

常压高温热处理对红竹竹材物理力学性能的影响

夏雨¹, 牛帅红², 李延军^{1,3}, 夏俐⁴, 马俊敏⁵, 王丽¹, 余肖红¹

(1. 浙江农林大学工程学院, 浙江杭州 311300; 2. 中融科创信息技术河北有限公司, 河北石家庄 050000; 3. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037; 4. 杭州和恩竹材有限公司, 浙江杭州 311251; 5. 浙江庆元县永青国有林场, 浙江庆元 323800)

摘要: 以红竹 *Phyllostachys iridescent* 为研究对象, 研究了常压高温热处理温度(110, 130, 150, 170 °C)与处理时间(1, 2, 3 h)对红竹竹材物理力学性能的影响。结果表明: 热处理后红竹材的物理力学性能优于未处理竹材, 热处理温度是影响竹材性能的主要因素; 在 110, 130, 150, 170 °C 热处理温度下, 圆竹材顺纹抗压强度增长率为 35.90%~52.01%, 圆竹材顺纹抗剪强度增长率 43.24%~90.99%, 圆竹材抗弯强度增长率 42.47%~122.58%, 圆竹材径向环刚度增长率 2.14%~52.55%; 170 °C 热处理竹材的各项干缩性能较好; 130 °C 和 150 °C 热处理竹材的力学性能相近。综合各因素, 适宜原竹家具用材红竹竹材的热处理工艺为温度 130 °C, 时间 2 h。图 3 参 16

关键词: 木材科学与技术; 常压热处理; 红竹; 原竹家具; 物理力学性能

中图分类号: S781.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2018)04-0765-06

Physical and mechanical properties of *Phyllostachys iridescent* under normal pressure and heat temperature

XIA Yu¹, NIU Shuaihong², LI Yanjun^{1,3}, XIA Li⁴, MA Junmin⁵, WANG Li¹, YU Xiaohong¹

(1. School of Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Hebei Zhongrong Kechuang Information Technology Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 4. Hangzhou Heen Bamboo Ltd., Hangzhou 311251, Zhejiang, China; 5. Qingyuan Yongqing State Forestry Center, Qingyuan 323800, Zhejiang, China)

Abstract: The effects of treatment temperature (110, 130, 150, 170 °C) and time (1, 2, 3 h) on the physical and mechanical properties of *Phyllostachys iridescent* (including bamboo strips and round bamboo strips) were studied. The results showed that the physical and mechanical properties of *Ph. iridescent* after heat treatment were better than untreated bamboo, and the heat treatment temperature was the main factor affecting bamboo properties. Treated by 110, 130, 150, 170 °C, compressive growth rate of round bamboo strips was 35.90%~52.01%, its shear growth rate was 43.24%~90.99%, its bending growth rate was 42.47%~122.58%, and its radial ring Stiffness growth rate was 2.14%~52.55%. The shrinkage of bamboo strip was better at 170 °C. 130 °C and 150 °C heat treated bamboo's mechanical properties were similar. Considering all the factors, the heat treatment process of the bamboo material was 130 °C for 2 h. [Ch, 3 fig. 16 ref.]

Key words: wood science and technology; atmospheric pressure heat treatment; *Phyllostachys iridescent*; raw bamboo furniture; physical and mechanical properties

中国是世界竹资源第一大国, 竹子栽培和竹材利用历史悠久, 在品种、面积、蓄积量、竹制品产量

收稿日期: 2017-10-09; 修回日期: 2018-01-15

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY16C160009); 国家自然科学基金资助项目(31570552); 浙江省科技厅公益项目(2015C31047)

作者简介: 夏雨, 从事木材科学与家具设计研究。E-mail: 794460892@qq.com。通信作者: 李延军, 教授, 博士, 博士生导师, 从事木竹材工程材料研究。E-mail: lalyj@126.com

和出口额方面均居世界第一，素有“竹子王国”美誉。中国竹产业自20世纪90年代开始发展以来，其产品广泛应用于车辆、建筑、家具、装饰等各个领域^[1-3]。中国竹家具的历史悠久，风格独特，造型美观，是传统家具的一个重要分支^[4-5]。原竹家具是竹家具的重要组成部分，主要使用红竹 *Phyllostachys iridescent* 作为加工材料。在实际生产加工中，由于竹材含有较高的纤维素、半纤维素、淀粉、糖类及蛋白质等有机物，原竹家具在储存、加工和使用过程中容易产生虫蛀、霉变和开裂等问题，因此原竹家具用材需进行必要的改性处理^[6-7]。竹材高温热处理是借鉴木材热处理技术而提出的改善竹材性能、提高产品质量的一种改性方法^[8-11]。高温热处理有利于改善竹材材料的尺寸稳定性、耐腐性、耐候性等性能，实现竹材的高效利用，增加产品种类，提高产品质量^[10]。目前，国内外对于竹材热处理的研究多集中于毛竹 *Phyllostachys edulis*^[3,6-7,12]，对于红竹热处理研究较少，红竹分布于浙江、江苏、上海、四川和安徽等地，产量丰富，是具有代表性的小径级竹材，笔者对红竹竹材进行高温热处理试验，为原竹家具原料的改性处理和小径级竹的研究提供一定的技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为3年生红竹，采伐自安徽省宁国市。选取表面光滑，无明显缺陷的红竹，距地50 cm处采伐，往上1.5 m为试件原料，采伐12组，15根·组⁻¹，共计180根。分别制作试件，参照GB/T 15780—1995《竹材物理力学性质试验方法》^[13]和ISO 22157-1—2004 *Species Test Methods for Evaluating the Following Characteristic Physical and Strength Properties for Bamboo*^[14]。制成10 mm×10 mm×t mm(t为壁厚)竹片材试件，测基本密度、干缩率；20 mm×20 mm×t mm竹片材试件，测顺纹抗压强度；160 mm×10 mm×t mm竹片材试件，测抗弯强度；35 mm×20 mm×t mm竹片材试件，测凸型顺纹抗剪强度；280 mm×10 mm×t mm竹片材试件，测凹型顺纹抗拉强度；d mm(d为直径)×40 mm的圆竹材试件，测顺纹抗压强度、顺纹抗剪强度、径向环刚度；d mm×60 cm(测试点无竹节)圆竹材试件，测抗弯强度。

1.2 试验设备

微机控制电子式木材万能试验机(DNS50)，高低交变湿热试验箱(ER-10AGP)，烘箱(SEG-021)，电子分析天平(AB204-N)，干燥碳化窑，游标卡尺，螺旋测微器等。

1.3 热处理试验

将试件放置于干燥箱中，初始温度为40 °C，隔2 h温度升高5 °C，直至103 °C，竹材干燥至绝干；将绝干试件分别以温度为110, 130, 150, 170 °C，时间分别为1, 2, 3 h进行常压高温热处理。热处理过程中为防止竹材及圆竹材开裂，采用蒸汽高温热处理，试件放入干燥窑后，开始通蒸汽，进行高温热处理，试件共计12组。热处理后试件放入高低交变湿热试验箱中，以温度(20±2) °C，湿度(65±5)%进行水分调节，待含水率稳定后，进行试验，竹材经过热处理后，其含水率处于稳定状态下为5.5%，因未处理竹材试验时含水率为12%，为了方便对比，将热处理竹材均计为含水率为12%时的强度。

2 结果与分析

2.1 热处理工艺对竹片材物理性能影响

由图1可见：热处理对竹材基本密度、径向干缩率、弦向干缩率、体积干缩率均有影响，根据各性能的方差分析，处理温度和时间对基本密度的影响不显著($P>0.05$)，对各项干缩性能的影响显著($P<0.05$)，其中温度为主影响因素；未处理竹材(对照)基本密度为0.60 g·cm⁻³，热处理竹材基本密度最小值为170 °C，3 h时的0.64 g·cm⁻³，最大值为150 °C，3 h时的0.68 g·cm⁻³，比对照增加了6.9%~13.9%；130和150 °C竹材基本密度趋势差异较小，110~150 °C呈现随温度升高、时间延长，基本密度增大趋势，170 °C则呈相反趋势。径向干缩率、弦向干缩率、体积干缩率随热处理温度增加，数值下降；同一热处理温度下，时间延长，数值也有所下降；170 °C时各项干缩率数值差异均较小；未处理竹材径向干缩率为2.2%，弦向干缩率为5.0%，体积干缩率为14.6%，热处理竹材径向干缩率最大为2.3%，数值最小为1.9%，比对未处理竹材变化率为4.55%~13.64%，弦向干缩率最大为4.8%，最小为3.2%，比对变化率为4.00%~36.00%，体积干缩率最大为12.2%，最小为11.0%，比对变化率16.44%~24.66%。

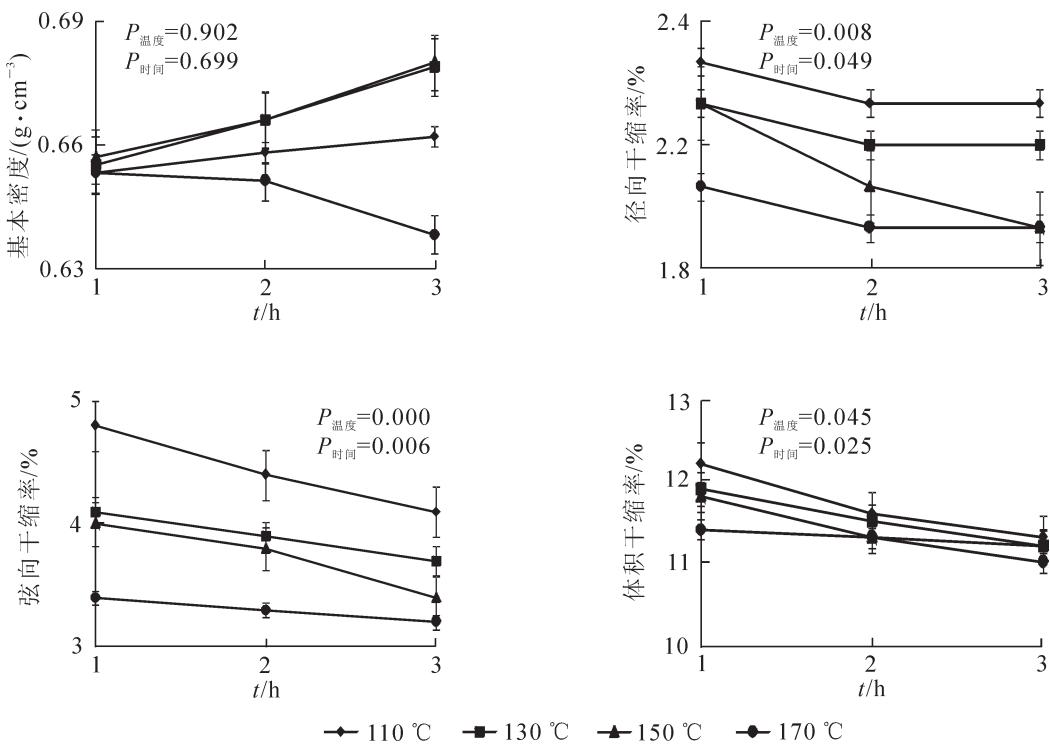


图 1 热处理竹材变化

Figure 1 Heat-treated bamboo's physical properties

2.2 热处理工艺对竹片材力学性能影响

由图 2 可见: 热处理工艺对竹片材顺纹抗压强度、顺纹抗剪强度、抗弯强度、顺纹抗拉强度有明显的影响, 竹片材各力学强度方差分析显示: 处理温度为影响力学强度的极显著因素($P<0.01$), 处理时间影响不显著($P>0.05$); 力学强度随热处理温度升高整体呈现先上升后下降的趋势; 未处理竹片材的抗剪强度、抗拉强度较 170 °C 处理竹材高, 这表明热处理温度过高, 其力学性能反而有下降趋势; 热处理温度为 110, 130, 150 °C 时, 随热处理时间的延长, 力学强度呈增大趋势, 而 170 °C 则呈相反趋势。未处理竹片材顺纹抗压强度为 51.6 MPa, 热处理后最小值为 69.3 MPa, 最大值为 72.4 MPa, 比对变化率为 32.17%~39.72%; 未处理竹片材顺纹抗剪强度为 19.6 MPa, 热处理后最小值为 17.5 MPa, 最大值为 24 MPa, 比对变化率为 -12.24%~20.91%; 未处理竹片材的抗弯强度为 142.7 MPa, 热处理后最小值为 162.3 MPa, 最大值为 196.6 MPa, 比对变化率为 13.52%~37.56%; 未处理竹片材的顺纹抗拉强度为 225.8 MPa, 热处理后最小值为 156.7 MPa, 最大值为 250.4 MPa, 比对变化率为 -30.73%~10.76%。

2.3 热处理工艺对圆竹材力学性能的影响

图 3 反映了热处理工艺对圆竹材顺纹抗压强度、顺纹抗剪强度、抗弯强度、径向环刚度^[15]的影响, 圆竹材各力学性能方差分析可见, 温度是影响各力学强度变化的主要因素($P<0.01$), 时间影响不显著($P>0.1$); 热处理后圆竹材的力学强度均大于未处理圆竹材; 热处理温度为 110, 130, 150 °C 时, 圆竹材的力学强度随温度升高和时间延长呈上升趋势; 110, 130, 150 °C 的温度条件时, 圆竹顺纹抗压强度总体趋势从低到高依次为 110, 130, 150 °C, 其中 110 °C 与 130, 150 °C 差异较大; 圆竹材顺纹抗剪强度增幅较缓, 10, 130, 150 °C 温度之间抗剪强度差异较小; 圆竹材抗弯强度 3 种温度条件差距不明显, 时间因素影响较明显; 圆竹材径向环刚度增幅较缓, 110, 130, 150 °C 温度之间强度差异小; 在 170 °C 的温度条件下, 圆竹材顺纹抗压强度、顺纹抗剪强度、抗弯强度及径向环刚度等 4 个力学性能均呈随时间延长, 强度下降的趋势。未处理圆竹材顺纹抗压强度为 29.8 MPa, 热处理后最小值为 40.8 MPa, 最大值 45.6 MPa, 比对变化率为 35.90%~52.01%; 未处理圆竹材顺纹抗剪强度为 11.1 MPa, 热处理后最小值为 16.2 MPa, 最大值为 21.6 MPa, 比对变化率为 43.24%~90.99%; 未处理竹圆竹材抗弯强度为 18.6 MPa, 热处理后最小值为 26.8 MPa, 最大值为 41.7 MPa, 比对变化率为 42.47%~122.58%; 未处理圆竹材径向环刚度为 98 kPa, 热处理后最小值为 100.4 kPa, 最大值为 159.8 kPa, 比对变化率为 2.14%~

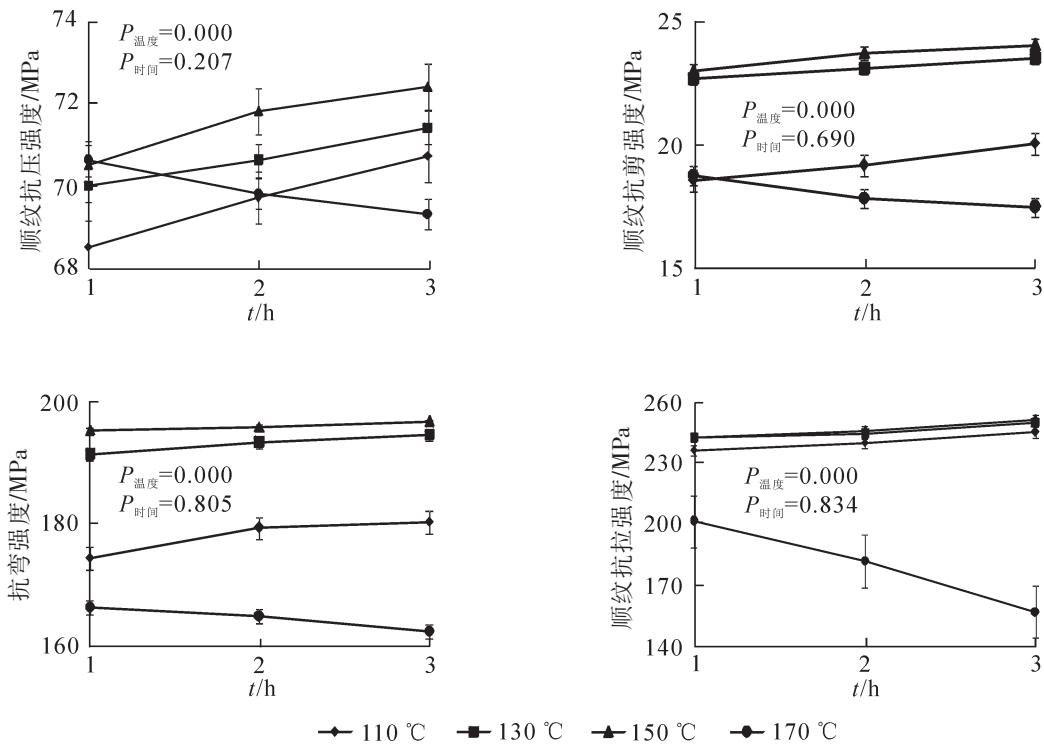


图2 热处理工艺对竹片材力学性能影响

Figure 2 Heat-treated bamboo sheet's mechanical properties

52.55%。可以看出，热处理后圆竹材的力学强度提升较大，这对于制作原竹家具是适合的改性方式。

3 结论

根据木材学理论及木材碳化机制^[16]，竹材在热处理过程中纤维素，尤其是半纤维素发生分解，含量降低，同时竹材内部结构发生变化，导致氢键浓度降低，或氢键被非亲水性基团所取代，引起竹材干缩；在温度为110~150 °C时，温度相对较低，竹材内部的纤维素、半纤维素分解缓慢，竹材内部自由水

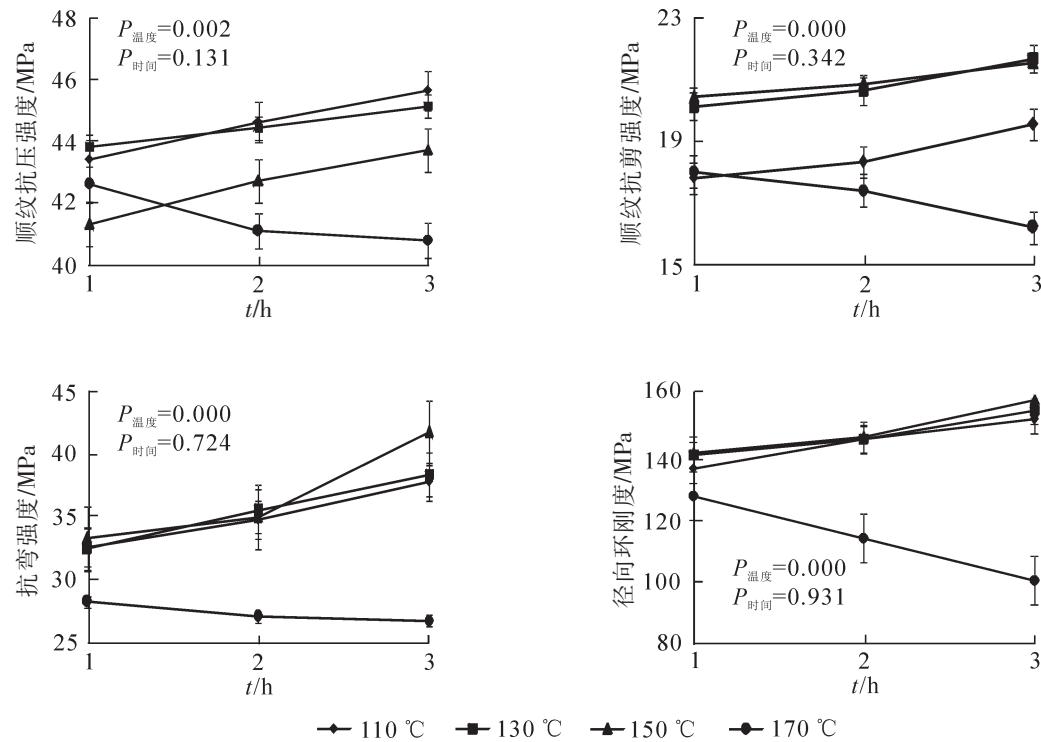


图3 热处理工艺对圆竹材力学性能的影响

Figure 3 Heat-treated round bamboo's mechanical properties

蒸发较多, 体积干缩较大, 竹材基本密度相对增加, 力学性能增加; 随着热处理温度的升高, 竹材的胞壁物质、半纤维素、纤维素分解剧烈, 竹材的胞壁物质减少, 而体积基本不变, 竹材基本密度相对降低, 其力学性能降低。

由以上分析可知, 温度是影响热处理后竹材物理力学性能的显著因素; 110 °C和170 °C时的竹材力学性能较弱, 而130 °C与150 °C的竹材其各项力学性能均相似, 因此, 首先排除110 °C和170 °C作为生产中热处理工艺温度; 实际生产和热处理过程中, 安全、环保、成本等均是需要综合考虑的因素, 150 °C热处理温度, 其消耗燃料、有害气体排放均较多, 温度较高, 安全隐患较大。因此, 最适宜生产的热处理工艺为温度130 °C, 时间2 h。

4 参考文献

- [1] 李延军, 许斌, 张齐生, 等. 我国竹材加工产业现状与对策分析[J]. 林业工程学报, 2016, 1(1): 2–7.
LI Yanjun, XU Bin, ZHANG Qisheng, et al. Present situation and the countermeasure analysis of bamboo timber processing industry in China [J]. *J For Eng*, 2016, 1(1): 2–7.
- [2] 闫薇, 傅万四, 张彬, 等. 基于规格竹片的胶合界面研究现状及建议[J]. 林业工程学报, 2016, 1(5): 20–25.
YAN Wei, FU Wansi, ZHANG Bin, et al. Research status and suggestion on specification bamboo bonding interface [J]. *J For Eng*, 2016, 1(5): 20–25.
- [3] 黄梦雪, 张晓春, 余文军, 等. 高温蒸汽软化竹材的力学性能及结构表征[J]. 林业工程学报, 2016, 1(4): 64–68.
HUANG Mengxue, ZHANG Xiaochun, YU Wenjun, et al. Mechanical properties and structure characterization of bamboo softened by high temperature steam [J]. *J For Eng*, 2016, 1(4): 64–68.
- [4] 曾利. 竹藤家具及其保养与修复技术[J]. 林产工业, 2010, 37(1): 40–42.
ZENG Li. The conservation and restoration of rattan furniture [J]. *China For Prod Ind*, 2010, 37(1): 40–42.
- [5] 何晓琴. 中国传统竹家具的文化特征[J]. 世界竹藤通讯, 2006, 4(2): 42–45.
HE Xiaoqin. Culture characteristics of traditional bamboo furniture in China [J]. *World Bamboo Rat*, 2006, 4(2): 42–45.
- [6] 包永洁, 蒋身学, 程大莉, 等. 热处理对竹材物理力学性能的影响[J]. 竹子研究汇刊, 2009, 28(4): 50–53.
BAO Yongjie, JIANG Shenxue, CHENG Dali, et al. The effects of heat treatment on physical-mechanical properties of bamboo [J]. *J Bamboo Res*, 2009, 28(4): 50–53.
- [7] 林勇, 沈珏程, 于利, 等. 高温热处理竹材的物理力学性能研究[J]. 林业机械与木工设备, 2012, 40(8): 22–24.
LIN Yong, SHEN Yucheng, YU Li, et al. Study of physical-mechanical properties of bamboos through high temperature heat treatment [J]. *For Mach Woodwork Equip*, 2012, 40(8): 22–24.
- [8] 李涛, 顾炼百. 185 °C高温热处理对水曲柳木材力学性能的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 92–97.
LI Tao, GU Lianbai. Effects of high temperature heat treatment at 185 °C on mechanical properties of ash wood [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, 45(2): 92–97.
- [9] 李延军, 唐荣强, 鲍滨福, 等. 高温热处理杉木力学性能与尺寸稳定性研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 232–235.
LI Yanjun, TANG Rongqiang, BAO Binfu, et al. Mechanical properties and dimensional stability of heat-treated Chinese fir [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, 32(4): 232–235.
- [10] 李延军, 孙会, 鲍滨福, 等. 国内外木材热处理技术研究进展及展望[J]. 浙江林业科技, 2008, 28(5): 75–79.
LI Yanjun, SUN Hui, BAO Binfu, et al. Advances and prospect of research on technology of wood heat-treatment [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2008, 28(5): 75–79.
- [11] 李贤军, 傅峰, 蔡智勇, 等. 高温热处理对木材吸湿性和尺寸稳定性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(6): 92–96.
LI Xianjun, FU Feng, CAI Zhiyong, et al. The effect of high temperature thermal treatment on moisture absorption and dimension stability of wood [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2010, 30(6): 92–96.

- [12] 侯瑞光, 刘元, 李贤军, 等. 高温热处理对重组竹物理力学性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(2): 101 – 104.
HOU Ruiguang, LIU Yuan, LI Xianjun, et al. Effects of heat treatment on physical-mechanical properties of reconstituted bamboo lumber (RBL) [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2013, **33**(2): 101 – 104.
- [13] 国家技术监督局. GB/T 15780–1995 竹材物理力学性质试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [14] ISO/TC 165 Timber Structures. ISO 22157-1–2004 *Species Test Methods for Evaluating the Following Characteristic Physical and Strength Properties for Bamboo* [S]. <https://www.iso.org/standard/36150.html>.
- [15] 张文福, 江泽慧, 王戈, 等. 用环刚度法评价圆竹径向抗压力学性能[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(1): 119 – 122.
ZHANG Wenfu, JIANG Zehui, WANG Ge, et al. Radial compression mechanical properties of bamboo-culm by ring stiffness [J]. *J Beijing For Univ*, 2013, **35**(1): 119 – 122.
- [16] 吴帅, 于志明. 木材炭化技术的发展趋势[J]. 中国人造板, 2008, **15**(5): 3 – 6.
WU Shuai, YU Zhiming. Review on current situation and developing trend of wood carbonization technology [J]. *China Wood-Based Panels*, 2008, **15**(5): 3 – 6.