

## 辐射松重组木密度对其孔隙率和性能的影响

魏金光<sup>1</sup>, 韦亚南<sup>1</sup>, 鲍敏振<sup>1</sup>, 张亚慧<sup>1</sup>, 余养伦<sup>1</sup>, 李长贵<sup>2</sup>, 于文吉<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014)

**摘要:** 为高值化利用人工林速生材辐射松 *Pinus radiata*, 采用高性能重组木制造技术, 制备了不同密度的辐射松重组木, 并探讨了密度对其孔隙率、耐水性以及力学强度的影响规律。结果表明: 辐射松素材的孔隙率约为 68.00%; 重组木的孔隙率随密度增大呈线性下降, 低至 2.11%。随密度增大, 重组木的耐水性和力学强度均呈升高趋势; 当密度从 0.80 g·cm<sup>-3</sup> 增加到 1.39 g·cm<sup>-3</sup>, 吸水厚度膨胀率和吸水率分别下降了 21.55% 和 76.88%, 弹性模量和水平剪切强度分别提高了 116.47% 和 86.29%。图 6 表 1 参 16

**关键词:** 木材科学与技术; 重组木; 密度; 孔隙率; 物理力学性能; 辐射松

**中图分类号:** S781.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2018)03-0519-05

## Effect of density on porosity and physical-mechanical properties of high-performance scrimbers

WEI Jingguang<sup>1</sup>, WEI Yanan<sup>1</sup>, BAO Minzhen<sup>1</sup>, ZHANG Yahui<sup>1</sup>, YU Yanglun<sup>1</sup>, LI Changgui<sup>2</sup>, YU Wenji<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Shandong Academy of Forestry, Ji'nan 250014, Shandong, China)

**Abstract:** For value-added utilization with fast-growing wood of *Pinus radiata* as well as promotion of added value of the products, outdoor scrimbers with varying densities were prepared with *P. radiata* as the raw material via the manufacturing technology of high-performance reconstituted wood. Then, effect of density on porosity, water resistance, and mechanical strength of the obtained scrimbers was determined. Results showed that the porosity of air-dry logs was 68.00%. Also, scrimber porosity decreased as density increased and the minimum was 2.11%. Both water resistance and mechanical strength were strengthened with an increase in density. When the density increased from 0.80 to 1.39 g·cm<sup>-3</sup>, thickness swelling rate (TSR) decreased 21.55% and water absorption rate (WAR) decreased 76.88%; whereas, modulus of rupture (MOR) increased 116.47% and horizontal shear strength (HSS<sub>⊥</sub>) increased 86.29%. It suggested that the density of *P. radiata* scrimbers had a big impact on porosity and physical-mechanical properties. [Ch, 6 fig. 1 tab. 16 ref. ]

**Key words:** wood science and technology; scrimber; density; porosity; physical-mechanical properties; *Pinus radiata*

辐射松 *Pinus radiata* 是一种适应性强、生长快、材质好的优良速生材, 主要分布于新西兰、澳大利亚、美国、智利等国<sup>[1]</sup>。目前, 辐射松是中国进口量较大的木材种类之一, 但由于辐射松存在材质疏松、密度低、节疤多、松脂含量高等不足, 应用局限于纸浆造纸、胶合板、集成材等低附加值产品<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2017-06-07; 修回日期: 2017-08-12

基金项目: 山东省泰山产业领军人才工程高效生态农业创新类项目(LJNY201602)

作者简介: 魏金光, 博士研究生, 从事木基复合材料的制备与胶合等研究。E-mail: weijorn@163.com。通信作者: 于文吉, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事木质重组材的研发与应用研究。E-mail: yuwenji@caf.ac.cn

因此,寻求新的制造工艺,高值高效化利用辐射松,已成为木材行业研究者关注的焦点。高性能重组木的研发与成功产业化为此提供了新的加工利用途径。高性能重组木是以速生林木材为原料,疏解单板作为基本单元,与酚醛树脂增强体胶合而成的重组材料<sup>[3]</sup>。该材料克服了速生林木材径级小、材质软、强度低、材质不均等缺陷,具有天然纹理结构、规格可调、性能可控等特点,是劣材优用、提高产品附加值的有效途径。现阶段,高性能重组木的制造技术已在杨树 *Populus*, 泡桐 *Paulownia*, 柳树 *Salix* 和桉树 *Eucalyptus* 等中低密度阔叶材上成功实践,产品可应用在景观建筑、地板、家具等领域。但在针叶材辐射松上的应用研究尚未涉及<sup>[4-7]</sup>。为此,笔者以新西兰辐射松为原料,采用高性能重组木制造技术,制备了不同密度的重组木,并探究了密度对板材孔隙率、耐久性和力学强度的影响,为辐射松的高值化利用提供技术参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与设备

材料:辐射松,购自新西兰,胸径 30~60 cm;酚醛树脂(PF)胶,购自北京太尔化工有限公司,固体含量 47.49%,黏度 37 Pa·s (25 °C),pH 10.22,水溶倍数 11.02,游离醛 1.90 g·kg<sup>-1</sup>,游离酚 <10.00 g·kg<sup>-1</sup>。

主要试验设备:无卡轴单板旋切机,疏解机,热压机,全自动真密度分析仪,万能力学试验机等。

### 1.2 试验方法

1.2.1 板材制备 工艺流程:原木旋切→单板剪裁→疏解→干燥→浸胶与干燥→组坯→热压→冷却与卸板→砂光→板材。主要工序:①疏解单板:采用无卡轴旋切机,旋切单板厚为 6 mm。利用专有的定向线裂纤维化分离装置<sup>[8]</sup>,将旋切单板成粗细较均匀、纤维束宽度分布在 1~3 mm 的木单板。②浸胶与干燥:先将疏解单板干燥至含水率约 8%,然后根据预浸胶试验结果,设定单板在固含量为 10%的 PF 胶中常压浸渍 2 min,再通过调控淋胶时间确保单板浸胶量在(13.0±0.5)%,最后自然晾晒至含水率 8%~10%。③组坯:单板沿顺纹方向平行逐张铺放于铺装槽中,规格为 450 mm×160 mm×12 mm,设计 0.80, 1.00, 1.20 和 1.40 g·cm<sup>-3</sup> 等 4 个密度水平。④热压:采用“热压-冷出”的成型工艺。将板坯移至已预热(145 °C)的压机模具中,加压至模具完全闭合。热压温度为 145 °C,闭合时间为 1.0 min·mm<sup>-1</sup>,保压 25 min。⑤平衡:自然环境中平衡 3 周,含水率控制在 7%左右。

1.2.2 密度与孔隙率的测定 参照 GB/T 17657-2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》测定重组木的表观密度,试件 6 个·样品<sup>-1</sup>,结果取平均值。采用 Accupy1330 型真密度全自动测试仪测定板材的实质密度。测试前,试样磨成木粉,过 60~80 目筛,含水率控制在 7%左右。以高纯氮气为介质,试件 6 个·样品<sup>-1</sup>,循环测量 5 次,结果取平均值。孔隙率( $P$ )按参考文献<sup>[9]</sup>中方法计算, $P=(1-V_{实}/V_{表})\times 100\%=(1-\rho_{表}/\rho_{实})\times 100\%$ 。其中, $V_{实}$ 、 $\rho_{实}$ 分别为材料的绝对密实体积和密度(实质密度), $V_{表}$ 、 $\rho_{表}$ 分别为材料在自然状态下的体积和密度(表观密度)。

1.2.3 耐水性测试 本试验设计重组木为户外结构用材,参考 GB/T 30364-2013《重组竹地板》中室外用重组竹地板的耐水性测试方法。先将试件放入(100±2) °C沸水中煮 4 h,再在(63±3) °C的干燥箱中干燥 20 h,最后放入(100±2) °C沸水中继续煮 4 h,取出后在室温下冷却 10 min。测定其吸水宽度膨胀率(WSR)、吸水厚度膨胀率(TSR)和吸水率(WAR)。各项目取试件 6 个·样品<sup>-1</sup>,结果取平均值。

1.2.4 力学性能测试 参照 GB/T 17657-2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》测定试件的抗弯性能。试件尺寸为 200 mm×24 mm×10 mm(长×宽×厚),支持辊跨度 150 mm,加载速度 5 min·mm<sup>-1</sup>,记录静曲强度(MOR)和弹性模量(MOE)。参照 GB/T 20241-2006《单板层积材》,测定试件的水平剪切强度(HSS<sub>⊥</sub>)。试件尺寸为 60 mm×24 mm×10 mm(长×宽×厚),支撑辊直径 10 mm,跨度 40 mm,加载辊直径 30 mm。垂直加载,加载速度为 5 min·mm<sup>-1</sup>。各项目取试件 6 个·样品<sup>-1</sup>,结果取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重组木的密度与孔隙率

由表 1 可知:辐射松素材的实质密度为 1.50 g·cm<sup>-3</sup>,接近软木细胞壁的平均密度(1.52 g·cm<sup>-3</sup>)<sup>[10]</sup>。

辐射松重组木的实质密度随表观密度的增加稍有波动。表观密度从  $0.80 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  增加到  $1.01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，实质密度下降至  $1.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ；表观密度大于  $1.01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时，实质密度保持在  $1.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。素材的气干密度为  $0.48 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，此时孔隙率为 68.00%，与樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 的（约 67.16%）接近<sup>[11]</sup>。辐射松重组木的表观密度为 0.80，1.01，1.20 和  $1.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时，对应的孔隙率分别为 45.95%，29.37%，15.49% 和 2.11%；与素材的孔隙率相比，分别下降了 32.43%，56.81%，77.22% 和 96.90%。

不同表观密度下，重组木板材内部孔隙发生不同程度的变化。在疏解单板热压胶合中，木材细胞被压缩，酚醛胶受热固化，部分空隙被封闭，形成与外界隔绝的微孔；当采用真密度测试仪测试时，惰性气体难以进入这些微孔，导致板材实质体积偏大，实质密度从  $1.48 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  降至  $1.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。当板材密度进一步增大，部分隔绝的微孔受压破裂或被填充，使得实质密度增加至极限值  $1.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。辐射松素材的实质密度近乎是细胞壁的密度，这说明 68.00% 的孔隙率几乎全部源于细胞腔的空隙。而重组木的空隙除细胞腔外，还包含单板旋切和疏解过程中产生的裂隙。在板材热压成型过程中，除细胞腔受压缩小外，还存在纤维之间裂隙的减小。所以随表观密度的增加，细胞腔逐渐被细胞壁填充，裂隙逐渐被木纤维取代，孔隙率随之降低。

经回归分析，孔隙率与表观密度存在高度的线性关系，即  $y = -72.988x + 103.42 (R^2 = 0.9995)$ 。其中  $y$  为孔隙率， $x$  为表观密度。

## 2.2 密度对重组木耐水性能的影响

由图 1~3 可知：随着密度的增加，重组木试件的 WSR，TSR 和 WAR 均呈减小趋势。当密度为  $0.80 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时，WSR，TSR 和 WAR 分别为 4.92%，31.51% 和 81.82%。而当密度增至  $1.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时，三者指标分别为 3.81%，24.72% 和 18.94%，同比下降了 22.56%，21.55% 和 76.88%。表明重组木试件的尺寸稳定性和耐水性随密度增大而显著提高。

辐射松为针叶材，主要由木纤维、木射线、轴向管胞、轴向薄壁组织和树脂道组成，其中木射线、管胞、薄壁细胞和树脂道等细胞腔大、壁薄<sup>[12-13]</sup>，吸水性强，易膨胀。当密度较低时，板材内部空隙较大，单板纤维相对松散，木纤维之间的有效胶合面降低，致使板材无法实现完全胶合，内应力较大。在湿热作用下，板材易吸水膨胀。随着密度增加，板坯密实化程度升高，水通道减少，进入板材内部困难。密度增大时，木纤维间接触紧密，有效胶合点增多，胶合性能改善，内应力降低，使得板材耐水性和尺寸稳定性增强，WSR，TSR 和 WAR 降低。

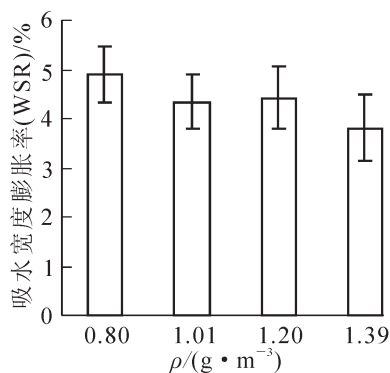


图 1 密度对吸水宽度膨胀率的影响

Figure 1 Effect of density on the width swelling rate

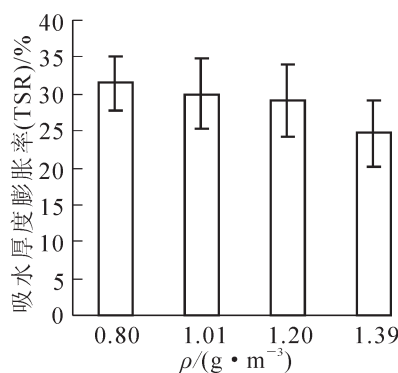


图 2 密度对吸水厚度膨胀率的影响

Figure 2 Effect of density on the thickness swelling rate

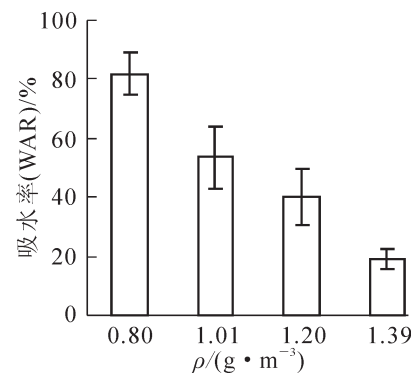


图 3 密度对吸水率的影响

Figure 3 Effect of density on the water absorption rate

表 1 辐射松重组木的表观密度、实质密度和孔隙率

Table 1 Substantial density, apparent density and porosity of radiata pine scrimbers

材性	表观密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	实质密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙率/%
素材	0.48(0.03)	1.50(0.02)	68.00
重组木	0.80(0.02)	1.48(0.02)	45.95
	1.01(0.03)	1.39(0.02)	29.37
	1.20(0.03)	1.42(0.03)	15.49
	1.39(0.02)	1.42(0.01)	2.11

说明：括号内数值为标准差

### 2.3 密度对重组木力学性能的影响

如图4~6所示:密度在 $0.80\sim 1.39\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 范围内,辐射松重组木的MOR, MOE和 $\text{HSS}_{\perp}$ 随着孔隙率的降低而增大。当密度为 $1.39\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,试件的MOR, MOE和 $\text{HSS}_{\perp}$ 分别高达 $178.72\text{ MPa}$ ,  $18.71\text{ GPa}$ 和 $21.16\text{ MPa}$ ;与密度 $0.80\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的板材相比,3个力学指标分别提高了 $116.47\%$ ,  $50.52\%$ 和 $86.29\%$ 。这表明高密度可有效提高重组木的力学强度,与前人研究的结果一致<sup>[14-15]</sup>。当密度为 $0.80\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,所制重组木的MOR和 $\text{HSS}_{\perp}$ 分别达到GB/T 20241-2006《单板层积材》中结构用单板层积材最高级180E和65V-55H的要求,MOE也能达到120E级的要求。

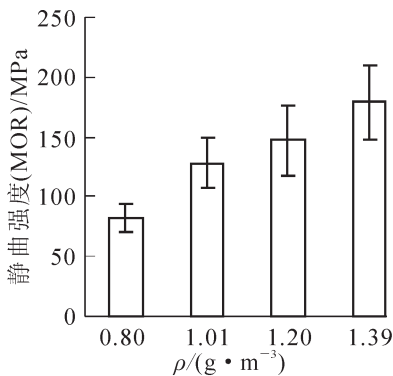


图4 密度对静曲强度的影响

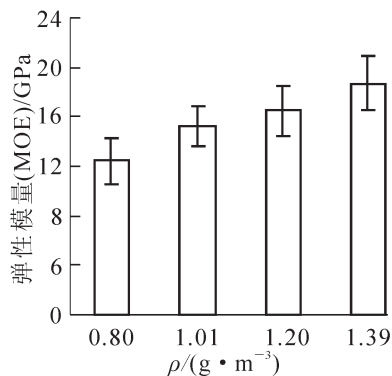


图5 密度对弹性模量的影响

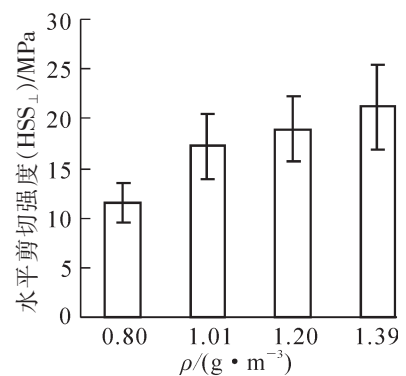


图6 密度对水平剪切强度的影响

Figure 4 Effect of density on the modulus of rupture

Figure 5 Effect of density on the modulus of elasticity

Figure 6 Effect of density on the horizontal shear strength

单板纤维间的裂隙和木材细胞腔是重组木空隙的主要来源,板材力学性能的增强与其有着密不可分的关系。木纤维是板材承受外部载荷的主体。根据复合材料强度理论,纤维主要起承载基体传递的载荷,防止基体屈曲,提高材料整体强度的作用<sup>[16]</sup>。密度的增加降低了板材内部空隙,增强细胞间的胶合性能,使得单根木纤维的承载能力提高;板坯经热压后,纤维间的裂隙缩小或数量减少,即密度增大,单位体积内的木纤维增多,提高了板材的整体承载能力。另外,源于纤维间裂隙的减少意味着纤维间的胶接点增多,胶合强度增大,也有效提高了板材的力学强度。

## 3 结论

辐射松素材的实质密度为 $1.50\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;热压胶合成重组木后,实质密度为 $1.42\sim 1.48\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。辐射松重组木孔隙率与表观密度存在负线性关系,即孔隙率随表观密度增大而降低。气干素材的孔隙率约 $68.00\%$ ,重组木的孔隙率最低为 $2.11\%$ 。随密度增大,辐射松重组木的耐水性和力学强度显著提高。当辐射松重组木表观密度为 $1.39\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,辐射松重组木的物理力学性能最高,吸水厚度膨胀率(TSR),吸水率(WAR),静曲强度(MOR)和水平剪切强度(垂直加载)( $\text{HSS}_{\perp}$ )分别为 $24.72\%$ ,  $18.94\%$ ,  $18.71\text{ GPa}$ 和 $21.16\text{ MPa}$ 。

本试验范围内,所有重组木板材的力学指标均能满足甚至超过GB/T 20241-2006《单板层积材》的结构用材要求,可根据生产和应用的实际情况合理选择板材密度,以达到高性价比产品。

## 4 参考文献

- [1] 孙晓珊, 王宝生, 温煌, 等. 木质素磺酸钠取代苯酚改性辐射松木材[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(2): 80 - 83.  
SUN Xiaoshan, WANG Baosheng, WEN Huang, *et al.* Properties of modified wood by sodium lignin sulfonate substituting phenol [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(2): 80 - 83.
- [2] 王启华, 李凯夫, 李鹏. 辐射松单板脱脂工艺研究[J]. 木材加工机械, 2008, **19**(3): 11 - 13.  
WANG Qihua, LI Kaifu, LI Peng. Study on the degreasing technology of radiata pine veneer [J]. *Wood Proc Mach*, 2008, **19**(3): 11 - 13.
- [3] 张亚慧, 张亚梅, 任丁华, 等. 高性能重组木制造工艺对其性能的影响[J]. 木材工业, 2016, **30**(5): 31 - 34.

- ZHANG Yahui, ZHANG Yamei, REN Dinghua, *et al.* Effect of manufacturing technology on scrimber performance [J]. *China Wood Ind*, 2016, **30**(5): 31 – 34.
- [4] 张亚梅, 余养伦, 李长贵, 等. 速生轻质木材制备高性能重组木的适应性研究[J]. 木材工业, 2016, **30**(3): 41 – 44.
- ZHANG Yamei, YU Yanglun, LI Changgui, *et al.* Manufacturing technology and properties of scrimbers made of low density wood [J]. *China Wood Ind*, 2016, **30**(3): 41 – 44.
- [5] 陈明及, 吴金绒, 陈骁轶, 等. 不同因素对竹柳枝桠材重组木性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(4): 658 – 666.
- TRAN Minh Toi, WU Jinrong, CHEN Xiaoyi, *et al.* Property of *Salix discolor* scrimber [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(4): 658 – 666.
- [6] 梁艳君, 张亚慧, 马红霞, 等. 户外用杨木重组木的制备工艺与性能评价[J]. 木材工业, 2017, **31**(2): 49 – 52.
- LIANG Yanjun, ZHANG Yahui, MA Hongxia, *et al.* Preparation and properties of populus scrimber for outdoor use [J]. *China Wood Ind*, 2017, **31**(2): 49 – 52.
- [7] 陈凤义, 张亚慧, 于文吉. 家具用高性能桉树重组木的制备及性能[J]. 木材工业, 2016, **30**(6): 39 – 42.
- CHEN Fengyi, ZHANG Yahui, YU Wenji. Manufacturing and properties of *Eucalyptus* scrimber for making furniture [J]. *China Wood Ind*, 2016, **30**(6): 39 – 42.
- [8] 余养伦, 于文吉. 新型纤维化单板重组木的主要制备工艺与关键设备[J]. 木材工业, 2013, **27**(5): 5 – 8.
- YU Yanglun, YU Wenji. Manufacturing technology of novel scrimber made of fibrosis of veneer [J]. *China Wood Ind*, 2013, **27**(5): 5 – 8.
- [9] 黄广华, 陈瑞英, 魏萍. 速生杉木密化材绝干密度与空隙率相关性[J]. 宜春学院学报, 2015, **37**(3): 7 – 11.
- HUANG Guanghua, CHEN Ruiying, WEI Ping. Correlation between densified wood dry density and porosity of fast-growth *Cunninghamia lanceolata* [J]. *J Yichun Coll*, 2015, **37**(3): 7 – 11.
- [10] KELLOGG R M, WANGAARD F F. Variation in the cell-wall density of wood [J]. *Wood Fiber Sci*, 1969, **1**(3): 180 – 204.
- [11] 何盛, 徐军, 吴再兴, 等. 毛竹与樟子松木材孔隙结构的比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, **41**(2): 157 – 162.
- HE Sheng, XU Jun, WU Zaixing, *et al.* Compare of porous structure of moso bamboo and *Pinus sylvestris* L. lumber [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2017, **41**(2): 157 – 162.
- [12] 郭喜良, 冉俊祥. 进口木材原色图鉴[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 219.
- [13] PATEL R N. Anatomy of stem and root wood of *Pinus radiata* D. Don [J]. *New Zealand J For Sci*, 1971, **1**(1): 37 – 49.
- [14] 张亚梅, 张亚慧, 于文吉. 密度对轻软木材制备重组木性能影响的研究[J]. 中国人造板, 2016, **23**(4): 10 – 13.
- ZHANG Yamei, ZHANG Yahui, YU Wenji. Effect of density on light-soft wood scrimber properties [J]. *China Wood-Based Panels*, 2016, **23**(4): 10 – 13.
- [15] 余养伦, 周月, 于文吉. 密度对桉树纤维化单板重组木性能的影响[J]. 木材工业, 2013, **27**(6): 5 – 8.
- YU Yanglun, ZHOU Yue, YU Wenji. Effect of density on properties of scrimber made of fibrosis of *Eucalyptus* veneer [J]. *China Wood Ind*, 2013, **27**(6): 5 – 8.
- [16] 代少俊. 高性能纤维复合材料[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2013: 86 – 87.