

铝-木复合材料抗弯性能预测与分析

俞友明¹, 王 聪¹, 蔡智勇², 卢克阳³

(1. 浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 美国农业部林务局 林产品研究所, 美国 威斯康星 麦迪逊 53726-2398; 3. 中国林业科学研究院 木材工业研究所 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 将铝合金薄板和定向刨花板(OSB)以层叠方式复合得到新型铝-木复合材料(WAC), 对不同组坯的铝-木复合材料抗弯性能进行研究, 通过三点弯曲加载试验得到铝-木复合材料弯曲破坏形式和抗弯弹性模量, 运用经典层合理论建立抗弯弹性模量预测模型, 并进行验证。结果表明: 将铝合金薄板叠加在最外层的铝-木复合材料结构荷载能力有很大提高, 并且纵向弹性模量(MOE)提高了 156.55%, 横向弹性模量提高了 192.79%。考虑胶层影响, 在经典层合模型的基础上对铝-木复合材料的弹性模量进行预测, 所得预测值和试验值之间相对误差在 10%以内。可见经典层合模型可以很好预测铝-木复合材料的弹性模量, 铝-木复合材料有着良好的抗弯性能, 将铝合金薄板叠加在最外层的结构是最为合理的。图 3 表 3 参 18

关键词: 木材科学与技术; 铝合金薄板; 定向刨花板; 弯曲性能; 层合理论; 预测模型

中图分类号: S718.6; TS653 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)01-0001-06

Bending performance of wood-aluminum composites: prediction and analysis

YU Youming¹, WANG Cong¹, CAI Zhiyong², LU Keyang³

(1. School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture, Madison 53726-2398, Wisconsin, USA; 3. Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To research bending behavior of wood-aluminum composites (WAC) and the effect of stacking sequences, orient strand boards (OSB) were laminated with aluminum alloy sheets by different stacking sequences to manufacture WACs. Then, the bending modulus of elasticity (MOE) and bearing capacity of the WAC were determined using a three-point bending test. Next, a prediction model was established from classical laminated plate theory and validated based on the effect of the glue line. Experimental results indicated that WAC with the structure locating the aluminum alloy sheet on the surface showed the best bending performance. The peak load of WAC, which composite the aluminum alloy sheet on the surface, was 2-fold greater than OSB. In contrast with OSB, the bending MOE for the aluminum alloy sheet on the surface increased 156.55% along the parallel and 192.79% along the perpendicular. The model based on classical laminated plate theory was precise enough to aim at a theoretical MOE with relative error of less than 10%. [Ch, 3 fig. 3 tab. 18 ref.]

Key words: wood science and technology; aluminum alloy sheets; orient strand board; warping performance; laminated theory; predicted model

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-05-13

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201104004)

作者简介: 俞友明, 教授, 博士, 从事木质材料性质改良相关研究。E-mail: yuyouming@zafu.edu.cn。通信作者: 卢克阳, 副研究员, 博士, 从事木质工程材料相关研究。E-mail: lucky@caf.ac.cn

20世纪80年代中期以来,定向刨花板(OSB)在北美地区得到了快速发展,与胶合板一起成为人造板产业中的主要品种^[1]。在国外,定向刨花板是主要的建筑工程结构材料之一,作为木质结构房屋的墙体材料、地板底衬材、工字梁腹材等被广泛应用于建筑领域^[2-4]。在中国,定向刨花板主要被用于装饰装修和家居制造。相比国外,中国定向刨花板在建筑市场所占份额较小。作为木质材料,定向刨花板耐火性能差,容易引发火灾。提高定向刨花板的耐火性能对它在建筑市场的推广可以起到至关重要的作用。复合材料是由2种或2种以上不同性质的材料组成具有新性能的材料,由于在设计上综合各组分的优点,通过材料设计使各组分的性能互相补充,弥补了各自的不足之处,具有单一材料无法比拟的综合性能^[5]。复合材料根据其结构可分为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料和层状复合材料^[6]。层状复合材料是指复合材料中的增强相相互平行的层面配置增强相,工艺相对简单,具有较好的综合性能^[7]。将定向刨花板与轻质耐火的铝合金薄板以层状结构复合,可以得到耐火性能优异的新型层状铝-木复合材料(WAC)^[8]。张晓东等^[9]以经典理论、一阶剪切变形理论和有限元法预测木竹复合层合板弹性模量(MOE)并分析了3种预测方法的适用性。卢晓宁等^[10-11]建立了速生杨木单板顺纹、横纹弹性模量和面内剪切模量预测模型,能较好预测单板经压缩和浸胶后的弹性模量,理论上可以推广到其他树种单板顺纹弹性模量的预测。余养伦等^[12]基于层合板理论,以相同热压工艺下的单板层积材的弹性模量带入经典层合板力学模型计算厚胶合板弹性模量,得到更为准确的预测结果。OKABE等^[13]以层合理理论和蒙特·卡罗方法很好地预测了交错层压木材的弯曲刚度和弯曲载荷能力。目前,仅有部分学者探究了木质及木竹层合板的力学性能,尚未出现木质金属层合材料力学性能的相关研究。笔者研究不同层叠方式对铝-木复合材料最大弯曲载荷和抗弯性能的影响,在复合材料力学和经典层合理理论的基础上,对铝-木复合材料的横向和纵向抗弯弹性模量进行预测,以期对铝-木复合材料的设计方式提供预见性指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

铝合金薄板:型号3003,幅面尺寸为900.0 mm×2 400.0 mm,厚度为0.5 mm,购于美国McMaster-Carr Supply公司,有着很好的可塑性、耐腐蚀性,弹性模量为40 GPa,泊松比0.3。定向刨花板(OSB):松木刨花,酚醛树脂胶黏剂,幅面尺寸1 200.0 mm×2 400.0 mm,厚度为6.5 mm,密度0.82 kg·m⁻³,含水率12%,购于Home Depot公司。胶黏剂:异氰酸酯胶MDI, RUBINATE 1840为深棕色液体,在25℃时,黏度为0.18 Pa·s,购于Huntsman公司。

1.2 压制工艺

如图1, y轴方向为纵向, x轴方向为横向,将铝合金薄板与定向刨花板单板按照以下几种不同的组坯方式:(AO)[Al/O/90/O/Al]; (OA)[O/Al/90/Al/O]; (C3)[O/90/O]; (O)[O]; (O1)[O]; (O2)[O], 其中:“O”表示定向刨花板纤维方向平行于纵向,“90”表示定向刨花板纤维方向垂直于纵向,“Al”表示铝合金薄板。AO, OA, C3组坯在层与层之间涂胶, O为未涂胶定向刨花板, O1为在单侧涂胶后的定向刨花板, O2为在两侧涂胶后的定向刨花板。以上类型组坯均以相同工艺热压:热压压力1 MPa, 热压温度150℃, 热压时间20 min, 单面施胶量50 g·m⁻², 全部均匀涂布在定向刨花板表面。

1.3 测试方法

参照ASTM D1037-1999《木质纤维板和刨花板的性能评定方法》,制作长360.0 mm宽50.8 mm试件10个·组⁻¹,测其纵向弹性模量(E_L)和横向弹性模量(E_T)。按式(1)计算。

$$E = \frac{l^3}{4 \times a \times h^3} \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (1)$$

式(1)中: E 为试件弹性模量, l 为试件跨距, a 为试件宽度, h 为试件厚度, ΔF 为荷载增量, Δf 为挠度增量。

2 实验结果与数据分析

2.1 不同层叠结构铝-木复合材料抗弯性能对比

图2是不同层叠结构铝-木复合材料荷载一位移曲线。从图2中可以看出:3种试样在荷载作用下,

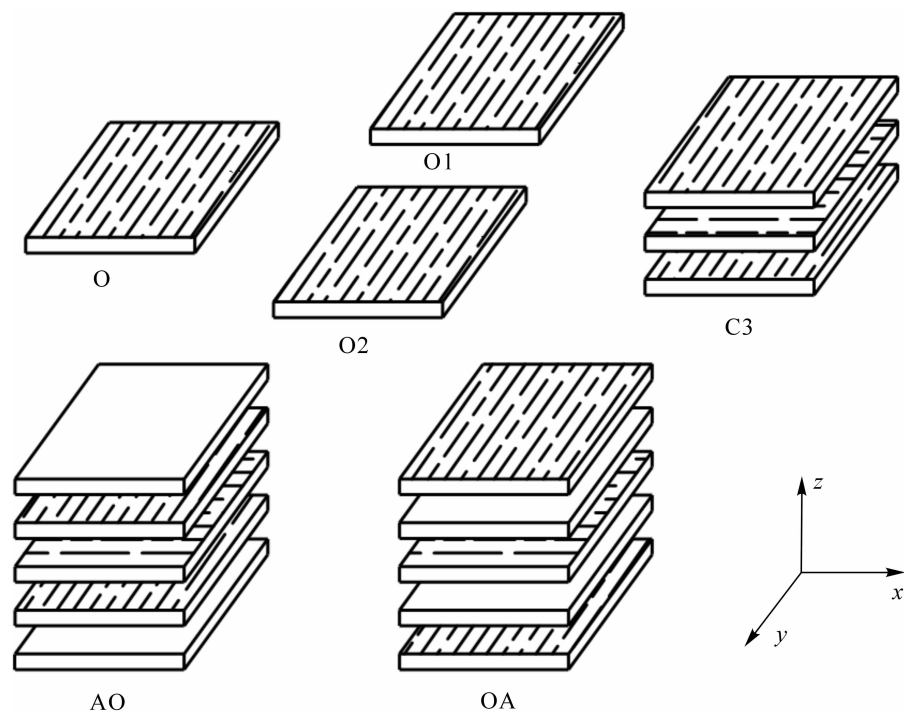


图 1 不同试样层叠顺序

Figure 1 Wood-aluminum composites panel stacking sequence

未达到荷载峰值之前其荷载—位移曲线近乎直线，处于线性弹性受力阶段。在荷载峰值以后，承载能力突降至峰值荷载的 1/2 以下，试件断裂。叠加铝合金薄板在最外层的 AO 荷载峰值最高，叠加铝合金薄板在次外层的 OA 与同样层数定向刨花板叠加的 C3 荷载峰值相差不大。材料弯曲变形中损伤分为 2 个区域：拉伸损伤区和压缩损伤区^[14]。由于受张力侧的形变量大于压力侧，所以主要的损伤集中在试样中心层以下张力侧的拉伸损伤区。因此，上表层和下表层的强度越大，越有利于提高复合材料层合板的弯曲承载能力^[15]。

表 1 是不同结构铝-木复合材的弹性模量。可以看出，叠加 0.5 mm 铝合金薄板在最外层的 AO 和同样层数定向刨花板叠加的 C3 相比纵向弹性模量提升显著，提高了 156.55%。而叠加 0.5 mm 铝合金薄板在次外层的 OA 相比同样层数定向刨花板叠加的 C3，弹性模量提高了仅仅 12.27%。显然铝合金薄板越靠外侧对铝-木复合材料影响越大。这是由于层合板弯曲时的应力是以中性层为对称面，沿厚度线性变化，离中性面越远的面受力越大，因此，只要将铝板尽可能置于远离中间层位置，就可以更大程度地增强铝-木层合板的抗弯性能。

2.2 铝-木复合材料横向、纵向抗弯性能对比

图 3 为不同层叠结构的铝-木复合材料纵向、横向抗弯曲试件的荷载—位移曲线。从图 3 可以看出：与铝合金薄板叠加后的 AO 和 OA 的纵、横向荷载—位移曲线基本相似，而 3 层定向刨花板层叠的 C3 纵向荷载峰值最大荷载远大于横向荷载峰值，显然与铝板复合后的定向刨花板纵向、横向差异缩小。从表 1 可以看到：叠加 0.5 mm 铝合金薄板在最外层的 AO 相比同样层数定向刨花板层叠的 C3，纵向弹性模量提高了 156.55%，横向弹性模量提高了 192.79%，抗弯性能较差的横

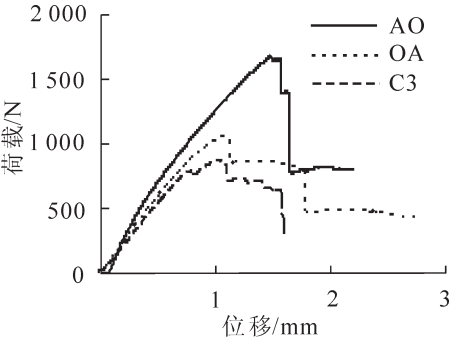


图 2 不同层叠结构铝-木复合材料的荷载位移曲线

Figure 2 Load-deflection curves of different specimens

表 1 铝-木复合材料纵向、横向弹性模量

类型	纵向		横向	
	弹性模量/GPa	变异系数/%	弹性模量/GPa	变异系数/%
AO	12.34	8.94	9.34	9.00
OA	5.40	8.10	3.24	4.00
C3	4.81	7.01	3.19	10.23

说明：变异系数(%)=标准差/平均值×均值数。

向弹性模量提升更为显著。叠加铝合金薄板在最外层的 AO 纵向横向弹性模量比为 21/16, 同样层数定向刨花板层叠的 C3 纵向、横向弹性模量比为 24/16。这是由于铝合金薄板是各向同性材料与各向异性定向刨花板胶合板层叠后一定层度上缩小了材料的各向异性。

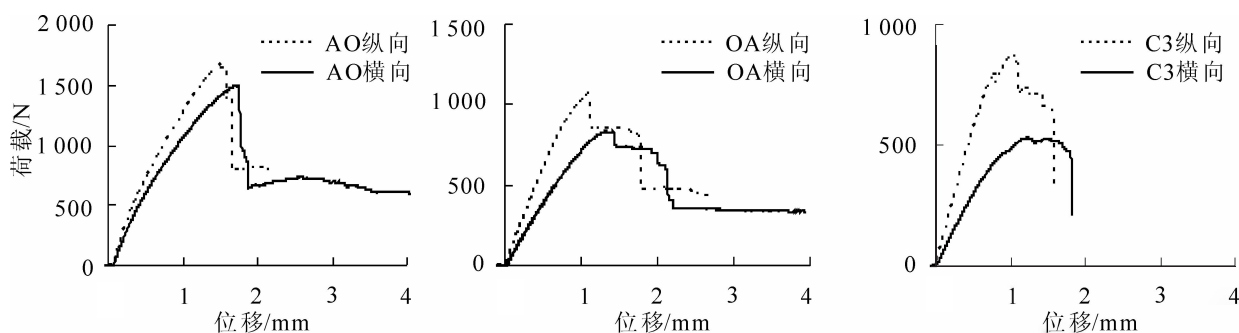


图3 各结构铝-木复合材料纵向、横向荷载位移曲线

Figure 3 Load-deflection curves of different specimens

2.3 胶层对单层定向刨花板弹性模量的影响

从表2可以看出:涂胶后的定向刨花板单板纵向、横向弹性模量都有很大的改变。单面涂胶的定向刨花板单板 O1 对比普通定向刨花板单板 O:纵向弹性模量提高了 4.67%, 横向弹性模量提高了 43.45%。上下面都涂胶的定向刨花板单板对比普通定向刨花板单板 O:纵向弹性模量提高了 57.98%, 横向弹性模量提高了 69.50%。这与 OKUMA^[16]胶层对胶合板弹性模量影响的研究结果一致,胶层使得定向刨花板单板弹性模量的提高。因此,在下文中预测铝-木复合材料弹性模量必须考虑胶层的影响。

表2 单层定向刨花板横向、纵向弹性模量

Table 2 Parallel and perpendicular MOE of single layer OSB

类型	纵向		横向	
	弹性模量/GPa	变异系数/%	弹性模量/GPa	变异系数/%
O	4.07	5.94	1.68	4.00
O1	4.26	6.16	2.41	7.00
O2	6.43	9.01	2.84	11.04

说明:变异系数(%)=标准差/平均值×均值数。

3 铝-木复合材料的弹性模量叠层模型

3.1 层合板理论模型

以厚度方向为 z 轴垂直于板面,沿 z 轴正方向将单板依次标记为 $1 \sim n$, x 和 y 坐标轴面置于板坯中面, x 和 y 轴分别与试件横向 T , 纵向 L 一致,令第 k 层单板的底面坐标为 Z_k , 其顶坐标为 Z_{k+1} , 层合板厚度为 h , 则 $Z_0 = -h/2$, $Z_n = h/2$ 。根据经典层合理论,一般层合板内力—应变关系矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} N \\ \dots \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \dots & \dots & \dots \\ B & \vdots & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ \dots \\ k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中: $[A]$ 联系面内力与中面的应变,称为面内刚度矩阵; $[B]$ 联系面内力和弯扭变形,称为耦合刚度(coupling stiffness)矩阵; $[D]$ 联系弯曲率和弯扭内力,称为弯曲刚度矩阵。

$$D_{ij}^* = 4 \sum_{k=1}^n Q_{ij}^{(k)} (z_k^3 - z_{k-1}^3) / h^3 \quad (3)$$

而式(3)中:模量分量 $Q_{ij}^{(k)}$ 与工程弹性常数有如下关系:

$$\begin{cases} Q_{11}^k = \frac{E_{11}^k}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22}^k = \frac{E_{22}^k}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),第 k 层对铝-木层合板的加权弹性模量为:

$$\begin{cases} E_L^k = \frac{4}{h^3 E_{11}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) (1 - \nu_{12} \nu_{21})} \\ E_T^k = \frac{4}{h^3 E_{22}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) (1 - \nu_{12} \nu_{21})} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中： E_L^k 为第 k 层对顺纹弯曲弹性模量加权值， E_T^k 为第 k 层对横纹弯曲弹性模量加权值， E_{11}^k 为第 k 层纵向弯曲弹性模量， E_{22}^k 为第 k 层横向弯曲弹性模量。结合式(3)式(4)式(5)式可得到：

$$\begin{cases} E_L = \sum_{i=1}^n E_L^i + \sum_{i=1}^m E_T^i \\ E_T = \sum_{i=1}^n E_T^i + \sum_{i=1}^m E_L^i \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知只要知道各层铝合金薄板、定向刨花板的厚度、弹性模量和泊松比，就可以计算出铝-木复合材料的弹性模量。

3.2 各项参数确定

从 2.3 分析看出：胶层对单层定向刨花板弹性模量的影响不可忽视，然而胶合板胶层的厚度很薄^[16]，因此，将胶层的厚度忽略，考虑涂胶对单层定向刨花板弹性模量的影响，做以下方案。

方案 1：将单层定向刨花板分为单面涂胶单层定向刨花板和双面涂胶单层定向刨花板，即相同热压条件下单面涂胶 O1 和单面涂胶 O2 实测弹性模量。方案 2：将未涂胶定向刨花板弹性模量带入计算作为对比。

方案 1 和方案 2 中单层定向刨花板的厚度 h ，由热压后铝-木复合材料实测厚度(AO：19.76 mm，OA：18.93 mm)减去铝合金薄板厚度(0.5 mm 热压前后铝合金薄板厚度不变)除以定向刨花板层数计算得到，定向刨花板纵向和横向泊松比分别为 0.375 和 0.109^[17]。

3.3 铝-木复合材料叠层模型的验证

将方案 1 和方案 2 中的数据代入式(5)和式(6)对铝-木复合材料试件的纵向、横向抗弯弹性模量进行求解，比较预测值和实际值，结果见表 3。方案 1 参数所预测 AO 型结构的纵向、横向弹性模量与实测值相对误差分别为 4.24% 和 5.99%，OA 型结构的纵向、横向弹性模量与实测值相对误差分别为 -2.92% 和 8.77%，与实测值较为接近。方案 2 参数所预测得到的弹性模量都比实际值偏低，OA 型横向弹性模量预测值的相对误差达到 -15.77%。分析原因：胶黏剂与木质复合材料接触时，在木质复合材料表面上黏附、渗透及铺展的效果对木质材料力学性能有一定影响^[18]。因此，上下表面涂胶对定向刨花板单板的力学性能的影响不可忽略。方案 1 中，考虑胶层对定向刨花板的影响，将它分为双面涂胶和单面涂胶定向刨花板可以更为准确地预测铝-木复合材料的弹性模量。

表 3 铝-木复合材料横向、纵向弹性模量预测值

Table 3 Parallel and perpendicular predicting MOE of WAC

方案	方向	类型	预测弹性模量/GPa	相对误差/%
方案 1	纵向	AO	12.86	4.24
		OA	5.24	-2.92
	横向	AO	9.90	5.99
		OA	3.52	8.77
方案 2	纵向	AO	10.80	-12.49
		OA	5.02	-6.98
	横向	AO	8.82	-5.52
		OA	2.73	-15.77

4 结论

铝合金薄板越靠近外层对抗弯弹性模量和荷载峰值的提升越大，铝合金薄板在最外层的贴面结构是最为合理的，这对实际生产有很高的指导价值。

铝-木复合材料的横向弹性模量提高 192.79%，纵向弹性模量提高 156.55%，与铝合金薄板层叠缩小了定向刨花板横纵向的差异性。

在经典层合理论的基础上，考虑胶层对定向刨花板力学性能的影响，带入涂胶后定向刨花板单层的弹性模量，可以准确预测不同组坯方式的铝-木复合材料的纵向弹性模量和横向弹性模量。

5 参考文献

- [1] LIN C H, YANG T H, LAI W J, *et al.* Anisotropic physical and mechanical performance of PF-impregnated oriented strand board [J]. *Bioresources*, 2013, **8**(2): 1933 – 1945.
- [2] 张方文, 于文吉. 欧洲定向刨花板发展现状及最新市场情况[J]. 国际木业, 2014, **44**(9): 16 – 19.
ZHANG Fangwen, YU Wenji. Current situation and new development of oriented strand board in Europe [J]. *Int Wood Ind*, 2014, **44**(9): 16 – 19.
- [3] 董春雷. 木结构建筑用木质工字梁整体静态弯曲性能的研究和设计[D]. 昆明: 西南林学院, 2009.
DONG Chunlei. *Study and Designing of Static-Bending Performance of Wood I-Joist Used for Wooden House* [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2009.
- [4] 陈伟, 叶继红. 基于势能原理的双轴对称工字梁弹性侧向屈曲研究[J]. 工程力学, 2012, **29**(3): 95 – 102.
CHEN Wei, YE Jihong. Elastic lateral buckling of doubly symmetric I-beams based on potential energy method [J]. *Eng Mech*, 2012, **29**(3): 95 – 102.
- [5] 张以河. 复合材料学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 4 – 5.
- [6] 师昌绪. 材料大辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994: 578 – 610.
- [7] 徐涛. 金属层状复合材料的发展与应用[J]. 轻铝合金加工技术: 2012, **40**(6): 7 – 10.
XU Tao. Development and application of laminated-metal composite [J]. *Light Alloy Fabr Technol*, 2012, **40**(6): 7 – 10.
- [8] LU Keyang, WHITE R H, FU Feng, *et al.* Reinforced hybrid wood-aluminum composites with excellent fire performance [J]. *Holzforschung*, 2014, **69**(8): 1027 – 1037.
- [9] 张晓冬, 李君, 王泉中, 等. 木竹复合层合板力学性能预测与分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, **29**(6): 103 – 105.
ZHANG Xiaodong, LI Jun, WANG Quanzhong, *et al.* Mechanical property prediction of laminated wood-bamboo composite and analysis [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2005, **29**(6): 103 – 105.
- [10] 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), 2007, **27**(2): 21 – 24.
LU Xiaoning, HUANG Helang, DU Yicheng. The prediction of elastic modulus in tangential direction of poplar veneer [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2007, **27**(2): 21 – 24.
- [11] 王志强, 卢晓宁, 陈虞平. 经典层合板刚度模型在胶合板中的应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, **32**(3): 8 – 12.
WANG Zhiqiang, LU Xiaoning, CHENG Yuping. Application of stiffness models of classical laminate plate theory in plywood [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2007, **32**(3): 8 – 12.
- [12] 余养伦, 于文吉, 张方文. 厚胶合板弹性模量预测模型[J]. 北京林业大学学报, 2009, **31**(1): 130 – 133.
YU Yanglun, YU Wenji, ZHANG Fangwen. Prediction of modules of elastic of thick plywood [J]. *J Beijing For Univ*, 2009, **31**(1): 130 – 133.
- [13] OKABE M, YASUMURA M, KOBAYASHI K, *et al.* Prediction of bending stiffness and moment carrying capacity of sugi cross-laminated timber [J]. *J Wood Sci*, 2014, **60**(1): 49 – 58.
- [14] 范金娟, 程小全, 陶春虎. 聚合物基复合材料构件失效分析基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 32 – 57.
- [15] 刘昭特, 张彦飞, 杜瑞奎, 等. 铺层结构对复合材料层合板弯曲强度及失效行为的影响[J]. 工程塑料应用, 2014, **42**(1): 56 – 61.
LIU Zhaote, ZHANG Yanfei, DU Ruikui, *et al.* Effect of layered structures on flexural strength and failure behaviors of composite laminates [J]. *Eng Plast Appl*, 2014, **42**(1): 56 – 61.
- [16] OKUMA M. Plywood properties influenced by the glue line [J]. *Wood Sci Technol*, 1976, **10**(1): 57 – 68.
- [17] 范文英, 沈福民. 定向刨花板弹性模量及泊松比的测试[J]. 北京木材工业, 1995(4): 32 – 33.
FANG Wenying, SHEN Fumin. MOE and poisson ratio of orient strand board [J]. *Beijing Wood Ind*, 1995(4): 32 – 33.
- [18] KHRULEV V M. Surface roughness and rheological properties of adhesives as factors determining optimal thickness of glue line [J]. *Polym Mech*, 1965, **1**(6): 61 – 63.