引用格式　李豪,马鑫茹,夏林,等. 慈竹基重组竹材物理力学性能研究[J]. 工业建筑,2025,55(2):1-9. LI H, MA X R, XIA L, et al. Research on Physical and Mechanical Properties of Bambusa emeiensis Bamboo Scrimber[J]. Industrial Construction,2025,55(2):1-9 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyjzG24083101

慈竹基重组竹材物理力学性能研究*

李　豪[1,2,3]　马鑫茹[1,2,3]　夏　林[1,2,3]　许　莉[1,2,3]　姜永泽[1,2,3]　陈　燕[1,2,3]　齐锦秋[1,2,3]

(1. 四川农业大学林学院, 成都　611130; 2. 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 成都　611130; 3. 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 成都　611130)

摘　要　为丰富重组竹物理力学性能基础数据,推广重组竹在建筑结构中的应用,制备了 5 种密度(0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 g/cm^3)、2 种组坯方式(纵向组坯和纵横组坯)的慈竹基重组竹材,依据 LY/T 3194—2020《结构用重组竹》和 GB/T 40247—2021《重组竹》测试分析其密度、耐水性、抗弯、抗压、抗拉、抗剪等 13 个物理力学性能指标。结果表明:重组竹板材实测密度与设定密度之间存在一定差异,纵向板密度偏差在-3.95%~5.89%,纵横板密度偏差在-5.80%~6.22%;纵向板各物理力学性能整体随密度增加逐渐增强,而纵横板强度随密度变化规律不明显,纵向板的吸水宽度膨胀率为 0.69%~2.73%,吸水厚度膨胀率为 3.27%~6.56%,抗弯强度为 194.5~228.2 MPa,抗弯弹性模量为 19.03~28.90 GPa,水平剪切强度为 10.8~18.5 MPa;纵横板力学强度整体上低于纵向板,但其横纹抗压、顺纹抗剪强度以及吸水宽度膨胀率高于纵向板。综合所测物理力学强度数据,建议在实际应用中使用 0.95 g/cm^3 以上的重组竹以获得更好的强度稳定性。

关键词　慈竹;重组竹;物理性质;力学性质;组坯方式

Research on Physical and Mechanical Properties of Bambusa emeiensis Bamboo Scrimber

LI Hao[1,2,3]　MA Xinru[1,2,3]　XIA Lin[1,2,3]　XU Li[1,2,3]　JIANG Yongze[1,2,3]　CHEN Yan[1,2,3]　QI Jinqiu[1,2,3]

(1. *College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu* 611130, *China*; 2. *National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River, Chengdu* 611130, *China*; 3. *Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu* 611130, *China*)

Abstract: To enrich the fundamental data on the physical and mechanical properties of bamboo scrimber and to promote its application in building structures, five densities (0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 g/cm^3) and two kinds of assembly methods (longitudinal, vertical and horizontal) of Bambusa emeiensis bamboo scrimber were prepared. According to the standards *Structural Bamboo Scrimber* (LY/T 3194—2020) and *Bamboo Scrimber* (GB/T 40247—2021), the study evaluated 13 properties, including density, water resistance, bending resistance, compressive strength, tensile strength, and shear resistance. The results revealed that the measured density varied from the set density in different areas of the bamboo scrimber board. The density deviation of the longitudinal plates was from -3.95% to 5.89%, and the density deviation of the vertical and horizontal plates was from -5.80% to 6.22%. As the density increased, the overall physical and mechanical properties of longitudinal plates improved, although the strength of vertical and horizontal plates did not vary significantly with density. For the longitudinal plates, the water absorption

* 四川省科技计划项目(2023YFS0393)。

第一作者:李豪,硕士研究生,1813858636@qq.com。

通信作者:齐锦秋,教授,博士,主要从事竹基复合材料研究,1092477321@qq.com。

收稿日期:2024-08-31

© 2025 工业建筑

width expansion rate ranged from 0.69% to 2.73%, and the water absorption thickness expansion ratio ranged from 3.27% to 6.56%. The bending strength was between 194.5 MPa and 228.2 MPa, the bending modulus of elasticity ranged from 19.03 GPa to 28.90 GPa, and the horizontal shear strength ranged from 10.8 MPa to 18.5 MPa. The mechanical strength of the vertical and horizontal plates was generally lower than that of the longitudinal plates, while transverse compressive strength, shearing strength parallel to grain and widths welling were higher than those of the longitudinal plates. Based on the measured physical and mechanical strength data, it was recommended to use bamboo scrimber with a density greater than 0.95 g/cm^3 to achieve better strength stability in practical applications.

Keywords: bambusa emeiensis; bamboo scrimber; physical properties; mechanical properties; assembly method

0　引　言

中国是竹资源最丰富、竹产品生产历史最悠久的国家。全国竹林面积达 641.16 万 hm^2[1],2022 年全国竹产业总产值达 4 100 多亿元[2]。合理开发和利用竹资源,实现“以竹代木”[3],既是解决木材供求矛盾、减少塑料污染的有效方法,也是发展循环经济、节约资源的重要途径。慈竹(Bambusa emeiensis)属禾本科簕竹属,主要分布于四川、重庆、贵州等地区,是四川省第一大丛生竹种,约占竹林面积的 50%,广泛应用于制浆造纸、木竹家具、人造板材等领域[4]。

重组竹是指以竹束或纤维化单板为结构单元,按顺纹组坯,通过冷压或热压方式制备而成的竹材人造板,提高了竹材利用率,其凭借优良的产品性能,现已成为竹材工业化利用的代表性产品之一[5]。重组竹的发展经历了三个阶段[6],20 世纪 90 年代,一些企业采用竹加工剩余物以及经去青、去黄的竹束制备重组竹,这个时期的重组竹生产效率和竹材利用率较低。21 世纪初,“冷压热固化法”和“热压法”两种重组竹的胶合成型工艺以及相应的成型机械问世,重组竹实现了工业化生产。到 2010 年左右,中国林科院木材工业研究所联合其他有关单位成功研制出多功能纤维化竹单板疏解机,解决了重组竹生产中竹青竹黄难以去除影响胶合性能以及小径级竹材难以加工利用等问题。

重组竹的物理力学性能是重组竹利用过程中最重要的性能指标之一,其主要受基材竹种、密度、胶合性能、施工工艺等方面影响。慈竹基重组竹相较于毛竹等其他竹材基重组竹材,其弹性模量、抗压强度、抗拉强度等力学性能更优[7]。密度是影响重组竹物理力学性能的重要参数,随着密度增加,重组竹力学性能和耐水性能增强[8]。Yu 等[9]研究表明浸胶量 16%、密度 1.30 g/cm^3 的重组竹吸水厚度膨胀率和吸水宽度膨胀率分别为 2.09%和 0.78%、弯曲强度和弹性模量分别为 310.0 MPa 和 29.7 GPa、水平剪切强度为 28.2 MPa。铺装工艺也会影响重组竹物理力学性能。

重组竹具有优良的物理力学性能、绿色环保等优点,应用领域已包括重组竹家具、重组竹内墙装饰等室内场景,也包括景观建筑等公共场所[10]。但在建筑结构领域尚处于起步阶段,重组竹物理力学的基础数据不尽完善,缺乏相关建筑标准。此外,重组竹的材性研究多集中于实验室小型热压机制备的板材(幅面尺寸小于 50 cm×50 cm),而重组竹各部位材性变异性大,对于企业生产的大尺寸板材材性变异程度评判不足。综上,为丰富重组竹物理力学性能基础数据,推广重组竹在建筑结构中的应用,本研究以慈竹基重组竹材为研究对象,采用 5 种密度、2 种组坯方式的慈竹基重组竹材分析其各物理力学性能指标,以期为重组竹在建筑结构中的应用提供参考。

1　材料与方法

1.1　采样地概况

本试验所用慈竹采样自雅安市雨城区周公山(29°57′41″~29°58′22″N,103°01′01″~103°01′48″E)。周公山位于雅安市南部,最高海拔 1 742.6 m,呈南北走向。气候属亚热带湿润季风气候类型,年平均降水量 1 774.3 mm,年平均气温 16.2 ℃。该区域内有水竹(Phyllostachys heteroclada)、刚竹(Phyllostachys sulphurea)、慈竹(Bambusa emeiensis)等竹种。

1.2　试验材料及设备

试验选用的慈竹(Bambusa emeiensis)为 2~3 年生,竹秆平均高度 13.5 m,竹秆平均胸径 6.5 cm,竹壁平均厚度 4.5 mm。胶黏剂选用酚醛树脂胶黏剂,其固含量为 52%,pH 值为 11.2,黏度为

41 MPa·s(25 ℃)。

试验设备包括数控自动剖竹机、竹材展平粗铣疏解机、连续干燥机、热压机、万能力学试验机、砂光机等。

1.3　试验方法

1.3.1　重组竹制备

重组竹制备工艺流程(图 1)为原竹→剖分→疏解→干燥→浸胶→二次干燥→组坯→热压成型→裁边砂光。

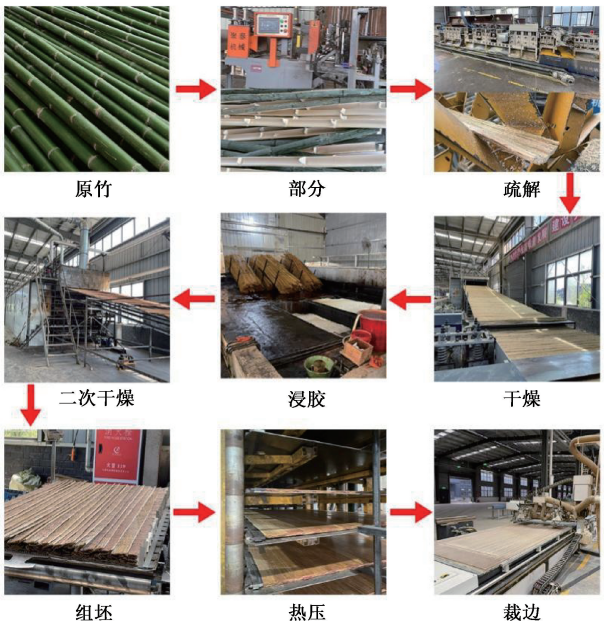


图 1　重组竹制备流程

Fig. 1　Bamboo scrimber manufacturing and preparation process flowchart

1)单元制备。将慈竹锯截成 2.5 m 长的竹筒,经剖竹机剖分成 4~5 cm 宽的竹片。再经竹材疏解机将慈竹竹片疏解成竹束,并去除竹青竹黄。

2)浸胶。将干燥至含水率为 6%~8%的竹束放入浸胶池浸胶,浸胶量 15%左右,浸胶时长约 30 min。然后在 70 ℃条件下干燥至含水率低于 8%。

3)组坯。竹束按纵向组坯和纵横组坯,对称铺装,竹青面朝外,竹黄面向内。纵向组坯:即重组竹组坯时全部竹束以顺纹方向(竹材纤维走向)沿板材长度方向铺装的组坯方式(图 2(a));纵横组坯:即组坯时按相邻层竹束纤维相互垂直组坯,其中表层竹束以顺纹方向沿板材长度方向铺装的组坯方式(图 2(b))。

4)热压。本试验采用“冷进冷出”工艺制备重组竹,即经组坯后的板坯直接放入热压机热压,热压成型后,待重组竹冷却再取出。热压温度 150 ℃,热压压力 3~5 MPa,热压时长按 1 min/mm 计算,冷水循环降温至 50 ℃以下时卸压。

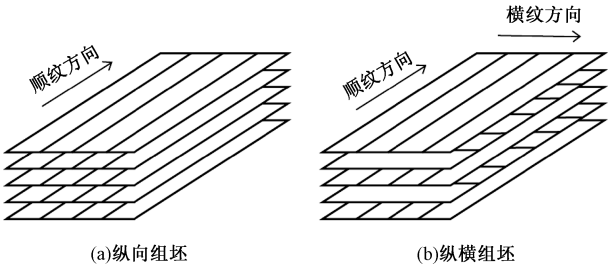


图 2　重组竹组坯方式

Fig. 2　Bamboo scrimber assembly method

1.3.2　性能测定

1)物理性质。参照 LY/T 3194—2020《结构用重组竹》测定重组竹密度(所测密度均为气干密度)以及室外用重组竹和室内用重组竹的吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率。

2)力学性质。参照 LY/T 3194—2020 测定重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量、顺纹抗拉强度、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度、横纹局部抗压强度、横纹全部抗压强度。参照 GB/T 40247—2021《重组竹》测定重组竹水平剪切强度(垂直加载)。

3)取样方法。如图 3 所示,将板面幅度为 1 200 mm×2 400 mm 的重组竹板材划分为 9 个区域,每个区域长 800 mm,宽 400 mm。每个区域内按相应标准锯切测定所需尺寸的试件,每个测试指标取 4 个试件。

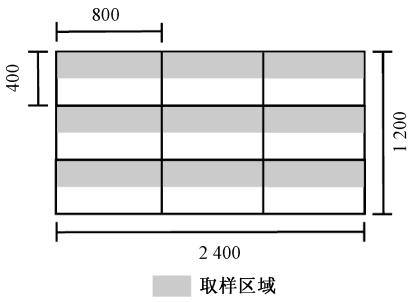


图 3　试件取样区域　mm

Fig. 3　Specimen sampling areas

试验采用的慈竹基重组竹的设定密度分别为 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 g/cm^3,每个密度的板材包括纵向组坯和纵横组坯 2 种组坯方式,每种组坯方式分别制备 2 块重组竹板材,共计 20 块重组竹板材。各板材分别按照图 3 所示位置取样,每个测试指标总计 720 个试件。

2　结果与分析

2.1　物理性能分析

2.1.1　密度

密度是衡量重组竹力学性能强弱的重要指标,重组竹各力学性能与密度呈正相关[11]。由图 4 可知,板材实测密度值与设定密度之间存在一定偏差,纵向组坯的重组竹板材(简称纵向板)的密度偏差在-3.95%~5.89%,纵横组坯的重组竹板材(简称纵横板)的密度偏差在-5.80%~6.22%。

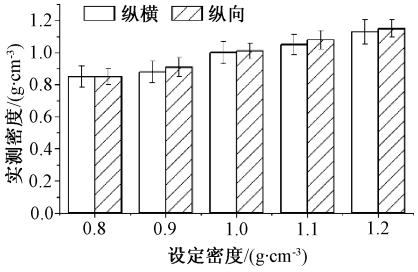
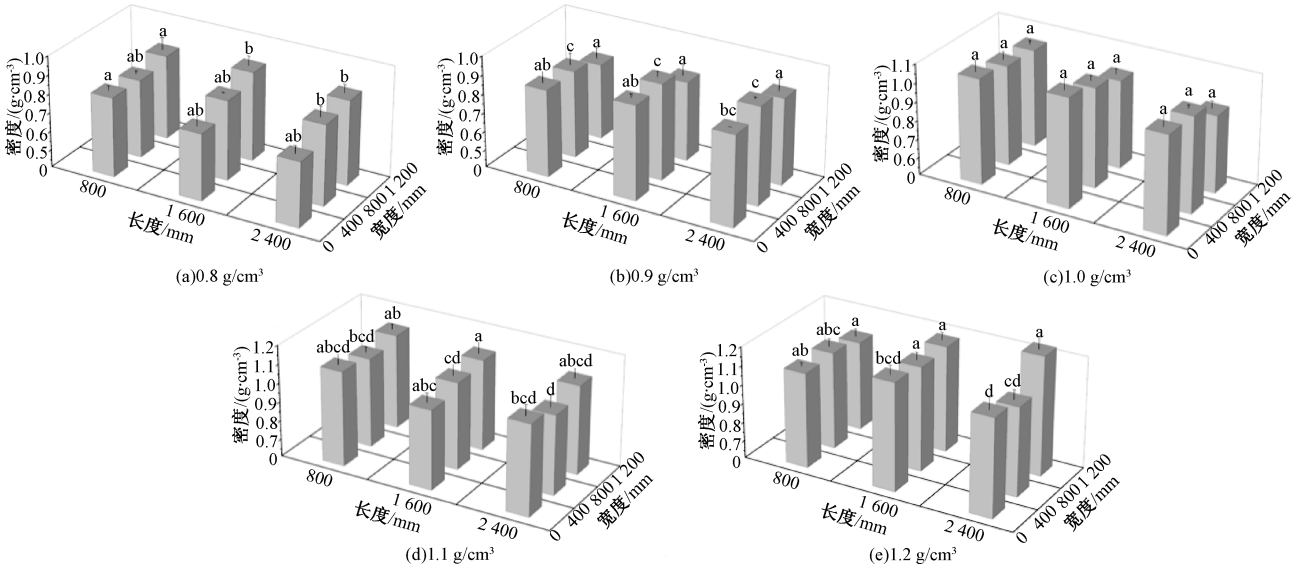


图 4　重组竹密度测定值

Fig. 4　Bamboo scrimber density measurement

重组竹板材的密度均匀稳定性对于重组竹的力学性能研究和推广利用具有重要意义。纵向板不同区域实测密度如图 5 所示,横纵坐标表示板材长度和宽度,竖坐标为实测密度。由图可知,0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 g/cm³ 的重组竹各区域实测密度分别在 0.79~0.90、0.81~0.96、0.98~1.06、0.99~1.11、1.11~1.23 g/cm³ 之间。经方差分析,0.8、1.0 和 1.1 g/cm³ 的重组竹各区域实测密度整体差异不显著($P>0.05$),0.9、1.2 g/cm³ 的重组竹各区域实测密度整体差异显著($P<0.05$)。纵横板不同区域实测密度如图 6 所示,0.9 g/cm³ 的重组竹密度在 0.81~0.93 g/cm³ 之间,1.2 g/cm³ 的重组竹密度 1.08~1.24 g/cm³ 之间,经方差分析,2 个密度的重组竹各区域实测密度整体差异显著($P<0.05$)。0.8、1.0、1.1 g/cm³ 的重组竹各区域实测密度整体差异不显著($P>0.05$)。这是由于竹材为各项异性材料,竹秆各部位密度变异大,导致经组坯热压后的重组竹各区域内密度存在差异。首先,自竹秆基部起,竹材基本密度随竹秆高度的增加而增大,基材密度的差异对重组竹各区域密度的影响不可避免。其



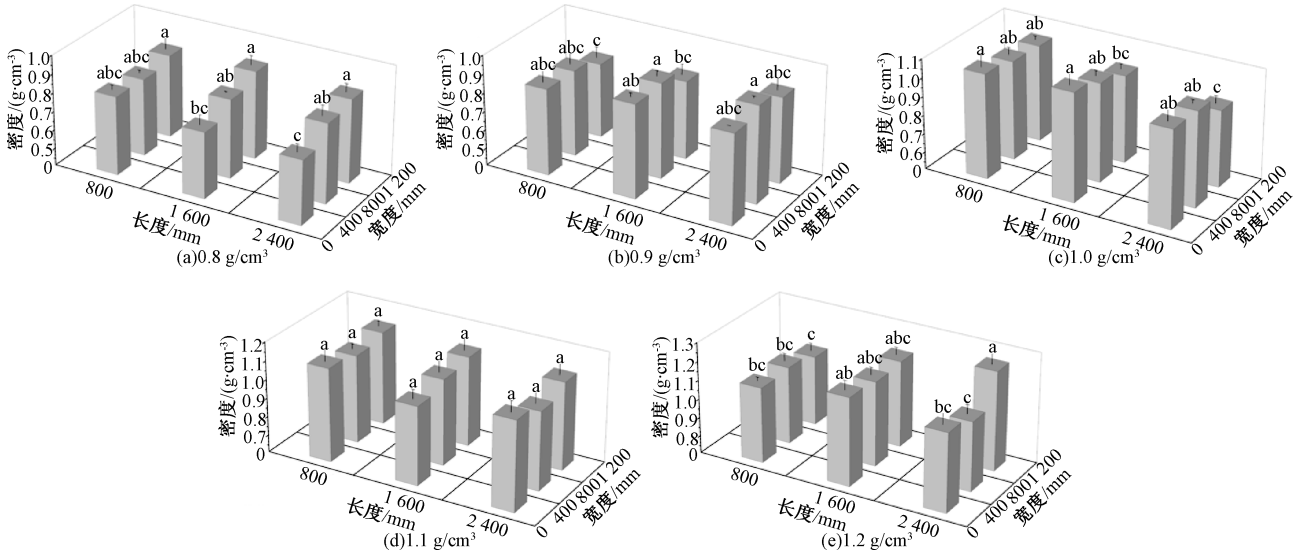
注:图内字母相同者表示数据的差异不显著。

图 5　纵向板实测密度

Fig. 5　Measured densities of longitudinal plates

次,竹壁厚度随竹秆高度的增加而减小,在组坯过程中,由于竹束铺装层数一定,竹壁间的厚度差异会导致不同区域密度偏差。另外,竹秆直径随高度的增加逐渐减小,经剖分后的竹片两端宽度不等,因此,在铺装时采用宽边与窄边交替平铺("大头对小头")的方式来减小竹材尖削度对重组竹各区域密度的影响[12]。此外,竹材中竹节密度大于节间密度,亦引起板材内各区域的密度偏差[13]。

综上,由于材料的各向异性,两种组坯方式的板材各区域内密度具有一定差异性。因此,在应用上,应注意重组竹因密度偏差而带来的物理力学强度的差异。为方便研究重组竹物理力学性能,现按重组竹各区域内实测密度将重组竹密度划分为 5 个密度区间,分别为 0.75~0.85、0.85~0.95、0.95~1.05、



注:图内字母相同者表示数据差异不显著。

图 6　纵横板实测密度

Fig. 6　Measured densities of vertical and horizontal plates

1.05~1.15 和 1.15~1.25 g/cm³,耐水性及各力学性质按密度区间统计分析。

2.1.2　耐水性

耐水性能够反应材料的尺寸稳定性,是重组竹板材最重要的物理性能指标之一。重组竹使用范围广泛,根据使用环境不同,分为用于干燥环境的室内用重组竹和用于潮湿环境的室外用重组竹。不同密度区间的室内用重组竹的吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率如图 7 所示,试验条件为 63 ℃水中浸泡 24 h。可知,随着密度增加,吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率逐渐降低。从 0.75~0.85 g/cm³ 区间到 1.15~1.25 g/cm³ 区间,纵向板的吸水宽度膨胀率从 2.32%下降到 0.58%,纵横板的吸水宽度膨胀率从 0.73%下降到 0.24%;纵向板的吸水厚度膨胀率从 5.13%下降到 2.60%,纵横板的吸水厚度膨胀率从 4.31%下降到 3.94%。

不同密度区间的室外用重组竹的吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率如图 8 所示,试验方法采用 28 h 循环(沸水—干燥—沸水)试验,较室内用重组竹试验条件更为严苛。由图可知,与室内用重组竹板材类似,随着密度增加,吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率逐渐降低。从 0.75~0.85 g/cm³ 区间到 1.15~1.25 g/cm³ 区间,纵向板的吸水宽度膨胀率从 2.73%下降到 0.69%,下降幅度达 74.7%,纵横板的吸水宽度膨胀率从 0.67%下降到 0.40%,下降幅度达 40.3%;纵向板吸水厚度膨胀率从 6.56%下降到 3.27%,下降幅度为 50.2%。本研究中室内用和室外用重组竹耐水性均满足 LY/T 3194—2020 的相关规定,而相较于室内用重组竹,室外用重组竹吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率更高。与顺纹组坯的梁山慈竹重组竹[14]相比,其吸水宽度膨胀率相当(3.49%~0.52%),而吸水厚度膨胀率优于梁山慈竹重组竹(9.45%~5.91%)。室外用纵向板和纵横

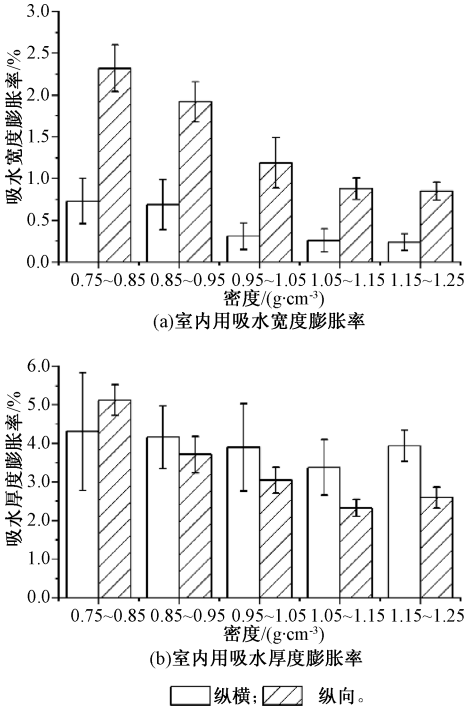


图 7　室内用重组竹的耐水性

Fig. 7　Water resistance of indoor bamboo scrimber

板的吸水宽度膨胀率整体上比室内用板材的吸水宽度膨胀率分别高 7.8%和 19.4%,吸水厚度膨胀率分别高 36.0%和 52.6%。

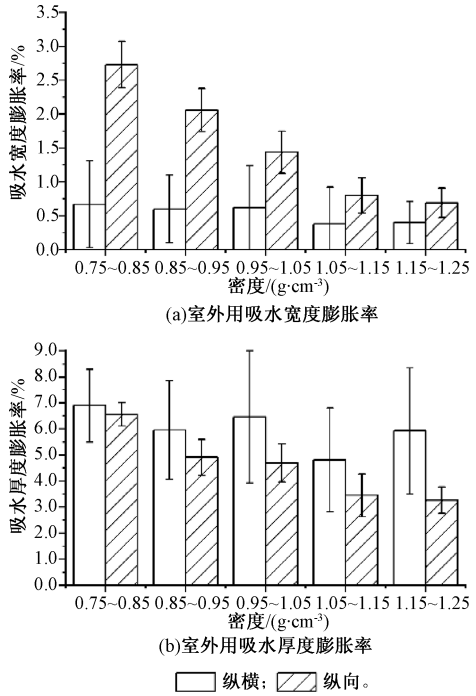


图 8　室外用重组竹的耐水性

Fig. 8　Water resistance of outdoor bamboo scrimber

重组竹的吸水宽度膨胀和吸水厚度膨胀是基材细胞壁吸水膨胀、细胞形态恢复以及胶黏剂憎水性能综合作用的结果。重组竹由竹材热压胶合而来,其基材细胞壁具有大量羟基、羧基等亲水性基团,易吸湿膨胀,酚醛树脂胶黏剂覆盖在基材表面,阻碍水分的移动,降低吸水膨胀率[15]。随着密度的增加,细胞逐渐被压缩密实,胶合面积增大,水分传输的通道减少,此外,更多的细胞被压溃,失去形变恢复能力,使吸水宽度膨胀率和吸水厚度膨胀率逐渐降低。重组竹板材的吸水宽度膨胀率低于吸水宽度膨胀率,这是由于在重组竹热压过程中,细胞受到沿厚度方向的平板压力,产生弹性变形,而在宽度方向上受到模具支撑力,压缩率低,其弹性变形更小[16]。纵横板的吸水宽度膨胀率低于纵向板,可能是纵横板测试吸水厚度膨胀率时,横纹竹束为其顺纹方向膨胀率,而纤维顺纹膨胀率低于纤维横向膨胀率所致。

2.2　力学性能分析

2.2.1　抗弯强度和抗弯弹性模量

不同密度区间的重组竹试件的抗弯强度如图 9(a)所示,纵向板的抗弯强度随密度增加而上升。在 0.75~0.85 g/cm³ 区间的抗弯强度为 194.5 MPa,1.15~1.25 g/cm³ 区间的抗弯强度为 228.2 MPa,总增幅为 17.3%。重组竹密度与抗弯强度的关系密不可分,随着密度的增加重组竹内部空隙因不断压缩而逐渐减小,单位体积内纤维含量增加[14];同时竹材细胞壁之间接触面积逐渐增加,有效胶合面积增大,胶合强度也随之增强[17],因此,抗弯强度逐渐增加。

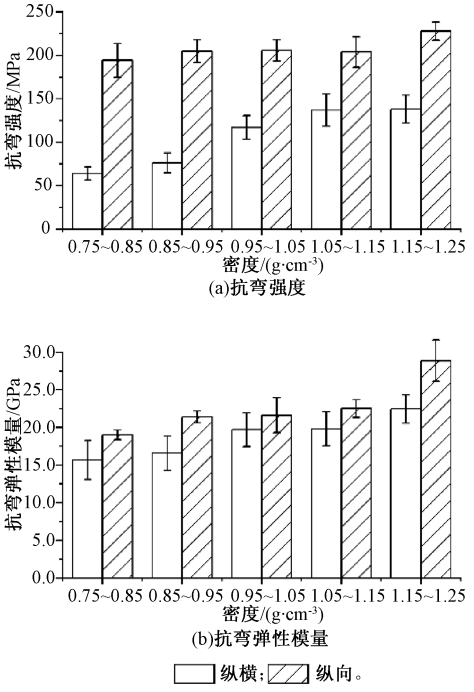


图 9　重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量

Fig. 9　Bending strengths and modulus of elasticity in bending of bamboo scrimber

在纵横组坯时,抗弯强度的增加也与密度呈现正相关。0.75~0.85 g/cm³ 区间的抗弯强度为 64.0 MPa,0.85~0.95 g/cm³ 区间的抗弯强度为 76.4 MPa。0.95~1.05、1.05~1.15 g/cm³ 区间的分别为 117.3、137.2 MPa,分别较上一区间增加 53.5%和 17.0%。1.15~1.25 g/cm³ 区间的抗弯强度为 138.4 MPa,小幅度上升。在抗弯强度测试中,试件上表层承受压应力,下表层承受拉应力,主要为竹纤维承力。纵向板全部为纤维承力,而纵横板的横纹竹束主要受力于胶黏剂和胶合界面,由于胶层强度低于纤维强度,因此纵向板的抗弯强度大于纵横板。

由图 9(b)可知,重组竹抗弯弹性模量也随着密度增加而逐渐增大,与苏光荣等[11]研究结果一致。纵向组坯时,0.75~0.85 g/cm³ 区间的抗弯弹性模

量为 19.03 GPa,1.15~1.25 g/cm³ 区间的抗弯弹性模量为 28.90 GPa,整体上升了 51.9%。纵横组坯时,0.75~0.85 g/cm³ 区间的抗弯弹性模量为 15.68 GPa,1.15~1.25 g/cm³ 区间的抗弯弹性模量为 22.47 GPa,整体上升了 43.3%。与板面为 300 mm×50 mm 的顺纹组坯的慈竹重组竹小板材[8]相比,本研究的抗弯强度更低,抗弯弹性模量相差不大。这种差异是由于小板材为实验室精细化试验,材料也可能存在优选情况,而大幅面板材为企业压制,其更符合重组竹实际应用场景。

2.2.2　顺纹抗拉强度

不同密度区间的重组竹试件的顺纹抗拉强度如图 10 所示。可知,纵向组坯时,重组竹抗弯强度随密度增加而上升。从 0.75~0.85 g/cm³ 区间到 1.15~1.25 g/cm³ 区间,重组竹顺纹抗拉强度为由 143.1 MPa 上升到 229.7 MPa,总增幅为 61.5%。在顺纹抗拉强度的测试中,试件主要由纤维的顺纹方向承受拉应力,随着密度的增加,重组竹内空隙率逐渐降低,单位体积内纤维含量以及胶合强度逐渐增加,因此,顺纹抗拉强度随密度增大而增大。同密度的慈竹重组竹和毛竹重组竹相比较,顺纹抗拉强度表现为慈竹重组竹高于毛竹重组竹[18-19]。

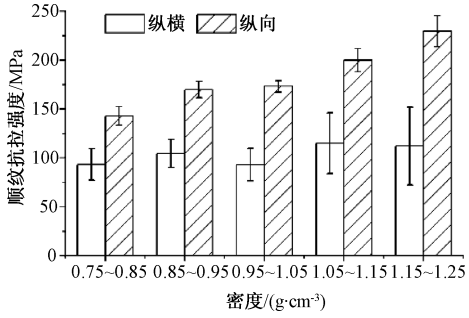


图 10　重组竹的顺纹抗拉强度

Fig. 10　Tensile strengths parallel to grain of bamboo scrimber

对于纵横组坯试件,从 0.75~0.85 g/cm³ 区间到 1.15~1.25 g/cm³ 区间,重组竹顺纹抗拉强度分别为 93.4、104.7、93.2、115.2、112.2 MPa,总体呈上升趋势,总体增幅为 20.1%,其整体变化趋势与纵向板一致,而变化幅度小于纵向板。纵向板的顺纹抗拉强度大于纵横板,这是由于纵横板中横纹方向纤维的受力类型为横纹拉伸,而纤维的横纹抗拉强度远低于顺纹抗拉强度[20]。在 0.95~1.05 g/cm³ 区间,其顺纹抗拉强度偏低,可能是制板时 1.0 g/cm³ 板材的横纹方向竹束比例高于顺纹方向竹束所致。

2.2.3　抗压强度

不同密度区间的重组竹试件的顺纹抗压强度如图 11 所示。可知,纵向组坯时,随着密度的增大,试件的顺纹抗压强度变化未见明显规律,0.95~1.05 g/cm³ 区间有最大顺纹抗压强度 114.8 MPa,1.05~1.15 g/cm³ 区间顺纹抗压强度最小,为 95.5 MPa。重组竹为各项异性材料,其性能与慈竹材性和加工工艺密切相关,竹材具有竹节部与竹间部,节部材与节间材强度差异大[13]。在纵横组坯时,从 0.75~0.85 g/cm³ 区间到 1.05~1.15 g/cm³ 区间,重组竹顺纹抗压强度分别为 69.8、72.7、71.1、73.8 MPa,呈上升趋势,增幅为 5.7%。整体顺纹抗压强度与密度呈正相关。纵向板顺纹受压时载荷全部由纤维承受,纵横板横纹纤维方向与载荷方向垂直,可能是纤维横纹承压强度低于顺纹受压,因此纵横板顺纹抗压强度偏低,这与上官蔚蔚[21]研究结果一致。

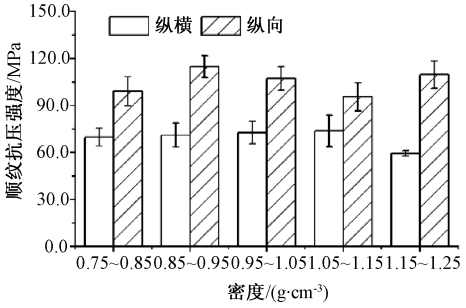


图 11　重组竹的顺纹抗压强度

Fig. 11　Ultimate stresses in compression parallel to grain of bamboo scrimber

不同密度区间的重组竹横纹局部抗压强度如图 12(a)所示。可知,纵向组坯时,从 0.75~0.85 g/cm³ 区间到 1.15~1.25 g/cm³ 区间,其横纹局部抗压强度随密度变化逐渐上升,强度值从 23.5 MPa 上升到 42.6 MPa,增幅为 81.3%。纵横组坯时,横纹局部抗压强度变化规律不明显,这与重组竹各项异性的特点密不可分。不同密度区间重组竹的横纹全部抗压强度如图 12(b)所示,与横纹全部抗压强度情况类似,纵向组坯时,横纹全部抗压强度随密度增加而增大,最大值为 37.4 MPa。横纹局部抗压在测试时,加压板两侧的纤维承受拉伸和剪切力,当载荷持续增加,加压板陷入试件,而试件未受压的端部会突出,试件突出的部分增加了直接载荷下的强度[22]。因此,横纹局部抗压强度大于横纹全部抗压强度。

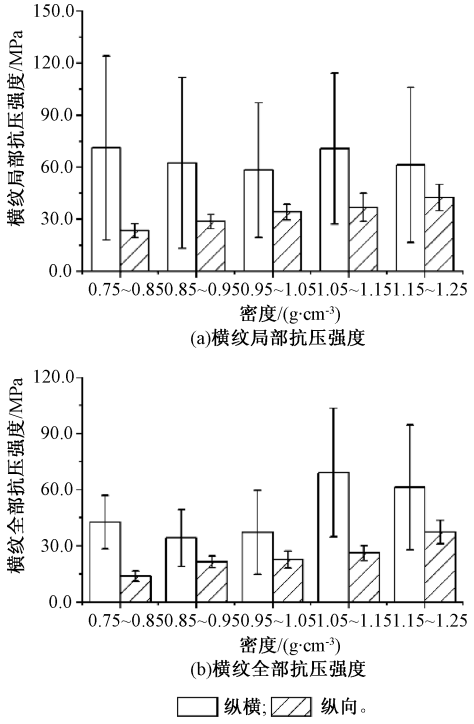


图 12　重组竹的横纹抗压强度

Fig. 12　Transverse compressive strengths of bamboo scrimber

综上,三种抗压强度均随密度的增加而增大,且顺纹抗压强度>横纹局部抗压强度>横纹全部抗压强度。

2.2.4　剪切强度

1)顺纹抗剪强度。

不同密度区间的重组竹试件顺纹抗剪强度如图 13 所示。可知,纵向组坯时,随着密度的增大,重组竹试件顺纹抗剪强度从 8.4 MPa 上升到 17.5 MPa,呈现逐渐上升的趋势,总增幅达 108.3%。重组竹顺纹抗剪强度在各力学强度中最小,这是由于竹材节间的细胞全部严格纵向排列,缺少像木材那样的径向分布的射线薄壁细胞来提供强度支撑。纵横组坯时,从 0.75~0.85 g/cm^3 区间到 0.95~1.05 g/cm^3 区间,其顺纹抗剪强度分别为 12.1、15.0、15.6 MPa,呈上升趋势。在低密度区间,纵横板的顺纹抗剪强度高于纵向板,这是由于纵横板对纤维横向的剪切力提供了额外的强度;在高密度区间,由于破坏总是出现在强度最薄弱的部位,且测试时记录瞬时破坏,纵横板额外的横向剪切力优势不明显,因此纵向板强度接近或高于纵横板。

2)水平剪切强度。

不同密度区间重组竹的水平剪切强度如图 14 所示。由图可知,纵向组坯时,从 0.75~0.85 g/cm^3 区间到 1.15~1.25 g/cm^3 区间,其水平剪切强度由 10.8 MPa 上升到 18.5 MPa,总增幅为 71.3%,整体平均值为 14.7 MPa,低于梁山慈竹重组竹[14],优于硬头黄竹重组竹[23]。随着密度增加,细胞压缩率增加,有效胶接面积增加,胶合性能增强,水平剪切强度增加。纵横组坯时,其水平剪切强度整体随密度变化不大,平均为 11 MPa。纵向板的水平剪切强度整体大于纵横板,这可能是纵横板各层间相互垂直,相较顺纹排列纤维间的胶合强度更低。

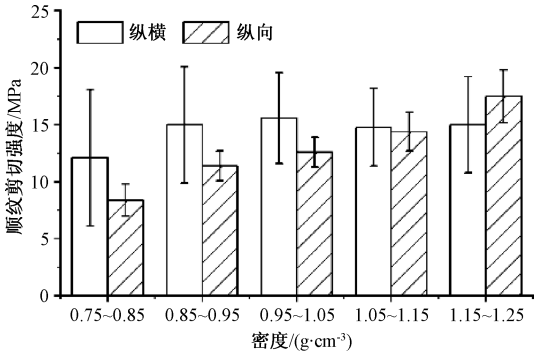


图 13　重组竹的顺纹抗剪强度

Fig. 13　Shearing strengths parallel to grain of bamboo scrimber

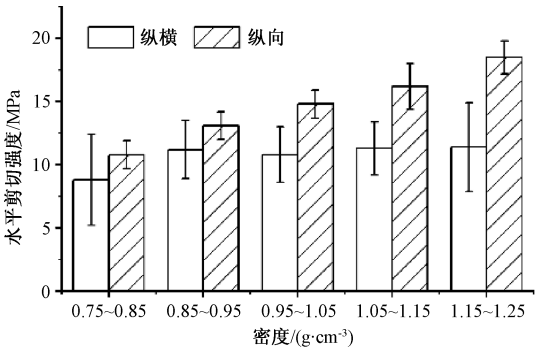


图 14　重组竹的水平剪切强度

Fig. 14　Horizontal shear strength of bamboo scrimber

3　结　论

研究制备了 5 种密度、2 种组坯方式的慈竹基重组竹板材,分析其各项物理力学性能,结论如下:

1)重组竹各物理力学性能整体上满足 LY/T 3194—2020《结构用重组竹》和 GB/T 40247—2021《重组竹》的相关规定要求,且随着密度增加,各物理力学性能逐渐增强。抗弯强度达 228.2 MPa,抗弯弹性模量达 28.90 GPa,顺纹抗拉强度达 229.7 MPa,顺纹抗压强度达 114.8 MPa,水平剪切强度达 17.5 MPa。

2)组坯方式对重组竹各物理力学性能存在一

定影响。纵横板由于各层竹束纤维相互垂直排列，其物理力学性能较纵向板更为复杂。纵横板强度随密度变化规律不明显，纵横板的抗弯强度、抗弯弹性模量、抗拉强度、顺纹抗压强度、水平剪切强度整体上低于纵向板。

3)重组竹板材不同区域实测密度与设定密度之间存在一定差异。在应用上，应注意重组竹在大幅面板材上密度偏差对物理力学强度的影响。低密度重组竹与基材竹束密度(0.8~0.85 g/cm^3)相近，板材制备中所需压力相对较低，局部存在层间胶合不良的状况。虽然低密度重组竹能满足相关标准的强度要求，但在实际应用中，建议使用 0.95 g/cm^3 以上的重组竹以获得更好的强度稳定性。

参　考　文　献

[1] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告[M]. 北京：中国林业出版社，2019.

[2] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴 2022[M]. 北京：中国林业出版社，2023.

[3] 国家发展改革委，工业和信息化部，财政部，等. 国家发展改革委等部门关于印发《加快“以竹代塑”发展三年行动计划》的通知[EB/OL]. (2023-10-12)[2024-08-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6913316.htm.

[4] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第九卷第一分册[M]. 北京：科学出版社，1996.

[5] HUANG Y, JI Y, YU W. Development of bamboo scrimber: a literature review[J]. Journal of Wood Science, 2019, 65(1), 25.

[6] 于文吉. 我国重组竹产业发展现状与机遇[J]. 世界竹藤通讯，2019，17(3)：1-4.

[7] 赵仕兴，周巧玲，齐锦秋，等. 重组竹结构的研究现状与工程应用[J]. 建筑结构，2023，53(7)：109-117.

[8] 许杨，刘倩，孙子健，等. 高密度重组竹的物理力学性能研究[J]. 林产工业，2024，61(6)：20-26.

[9] YU Y, LIU R, HUANG Y, et al. Preparation, physical, mechanical, and interfacial morphological properties of engineered bamboo scrimber[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 1032-1039.

[10] 齐越，吴江源，任丁华，等. 重组竹制造与应用技术研究进展[J]. 林业科学，2023，59(6)：159-168.

[11] 苏光荣，李贤军，胡嘉裕，等. 重组竹尺寸稳定性及力学特性[J]. 中南林业科技大学学报，2022，42(2)：159-168.

[12] 谢九龙，齐锦秋，黄兴彦，等. 生长发育进程中慈竹秆形结构及物理力学性质[J]. 四川农业大学学报，2012，30(1)：46-49，81.

[13] 齐锦秋，于文吉，余养伦，等. 竹节对竹基纤维复合材料性能的影响[J]. 木材工业，2012，26(6)：1-3.

[14] 齐锦秋，于文吉，黄兴彦，等. 梁山慈竹重组竹材密度对其微观形态及性能的影响[J]. 木材工业，2013，27(6)：25-28.

[15] 郝秀. 竹基纤维复合材料重组单元制备机理与力学性能增强机制[D]. 哈尔滨：东北林业大学，2024.

[16] 魏金光. 高密度竹基纤维复合材料的性能及其胶合成型机理研究[D]. 北京：中国林业科学研究院，2022.

[17] WU J, HUANG Y, HU J, et al. Effects of density and resin content on the rebonding performance of bamboo scrimber composite [J]. Construction and Building Materials, 2023, 400, 132848.

[18] KUMAR A, VLACH T, LAIBLOVA L, et al. Engineered bamboo scrimber: influence of density on the mechanical and water absorption properties[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 815-827.

[19] 盛叶，黄庚浪，叶小凡，等. 密度和含水率对重组竹顺纹抗拉强度的影响[J]. 林业科学，2024,10(10)：110-121.

[20] ZHANG K, HOU Y, LU Y, et al. Experimental study on the fracture toughness of bamboo scrimber[J]. Materials, 2023, 16 (13), 4880.

[21] 上官蔚蔚. 重组竹物理力学性质基础研究[D]. 北京：中国林业科学研究院，2015.

[22] 徐有明. 木材学[M]. 第 2 版. 北京：中国林业出版社，2019.

[23] 秦柏东. 硬头黄竹重组材制备工艺及性能研究[D]. 雅安：四川农业大学，2017.