

## 强化复合地板刚度预测

王志强<sup>1</sup>, 季雪平<sup>2</sup>, 卢晓宁<sup>1</sup>, 朱林<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学 木材工业学院, 江苏 南京 210037; 2. 常州市泰诺化工材料有限公司, 江苏 常州 213022;  
3. 四川升达林业产业股份有限公司 温江人造板分公司, 四川 成都 611130)

**摘要:** 应用复合材料经典层合板理论, 分析了强化复合地板刚度计算, 并使用电阻应变片测得试件在受轴向拉伸或纯弯曲载荷时, 其上、下表面的应变  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$ , 从而对柔度系数的实验值和预测值, 正则化柔度系数与弹性常数进行了验证。结果表明, 预测值与实验值相对误差较小, 建立的强化复合地板刚度计算模型能较好地符合实际情况。图 1 表 5 参 8

**关键词:** 林业工程; 经典层合板理论; 刚度预测; 强化复合地板

**中图分类号:** S781.2; TS653      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2010)05-0646-05

## Stiffness prediction of laminated flooring

WANG Zhi-qiang<sup>1</sup>, JI Xue-ping<sup>2</sup>, LU Xiao-ning<sup>1</sup>, ZHU Lin<sup>3</sup>

(1. College of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Changzhou Tainuo Chemical Materials Co., Ltd., Changzhou 213022, Jiangsu, China; 3. Wenjiang Wood-Based Panels Branch, Sichuan Shengda Forestry Industry Co., Ltd., Chengdu 611130, Sichuan, China )

**Abstract:** On the basis of the classic theory on plywood, the stiffness computation model of laminated flooring was built in this paper. In the model test, the test specimens were under single axial tensile load or pure bending moment load, the strain of face and back plies,  $\varepsilon_x$  and  $\varepsilon_y$  were obtained through strain gage, so the experimental and theoretic value of some compliance coefficients were tested. The result from experiments showed the stiffness model could have a good prediction of the stiffness of laminated flooring. [Ch, 1 fig. 5 tab. 8 ref.]

**Key words:** forest engineering; classic theory on plywood; stiffness prediction; laminate flooring

强化复合地板在结构上不完全对称, 所以产品在存放或使用过程中, 由于各组成材料(主要是表层耐磨纸、装饰层木纹纸和底层平衡纸)的吸湿性和膨胀率有差异, 强化地板容易翘曲变形<sup>[1]</sup>。国内相关研究主要从生产工艺、使用和铺装等 3 个方面对强化复合地板的翘曲变形进行控制<sup>[2-3]</sup>。复合材料力学中, 经典层合板理论已经被实验所证明能很好地描述层合板刚度问题, 并且广泛用于复合材料结构设计中<sup>[4-5]</sup>。人造板工业中, 许多产品都可以看作是层合板, 如胶合板、强化复合地板等。本研究在前期研究基础上<sup>[1,6-7]</sup>, 分析强化复合地板刚度, 通过计算刚度矩阵值来进行弹性和翘曲变形方面的结构设计。

### 1 刚度计算

#### 1.1 基本假定

将整个强化复合地板视为“层合板”, 由 4 种单层板[表层耐磨纸、装饰层木纹纸、基材高密度纤

收稿日期: 2010-01-05; 修回日期: 2010-04-25

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009530)

作者简介: 王志强, 讲师, 博士, 从事木结构与木质复合材料研究。E-mail: wangzhiqiang@njfu.edu.cn

维板(HDF)、平衡层平衡纸]构成。板坯热压后，在压力和温度作用下，单层间通过胶黏剂粘结牢固，单层间胶黏剂在 2 个相邻单层上均匀分布且厚度不计。整个强化复合地板满足经典层合板理论基本假定<sup>[4]</sup>。

取坐标  $z$  轴垂直于板面，向下为正，沿  $z$  轴正方向将单层板依次编号 1 至 4， $x-y$  坐标面置于板坯中面，设定坐标  $x, y$  与地板长度、宽度方向一致，坐标体系如图 1。令第  $k$  层单层板厚度为  $t_k$ ，该单层底面在  $z$  轴方向坐标为  $z_k$ ，顶面为  $z_{k-1}$ ，则： $z_0 = -h/2$ ， $z_4 = h/2$  ( $h$  为地板厚度)。根据材料特性，将 3 种浸渍纸视为正交各向异性单层板，基材高密度纤维板视为各向同性单层板。

### 1.2 计算公式

根据复合材料力学层合板理论<sup>[4]</sup>，强化复合地板刚度计算可由式(1)(2)(3)组成：

$$\left. \begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^{(k)}(z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= 0 \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^{(k)}(z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \right\} (i, j = 1, 2, 6)。 \quad (1)$$

其中，浸渍纸单层板弹性主方向刚度计算公式：

$$\left. \begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_L}{1 - v_{LT} v_{TL}}, \quad Q_{12} = \frac{E_L v_{TL}}{1 - v_{LT} v_{TL}}, \quad Q_{16} = 0 \\ Q_{22} &= \frac{E_T}{1 - v_{LT} v_{TL}}, \quad Q_{66} = G_{LT}, \quad Q_{26} = 0 \end{aligned} \right\}。 \quad (2)$$

基材高密度纤维板单层弹性主方向刚度计算公式：

$$\left. \begin{aligned} Q_{11} &= Q_{22} = \frac{E}{1 - v^2}, \quad Q_{12} = \frac{vE}{1 - v^2} \\ Q_{66} &= \frac{E}{2(1 + v)}, \quad Q_{16} = Q_{26} = 0 \end{aligned} \right\}。 \quad (3)$$

式(1)中， $A_{ij}$  为面内刚度系数( $N \cdot mm^{-1}$ )， $B_{ij}$  为耦合刚度系数( $N$ )， $D_{ij}$  为弯曲刚度系数( $N \cdot mm^{-1}$ )； $\bar{Q}_{ij}^{(k)}$  为第  $k$  层单层板非弹性主方向刚度系数(MPa)； $N$  为板坯层数( $N = 4$ )；式(2)中， $Q_{ij}$  为浸渍纸单层板弹性主方向刚度系数(MPa)； $E_L$  为浸渍纸单层板顺纹弹性模量(MPa)； $E_T$  为浸渍纸单层板横纹弹性模量(MPa)； $G_{LT}$  为浸渍纸单层板面内纵横向剪切弹性模量(MPa)； $v_{LT}(v_{TL})$  为浸渍纸单层板面内纵横向(横纵向)泊松比。式(3)中， $E$  为基材高密度纤维板弹性模量(MPa)， $v$  为基材高密度纤维板泊松比。

将刚度矩阵 $[A]$ ， $[B]$ 和 $[D]$ 分别求逆可得到柔度矩阵 $[a]$ ， $[b]$ 和 $[d]$ ，为了使刚度系数易于比较，可以将刚度矩阵和柔度矩阵分别正则化处理，得到正则化刚度矩阵 $[A^*]$ ， $[B^*]$ 和 $[D^*]$ 和柔度矩阵 $[a^*]$ ， $[b^*]$ 和 $[d^*]$ <sup>[4]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

基材高密度纤维板：含水率为 8% ~ 10%，名义厚度 8.00 mm。三聚氰胺浸渍纸：装饰纸，定量为 70  $g \cdot m^{-2}$ ，上胶量为 100%，名义厚度 0.08 mm。耐磨纸，定量为 45  $g \cdot m^{-2}$ ，上胶量为 260%，名义厚度 0.10 mm。平衡纸，定量为 120  $g \cdot m^{-2}$ ，上胶量为 127%，名义厚度 0.21 mm。电阻应变片：型号 BE120-5AA(11)，灵敏系数为  $2.10 \pm 0.01$ 。

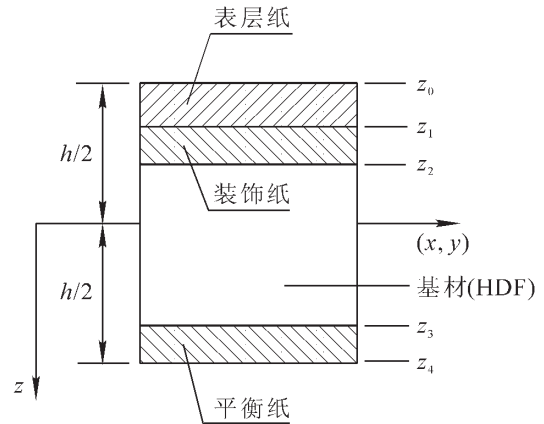


图 1 强化复合地板层合板坐标体系

Figure 1 Coordinate system of impregnated paper laminate floor

## 2.2 方法

浸渍纸弹性常数测定。3种浸渍纸分别在压力2 MPa, 温度190 ℃, 时间30 s条件热压固化, 每种浸渍纸制作纵横向试件各10个, 试件长×宽为250 mm×25 mm。参照GB 453-1989进行拉伸, 得到位移与载荷数据, 再拟合得到浸渍纸纵向和横向弹性模量。

基材高密度纤维板力学性能测试。参照GB 17657-1999测试弹性模量、静曲强度等指标。同时, 在试件表面长度和宽度方向分别粘贴应变片, 在弹性范围内对基材高密度纤维板进行拉伸, 采集长度和宽度方向应变, 利用最小二乘法拟合直线得到抗拉弹性模量和泊松比值。

强化复合地板压制。组坯好的板坯在压力2 MPa, 温度190 ℃, 时间30 s条件进行压制。试件幅面为420 mm×420 mm。再锯成0度梁和90度梁试件, 试件尺寸: 长×宽为300 mm×30 mm。

应变采集。在板坯上、下表面对应位置布置4片电阻应变片, 当板坯仅受纯拉力( $N_x$ 或 $N_y$ )或纯弯矩( $M_x$ 或 $M_y$ )作用时, 在弹性范围内采用等量加载法, 测量板坯上、下表面4点的应变 $\varepsilon_x$ 和 $\varepsilon_y$ 。

通过公式(4)计算板坯中面应变 $\varepsilon^0$ 和曲率 $k$ , 由已知轴向载荷 $\{N\}$ 、纯弯矩 $\{M\}$ 及测量计算的 $\varepsilon^0$ 和 $k$ , 代入公式(5)计算柔度系数实验值<sup>[8]</sup>。另一方面, 根据公式(1), (2)和(3)计算的刚度矩阵求逆得到柔度系数理论值, 将柔度系数实验值和理论值比较, 进行验证。试验方案见表1。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i^0 - \frac{h}{2}k_i &= \varepsilon_i^{\text{上}} \\ \varepsilon_i^0 - \frac{h}{2}k_i &= \varepsilon_i^{\text{下}} \end{aligned} \right\} (i, j = 1, 2, 6, h \text{ 为试件厚度})。 \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}。 \quad (5)$$

式(4)和(5)中,  $\{\varepsilon^0\}$ 为板坯中面面内应变,  $\{\varepsilon_i^{\text{上}}\}$ 和 $\{\varepsilon_i^{\text{下}}\}$ 为板坯上下表面面内应变,  $\{k\}$ 为板坯中面弯曲应变,  $\{N\}$ 为板坯横截面单位宽度内力,  $\{M\}$ 为板坯横截面单位宽度内力矩。

## 3 结果与分析

### 3.1 材料弹性常数

浸渍纸 $G_{LT}$ 值由 $G_{LT} = \frac{E_L}{2(1+v_{LT})}$ 近似得到,  $v_{LT}$ 由参考文献4中近似得到。高密度纤维板剪切模量 $G$ 值由 $G = \frac{E}{2(1+v)}$ 计算得到。强化复合地板构成材料的弹性常数如表2。

表2 材料弹性常数

Table 2 Elasticity parameters of materials

单层板	名义厚度/mm	$E_L/(E) / \text{MPa}$	$E_T / \text{MPa}$	$G_{LT}(G) / \text{MPa}$	$v_{LT}(v)$
耐磨浸渍纸	0.21	4 226 (4.17)	3 147 (3.27)	1 625	0.30
木纹浸渍纸	0.13	7 439 (1.87)	7 463 (4.92)	2 861	0.30
高密度纤维板	8.00	1 388		583	0.19
平衡浸渍纸	0.26	5 237 (6.28)	4 906 (6.21)	2 014	0.30

说明: ( )中数据为变异系数(%)。

表1 试验设计方案

Table 1 Experiments and plans

编号	试件类型	载荷	验证柔度系数
1	0度梁	纯拉力 $N_x$	$a_{11}, a_{12}, b_{11}, b_{12}$
		纯弯矩 $M_x$	$b_{11}, b_{12}, d_{11}, d_{12}$
2	90度梁	纯拉力 $N_y$	$a_{12}, a_{22}, b_{12}, b_{22}$
		纯弯矩 $M_y$	$b_{12}, b_{22}, d_{12}, d_{22}$

说明: 0度梁和90度梁, 分别指试件表层纸的纹理方向与试件长度方向分别成0°和90°。

### 3.2 实验验证

3.2.1 柔度系数理论值与实验值 为减少误差，在公式(4)中代入多点测量的  $\Delta N$  (或  $\Delta M$ ) 和  $\Delta \varepsilon$  (或  $\Delta k$ ) 的平均值，计算出柔度系数的实验值。公式(4)主要计算参数见表 3，验证结果见表 4。

表 3 主要计算参数

Table 3 Major parameters for computation

板坯 编号	载荷类型	试件宽度/ mm	试件厚度/ mm	单位宽度力/ (N·mm <sup>-1</sup> )	单位宽度弯矩/N	中面应变 $\varepsilon(\times 10^{-6})$		中面曲率 $k(\times 10^{-6})/\text{mm}^{-1}$	
						$\Delta \varepsilon_x^0$	$\Delta \varepsilon_y^0$	$\Delta k_x$	$\Delta k_y$
1	顺纹拉力	29.24	7.56	1.71	3.42	104	- 24	0	1
	顺纹弯矩					2	0	37	- 9
2	横纹拉力	30.25	7.46	1.65	3.31	- 23	116	0	0
	横纹弯矩					1	- 3	- 8	39

表 4 强化复合板刚度模型验证

Table 4 Test for stiffness models of impregnated paper laminate floor

编号	柔度系数	理论值( $\times 10^{-8}$ )	实验值( $\times 10^{-8}$ )	相对误差/%	编号	柔度系数	理论值( $\times 10^{-8}$ )	实验值( $\times 10^{-8}$ )	相对误差/%
1	$a_{11}$	6 978	6 082	- 14.73	2	$a_{12}$	- 1 490	- 1 392	- 7.04
	$a_{12}$	- 1 490	- 1 404	- 6.13		$a_{22}$	7 131	6 988	- 2.05
	$b_{11}$	91	0			$b_{12}$	- 14	15	193.33
	$b_{12}$	- 14	0			$b_{22}$	60	0	
	$d_{11}$	877	1 071	18.39		$d_{12}$	- 211	- 255	17.25
	$d_{12}$	- 211	- 255	17.25		$d_{22}$	918	1 168	21.40

说明：柔度系数[a], [b], [d]单位分为 mm·N<sup>-1</sup>, N<sup>-1</sup> 和 N·mm<sup>-1</sup>；相对误差 = (实验值-理论值)/实验值 × 100%。

由表 4 数据可以看出，面内柔度系数  $a_{11}$ ,  $a_{12}$  和  $a_{22}$  以及弯曲柔度系数  $d_{11}$ ,  $d_{12}$  和  $d_{22}$  的理论值和预测值之间的相对误差较小，而且相对误差呈一定的规律，即面内柔度系数的实验值都小于理论值，而弯曲柔度系数则相反。这说明在实际预测强化复合地板的面内刚度和弯曲刚度时可以进行修订，使得预测值和实际值的相对误差减少。另外，对于耦合柔度系数  $b_{11}$ ,  $b_{12}$  和  $b_{22}$  的实验值几乎都为 0 (除 2 号试件  $b_{22}$  除外)，而且与其他柔度系数相比在数值上小得多，这说明该结构的板坯存在较小的耦合效应，这也可以从板坯的正则化耦合刚度系数值看出，其中  $B_{11}^* = - 43$ ,  $B_{12}^* = - 9$ ,  $B_{22}^* = - 27$ ,  $B_{66}^* = - 15$ 。而耦合柔度系数的理论值不为 0，主要由于构成材料的弹性系数拟合存在误差等原因造成。

3.2.2 正则化柔度系数与弹性常数 强化复合地板，由于结构上的特殊性，基材上下表面分别覆盖不同的浸渍纸，在结构上不可能完全对称。从实验数据来看，本实验压制的复合地板正则化耦合刚度系数值较小，这说明板坯耦合效应很小，可近似认为属于对称结构。根据参考文献[4]，对称结构层合板的正则化柔度系数和弹性常数之间存在关系，如式(6)。这样，可以将实验测试值  $E_L$ ,  $E_T$ ,  $v_{LT}$ ,  $v_{LT}$  和理论计算值进行比较，进一步对文中建立的刚度模型进行验证。

表 5 正则化柔度系数与弹性常数

Table 5 Normalizable compliance coefficient and modulus of elasticity (MOE)

$E_L/\text{MPa}$	$\frac{1}{a_{11}}/\text{MPa}$	相对误差/%	$E_T/\text{MPa}$	$\frac{1}{a_{22}}/\text{MPa}$	相对误差/%
2 089	1 666	20.25	1 996.00	1 631.00	18.29
$v_{TL}$	$-\frac{a_{21}^*}{a_{11}}$	相对误差/%	$v_{LT}$	$-\frac{a_{12}^*}{a_{22}}$	相对误差/%
0.226	0.214	5.51	0.200	0.209	- 4.49

$$E_L = \frac{1}{a_{11}^*}, E_T = \frac{1}{a_{22}^*}, v_{TL} = -\frac{a_{21}^*}{a_{11}^*}, v_{LT} = -\frac{a_{12}^*}{a_{22}^*}. \quad (6)$$

#### 4 结论

强化复合地板可视为层合板, 其中浸渍纸和高密度纤维板可分别视为正交各向异性单层板和各向同性材料单层板。在相关假设基础上, 根据经典层合理论计算强化复合地板刚度, 柔度系数、正则化柔度系数与弹性常数之间的相对误差较小。

利用建立的强化复合地板刚度模型, 对于不完全对称的强化复合地板, 可通过计算设计结构的耦合刚度矩阵 $[B] = 0$ , 来控制板坯翘曲度。

利用建立的强化复合地板刚度模型, 可通过计算设计结构的正则化柔度系数来预测其弹性性能。

#### 参考文献:

- [1] 王志强, 卢晓宁, 肖中平. 胶合板湿变形模型[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, **34** (1): 101 - 103.  
WANG Zhiqiang, LU Xiaoning, XIAO Zhongping. Predict the hygroscopic deformation of plywood [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2010, **34** (1): 101 - 103.
- [2] 吴晓金, 杨军. 强化木地板的翘曲变形及其预防[J]. 林产工业, 2000, **27** (6): 24 - 26.  
WU Xiaojin, YANG Jun. Deformation of laminated floor and its precautions [J]. *China For Prod Ind*, 2000, **27** (6): 24 - 26.
- [3] 方立新. 强化木地板翘曲变形与工艺探讨[J]. 人造板通讯, 2003 (4): 6 - 7.  
FANG Lixin. Research on warping and technology of laminated floor [J]. *China Wood-Based Panels*, 2003 (4): 6 - 7.
- [4] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [5] 那斌, 卢晓宁. 胶合板弹性特性预测[J]. 建筑人造板, 2002 (1): 31 - 33.  
NA Bin, LU Xiaoning. The prediction of elastic property of plywood [J]. *Build Artif Board*, 2002 (1): 31 - 33.
- [6] 王志强, 郭飞燕, 卢晓宁, 等. 速生树种胶合板弯曲弹性性能优化设计[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, **33** (1): 30 - 32.  
WANG Zhiqiang, GUO Feiyan, LU Xiaoning, et al. Optimizing design of fast-growing woody species plywood bend elastic properties [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2009, **33** (1): 30 - 32.
- [7] 王志强, 卢晓宁, 朱月虎, 等. 不对称人造板结构设计研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, **30** (3): 23 - 26.  
WANG Zhiqiang, LU Xiaoning, ZHU Yuehu, et al. The structural design of unsymmetrical wood based panels [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2006, **30** (3): 23 - 26.
- [8] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 178 - 179.