

## 重组竹高温处理后物理力学性能研究

俞君宝<sup>1,2</sup>, 杨鼎宜<sup>1\*</sup>, 杜保聪<sup>1</sup>, 蔡元成<sup>1</sup>

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 扬州工业职业技术学院, 江苏 扬州 225100)

**摘要:**为探索高温处理对重组竹物理力学性能的影响,研究不同温度(110、170、230 ℃)和不同处理时间(1、2、3、4 h)对重组竹抗压强度、抗剪强度、抗弯强度、抗拉强度和质量损失的影响。结果表明,重组竹的力学性能随着处理温度 and 时间的增加而逐渐降低。230 ℃高温下重组竹的物理力学性能降低较显著,恒温4 h后抗压强度、抗剪强度、抗弯强度、抗拉强度及质量的残留率分别35%、20%、25%、10%、70%。高温后重组竹在自然冷却条件下的残余强度大于浸水冷却条件下的残余强度。

**关键词:**重组竹; 高温处理; 力学性能; 物理性能

**中图分类号:**S781.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)04-0243-05

## Physical and Mechanical Properties of Bamboo Scrimber After High Temperature Treatment

YU Jun-bao<sup>1,2</sup>, YANG Ding-yi<sup>1\*</sup>, DU Bao-cong<sup>1</sup>, CAI Yuan-cheng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China;

2. Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225100, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of high temperature treatment on the physical and mechanical properties of the bamboo scrimber (BS), the effects of different temperatures (110, 170, and 230 ℃) and different treatment time durations (1 h, 2 h, 3 h, and 4 h) on the compressive strength, shear strength, flexural strength, tensile strength and mass loss of the BS were studied. The results showed that the mechanical properties of the BS decreased with the increase of treatment temperature and time. The physical and mechanical properties of the BS decreased significantly at 230 ℃, and the residual rates of compressive strength, shear strength, flexural strength, tensile strength and mass loss were 35%, 20%, 25%, 10% and 70%, respectively, after 4 h thermostatic treatment. After treated with high temperature, the residual strength of the BS under natural cooling conditions was greater than that under water cooling conditions.

**Key words:** bamboo scrimber; high temperature treatment; mechanical property; physical property

竹材是一种生长周期短、力学性能优良、一次种植可持续利用的绿色建材<sup>[1]</sup>。为满足现代工业化、装配化对建筑结构用材的需求,利用复合加工技术,将小径杂竹加工成竹束后经疏解、施胶、组坯热压而成重组竹<sup>[2-3]</sup>。F. Rao等<sup>[4]</sup>、李频<sup>[5]</sup>和吴文清等<sup>[6]</sup>对重组竹的基本力学性能进行了研究,结果表明重组竹具有较好的物理力学性能。肖纲要等<sup>[7]</sup>、肖忠平

等<sup>[8]</sup>和魏洋等<sup>[9]</sup>对结构用重组竹的抗弯性能进行研究,结果表明重组竹可用作建筑结构用材。然而,竹材与木材一样属于可燃性材料,高温下竹材炭化、承载性能及刚度下降,阻碍着其工程应用。

向金华<sup>[10]</sup>、夏秋羚<sup>[11]</sup>研究了胶合竹和重组竹高温后基本性能,结果表明,胶合竹和重组竹高温后物理力学性能显著下降,碳化深度明显增加,且与时

收稿日期:2021-08-27 修回日期:2021-10-07

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD1101002);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB560010);江苏省住房和城乡建设厅科技项目(2020ZD40)。

第一作者:俞君宝,讲师。研究方向:土木工程材料。E-mail:229302956@qq.com

\* 通信作者:杨鼎宜,教授,博士生导师。研究方向:土木工程材料。E-mail:yangdy@yzu.edu.cn

间呈现非线性关系。肖忠平等<sup>[12]</sup>、朱彦等<sup>[13]</sup>研究了高温后重组竹的受压性能,发现重组竹受压随高温时间逐渐下降,但仍具有一定的剩余强度,可以减少火灾高温对建筑的损伤。M. Xu 等<sup>[14-15]</sup>开展了高温下重组竹压缩和拉伸性能的试验研究,阐明了重组竹材的应力-应变关系和破坏机理,建立了高温下重组竹强度和弹性模量折算因子方程。靳肖贝等<sup>[16-17]</sup>、王嘉辉等<sup>[18]</sup>开展了重组竹燃烧性能和物理力学性能研究,并通过添加阻燃剂提高重组竹的阻燃性能。

当前对重组竹高温后力学性能的研究较少且不成系统。本研究通过对重组竹高温处理,探讨了重组竹力学性能和质量损失随高温时间和温度的变化规律,并比较不同冷却方式对重组竹高温处理后力学性能的影响,为重组竹建筑的抗火设计、火灾后的重组竹结构性能评估提供理论支持。

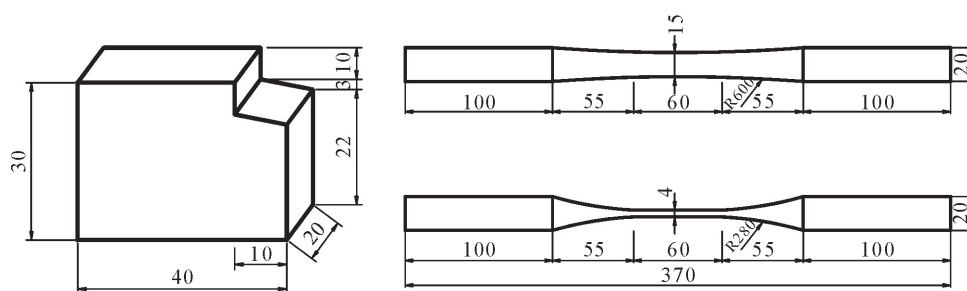


图1 抗剪试件和抗拉试件尺寸

Fig. 1 Sizes of shear and tensile specimens

将制作好的试件放置于高温炉内并进行高温处理。设置温度为 110、170、230 °C,分别恒温处理 1、2、3、4 h,取出后自然冷却,测试其力学性能。为了研究冷却方式对重组竹力学性能的影响,将制作好的试件放置于高温炉内,设置温度 230 °C,恒温 4 h,取出分别进行自然冷却和浸水冷却,然后测试其力学性能。

## 2 结果与分析

### 2.1 抗压强度变化

由图 2 可知,高温下重组竹的抗压强度随时间的增加而逐渐降低,且温度越高下降越快。相同条件下,密度对高温下重组竹抗压强度的影响不明显,2 种不同密度的重组竹抗压强度下降趋势和残余强度基本相同。高温下,前 1 h 内的重组竹抗压强度下降较快,后 3 h 下降变缓慢。230 °C 高温下 1 h,A 类重组竹的残余抗压强度约 50 MPa,B 类重组竹的残余抗压强度约 60 MPa,强度保留率约为 50%。110 °C 高温下 4 h,2 种重组竹的残余强度约为 75 MPa,强度保留率约为 80%。170 °C 高温下 4 h,

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料和设备

重组竹:密度分别为 0.85 g/cm<sup>3</sup>(A 类)和 1.05 g/cm<sup>3</sup>(B 类),广西绿镜竹业有限公司生产并提供。SX2-10-24 智能箱式高温炉、WDW-200 电子万能试验机。

### 1.2 试验方法与性能测试

参照《木材顺纹抗压强度试验方法》GBT 1935—2009、《木材抗弯强度试验方法》GBT 1936.1—2009、《木材顺纹抗剪强度试验方法》GBT 1937—2009、《木材顺纹抗拉强度试验方法》GBT 1938—2009 分别制作试件并测试力学性能。抗压试件尺寸:30 mm×20 mm×20 mm,抗弯试件尺寸:30 mm×20 mm×20 mm,抗剪试件和抗拉试件尺寸如图 1 所示。

2 种重组竹的残余强度约为 50 MPa,强度保留率约为 55%。230 °C 高温下 4 h,2 种重组竹的残余强度约为 30 MPa,强度保留率约为 35%。

### 2.2 抗剪强度变化

由图 3 可知,高温下重组竹的抗剪强度随时间的增加逐渐降低,且温度越高下降越快。相同条件下,重组竹密度越大,抗剪强度下降越缓慢,残余强度越大。高温下,重组竹的抗剪强度在第 1 h 内下降较快,后 3 h 下降变缓慢。110 °C 高温下 1 h,2 种重组竹的残余抗剪强度约为 20 MPa,强度保留率约为 83%。170 °C 高温下 1 h,2 种重组竹的残余抗剪强度分别为 15 MPa 和 18 MPa,强度保留率约为 62%和 75%。230 °C 高温下 1 h,2 种重组竹的残余抗剪强度分别为 8 MPa 和 12 MPa,强度保留率约为 30%和 50%。110 °C 高温下 4 h,2 种重组竹的残余抗剪强度约为 18 MPa,强度保留率约为 80%。170 °C 高温下 4 h,2 种重组竹的残余抗剪强度约为 13 MPa,强度保留率约为 50%。230 °C 高温下 4 h,2 种重组竹的残余抗剪强度约为 5 MPa,强度保留率约为 20%。

2.3 抗弯强度变化

由图 4 可知,高温下重组竹的抗弯随时间的增加逐渐降低,且温度越高下降越快。相同条件下,密度对高温下重组竹抗弯强度的影响不明显,2 种密度的重组竹抗弯强度下降趋势和残余强度基本相同。110 ℃高温下,2 种重组竹的抗弯强度下降较缓慢,4 h 后的残余抗弯强度为 110 MPa,强度保留

率约为 90%。170 ℃高温下,2 种重组竹的抗弯强度下降变快,4 h 内下降速率均匀,4 h 后残余抗弯强度 50~70 MPa,强度保留率约为 45%~60%。230 ℃高温下,2 种重组竹的抗弯强度在前 2 h 下降迅速,2 h 时后残余抗弯强度为 30 MPa,强度保留率约为 25%;后 2 h 重组竹的抗弯强度变化较小。

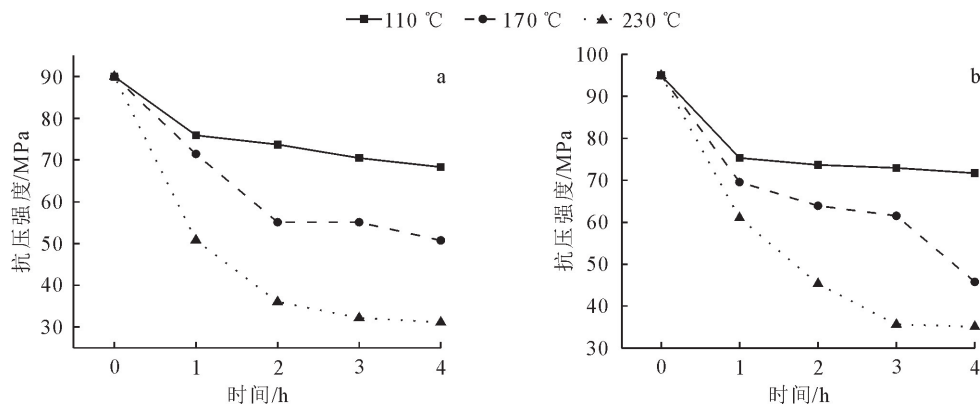


图 2 A 类重组竹(a)和 B 类重组竹(b)抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of class A bamboo scrimber (a) and class B bamboo scrimber (b)

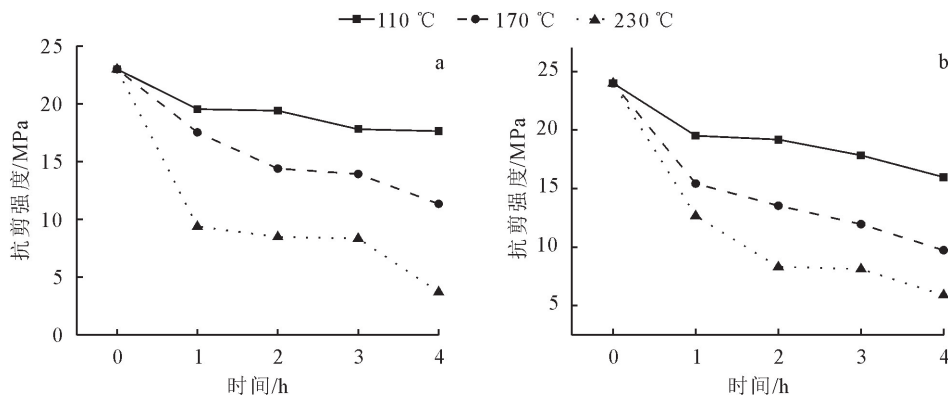


图 3 A 类重组竹(a)和 B 类重组竹(b)抗剪强度

Fig. 3 Shear strength of class A bamboo scrimber (a) and class B bamboo scrimber (b)

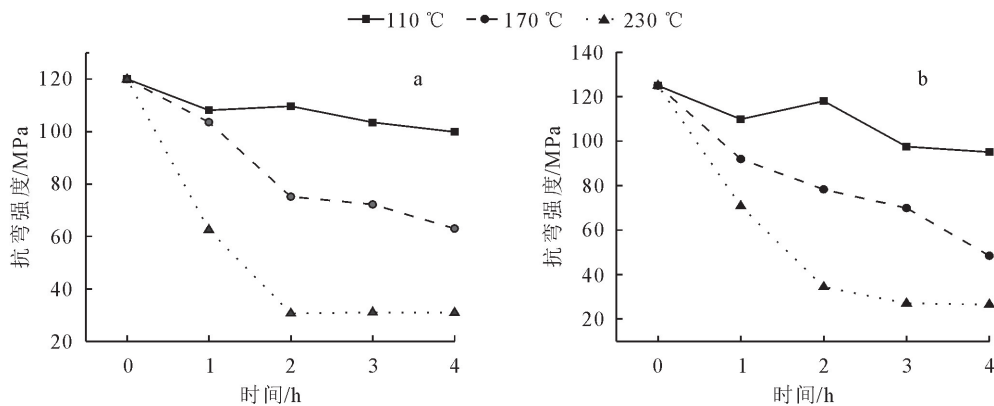


图 4 A 类重组竹(a)和 B 类重组竹(b)抗弯强度

Fig. 4 Flexure strength of class A bamboo scrimber (a) and class B bamboo scrimber (b)

## 2.4 抗拉强度变化

由图 5 可知,高温下重组竹的抗拉强度随着时间的增加逐渐降低,且温度越高下降越快。相同条件下,重组竹密度越大,抗拉强度下降越缓慢,残余强度越大。110 ℃高温下,A 类重组竹的抗拉强度下降较缓慢,B 类重组竹的抗拉强度下降较快。170 ℃高温下,2 种重组竹的抗拉强度均出现较快的下降,1 h 后 A 类重组竹的残余抗拉强度为 70 MPa,B 类重组竹的残余抗拉强度为 80 MPa,2 种重组竹的强度保留率分别约为 56%和 72%;4 h 后 2 种重组竹的残余抗拉强度接近,约为 45 MPa,强度保留率约为 35%。230 ℃高温下,1 h 后 A 类重组竹的残余抗拉强度为 30 MPa,B 类重组竹的残余抗拉强度为 35 MPa,2 种重组竹的强度保留率分别约为 24%和 31%;4 h A 类重组竹的残余抗拉强度为 10 MPa,B 类重组竹的残余抗拉强度为 20 MPa,2 种重组竹的强度保留率分别约为 8%和 18%。

## 2.5 质量损失

由图 6 可知,高温下重组竹的质量损失率随着时间的增加逐渐增大,且温度越高损失越明显。相同条件下,密度对高温下重组竹质量损失的影响不明

显,2 种密度的重组竹质量损失趋势和残余质量基本相同。110 ℃和 170 ℃高温下,2 种重组竹质量损失不明显,随着时间的增加质量损失率略有增加,恒温 4 h 后残余质量分别约为 95%和 90%。230 ℃高温下 2 种重组竹质量损失明显,随着时间的增加质量损失率大幅增加,恒温 4 h 后残余质量仅剩约为 70%。

## 2.6 冷却方式对强度损失的影响

为了研究冷却方式对高温处理后重组竹力学性能的影响,将重组竹在高温 230 ℃下处理 4 h,取出分别对其进行自然冷却和浸水冷却,然后测试其力学性能。

由图 7 可知,高温后自然冷却下重组竹的残余强度均大于浸水冷却的残余强度。抗压强度和抗弯强度相差较为明显,且 A 类重组竹比 B 类重组竹相差更明显,分析原因:重组竹随着含水率的增加,强度会降低。A 类重组竹密度小,孔隙率大,吸水率大等导致强度降低较大。实际火灾情况下,用水消防灭火后,重组竹的强度会有所下降,因此,在一定程度上会增加重组竹结构当时的危险性。

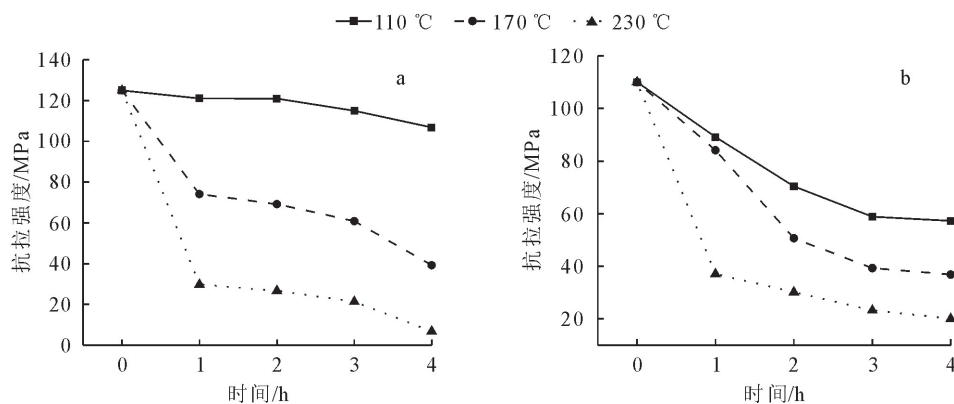


图 5 A 类重组竹(a)和 B 类重组竹(b)抗拉强度

Fig. 5 Tensile strength of class A bamboo scrimber (a) and class B bamboo scrimber (b)

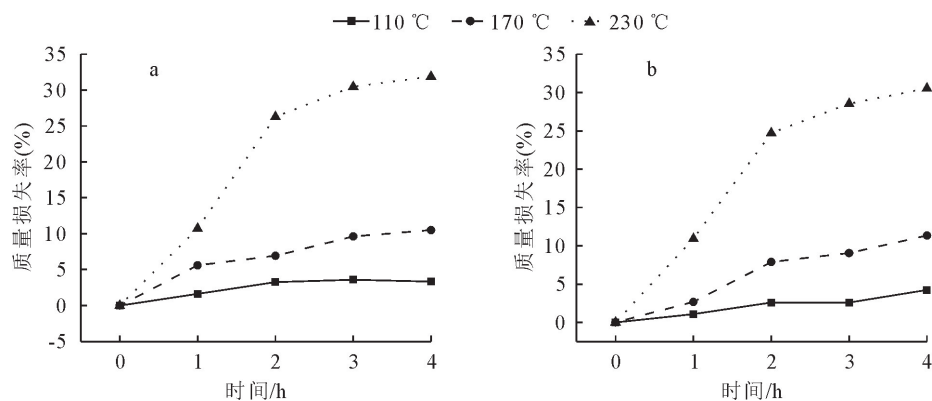


图 6 A 类重组竹(a)和 B 类重组竹(b)质量损失率

Fig. 6 Mass loss rate of class A bamboo scrimber (a) and class B bamboo scrimber (b)

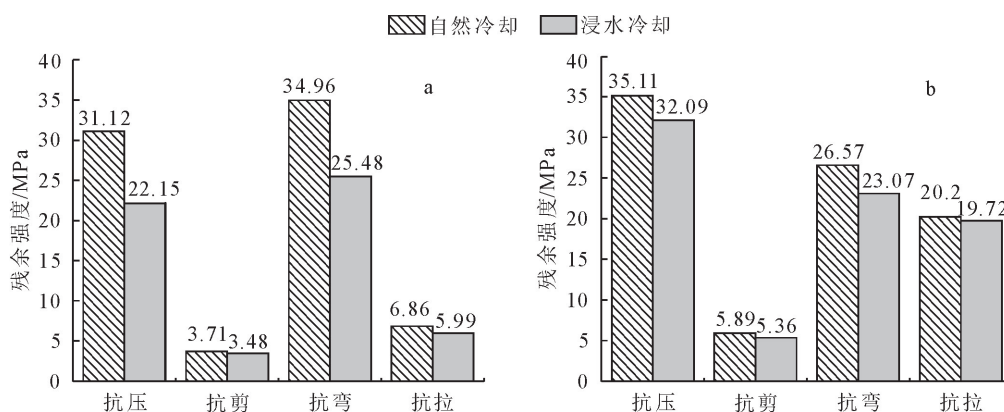


图7 A类重组竹(a)和B类重组竹(b)残余力学强度

Fig. 7 Residual mechanical strength of class A bamboo scrimber (a) and class B bamboo scrimber (b)

### 3 结论与讨论

高温处理后重组竹的力学性能逐渐降低,温度越高,高温时间越长,下降越明显。230℃高温下重组竹力学强度急剧下降,4 h后残余强度在10%~35%。抗压强度和抗剪强度的残余强度相对较大,抗弯强度和抗拉强度的残余强度相对较小。相同条件下,重组竹的密度越大,强度损失越小。高温处理后重组竹的质量损失率逐渐增加,110℃和170℃高温下,重组竹质量损失不明显,230℃高温下重组竹质量损失明显,恒温4 h后残余质量仅剩约为70%。高温处理后,自然冷却的重组竹残余强度高于浸水冷却,尤其是抗压强度和抗弯强度。重组竹密度越大,冷却方式对残余强度的影响越小。

相较于传统竹木材,重组竹是一种在高压下形成的密实型复合材料,具有较好的防高温和阻燃性能。同时,由于生产重组竹所用的树脂类胶黏剂具有较好的高温稳定性,所以,重组竹在高温下的物理力学性能较好。但是,当温度较高时,重组竹的物理力学性能也会急剧下降,这为重组竹在工程应用提供理论指导,确保使用的安全性。

#### 参考文献:

- [1] SERGEY S, GALINA D V, EDVARD Y, *et al.* Bamboo as a unique ecological building material of the XXI century: bamboo description, bamboo physical and mechanical properties studies [J]. *Materials Science Forum*, 2021, 6306.
- [2] SUN Y, YU W, WEI X, *et al.* Bamboo strand-based structural composite lumber: Influence of technological parameters on physico-mechanical properties [J]. *Constr. Build. Mater.*, 2021, 271: 121795.
- [3] YU Y, LIU R, HUANG Y, *et al.* Preparation, physical, mechanical, and interfacial morphological properties of engineered bamboo scrimber [J]. *Constr. Build. Mater.*, 2017, 157: 1032-1039.

- [4] RAO F, JI Y, LI N, *et al.* Outdoor bamboo-fiber-reinforced composite: Influence of resin content on water resistance and mechanical properties [J]. *Constr. Build. Mater.*, 2020, 261: 120022.
- [5] 李频. 重组竹的力学性能试验 [J]. *湖南文理学院学报: 自然科学版*, 2018, 30(2): 53-57.  
LI P. Experimental study on mechanical properties of bamboo scrimber [J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science: Science and Technology*, 2018, 30(2): 53-57. (in Chinese)
- [6] 吴文清, 宋晓东. 重组竹基本力学性能的试验分析与研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2017, 39(4): 46-51.  
WU W Q, SONG X D. Analysis and research of basic mechanical performance test of recombinant bamboo [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2017, 39(4): 46-51. (in Chinese)
- [7] 肖纲要, 李霞镇, 钟永. 结构用重组竹抗弯力学性能 [J]. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(1): 60-64.  
XIAO G Y, LI X Z, ZHEN Y. Bending properties of the structural recombinant bamboo [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(1): 60-64. (in Chinese)
- [8] 肖忠平, 李晨, 苏相宇. 不同截面形式重组竹柱轴心受压试验研究 [J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(5): 231-235.  
XIAO Z P, LI C, SU X Y. Experimental study on axial compression of glued laminated bamboo columns with different cross sections [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(5): 231-235. (in Chinese)
- [9] 魏洋, 吴刚, 张齐生, 等. 足尺重组竹受弯构件的试验与理论分析 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(Supp. 1): 140-145.  
WEI Y, WU G, ZHANG Q S, *et al.* Theoretical analysis and experimental test of full-scale bamboo scrimber flexural components [J]. *Civil, architectural and environmental engineering*, 2012, 34(Supp. 1): 140-145. (in Chinese)
- [10] 向金华. 重组竹高温下基本性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [11] 夏秋羚. 胶合竹高温下基本性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.

(下转第265页)

- Landscape Architecture, 2002, 18(5): 77-80. (in Chinese)
- [7] 谢花林, 刘黎明. 乡村景观评价研究进展及其指标体系初探[J]. 生态杂志, 2003, 22(6): 97-101.  
XIE H L, LIU L M. Research advance and index system of rural landscape evaluation. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(6): 97-101. (in Chinese)
- [8] 王秋鸟, 邓华峰. 基于 AVC 的乡村景观综合评价研究——以三岔村为例[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 298-303.  
WANG Q N, DENG H F. AVC theory based rural landscape evaluation: taking Sancha village as an example[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3): 298-303. (in Chinese)
- [9] 孙庆忠. 佳县泥河沟村——以农业遗产保护延续“枣缘社会”[J]. 世界遗产, 2015(11): 44-48.  
SUN Q Z. Hegou village in Jiaxian county—a traditional date fruit-based socio-economic pattern continued through GIAHS[J]. World Heritages, 2015(11): 44-48. (in Chinese)
- [10] 高瑜. 基于层次分析法的美丽乡村景观评价——以重庆市合川区为例[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(16): 14-20.
- [11] 李宇奇, 罗奕爽, 黎燕琼, 等. 基于 AHP 法的乡村景观质量评价体系构建——以川西林盘为例[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 263-268.  
LI Y Q, LUO Y S, LI Y Q, *et al.* Establishment of the evaluation system for rural landscape quality based on analytic hierarchy process: taking Western Sichuan Linpan as an example [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 263-268. (in Chinese)
- [12] 王烨梓, 韦宝婧, 胡希军, 等. 基于保护和利用视角下的松岭村乡土景观资源评价[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 281-288.  
WANG Y Z, WEI B J, HU X J, *et al.* Evaluation of local landscape resources from the perspective of protection and utilization in Songling village[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 281-288. (in Chinese)
- [13] 梁振然, 任爽. 桂林市乡村园林景观分布特征及评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 221-225.  
LIANG Z R, REN S. The distribution and evaluation of rural landscape in Guilin[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4): 221-225. (in Chinese)
- [14] 吕桂菊, 刘大亮. 鲁中山区乡村景观个性特质评价研究[J]. 中国园林, 2020, 36(2): 85-90.  
LÜ G J, LIU D L. Study on individual characteristics evaluation of rural landscape in Luzhong Mountains[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(2): 85-90. (in Chinese)
- [15] 唐英, 王军, 史承勇. 农业文化遗产资源型传统村落保护发展——以佳县泥河沟村为例[J]. 建筑与文化, 2016(7): 136-138.  
TANG Y, WANG J, SHI C Y. Research on the protection and development of giah resource type heritage traditional village—in the case of Hegou village in Jiaxian county[J]. Architecture & Culture, 2016(7): 136-138. (in Chinese)
- [16] 宋艳伟. 农业文化遗产保护与乡村发展——陕西佳县泥河沟村的民众参与式实践[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [17] 李晓斌, 罗雪珍, 史承勇, 等. 菌文化在乡村景观设计中的应用探讨[J]. 食用菌, 2020, 42(6): 1-3.

#### (上接第 247 页)

- [12] 肖忠平, 俞君宝, 束必清, 等. 重组竹高温处理后的性能研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 240-243, 287.  
XIAO Z P, YU J B, SHU B Q, *et al.* Performance of glued laminated bamboo after high temperature treatment [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 240-243, 287. (in Chinese)
- [13] 朱彦, 卞玉玲, 周爱萍, 等. 重组竹高温下单轴受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(9): 127-134.  
ZHU Y, BIAN Y L, ZHOU A P, *et al.* Experimental study on uniaxial compressive properties of parallel strand bamboo at high temperatures [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(9): 127-134. (in Chinese)
- [14] XU M, CUI Z, CHEN Z, *et al.* Experimental study on compressive and tensile properties of a bamboo scrimber at elevated temperatures[J]. Constr. Build. Mater., 2017, 151: 732-741.
- [15] XU M, CUI Z, TU L, *et al.* The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of laminated bamboo[J]. Constr. Build. Mater., 2019, 226: 32-43.
- [16] 靳肖贝, 李瑜瑶, 温旭雯, 等. 磷氮硼复配阻燃剂处理竹材的热降解及燃烧性能[J]. 林产工业, 2015, 42(12): 40-44.  
JIN X B, LI Y Y, WEN X W, *et al.* The thermal degradation and combustion properties of bamboo treated with P-N-R flame retardants [J]. Forest Products Industry, 2015, 42(12): 40-44. (in Chinese)
- [17] 靳肖贝, 张禄晟, 李瑜瑶, 等. 3 种阻燃剂对重组竹燃烧性能和物理力学性能的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 214-218.  
JIN X B, ZHANG L S, LI Y Y, *et al.* Effects of three flame retardants on combustion, physical and mechanical properties of bamboo scrimber [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 214-218. (in Chinese)
- [18] 王嘉辉, 袁峰, 刘子江, 等. APP-PER-MEL 阻燃剂对竹粉/PP 复合材料性能的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 212-217.  
WANG J H, YUAN F, LIU Z J, *et al.* Effect of ammonium polyphosphate-pentaerythritol-melamine flame retardant on the properties of bamboo powder/polypropylene composites [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 212-217. (in Chinese)