.43	94.61	2.3
内部单胞预测法				85.4		9.7

表 6 预测结果和试验结果对比

Table 6 Comparison of predicted results and experimental results

试验件截面 尺寸/mm	方法	κ_1	κ_2	预测值	试验平均值	误差/%
8×3.5	本文预测方法	0.5	0.75	51.8	63.4	18.3
	内部单胞预测法			85.4		48.8
13×3.5	本文预测方法	0.71	0.85	68.3	72.5	5.8
	内部单胞预测法			85.4		17.8
16×3.5	本文预测方法	0.75	0.875	71.6	74.8	4.2
	内部单胞预测法			85.4		14.2
21×3.5	本文预测方法	0.82	0.9	76.9	81	5
	内部单胞预测法			85.4		5.4

表 6 可以很明显地看出当试验件尺寸较小时,两种预测方法精度均较差,随着试验件宽度变大,两种预测方法的精度都有明显的提高。内部单胞预测法在尺寸较小时的预测结果远远大于试验值,这是由于切边后的材料仅存在部分内部单胞和表面单胞,当材料尺寸较小时,切边作用造成的单胞损伤率高,实际作用的单胞数量较少(由 k_1 、 k_2 值可知),不考虑材料的单胞损伤进行预测将造成结果偏大。

3 结 论

本文基于细观单胞的思想,通过建立三维四向复合材料内部单胞、表面单胞以及角胞对三维四向碳/碳复合材料进行了刚度预测,结论如下。

1) 本文建立的单胞模型考虑纤维的截面形状、纱线的相互挤压以及三种单胞模型的不同纤维体积分数的影响,通过对比纤维体积分数的预测值和实际值,验证了参数的准确性。对三种单

胞分别建立了周期性约束模型,以此在有限元模型中施加相应的周期性边界条件,通过施加位移载荷,得到了三种单胞的应力应变场,然后利用所得到的平均应力除以平均应变,得到相应单胞的弹性常数。

2) 将计算三种单胞在复合材料中所占比例系数,加权到三种单胞的弹性模量中,得到复合材料的纵向弹性模量,对三维四向碳/碳复合材料进行纵向弹性模量预测,通过计算可知,表面单胞、角胞比内部单胞的纵向弹性模量更大,这与采用内部单胞进行预测时结果偏小一致。与试验值对比表明,除试验件宽度为 8 mm 误差较大以外,其他预测误差均在 5%左右,证明本文所建立的预测模型精度较高。

3) 对四种沿宽度方向切边加工的三维四向碳/碳复合材料进行纵向弹性模量预测,结果显示,本文所建立模型具有一定的预测精度,随着试验件宽度方向增大,预测精度逐渐增高,当试验件

宽度大于 13 mm 时,本文建立的预测方法精度良好。而内部单胞法由于切边作用造成的单胞损伤,实际作用的单胞数量减少,在尺寸较小时的预测结果远远大于试验值,总体的预测值均偏高。

参考文献:

[1] KO F K. Tensile strength and modulus of a three-dimensional braid composite[C]//Composite Materials: Testing and Design. Philadelphia, US: American Society for Testing and Materials, 1986:392-403.

[2] YANG J M, MA C L, CHOU T W. Elastic stiffness of three-dimensional braided textile structure composites[C]//Composite Materials: Testing and Design. Philadelphia, US: American Society for Testing and Materials, 1986: 404-421.

[3] 庞宝君,杜善义,王铎,等. 多向编织复合材料分析模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,1996,28(6):1-6.

PANG Baojun,DU Shanyi,WANG Duo,et al. An analytical model of 3D multi-directionally braided composites[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,1996,28(6):1-6. (in Chinese)

[4] 杨振宇,卢子兴. 三维四向编织复合材料弹性性能的理论预测[J]. 复合材料学报,2004,21(2):134-141.

YANG Zhenyu,LU Zixing. Theoretical prediction of the elastic properties of three-dimensional and four-directional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004,21(2):134-141. (in Chinese)

[5] 袁辉. 碳/碳复合材料刚度与强度预测模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2009.

YUAN Hui. Research on prediction models for stiffness and strength of C/C composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2009. (in Chinese)

[6] 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 composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2006,23(5):154-160. (in Chinese)

[7] 徐焜,许希武. 三维编织复合材料渐进损伤的非线性数值分析[J]. 力学学报,2007,39(2):398-407.

XU Kun,XU Xiwu. Nonlinear numerical analysis of progressive damage of 3D braided composites[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39 (2):398-407. (in Chinese)

[8] KANG T J, KIM S, JUNG K. Prediction of mechanical properties of 3-D braided composite using CAD system [J]. Textile Research Journal,2008,78(2):174-182.

[9] WIMMER J,STIER B,SIMON J W et al. Computational homogenisation from a 3D finite element model of asphalt concrete:linear elastic computation[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2016,110:43-57.

[10] 冯驰,吴晓青. 三维编织预制件单胞模型的参数化[J]. 玻璃钢/复合材料,2007,(2):12-15.

FENG Chi,WU Xiaoping. Parameterized unit cell model of 3D braided perform[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2007(2):43-57. (in Chinese)

[11] 朱元林,崔海涛,温卫东,等. 含纤维束截面形状变化的三维编织复合材料细观模型及刚度预报[J]. 复合材料学报, 2012,29(6):135-145.

ZHU Yuanlin,CUI Haitao,WEN Weidong,et al. Micro-structure model and stiffness prediction of 3D braided composites considering yarns' cross-section variation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29 (6): 135-145. (in Chinese)

[12] 郑锡涛,叶天麒. 三维四向编织复合材料弹性性能细观分析[J]. 机械强度,2003,25(5):504-508.

ZHENG Xitao,YE Tianqi. Microstruture analysis on the elastic behavior of 3D braided composites[J]. Journal of Mechanical Strength,2003,25(5):504-508. (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.

FENG 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] 徐焜,许希武. 三维五向编织复合材料宏细观力学性能分析[J]. 宇航学报,2008,29(3):1053-1058.

XU Kun,XU Xiwu. Mechanical analysis of 3D five-directional braided composites based on unit cell[J]. Journal of Astronautics,2008,29(3):1053-1058. (in Chinese)

[15] 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,et al. Evaluation of elastic properties of 3-D 4-direction braided composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24 (11): 2514-2520. (in Chinese)

[16] 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.

[17] XIA Z H,ZHANG Y F,ELLYIN F. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications[J]. International Journal of Solids and Structures,2003,40(8):1907-1921.

(编辑:陈 越)