

文章编号: 1000 8055(2008) 11- 2031- 05

2.5 维机织结构复合材料的弹性性能预测

郑 君, 温 卫东, 崔海涛, 高建辉
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 基于经纱矩形截面及纬纱双凸透镜截面假设, 重点考虑了该结构表层经纱与内部经纱密度的不同及相同机织结构合成不同厚度和纤维束截面的情况, 建立了 2.5 维机织复合材料的弹性性能预测模型. 同时, 试验测定了 6 种结构 62 个试件的弹性模量. 数值预测与试验结果对比表明: 研究建立的弹性性能预测模型可以较好地反映 2.5 维机织复合材料的内部结构; 在 2.5 维机织复合材料弹性模量预测中, 表层与内部经纱的差异不可忽略.

关 键 词: 复合材料; 2.5 维机织; 弹性性能; 预测模型

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Elastic property prediction of 2.5 dimensional woven structures

ZHENG Jun, WEN Wei dong, CUI Hai tao, GAO Jian hui

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Based on the hypothesis of rectangle and biconvex section shape of the yarn, and different collocation between the inner warp and outer warp, thickness, section shape of the same structure being considered especially, a model for predicting the elastic property of 2.5-D woven composites was developed. To verify the elastic model, 62 samples of 2.5-D woven composites with 6 various structures were selected and the elastic properties were measured. Experiment results are in good agreement with the outcomes of the model. Further, it is shown that the difference between the inner warp and outer warp can't be ignored in predicting the elastic property of 2.5-D woven composites.

Key words: composites; 2.5-D woven; elastic property; prediction model

三维机织及 2.5 维机织结构复合材料明显改善层合板结构复合材料的层间缺陷, 因此越来越受到人们的关注. 三维机织复合材料因出现较早, 目前应用较为广泛, 关于该类复合材料的研究已有相应文献报道^[1-4]. 在对三维机织结构复合材料的研究中, 燕瑛等^[5]和杨连贺等^[6]以经、纬纱弯曲且纤维束截面为双凸透镜形状为假设, 采用取向平均模型研究了三维机织结构的弹性性能. 易红雷等^[7]以经纱弯曲、纬纱平直且截面为跑道型假设, 采用等效响应比拟技术研究了三维机织结构的弹性性能.

2.5 维机织结构作为三维机织结构一种特殊形式出现. 近年来, 以 2.5 维机织结构为增强体的纺织复合材料因其结构和工艺上的优势得到越来越多的关注, 但关于该类复合材料研究的文献尚不多见. 因其内部结构与传统的三维机织机构不同等原因, 三维机织结构的弹性性能预测模型不宜直接应用到 2.5 维机织结构复合材料. 在 2.5 维机织结构复合材料的研究中, 董伟锋^[8]等建立了经纱弯曲、纬纱平直且纤维束截面为圆形的弹性性能预测模型. 该模型的截面假设与实际差距较大, 且未考虑 2.5 维机织结构特有的内层和外

收稿日期: 2007 10 29; 修订日期: 2008 03 25

作者简介: 郑君(1974-), 男, 辽宁昌图人, 博士生, 主要从事先进复合材料力学性能研究.

层经纱取向角度不同等因素, 这些因素都将对材料弹性模量的预测产生很大的影响.

本文中针对 2.5 维机织复合材料的结构特点, 采用两种不同的截面假设, 即假设纬纱截面为双凸透镜形, 经纱截面为矩形, 考虑表层经纱密度变化及因工艺影响造成材料厚度和纤维束截面的不同, 同时将经纱按取向角度不同划分为表层经纱和内部经纱两类, 在弹性模量的预测中分别计算表层经纱系和内层经纱系对整体弹性性能的贡献, 并通过试验对弹性性能预测模型进行对比验证.

1 2.5 维机织复合材料的细观结构

1.1 细观结构的几何形态

准确描述 2.5 维机织复合材料的几何形态是建立合理的弹性性能预测模型的关键. 为此, 本文对实际复合材料的细观结构采用显微照相技术进行照相分析. 图 1 为五层浅交弯联结构纱线走向显微照片.

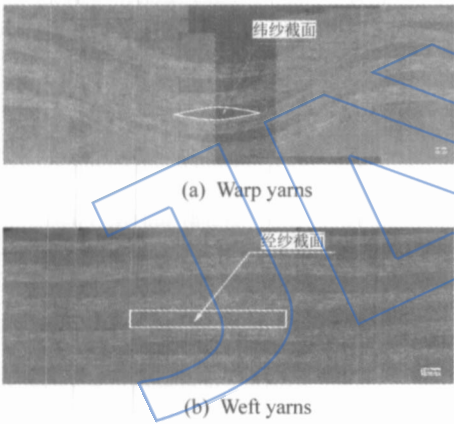


图 1 五层浅交弯联结构纱线走向显微照片
Fig. 1 Yarn orientation micrograph of five layer bend joint structure

图 1(a) 是五层浅交弯联结构的经纱走向显微照片. 由图可见, 经纱可认为是曲段和直段的连接; 表层经纱与内部经纱直段部分的取向角度有差别; 由图可假设在经纱对的拉紧和挤压作用下, 纬纱截面形成双凸透镜形状. 图 1(b) 为纬纱走向显微照片. 由图可见, 表层的纬纱基本平直, 因经纱对交织过程中存在张紧力, 内层的纬纱形成微小的弯曲, 表层纬纱和邻近的纬纱间距离较内层纬纱间的距离略小.

根据以上显微照片及分析, 对 2.5 维机织复合材料做如下假设: ①纬纱纤维束截面呈双凸透

镜形状, 纬纱平直且均匀分布; ②经纱截面为矩形, 分为外层经纱和内部经纱, 为曲段和直段两种特征段的连接. 表层经纱因同层经纱密度较小, 横向宽度较内层经纱经密条件下大, 其厚度相应降低, 使近表面两层纬纱间的距离较内部纬纱间的距离小; ③对有经向填充纱的结构, 认为填充纱平直, 其截面形状与经纱一致. 杨彩云等^[9]关于经纱为矩形截面, 纬纱为双凸透镜截面的研究也进一步证实了上述假设的正确性.

1.2 各组分的取向角和体积分数

复合材料中各纱线系的取向角度和体积含量是预测弹性性能的关键参数, 须通过纤维截面参数计算获得. 按图 2 取可重复最小单元(即单胞), 在单胞内建立直角坐标系, 坐标轴 x, y, z 依次对应经向、纬向和厚度方向. 根据上述假设, 本文对几何参数的计算公式推导如下.

对应于矩形截面的几何参数可通过下式计算

$$A_j = \frac{T}{1000\rho_j}, W_{1j} = \eta \frac{10}{M_j}, W_{2j} = \frac{A_j}{W_{1j}} \quad (1)$$

式中 A_j 为经纱纤维束面积(mm^2); T 为纤维束的特数($\text{g}/1\,000\text{m}$); M_j 为经纱的排列密度(根/ cm); W_{1j}, W_{2j} 分别为纤维束的宽度和高度(mm); ρ 为纤维密度(g/cm^3); p_j 为纤维束内纤维聚集密度, 矩形所对应的纤维束聚集密度约为 $0.785^{[10]}$; η 为间隔系数, 是经纱实际宽度与无填充纱条件下内层经纱理论宽度之比.

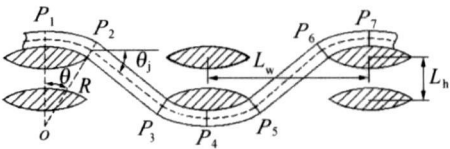


图 2 经纱的几何关系图
Fig. 2 Geometry relation of warp yarn

双凸透镜截面的几何参数通过下式计算

$$\left\{ \begin{aligned} L_z &= W_{2w}N_h + 4W_{2jw} + (N_h - 3)W_{2jn} \\ A_w &= \frac{T}{1000\rho_w} = \frac{W_{2w}^2(k_w^2 + 1)^2}{8} \arcsin\left(2\frac{k_w}{k_w^2 + 1}\right) - k_w W_{2w}^2 \frac{(k_w^2 - 1)}{4} \\ W_{1w} &= k_w W_{2w} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中 A_w 为纬纱纤维束面积(mm^2); W_{1w}, W_{2w} 分别为双凸透镜截面的宽度和高度(mm), k_w 为双凸透镜宽高比(通过迭代计算获得); L_z 为单胞的

厚度,通过实测获得; p_w 为纤维束内纤维聚集密度,半圆形对应的纤维束聚集密度约为 $0.75^{[10-11]}$,双凸透镜形的纤维束聚集密度参照半圆形选取; N_h 为厚度方向上纬纱根数; W_{2w} , W_{2jw} , W_{2jn} 分别为单根纬纱、外层经纱和内部经纱厚度方向上的尺寸(mm)。

单胞内全长 l_j (mm) 及直段取向角 θ_i (弧度) (见图 2) 由式 (3) 确定,其中 $P_1 \sim P_8$ 为经纱上各特征点。

$$\begin{cases} l_j = \sum_{i=1}^6 P_i P_{i+1} = 4P_1 P_2 + 2P_2 P_3 \\ \theta_j = \arctan \frac{W_{2j} \cos \theta + L_h}{\frac{N_w - 1}{2} L_w - (2R + W_{2j}) \sin \theta} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $P_1 P_2 = \left[R + \frac{W_{2j}}{2} \right] \theta$, $L_h = W_{2j} + W_{2w}$, W_{2j} 为经纱截面宽度,在计算中根据经纱位置由 W_{2jn} 或 W_{2jw} 代替; $P_2 P_3$ 为

$$P_2 P_3 = \sqrt{W_{2j} \cos \theta + L_h)^2 + \left[\frac{(N_w - 1)}{2} L_w - (2R + W_{2j}) \sin \theta \right]^2};$$

R 为双凸透镜截面的曲率半径(mm); θ 为双凸透镜截面的弦心半角(rad); R 和 θ 通过 W_{1w} , W_{2w} 计算得到。

由此,纤维体积含量可按下式计算为

$$\begin{cases} V_{jn} = \frac{n_{jn} l_{jn} A_{jpj}}{L_x L_y L_z}, V_{jw} = \frac{n_{jw} l_{jw} A_{jpj}}{L_x L_y L_z} \\ V_w = \frac{n_w L_y A_w p_w}{L_x L_y L_z}, V_s = \frac{n_s A_s p_s L_x}{L_x L_y L_z} \end{cases} \quad (4)$$

式中 V 为纤维体积含量,下标 jn, jw, w, s 分别为内部经纱、外层经纱、纬纱和填充纱

$$n_{jn} = 2(N_h - 3) N_j$$

为单胞内内部经纱总数量;

$$n_{jw} = 4 N_j$$

为单胞内外层经纱总数量;

$$n_w = \begin{cases} (N_w - 1) N_h & (\text{浅交弯联}) \\ (N_w - 1) N_h - 2 & (\text{浅交直联}) \end{cases}$$

为单胞内纬纱总数量; $n_s = 2B(N_h - 1) N_j$, 为填充纱总数量。

2 2.5 维机织复合材料弹性性能预测模型

在建立 2.5 维机织复合材料弹性性能预测模型过程中,将合成后的纤维束认为是横观各向同

性的单向复合材料,建立局部直角坐标系,坐标轴 1, 2, 3 分别对应纤维主轴及纤维横截面上的两个相互垂直方向,即可以获得材料在局部坐标系下的刚度矩阵。

2.1 各子纱系的刚度矩阵

2.5 维机织复合材料纱系由表层经纱系、内部经纱系、纬纱系和填充纱系组成,其中表层经纱系和内部经纱系可通过相同的方式进行刚度矩阵的计算。

1) 填充纱刚度矩阵

填充纱刚度矩阵和全局坐标系重合,故填充纱的刚度矩阵 $[\bar{C}]_s$ 为 $[\bar{C}]_s = [C]$ 。

2) 纬纱刚度矩阵

纬纱的刚度矩阵 $[\bar{C}]_w$ 可通过局部坐标系向全局坐标系转换获得,即 $[\bar{C}]_w = [T][C][T]^T$, 其中 $[T]$ 为坐标转换矩阵。

3) 表层和内部经纱系刚度矩阵

表层和内部经纱系刚度矩阵 $[\bar{C}]_{jw}$, $[\bar{C}]_{jn}$ 分别通过各自的柔度矩阵求逆获得。两者的柔度矩阵可按同一公式计算,其差别在于计算中采用的取向角度 θ 不同。单胞内经纱由 4 个 1/4 弧段和两个直段组成,在模型中对直段和曲段分别处理后进行柔度累加获得经纱的柔度矩阵为

$$[\bar{S}]_j = \frac{2l_q[\bar{S}]_q + l_{zh}[\bar{S}]_{zh}}{2l_q + l_{zh}} \quad (5)$$

其中 $[\bar{S}]_{zh}$ 经纱直段在整体坐标系下的柔度矩阵,为 $[\bar{S}]_{zh} = ([T]^T)^{-1}[S]([T])^{-1}$; $[\bar{S}]_q$ 经纱曲段在整体坐标系下的柔度矩阵,为 $[\bar{S}]_q = \frac{1}{l} \int_l ([T(\theta)]^T)^{-1}[S]([T(\theta)])^{-1} dl$; l_q 为单一曲段长度, l_{zh} 为单一直段长度, $[T(\theta)]$ 为曲段上各积分微段的坐标转换矩阵。

2.2 复合材料整体刚度的计算

按体积加权平均方法求取单元总体刚度矩阵在三维机织复合材料的刚度计算中应用广泛,且预测效果较好^[34],本文尝试将其应用于 2.5 维机织复合材料的刚度计算中,并将经纱分为外层经纱系和内层经纱系,即在上述计算的基础上,按体积加权平均的方法集成得到单元的总体刚度矩阵 $[\bar{C}]$ 为

$$[\bar{C}] = V_w[\bar{C}]_w + V_{jn}[\bar{C}]_{jn} + V_{jw}[\bar{C}]_{jw} + V_s[\bar{C}]_s + V_m[\bar{C}]_m \quad (6)$$

式中 V_m 为纤维束外树脂体积含量; $[\bar{C}]_m$ 为树脂刚度矩阵。

3 实验验证及分析

为验证上述弹性性能预测模型, 本文采用 RTM (Resin transfer molding) 技术合成 2.5 维机织复合材料, 共 6 种 62 件试件进行拉伸实验. 表 1 为试验及理论预测结果对比表, 其中试样 1, 2, 3 分别为四层、五层、六层浅交弯联结构, 试样

4, 5 分别为四层、五层浅交直联结构, 试样 6 为变截面浅交弯联结构. 表中本文模型为按上述方法建立的弹性性能预测模型. 为对比验证本文模型的预测结果, 本文同时假设纤维束截面为双凸透镜型, 纬纱平直, 不区分内外层经纱等条件下建立了弹性性能预测模型, 即其它模型, 并将其计算结果纳入表 1.

表 1 2.5 维机织复合材料弹性模量实测及预测对比/GPa

Table 1 Contrast between the prediction results and experimental results of 2.5 D woven composites elastic / GPa

Sample	1		2		3		4		5		6	
	E_x	E_y	E_x	E_y	E_x	E_y	E_x	E_y	E_x	E_y	E_x	E_y
Experiment	39.91	32.80	39.58	30.36	41.00	32.95	73.76	31.41	73.64	37.71	51.15	23.93
Predict ion of other model	33.78	31.06	36.11	30.87	36.53	33.19	84.84	35.02	105.00	37.36		
Error of other model/ %	15.36	5.30	3.06	1.68	10.90	0.73	15.02	11.49	42.59	0.93		
Predict ion of this paper	39.31	32.23	40.63	33.27	41.16	34.37	67.23	34.52	77.70	37.13	56.34	25.79
Error of this paper/ %	1.50	1.73	2.65	9.58	0.39	4.31	8.85	9.90	5.51	1.54	10.15	7.77

由表 1 可见, 本文建立的 2.5 维机织复合材料的弹性模量理论预测值与实验值总体上吻合较好. 最大预测误差在 8% ~ 10% 之间, 变截面结构复合材料理论值与试验值误差较大, 为 7.77% ~ 10.15%. 此外, 通过对比还能发现, 本文模型较其它模型预测精度总体上有明显提高, 经向弹性模量的预测精度较其它模型普遍提高了 10% 左右, 五层浅交直联结构复合材料弹性模量的预测误差由 42.59% 降低到 5.51%. 可见, 本文建立的弹性性能预测模型在采用两种不同纤维束截面假设的基础上, 考虑了内层和外层经纱的几何形态上的差异, 更为真实地反映了 2.5 维机织复合材料的实际结构.

为分析机织参数对复合材料弹性模量的影响, 本文选取四层浅交弯联结构复合材料为例, 计算了同厚度时, 不同经纬密度条件下的复合材料弹性模量. 图 3 为纬纱密度为 3.5 根/cm, 经纱密度由 6.0 根/cm 增加到 10.0 根/cm 条件下复合材料的弹性模量变化曲线. 由曲线可知, 随经纱密度增加, 复合材料经向弹性模量增大, 纬向弹性模

量基本保持不变. 可以认为在本文给定的计算条件下, 纬向弹性模量几乎不受经纱密度的影响.

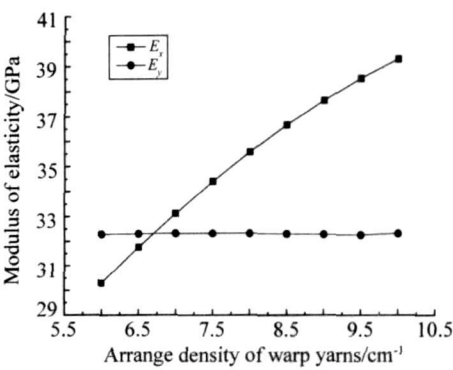


图 3 弹性模量随经纱密度的变化规律
Fig. 3 Modulus of elasticity variation with the density of warp

图 4 为经纱密度为 10.0 根/cm, 纬纱密度由 3.0 根/cm 增加到 7.0 根/cm 的条件下, 复合材料的弹性模量的变化规律. 由曲线可知, 随纬纱密度的增大, 复合材料纬向弹性模量增大, 这主要是因为复合材料单位面积上纬纱密度增大引起的.

此外, 经向弹性模量随纬纱密度的增大而降低, 主要是因为纬纱密度的增大造成经纱取向角度增大引起的。

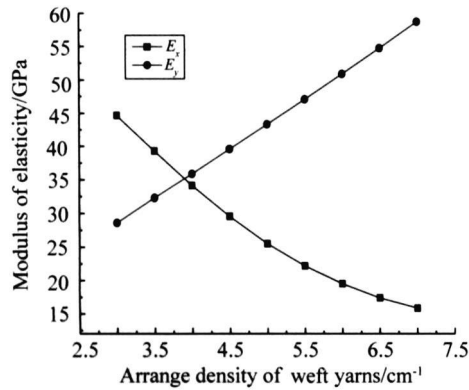


图 4 弹性模量随纬纱密度的变化规律

Fig.4 Modulus of elasticity variation with the density of weft

4 结 论

1) 基于经纱矩形截面及纬纱双凸透镜截面假设, 考虑表层经纱与内部经纱截面厚度和取向角度的不同, 将经纱分为内部经纱和外层经纱两类, 建立了 2. 5 维机织复合材料的弹性性能预测模型。

2) 对多种结构复合材料试件进行了力学实验, 经与理论预测结果对比表明: 该弹性性能预测模型在对平板复合材料弹性模量的预测结果误差为 10% 以内, 弹性模量的预测精度明显提高; 对变截面复合材料弹性模量预测结果的误差也在 10% 左右, 较好地反映了 2. 5 维机织复合材料的内部情况。

3) 不同弹性性能预测模型的计算结果对比表明: 内外层经纱几何形态上的差异, 对 2. 5 维机织复合材料弹性性能的预测有影响明显; 在预测 2. 5 维机织复合材料的过程中应考虑内部与表层经纱几何形态上差异的情况。

4) 在其他条件不变的情况下, 随经纱密度的增大, 经向弹性模量增大而纬向弹性模量几乎不变; 随纬纱密度的增大, 纬向弹性模量增大, 经向弹性模量降低。

参考文献:

[1] Pochiraju K, Chou T W. Three dimensionally woven and braided composites. I: A model for anisotropic stiffness prediction[J]. Polymer Composites, 1999, 20(4): 565-580.
[2] Quinn J P, Hill B J, McIlhagger R. An integrated design

system for the manufacture and analysis of 3-D woven performs [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(7): 911-914.
[3] 周储伟, 喻澹鉴, 周光明. 三维机织复合材料的一种梁单元细观力学模型[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 155-160.
ZHOU Chuwei, YU Jianjian, ZHOU Guangming. Micro beam model for 3-D woven composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 155-160. (in Chinese)
[4] 杨连贺, 邱冠雄, 黄故. 任意三维机织结构复合材料弹性性能的计算机模拟[J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 79-83.
YANG Lianhe, QIU Guanxiong, HUANG Gu. Computer simulation of elastic properties on any structure 3D woven composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2): 79-83. (in Chinese)
[5] 燕瑛, 成传贤. 基于细观结构的三维机织复合材料弹性性能分析[J]. 航空学报, 1999, 20(4): 289-294.
YAN Ying, CHENG Chuanxian. Analysis of elastic property for 3D woven composites based on fabric microstructure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(4): 289-294. (in Chinese)
[6] 杨连贺. 3-D 机织复合材料弹性性能研究[J]. 天津纺织工学院学报, 1998, 17(4): 41-48.
YANG Lianhe. Study on elastic properties for 3D woven composites[J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 1998, 17(4): 41-48. (in Chinese)
[7] 丁辛, 易洪雷. 三维机织结构的几何模型[J]. 复合材料学报, 2003, 20(5): 108-113.
DING Xin, YI Honglei. A geometric model of three dimensional woven structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(5): 108-113. (in Chinese)
[8] 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. 5-D braided composites [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 37(5): 659-663. (in Chinese)
[9] 杨彩云, 李嘉禄. 基于纱线真实形态的三维机织复合材料细观结构及其厚度计算[J]. 复合材料学报, 2005, 22(6): 178-182.
YANG Caiyun, LI Jialu. Microstructure and thickness equation of 3-D woven composites based on yarn's true configuration [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 178-182. (in Chinese)
[10] Ko F K, Du G W. Processing of textile performs [M]// Gutowski T G. Advanced composites manufacturing. New York: John Wiley & Sons Inc, 1997: 182-187.
[11] Lee S K, Byun J H, Soon H H. Effect of fiber geometry on the elastic constants of the plain woven fabric reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 347(2): 346-358.