

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025146

冻融循环处理对重组竹抗压弹性模量 与抗压强度的影响

邸静¹, 伍锴杰¹, 郭楠¹, 梅力丹^{2,3}, 吕佳峰⁴, 邱明桃^{3,4},
罗晓英⁵, 王桐^{3,6}

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福建福州 350002; 2. 三江学院土木工程学院, 江苏南京 210012;
3. 东北林业大学交通与土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 4. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
5. 重庆工商大学, 重庆 400067; 6. 东北石油大学土木工程学院, 黑龙江大庆 163319)



摘要: 重组竹凭借优异的力学性能, 其应用领域逐渐扩展到建筑结构行业。作为结构材料, 重组竹在冻融环境下的性能劣化机制尚不明确。研究对比分析重组竹试件经过0、20、40和60次冻融循环(−20℃冷冻8h、20℃水中浸泡8h为一次循环)处理后, 顺纹加载、横纹加载I(加载方向垂直于胶层)和横纹加载II(加载方向平行于胶层)下试件的破坏模式、抗压弹性模量和抗压强度。结果表明, 冻融循环处理并未改变重组竹试件的破坏模式类型, 但各种破坏模式的占比发生变化, 其中胶层开裂的比例随着冻融循环次数由0次增加至60次显著增加(从30%到64%); 不同加载方向测试重组竹试件的抗压弹性模量和抗压强度均随冻融循环次数增加而降低, 其中横纹加载II方向测试试件的降幅分别为38.3%和35.2%。基于试验数据统计分析确定重组竹材料抗压强度的设计特征值(0.05分位数), 并建立抗压性能随冻融循环次数变化的衰减模型($R^2 > 0.95$), 为重组竹材料在严寒地区应用的可靠度设计提供数据支撑。

关键词: 重组竹; 冻融循环处理; 破坏模式; 抗压弹性模量; 抗压强度; 衰减模型

中图分类号: TS653

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694(2026)02-0042-07

Effect of Cyclic Freeze-Thaw Treatment on the Elastic Modulus and Strength of Bamboo Scrimber under Compression

DI Jing¹, WU Kaijie¹, GUO Nan¹, MEI Lidan^{2,3}, LYU Jiafeng⁴, WU Mingtao^{3,4},
LUO Xiaoying⁵, WANG Tong^{3,6}

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. College of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, Jiangsu, China;
3. College of Transportation and Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
4. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
5. Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
6. College of Civil Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

收稿日期: 2025-12-24; 修改日期: 2026-01-25

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目“内置钢筋重组竹梁柱-混凝土节点受力机理及抗震性能研究”(2025J01593); 福建省交通运输科技项目“内置槽钢重组竹公路护栏受力性能研究”(LS202304)。

作者简介: 邸静(1993—), 女, 讲师。Email: dijjob@163.com

通讯作者: 郭楠, 男, 教授。Email: snowguonan@163.com

Abstract: Bamboo scrimber (BS), due to its excellent mechanical properties, has been increasingly utilized in the construction industry. However, as a structural material, the degradation mechanism of BS under cyclic freeze-thaw treatment is not yet clear. This study investigated the failure modes, elastic modulus, and compressive strength of BS specimens subjected to 0, 20, 40, and 60 freeze-thaw (F-T) cycles (each cycle comprising freezing at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 8 hours followed by thawing in water at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 8 hours) under three loading directions, i. e., parallel-to-grain loading, perpendicular to grain I loading (perpendicular to the glue layer), and perpendicular to grain II loading (parallel to the glue layer). The results indicated that while F-T cycling did not change the failure modes type of the specimens, it significantly altered the proportions of different failure modes. Notably, the proportion of glue layer cracking increased remarkably with increasing F-T cycles from 0 to 60 (from 30% to 64%). Both elastic modulus and compressive strength decreased with an increasing number of F-T cycles across all loading directions, with a decrease of 38.3% and 35.2% in the perpendicular to grain II direction, respectively. Finally, the design characteristic value (0.05 quantile) of the compressive strength of BS was determined based on the statistical analysis of experimental data, and an attenuation model ($R^2 > 0.95$) of compressive performance with varying numbers of freeze-thaw cycles was established to provide data support for the reliability design of BS structures in cold regions.

Key words: bamboo scrimber; cyclic freeze-thaw treatment; failure modes; elastic modulus; compressive strength; degradation model

重组竹具有可再生和高强度等特性^[1-2], 其应用领域从装饰材料拓展至建筑结构材料, 被誉为“双碳”背景下具有应用潜力的绿色结构材料。重组竹各向异性显著, 受力加载方向显著影响其破坏特征和力学响应^[3-4]。重组竹在制造过程中受压密程度与纤维排布方向差异的影响, 顺纹加载与横纹加载的力学性能存在差别^[5-6], 两个横纹方向(加载方向平行和垂直于胶层方向)加载之间亦表现出不同程度的差异性。相关研究据此建立了应力-应变关系模型, 这为建立材料本构模型提供基础^[7]。另外, 对重组竹抗压与抗剪性能等测试发现, 界面失效是导致其破坏的主要原因^[8]。

在严寒及季节性冻融地区, 结构材料服役期内反复经历冻融循环, 水-冰相变引发的孔隙压力变化与界面损伤累积, 导致材料刚度、承载能力持续衰减, 力学性能离散性被放大。为推动竹木结构在极端气候区域^[9](如俄罗斯西伯利亚、挪威等)的安全应用, 需要考虑冻融环境对材料性能的影响。SZMUTKU等^[10]研究温度对云杉(*Picea* spp.)板材(500 mm×80 mm×35 mm和500 mm×80 mm×65 mm)力学性能的影响, 发现缓慢冷冻($\Delta t = -1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$)降温至 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保存一周后, 其抗

压强度衰减31%。采用酚醛树脂胶黏剂制备的落叶松(*Larix gmelinii*)和樟子松(*Pinus sylvestris*)胶合木的抗弯、抗剪性能及弹性模量, 随冻融循环次数增加而降低, 但试件的厚度膨胀率基本不变^[11]。重组竹地板经过冻融循环处理, 其静态抗弯强度和弹性模量降低, 24 h吸水厚度膨胀率增加^[12]。重组竹属于“竹束-胶层-界面”复合材料, 冻融损伤易集中表现为界面脱粘、胶层开裂与层间劣化, 这使得重组竹在冻融环境下的劣化速率与演化离散规律明显区别于木材^[12-13]。但目前针对重组竹在冻融循环条件下抗压弹性模量和抗压强度劣化的研究仍不足, 这导致面向重组竹工程设计的退化模型与特征值评价方法亦有待完善。

破坏模式与抗压性能是表征重组竹冻融劣化程度与结构安全性的关键指标, 鉴于此, 本研究对重组竹在不同冻融循环条件下的破坏模式、抗压弹性模量与抗压强度进行分析, 系统揭示冻融循环处理后重组竹抗压性能的退化机制; 并在统计分析的基础上, 计算得出重组竹抗压性能的特征值, 建立基于冻融循环次数的抗压性能预测模型, 旨在重组竹在严寒地区应用的耐久性评估与可靠度设计提供数据支撑与模型基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 重组竹试件: 规格尺寸为 60 mm×20 mm×20 mm (长×宽×厚) 和 30 mm×20 mm×20 mm (长×宽×厚), 以酚醛树脂 (phenol formaldehyde, PF) 为胶黏剂, 密度约为 1.24 kg/m³, 含水率为 2.28%。外购。

1.2 试验方法

由于目前尚无针对重组竹材料的专用冻融试验规范, 参考 ASTM C666/C666M-2015 “*Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*” 中规定的循环方式, 以及重组竹老化相关研究^[14]设计冻融循环试验, 并以未进行冻融循环处理的试样作为对照组。具体冻融循环试验步骤如下:

将重组竹浸泡于室温水 中 48 h, 取出擦拭表面水分后立即放入温度为 −20 °C 的低温箱中 8 h, 取出后放入 20 °C 水中浸泡 8 h。将 −20 °C 冷冻和 20 °C 水中浸泡分别循环 0、20、40 和 60 次。

1.3 性能测试

重组竹的力学性能除了受纤维取向影响外, 还与胶层分布、载荷加载方向等有关。为准确反映横纹受压条件下重组竹的力学响应特征, 综合考虑横纹加载在破坏模式、承载机制及变形能力方面的差异^[8, 15], 将横纹加载方向进一步细分为横纹加载 I (加载方向垂直于胶层方向) 和横纹加载 II (加载方向平行于胶层方向) (图 1)。

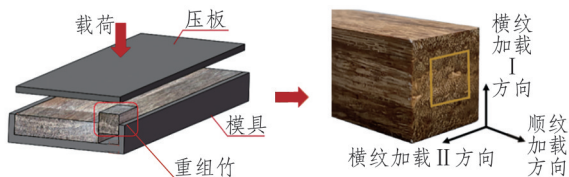


图 1 重组竹制备及加载方向示意

Fig.1 Schematic diagram of bamboo scrimber preparation and loading directions

参考相关文献^[8, 16]以及 ASTM D143-2021 “*Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*”, 采用万能试验机测试重组竹的抗压弹性模量和抗压强度。根据试验目的和加载方向设计 24 组试验, 共计 1 200 个试件。重组竹的测试性能、加载方向和循环次数列于表 1。

表 1 重组竹试件信息

Tab.1 Information on bamboo scrimber specimens

分组	编号	加载方向	试件尺寸/mm	试件数量/个
抗压弹性模量	ES	顺纹	60×20×20	50
	EHI	横纹I (垂直于胶层)		
	EHII	横纹II (平行于胶层)		
抗压强度	CS	顺纹	30×20×20	50
	CHI	横纹I		
	CHII	横纹II		

根据公式 (1) 和公式 (2) 分别计算重组竹的抗压弹性模量 (E_c) 和抗压强度 (f_{cu})。

$$E_c = \frac{\Delta F_{ce}}{A \cdot \Delta \varepsilon_{ce}} \quad (1)$$

$$f_{cu} = \frac{F_{cu}}{A} \quad (2)$$

式中: F_{ce} 为弹性阶段压力, kN; ε_{ce} 为抗压弹性阶段应变; A 为试件截面面积, mm²; F_{cu} 为极限压力, kN。

2 结果与分析

2.1 破坏模式

根据文献^[8]定义重组竹受压试件的破坏模式, 并对比分析经过不同次冻融循环处理后重组竹的破坏模式和数量。

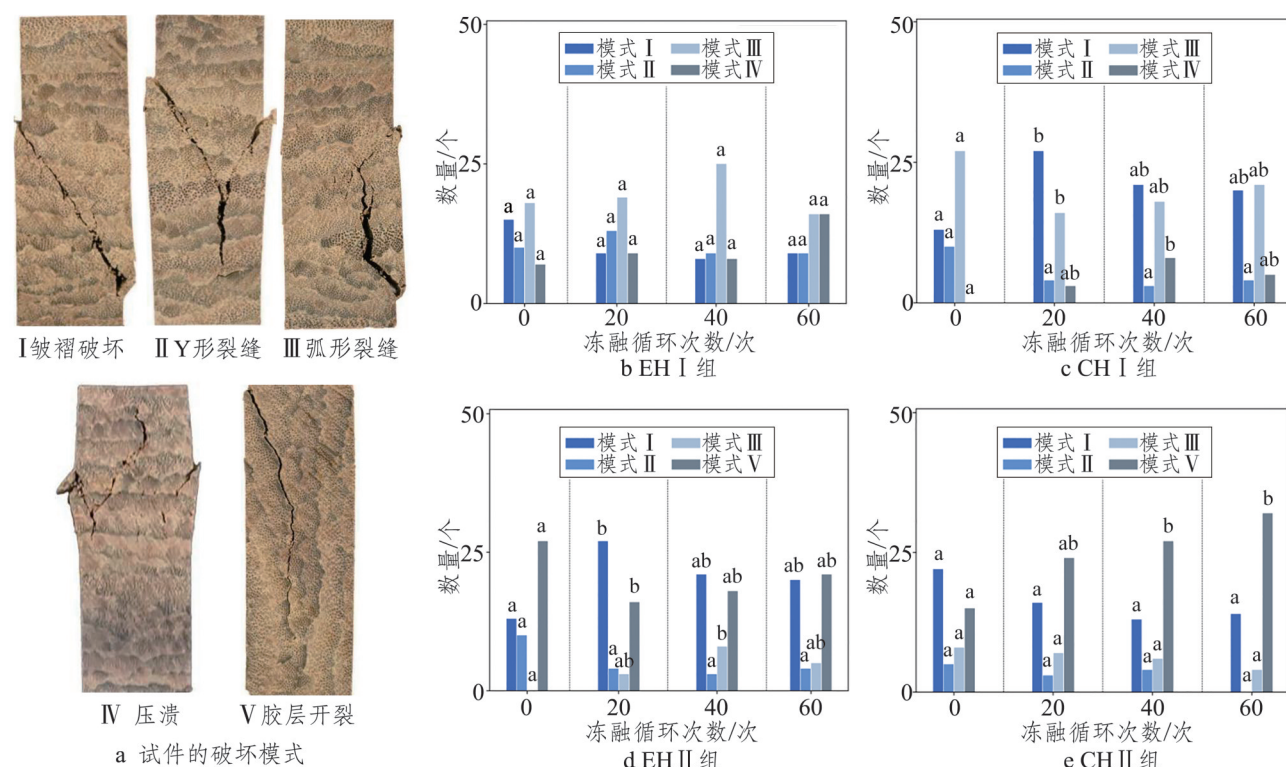
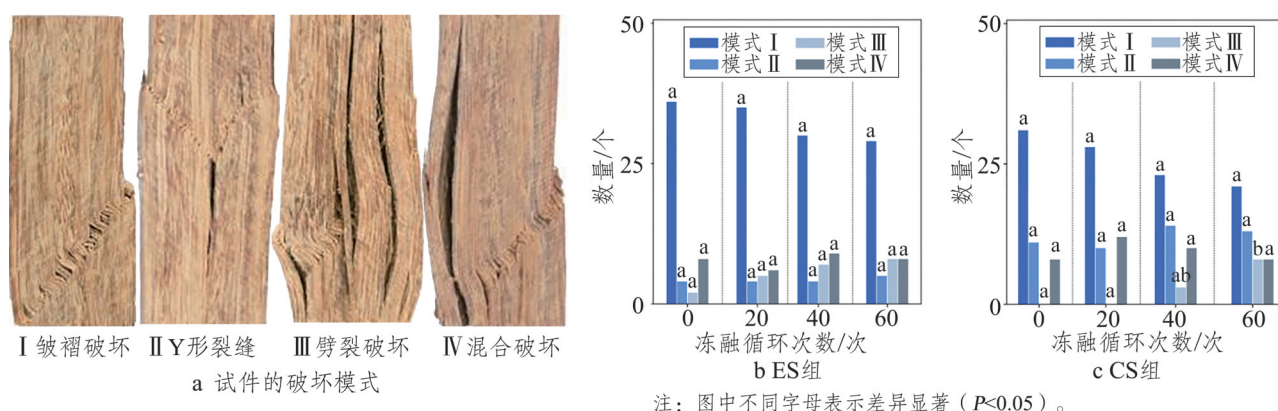
2.1.1 顺纹方向加载 顺纹方向加载测试抗压弹性模量和抗压强度, 试件的破坏模式和各模式的数量, 如图 2 所示。

如图 2a 所示, 褶皱破坏和 Y 形裂缝是在压力作用下纤维发生剪切滑移从而屈曲所致; 在受压过程中试件发生周向膨胀产生内部拉力, 当拉力超过试件胶层结合力时, 发生劈裂破坏; 当纤维屈曲和破裂同时存在时, 发生混合破坏。

图 2b 和 2c 显示, 随着冻融循环次数由 0 次增加到 60 次时, 抗压弹性模量试件和抗压强度试件褶皱破坏 (模式 I) 的比例分别由 72% 降至 58%、62% 降至 42%; 劈裂破坏 (模式 III) 的比例分别从 4% 升至 16%、0% 升至 26%。其他两种破坏模式比例并未随冻融循环次数的增加而显著变化。

2.1.2 横纹方向加载 横纹方向加载测试试件的破坏模式和各模式的数量, 如图 3 所示。

对于横纹加载 I 抗压弹性模量试件, 弧形裂缝 (模式 III) 为主要破坏模式, 比例为 32%~50%, Y 形裂缝和褶皱破坏的占比均为 20%。随着冻融循



环次数的增加, 皱褶破坏的试件数量占比从30%降为18% (图3b)。对于抗压强度试件, 皱褶破坏 (模式 I) 和弧形裂缝 (模式III) 占比约为80% (图3c)。

横纹加载 II 试件的破坏模式与横纹加载 I 试件的区别在于存在胶层开裂 (模式 V)。在未经过冻融循环 ($n=0$) 的试件中, 可以观察到一定比例的胶层破坏。这反映了重组竹材料在初始状态下的界面力学特征, 而冻融循环是通过水-冰相变引

起的体积变化及界面应力反复累积, 加速界面损伤的扩展过程, 从而改变胶层破坏的占比。对于横纹加载 II 抗压弹性模量试件, 皱褶破坏 (模式 I) 与胶层开裂 (模式 V) 的占比为70%~90%。随着冻融循环次数的增加, 皱褶破坏增加, 胶层开裂呈现相反的趋势 (图3d)。对于抗压强度试件, 皱褶破坏与胶层开裂依旧为主要破坏模式。随着冻融循环次数的增加, 皱褶破坏从44%逐渐降为28%, 胶层开裂从30%升至64% (图3e)。

2.2 抗压弹性模量

为预测冻融循环次数对重组竹抗压弹性模量的影响，采用线性或对数函数拟合方式建立冻融循环次数对三向抗压弹性模量的预测模型^[7]，具体见公式（3）。

$$E(n)=\begin{cases} E(0)-a\times n \\ E(0)-a\ln(n+1) \end{cases} \quad (3)$$

式中：*a*为抗压弹性模量退化模型拟合参数，常数；*E*(0)为常温下该方向的抗压弹性模量，MPa；*E*(*n*)为*n*次冻融循环后该方向的抗压弹性模量，MPa。

为更准确地评估重组竹在冻融环境下的工程

适用性，引入特征值作为评价指标。材料强度特征值定义为具有 95% 保证率的数值（即 5% 分位值）。采用正态分布计算重组竹的强度特征值^[17]，具体见公式（4）。

$$v_k=\mu-1.645\sigma \quad (4)$$

式中：*v_k*为材料强度特征值（5% 分位值），MPa；*μ*为样本均值，MPa；*σ*为样本标准差，MPa。

不同冻融循环处理后，各组抗压弹性模量的均值和特征值结果列于表 2；基于抗压弹性模量均值进行拟合，预测模型见图 4，结果显示，建立的预测模型 *R*² 值均大于 0.95，具有较好的拟合效果。

表 2 冻融循环处理后不同试件抗压弹性模量的均值和特征值

Tab.2 Means and characteristic values of the compressive elastic modulus of different specimens under freeze-thaw cycles							
组别	循环次数	均值/MPa	变异系数/%	均值降幅/%	特征值/MPa	特征值降幅/%	预测公式
ES	0	14 833.8±1 424.0a	9.6	-	11 082.8	-	$E_s(n)=E_s(0)-17.05n$
	20	14 409.6±1 498.6ab	10.4	2.9	10 457.8	5.6	
	40	14 195.9±1 277.6ab	9.0	4.3	10 804.1	2.5	
	60	13 808.7±1 201.4b	8.7	6.9	10 613.9	4.2	
EHI	0	1 947.0±165.5a	8.5	-	1 509.9	-	$E_{HI}(n)=E_{HI}(0)-3.71n$
	20	1 921.6±203.7bc	10.6	1.3	1 382.4	8.4	
	40	1 802.0±210.8ab	11.7	7.5	1 243.2	17.7	
	60	1 706.2±203.0c	11.9	12.4	1 169.6	22.5	
EHII	0	3 260.1±218.4a	6.7	-	2 681.1	-	$E_{HII}(n)=E_{HII}(0)-298.88\ln(n+1)$
	20	2 410.0±168.7b	7.0	26.1	1 965.5	26.7	
	40	2 157.3±194.2c	9.0	33.8	1 642.6	38.7	
	60	2 012.4±217.3d	10.8	38.3	1 440.0	46.3	

注：不同字母表示差异显著(*P*<0.05)。

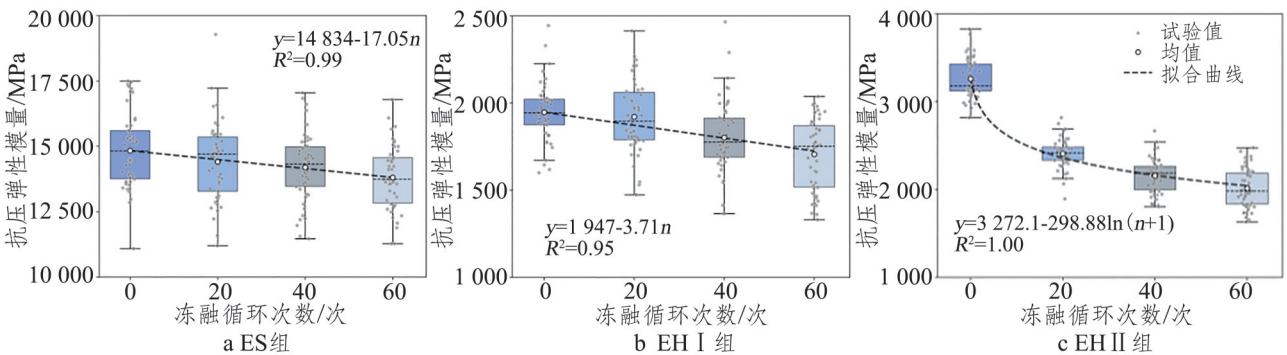


图 4 冻融循环处理后不同试件的抗压弹性模量及预测模型

Fig.4 Compressive elastic modulus and prediction model of different specimens under freeze-thaw cycles

表 2 显示，随着冻融循环次数增加，抗压弹性模量均呈下降趋势，其中横纹加载 II 试件下降幅度最大：相较于未经冻融循环的试件，在经历 20、40 和 60 次冻融循环后，抗压弹性模量均值降幅为 26.1%~38.3%；横纹加载 I 试件的抗压弹性模量均

值降幅为 1.3%~12.4%。冻融循环对顺纹方向抗压弹性模量的影响最小，其下降幅度介于 2.9%~6.9%。随着冻融循环次数的增加，各向抗压弹性模量的变异系数呈上升趋势。这是因为冻融循环过程中竹材有机物溶解导致分子结构稳定性下

降^[12]。随着冻融循环次数增加，胶层开裂增多。表明冻融循环对胶层的影响较大，进一步降低重组竹材料的稳定性。

由于冻融损伤导致材料内部缺陷分布的不均匀性增加，导致整体模量特征值的衰减速率明显快于均值。表明在严寒地区进行重组竹结构设计时，若仅依据模量均值进行折减，可能会在稳定性验算中引入安全隐患，因此需要考虑更高的折减系数。

2.3 抗压强度

为预测冻融循环次数对重组竹抗压强度的影响，采用线性或对数衰减方式建立冻融循环次数

的各向抗压强度预测模型^[7]，具体见公式（5）。

$$f_c(n)=\begin{cases} f_c(0)-b\times n \\ f_c(0)-b\ln(n+1) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $f_c(n)$ 为经历 n 次冻融循环后试件抗压强度，MPa； $f_c(0)$ 为未经历冻融循环试件抗压强度，MPa； b 为抗压强度退化模型拟合参数，常数。

经历不同次冻融循环处理后，重组竹抗压强度的均值和特征值结果，列于表3；基于重组竹抗压强度均值进行拟合，其预测模型如图5所示。图5显示，建立的抗压强度预测模型 R^2 值均大于 0.99，可有效预测 0~60 次冻融循环处理对重组竹抗压强度的影响。

表3 冻融循环处理后不同试件抗压强度的均值和特征值

Tab.3 Means and characteristic values of compressive strength of different specimens under freeze-thaw cycles							
组别	循环次数	均值/MPa	变异系数/%	均值降幅/%	特征值/MPa	特征值降幅/%	预测公式
CS	0	121.1±2.5a	2.1	-	114.3	-	$f_{CS}(n)=f_{CS}(0)-0.58n$
	20	107.3±4.3b	4.0	11.4	96.0	16.0	
	40	98.5±3.7c	3.8	18.6	88.7	22.4	
	60	86.3±3.4d	3.9	28.7	77.3	32.3	
CHI	0	49.4±6.5a	13.2	-	32.1	-	$f_{CHI}(n)=f_{CHI}(0)-0.07n$
	20	48.2±4.0a	8.4	2.3	37.5	-16.8	
	40	46.6±10.0ab	21.5	5.6	20.0	37.7	
	60	45.1±4.5b	9.9	8.6	33.4	-3.9	
CHII	0	63.2±6.3a	10.0	-	46.5	-	$f_{CHII}(n)=f_{CHII}(0)-5.45\ln(n+1)$
	20	45.3±4.9b	10.8	28.3	32.4	30.4	
	40	43.1±3.6b	8.3	31.7	33.7	27.4	
	60	41.0±5.7c	14.0	35.2	25.8	44.5	

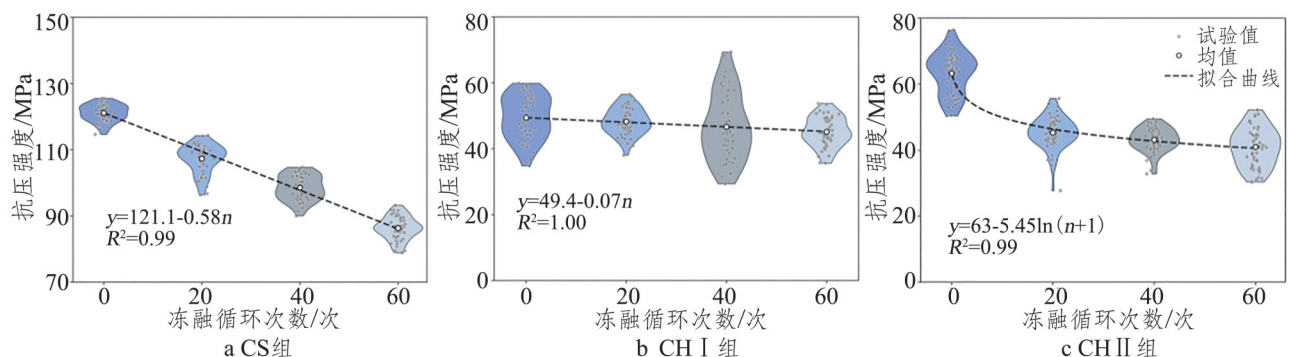


图5 冻融循环处理后不同试件的抗压强度及预测模型

Fig.5 Compressive strength and prediction model of different specimens under freeze-thaw cycles

横纹加载 I 试件在不同冻融循环处理后的抗压强度下降幅度最小，为 2.3%~8.6%。顺纹方向抗压强度降幅略有增大，为 11.4%~28.7%。冻融循环对横纹加载 II 试件的抗压强度影响最大，降幅达 28.3%~35.2%；当 $n>20$ 次时，其影响不再显著，

这是因为冻融循环处理超过 20 次后，胶层性能严重劣化，直接制约了该方向的抗压强度，胶层开裂成为主要影响因素。横纹加载 I 试件在 20 次循环后强度特征值略有上升；另外，变异系数由 13.2% 降至 8.4%，表明适度的湿热作用可能对内部

缺陷产生“愈合”效应,降低抗压强度的离散性。

由表3可知,对于横纹加载Ⅱ(CHⅡ)受损严重的组别,冻融循环处理导致试件内部损伤累积,显著增大了强度的离散性,使特征值衰减幅度(44.5%)大于均值衰减幅度(35.2%);其他组别特征值衰减程度较小,但仍高于均值。这说明仅依据均值进行折减,无法覆盖离散性增大带来的低强度失效风险,而采用考虑标准差的特征值指标,能更严谨地量化重组竹的抗压承载潜力。

3 结论

1) 对重组竹的抗压弹性模量与抗压强度试件进行0、20、40和60次冻融循环试验,随着冻融循环次数增加,湿胀干缩差异诱发的界面累积损伤不断加剧,表明界面/胶层耐久性是影响冻融循环条件下重组竹抗压性能退化的关键因素。

2) 冻融循环处理进一步放大了重组竹抗压性能的各向异性。其中横纹加载Ⅱ试件(加载方向平行于胶层方向)经过60次冻融循环后,抗压弹性模量与抗压强度降幅分别为38.3%与35.2%,高于横纹加载Ⅰ试件(降幅分别为12.4%与8.6%),说明层间胶合性能及界面完整性对冻融耐久性具有影响。

3) 冻融循环处理使重组竹材料三向特征值(5%分位值)的衰减速率整体高于均值,表明在严寒环境下进行工程设计或安全性评估时,仅采用均值可能低估不利效应,应同时关注特征值层面的退化。

4) 采用线性/对数衰减形式进行拟合,建立抗压弹性模量与抗压强度的退化预测模型,模型拟合优度 R^2 大于0.95,可用于0~60次冻融循环范围内重组竹抗压性能的退化评估。

本研究尚未直接对重组竹材料内部孔隙结构、胶层微裂纹及界面损伤演化进行可视化观测,后续研究将结合X-ray CT等无损检测技术,对冻融循环处理后重组竹内部空间结构及界面损伤特征进行多尺度表征,进一步验证所提出的退化模型,建立材料-构件关联的退化模型与更完善的耐久性评价框架。

参考文献:

- [1] 于文吉.我国重组材料科学技术发展现状与趋势[J].木材科学与技术,2023,37(1):1-7.
YU W J. Current status and future trend of science and technology for reconstituted materials in China[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 1-7.
- [2] HUANG Y X, JI Y H, YU W J. Development of bamboo scrimber: a literature review[J]. Journal of Wood Science, 2019, 65(1): 25.
- [3] SU H W, ZHANG F, JIANG F J, et al. Effects of grain angle and moisture content on the compressive properties of engineered bamboo scrimber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(9). DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-19860.
- [4] HUANG Z W, YE X F, SU H W, et al. Size effect on tensile strength parallel to grain of structural bamboo scrimber[J]. Structures, 2026, 85. DOI: 10.1016/j.istruc.2026.111129.
- [5] LI H T, QIU Z Y, WU G, et al. Compression behaviors of parallel bamboo strand lumber under static loading[J]. Journal of Renewable Materials, 2019, 7(7): 583-600.
- [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 mechanics performance test of recombinant bamboo[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, 39(4): 46-51.
- [7] WU M T, MEI L D, GUO N, et al. Mechanical properties and failure mechanisms of engineering bamboo scrimber[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128082.
- [8] QIU Z Y, WANG J X, FAN H L, et al. Anisotropic mechanical properties and composite model of parallel bamboo strand lumbers[J]. Materials Today Communications, 2020, 24. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101250.
- [9] Canadian Timberframes : Timber frame experts[EB/OL]. <https://www.canadiantimberframes.com/>.
- [10] SZMUTKU M B, CAMPEAN M, POROJAN M. Strength reduction of spruce wood through slow freezing[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2013, 71(2): 205-210.
- [11] YANG R Y, LI H T, DAULETBEK A, et al. Effects of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of glulam exposed to outdoor environment[J]. Journal of Renewable Materials, 2021, 9(7): 1293-1307.
- [12] 吴自成.冻融循环处理对重竹地板性能的影响[J].安徽农学通报,2017,23(24):118-120.
WU Z C. Effect of freeze-thaw circle on the resistance of reconsolidated bamboo flooring[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(24): 118-120.
- [13] WU M T, MEI L D, LIN X Y, et al. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and failure modes of bamboo scrimber[J]. Construction and Building Materials, 2025, 483. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141634.
- [14] 黄小真.户外竹材重组材耐老化试验方法及性能研究[D].南京:南京林业大学,2009.
- [15] MEI L D, WU M T, LI T, et al. Experimental and theoretical investigation of short-term behavior of unbonded prestressed bamboo scrimber-steel composite beams[J]. Engineering Structures, 2025, 327. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.119614.
- [16] SUN X F, HE M J, LIANG F, et al. Experimental investigation into the mechanical properties of scrimber composite for structural applications[J]. Construction and Building Materials, 2021, 276. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122234.
- [17] XIAO Y, WU Y, LI J, et al. An experimental study on shear strength of glulam[J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 490-500.

(责任副主编 余养伦/编校 向琴)