

# 基于有限元法速生杨层积材增强家具直榫优化

曹友霖,王天龙\*,王 媛

(北京林业大学 材料科学与技术学院,北京 100083)

**摘 要:**以 T 形无榫肩直通榫中榫头与榫眼的受力为依据,设计竹材增强速生杨木层积材的结构,并在满足结构强度要求的前提下,优化材料制作 T 形无榫肩直通榫并应用在椅凳家具后腿与望板结合部位的尺寸。采用受力分析法设计材料结构,采用有限元数值分析与试验验证结合的方法,优化材料应用的榫卯结构尺寸。结果表明,竹材增强的速生杨单板层积材用作椅子后腿与望板结合部位时,其材料强度能够满足 GB10357—2013《家具力学性能试验 第 3 部分:椅凳类强度和耐久性》的要求;试验验证的榫头破坏形式与仿真模拟基本相同,有限元优化后的径向与弦向的结构强度与试验验证结果误差分别为 3.10%和 3.76%;优化后 T 形无榫肩直通榫的尺寸为榫头榫眼宽度 10 mm,高度 20 mm,竖材截面宽度为径向 25 mm,弦向 35 mm,相同结构达到相同强度时,较未进行强化设计的速生杨木层积材能够减少径向截面宽度 10 mm 材料用量,即在径向能够得到有效增强并节省毛料体积 28.6%。研究结果可为有限元数值模拟研究复合材料的建模方法提供一定参考,为实现速生树种木材高效高质利用提供了借鉴技术。

**关键词:**有限元;家具;速生杨单板层积材

**中图分类号:**TS664.0      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2019)01-0218-06

## Poplar LVL Strengthen and Furniture Joint Size Optimization Based on Finite Element Analysis

CAO You-lin, WANG Tian-long\*, WANG Yu

(College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 10083, China)

**Abstract:** This research designed a pair of laminated veneer lumber (LVL) assembled by fast-growing poplar wood and bamboo veneer based on the force analysis of the furniture T-shaped joint. The size of the T-shaped joint was optimized, and the results of the optimization were then applied to the part of the chair to meet the structural strength requirement. Force analysis method was adopted to design the material, the size of joint was optimized by finite element analysis (FEA), which was verified by the experiment. The fast-growing poplar LVL strengthened by bamboo veneer could meet the chair hind leg structure requirement in China national standard (GB10357—2013 *Test of mechanical properties of furniture strength and durability of chairs and stools*). The experiment failure mode was similar to the numerical modeling. The error results of experiment and FEA in two directions were 3.10% and 3.76%, respectively. The optimized sizes of T-shaped joint were as follows: 10 mm in width, 20 mm in height, 25 (vertical to veneer) × 35 (parallel to veneer) mm for the sectional dimension of mortise part. This LVL could cut 10 mm in the vertical to veneer direction, so it could save 28.6% of poplar material to the same mechanical properties. This LVL could be applied to the furniture frame structure, and FEA method could be an excellent approach to do the research of furniture material and structure. The method introduced in this paper could make the model of

收稿日期:2018-03-21    修回日期:2018-04-17

基金项目:林业公益性行业专项重大项目:低质人工林木材家具制造关键技术研究与示范(201404502)。

作者简介:曹友霖,女,在读硕士,研究方向:家具设计与制造。E-mail:870808015@qq.com

\* 通信作者:王天龙,男,副教授,博士,研究方向:家具设计与制造。E-mail:luckywtl@126.com

composite laminated material and to offer an approach and theory to promote the utilization of fast-growing wood.

**Key words:** finite element analysis; furniture; fast-growing poplar LVL

我国家具用材日益紧张,亟待开发速生树种的高效高质利用来缓解此状况。速生杨木作为蓄积量最大的速生树种之一,纹理细腻,生长快,但是材质松软、力学性能差,仅能用于家具的非结构部位。竹材虽然强度高,但是全竹制家具重量大,不便运输。而速生杨木不需蒸煮即可旋切的特点,使其非常适宜制备层积材这种材料,而竹材则可以作为良好的增强材料对速生杨木层积材进行增强<sup>[1]</sup>。

目前毛竹速生杨复合单板层积材的相关研究仅局限在材料基本物理力学性能的研究上:如分别在杨木单板层积材的上下次表层和中间层加入竹帘热压,对其静曲强度、冲击韧性等进行探究<sup>[8]</sup>;用浸胶单板制造单板层积材,研究单板层积材的静曲强度、弹性模量、剪切强度等<sup>[9]</sup>;采用酚醛树脂浸渍的处理方式,研究测试弹性模量和静曲强度<sup>[11]</sup>。然而仅凭材料物理力学性能并不能有效设计复合材料满足家具结构强度要求,应该通过结构强度测试研发材料。有研究通过对家具结构受力进行有限元模拟计算分析实现实木家具结构优化设计与强度分析<sup>[12]</sup>;还有学者使用有限元方法对速生杨木圆棒榫结构增强实验进行理论分析与验证<sup>[13]</sup>。

本研究使用竹材作为增强单元对速生杨木层积材进行增强,首先以结构受力分析为依据设计材料,再使用有限元数值分析法模拟材料在结构中的受力,最后根据模拟结果及国标强度要求优化结构尺寸。解决了复合材料在结构应用研究中需要大量人力物力投入问题,为有限元方法研究复合层合材料提供参考,同时为速生材制备家具材料提供一种研究方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

试验材料为毛竹增强的速生杨木单板复合层积材,其中基本单元为河北产 6 mm 厚速生杨木单板,增强单元为福建产 3 mm 厚毛竹单板,胶黏剂采用湖南绿达新材料公司生产的生物质胶黏剂。

试验设备为 MMW-50 微机控制人造板万能试验机, YJK4500 型数字静态电阻应变仪(应变范围 0~±19 999  $\mu\epsilon$ ,分辨率 1  $\mu\epsilon$ ), BX120-3AA 型箔式电阻应变片(灵敏系数 2.08,名义阻值 120  $\Omega$ ,丝栅面积 2 mm×3 mm),天平精度 0.01 g,游标卡尺精度 0.01 mm。

### 1.2 试验方法

1.2.1 层积材组合结构设计 选用竹单板作为增强单元,需要先对家具结构进行受力分析,从而进行结构增强。家具 T 形无肩直通榫结构受力分析见图 1<sup>[14]</sup>,力  $F$  作用下,榫眼 X、Y 位置受到挤压,由于木材顺纹抗压强度大于横纹,随着结构发生相对位移,榫头 M、N 位置受压变形,最终在 M' 处受拉破坏。因此,为增强榫眼材料的抗压和抗剪切强度以及榫头材料的抗弯抗拉强度,分别在速生杨木层积材次表层和对称中心位置加入竹材单板,组合方式见图 2。并且规定榫头平行于单板层积方向为  $T$  方向,即弦向(图 3a),垂直于单板层积方向为  $R$  方向,即径向(图 3b)。

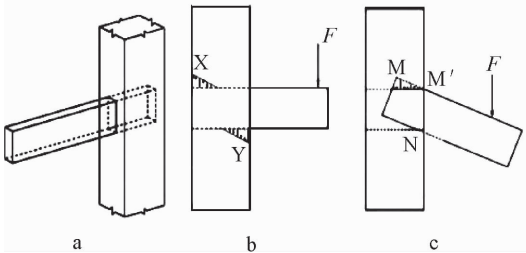


图 1 T 形无榫肩直角榫结构及受力分析  
Fig. 1 Strength analysis of T-shaped joints

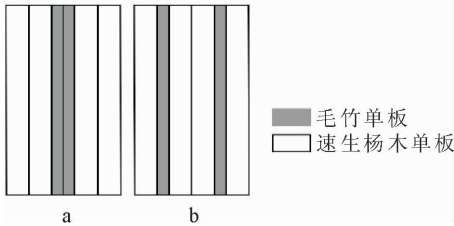


图 2 速生杨毛竹复合单板层积材层积结构  
Fig. 2 Structure of composite LVL

1.2.2 材料基本参数测定 研究采用有限元法,对家具结构进行强度分析及尺寸优化,需要测定相应材料基本参数。其中有材料密度、弹性常数、泊松比等<sup>[15]</sup>,试验采用电测法测量速生杨木、毛竹的抗压弹性模量、泊松比<sup>[16]</sup>;根据 GB/T1935—2009《木材顺纹抗压强度测试方法》测量顺纹抗压强度<sup>[17]</sup>;根据 GB/T 1938—2009《木材顺纹抗拉强度试验方法》测量顺纹抗拉强度<sup>[18]</sup>;采用静态弯曲法测定抗弯弹性常数;根据弹性常数间的相关数值公式计算出剪切弹性模量<sup>[16]</sup>;根据 GB/T 1933—2009《木材密度测试方法》测定密度<sup>[19]</sup>,结果取平均值。

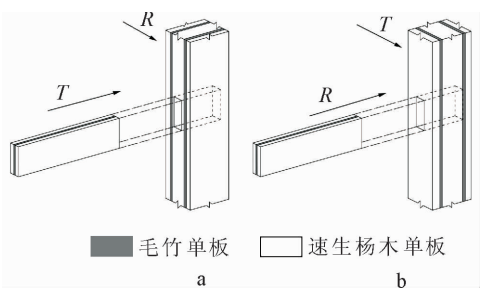


图3 材料的2种使用示意

Fig. 3 Diagram of materials using in the structure in two directions

1.2.3 直榫结构强度有限元数值模拟 本研究使用 ABAQUS 有限元仿真软件进行数值模拟,根据试验分组分别建立有限元模型,步骤如下:

表1 数值模拟试验分组及尺寸

Table 1 Size group of Finite Element Analysis mm

榫头 榫眼 宽度 $a$	T 向榫头 榫眼 深度 $bT$	编号	R 向榫头 榫眼 深度 $bR$	编号
6	25	T25-6	20	R20-6
	30	T30-6	25	R25-6
	35	T35-6	30	R30-6
8	25	T25-8	20	R20-8
	30	T30-8	25	R25-8
	35	T35-8	30	R30-8
10	25	T25-10	20	R20-10
	30	T30-10	25	R25-10
	35	T35-10	30	R30-10

1)建立几何模型:按照图4结构尺寸标注与表1试验分组尺寸,建立6 mm厚杨木单板及3 mm厚竹材单板的几何模型进行装配,材料中竹单板保持对称结构。其中竖材榫眼下表面到竖材端面高度  $H$  为400 mm,榫头榫眼高度  $h$  为20 mm,宽度为  $a$ ,深度为  $b$ ,共18组几何模型。

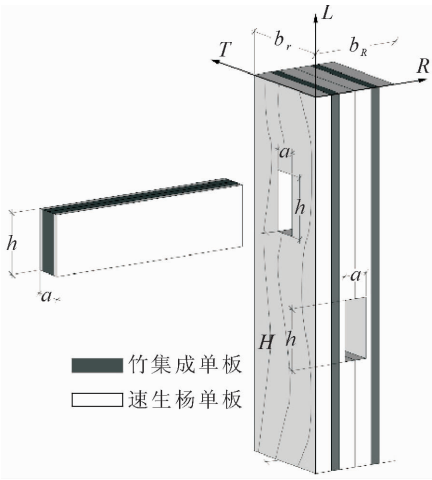


图4 T形无榫肩直通榫几何尺寸标注示意

Fig. 4 Graphic of geometric dimension of T-shaped joints

2)设定层之间接触为刚性连接,榫头与榫眼仅在上下壁有摩擦,摩擦系数取0.2<sup>[20]</sup>。

3)设置正交各向异性材料属性,赋予杨木及毛竹的材料基本参数,对零件指派材料方向。

4)选择扫掠网格划分方式,设置网格单元单位为3 mm。

5)在竖材上下端定义约束,并根据GB10357—2013《家具力学性能试验第3部分:椅凳类强度和耐久性》<sup>[21]</sup>对椅腿结构强度要求,见图5所示位置对榫卯结构施加竖直向下的载荷  $F=380\text{ N}$ 。

1.2.4 榫卯结构强度验证 根据有限元模拟结果,制备2种结构的竹单板增强的速生杨木单板层积材,并将其按照优化后的尺寸制作成直榫结构,每个方向各5组。

将直榫结构置于万能力学试验仪上(图5),固定竖材底端,对结构施加载荷。其中加载速度为  $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,预紧速度为  $100\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

根据力臂和位移计算转角与有限元模拟结果计算的转角相比较来验证有限元模拟结果的准确性,并对比结构破坏形态与有限元仿真的形变,其中转角的计算公式如下:

$$\theta=\arctan(s\div l)\times\frac{\pi}{180}\tag{1}$$

式中,  $s$  为位移(mm),  $l$  为力臂(mm),  $\theta$  为转角(rad)。

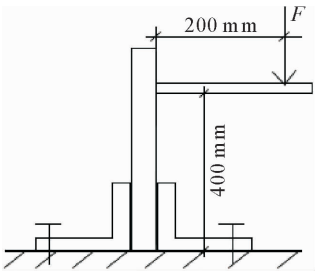


图5 试件加载位置示意

Fig. 5 Position figure of loading test

2 结果与分析

2.1 材料基本参数测定结果

速生杨和毛竹平均密度分别为  $0.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和  $0.64\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,其他所需试验参数见表2、表3。

2.2 有限元数值模拟结果与讨论

有限元数值模拟应力云图见图6,深色区域所受应力较大,最大应力出现在榫眼下表面图6(b)和榫头上表面图6(c)所示,与1.2.1中受力分析结果一致。

当零件全部被赋予速生杨木材料属性时,榫头榫眼所受最大应力超过材料能够承受的最大强度,

速生杨木层积材无法满足结构强度要求。而使用竹材给予增强后,能够有尺寸满足结构强度要求。

通过软件计算后可以得知最大应力在直榫结构中的位置以及数值,通过对比数值以及相应材料强度,可知材料是否能够满足强度。

图 7 表明榫头所受最大应力值在同方向同深度

表 2 2 种基材材料的 9 个弹性常数  
Table 2 Nine elastic constants of two basic materials

强度	抗压强度 $\sigma$ /MPa			抗拉强度 /MPa
	$\sigma_L$	$\sigma_R$	$\sigma_T$	
速生杨木	52.20	5.63	7.30	85.61
毛竹	80.20	25.42	22.93	190.50

表 3 基材材料强度  
Table 3 Intensity of basic materials

MPa

弹性常数	弹性模量			剪切模量			泊松比 $\mu$		
	$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LT}$	$G_{LR}$	$G_{RT}$	$\mu_{LR}$	$\mu_{LT}$	$\mu_{RT}$
速生杨木	15 945	573	347	93.23	148.08	649.36	0.27	0.46	0.21
毛竹	23 289	2 245	1 176	331.06	343.07	828.10	0.23	0.53	0.12

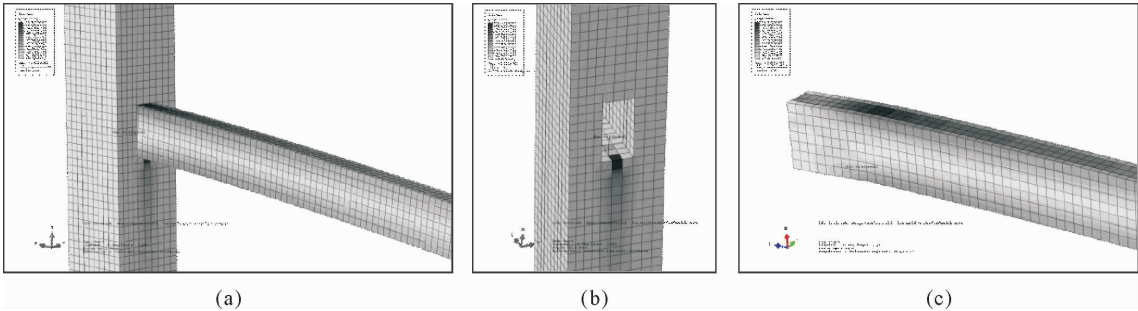


图 6 有限元数值模拟应力云图  
Fig. 6 Mises stress and strain contour plot

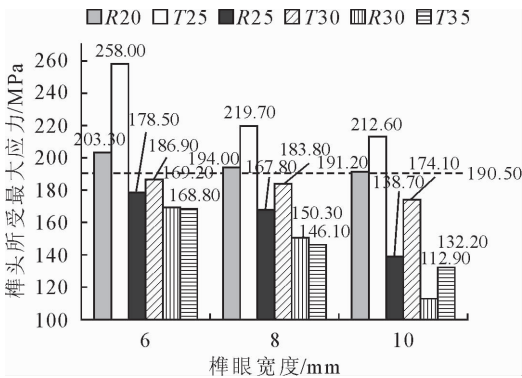


图 7 榫头不同尺寸下弯矩一定时榫头受最大应力值  
Fig. 7 Stress of tenon of T-shape joints in different sizes but under the same bending moment

情况下随榫头榫眼宽度  $a$  增大而减小, $a=10\text{ mm}$  时,榫头受力面积较大,能够有效缓解应力集中,故榫头所受最大应力较小;榫头榫眼宽度  $a$  和深度  $b$  相同情况下,由于  $R$  方向有竹材能够增强直榫结构,故  $R$  方向结构强度较佳。

榫头应力最大点出现在竹材,试验组中当  $b_R \geq 25\text{ mm}$  或  $b_T \geq 30\text{ mm}$  时,榫头所受最大拉应力小于竹材抗拉强度  $190.50\text{ MPa}$ ,满足结构强度。

图 8 表明榫眼所受应力变化趋势基本与榫头相同, $a=10\text{ mm}$  时,榫眼所受最大应力较小;但当  $b_T=20\text{ mm}$  时趋势相反,且仅在  $a=6\text{ mm}$  时,强度

满足要求。这是因为  $T$  方向没有竹材对直榫结构加强,且当  $b_T$  未达到一定深度时, $b_T$  尺寸相比较榫眼宽度  $a$  对榫眼受力影响更大,因而榫眼宽度越大,榫眼侧壁越薄,榫眼承受榫头的力越大,应力越大。

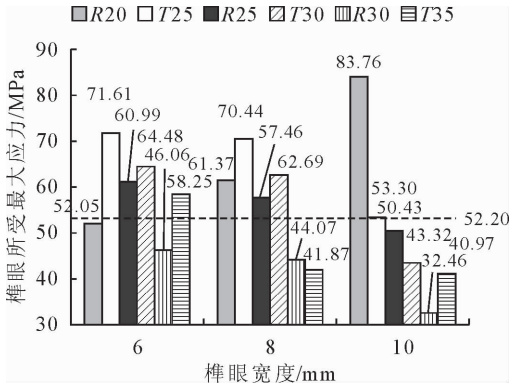


图 8 榫眼不同尺寸下弯矩一定时榫眼受最大应力值  
Fig. 8 Stress of mortise of T-shape joints in different sizes but under the same bending moment

榫眼所受应力最大位置出现在速生杨木,试验组中当  $b_R \geq 30\text{ mm}$ ,或  $a=8\text{ mm}$  且  $b_T=35\text{ mm}$ ,或  $a=10\text{ mm}$  且  $b_T \geq 30\text{ mm}$  时,榫眼所受最大压应力小于速生杨木顺纹抗压强度  $52.20\text{ MPa}$ ,可满足结构强度要求。

榫头榫眼强度能够满足要求的试验组为 R25-10、R30-6、R30-8、R30-10、T35-8、T35-10。根据节



省原材料以及加工工艺最简原则优化后得到较优尺寸为  $h=20\text{ mm}$ ,  $a=10\text{ mm}$ ,  $b_T=35\text{ mm}$ ,  $b_R=25\text{ mm}$ 。

通过有限元数值模拟结果可知,在  $R$  方向上竹材有加强作用, $T$  方向榫眼均在层积材的双层杨木位置,未得到竹材加强,因此当  $h=20\text{ mm}$ ,  $a=10\text{ mm}$  时,使用速生杨木达到相同强度,需要榫眼材料截面尺寸为  $35\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ ,则使用增强材料制作相同结构可节省毛料体积 28.6%。

2.2 验证试验结果

试验结果见图 9,有限元模拟结果在  $R$  方向和  $T$  方向分别为 4.92 rad 和 3.42 rad。T4 组榫头与榫眼进行装配时,出现了过盈配合情况,榫眼材出现细微裂缝,结果偏差过大舍弃。因此在弹性范围内,试验验证结果在  $R$  方向和  $T$  方向的平均误差分别为 3.10% 和 3.76%。

当载荷达到约 435 N 时材料塑性变形严重,榫头发生拉断破坏,破坏形态对比见图 10,有限元仿真模拟应变与验证试验破坏形态基本相同。

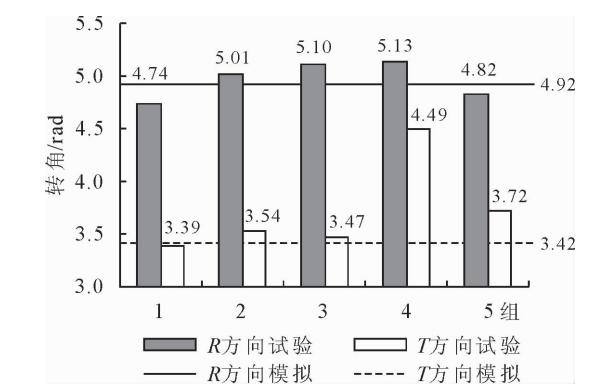


图 9 抗弯验证试验与数值模拟结果对比

Fig. 9 The comparison between the results of experiments and Finite element analysis

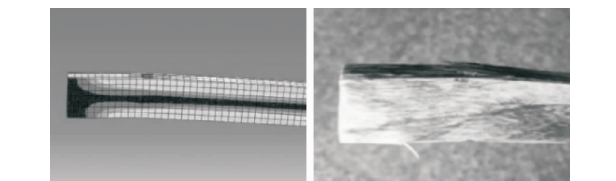


图 10 应变云图与验证试验破坏对比

Fig. 10 Comparison between strain results of experiment and Finite element analysis

3 结论

有限元仿真模拟结果表明,毛竹增强的速生杨单板层积材制作 T 形无肩直通榫结构用于家具后腿与望板结合部位,可以满足 GB10357—2013《家具力学性能试验 第 3 部分:椅凳类强度和耐久性》中规定的强度要求。

当榫头榫眼高度为 20 mm 时,径向榫头榫眼深度为 25 mm 且榫头榫眼宽度为 10 mm,或径向榫头榫眼深度为 30 mm 且榫头榫眼宽度为 6、8、10 mm,或弦向榫头榫眼深度为 35 mm 且榫头榫眼宽度为 10 mm 的结构强度能够满足国标中规定的要求。

优化后的结构尺寸为榫头榫眼高度 20 mm、宽度 10 mm,竖材截面宽度为径向 25 mm,弦向 35 mm。竹材在直榫径向有加强作用,在同样强度下,较速生杨木单板层积材制作同样结构所需毛料材体积减少了 28.6%。

验证试验中榫头的破坏形式与仿真模拟基本相同,验证试验转角计算结果与有限元仿真数值模拟结果在径向与弦向的误差分别为 3.10% 和 3.76%,仿真结果比较准确,为家具用速生材复合材料的结构设计和应用提供了新的研究方法及理论支持。

参考文献:

[1] 饶鑫,杨静,卫佩行,等.增强型单板层积材研究进展[J].西北林学院学报,2015,30(1):222-226.  
RAO X,YANG J,WEI P X,et al. Progress on reinforced laminated veneer lumber[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(1):222-226. (in Chinese)

[2] 朱一辛,关明杰,张晓冬.竹材增强杨木单板层积材冲击性能的研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2005,29(6):99-102.  
ZHU Y X,GUAN M J,ZHANG X D. Studies on impact performance of bamboo strengthened laminated veneer lumber of poplar[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition,2005,29(6):99-102. (in Chinese)

[3] 张冬梅,杨亮庆.速生杨木改性研究进展[J].林业机械与木工设备,2012,40(3):16-20.  
ZHANG D M,YANG L Q. Research progress in modified fast growing poplar wood[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2012,40(3):16-20. (in Chinese)

[4] 吴智慧,黄琼涛.杉木单板层积材的材性及其在家具与木制品中的应用[J].家具,2015,36(6):11-17.  
WU Z H,HUANG Q T. Properties of LVL made with Chinese fir and its application in furniture and wood products[J]. Furniture,2015,36(6):11-17. (in Chinese)

[5] 孙静,吴智慧,黄秋陆,等.层积材家具造型设计初探[J].西北林学院学报,2012,27(1):251-254.  
SUN J,WU Z H,HUANG Q L,et al. Modeling design of laminated venner lumber furniture[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(1):251-254. (in Chinese)

[6] 吴盛富.浅析单板层积材在我国的应用和发展[J].人造板通讯,2003,10(2):6-9.

[7] 张心安,朱一辛.单板层积材的研究与发展现状[J].中国林业产业,2005(4):26-28.

[8] 张心安,朱一辛,程丽美,等.竹材增强单板层积材的动态与静态弯曲性能[J].南京林业大学学报:自然科学版,2006,30(1):69-71.

ZHANG X A,ZHU Y X,CHENG L M,*et al.* The comparison of dynamic and static MOR of bamboo strengthened LVL[J]. Journal of Nanjing Forestry University; Natural Sciences Edition,2006,30(1):69-71. (in Chinese)

[9] 徐咏兰,华毓坤. 不同结构杨木单板层积材的蠕变和抗弯性能[J]. 木材工业,2002,16(6):10-12.

[10] 刘焕荣. 浸渍法生产竹木复合强化单板层积材工艺研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2007.

[11] 张占宽,刘君良. 密实型杨木强化单板层积材制造工艺及应用前景分析[J]. 林业机械与木工设备,2005,33(7):28-30.

[12] 马贞,宋俞成,刘文金. 基于有限元分析的梓木家具直榫结构设计研究[J]. 木材加工机械,2013,24(2):39-43,59. MA Z,SONG Y C,LIU W J. Straight tenon structure design of lignum catalpa furniture based on finite element analysis [J]. Wood Processing Machinery,2013,24(2):39-43,59. (in Chinese)

[13] 郭兆霞,高颖,伊松林,等. 杨木柜类家具 T 型节点连接强度及其补强研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):280-285,314. GUO Z X,GAO Y,YI S L,*et al.* Strength and reinforcement of T-type joint of poplar solid wood cabinet[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(2):280-285,314. (in Chinese)

[14] CHANG W S,HSU M F,KOMATSU K. Rotational performance of traditional Nuki joints with gap II: the behavior of butted Nuki joint and its comparison with continuous Nuki joint[J]. Journal of Wood Science,2007,52(5),401-407.

[15] 王丽宇,鹿振友,申世杰. 白桦材 12 个弹性常数的研究[J]. 北京林业大学学报,2003,25(6):64-67. WANG L Y,LU Z Y,SHEN S J. Study on twelve elastic constant values of *Betula platyphylla* Suk. wood[J]. Journal of Beijing Forestry University,2003,25(6):64-67. (in Chinese)

[16] 张帆,李黎,张立,等. 五种家具常用木材弹性常数及力学性能参数的测定[J]. 林业机械与木工设备,2012,40(1):16-19.

[17] GB/T 1935-2009. 木材顺纹抗压强度测试方法[S]. 北京,中国标准出版社,2009.

[18] GB/T 1938-2009. 木材顺纹抗拉强度试验方法[S]. 北京,中国标准出版社,2009.

[19] GB/T 1933-2009. 木材密度测试方法[S]. 北京,中国标准出版社,2009.

[20] 马尔妮,赵广杰. 木材物理学专论[M]. 北京:中国林业出版社,2012.

[21] GB/T 10357.3-2013. 家具力学性能试验 第 3 部分:椅凳类强度和耐久性[S]. 北京,中国标准出版社,2013.

(上接第 210 页)

参考文献:

[1] 祝维,张西,贾黎明. 伏牛山地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 东北林业大学学报,2017,12(45):32-37.

[2] 张瑜,贾黎明,郑聪慧,等. 秦岭地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 林业科学,2014,50(4):47-54. ZHANG Y,JIA L M,ZHENG C H,*et al.* Establishment of a site index table for *Quercus variabilis* natural secondary stand in Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae,2014,50(4):47-54. (in Chinese)

[3] 侯元兆,幸良,国吉. 栎类经营[M]. 北京:中国林业出版社,2017.

[4] SABATIA C O,BURKHART H E. Predicting site index of plantation loblolly pine from biophysical variables[J]. Forest Ecology and Management,2014,326:142-156.

[5] AERTSEN W,KINT W,VMUYS B,*et al.* Effects of scale and scaling in predictive modelling of forest site productivity[J]. Environmental Modelling and Software,2012(31):19-27.

[6] 陈晨,刘光武. 马尾松人工林树高 BP 模型研究与应用[J]. 安徽农业科学,2012,40(14):8175-8177.

[7] 宋朝枢. 伏牛山自然保护区科学考察集[M]. 北京:中国林业出版社,1994.

[8] 罗伟祥. 中国栓皮栎[M]. 北京:中国林业出版社,2009.

[9] 张益,陈丹丹,郝凡等. 麻栎和栓皮栎叶脉序与环境因子关系研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(1):31-36. ZHANG Y,CHEN D D,HAO F,*et al.* Relationship between leaf venation and environment in *Querecus acutissima* and *Q. variabilis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(1):31-36. (in Chinese)

[10] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006.

[11] 黄家荣. 森林生长的人工神经网络建模[M]. 北京:中国农业出版社,2006.

[12] 陈晨,刘光武. Weibull 函数在杉木人工林直径分布中的研究[J]. 绿色科技,2017,3:59-61.

[13] 郑聪慧,贾黎明. 华北地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 林业科学,2013,49(2):79-85.

[14] 黄国胜,马炜,王雪军,等. 基于一类清查数据的福建省立地质量评价技术[J]. 北京林业大学学报,2014,36(3):1-8. HUANG G S,MA W,WANG X J,*et al.* Forestland site quality evaluation of Fujian Province based on continuous forest inventory data [J]. Journal of Beiing Forestry University,2014,36(3):1-8. (in Chinese)

[15] 吴恒,党坤良,田相林,等. 秦岭林区天然次生林与人工林立地质量评价[J]. 林业科学,2015,51(4):78-88. WU H,DANG K L,TIAN X L *et al.* Evaluating site quality for secondary forests and plantation in Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae,2015,51(4):78-88. (in Chinese)

[16] 徐罗,亢新刚,刘洋,等. 长白山天然云冷杉针阔混交林地位指数导向曲线的模拟[J]. 东北林业大学学报,2014(4):32-37.

[17] 陈晨,刘光武,康文涛,等. 马尾松人工林地位指数 BP 模型研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(2):128-130. CHEN C,LIU G W,KANG W T,*et al.* Site index BP model of masson pine fortunei plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(2):128-130. (in Chinese)

[18] 朱伟杰,高光芹,黄家荣,等. 毛白杨农田防护林林分密度指数模型[J]. 西北林学院学报,2011,26(1):151-154. ZHU W J,GAO G Q,HUANG J R,*et al.* Density index model of *Populus shelterbelts*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(1):151-154. (in Chinese)