

负压轻炭化木材物理力学性能

薛紫荞^{1,2}, 王雪花^{1,2}, 周亚琴^{1,2}, 陈梦奇^{1,2}, 黄琼涛³

(1. 南京林业大学 家居与工业设计学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 梅州市汇胜木制品有限公司, 广东 梅州 514600)

摘要: 对比了奥克榄 *Aucoumea klaineana*, 椴木 *Tilia europaea*, 单瓣豆 *Monopetalanthus* sp.等 3 种木材在同一炭化条件下物理力学性能的变化, 探究负压轻炭化处理木材的可行性与实际效果。将 3 种木材分别置于真空炭化箱内以 160 ℃, 0 MPa 的条件处理 3.0 h, 然后将木材按照国标规定的木材物理力学试材锯解及试样截取方法加工, 之后分别测量木材的密度、色差、冲击韧性、抗弯强度、抗弯弹性模量、硬度、干缩率和湿胀率。结果表明: 在该炭化工艺下单瓣豆的体积干缩系数降低了 16.00%, 尺寸稳定性有较大改善; 抗弯强度增加了 18.00%, 径面、弦面和端面硬度分别增加了 19.00%, 33.00%和 50.00%, 冲击韧性损失 24.00%。负压轻炭化能够在一定程度上改善木材的尺寸稳定性, 并且使其物理力学性能不受太大损失。图 5 表 5 参 17

关键词: 木材科学与技术; 负压轻炭化; 物理力学性能; 木材干燥

中图分类号: TS652; S781.29

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)01-0177-06

Physical and mechanical properties of low thermo-vacuum treated wood

XUE Ziqiao^{1,2}, WANG Xuehua^{1,2}, ZHOU Yaqin^{1,2}, CHEN Mengqi^{1,2}, HUANG Qiongtao³

(1. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Co-Innovation Center for Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, Nanjing Forestry University,

Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Meizhou Huisheng Wood Products Co., Ltd., Meizhou 514600, Guangdong, China)

Abstract: Heat treated wood is widely used in indoor and outdoor construction, decoration, and furniture because of its favorable dimensional stability, excellent corrosion resistance, and approximate padauk color. However, with many deficiencies in the existing heat treatment process of wood, such as excessive loss of mechanical strength and timber color being too heavy, this study was conducted to provide a reference during actual production for the feasibility and practical effect of low thermo-vacuum treatments with lower temperatures. Changes in physical and mechanical properties of three kinds of wood— okoume, basswood, and andoung, using the same thermo-vacuum treatment conditions were tested. The three woods were placed in a vacuum carbonization tank at 160 ℃ and 0 MPa conditions for 3 h. Then the timber was sawn according to experimental requirements with wood density, color deviation, toughness, bending strength, modulus of elasticity in static bending, static hardness, shrinkage, and swelling rate being measured. Results showed that dimensional stability of heat-treated andoung was greatly improved with its volume shrinkage coefficient decreasing 16.00%. Moreover, andoung had an increase in flexural strength and hardness, with increased bending strength (18.00%), hardness of its radial section (19.00%), tangential section (33.00%), and end surface (50.00%). Also, its impact toughness loss was less (24.00%). Overall, low thermo-vacuum treatment could improve dimensional stability of wood as it avoided loss of physical and mechanical properties of the timber. [Ch, 5 fig.

收稿日期: 2018-01-02; 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31800471); 国家木竹产业技术创新战略联盟科研计划项目(TIAWB201708); 南京林业大学大学生创新训练计划项目(2016NFUSPITP179)

作者简介: 薛紫荞, 从事家具用材改性研究。E-mail: 809569841@qq.com。通信作者: 王雪花, 讲师, 博士, 从事木/竹质建筑材料研究。E-mail: xuehua3099@sina.com

5 tab. 17 ref.]

Key words: wood science and technology; thermo-vacuum treatment; physical and mechanical properties; wood drying

炭化是一种常见的木材化学改性技术^[1], 相对其他改性方法, 炭化处理具有无毒性、环境污染小、工艺简单等优点。出于降低材料处理成本的考虑, 炭化材主要用于户外用材, 室内材应用较少^[2]。奥克榄 *Aucoumea klaineana*, 椴木 *Tilia europaea*, 单瓣豆 *Monopetalanthus* sp. 是如今市场上 3 种常见的家具用材, 其色泽均匀、纹理美观, 但应用过程中也存在易变形、易腐蚀等问题, 严重影响了木材的实用价值和产品附加值。探究一种低成本、适于室内家具用材的热处理工艺, 对于延长家具使用寿命、提高产品附加值意义重大。炭化处理的实质, 是通过减少木材组分中吸水羟基的含量, 降低木材的吸湿性, 以提高其尺寸稳定性^[3]。常用的高温炭化易出现使材色过深、大幅降低木材力学性能等问题^[4-5]。为了平衡这 2 方面的问题, 笔者提出“负压轻炭化”的工艺理念, 即炭化温度不超过之前大部分炭化实验常用的最低温度, 炭化箱内的气压低于 1 个标准大气压。为了探究奥克榄、椴木、单瓣豆木材在使用过程中尺寸稳定性并避免其材色和力学性能受太大影响, 笔者以奥克榄、椴木、单瓣豆木材为研究对象, 在较低温度、负压条件下进行处理, 并研究该处理工艺对这 3 种木材物理力学性能的影响, 以为室内用材炭化工艺提供参考。

1 材料与方 法

1.1 热处理方法

先将试材在电鼓风干燥箱中干燥至含水率稳定, 随后进行炭化, 前期缓慢升温, 最终以炭化箱内 160 ℃, 0 Mpa 实验条件炭化 3.0 h。

1.2 材性指标及测定方法

炭化完成后用电子万能材料试验机(AG-IC/100KN)、摆锤式冲击试验机(JBS-300S)色差仪等测量木材的物理力学性能。本研究所测物理力学性质包括全干密度, 色差, 冲击韧性, 抗弯强度, 抗弯弹性模量, 硬度(径面硬度、弦面硬度、端面硬度), 气干湿胀率, 吸水至尺寸稳定的湿胀率, 气干干缩率, 全干干缩率在共 11 个性状。

性能测试分别按照 GBT 1933-2009《木材密度测定方法》、GBT1940-2009《木材冲击韧性试验方法》、GBT1936.1-2009《木材抗弯强度试验方法》、GBT1936.2-2009《木材抗弯弹性模量测定方法》、GBT1941-2009《木材硬度试验方法》、GBT1934.2-2009《木材湿胀性测定方法》、GBT1932-2009《木材干缩性测定方法》进行。色差测量取得数值后使用亨特色差公式计算。

2 结果与分析

2.1 物理性质

从图 1 可看出: 3 种试材炭化后的全干密度均有所降低, 其中椴木和单瓣豆的全干密度变化不大, 奥克榄的密度降低最为显著, 由 0.489 g·cm⁻³ 下降至 0.362 g·cm⁻³, 降幅达 26.00%。与之相比, 通过 3.0 h, 160 ℃ 真空热处理的日本落叶松 *Larix kaempferi* 全干密度达到 0.667 g·cm⁻³, 较未处理材下降了 0.74%^[4]; 来自广西的红锥 *Castanopsis hystrix* 家系木材的全干密度为 0.611 g·cm⁻³^[6]。本研究处理后的试材全干密度相对较低。

纤维素、半纤维素、木质素是构成木材的主要成分, 当受到热量作用, 这三大成分产生不同程度的降解^[7], 因此, 炭化材的密度比素材均有所降低。木材质量下降, 但同时木材体积也在收缩, 当木材质量下降的程度超过木材体积收缩的程度时, 木材密度就会降低。

负压轻炭化处理前后木材的色差如图 2 所示。通过色差仪测得试材炭化前后的 L , a , b 值, 后通过亨特色差公式 $\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$ 计算^[8]。由图 2 可得: 3 种木材通过 3.0 h, 160 ℃, 0 Mpa 炭化处理材色均有较大变化。其中奥克榄的材色变化相对较小, 椴木的材色变化最大。

当木材的含水率低于纤维饱和点时, 木材的尺寸随含水率升降而增减^[9]。木材的涨缩会造成木制品

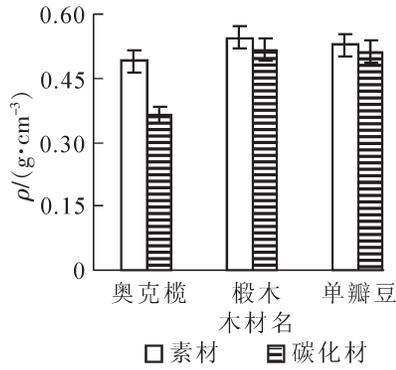


图 1 不同试材的素材与炭化材密度对比图

Figure 1 Density of treated and control samples

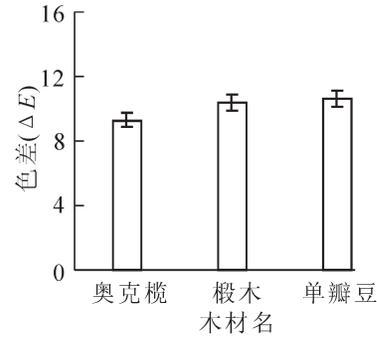


图 2 不同试材炭化前后色差统计图

Figure 2 Color deviation of treated and control samples

开裂、翘曲变形等缺陷，因此，木材的尺寸稳定性是在利用木材时所需考虑的重要因素。本研究从干缩性和湿胀性 2 个方面的指标来研究奥克榄、椴木和单瓣豆的尺寸稳定性。首先，结合表 1 和表 2 可看出：炭化后椴木体积干缩系数达 0.52，根据木材材性分级表^[10]属中级(0.46~0.55)；而奥克榄炭化后的体积干缩系数未改变，仍为 0.35，属小级(≤ 0.45)；同样，单瓣豆炭化后的体积干缩系数由 0.44 降至 0.37，但级别不变，属小级。比较炭化前后木材干缩系数变化的程度，可以发现在相同炭化条件下，奥克榄的干缩系数无变化，椴木的干缩系数仅降低了 1.00%，只有单瓣豆的干缩系数有明显降低，降低比例为 16.00%。以 160 ℃，2.0 h 热处理的杉木气干体积干缩率下降了 29.76%、全干体积干缩率下降了 19.37%；以 190 ℃，3.0 h 热处理的杉木气干体积干缩率下降了 35.61%，全干体积干缩率下降了 24.18%^[11]。本研究处理后的单瓣豆气干体积干缩率下降了 21.30%，全干体积干缩率下降了 10.60%，降低幅度较之略小。

由表 3 和表 4 可以看出：炭化对于 3 种木材的湿胀率均有一定的改善。通过对干缩率和湿胀率变化的研究可以发现，在实验设置的炭化条件下单瓣豆的尺寸稳定性改善最为显著。热处理使木材细胞壁的结构更加紧密，炭化后的木材细胞壁中纤维素与半纤维素无定型区域形成了不可逆的氢键，因此，之前一些用于吸水的部位在再次湿润时不能与水分子结合^[12]。

2.2 力学性质

通过图 3 和图 4 可以发现：经过炭化的奥克榄较未炭化的试材其抗弯强度和抗弯弹性模量均略有减

表 1 3 种试材的气干干缩率统计分析

Table 1 Statistical figures of woods' air-dry shrinkage

材种	试样数/个	径向干缩率/%	弦向干缩率/%	体积干缩率/%	
奥克榄	素材	10	3.20 ± 0.009 6	3.20 ± 0.008 6	6.30 ± 0.005 2
	炭化材	10	3.10 ± 0.005 9	3.20 ± 0.005 8	6.80 ± 0.005 1
椴木	素材	10	4.60 ± 0.005 9	5.90 ± 0.005 7	10.90 ± 0.006 9
	炭化材	10	4.50 ± 0.001 7	6.10 ± 0.003 8	10.30 ± 0.004 9
单瓣豆	素材	10	2.70 ± 0.004 9	5.60 ± 0.005 1	8.90 ± 0.006 1
	炭化材	10	2.30 ± 0.004 6	4.40 ± 0.008 7	7.00 ± 0.009 8

说明：表中“±”后数值表示数据的标准差

表 2 3 种试材的全干干缩率统计分析

Table 2 Statistical figures of woods' absolute-dry shrinkage

材种	试样数/个	径向干缩率/%	弦向干缩率/%	体积干缩率/%	体积干缩系数/%	
奥克榄	素材	10	5.30 ± 0.012 1	5.00 ± 0.012 7	10.40 ± 0.004 4	35 ± 0.011 4
	炭化材	10	5.10 ± 0.008 0	5.10 ± 0.008 9	11.00 ± 0.014 4	35 ± 0.022 7
椴木	素材	10	7.10 ± 0.003 3	8.10 ± 0.022 6	16.00 ± 0.008 9	53 ± 0.024 0
	炭化材	10	7.10 ± 0.002 0	8.90 ± 0.004 3	15.60 ± 0.004 8	52 ± 0.016 2
单瓣豆	素材	10	4.50 ± 0.005 2	8.30 ± 0.009 4	13.20 ± 0.011 4	44 ± 0.016 2
	炭化材	10	4.30 ± 0.011 9	7.10 ± 0.010 1	11.80 ± 0.016 9	37 ± 0.038 4

说明：表中“±”后数值表示数据的标准差

表3 3种试材的气干湿胀率统计分析

Table 3 Statistical figures of woods' air-dry swelling

材种	试样数/个	径向湿胀率/%	弦向湿胀率/%	体积湿胀率/%	
奥克榄	素材	10	1.60 ± 0.003 3	1.50 ± 0.004 2	3.70 ± 0.003 7
	炭化材	10	1.20 ± 0.005 2	1.30 ± 0.005 6	2.70 ± 0.010 7
椴木	素材	10	2.00 ± 0.008 4	1.80 ± 0.004 0	4.00 ± 0.004 0
	炭化材	10	1.50 ± 0.002 2	1.70 ± 0.014 0	3.30 ± 0.010 7
单瓣豆	素材	10	1.30 ± 0.001 2	1.80 ± 0.000 8	3.40 ± 0.002 3
	炭化材	10	1.10 ± 0.003 0	1.70 ± 0.001 8	3.30 ± 0.002 4

说明：表中“±”后数值表示数据的标准差

表4 3种试材吸水至尺寸稳定时的湿胀率统计分析

Table 4 Statistical figures of woods' absolute-dry swelling

材种	试样数/个	径向湿胀率/%	弦向湿胀率/%	体积湿胀率/%	
奥克榄	素材	10	5.40 ± 0.016 7	6.60 ± 0.010 8	12.90 ± 0.027 4
	炭化材	10	5.00 ± 0.015 0	5.00 ± 0.001 9	11.20 ± 0.032 1
椴木	素材	10	9.50 ± 0.015 4	10.90 ± 0.019 6	23.80 ± 0.023 6
	炭化材	10	9.30 ± 0.012 7	10.50 ± 0.018 3	21.60 ± 0.013 7
单瓣豆	素材	10	3.90 ± 0.008 4	7.60 ± 0.004 7	12.60 ± 0.019 4
	炭化材	10	3.90 ± 0.010 2	6.70 ± 0.011 9	12.30 ± 0.013 8

说明：表中“±”后数值表示数据的标准差

小，其中抗弯强度减小了6.00%，抗弯弹性模量减小了7.00%；而椴木和单瓣豆的抗弯强度和抗弯弹性模量则均有增加，但椴木的抗弯强度仅增加4.00%，说明炭化条件对其影响不显著^[13]；单瓣豆的抗弯强度增加了18.00%，弹性模量增加了9.00%。

在之前的多项研究中都曾提及这种现象，即木材的抗弯强度随着炭化温度的提升先升高后下降，因此，在相对较低的炭化温度下木材的抗弯强度会有所提升。例如扁柏 *Platycladus orientalis* 木在100~150℃，2.0~100.0 h的热处理条件下抗弯强度均较素材有所提高；北美云杉 *Picea sitchensis* 在空气和氮气中以160℃，2.0 h或160℃，4.0 h的条件进行热处理，其抗弯强度均有所增加^[14]；马尾松 *Pinus masoniana* 通过170℃，2.0~6.0 h的蒸汽热处理后静态弯曲应力均有所提升^[15]。

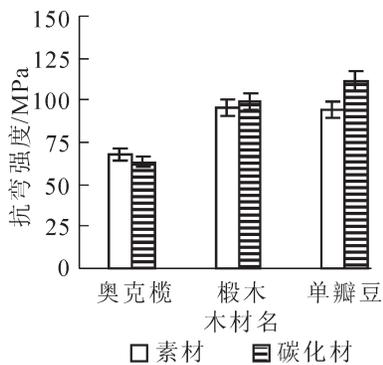


图3 不同试材素材与炭化材抗弯强度对比

Figure 3 MOR of treated and control samples

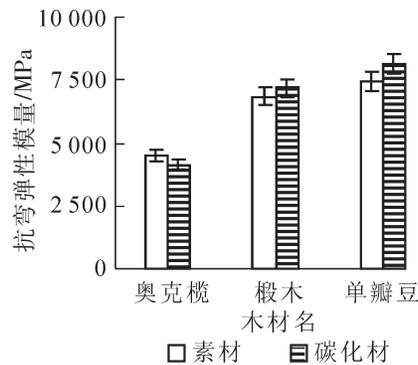


图4 不同试材的素材与炭化材抗弯弹性模量对比

Figure 4 MOE of treated and control samples

由表5可知：奥克榄炭化材的径面和弦面硬度略有减少，端面硬度有所增加；而椴木和单瓣豆的径、弦、端向硬度均有所增大。出现这种现象是因为细胞壁中的纤维素和半纤维素的分子结构在高温的作用下发生改变，纤维素分子结晶度增加，使木材表面硬度变大^[3]。

分析图5可以看出：3种木材通过炭化冲击韧性均有所降低，其中冲击韧性损失最为严重的是奥克榄，损失率高达53.00%；单瓣豆次之，损失率达到24.00%；椴木损失率最低，仅12.00%。奥克榄炭化后冲击韧性显著降低和其密度大幅降低有直接的关系^[16]。

热处理的温度较低时，木材细胞壁中的半纤维素由于热稳定性较差，发生部分的结构重组或降解，

分子链中的羟基脱落。纤维素无定型区域内水分散失以及相邻纤维素表面靠拢使纤维素分子链排列更加紧密, 纤维素分子链之间的羟基发生“架桥”反应, 使纤维素分子结晶度增加。从而使木材力学性能提升。随着热处理温度升高, 一方面木材细胞壁中半纤维素和木素非结晶性高聚物发生玻璃化转变, 纤维素、半纤维素和木素之间的联结被破坏, 降低了木材的力学强度。另一方面, 半纤维素剧烈降解产生大量己酸, 催化了纤维素降解, 纤维素结晶度与聚合度降低。纤维素、半纤维素和木素的大量降解使木材力学强度下降^[17]。

表 5 3 种试材的硬度统计分析

Table 5 Statistical figures of woods' hardness

材种	试样数/个	弦面硬度/N	径面硬度/N	端面硬度/N	
奥克榄	素材	7	2 330.871 ± 906.723	2 328.058 ± 856.433	3 603.304 ± 608.959
	炭化材	7	2 049.777 ± 619.954	2 195.692 ± 662.054	4 008.348 ± 652.936
椴木	素材	7	2 737.411 ± 431.892	2 854.308 ± 373.424	4 136.273 ± 413.997
	炭化材	7	3 495.514 ± 466.173	3 613.616 ± 430.956	4 667.332 ± 368.028
单瓣豆	素材	7	2 025.848 ± 579.817	2 285.290 ± 663.906	2 331.451 ± 266.435
	炭化材	5	2 691.328 ± 898.033	2 711.836 ± 936.238	3 507.094 ± 829.350

说明: 表中“±”后数值表示数据的标准差

3 结论

3.0 h, 160 °C, 0 MPa 的负压热处理降低了 3 种木材的全干密度, 使材色变深, 尺寸稳定性有所提升, 其中对于单瓣豆的尺寸稳定性改善最大, 使其体积干缩系数降低了 16.00%。

实验设置的热处理环境对于 3 种木材的冲击韧性均有所降低, 其中奥克榄均减弱最多。同时热处理使奥克榄的抗弯强度有所降低, 对椴木的抗弯强度无影响, 使单瓣豆的抗弯强度有所提升, 增加了 18.00%。木材力学性能的变化与木材的密度有紧密关联, 其中奥克榄素材本身素材密度较椴木、单瓣豆偏低, 这意味着木材内部孔隙较多, 多孔的结构一方面影响木材的力学性能, 另一方面使木材热处理时直接受热的面积增大, 吸收热量更为迅速, 导致在相同炭化条件下的奥克榄力学性能降低更多。而热处理可一定程度上增加木材的硬度, 在 3 种试材中单瓣豆的端面硬度增加最为显著, 增幅达 50.00%。

综合以上多种物理力学性能指标分析, 在实验设置的炭化条件下单瓣豆的尺寸稳定性改善最多而力学性能损失较少。可以表明在 3.0 h, 160 °C, 0 MPa 的炭化条件可以使木材的尺寸稳定性提升, 同时较小程度地损失其力学性能。

4 参考文献

- [1] 林兰英, 陈志林, 傅峰. 木材炭化与炭化物利用研究进展[J]. 世界林业研究, 2007, 20(5): 22 - 26.
LIN Lanying, CHEN Zhilin, FU Feng. Research on development of wood carbonization and chercoal's [J]. *World For Res*, 2007, 20(5): 22 - 26.
- [2] 韩蕾. 选防腐木还是炭化木?[J]. 建材与装修情报, 2007(9): 227.
HAN Lei. Choose preservative wood or carbonized wood? [J]. *Build Mat Decor Inf*, 2007(9): 227.
- [3] 廖立, 涂登云, 李重根, 等. 热处理对尾赤桉木材物理力学性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(5): 128 - 131.
LIAO Li, TU Dengyun, LI Chonggen, et al. Effects of heat treatment on physical-mechanical properties of *E. urophylla* × *E. camaldulensis* [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2013, 33(5): 128 - 131.
- [4] 王喆. 真空热处理落叶松材性变化规律及其机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
WANG Zhe. *Study on Properties and Mechanism of Larch Wood Modified by Vacuum Heat Treatment* [D]. Beijing:

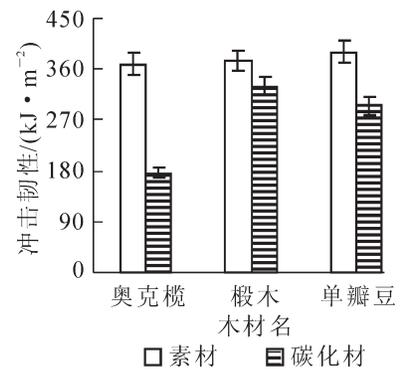


图 5 不同试材的素材与炭化材冲击韧性对比图

Figure 5 Toughness of treated and control samples

- Chinese Academy of Forestry, 2017.
- [5] 唐荣强, 鲍滨福, 李延军. 热处理对杉木颜色变化的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(3): 455 – 459.
TANG Rongqiang, BAO Binfu, LI Yanjun. Heat-treatment influence on *Cunninghamia lancoolata* discoloration [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(3): 455 – 459.
- [6] 蒋燧, 李志辉, 朱积余, 等. 红锥家系木材密度等物理性状的遗传及变异性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(11): 9 – 13.
JIANG Yi, LI Zhihui, ZHU Jiyu, *et al.* Analysis on genetic and variability of wood density and other physical properties *Castanopsis hystrix* family [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2012, **32**(11): 9 – 13.
- [7] PARK Y, JANG S K, PARK J H, *et al.* Changes of major chemical components in larch wood through combined treatment of drying and heat treatment using superheated steam [J]. *J Wood Sci*, 2017, **63**(1): 1 – 9.
- [8] 刘洪海, 杨琳, 吴智慧, 等. 真空中湿热处理对家具用材力学性能及颜色的影响[J]. 家具, 2016, **37**(6): 7 – 10.
LIU Honghai, YANG Lin, WU Zhihui, *et al.* Effect of medium thermo-vacuum treatment on mechanical properties and colors of the wood for furniture [J]. *Furniture*, 2016, **37**(6): 7 – 10.
- [9] 曹文, 余友明, 童再康, 等. 笔罗子木材物理力学性质的研究[J]. 浙江林业科技, 2015, **35**(4): 77 – 80.
CAO Wen, YU Youming, TONG Zaikang, *et al.* Physico-mechanical properties of *Meliosma rigida* wood [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2015, **35**(4): 77 – 80.
- [10] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 761.
- [11] 程大莉. 高温热处理杉木木材的工艺及性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
CHENG Dali. *The Study on Technics and Properties of Heat Treated Fir Wood* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [12] BORREGA M, KÄRENLAMPPI P P. Hygroscopicity of heat-treated Norway spruce (*Picea abies*) wood [J]. *Eur J Wood Prod*, 2010, **68**(2): 233 – 235.
- [13] 周建斌, 邓丛静, 蒋身学, 等. 炭化木物理力学性能的研究[J]. 林产工业, 2008, **35**(6): 28 – 31.
ZHOU Jianbin, DENG Congjing, JIANG Shenxue, *et al.* Study on physical and mechanical property carbonized wood [J]. *China For Prod Ind*, 2008, **35**(6): 28 – 31.
- [14] KUBOJIMA Y, OKANO T, OHTA M. Bending strength and toughness of heat-treated wood [J]. *J Wood Sci*, 2000, **46**(1): 8 – 15.
- [15] 郭飞, 黄荣凤, 吕建雄, 等. 热处理温度与时间对马尾松木材脆性的影响[J]. 木材工业, 2016, **30**(3): 9 – 12.
GUO Fei, HUANG Rongfeng, LÜ Jianxiong, *et al.* Effect of heat treatment parameters on brittleness of masson pine wood [J]. *China Wood Ind*, 2016, **30**(3): 9 – 12.
- [16] BOONSTRA M J, ACKER J V, TJEERDSMA B F, *et al.* Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents [J]. *Ann For Sci*, 2007, **64**(7): 679 – 690.
- [17] 史蔷, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 热处理温度对圆盘豆木材力学性能的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2011, **39**(1): 27 – 29.
SHI Qiang, BAO Fucheng, LÜ Jianxiong, *et al.* Effect of heat treatment temperature on mechanical properties of okan wood [J]. *For Mach Woodwork Equipm*, 2011, **39**(1): 27 – 29.