

尾巨桉单板/金属网复合层积材 弯曲刚度模型的构建

李 鹏, 胡传双, 李凯夫, 邓燕平

(华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642)

摘要:根据复合材料力学中的经典层积材理论构建了尾巨桉单板/金属网复合层积材弯曲刚度的预测模型。经对由20、40和60目不锈钢金属网所组成的尾巨桉单板/金属网层积材进行模型验证,当不锈钢金属网为20和40目时,模型预测值与实测值具有很好的吻合度,相对误差分别为7.75%与1.38%,但目数为60目时,相对误差却达到了84.59%。结果表明,构建的模型能够准确预测尾巨桉单板/金属网层积材的弯曲刚度。

关键词:层积材; 弯曲刚度; 不锈钢金属网; 模型

中图分类号:TB330.1

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2008)03-0096-05

Modeling the Bending Stiffness of the Laminated Eucalyptus Veneer/Steel Mesh Lumber

LI Peng, HU Chuan-shuang, LI Kai-fu, DENG Yan-ping

(College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The bending stiffness of the laminated eucalyptus veneer/steel mesh lumber was modeled according to the theory of the classical laminated composites with the ultimate purpose of predicting the design strength value and optimizing its engineering applications. The lumbers using *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake $\times$ *E. grandis* W. Hill ex Maiden veneer and three different types of steel meshes were laminated to verify the proposed model. The results showed that the bending elasticity calculated by the proposed model had a good agreement with the bending elasticity measured by the three point bending test when the mesh grits used were 20# and 40#, and the relative error were 7.75% and 1.38%, and this implied that the proposed model was reliable in predicting the bending elasticity of the laminated eucalyptus veneer and steel mesh lumber. When the mesh grit was 60#, however, there was a great difference between predicting values and the test results, with the relative error being as high as 84.59%. Three reasons were analyzed for the great difference.

Key words: laminated veneer lumber; bending stiffness; stainless steel mesh; modeling

王志强等^[1]从复合材料力学理论出发建立了不对称人造板耦合刚度矩阵计算模型,讨论了耦合刚度系数与板坯翘曲度的关系,分析了板坯层数、铺层顺序和铺设方向等对板坯耦合效应的影响。卢晓宁等^[2-4]根据复合材料力学理论建立了速生杨木单板

顺纹弹性模量、横纹弹性模量与面内剪切弹性模量的预测模型,为杨木单板复合材料整体力学性能的预测提供了有益的参考。Tang^[5]认为对于结构用胶合板而言,通常可将各层单板视为宏观均匀体。Tabiei等^[6]针对木材建立了三维非线性材料模型,模

收稿日期:2007-04-01

作者简介:李 鹏(1984—),男,硕士研究生; 通讯作者:胡传双(1978—),男,副教授,博士,E-mail: cshu@scau.edu.cn

基金项目:华南农业大学校长基金(4400-K05107)

型可预测木材起始刚度的变化量。

尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* W. Hill ex Maiden 作为华南地区的主要速生树种之一,目前主要作为纸浆造纸原料,利用过程增值低。尾巨桉单板/金属网复合层积材由于兼具木材的自然属性和金属材料的强度优点而被认为是尾巨桉材高附加值利用的有效途径之一。考虑到单板层积材(LVL)在实际的工程应用中通常承受弯曲载荷,本文尝试利用复合材料经典层积材理论构建尾巨桉单板/金属网复合层积材的弯曲刚度的预测模型,以期尾巨桉单板/金属网复合层积材的性能设计和工程运用提供参考。

1 弯曲刚度模型

根据正交各向异性材料力学理论^[7]可知,对于尾巨桉单板,其刚度矩阵可表达为下式:

$$A = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix}_{90^\circ} = \begin{pmatrix} Q_{22} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix}_{0^\circ}, \quad (1)$$

其中 $Q_{ij}(i, j = 1, 2, 6)$ 为正轴状态下平面应力的模量分量。

金属网可视为各向同性单层板,则其刚度矩阵关系如下式所示:

$$B = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

单层板在平面应力状态下的正轴刚度特性 Q_{ij} 与正轴工程弹性模量之间的关系为:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= E_L / (1 - \nu_{LT}\nu_{TL}), \\ Q_{22} &= E_T / (1 - \nu_{LT}\nu_{TL}), \\ Q_{12} &= \nu_{TL}E_T / (1 - \nu_{LT}\nu_{TL}) = \\ &\quad \nu_{LT}E_L / (1 - \nu_{LT}\nu_{TL}), \\ Q_{66} &= G_{LT}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, E_L 为纵向拉伸弹性模量, E_T 为横向拉伸弹性模量, ν_{LT} 为纵横向泊松比, ν_{TL} 为横纵向泊松比, G_{LT} 为面内剪切弹性模量(亦称纵横剪切弹性模量)。对于正交各向异性单层板而言有:

$$Q_{12} = Q_{21}, E_L/E_T = \nu_{TL}/\nu_{LT}. \quad (4)$$

单层板在一般轴向状态(图1)下不再呈正交各向异性,其应力-应变关系式为:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

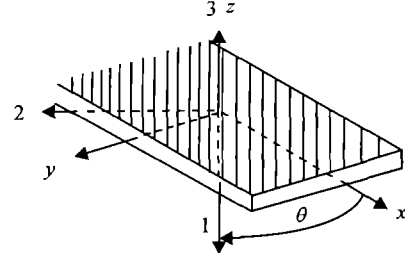


图1 一般正交各向异性板的坐标系

Fig. 1 Coordinates of an orthotropic lamina

式(5)中 $\bar{Q}_{ij}(i, j = 1, 2, 6)$ 为偏轴模量分量, σ_x 为 x 方向的应力, ε_x 为 x 方向的应变, τ_{xy} 为面内剪应力, γ_{xy} 为面向剪应变。其中偏轴模量为:

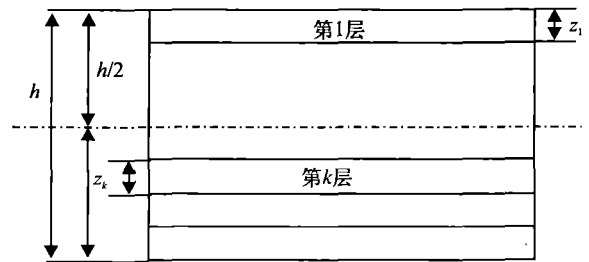
$$\begin{pmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \cos 4\theta & 0 & 0 \\ 1 & -\cos 2\theta & \cos 4\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\cos 4\theta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\cos 4\theta & 0 & 1 \\ 0 & 1/2 \sin 2\theta & \sin 4\theta & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 \sin 2\theta & -\sin 4\theta & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{1Q} \\ U_{2Q} \\ U_{3Q} \\ U_{4Q} \\ U_{5Q} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式(6)中 $U_{iQ}(i = 1, \dots, 5)$ 为各材料材料特性系数,具体可表示为:

$$\begin{pmatrix} U_{1Q} \\ U_{2Q} \\ U_{3Q} \\ U_{4Q} \\ U_{5Q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3/8 & 3/8 & 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 & 0 & 0 \\ 1/8 & 1/8 & -1/4 & -1/2 \\ 1/8 & 1/8 & 3/4 & -1/2 \\ 1/8 & 1/8 & -1/4 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{pmatrix} \quad (7)$$

根据经典层积材理论,对尾巨桉/金属网复合层积材可做如下假设^[7]:1)层间变形一致假设:层积板各单层之间粘合牢固,层间变形一致,无相对位移;2)直线不变假设:变形前垂直于板中面的直线在板变形后仍保持垂直,且长度不变;在厚度方向上的正应力与其他应力相比很小,可忽略不计;3)单层平面应力状态假设:层积板中各单层都可近似地认为处于平面应力状态。

图2所示为层积材模型示意图。对于对称层积



h 为层积板的厚度; z 为坐标值; k 为单板层号

h : thickness of the laminated veneer; z : coordinate value; k : lamina number

图2 层积材模型

Fig. 2 Geometry of the multilayered laminate

材,其所受弯矩与弯曲变形的关系为:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中: M_x 、 M_y 和 M_{xy} 分别为层积板 x 方向轴力引起的弯矩、 y 方向轴力引起的弯矩和 $x-y$ 平面内剪应力引起的扭矩; D_{ij} 为弯曲刚度矩阵元素,对于对称层积材可具体表示为:

$$D_{ij} = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{n/2} Q_{ij}^{(k)} (z_k^3 - z_{k-1}^3). \quad (9)$$

为了方便比较,此处可引入正则化系数:

$$M^* = 6M/h^2, k^* = hk/2, D_{ij}^* = 12D_{ij}/h^3, \quad (10)$$

则式(8)对于由正交各向异性单层板或各向同性单层板所组成的层积材可改写为:

$$\begin{pmatrix} M_x^* \\ M_y^* \\ M_{xy}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & 0 \\ D_{12}^* & D_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & D_{66}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_x^* \\ k_y^* \\ k_{xy}^* \end{pmatrix}, \quad (11)$$

其中 D_{ij}^* 可由下式计算:

$$\begin{pmatrix} D_{11}^* \\ D_{22}^* \\ D_{12}^* \\ D_{66}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{1Q} & W_1^* & W_2^* \\ U_{1Q} & -W_1^* & W_2^* \\ U_{4Q} & 0 & -W_2^* \\ U_{5Q} & 0 & -W_2^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ U_{2Q} \\ U_{3Q} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

另外,式(12)中矩阵参数 W_i^* ($i=1,2$) 可由纤维配向角、层积比率、层积顺序来确定,具体可由式(13)表示:

$$W_1^* = \sum_{k=1}^n \zeta_k \cos 2\theta_k, W_2^* = \sum_{k=1}^n \zeta_k \cos 4\theta_k, \quad (13)$$

其中,多项式系数 ζ_k 又可以由式(14)表示:

$$\zeta_k = \left(\frac{2z_k}{h} \right) \left(\frac{2z_{k-1}}{h} \right)^2, \quad (14)$$

所以,当已知 D_{ij}^* 值时,层积材在受单纯弯/扭 ($M_x = D_x^* k_x, M_y = D_y^* k_y, M_{xy} = D_{xy}^* k_{xy}$) 时,对称层积材的顺纹弯曲弹性模量 E_x^f 可以表示为^[8]:

$$E_x^f = D_x = D_{11}^* + \frac{2D_{12}^* D_{16}^* D_{26}^* - D_{22}^* D_{16}^{*2} - D_{12}^{*2} D_{66}^*}{D_{22}^* D_{66}^* - D_{26}^{*2}}, \quad (15)$$

则对称铺层的尾巨桉单板/金属网复合层积材顺纹弯曲弹性模量 E_P 的预测模型可以简写为:

$$E_P = \frac{D_{11}^* D_{22}^* - D_{12}^{*2}}{D_{22}^*}. \quad (16)$$

模型中独立的输入参数共有 6 个,分别为尾巨

桉单板顺纹拉伸弹性模量 E_L 、横纹拉伸弹性模量 E_T 、纵横向泊松比 ν_{LT} 、横纵向泊松比 ν_{TL} 、面内剪切弹性模量 G_{LT} 和金属网等效弹性常数 E_s 。

2 材料与方法

尾巨桉单板由康隆木业有限公司提供,规格为 300 mm × 300 mm × 2.2 mm,含水率约为 11%。在测量尾巨桉单板顺纹拉伸弹性模量 E_L 与 45° 纹理单板拉伸弹性模量 E_{45} 时,制成方向分别为沿单板纤维方向和与纤维成 45° 的方向,规格为 100 mm × 50 mm × 2.2 mm 的试件。在万能力学实验机 (AG-50KN, 日本岛津公司) 上进行单板拉伸试验,各重复拉伸 20 次,确立顺纹拉伸弹性模量 E_L 与 45° 角的拉伸弹性模量 E_{45} 的平均值。在实际拉伸试验中,为了防止夹头夹断纤维,保障试样断裂尽可能发生在中部,在试样的两端粘接加强片,由于尾巨桉单板在旋切时存在很多裂隙缺陷,所以其横向弹性模量很难直接用拉伸试验测得准确的数值,本文通过式(17)的 Hankinson 公式^[9],利用 45° 角的拉伸弹性模量 E_{45} ,经计算,间接确定横纹拉伸弹性模量 E_T 。

$$E_\theta = \frac{E_L E_T}{E_L \sin^n \theta + E_T \cos^n \theta}, \quad (17)$$

其中, E_θ 为纤维角夹角为 θ 处的拉伸弹性模量。从而横纹拉伸弹性模量 E_T 可由式(18)计算得出:

$$E_T = \frac{E_{45} E_L \sin^n \theta}{E_L - E_{45} \cos^n \theta}, \quad (18)$$

对于木材金属复合材料,系数 n 为 1.8^[8]。

由于木材泊松比 ν_{LT} 与 ν_{TL} 一般均在 10^{-2} 数量级上,而木材的弹性模量均在 10^4 左右,对于模型中 $1 - \nu_{LT} \nu_{TL} \approx 1$,所以由木材的变异性导致泊松比的变化在工程精度范围内可以忽略。本试验参考文献[10]取尾巨桉单板纵横向与横纵向泊松比分别为 $\nu_{LT} \approx 0.38$ 和 $\nu_{TL} \approx 0.027$ 。

面内剪切弹性模量 G_{LT} 可由下式确定:

$$G_{LT} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + \frac{2\nu_{TL}}{E_L}}. \quad (19)$$

金属网可视为薄金属板,根据其相对厚度可从文献[11]中查出其弹性常数。根据质量相当的原理,由式(20)可计算出薄层金属网相对属板的相对厚度:

$$t_2 = \frac{m}{a \times d}, \quad (20)$$

其中: m 为不锈钢金属网质量; a 为层积板板幅面积;

d 为薄层金属板的密度; t_2 为相对薄层金属板的厚度。

验证模型所用尾巨桉单板/不锈钢金属网复合层积材的制板工艺及材料参数如下:用由广东增城广和胶水厂提供的酚醛树脂胶黏剂[固体质量分数为49%,苯酚与甲醛摩尔比为1:2,粘度(涂4杯,25℃)为40 s],对尾巨桉单板进行双面施胶,施胶量为350 g/m²。按相邻2层纹理方向相互垂直的尾巨桉单板之间嵌入不锈钢金属网(由市场购得的20、40和60目不锈钢金属网)的形式进行组坯,组成3层尾巨桉单板与2层不锈钢金属网结构的五层尾巨桉单板/不锈钢金属网复合层积材。陈化30 min后,应用热压机(型号为BY602 X 2/2.5A,华翔木业机械有限公司制造)以热压温度140℃、热压时间1.4 min/mm²、热压压力1.8 MPa压制成板,冷却卸板并放置24 h后,应用万能力学试验机(型号AG-50KNI,日本岛津公司制造)按照文献[12]测试层积

材的顺纹弯曲弹性模量,并对每种目数下的复合层积材重复测试7次取其平均值。

3 结果与分析

尾巨桉单板各项基本参数中由试验测得的参数为:单板顺纹拉伸弹性模量 E_L 为11 170 MPa,变异系数为13.03%;45°纤维角时拉伸弹性模量 E_{45} 为430 MPa,变异系数为22.33%。由理论公式计算的参量为:横纹拉伸弹性模量 E_T 为240 MPa,纵横向泊松比 ν_{LT} 为0.38,横纵向泊松比 ν_{TL} 为0.027,面内剪切弹性模量 G_{LT} 为200 MPa。

不锈钢金属网各项参数如表1所示,由表1可知不锈钢金属网等效为金属薄板后的弹性模量为206 000 MPa,泊松比为0.300,20、40和60目金属网等效金属薄板厚度分别为0.056 9、0.050 8和0.039 6 mm。

表1 不锈钢金属网各项参数

Tab.1 Parameters of the stainless steel mesh

目数 mesh grid	E/MPa	ν	$m_{\text{金属网steel mesh}}/\text{g}$	$d_{\text{金属板steel plate}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	金属网实际厚度 thickness of steel mesh/mm	金属板相对厚度 thickness of plate/mm
20	206 000	0.300	40.470	7.900	0.544	0.056 9
40	206 000	0.300	36.100	7.900	0.384	0.050 8
60	206 000	0.300	28.130	7.900	0.260	0.039 6

不同目数不锈钢金属网的尾巨桉单板/不锈钢金属网复合层积材顺纹弯曲弹性模量预测值和实测值结果如表2所示,当不锈钢金属网分别为20和40目时,尾巨桉单板/不锈钢金属网复合层积材顺纹弯曲弹性模量预测值与实测值基本上相同,相对误差分别为7.75与1.38,此时,基于经典层积材理论构建的模型能够很好的预测尾巨桉单板/不锈钢金属网复合层积材的顺纹弯曲弹性模量。但当不锈钢金属网为60目时,尾巨桉单板/金属网复合层积材的顺纹弯曲弹性模量预测值与实测值差异很大,相对误差达到了84.59,实际测量值的变异系数为10.53,说明测试过程中顺纹弯曲弹性模量变化相对较大。之所以会出现当不锈钢金属网为60目时预测值与实测值的偏差较大,分析认为原因有三:首先,相比较而言,酚醛树脂胶黏剂与金属网之间的粘合力要远弱于酚醛树脂胶黏剂与木材之间的粘合力,尾巨桉单板/金属网复合层积材界面的胶合强度很大程度是由酚醛树脂胶黏剂透过金属网网格使两侧的单板胶合所产生的粘合力。由于60目不锈钢金属网孔

数致密,阻碍了其两侧尾巨桉单板的胶合效果,导致界面胶合状况变差和胶合强度降低,从而会破坏模型中关于层间变形一致的假设。其次,界面的存在和作用对复合材料的性质影响极大,在经典层积材理论中仅假设了存在平面应力状态,而没有考虑层间应力的存在。但高的层间应力又是层积板脱粘,并使整体力学性能下降的重要影响因素之一,对于60目不锈钢金属网因其孔隙致密,金属网与尾巨桉单板的湿热膨胀系数相差很大,从热压状态冷却到室温的过程中势必在两者的界面中产生较大的界面应力^[13],破坏了模型中假设的界面应力条件。最后,金属网属于由金属丝经纬编制而成的平纹编织材料,在金属丝的经纬交叉处存在屈曲的现象,并且在垂直载荷的方向上金属丝的屈曲对材料的弹性模量、泊松比以及应变都有很大的影响^[14]。在模型的建立过程中,把金属网等效成了金属板,忽略了金属网的实际结构影响,对于空隙稀疏的金属网而言忽略结构影响并不影响模型的准确性,但对于孔隙致密的60目不锈钢金属网由于波纹系数影响突出,会导致

模型预测结果产生较大偏差.

表2 弯曲弹性模量模型预测值(E_p)与实测值(E)比较

Tab.2 The bending elasticity tested vs. the bending elasticity calculated

复合板 composites	E/MPa	CV	E_p/MPa	$ (E-E_p)/E /\%$
20目20 [#]	11 480	6.85	10 590	7.75
40目40 [#]	10 180	1.09	10 320	1.38
60目60 [#]	5 450	10.53	10 060	84.59

4 结论

(1)根据复合材料力学中经典层积材理论构建了尾巨桉单板/金属网复合层积材的顺纹弯曲弹性模量的预测模型.

(2)经对由20、40和60目的不锈钢金属网所组成的尾巨桉单板/不锈钢金属网层积材进行模型验证,结果表明当不锈钢金属网的目数为20和40目时,模型预测值与实测值具有很高的吻合度,此时,构建的模型能够准确预测尾巨桉单板/金属网层积板的顺纹弯曲弹性模量.

(3)当不锈钢金属网的目数为60目时,模型预测值与实测值具有较大的差异,模型不能很好的预测.原因被认为是由于金属网格致密波纹系数影响较大并阻碍两侧尾巨桉单板的胶合以及热膨胀系数的较大差异所产生的较大的界面应力.

参考文献:

- [1] 王志强,卢晓宁,朱月虎,等. 不对称人造板的结构设计[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006, 30(3): 23-26.
- [2] 卢晓宁,陈宇聪,陈颖. 速生杨木单板顺纹弹性模量预测模型[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2002, 26(3): 9-13.
- [3] 卢晓宁,黄河浪,杜以诚. 速生杨木单板横纹弹性模量预测模型[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2003, 27(2): 21-24.
- [4] 卢晓宁,王志强,杜以诚,等. 速生杨木单板面内剪切模量预测模型[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006, 30(1): 93-94.
- [5] TANG R C. Stress concentration around knots in laminated beam[J]. Wood and Fiber Science, 1984, 16(1): 237-245.
- [6] TABIEI A, WU Jin. Three-dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood[J]. Composite Structures, 2000, 50(2): 143-149.
- [7] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [8] TSAI S W, HAHN H N. Introduction to composites materials[J]. Technomic Pub, 1980, 25(6): 37-41; 1981, 26(1): 25-29.
- [9] LABORATORY F P. Wood handbook-wood as an engineering material [M]. Madison: Forest Products Laboratory, 1999: 4-29.
- [10] JENKIN C F. Report on the Materials of Construction Used in Aircraft and Aircraft[R]. London: Aeronautical Research Committee, 1920.
- [11] 成大先. 机械设计手册[M]. 4版. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [12] 中国林业科学研究院木材工业研究所,人造板标准化技术委员会. GB/T 17657-1999 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 1999.
- [13] 李凯夫,陈雄伟. 木质材料界面与界面力学[M]. 广州:广东科技出版社, 2003.
- [14] ISHIKAWA T, CHOU T W. One-dimensional micromechanical analysis of woven fabric composite[J]. AIAA Journa, 1983, 21: 3211-3220.

【责任编辑 李晓卉】