

厚胶合板弹性模量预测模型

余养伦 于文吉 张方文

(中国林业科学研究院木材工业研究所)

摘要:为了预测厚胶合板弹性模量,通过简化层合板理论,该文建立了胶合板弹性模量预测模型,并以单板条、经过涂胶热压处理的单板条和相同工艺条件下的单板层积材的弹性模量,采用4种不同铺层方式的19层桉树胶合板对模型进行了验证。结果表明:3种预测值与实测值的趋势一致,相关系数 R^2 顺纹在0.86以上,横纹在0.88以上,但是精度不同。采用单板条弹性模量预测的胶合板弹性模量比实测值偏低;采用经过涂胶热压处理后的单板条弹性模量预测的胶合板弹性模量比实测值偏高;采用相同工艺条件下的单板层积材弹性模量预测的胶合板弹性模量与实测值偏差较小,顺纹平均误差为4.64%,横纹平均误差10.94%。因此,采用相同工艺条件下的单板层积材的弹性模量来预测胶合板的弹性模量是可行的。

关键词:厚胶合板;弹性模量;预测模型

中图分类号:TS653.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2009)01-0130-04

YU Yang-lun; YU Wen-ji; ZHANG Fang-wen. Prediction of modules of elastic of thick plywood. *Journal of Beijing Forestry University* (2009) 31(1) 130-133 [Ch, 13 ref.] Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

In order to predict the modules of elastic (*MOE*) of thick plywood, a mathematical model was developed by predigested laminate theory. The *MOE* of plywood was predicted based on *MOE* of veneer stands, veneer stands treated with gluing and hot pressing or laminate veneer lumber. The results showed that the trend of predicted values by three methods was similar to experimental values of *MOE*. The correlation coefficients between predicted and experimental values of longitudinal and transverse *MOE* were above 0.86 and 0.88, respectively. Different methods had obvious different accuracy. The experimental *MOE* of plywood was higher than that predicted by the *MOE* of veneer stands, while lower than that predicted by the *MOE* of veneer stands treated with gluing and hot pressing. The *MOE* of plywood predicted by the *MOE* of laminate veneer lumber well agreed with the experimental values, the average error values of longitudinal and transverse *MOE* were 4.64% and 10.94%, respectively. The results indicate that the *MOE* of thick plywood predicted by the *MOE* of laminate veneer lumber at the similar hot pressing technology is accurate and practicable.

Key words thick plywood; modules of elastic (*MOE*); predicted model

弹性模量是胶合板结构设计的重要依据之一,木材的顺纹弹性模量是横纹的20~30倍^[1],因此,铺层的顺序对板材的弹性模量具有重要的影响。如果能用理论方法预测弹性模量来指导材料的结构设计,对于铺层数较多的厚胶合板具有一定的理论和实际意义。

近年来,国内外学者对木质复合材料弹性模量预测模型进行了大量的探索和研究,并取得了可喜

的进展。Sotelo^[2]用有限元从微观和宏观两个尺度对不同含水率的墨西哥6种木材的顺纹和横纹的弯曲弹性模量和压缩弹性模量进行了预测,预测结果与实际较为接近。周小凡等^[3]利用层合板理论结合植物纤维细胞壁的微观结构建立了数学模型,研究了植物纤维细胞壁的微观结构特征与纤维弹性模量的计算机仿真,探讨了纤维细胞壁的各向弹性模量与纸张纤维细胞的结构特性之间的关系。卢晓宁

收稿日期:2007-12-25

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD19B0504)、“948”国家林业局引进项目(2006-4-C04)。

第一作者:余养伦。主要研究方向:木基复合材料。电话:010-62889481 Email:yuyanglun@caf.ac.cn 地址:100091 北京颐和园后中国林业科学研究院木材工业研究所。

责任作者:于文吉。研究员。主要研究方向:木基复合材料。电话:010-62889427 Email:yuwenji@caf.ac.cn 地址:同上。

等^[4-6]建立了速生杨木 (*Populus*) 单板顺纹、横纹弹性模量和纵横向剪切模量的预测模型。那斌等^[7]对花旗松 (*Pseudotsuga merziesii*) 胶合板弹性模量进行了预测。王志强等^[8]建立了不对称人造板耦合刚度矩阵计算模型,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。

综上所述,目前对木质复合材料的力学模型的研究主要是借鉴复合材料层合板理论,采用有限元方法或通过编程等方法对木质复合材料的性能进行预测,计算方法较为复杂。本文拟在借鉴各种模型的基础上,对经典层合板理论进行简化,建立厚胶合板的弹性模量预测模型。

1 厚胶合板弹性模量模型的建立

根据层合板的弯曲理论,对称层合板的弯曲刚

度可由式(1)推算^[9]:

$$D_{ij} = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{n/2} \bar{Q}_{ij}^{(k)} (z_k^3 - z_{k-1}^3) \tag{1}$$

式中: D_{ij} 为层合板的单位宽度的弯曲刚度, ($i, j=1, 2, 6$); $\bar{Q}_{ij}^{(k)}$ 为层合板中第 k 层偏轴弯曲模量; k 为层合板的单层序号; Z_k 为层合板的第 k 个单层的坐标,当层合板的总层数 n 为奇数时,可将半个单层算作 1 个单层,总单层数 $k=2n$ (如图 1 所示)。当各单层的厚度相同时,将式(1)转化为:

$$D_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{ij}^{(k)} [k^3 - (k-1)^3] \tag{2}$$

式中: $[k^3 - (k-1)^3]$ 为对称层合板的加权因子,层合板中各层对弯曲刚度系数的贡献率与它们的到中面距离的三次方成正比,加权因子随远离中面而迅速增大。

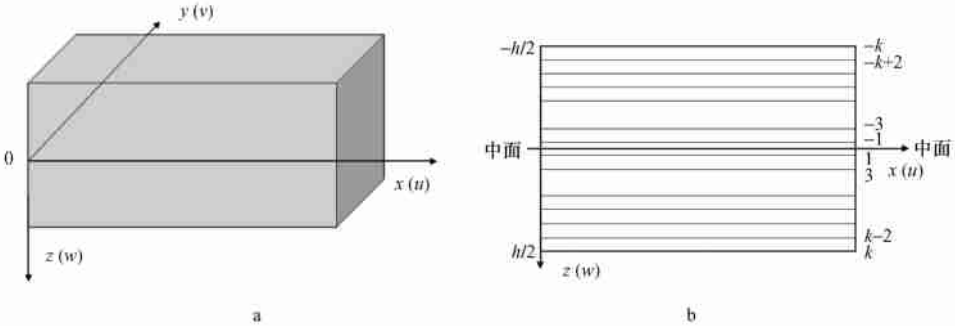


图 1 胶合板的几何标志图

FIGURE 1 Geometric coordinate system of plywood

注: $x(u)$ 为胶合板的顺纹坐标, $y(v)$ 为胶合板的横纹坐标, $z(w)$ 为胶合板的厚度坐标。

假设胶合板为等厚相同材质的各向异性单层所构成对称于中面的胶合板,则 $D_{16} = D_{26} = 0$, 弯、扭内力 M 与应变 ν 之间的关系可以表示为:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \nu_x \\ \nu_y \\ \nu_{xy} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

从式(3)可以看出,正交对称胶合板在弯曲时是正交各向异性的,仅有泊松效应而没有弯扭之间的耦合, D_{11} 和 D_{22} 为顺纹方向和横纹方向弯曲时的弯曲弹性模量,而顺纹和横纹弹性模量的预测对于胶合板而言具有重要的意义。由模量分量 Q 与工程弹性常数 E 的关系:

$$\begin{cases} Q_{11}^k = ME_{11}^k \\ Q_{22}^k = ME_{22}^k \end{cases} \tag{4}$$

式中: $M = (1 - \nu_{12} \nu_{21})^{-1}$, ν_{21} 为纵向泊松比, ν_{12} 为横向泊松比。根据 Persson^[10] 和 Mark^[11] 研究,木材纵向泊松比在 0.011 ~ 0.014 之间,横向泊松比为 0.161, $M = (1 - 0.014 \times 0.161)^{-1} = 1.0018$,故可将式(4)做如下近似处理:

$$\begin{cases} Q_{11}^k = E_{11}^k \\ Q_{22}^k = E_{22}^k \end{cases} \tag{5}$$

根据式(5),第 k 单层板对于木质复合材料的加权弹性模量为:

$$\begin{cases} E_{//k} = \frac{1}{n} E_{11}^k [k^3 - (k-1)^3] \\ E_{\perp k} = \frac{1}{n} E_{22}^k [k^3 - (k-1)^3] \end{cases} \tag{6}$$

式中: E_{11}^k 为第 k 层顺纹弹性模量, E_{22}^k 为第 k 层横纹弹性模量, $E_{//k}$ 为第 k 层单层对顺纹加权弹性模量; $E_{\perp k}$ 为第 k 层横纹加权弹性模量。根据层合板叠加原理,胶合板的顺纹弹性模量 E_x 和横纹弹性模量 E_y 为:

$$\begin{cases} E_x = D_{11} = \sum_{i=1}^n E_{//i} + \sum_{j=1}^m E_{\perp j} \\ E_y = D_{22} = \sum_{i=1}^n E_{\perp i} + \sum_{j=1}^m E_{//j} \end{cases} \tag{7}$$

式中: n 为顺纹板的总层数, m 为横纹板的总层数。

由式(6)、(7)可知,只要知道每个单层的弹性模量和铺层顺序,就可以预测出胶合板的弹性模量。

因此,如何选择每个单层的弹性模量对胶合板的弹性模量预测模型的精度具有重要影响。对此,本文选择了单板条的弹性模量、经过涂胶热压后的单板条和相同条件下单板层积材的弹性模量作为单层的弹性模量对厚胶合板的弹性模量进行了预测。

2 材料和方法

2.1 材 料

尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)采自广东湛江,单板厚度为 1.5 mm,幅面为 450 mm×300 mm,含水率为 5%~8%。

酚醛树脂购自北京太尔化工有限公司,固含量为 44%,pH 值为 12.5,黏度 220 Pa·s。

2.2 方 法

试验选用以下 4 种不同铺层方式:1# [$O_2/90_2/O_2/90_2/0/0$];2# [$O_2/90/0/90_2/0/90/0/0$];3# [$O_2/90/0/90/0/90/0_2/0$];4# [$O_2/90/O_2/90/0/90/0/0$],经铺装热压而成对称结构的 19 层胶合板。其中:“0”表示单板顺纹铺装,“90”表示单板横纹铺装,数据下标表示连续重复铺层数,顶标“—”表示对称中面。单板层

积材采用 19 层顺纹铺层方式,编号为 5#。

2.3 工艺条件

涂胶热压的单板条、单板层积材和不同铺层方式的胶合板的热压工艺为:热压温度 140℃,热压压力 3 MPa,热压时间 1 min/mm,施胶量 250 g/m²,板坯含水率 9%。

单板条和经涂胶热压后的单板条弹性模量(MOE)试件制作和测试方法参照 GB/T3356—1999^[12]进行。单板层积材和厚胶合板的弹性模量测试方法和试件制作按 GB/T17657—1999^[13]进行。

3 结果与分析

单板条的横纹弹性模量检测比较困难,本试验计算时横纹弹性模量均采用 19 层单板层积材的横纹弹性模量(789 MPa),顺纹弹性模量为桉树单板条的弹性模量(1 023 MPa)、经过涂胶热压处理后桉树单板条弹性模量(15 129 MPa)和 19 层桉树单层积材的弹性模量(12 027 MPa)(表 1)分别代入式(6)、(7),求得 1~4 号组坯 19 层胶合板的弹性模量(表 2)。

表 1 单板条和单板层积材的密度和弹性模量

TABLE 1 Density and MOE of veneer strip and laminate veneer lumber

项目	单板条		涂胶热压后单板条				单板层积材	
	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa		密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	
		顺纹	横纹	顺纹	横纹		顺纹	横纹
平均值	0.60	10 023	0.80	15 129	0.80	12 027	789	
标准方差	0.040 6	1 324	0.045 4	1 064	0.048 0	1 003	140	
变异系数	6.78	13.21	5.68	7.03	6.00	8.34	17.74	

表 2 厚胶合板弹性模量的预测值和实验值

TABLE 2 Predicted and experimental values of MOE of thick plywood

项目	顺纹				<i>R</i> ²	横纹				<i>R</i> ²
	1#	2#	3#	4#		1#	2#	3#	4#	
压缩比/%	19.5	19.6	21.9	19.7		22.4	21	21.5	20.0	
密度/(g·cm ⁻³)	0.78	0.78	0.83	0.81		0.83	0.78	0.80	0.82	
静曲强度/MPa	69	59	84	82		48	50	57	50	
弹性模量	实测值/MPa	7 641	8 110	9 371	9 554	5 033	4 979	4 831	3 935	
	预测值 1/MPa	6 850	6 979	7 336	7 788	0.862 2	3 973	3 844	3 487	0.886 2
	误差/%	-10.35	-13.95	-21.72	-18.48		-21.06	-22.80	-27.82	-22.87
	预测值 2/MPa	10 199	10 399	10 955	11 657	0.862 5	5 730	5 530	4 974	0.885 9
	误差/%	33.48	28.22	16.90	22.01		13.85	11.07	2.96	8.56
	预测值 3/MPa	8 147	8 304	8 739	9 288	0.862 7	4 655	4 498	4 063	0.885 4
	误差/%	6.62	2.39	-6.74	-2.78		-7.51	-9.66	-15.90	-10.67

注:预测值 1、2、3 分别为采用单板条、经涂胶热压后的单板条和单板层积材的弹性模量预测的胶合板弹性模量。顺纹与横纹的平均误差是误差绝对值的平均数。

从表 2 可以看出,采用单板条、经涂胶热压后的单板条和单板层积材的弹性模量预测的厚胶合板弹性模量值与实测值的趋势一致。Pearson 乘积矩相关系数 *R*² 顺纹均在 0.86 以上,横纹均在 0.88 以上。但 3 种预测值与实测值的精度不同。

采用单板条弹性模量预测得到的 19 层不同铺

层方式的胶合板弹性模量比实测值偏低,顺纹平均值低了 16.12%,横纹平均值低了 23.64%。未处理的桉树条单板由于旋切、干燥等加工工艺,在加工表面形成许多裂隙,组织疏松,木质纤维之间呈松散和断裂状态。在受载时,应力在纤维之间不能很好地传递,纤维间产生滑移,变形量大,刚度和强度下降。

所以,用未处理的单板条测出来的弹性模量来预测桉树胶合板的弹性模量值偏小。

采用涂胶热压后的单板条顺纹弹性模量预测得到的 19 层桉树胶合板的弹性模量比实测值偏高,顺纹平均值高出 25.15%,横纹平均值高出 9.11%。单板经过涂胶热压后,由于胶黏剂的作用,松散的纤维紧密地结合在了一起。根据复合材料载荷传递机理,胶黏剂的作用是支撑和保护纤维并在纤维间分布和传递载荷。材料在受载时,胶黏剂上产生剪应力,剪应力阻止了断裂纤维的拔出或滑移,从而使桉树单板条刚度和强度上升。此外,小试件没有节子、斜纹理等缺陷和无层间耦合效应。所以,采用经过涂胶热压处理后单板条的弹性模量预测胶合板的弹性模量值偏高。

采用单板层积材的弹性模量预测得到的 19 层桉树胶合板的弹性模量与实测值误差较小,顺纹平均误差为 4.64%,横纹的平均误差 10.94%。由于单板层积材的工艺条件与厚胶合板的相似,预测值与实测值较接近,因此,可以采用相同热压工艺条件下的单板层积材的弹性模量来预测不同组坯方式胶合板的纵横向弹性模量。

4 结 论

本文通过简化层合板理论,建立了胶合板弹性模量预测模型。并以单板条、经过涂胶热压处理的单板条和相同工艺条件下的单板层积材的弹性模量,采用 4 种不同铺层方式的 19 层桉树胶合板对模型进行了验证。结果表明:3 种预测值与实测值的趋势一致,相关系数 R^2 顺纹均在 0.86 以上,横纹均在 0.88 以上,但是精度不同;采用未处理单板条的弹性模量预测得到的胶合板弹性模量比实测值偏低,顺纹平均值低了 16.12%,横纹平均值低了 23.64%;采用经涂胶热压处理后的单板条弹性模量预测得到的胶合板弹性模量比实测值偏高,顺纹平均值高出 25.15%,横纹平均值高出 9.11%;采用单板层积材的弹性模量预测得到的胶合板弹性模量与实测值误差较小,顺纹平均误差为 4.64%,横纹的平均误差 10.94%。因此,可以采用相同热压工艺条件下的单板层积材的弹性模量代入胶合板弹性模量预测模型来预测不同组坯方式胶合板的纵、横向弹性模量。

参 考 文 献

[1] 张齐生.中国竹材工业化利用[M].北京:中国林业出版社,1995.
ZHANG Q S. *Industrial utilization of bamboo in China* [M]. Beijing:China Forestry Publishing House, 1995.

[2] SOVATELO R D. Determination of elastic properties of clear wood by the homogenization method in two dimensions[J]. *Sci Tech Wood Nol*, 2005, 39(3):385-417.
[3] 周小凡,谢来苏,隆言泉.植物纤维各向弹性模量的计算机仿真[J].南京林业大学学报(自然科学版),2001,25(6):33-37.
ZHOU X F, XIE L S, LONG Y Q. A simulation study on fiber isotropic modulus [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2001, 25(6):33-37.
[4] 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.
LU X N, CHEN Y C, CHEN Y. The prediction of elastic modulus along the grain of poplar veneer [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(3):9-13.
[5] 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):21-25.
LU X N, HUANG H L, DU Y C. The prediction of elastic modulus in tangential direction of poplar veneer [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2003, 27(2):21-25.
[6] 卢晓宁,王志强,杜以诚.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):94-95.
LU X N, WANG Z Q, DU Y C. The prediction of in-plane shearing modulus of poplar veneer [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2006, 30(1):94-95.
[7] 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 B, LU X N. The prediction of elastic property of plywood [J]. *Building Artificial Boards*, 2002(1):31-33.
[8] 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(6):23-27.
WANG Z Q, LU X N, ZHU Y H, et al. The structural design of unsymmetrical wood based panels [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2006, 30(6):23-27.
[9] 王耀先.复合材料结构设计[M].北京:化学工业出版社,2001.
WANG Y X. *Structural design of composites* [M]:Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
[10] PERSSON K. *Micromechanical modeling of wood and fiber properties* [D]. Lund, Switzerland:Lund University, 2000.
[11] MARK R E. *Molecular and wall structure of wood* [C]. Pennsylvania:Penn State University, 1981.
[12] 国家技术监督局. GB/T3356—1999 单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S].北京:中国标准出版社,1999.
China State Bureau of Technical Supervision. *GB/T3356—1999 The method for flexural properties of unidirectional fiber reinforced plastics* [S]. Beijing:Standards Press of China, 1999.
[13] 国家技术监督局. GB/T17657—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.
China State Bureau of Technical Supervision. *GB/T17657—1999 Test methods of evaluating the properties of wood-based panels and surface decorated wood-based panels* [S]. Beijing:Standards Press of China, 1999.

(责任编辑 李文军)