

文章编号:1000-8055(2011)11-2459-09

2.5 维 C/SiC 复合材料单胞模型及刚度预测

孔春元, 孙志刚, 高希光, 宋迎东
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 通过提取 2.5 维 C/SiC 复合材料经纱边界曲线, 采用鲁棒最小二乘拟合得到了经纱轴向函数表达式, 对拟合后的曲线进行合理简化, 建立了参数化的 2.5 维 C/SiC 复合材料的有限元模型. 采用双尺度模型对 2.5 维 C/SiC 复合材料进行刚度预测, 分别为考虑纤维/基体/孔隙的微观尺度和考虑经纱/纬纱/孔隙的单胞尺度模型, 刚度预测的方法采用刚度平均法和能量法. 最后讨论了微观尺度的孔隙率对 2.5 维 C/SiC 复合材料弹性模量的影响. 结果表明, 刚度平均法和能量法的计算结果差异较小, 考虑微观孔隙率后, 计算结果与试验结果吻合得更好.

关 键 词: 2.5 维 C/SiC 复合材料; 鲁棒最小二乘; 双尺度模型; 刚度平均法; 孔隙率

中图分类号: V258; TB33

文献标志码: A

Unit cell of 2.5 dimension C/SiC and its stiffness prediction

KONG Chun-yuan, SUN Zhi-gang, GAO Xi-guang, SONG Ying-dong

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A kind of unit cell for 2.5 dimension C/SiC composites was established by extracting the boundary of warp, fitting the curve using robust least square and simplifying the fitted curve. The elastic properties of 2.5 dimension C/SiC composites were predicted using dual-scale model; the dual-scale model was micro-scale which considered the scale of matrix/fiber/pore, and also meso-scale which considered the scale of warp/weft/cavity. The method for predicting the elastic properties of 2.5 dimension C/SiC composites was stiffness average method and energy method; finally the relationship between the porosity in the micro-scale and the elastic properties of 2.5 dimension C/SiC composites was discussed. Numerical results show that the theoretical results using energy method and stiffness average method have little difference; when considering the micro-scale porosity, the theoretical results can fit the experimental results better.

Key words: 2.5 dimension C/SiC composites; robust least square; dual-scale model; stiffness average method; porosity

陶瓷基复合材料(CMCs)在高温条件下具有高的比刚度和比强度^[1], 是未来航空发动机热端部件理想备选材料之一. 2.5 维编织 C/SiC 复合材料体现了二维编织工艺简单和三维编织层间性能优良两方面优点, 加强了层间的连接、淡化了层

的概念, 改进了层间层内强度、损伤容限和热应力失配, 得到了越来越广泛的关注^[2]. 对 2.5 维编织 C/SiC 复合材料的力学性能进行研究, 首先要对其刚度进行研究. 这种材料的刚度主要由其组成项的性能决定, 如经纱、纬纱的截面与轴向, 材料

收稿日期: 2010-12-14; 修订日期: 2011-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51075204); 航空科学基金(2009ZB52028); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目

作者简介: 孔春元(1982-), 男, 河南济源人, 博士生, 主要研究方向是复合材料结构优化设计.

体积分数等,其中经纱、纬纱的截面形状的特点和轴向对材料刚度有很大影响。另一方面,在复合材料制备过程中也会对纱线的几何形态造成较大的影响,因此对这种材料进行刚度预测就必须从材料成型后的细观结构入手。

目前,对2.5维C/SiC复合材料细观结构的研究还不充分,较少有人考虑材料加工过程对2.5维C/SiC复合材料结构的影响。董伟锋等^[3]、郑君等^[4]和杨振宇等^[5]对2.5维编织复合材料细观模型进行了研究。其中董伟锋等^[3]将纱线截面假设为圆形,假设经纱轴向为正弦曲线。郑君等^[4]指出董伟锋等^[3]将纱线截面假设为圆形与实际情况有较大的差距,不能反映2.5维复合材料成型后的细观结构。郑君等^[4]和杨振宇等^[5]将纬纱截面假设为双凸透镜,这与Vandeuren等^[6]的研究结果相一致,他们同时将经纱的轴向定义为曲线与直线段相连。Chang等^[7]将陶瓷基复合材料的经纱、纬纱简化为复合材料杆,同时假设经纱轴向为正弦函数,纬纱平直,纱线截面为椭圆形。常岩军等^[2]将经纱定义为正弦函数,这比郑君等^[4]的工作要更符合实际情况,但是他们并没有分析将经纱轴向定义为正弦曲线后与原始经纱轴向之间的差异情况,对于2.5维复合材料成型后的经纱轴向进行标定仍是一件必要的工作。

对于刚度预测模型的研究已经开展多年,其主要模型有Whitney等^[8]的纤维倾斜模型,Byun等^[9]的刚度平均模型和有限元方法。对于2.5维复合材料而言,刚度平均模型应用的较多,董伟锋等^[3]、郑君等^[4]采用此方法对2.5维树脂基复合材料进行了刚度预测,Chang等^[7]和杨振宇等^[5]采用此方法对2.5维陶瓷基复合材料进行了刚度预测。Chang等^[7]指出树脂基复合材料的刚度预测方法不能直接应用于陶瓷基复合材料,其主要是由于工艺原因,陶瓷基复合材料在纤维束内部(微观尺度)和由纤维束组成的编织结构(单胞尺度)中均存在孔隙,是一种多孔材料。Chang等^[7]的模型考虑了单胞尺度的孔隙,但是由于忽略了纤维束内部的孔隙,导致预测结果比试验结果偏高。

采用有限元方法对编织结构的力学性能进行研究已经逐步开展起来^[10]。Ivanov等^[11]和Lomov等^[12]分别对平纹编织结构建立了有限元模型,并进行了细观应变场的研究。许英杰,汪海滨等^[13-14]建立了平纹编织结构的有限元模型,并进行了刚度预测。Dong等^[15]、杨振宇等^[5]建立了

2.5维编织结构的有限元模型,但是他们的模型没有考虑编织结构中存在的孔隙,所以不能直接应用到2.5维C/SiC复合材料的刚度预测中来。

通过以上分析可以看出,董伟锋等^[3]、郑君等^[4]、Chang等^[7]和杨振宇等^[5]采用的刚度计算模型不能直接应用到2.5维C/SiC复合材料的刚度预测中。对2.5维C/SiC复合材料的刚度进行预测,其模型必须考虑微观尺度和单胞尺度的孔隙。基于以上分析,本文的工作主要从以下两个方面展开:①建立2.5维C/SiC复合材料有限元单胞模型,将经纱截面假设为矩形,其轴向通过鲁棒最小二乘拟合曲线得到;纬纱截面采用双凸透镜形,其轴向平直;将经纱、纬纱等效为复合材料杆。②采用双尺度模型预测2.5维C/SiC复合材料的刚度。在微观尺度模型中,考虑纤维束内部的纤维/基体/孔隙的材料属性及其体积分数,计算得到纤维束的刚度;将纤维束的刚度带入单胞有限元模型,计算得到编织结构的整体刚度。

1 刚度预测模型

1.1 经纱轴向的标定

对成型后2.5维C/SiC复合材料的经纱拍摄显微照片,提取其边界,采用鲁棒最小二乘对曲线进行拟合,最后对拟合曲线进行合理简化,从而实现经纱轴向的标定。

图1所示为纬纱截面,点1为坐标原点,点1与点2可以确定 x 轴方向及单位长度,点1与点3可以确定 y 轴方向及单位长度。图中黑色点连成的曲线为经纱边界。

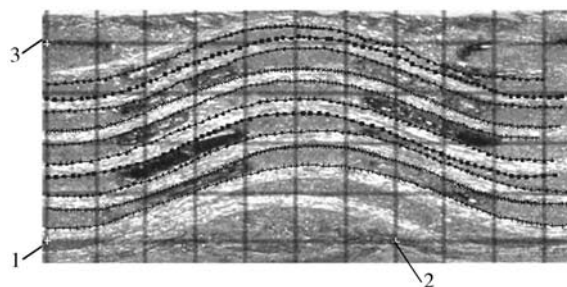


图1 纬纱截面

Fig. 1 Section of weft yarn

将提取的曲线进行归一化处理,采用鲁棒最小二乘法对其进行拟合,拟合函数采用傅里叶函数,鲁棒最小二乘的计算过程^[16]如图2所示。

第二步中,计算调整残差的公式^[16]为

$$r_{\text{adj}} = \frac{r_i}{\sqrt{1-h_i}} \quad h = \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \quad (1)$$

其中 r_i 为普通最小二乘法的残差, h_i 为残差调整杠杆值, 用于降低输入误差的权重。

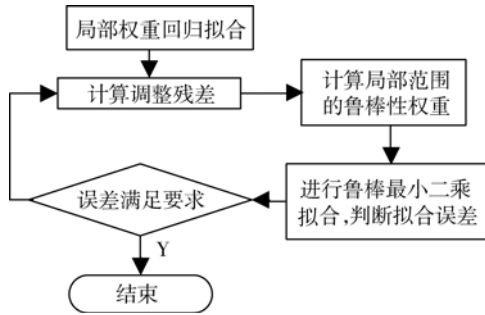


图 2 鲁棒最小二乘计算流程

Fig. 2 Flow of robust least square

标准调整残差公式^[16]为

$$u = \frac{r_{adj}}{K \cdot s} \quad s = \frac{M(r_i)}{0.6745} \quad (2)$$

其中 K 为调整参数, 其值为 4.685; s 为鲁棒性偏差; M 为残差的中值绝对偏差。

第三步中, 计算鲁棒性权重的公式^[16]为

$$W_i = \begin{cases} (1 - u_i^2)^2 & |u_i| < 1 \\ 0 & |u_i| \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

拟合完成的曲线如图 3 所示。图 3 中黑线表示为拟合后的曲线。可以看出, 拟合后的曲线较好的反映了原始数据的特点。

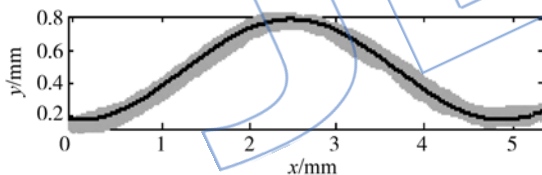


图 3 鲁棒最小二乘拟合结果

Fig. 3 Result of robust least square

鲁棒最小二乘拟合的结果如式(4)所示

$$\begin{cases} Y = a_0 + a_1 \cos(\omega \cdot x) + b_1 \sin(\omega \cdot x) \\ a_0 = 0.3388 \quad (0.3378, 0.3399) \\ a_1 = -0.3041 \quad (-0.3052, -0.303) \\ b_1 = -0.0295 \quad (-0.03274, -0.02627) \\ \omega = 1.307 \quad (1.303, 1.311) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 a_0 的值为 0.3388, 括号中的值为置信度为 95% 时的置信区间, a_1, b_1, ω 与 a_0 类似。 a_0 为函数在 y 方向的平移, 只影响函数结果的大小, 对函数形态没有影响, 故 a_0 可以省略; b_1 相对于 a_1 而言较小, 将其忽略可以简化拟合后的函数, 并且不会对函数的形态造成较大的影响。

从图 1 可以看出, 2.5 维编织复合材料结构中, 经纱曲线峰谷之间的高度为两根经纱高度和两根纬纱高度之和, 则三角函数的幅值 a_1 可以用 $J_h + W_h$ 来表示, 其中 J_h 为经纱高度, W_h 为纬纱高度; ω 是函数的周期, 为 $2\pi/J_s$, 其中 J_s 为经纱一个重复周期的长度, 则经纱轴向曲线可以简化为

$$Y = (J_h + W_h) \cos[(2\pi/J_s)x] \quad (5)$$

简化后的经纱轴向与 Chang 等^[2,7]采用的模型类似, 通过对经纱的标定可以看出, 采用正弦或余弦曲线可以比较精确地描述 2.5 维复合材料成型后的经纱轴向。

1.2 单胞模型

2.5 维 C/SiC 单胞模型的参数为: 经纱高度 J_h 、经纱宽度 J_w 、经纱跨度 J_s 、纬纱高度 W_h 、纬纱宽度 W_w 。2.5 维复合材料单胞几何模型如图 4 所示, 图中纬纱截面为双凸透镜形, 经纱截面采用矩形。

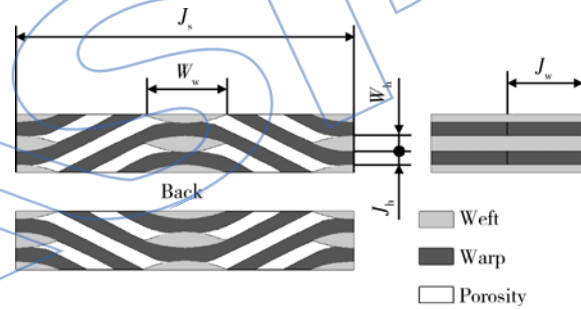


图 4 2.5 维复合材料单胞模型

Fig. 4 Unit cell of 2.5 dimension composite

2.5 维 C/SiC 复合材料完整的单胞模型分为前后两部分, 前半部分的经纱轴向可以用曲线方程 $-Y$ 表示, 后半部分的经纱轴向可以用曲线方程 Y 表示, 则经纱纤维轴向与 x 轴夹角为可以通过式(6)和(7)确定。

$$\theta_1 = \arctan \left[(J_h + W_h) \frac{2\pi}{J_s} \sin \left[\frac{2\pi \cdot x}{J_s} \right] \right] \quad (6)$$

$$\theta_2 = \arctan \left[- (J_h + W_h) \frac{2\pi}{J_s} \sin \left[\frac{2\pi \cdot x}{J_s} \right] \right] \quad (7)$$

其中 θ_1 为单胞模型前半部分经纱中某一单元的纤维轴向与 x 轴的夹角, θ_2 单胞模型后半部分经纱中某一单元的纤维轴向与 x 轴的夹角, x 为单胞模型中单元的 x 坐标, 其余参数与公式(5)相同。

图 5 给出了有限元中单胞前、后两部分的有限元模型和经纱的材料主方向, 图中黑线为经纱纤维

轴向,与黑线垂直的方向为经纱纤维横向,从中可以看出,经纱的纤维轴向与标定的函数保持一致。

完整的单胞模型如图6所示,该单胞模型中方向“1”为经纱方向,方向“3”为纬纱方向。

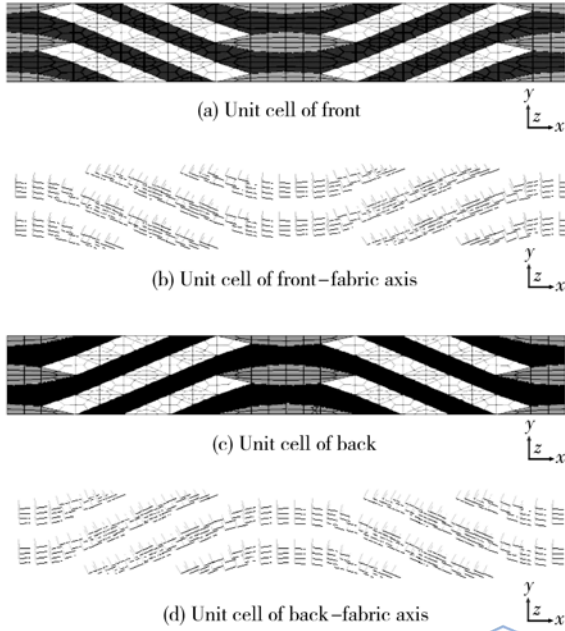


图5 单胞模型及经纱纤维轴向
Fig. 5 Unit cell and fabric axis

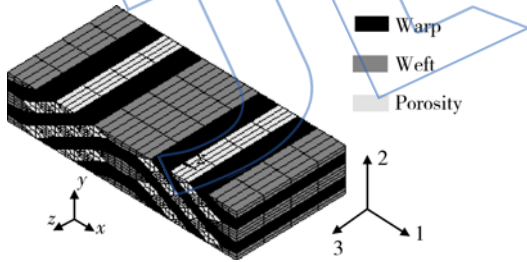


图6 完整的单胞模型
Fig. 6 A total unit cell

1.3 能量法刚度预测原理

假设微观结构由孔隙、纤维和基体组成,在宏观上可以将此不均匀的微结构等效成均质等效体。图7为微结构等效前后示意图。

等效体的应力为微观结构的平均应力,等效体的应变为微观结构的平均应变,用公式可以表示为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^N \sigma_{ij}^n \Delta V^n \quad (8)$$

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^N \epsilon_{ij}^n \Delta V^n \quad (9)$$

其中 $\bar{\sigma}_{ij}$ 为等效体的应力, σ_{ij}^n 为微观结构的单元

局部应力, $\bar{\epsilon}_{ij}$ 为等效体的应变, ϵ_{ij}^n 为微观结构的单元局部应变, ΔV^n 为微观结构单元的体积, N 为单元数, V 为等效体的体积。

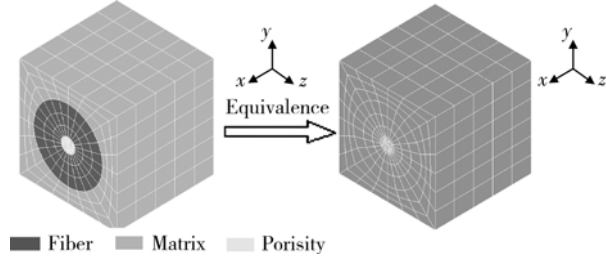


图7 微结构示意图

Fig. 7 Illustration of microstructures

等效体的应力应变关系可以表示为

$$\bar{\sigma}_{ij} = C_{ii'jj'} \bar{\epsilon}_{i'j'} \quad (10)$$

其中 $C_{ii'jj'}$ 为等效体的弹性矩阵。

微观结构的弹性应变能为

$$E = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \sigma_{ij}^n \cdot \epsilon_{ij}^n \cdot \Delta V^n = \frac{1}{2} C_{ii'jj'} \bar{\epsilon}_{i'j'}^2 \quad (11)$$

通过给定特定的应变场边界条件,可以计算出微结构的单位体积应变能,再根据应变能计算得到微结构的等效弹性常数。

利用表1中的结果,即可求出微结构的等效刚度矩阵,即

表1 微结构应变场工况条件及相应的应变能^[13]

Table 1 Boundary conditions of microstructure and corresponding strain energy

边界条件	应变能
$\bar{\epsilon}_{(1)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$E^{(1)} = \frac{1}{2} C_{1111}^{(H)} V$
$\bar{\epsilon}_{(2)} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$E^{(2)} = \frac{1}{2} C_{2222}^{(H)} V$
$\bar{\epsilon}_{(3)} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$E^{(3)} = \frac{1}{2} C_{3333}^{(H)} V$
$\bar{\epsilon}_{(4)} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$	$E^{(4)} = \frac{1}{2} C_{1212}^{(H)} V$
$\bar{\epsilon}_{(5)} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$	$E^{(5)} = \frac{1}{2} C_{2323}^{(H)} V$
$\bar{\epsilon}_{(6)} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$	$E^{(6)} = \frac{1}{2} C_{3131}^{(H)} V$
$\bar{\epsilon}_{(7)} = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$E^{(7)} = \frac{1}{2} (2C_{1122}^{(H)} + C_{1111}^{(H)} + C_{2222}^{(H)}) V$
$\bar{\epsilon}_{(8)} = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$E^{(8)} = \frac{1}{2} (2C_{2233}^{(H)} + C_{2222}^{(H)} + C_{3333}^{(H)}) V$
$\bar{\epsilon}_{(9)} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$E^{(9)} = (2C_{1133}^{(H)} + C_{1111}^{(H)} + C_{3333}^{(H)}) V$

$$\begin{bmatrix}
 \frac{2E^{(1)}}{V} & \frac{E^{(7)} - E^{(2)} - E^{(1)}}{V} & \frac{E^{(9)} - E^{(3)} - E^{(1)}}{V} & 0 & 0 & 0 \\
 & \frac{2E^{(2)}}{V} & \frac{E^{(8)} - E^{(2)} - E^{(3)}}{V} & 0 & 0 & 0 \\
 & & \frac{2E^{(3)}}{V} & 0 & 0 & 0 \\
 & & & \frac{2E^{(4)}}{V} & 0 & 0 \\
 & & & & \frac{2E^{(5)}}{V} & 0 \\
 & & & & & \frac{2E^{(6)}}{V}
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \text{sym}
 \end{matrix}
 \quad (12)$$

对等效刚度矩阵求逆得到等效柔度矩阵,用 S' 表示,则复合材料等效弹性常数

$$\begin{aligned}
 E'_1 &= \frac{1}{S'_{11}}, \quad E'_2 = \frac{1}{S'_{22}}, \quad E'_3 = \frac{1}{S'_{33}} \\
 G'_{23} &= \frac{1}{S'_{44}}, \quad G'_{13} = \frac{1}{S'_{55}}, \quad G'_{12} = \frac{1}{S'_{66}} \\
 \nu'_{12} &= -S'_{12} \cdot E'_1, \quad \nu'_{13} = -S'_{13} \cdot E'_1 \\
 \nu'_{23} &= -S'_{23} \cdot E'_2
 \end{aligned}
 \quad (13)$$

对单胞模型进行刚度预测时,首先利用能量法对微观结构进行计算,可以得到纤维束的刚度矩阵;将计算得到的结果带入 2.5 维 C/SiC 复合材料单胞模型中,利用能量法即可求得编织结构的刚度矩阵。

1.4 刚度平均法刚度预测原理

刚度平均模型基于等应变假设,在全局坐标系下,等应变公式表示为

$$\epsilon_{ij}^{(k)} = \bar{\epsilon}_{ij} \quad (14)$$

其中 (k) 表示第 k 种组分材料或第 k 个单元。

在局部坐标系下,单元或组分材料的应力-应变关系可以表示为

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (15)$$

在全局坐标系中,单胞模型的整体应力-应变关系表示为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \bar{C}_{ijkl} \bar{\epsilon}_{kl} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}_{ij} &= [\bar{\sigma}_{11} \quad \bar{\sigma}_{22} \quad \bar{\sigma}_{33} \quad \bar{\sigma}_{12} \quad \bar{\sigma}_{23} \quad \bar{\sigma}_{13}] \\
 \bar{\epsilon}_{ij} &= [\bar{\epsilon}_{11} \quad \bar{\epsilon}_{22} \quad \bar{\epsilon}_{33} \quad \bar{\epsilon}_{12} \quad \bar{\epsilon}_{23} \quad \bar{\epsilon}_{13}]
 \end{aligned}$$

式中 $\bar{C}_{ijkl}$ 为等效刚度矩阵。

微观尺度中,刚度平均模型主要考虑纤维、基体、孔隙的材料属性和体积百分比。各组分材料的全局坐标系下的主应力、主应变方向与局部坐标系下的主应力、主应变方向相同,由平均应力的定义可知

$$\bar{\sigma}_{ij} = \left[\frac{1}{V} \sum_{k=1}^n C_{ijkl}^{(k)} \Delta V^{(k)} \right] \bar{\epsilon}_{kl} \quad (17)$$

其中 $C_{ijkl}^{(k)}$ 为第 k 个组分材料的刚度矩阵; ϵ_{kl} 为任一组分材料的应变; $\Delta V^{(k)}$ 为第 k 个组分材料的体积, V 总体积, n 为组分材料的数量。

由等应变假设,微观尺度的刚度平均模型为

$$C_w = v_f C_f + v_m C_m + v_c C_c \quad (18)$$

其中 C_w 为纤维束的刚度矩阵, v_f 为纤维的体积百分比, C_f 为纤维的刚度矩阵; v_m 为基体的体积百分比, C_m 为基体的刚度矩阵; v_c 为孔隙的体积百分比, C_c 为孔隙的刚度矩阵; v_f, v_m, v_c 的和等于 1, 组分材料的刚度矩阵可以通过材料的柔度矩阵 S 求逆得到。

柔度矩阵 S 为

$$S = \begin{bmatrix}
 \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{\nu_{23}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}}
 \end{bmatrix}$$

其中 E_i 表示材料的拉伸弹性模量, ν_{ij} 表示材料泊松比, G_{ij} 表示材料剪切模量。

在单胞尺度中,经纱和纬纱材料局部坐标系下的主应力、主应变方向与全局坐标系下的主应力、主应变方向存在一定的夹角,材料的等效刚度矩阵为

$$\bar{C}_{ijkl} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^n (T \cdot C_{ijkl}^{(k)} \cdot T^T \cdot \Delta V^{(k)}) \quad (19)$$

其中 $C_{ijkl}^{(k)}$ 为第 k 个单元的材料刚度矩阵,其值为 C_w , 通过微观模型得到; $\Delta V^{(k)}$ 为单胞模型中第 k 个单元的体积, V 为单胞的体积, n 为单元数, T

为张量转换矩阵.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2m_1n_1 & 2n_1l_1 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 & 2l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 & 2l_3m_3 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 & l_2m_3 + l_3m_2 \\ l_3l_1 & m_3m_1 & n_3n_1 & m_1n_3 + m_3n_1 & n_1l_3 + n_3l_1 & l_1m_3 + l_3m_1 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 & l_1m_2 + l_2m_1 \end{bmatrix}$$

式中 l_i, m_i, n_i 分别表示材料三个主方向与全局坐标系三个方向的方向余弦.

对于经纱,材料的方向余弦分别为

$$l = [\cos(\theta^{(k)}), \cos(90 - \theta^{(k)}), 0]$$

$$m = [\cos(90 + \theta^{(k)}), \cos(\theta^{(k)}), 0]$$

$$n = [0, 0, 1].$$

对于纬纱,材料的方向余弦分别为

$$l = [0, 0, 1],$$

$$m = [0, 1, 0],$$

$$n = [1, 0, 0].$$

将公式(19)求逆后,利用公式(13)可以求得编织结构的等效弹性常数.

2 试验验证

为了验证刚度预测模型的正确性,对利用 CVI (chemical vapor infiltration) 工艺制成的 2.5 维 C/SiC 复合材料进行拉伸试验,试验使用的 2.5 维 C/SiC 复合材料由上海硅酸盐研究所制备.2.5 维 C/SiC 复合材料试件的制备过程如下:将材料为 T300 的纤维束制成 2.5 维预制体,通过 CVI 法在预制体表面和内部沉积热解碳作为界面层,再通过 CVI 法沉积 SiC 基体,最后进行机械加工,加工成试验用试件,试件尺寸如图 8 所示.

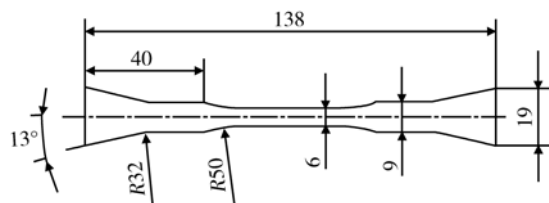


图 8 试件几何形状(单位:mm)

Fig. 8 Geometry of specimen(unit:mm)

进行试验时,首先将楔形夹头放入试验机的液压夹头中,同时采用定位块检验上下楔形夹头对中性,防止加载时产生附加载荷,保证试验过程为单轴拉伸.然后将试件放入夹头 2 后,装入楔形

夹头,预加 0.02 kN 的初始载荷,以消除试件与定位块之间的间隙,最后锁紧试件,同时安装引伸计,用来记录拉伸试验过程的应变,从而完成试件的装夹.夹具与试件的安装如图 9 所示.

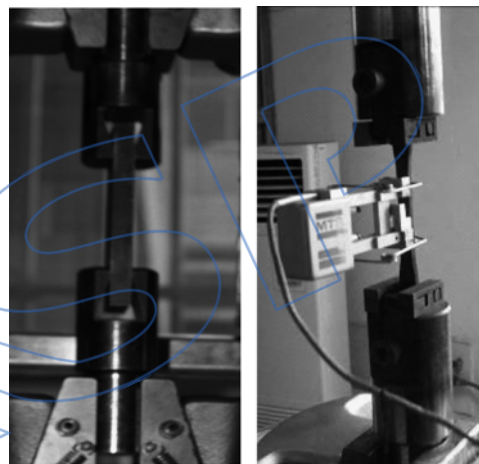


图 9 夹具与试件安装

Fig. 9 Fixture and specimen installation

试验时,测量每根试件的实际宽度和厚度,将结果输入 MTS809 试验机,然后对 4 根经向试件和 4 根纬向试件进行准静态拉伸,试验机的加载速率为 0.05 mm/min.

对编织结构进行刚度预测时,首先计算微观尺度的刚度.由于 C/SiC 复合材料是一种多孔材料,材料的微观尺度的孔隙率在 0%~10%之间^[1],假设微观尺度上的孔隙仅存在于基体中,则纤维束内部的纤维体积含量为 59.5%,基体的体积含量为 30.5%~40.5%.然后将微观尺度的刚度计算结果带入单胞尺度的有限元模型,对编织结构进行刚度预测.单胞模型的几何参数通过对显微照片测量得到,共测得 493 组数据,数据如图 10 所示,图中各个参数的含义与公式(5)相同.从图中可以看出,复合材料成型后,其结构存在一定的分散性,但是分散性较小.表 2 给出了各个参数的均值.表 3 给出了室温条件下纤维、基体的材料属性.

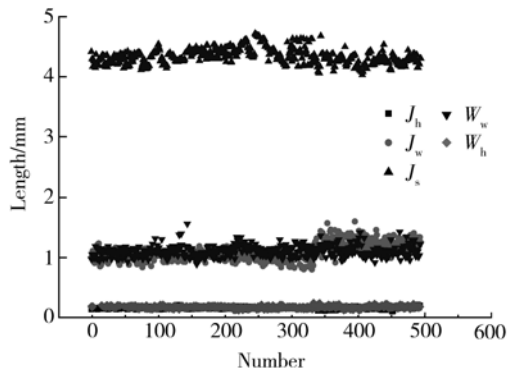


图 10 单胞模型几何尺寸测量结果

Fig. 10 Geometry measurements of unit cell

表 2 单胞模型几何尺寸(均值)

Table 2 Geometry of unit cell (mean value)

经纱 跨度/mm	经纱 宽度/mm	经纱 高度/mm	纬纱 宽度/mm	纬纱 高度/mm
4.26	1.015	0.169	1.053	0.199

表 3 纤维和基体的弹性性能^[1]

Table 3 Elastic modulus for the composite phases

	$E_1 /$ GPa	$E_2 /$ GPa	$G_{12} /$ GPa	$G_{23} /$ GPa	ν_{12}	ν_{23}
C	211	13.8	9	4.8	0.2	0.25
SiC	350	350	140	140	0.25	0.25

表 4、表 5 给出了微观孔隙率为零时,微观尺度/单胞尺度的刚度矩阵。其中,“/”前为微观尺度的刚度,“/”后为单胞尺度的刚度,表 4 的刚度预测方法为能量法,表 5 为刚度平均法。对比表 4、表 5 的计算结果可以看出,两种方法计算的结果非常接近,仅在单胞尺度的 C_{33} 、 C_{44} 中存在微小差异。

表 6 给出了微观孔隙率为零时,预测的经向、纬向的弹性模量以及试验结果。其中,刚度平均法预测的经向模量为 152.8 GPa,与试验结果的误

差为 10.4%,纬向模量为 128.2 GPa,与试验结果的误差为 13.5%;能量法预测的经向模量为 151.9 GPa,与试验结果的误差为 9.8%,纬向模量为 127.5 GPa,与试验结果的误差为 12.8%。

表 4 能量法计算得到的微观/单胞尺度的刚度矩阵
(单位:GPa)

Table 4 Stiffness matrix in micro/meso scale by using energy method (unit:GPa)

302/174	58/47	59/41	0	0	0
58/47	179/125	59/41	0	0	0
59/41	59/41	179/145	0	0	0
0	0	0	59/47	0	0
0	0	0	0	62/41	0
0	0	0	0	0	62/43

表 5 刚度平均法计算得到的微观/单胞尺度的刚度矩阵
(单位:GPa)

Table 5 Stiffness matrix in micro/meso scale by using stiffness average method (unit:GPa)

302/174	58/47	59/41	0	0	0
58/47	179/125	59/41	0	0	0
59/41	59/41	179/146	0	0	0
0	0	0	59/48	0	0
0	0	0	0	62/41	0
0	0	0	0	0	62/43

表 6 中的预测结果由于没有考虑微观尺度的孔隙率,导致预测结果比试验值稍大。图 11 给出了微观尺度上孔隙率从 0~0.1 变化时,经向和纬向弹性模量的变化规律。从图中可以看出,随着微观尺度上孔隙率的增加预测的经向与纬向的弹性模量呈现下降趋势,并且采用能量法预测的结果比刚度平均法略小。

表 6 预测弹性模量与试验值的比较

Table 6 Predicted elastic modulus compared with the experimental values

计算方法	经向模量			纬向模量		
	计算值/GPa	试验值(均方差)/GPa	误差/%	计算值/GPa	试验值(均方差)/GPa	误差/%
刚度平均法	152.8	138.4	10.4	128.2	113	13.5
能量法	151.9	(18.0)	9.8	127.5	(18.5)	12.8

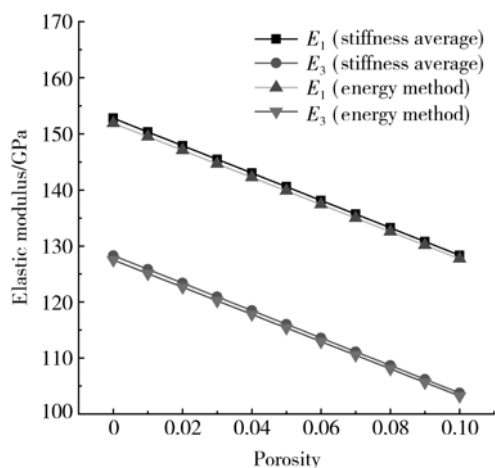


图11 微观孔隙率对经向和纬向弹性模量的影响

Fig. 11 Warp and weft stiffness with different micro-porosity

Puglia 等^[17]对平纹编织陶瓷基复合材料(CMC)的微观孔隙率进行了分析,他们的研究表明,平纹编织 CMC 复合材料的微观孔隙率约为 0.03。当孔隙率为 0.03 时,采用刚度平均法预测的经向模量为 145.5 GPa,与试验结果的误差为 5.4%,纬向模量为 120.9 GPa,与试验结果的误差为 7.0%;采用能量法预测的经向模量为 144.7 GPa,与试验结果的误差为 4.6%,纬向模量为 120.2 GPa,与试验结果的误差为 6.4%。

3 结果与讨论

本文提取了 2.5 维 C/SiC 复合材料的细观参数,建立了单胞模型,并且建立了可以同时考虑纤维束内部的微观孔隙和单胞尺度的孔隙的刚度预测模型,并且能量法与刚度平均法计算结果相近。当考虑微观孔隙率时,能量法与刚度平均法的计算结果与试验结果吻合的更好。

计算结果表明,微观尺度孔隙率对于 2.5 维 C/SiC 复合材料的刚度预测十分重要,未来进一步的工作应当对采用 CVI 工艺制备的 2.5 维 C/SiC 复合材料的微观孔隙率进行测量。

参考文献:

[1] Dalmaz A, Ducret D, Guerjouma R E, et al. Elastic moduli of a 2.5D Cf/SiC composite: experimental and theoretical estimates[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(6): 913-925.

[2] 常岩军, 矫桂琼, 王波, 等. 倾斜内锁型三维机织陶瓷基复合材料的细观力学模型[J]. 应用力学学报, 2007, 24(1): 146-150.

CHANG Yanjun, JIAO Guiqiong, WANG Bo, et al. Micro-

mechanical model for elastic properties of 3D angle-interlock woven ceramic composites[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(1): 146-150. (in Chinese)

- [3] 董伟锋, 肖军, 李勇, 等. 2.5 维编织复合材料弹性性能的理论研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(5): 659-663.
- DONG Weifeng, XIAO Jun, LI Yong, et al. Theoretical study on elastic properties of 2.5D braided composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(5): 659-663. (in Chinese)
- [4] 郑君, 温卫东, 崔海涛, 等. 2.5 维机织结构复合材料的弹性性能预测[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2031-2035.
- ZHENG Jun, WEN Weidong, CUI Haitao, et al. Elastic property prediction of 2.5 dimensional woven structures[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 2031-2035. (in Chinese)
- [5] 杨振宇, 俸翔, 苏洲, 等. 2.5D 编织复合材料细观结构及弹性性能[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(2): 67-71.
- YANG Zhenyu, FENG Xiang, SU Zhou, et al. Meso-structure and elastic properties of 2.5D braided composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(2): 67-71. (in Chinese)
- [6] Vandeurzen P, Ivens J, Verpoest I. A three-dimensional micromechanical analysis of woven-fabric composites II: elastic analysis[J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(11): 1317-1327.
- [7] Chang Y, Jiao G, Wang B, et al. Elastic behavior analysis of 3D angle-interlock woven ceramic composites[J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 19(2): 152-159.
- [8] Whitney T J, Chou T W. Modeling of three-dimensional angle-interlock textile structural composite[J]. Journal of Composite Materials, 1989, 23(9): 890-911.
- [9] Byun J H, Chou T W. Elastic properties of three-dimensional angle-interlock fabric perform[J]. Journal of Textile Institute, 1990, 81(4): 538-548.
- [10] Ayranci C, Carey J. 2D braided composites: a review for stiffness critical applications[J]. Composite Structures, 2008, 85(1): 43-58.
- [11] Ivanov D, Ivanov S, Lomov S, et al. Strain mapping analysis of textile composites next term[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 47(3-4): 360-370.
- [12] Lomov S V, Ivanov D S, Verpoest I, et al. Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(8): 1218-1231.
- [13] 许英杰, 张卫红, 杨军刚. 平纹机织多元多层碳化硅陶瓷基复合材料的等效弹性模量预测[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1350-1355.
- XU Yingjie, ZHANG Weihong, YANG Jungang, et al. Prediction of effective elastic modulus of plain weave multi-phase and multi-layer silicon carbide ceramic matrix composite[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1350-1355. (in Chinese)

- [14] 汪海滨,张卫红,许英杰. C/C-SiC 机织复合材料尺度参数对力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2010, 27(5): 93-100.
WANG Haibin, ZHANG Weihong, XU Yingjie. Effects of different scale parameters on effective modulus of woven C/C-SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(5): 93-100. (in Chinese)
- [15] Dong W F, Xiao J, Li Y. Finite element analysis of the tensile properties of 2.5D braided composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 457(1-2): 199-204.
- [16] 赵冬青,赵振峰. 基于改进鲁棒最小二乘法的发动机试验数据处理[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 338-342.
ZHAO Dongqing, ZHAO Zhenfeng. Application of improved robust least-square method to experimental data processing of engine[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 338-342. (in Chinese)
- [17] Puglia P D, Sheikh M A, Hayhurst D R. Classification and quantification of initial porosity in a CMC laminate[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(2): 223-230.

JAS