

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026022

加压热处理薄型地采暖用实木地板的制备与性能

唐南畅¹, 梁东东¹, 李万菊², 谢桂军², 程奥凯¹, 严志松³, 涂登云¹

(1. 华南农业大学生物物质学院农业部农业设施新材料重点实验室, 广东广州, 510642; 2. 广东省林业科学研究院, 广东广州, 510642; 3. 浙江世友木业有限公司, 浙江湖州, 313009)



摘要: 为解决薄型地采暖用实木地板因环境湿度变化而发生离缝、翘曲、开裂和起拱等尺寸稳定性不足的问题, 以番龙眼 (*Pometia pinnata*) 为研究对象, 采用 230 °C、240 °C 和 250 °C 加压热处理 7 min 的方法对其改性, 并制备成薄型地采暖用实木地板, 评价其线性湿胀率、抗胀率、漆膜性能、耐湿和耐热尺寸稳定性。结果表明, 随着处理温度的升高, 试件平衡含水率和吸水率逐渐降低 ($P < 0.05$), 且吸湿和吸水条件下的线性湿胀率逐渐减小和体积抗胀率逐渐增大 ($P < 0.05$), 250 °C 处理番龙眼木材的吸湿和吸水体积抗胀率分别为 59.29% 和 33.69%, 抗弯强度和弹性模量分别为 111.45 MPa 和 11.58 GPa, 分别较对照组降低了 9.47% ($p < 0.05$) 和 2.11% ($p > 0.05$)。在 230 °C、240 °C 和 250 °C 条件下, 地采暖用实木地板耐湿尺寸稳定性 (长/宽度膨胀率) 分别为 0.02%/0.16%、0.02%/0.14% 和 0.01%/0.09%, 耐热尺寸稳定性 (长/宽度收缩率) 分别为 0.08%/0.34%、0.06%/0.34% 和 0.03%/0.21%, 耐湿和耐热尺寸稳定性较对照组均显著提高 ($p < 0.05$)。导热效能均达到 $11 \text{ °C} \cdot \text{h}^{-1}$, 尺寸稳定性和导热效能分别符合 GB/T 35913-2018 《地采暖用实木地板技术要求》和 GB/T 41547-2022 《地采暖用木质地板》对地采暖用实木地板的技术要求; 同时, 其漆膜附着力、硬度及耐磨性能均符合 GB/T 15036-2018 《实木地板第 1 部分: 技术要求》中优等品的技术要求。

关键词: 薄型地采暖用实木地板; 加压热处理; 尺寸稳定性; 导热效能; 番龙眼

中图分类号: S781.7; S784 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (XXXX) XX-0001-12

Fabrication and Performance of Thin Solid Wood Flooring with Pressurized Heat Treatment for Ground Heating System

TANG Nanchang¹, LIANG Dongdong¹, LI Wanju², XIE Guijun², CHENG Aokai¹, YAN Zhi-song³, TU Dengyun¹

(1. Key Laboratory of Advanced Materials for Facility Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Future Biomass, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 3. Zhejiang Shiyou Timber Company Limited, Huzhou, 313009, Zhejiang, China)

Abstract: To address the issue of insufficient dimensional stability in thin solid wood flooring for ground heating system, which can lead to problems such as seam separation, warping, cracking, and buckling due to changes in environmental humidity, this study focuses on *Pometia pinnata* wood. The research employs pressurized heat treatment methods at 230 °C, 240 °C, and 250 °C to modify the wood,

收稿日期: 2026-02-03; 修改日期: 2026-03-26

基金项目: 广东省林业科技创新项目“木竹材精深加工与高值化利用关键技术研究”2026KJCX002; 广西林业科技推广项目“超薄实木复合地板基材关键技术开发”桂林科研[2026KX]第22号。

通讯作者: 涂登云, 男, 教授, E-mail: tudengyun@scau.edu.cn

subsequently fabricating thin solid wood flooring for ground heating system. The linear swelling, anti-swelling efficiency, coating performance, wet-resistant, and heat-resistant dimensional stability are evaluated. The results indicated that with increasing treatment temperature, the equilibrium moisture content and water absorption of the specimens gradually decreased ($P < 0.05$), while the linear swelling under moisture and water absorption conditions decreased and the volumetric anti-swelling efficiency increased ($P < 0.05$). For *Pometia pinnata* wood treated at 250 °C, the volumetric anti-swelling efficiency under moisture and water absorption were 59.29% and 33.69%, respectively. The modulus of rupture and modulus of elasticity were 111.45 MPa and 11.58 GPa, representing decreases of 9.47% ($P < 0.05$) and 2.11% ($p > 0.05$) relative to the control group. At 230 °C, 240 °C, and 250 °C, the wet-resistant dimensional stability (length/width swelling) of the flooring was 0.02%/0.16%, 0.02%/0.14%, and 0.01%/0.09%, respectively. The heat-resistant dimensional stability (length/width shrinkage) was 0.08%/0.34%, 0.06%/0.34%, and 0.03%/0.21%, respectively. Both wet-resistant and heat-resistant dimensional stability were significantly improved compared to the control ($P < 0.05$). The thermal conductivity efficiency reached 11 °C·h⁻¹ in all groups. The dimensional stability and thermal conductivity met the requirements of GB/T 35913-2018 "Technical requirements of solid wood flooring for ground with heating system" and GB/T 41547-2022 "Wood-based flooring for underfloor heating" for solid wood flooring for ground with heating system. In addition, the coating adhesion, hardness, and wear resistance met the premium-grade requirements of GB/T 15036-2018 "Solid wood flooring-Part 1: Technical requirements".

Key words: thin solid wood flooring for ground heating system; pressurized heat treatment; dimensional stability; thermal conductivity; *Pometia pinnata*

在北方地区, 地采暖成为人们生活中需要考虑的重要因素^[1]。随着现代社会对可持续发展和环保的日益重视, 木材作为一种绿色可再生资源, 因其良好的物理力学性能、较高的强重比、优异的加工性, 被广泛用于铺地材料^[2]。目前, 市场上的实木地板在地采暖用环境中的常用厚度多为 15~18 mm^[3]。较大的厚度在实际应用中容易带来运输成本和材料成本增加等问题, 同时也不利于地暖条件下热量的有效传递, 进而影响采暖效果^[4]。在地采暖使用过程中, 地板通常采用免龙骨平铺的安装方式^[5], 这在一定程度上降低了对地板厚度的结构限制, 为地板减薄提供了条件。此外, 地采暖用实木地板薄型化还可以减少木材用量, 降低材料和运输成本, 实现轻量化应用, 也更符合当前节能减排和低碳环保的发展需求。

然而, 在地采暖环境下, 薄型实木地板比常规厚板对尺寸稳定性要求更高。这主要是因为薄板厚度较小, 受湿度变化的影响更敏感, 微小的吸湿膨胀或干燥收缩都可能导致翘曲、开裂或接缝变形, 从而影响使用性能^[6]。因此, 为保证薄型

地板在采暖季与非采暖季的长期稳定性, 需要木材具有更低的吸湿性。由于木材固有的干缩特性, 在地采暖的干燥环境中, 实木地板易发生解吸干缩, 从而产生离缝、翘曲或开裂等缺陷^[7-9]。为克服采暖期上述问题, 根据标准 GB/T 35913-2018《地采暖用实木地板技术要求》, 通常把地采暖用实木地板的含水率控制在 5%~9%。采暖季结束后, 环境相对湿度显著升高, 实木地板在吸湿过程中易发生较大的湿胀变形, 而产生起拱等问题^[10-12]。受地采暖特殊环境的影响, 薄型实木地板在地采暖条件下的应用在一定程度上受到限制^[4]。

为解决薄型实木地板在地采暖环境中尺寸稳定性不足的问题, 有必要对木材进行尺寸稳定化改性。前期研究表明, 采用 220 °C~270 °C 的高温热压对低含水率毛白杨 (*Populus tomentosa*) 进行处理, 可在一步工艺中实现木材压缩及其回弹的有效固定, 显著提高尺寸稳定性, 说明利用热压法进行木材高温快速热改性具有可行性^[13]。在此基础上, 本研究选取番龙眼 (*Pometia pinnata*) 作为研究对象。番龙眼虽已广泛应用于实木地板, 但

因其半纤维素含量较高、亲水性官能团丰富, 在湿度变化条件下易产生较大的干缩湿胀^[14-15]。针对其材性特点, 采用230~250 °C热压法对番龙眼进行热改性, 并将其制备成厚度为12 mm的薄型地采暖用实木地板, 分析热处理对番龙眼的木材尺寸稳定性、力学性能、吸湿性、化学组成及微观结构的影响, 并对薄型地采暖用实木地板的漆膜性能、耐热和耐湿尺寸稳定性进行评价, 为其在地采暖环境中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

番龙眼木材, 产自巴布亚新几内亚, 气干密度为 $0.68 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$, 初始含水率为10%~13%, 由浙江世友木业有限公司供应。木材试样依据颜色相似、纹理相近且无明显缺陷(如裂纹和虫蛀)进行筛选。每块试样尺寸为500 mm(纵)×160 mm(径)×12 mm(弦), 共分为4组, 每组6块, 其中一组为对照材。同时筛选了500 mm(纵)×160 mm(径)×15 mm(弦)和500 mm(纵)×160 mm(径)×17 mm(弦)用于导热效能测试。

1.2 仪器与设备

木材高温干燥实验箱(M9060)、高温热压机(LE-6170-B)、高低温湿热试验箱(PL404A-150H)、万能力学试验机(UTM 5504)、漆膜磨耗仪(JM-IV)、热重分析仪(TG209F1)、多路温度记录仪(TP700-64)、场发射扫描电子显微镜(Zeiss Sigma 300)、X射线粉末衍射仪(ULTIMAIV)、傅里叶变换-红外吸收光谱仪(TENSOR27)、滴液分析仪(DSA100 HP)等。

1.3 试验方法

1.3.1 干燥方法

采用木材高温干燥实验箱对番龙眼进行干燥。如表1所示, 为避免干燥过程中产生开裂, 首先对番龙眼进行低温预热, 以减小芯层与表层之间的温度差, 同时, 通过调节干燥实验箱湿球温度, 降低芯层与表层的含水率梯度, 从而减小内应力的产生。

1.3.2 中心层温度测量方法

试样干燥完成后, 于厚度方向中心位置钻孔,

表1 12 mm番龙眼木材干燥工艺

Table 1 Drying schedule for 12 mm *Pometia pinnata* wood

阶段	干球温度/°C	湿球温度/°C	持续时间/h
I	50	40	1
II	60	45	1
III	70	50	1
IV	80	55	1
V	90	60	2
VI	103	/	至3~5%

并将热电偶埋设于孔内, 使测温端与孔壁紧密接触, 以尽可能提高测温准确性。热电偶连接多路温度记录仪, 实现全过程实时连续采集。正式试验前, 先将热压机预热至230 °C并保持温度稳定。随后迅速将试样置于热压板之间, 立即合模, 并同步启动多路温度记录仪, 记录试样中心层温度随时间变化的过程。测试结果表明, 当时间达到430 s时, 试样中心层温度已升至230 °C。因此, 综合升温过程及温度稳定情况, 本研究将420 s(7 min)确定为热处理时间。

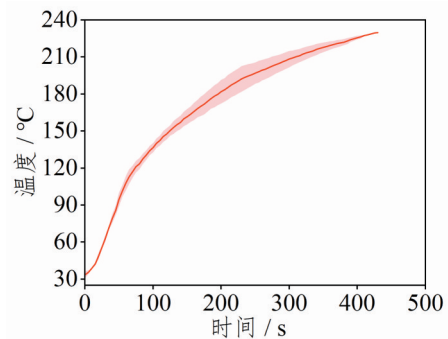


图1 230 °C加压热处理下番龙眼木材中心温度随时间的变化

Fig. 1 Core temperature of *Pometia pinnata* wood as a function of time during pressurized heat treatment at 230 °C

1.3.3 热处理方法

采用高温热压机对干燥后的试样进行热处理, 具体热处理工艺参数见表2。热压压力为热压机抬升压力, 设定为1.2 MPa, 作用在番龙眼木材上的压力为0.68 Mpa, 此压力不会造成番龙眼木材压缩。热处理前, 先将热压机预热至设定的热处理温度, 随后迅速将试样放入压机中并快速闭合。压机闭合后, 在恒定压力和温度条件下保温7 min, 以确保试样充分受热。随后通入冷却水进行冷却处理, 冷却时间为7 min, 直至木材温度降至

约 50 °C, 之后取出试样。在预试验中, 260 °C 和 270 °C 的热处理过程中, 木材发生了严重的炸板现象, 因此最高温度设置在 250 °C。

1.3.4 含水率调节

将热处理的试样放入木材高温干燥试验箱中在干球温度为 55 °C、湿球温度为 50 °C 条件下进行含水率调节, 将其含水率控制为 6%~8%。未处理材在干球温度为 55 °C、湿球温度为 41 °C 条件下将其含水率控制为 6%~8%。

1.3.5 薄型地采暖用实木地板制备方法

采用常用的水性 UV 漆涂饰工艺对热处理试样进行表面涂装。涂饰前, 对照材和热处理材表面经 320 目压辊带式砂光机砂光, 砂光量约为 0.5 mm, 并彻底除尘。随后采用辊涂方式施涂 UV 底漆并进行紫外固化, 固化后进行中间砂光, 再施涂第二道底漆并固化, 最后涂覆一道 UV 面漆并经紫外固化完成涂饰, 该工艺由浙江世友木业有限公司提供。各涂层涂布量控制在 80~120 g/m²。每组制备 6 块, 涂饰后尺寸为 500 mm (纵) × 160 mm (径) × 12 mm (弦)。同时用该方法制备了 15 mm 和 17 mm 厚的 250 °C 热压处理地板。

1.4 性能测试

1.4.1 番龙眼木材性能测试

1) 质量损失率 根据公式 (1), 质量损失率 (mass loss, ML) 由热处理前后试样的绝干质量计算得到, 用于反映热处理过程中木材自身质量的变化 (不包括水分)。

$$ML = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为试件的绝干质量, g; m_1 为试件热处理后的绝干质量, g。

2) 热重测试 采用热重分析仪对照材进行热重分析。将约 15 mg 木粉置于 Al₂O₃ 坩埚中, 在空气气氛下以 5 °C/min 的升温速率从室温加热至 600 °C。

3) 尺寸稳定性测定 吸水尺寸稳定性和吸湿尺寸稳定性测试均依据 GB/T 1927—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法》进行。分别选取对照材与热处理试样, 加工成尺寸为 20 mm (纵) × 20 mm (径) × 12 mm (弦) 的试件, 每组共 18 个试件。试件首先置于 103 °C 烘箱中干燥至

恒重, 随后测量其在径向、弦向和纵向方向上的尺寸, 作为绝干状态下的初始尺寸。干燥完成后, 将试件转移至温度 20 °C、相对湿度 (RH) 65% 的恒温恒湿箱中进行平衡调湿, 直至试件质量最后两次测量只差不超过 0.05%, 认为其达到吸湿平衡状态。平衡后, 再次测量试样在各方向上的尺寸, 用以表征吸湿条件下的尺寸变化。

吸水尺寸稳定性测试中, 将试件完全浸泡于去离子水中, 直至试件质量连续两次称量的质量差不超过 0.05%。随后, 测量试件在径向、弦向和纵向方向上的尺寸。最终, 依据试件在绝干状态与吸湿平衡状态和饱水状态的质量和尺寸变化, 计算其吸湿与吸水尺寸稳定性。其平衡含水率 (equilibrium moisture content, EMC)、吸水率 (water absorption rate, WA) 线湿胀率 (linear swelling, LS) 体积湿胀率 (volume swelling, VS) 以体积抗胀性 (anti-swelling efficiency, ASE), 计算方法见公式 (2) - (6)。

$$EMC = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$WA = \frac{m_2 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$LS = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$VSR = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$ASE = \frac{VSR_0 - VSR_m}{VSR_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中, m_1 为试件吸湿平衡后的质量, g; m_0 为试件的绝干质量, g; m_2 为试件饱水后的质量, g; d_1 为试件吸湿和吸水饱和后的线性尺寸, mm; d_0 为试件绝干时的线性尺寸, mm; V_1 为试件在吸湿和吸水饱和后的体积, mm³; V_0 为试件在绝干时的体积, mm³; VSR_0 为对照材在吸湿和吸水饱和后的体积, mm³; VSR_m 为处理材在吸湿和吸水饱和后的体积, mm³。

4) 力学性能测试 试样的弯曲强度和弯曲模量采用万能力学试验机进行测试。试验前, 试样加工成 230 mm (纵) × 20 mm (径) × 12 mm (弦) 的试件, 共 4 组, 每组 18 块, 其中一组为对照组, 并在 20 °C、RH 为 65% 条件下进行调湿处理直至达到质量平衡。测试过程中, 因试件厚度

未达国家标准规定的 20 mm 要求, 故依据 ASTM D 790 “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials” 将跨距设定为 192 mm, 保持跨距与试样厚度之比为 16:1。加载速率设定为 5 mm/min。

4) 微观形貌表征 采用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察热处理前后木材表面的微观形貌。采用二次电子模式, 加速电压为 5 kV。

5) 表面润湿性 采用单滴法结合滴液分析仪测量水接触角。通过高分辨率相机捕捉样品表面水滴图像, 由软件自动测定接触角。共 4 组, 每组 3 块试件, 其中一组为对照组, 每个试件测试五个不同点位, 并在 60 s 内计算平均接触角值。

6) 化学表征 将试样表层研磨成粒度为 40~60 目的木粉, 用于化学成分和结晶度测定。番龙眼中的提取物含量按 GB/T 35818-2018《林业生物质原料分析方法 多糖及木质素含量的测定》测定。总纤维素、 α -纤维素及木质素含量分别按 GB/T 2677.10-1995《造纸原料综纤维素含量的测定》、GB/T 744-1989《纸浆 α -纤维素的测定》和 GB/T 2677.8-1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》测定。FTIR 是采用标准傅立叶变换-红外吸收光谱仪进行测定。测试样品制备方法为取 1 mg 样品与 100 mg 溴化钾混合。样品在透射模式下以 2 cm^{-1} 分辨率扫描 32 次, 波数范围覆盖 4000 至 400 cm^{-1} 。

XRD 是采用 X 射线粉末衍射仪进行测试, 实验条件为 40 kv、30 mA, 配备镍滤光片的 $\text{CuK}\alpha$ 辐射源。扫描范围为 $5^\circ\sim 45^\circ$, 扫描速率为 $4^\circ/\text{min}$ 。相对结晶度 (CrI) 采用 Segal 法^[6]根据公式 (6) 计算得出。

$$\text{CrI}(\%) = \frac{I_{002} - I_{\text{am}}}{I_{002}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, I_{002} 为 (002) 晶面的衍射强度, 代表最大衍射强度, 对应木材的结晶部分。 I_{am} 为 $2\theta=18^\circ$ 晶面的衍射强度, 仅代表木材中的非结晶部分。

1.4.2 薄型地采暖用实木地板性能测试

1) 耐湿和耐热尺寸稳定性 根据 GB/T 35913-2018《地采暖用实木地板技术要求》测试薄型地采暖用实木地板的耐湿和耐热尺寸稳定性和试验前的平衡含水率。将对照材和热处理试样锯

成 200 mm (纵) \times 60 mm (径) \times 12 mm (弦) 的规格, 并对锯口进行封边处理。共 4 组, 每组 6 片, 其中一组为对照材。

2) 导热效能 根据标准 GB/T 41547-2022《地采暖用木质地板》, 测试薄型地采暖用实木地板的导热效能。试件尺寸为 100 mm (纵) \times 60 mm (径) \times 12 mm (弦), 共 4 组, 每组 1 片, 其中一组为对照材, 同时也测试了 15 mm 和 17 mm 厚 250°C 热处理地板的导热效能。

3) 漆膜性能 根据 GB/T 1768-2006《耐磨性的测定旋转橡胶砂轮法》、GB/T 9286-2021《色漆和清漆划格试验》和 GB/T 6739-2022《铅笔法测定漆膜硬》测试薄型地采暖用实木地板漆膜的耐磨性、附着力和硬度, 每个性能重复测试试件为 6 个。

1.5 统计分析

本文所获得的实验数据均采用 SPSS 软件进行统计分析。各组数据均以均值 \pm 标准差表示, 显著性检验水平设定为 0.05, 即 $P < 0.05$ 时即有显著性差异。不同处理组之间的差异采用单因素方差分析 (ANOVA) 进行判断, 并通过 Duncan 多重比较法对显著性差异进行进一步分析, 相同字母表示差异性不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示差异性显著 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 番龙眼木材性能分析

2.1.1 质量损失率

图 2 展示了番龙眼对照材的热重分析结果, 揭示了其热降解特性。由图 2a 所示的 TG 曲线, 番龙眼的热降解可以分为几个阶段。在初始阶段, 温度范围为 $200\sim 250^\circ\text{C}$, 质量损失约为 7.9%, 主要归因于半纤维素的脱水和炭化^[7]。第二阶段考虑的温度范围为 $250\sim 330^\circ\text{C}$, 质量损失约为 60%。在温度超过 250°C 时, 样品开始出现显著的质量损失, 表明组分在此温度以上发生了明显的热降解, 在本阶段, 热解过程主要由纤维素主导, 其降解机制包括脱水、分子重排和热解反应, 导致质量损失, 并生成一氧化碳、左旋葡萄糖及可燃性焦油, 而在 $330\sim 450^\circ\text{C}$ 范围内, 热降解则以木质素为主

导^[18]。TG分析说明250℃的热处理温度能够在保持木材热稳定性的同时，将质量损失率控制在较低水平。经过230℃、240℃和250℃热处理7

min后，木材的质量损失率平均值分别为1.16%、1.72%和2.47%，不同温度热处理对木材质量损失率有显著区别 ($P<0.05$)。

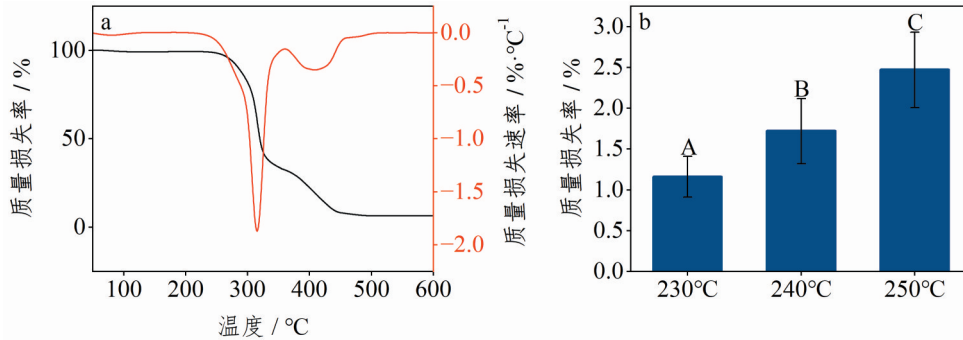


图2 番龙眼加压热处理前的热重曲线和处理后的质量损失

Fig. 2 TG/DTG analysis of untreated *Pometia pinnata* wood and mass loss of wood after pressurized heat treatment

2.1.2 尺寸稳定性

不同温度热处理番龙眼试件的吸湿性和吸水性如图2所示。由图3a可知，对照材的平衡含水率为9.42%。230℃处理后平衡含水率降至7.26%，较对照材降低22.93% ($P<0.05$)，表明该温度下木材内部发生明显化学变化，吸湿性显著减弱。当热处理温度升至250℃时，平衡含水率进一步显著降至6.37%，较对照材降低32.38% ($P<0.05$)。由图3b可知，试件在浸泡528h后吸水率趋于稳定，其中前48h吸水速率较快，主要与水分进入木材孔隙有关^[19]。对照材的48h吸水率为48.30%，经热处理后，试件吸水速率降低，且随热处理温度升高呈下降趋势，分别为45.01%、40.08%和32.97%。何露茜等人^[20]在对不同树种热处理后，平衡含水率和吸水率同样随着温度的升高逐渐降低，但由于热处理温度较低，降幅较小。

热处理前后番龙眼试件的吸湿与吸水湿胀率如图4所示。由图4a可知，径向吸湿和吸水湿胀率均随热处理温度升高而降低。对照材的吸湿和吸水径向湿胀率分别为2.52%和6.09%，经230℃处理后降至1.47% ($P<0.05$)和5.70% ($P>0.05$)，在250℃时进一步降至1.14% ($P<0.05$)和4.93% ($P<0.05$)。如图4b所示，对照材吸湿和吸水弦向湿胀率分别为3.48%和10.25%，热处理后降低，在250℃时达到最低，分别为1.51% ($P<0.05$)和6.21% ($P<0.05$)，体积湿胀率的变化趋势与弦向结果一致 (图4c)，均随热处理温度升高而降低，

差异性结果与弦向湿胀率类似，说明升温可有效抑制番龙眼的整体湿胀行为。进一步以体积抗胀率评价尺寸稳定性 (图4d)，结果表明热处理后吸湿和吸水体积抗胀率随处理温度升高而增加。其中，230℃、240℃和250℃下的吸湿体积抗胀率分别为47.78%、49.21%和59.29%，吸水体积抗胀率分别为17.30%、25.24%和33.69%。有研究表明，热处理温度对降低木材线湿胀率具有显著影响，同时能显著提高体积抗胀率^[21]。

2.1.3 力学性能与微观形貌

高温热处理对番龙眼力学性能的影响如图5所示。对照材的抗弯强度为128.13 MPa。相比之下，经230℃、240℃和250℃组的抗弯强度分别为124.93 MPa、117.42 MPa和111.45 MPa，分别下降2.08% ($P>0.05$)、4.94% ($P<0.05$)和9.77% ($P<0.05$)。此外，处理材的弯曲模量较对照材没有显著性差异 ($P>0.05$)。

如图6所示，热处理温度升高会引起细胞壁不同程度的微观损伤。230~250℃条件下细胞壁有少量裂纹，并随温度的提高，裂纹呈增大趋势；总体而言尽管，230~250℃高温作用诱发了裂纹的萌生与局部扩展，但细胞壁整体结构并未发生明显塌陷或解体，细胞形态仍保持相对完整。该现象表明，在该温度区间内，结构损伤主要表现为局部微裂纹而非整体结构失稳，因此对细胞壁承载连续性的破坏有限，宏观力学强度未出现显著降低。这种裂纹的产生推测认为起黏结作用的

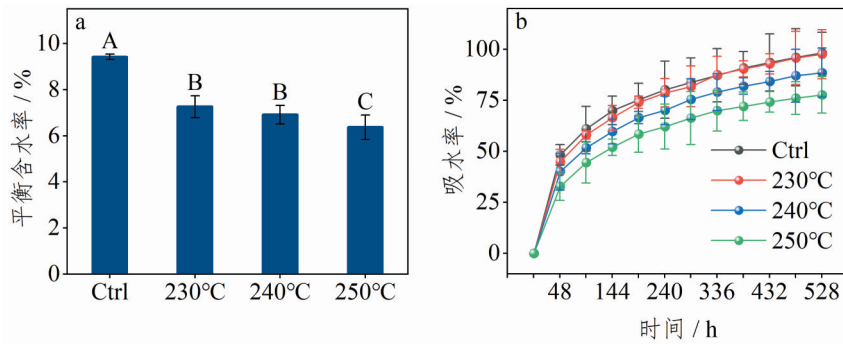


图3 加压热处理前后番龙眼木材的平衡含水率和吸水率

Fig. 3 Equilibrium moisture content and water absorption of *Pometia pinnata* wood before and after pressurized heat treatment

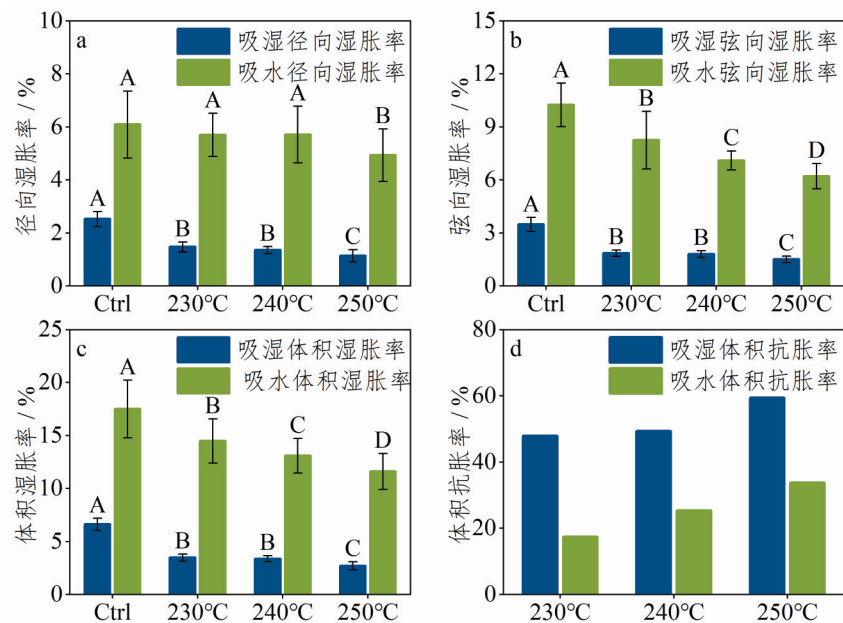


图4 加压热处理前后番龙眼木材的径向湿胀率、弦向湿胀率、体积湿胀率和体积抗胀率

Fig. 4 Radial, tangential, and volumetric swelling, and anti-swelling efficiency of *Pometia pinnata* wood before and after pressurized heat treatment

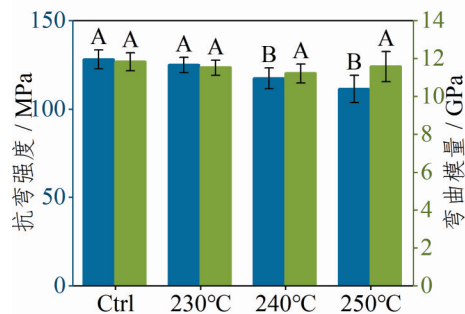


图5 加压热处理前后番龙眼木材的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of *Pometia pinnata* wood before and after pressurized heat treatment

半纤维素被大量降解, 导致细胞壁纤维之间的链接性减弱了, 从而产生了裂纹, 同时, 高温条件

下细胞壁内水蒸气压力增大也会引起细胞壁开裂^[22]。

2.1.4 表面润湿性

为评价热处理后木材的疏水性, 测试了表面润湿性能。如图7a所示, 对照组的木材表面水滴在20 s内完全扩散。相比之下, 经230 °C、240 °C和250 °C处理的木材表面水滴在20 s后仍保持原状, 其中250 °C组效果最为显著, 水滴在60 s后仍近乎半球形, 底面直径变化较小。水接触角随温度升高而增大, 表明表面疏水性增强, 热处理通过降低木材中的半纤维素含量, 并促使木质素与降解产物发生缩合反应形成疏水层, 从而显著提高木材的疏水性能^[23]。未经处理木材的初始接触

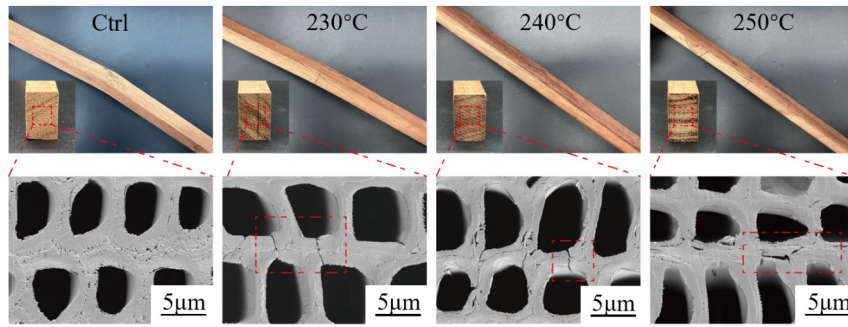
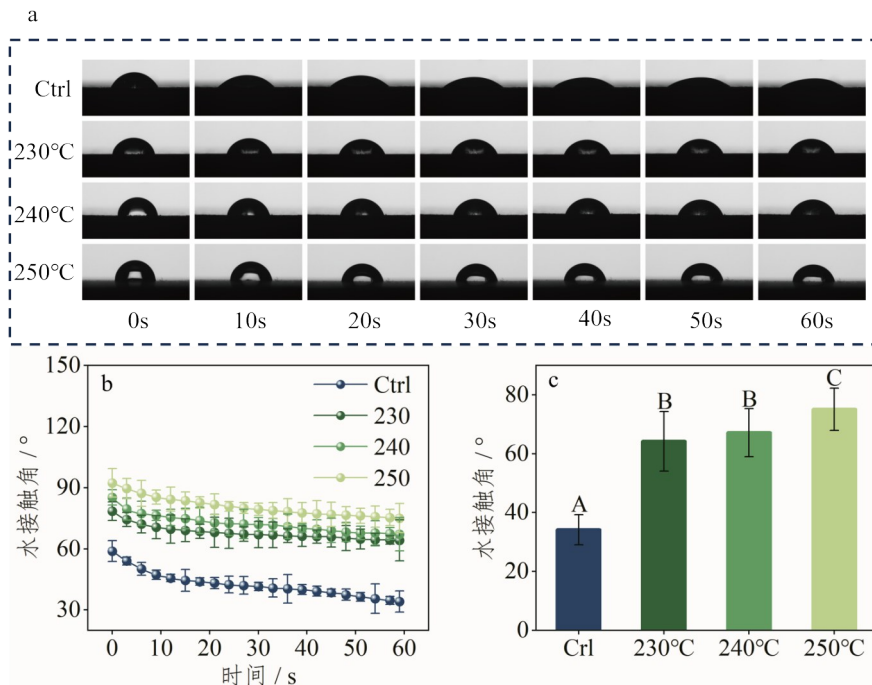


图6 加压热处理前后番龙眼木材的微观形貌

Fig. 6 Microstructure of *Pometia pinnata* wood before and after pressurized heat treatment

角为59°，20 s内迅速降至45°（图7b），在60 s时为34.15°。而热处理木材在230 °C、240 °C和250 °

C下的60 s时分别为64.16°、67.16°和75.05°（图7c）。



a 接触角的动态变化图像, b 接触角动态变化, c 60s时的水接触角。

图7 加压热处理前后番龙眼木材表面润湿性

Fig. 7 Surface wettability of *Pometia pinnata* wood before and after pressurized heat treatment

2.1.5 化学成分与结构

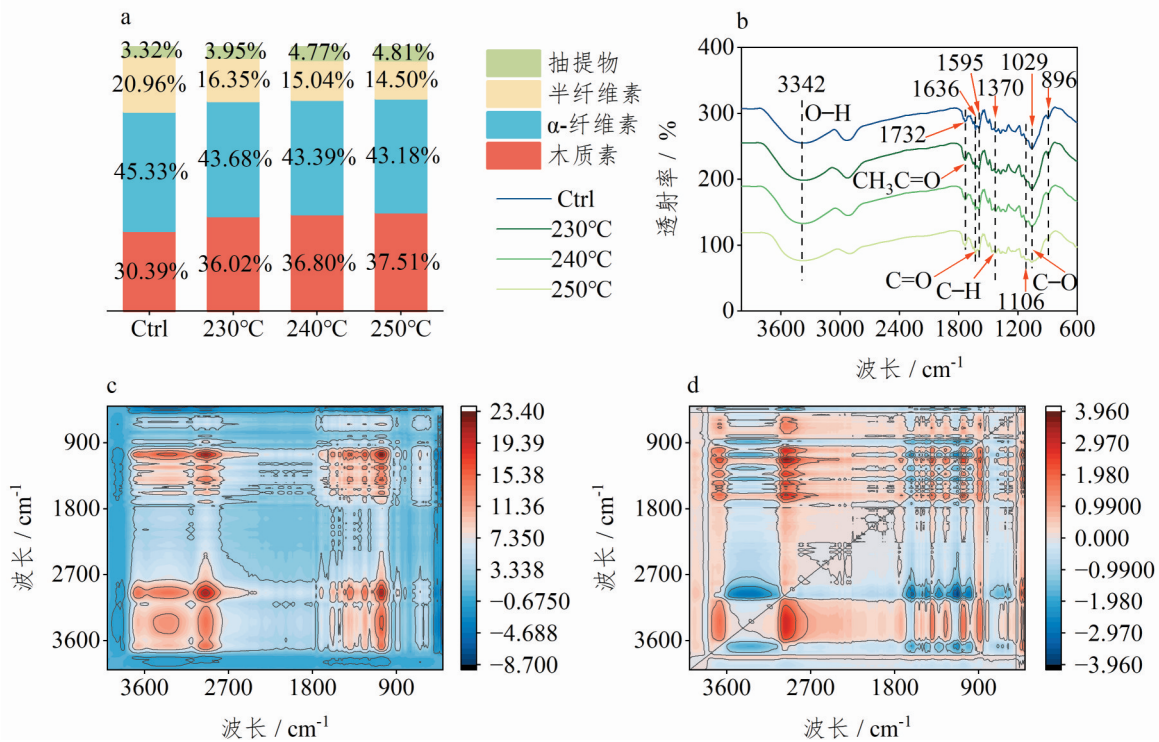
木材热处理过程中发生的化学结构演变会直接决定其宏观性能。如图8a所示，随温度升高，半纤维素显著降解，其含量由20.96%降至14.50%。相比之下，木质素具有较高热稳定性，降解程度较小，其含量由30.39%升至37.52%。该升高主要可归因于：半纤维素减少导致木质素相对比例上升，同时，木质素与降解产物的交联缩合反应，以及综纤维素在热作用下生成“假木质素”等过程^[24]，也可能进一步提升木质素含量，上

述结论与FTIR分析结果一致（图8b）。1595 cm^{-1} 处木质素芳香环C=C伸缩振动峰增强，发生缩合并形成共轭结构，1636 cm^{-1} 处C=O吸收增强亦支持木质素相关结构比例增加。与此同时，3342 cm^{-1} 的-OH吸收与1732 cm^{-1} 的乙酰基（-CH₃C=O）吸收减弱，表明半纤维素发生降解与脱乙酰化并生成乙酸，当温度升至250 °C时，1732 cm^{-1} 的-CH₃C=O峰及896 cm^{-1} 的 β -糖苷键特征峰几近消失，说明半纤维素发生深度降解^[25]。

尺寸稳定性提升源于协同的组分变化，半纤

纤维素发生大量分解, 而木质素基本保持完整, 并通过与降解产物发生交联和缩合反应增强了热稳定性。二维同步红外光谱(图8c)揭示羟基(3342 cm^{-1})与C=O基团存在强相关性, 表明脱水与结构变化同步发生。木质素C=C(1595 cm^{-1})与半纤维素CH₃C=O(1732 cm^{-1})的负相关反映了反向变化, 而纤维素 β -糖苷键(896 cm^{-1})则发生独立变化。异步红外光谱(图8d)显示脱乙酰化反应发生在1732 cm^{-1} 处, 先于1029 cm^{-1} 处的C-O键断裂。此外, 896 cm^{-1} 处指示的纤维素降解发生在木质素交联之后, 这与一维傅里叶变换红外光谱(1D FTIR)的发现一致。转化序列为: 1732 \rightarrow

1595 \rightarrow 1029 \rightarrow 1636 \rightarrow 896 cm^{-1} [26-27]。综合来看, 半纤维素的降解显著减少了细胞壁中亲水性官能团和可吸湿位点, 从而降低了木材对水分的吸附能力并提升其尺寸稳定性[28], 此外, 木质素在高温作用下发生缩合与交联反应, 进一步增强了细胞壁的网络结构完整性。上述化学结构的协同演变不仅有效抑制了水分诱导的干缩湿胀行为, 还有助于维持细胞壁的整体骨架, 从而在尺寸稳定性与疏水性显著提高。总体而言, 这种以半纤维素的降解和木质素交联重构的化学变化, 为在短时热处理条件下实现木材尺寸稳定性与表面性能的协同提升提供了重要支撑。



a 化学成分, b 傅里叶变换红外光谱, c, d 二维同步与异步光谱

图8 加压热处理前后番龙眼木材的化学成分与结构

Fig. 8 Chemical composition and structure of *Pometia pinnata* wood before and after pressurized heat treatment

XRD分析(图9a)表明热处理过程中未发生相变, 然而结晶度从对照材的55.28%分别升至230 $^{\circ}\text{C}$ 、240 $^{\circ}\text{C}$ 和250 $^{\circ}\text{C}$ 时的58.45%、59.21%及62.48%(图9b)。该提升归因于纤维素非结晶区的降解及纤维素链的潜在重排, 形成更多的结晶结构, 抑制了水分渗透, 从而进一步增强了尺寸稳定性[29]。

2.2 薄型地采暖用实木地板性能评价

2.2.1 耐热、耐湿尺寸稳定性

薄型地采暖用实木地板试件的耐热尺寸稳定性测试结果见表2。对照材的含水率为6.78%, 地板的平衡含水率分别为6.33%、6.12%和5.71%, 表明提高热处理温度能显著降低地板的含水率。对照材和处理材的耐热尺寸稳定性均能达到标准GB/T 35913-2018《地采暖用实木地板技术要求》中规定的要求, 而经高温热处理后, 试件的长度

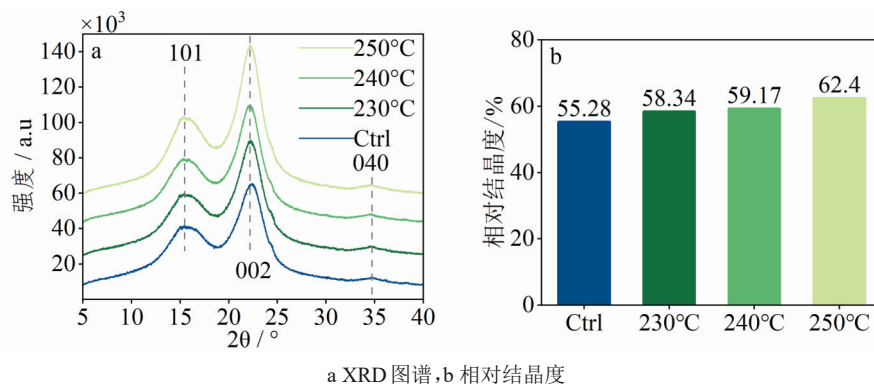


图9 加压热处理前后番龙眼木材的XRD谱图和相对结晶度

Fig. 9 XRD spectra and relative crystallinity of *Pometia pinnata* wood before and after pressurized heat treatment

收缩率和宽度收缩率显著降低 ($P < 0.05$), 这种下降源自经热处理的薄型地采暖用实木地板平衡含水率低于对照材。

同时, 对薄型地采暖用实木地板试件在高湿条件下的耐湿尺寸稳定性进行了测试, 结果见表3, 23 °C 处理材的长度膨胀率和宽度膨胀率分别较对照材降低了 66.66% ($P < 0.05$) 和 68.62% ($P < 0.05$)。当处理温度为 250 °C 时, 长度膨胀率和宽度膨胀率分别较对照材分别降低了 83.33% ($P < 0.05$) 和 82.35% ($P < 0.05$)。上述结果表明, 热处理可显著提升薄型地采暖用实木地板在高湿环境下的尺寸稳定性。综合表中数据可知, 用未处理和热处理后的番龙眼制备成的薄型地采暖用实木地板的耐热和耐湿尺寸稳定性均能满足标准 GB/T 35913-2018 《地采暖用实木地板技术要求》的要求。

表2 番龙眼薄型地采暖用实木地板试件的耐热尺寸稳定性

Table 3 Thermal dimensional stability of *Pometia pinnata* thin solid wood flooring for ground heating system

类型	长度收缩率/%	宽度收缩率/%	含水率/%
Ctrl	0.10±0.024a	0.67±0.031a	6.78±0.63a
230°C	0.08±0.008b	0.34±0.058b	6.33±0.22b
240°C	0.06±0.014c	0.34±0.020b	6.12±0.28bc
250°C	0.03±0.008d	0.21±0.026c	5.71±0.11c

2.2.2 导热效能

从表4可以看出, 薄型地采暖用实木地板试件的导热效能均在 $11 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$, 均高于 GB/T 41547-2022 《地采暖用木质地板》中规定的不低于 $8 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的要求, 说明所有试件在导热性能方面均能够满

表3 番龙眼薄型地采暖用实木地板的耐湿尺寸稳定性

Table 2 Moisture-related dimensional stability of *Pometia pinnata* thin solid wood flooring for ground heating system

类型	长度膨胀率/%	宽度膨胀率/%	含水率/%
Ctrl	0.06±0.006a	0.41±0.017a	6.78±1.01a
230°C	0.02±0.003b	0.16±0.014b	6.33±0.45b
240°C	0.02±0.004b	0.14±0.011c	6.12±0.64bc
250°C	0.01±0.001c	0.09±0.007d	5.71±0.21c

足地采暖地板的使用标准。表明热处理温度的提高并未对导热性能产生明显不利影响。

表4 番龙眼薄型地采暖用实木地板的导热效能

Table 4 Thermal conductivity of *Pometia pinnata* thin solid wood flooring for ground heating system

类型	导热效能/ $^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$
Ctrl	11
230°C	11
240°C	11
250°C	11
15mm 250°C 热处理地板	11
17mm 250°C 热处理地板	11

2.2.3 漆膜性能

根据表5所示, 薄型地采暖用实木地板试件的漆膜性能无差异 ($P > 0.05$), 漆膜性能主要是由漆膜本身质量所决定, 热处理未对地板漆膜产生不利的影响, 因此所有试件的漆膜附着力、硬度、磨损量均满足 GB/T 15036-2018 《实木地板技术要求》标准中优等品的技术要求。

3 结论

1) 本研究以番龙眼木材为原料, 通过高温热处理提高其尺寸稳定性, 结果表明, 230~250 °C

表5 番龙眼薄型地采暖用实木地板试件的漆膜性能
Table 5 Surface coatings of *Pometia pinnata* thin solid wood flooring for ground heating system

类型	附着等级	硬度等级	磨损量/g
Ctrl	0级	5H	0.20±0.011a
230°C	0级	5H	0.20±0.014a
240°C	0级	5H	0.20±0.010a
250°C	0级	5H	0.20±0.005a

热处理材的平衡含水率较对照材降低了 22.93~32.38% ($P<0.05$)，吸水率显著降低，吸湿和吸水径向湿胀率由对照组的 2.52% 和 6.09% 降至 1.14% ($P<0.05$) 和 4.93% ($P<0.05$)，吸湿和吸水弦向湿胀率由对照组的 3.48% 和 10.25% 降至 1.51% ($P<0.05$) 和 6.21% ($P<0.05$)，，体积湿胀率显著降低 ($P<0.05$)，吸湿和吸水体积抗胀率最大为 59.29% 和 33.69%。热处理导致的细胞壁亲水基团减少和结晶度提高是尺寸稳定性提升的重要原因。

2) 制备的薄型地采暖用实木地板耐湿尺寸稳定性 (长/宽度膨胀率) 分别为 0.02%/0.16%、0.02%/0.14% 和 0.01%/0.09%，耐热尺寸稳定性 (长/宽度收缩率) 分别为 0.08%/0.34%、0.06%/0.34% 和 0.03%/0.21%，耐湿和耐热尺寸稳定性较对照组均显著提高 ($P<0.05$)。导热效能均达到 $11\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ，尺寸稳定性和导热效能符合 GB/T 35913-2018《地采暖用实木地板技术要求》和 GB/T 41547-2022《地采暖用木质地板》要求。

3) 制备的薄型地采暖用实木地板的漆膜附着力达到 0 级、硬度为 5H，磨损量为 0.20 g，均符合 GB/T 15036-2018《实木地板技术要求》中优等品的技术要求。

参考文献:

[1] 张艳. 生活方式对开封城市家庭采暖碳排放的影响[J]. 地理科学进展, 2013, 32(7): 1072-1081.
ZHANG Y. Lifestyle's impact on carbon emissions from urban households' space heating: a case study of Kaifeng City[J]. Progress in Geography, 2013, 32(7): 1072-1081.

[2] 高晶晶, 韦崖灯, 何正斌, 等. 不同热处理工艺对实木地板材色和尺寸稳定性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(2): 93-96.
GAO J J, WEI Y D, HE Z B, et al. Effect of different heat treatment processes on color and dimensional stability of solid wood flooring[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(2): 93-96.

[3] 罗明明. 地热地板的选用及保养[J]. 青年文学家, 2009(19): 245.
LUO M M. Selection and maintenance of geothermal floor[J]. Youth Literator, 2009(19): 245.

[4] 何金存, 张妍, 周志芳, 等. 地采暖用木质地板尺寸稳定性研究进展

[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(3): 200-201, 215.
HE J C, ZHANG Y, ZHOU Z F, et al. Research progress on dimensional stability of wooden floor for heating[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(3): 200-201, 215.

[5] 地采暖用实木地板铺装、验收及使用规范: T/WJDB 003—2018[S].

[6] 王聚颜. 木材变形开裂及其预防[J]. 陕西林业科技, 1989, 17(1): 59-62.
WANG J Y. Wood deformation and cracking and its prevention[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 1989, 17(1): 59-62.

[7] 顾炼百, 李涛, 涂登云, 等. 超高温热处理实木地板的工艺及应用[J]. 木材工业, 2007, 21(3): 4-7.
GU L B, LI T, TU D Y, et al. Technology and application on heat-treated solid wood flooring[J]. China Wood Industry, 2007, 21(3): 4-7.

[8] 孔繁旭, 王艳伟, 何啸宇, 等. 热处理国产柚木地板用材物理性能及工艺研究[J]. 林产工业, 2021, 58(11): 8-15.
KONG F X, WANG Y W, HE X Y, et al. Research on physical properties and technology of heat treated domestic teak geothermal floor materials[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(11): 8-15.

[9] 孔繁旭, 王艳伟, 何啸宇, 等. 加压蒸汽热处理提升地木地板坯料尺寸稳定性的处理方式研究[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(12): 45-51.
KONG F X, WANG Y W, HE X Y, et al. Research on the methods of improving dimensional stability of geothermal floor blanks through steam heat treatment above atmospheric pressure[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(12): 45-51.

[10] 周玲玲. 橡木实木地木地板制造技术[J]. 中国人造板, 2018, 25(10): 22-25.
ZHOU L L. Manufacturing technology of oak solid wood flooring for ground with heating system[J]. China Wood-Based Panels, 2018, 25(10): 22-25.

[11] 黄玲玲, 尚子剑, 姜志华, 等. 实木复合地板在地热辐射采暖环境中的尺寸稳定性[J]. 森林工程, 2016, 32(6): 38-43.
HUANG L L, SHANG Z J, JIANG Z H, et al. The dimension stability of solid wood parquet flooring in the radiant floor heating environment [J]. Forest Engineering, 2016, 32(6): 38-43.

[12] 宋建月. 新型木质复合地木地板结构及热性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.

[13] CHEN C F, FAN Q, ZHOU H Y, et al. Rapid production of high-performance unilaterally surface-densified wood through integrating mechanical compression and thermochemical modification[J]. Construction and Building Materials, 2024, 453: 139014.

[14] LING C S, CAI C Y, XIONG X Q, et al. Effects of heating media on microstructure and chemical composition of heat-treated *Pometia pinnata*[J]. BioResources, 2024, 19(4): 7320-7338.

[15] WANG Y R, SU M L, SUN H Y, et al. Comparative studies on microstructures and chemical compositions of cell walls of two solid wood floorings[J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(5): 501-508.

[16] SEGAL L, CREELY J J, MARTIN A E JR, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. Textile Research Journal, 1959, 29(10): 786-794.

[17] YANG H P, YAN R, CHEN H P, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis[J]. Fuel, 2007, 86(12/13): 1781-1788.

[18] JIANG J X, LI J Z, GAO Q. Effect of flame retardant treatment on dimensional stability and thermal degradation of wood[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 74-81.

[19] 马尔妮, 王瑜瑶, 李京予, 等. 水分对木材细胞壁孔隙结构影响研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 1-8.
MA E N, WANG Y Y, LI J Y, et al. Research progress on the effect of water on pore structure of wood cell wall[J]. Journal of Beijing

- Forestry University, 2024, 46(2): 1-8.
- [20] 何露茜, 张天放, 阮智勇, 等. 高温热处理对三种热带阔叶木材颜色和尺寸稳定性的影响[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(2): 25-34.
HE L X, ZHANG T F, RUAN Z Y, et al. Effect of high-temperature heat treatment on color and dimensional stability of three tropical hardwoods[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(2): 25-34.
- [21] ČERMÁK P, SUCHOMELOVÁ P, HESS D. Swelling kinetics of thermally modified wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021, 79(5): 1337-1340.
- [22] WANG P, HOWARD B H. Impact of thermal pretreatment temperatures on woody biomass chemical composition, physical properties and microstructure[J]. Energies, 2018, 11(1): 25.
- [23] BODÎRLĂU R, TEACĂ C A, SPIRIDON I. Chemical modification of beech wood: Effect on thermal stability[J]. BioResources, 2008, 3(3): 789-800.
- [24] LIU S M, RAN Y Y, CAO J Z. Comparison on thermally modified beech wood in different mediums: Morphology, chemical change and water-related properties[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 209: 117935.
- [25] 李红晨, 杨洋, 霍鸿飞, 等. 水热处理黄杨木的成分变化分析[J]. 林产工业, 2022, 59(4): 14-19.
LI H C, YANG Y, HUO H F, et al. Analysis of composition changes of boxwood by hydrothermal treatment[J]. China Forest Products Industry, 2022, 59(4): 14-19.
- [26] 侯磊, 武培怡. 二维相关红外光谱分析技术在高分子表征中的应用[J]. 高分子学报, 2022, 53(5): 522-538.
HOU L, WU P Y. Applications of two-dimensional correlation infrared spectroscopy in the characterization of polymers[J]. Acta Polymerica Sinica, 2022, 53(5): 522-538.
- [27] CHENG A K, HUANG J W, LIN X Y, et al. A clean and novel drying method for bamboo colorization and in-situ surface wax utilization[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119885.
- [28] TANG J, ZHAN T Y, LI Z, et al. Optimization of dimensional stability and mechanical performance of thermally modified wood using cyclic-gradient thermal treatment[J]. Construction and Building Materials, 2025, 458: 139596.
- [29] SWEYGERS N, DEPUYDT D E C, EYLEY S, et al. Prediction of the equilibrium moisture content based on the chemical composition and crystallinity of natural fibres[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 186: 115187.