

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026022

加压热处理地采暖用薄型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: 为解决地采暖用薄型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12 mm厚番龙眼(*Pometia pinnata*)木材为研究对象, 先采用230、240和250 °C加压热处理7 min的方法对其改性, 再制备地采暖用薄型实木地板。评价热处理木材的质量损失、化学结构、表面润湿性、尺寸稳定性、力学性能, 以及地板的尺寸稳定性、导热效能和漆膜性能。结果表明, 加压热处理对木材的质量损失率影响较小, 250 °C处理材的质量损失率仅2.47%; 加压热处理对木材的平衡含水率、吸水率、湿胀率有显著影响($P < 0.05$), 随着热处理温度升高, 木材平衡含水率、吸水率、湿胀率降低, 这是因为加压热处理导致木材亲水性官能团、吸湿位点减少以及纤维素结晶度的增加; 不同温度加压热处理虽然引起细胞壁不同程度的微观损伤, 但对木材力学性能影响较小。3种温度热处理木材制备地板的耐湿、耐热尺寸稳定性较对照组显著提高($P < 0.05$), 符合GB/T 35913—2018《地采暖用实木地板技术要求》; 导热效能均达到11 °C·h⁻¹, 符合GB/T 41547—2022《地采暖用木质地板》技术要求; 漆膜附着力、硬度及耐磨性能与对照组无显著性差异, 符合GB/T 15036—2018《实木地板第1部分: 技术要求》优等品技术要求。

关键词: 薄型实木地板; 地采暖; 番龙眼木材; 加压热处理; 尺寸稳定性; 导热效能

中图分类号: S781.7; TS652 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 02-0058-11

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

TANG Nanchang¹, LIANG Dongdong¹, LI Wanju², XIE Guijun², CHENG Aokai¹,
YAN Zhisong³, 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 Academy of Forestry, Guangzhou 510642, Guangdong, China;

3. Zhejiang Shiyu Timber Company Limited, Huzhou 313009, Zhejiang, China)

Abstract: To address the insufficient dimensional stability of thin solid wood flooring for ground heating system, including gaps, warping, cracking, and cupping caused by changes in ambient humidity. 12 mm thick *Pometia pinnata* wood was used as the material, pressure heat treatment was carried out at 230 °C, 240 °C, and 250 °C for 7 min to modify the wood, which was then fabricated into thin solid wood flooring

收稿日期: 2026-02-03; 修改日期: 2026-02-26

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)。

作者简介: 唐南畅(2001—), 男, 硕士研究生。Email: nancoengtang@163.com

通讯作者: 涂登云, 男, 教授。Email: tudengyun@scau.edu.cn

for ground heating system. The mass loss rate, chemical structure changes, surface wettability, dimensional stability, and mechanical properties of the wood, as well as the dimensional stability, thermal conductivity, and coating properties of the flooring, were evaluated. The results showed that pressure heat treatment had only a minimal effect on the mass loss rate of the wood, with the mass loss rate remaining below 2.47% even at 250 °C. Pressurized heat treatment significantly reduced the equilibrium moisture content, water absorption, and swelling rate of the wood ($P<0.05$), and these values decreased with increasing treatment temperature. This was attributed to the reduction in hydrophilic functional groups and moisture adsorption sites, as well as the increase in cellulose crystallinity induced by pressure heat treatment. In addition, pressure heat treatment at different temperatures caused varying degrees of microscopic damage to the cell walls, but had little effect on the mechanical properties of the wood. Compared with the control group, the test flooring exhibited significantly improved moisture-resistant and heat-resistant dimensional stability ($P<0.05$), meeting the requirements of the Chinese Standard GB/T 35913—2018 “*Technical requirements of solid wood flooring for ground with heating system*”. The thermal conductivity reached $11\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$, satisfying the technical requirements of the Chinese Standard GB/T 41547—2022 “*Wood-based flooring for underfloor heating*”. The coating adhesion, hardness, and wear resistance showed no significant differences from those of the control group and met the premium-grade requirements specified in the Chinese Standard GB/T 15036—2018 “*Solid wood flooring-Part 1: Technical requirements*”.

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

在北方地区,地采暖是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^[2-3]。目前,市场上地采暖用实木地板的常规厚度为15~18 mm。较大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,同时也不利于地采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。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,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]。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》,通常将地采暖用实木地板的含水率控制在5%到各地区的木材平衡含水率之间。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^[8-10]。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的尺寸稳定性问题,有必要对木材进行尺寸稳定化改性。前期研究表明,采用220~270 °C的加压热处理对毛白杨(*Populus tomentosa*)进行处理,可显著提高木材尺寸稳定性,说明利用热压法进行木材高温热改性具有可行性^[11]。本研究选取番龙眼

(*Pometia pinnata*) 木材作为研究对象。番龙眼木材虽然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^[12-13]。针对其材性特点, 采用 230~250 ℃ 加压热处理对 12 mm 厚番龙眼木材进行热处理, 并将其制备成地采暖用薄型实木地板, 分析热处理对番龙眼木材尺寸稳定性等理化性能的影响, 并对地板的耐热和耐湿尺寸稳定性、导热效能、漆膜性能进行评价, 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±0.03 g/cm³, 初始含水率为 10%~13%, 由浙江世友木业有限公司提供。筛选颜色相似、纹理相近, 且无裂纹、虫蛀等明显缺陷的试样。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 1 组为对照材。

底漆与面漆为水性 UV 漆, 由浙江世友木业有限公司提供, 底漆黏度为 100~200 mPa·s, 面漆黏度为 1 000~2 000 mPa·s。

1.2 仪器与设备

木材高温干燥实验箱、高低温湿热试验箱、高温热压机 (LE-6170-B)、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)、傅里叶变换红外光谱仪 (TENSOR27)、滴液分析仪 (DSA100 HP) 等。

1.3 试验方法

1.3.1 木材干燥 采用木材高温干燥实验箱对番龙眼木材进行干燥。干燥工艺列于表 1, 为避免干燥过程中产生开裂, 首先对番龙眼木材进行低温预热, 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 试样干燥完成后, 于厚度方向中心位置钻孔, 并将热电偶埋设于孔内,

表 1 12 mm 番龙眼木材干燥工艺

Tab.1 Drying schedule for 12 mm *Pometia pinnata* wood

阶段	干球温度/℃	湿球温度/℃	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	至含水率 3%~5%	

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 ℃ 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。结果表明, 当时间达到 430 s 时, 试样中心层温度已升至 230 ℃。因此, 综合升温过程及温度稳定情况, 研究确定热处理时间为 420 s (7 min)。

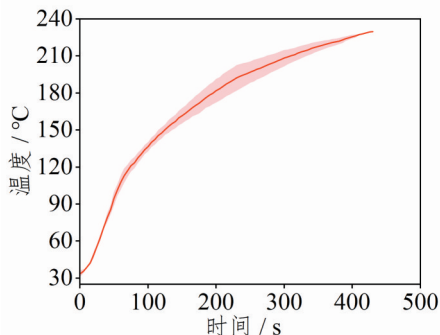


图 1 230 ℃ 加压热处理下番龙眼木材中心温度
Fig.1 Core temperature of *Pometia pinnata* wood during pressure heat treatment at 230 ℃

1.3.3 木材热处理 采用高温热压机对干燥后的试样进行热处理, 温度条件根据前期试验确定为 230、240、250 ℃; 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, 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 ℃, 并取出试样。

1.3.4 木材含水率调节 将热处理的试样放入木材高温干燥实验箱中在干球温度为 55 ℃、湿球温

度为50℃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℃、湿球温度为41℃条件下, 控制含水率为6%~8%。

1.3.5 地采暖用薄型实木地板制备 按企业生产工艺, 采用水性UV漆两底一面涂饰工艺。涂饰前, 对照材和热处理木材表面经320目压辊带式砂光机砂光, 砂光量约0.5 mm, 并彻底除尘。随后采用辊涂方式施涂UV底漆并进行紫外线固化; 固化后进行砂光, 再施涂第二道底漆并固化, 最后涂覆一道UV面漆并经紫外线固化完成涂饰。各涂层涂布量控制在80~120 g/m²。每组制备试样6块, 涂饰后地板试样尺寸为500 mm (纵) ×160 mm (径) ×12 mm (弦)。

1.4 性能测试

1.4.1 番龙眼木材性能测试

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

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

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

采用热重分析仪番龙眼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℃/min的升温速率从室温加热至600℃。

2) 化学结构。将试样表层研磨成40~60目木粉, 用于化学成分和结晶度测定。

抽提物含量按GB/T 35818—2018《林业生物原料分析方法 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—2004《纸浆 抗碱性的测定》和GB/T 2677.8—1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》测定。

官能团采用标准傅里叶变换红外光谱仪进行测定。将1 mg样品与100 mg溴化钾混合, 在透射模式下以2 cm⁻¹分辨率扫描32次, 波数范围覆盖4 000~400 cm⁻¹。

相对结晶度采用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CuKα

辐射源。扫描范围为5°~45°, 扫描速率为4°/min。相对结晶度 (CrI) 采用Segal法^[14]根据公式(2)计算。

$$CrI = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100\% \quad (2)$$

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, 代表木材中的非结晶部分。

3) 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。

4) 尺寸稳定性。吸水尺寸稳定性和吸湿尺寸稳定性测试均依据GB/T 1927.8—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第8部分: 湿胀性测定》进行。由于木材厚度限制, 样品尺寸为20 mm (纵) ×20 mm (径) ×12 mm (弦), 每组制备18个试件。

5) 抗弯强度和抗弯弹性模量。采用万能力学试验机进行测试。试样尺寸230 mm (纵) ×20 mm (径) ×12 mm (弦), 共4组, 每组18块, 其中1组为对照组, 并在20℃、RH 65%条件下调湿处理直至达到质量平衡。测试过程中, 因试件厚度未达到GB/T 1927.9—2021和GB/T 1927.10—2021中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。同时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。

1.4.2 地采暖用薄型实木地板性能测试

1) 耐湿和耐热尺寸稳定性。按照GB/T 35913—2018《地采暖用实木地板技术要求》进行测试。将对照材和热处理试样锯成200 mm (纵) ×60 mm (径) ×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1组为对照材。

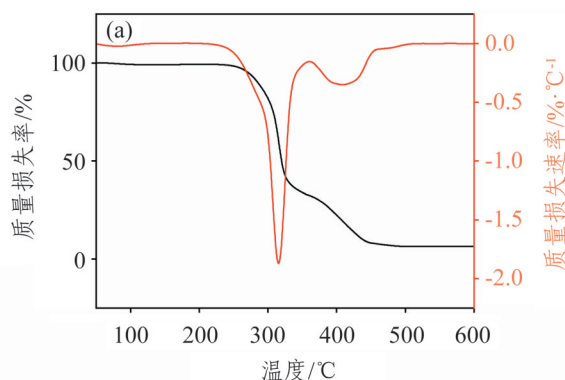
2) 导热效能。根据标准GB/T 41547—2022《地采暖用木质地板》, 测试地采暖用薄型实木地

板的导热效能。试件尺寸为100 mm (纵)×60 mm (径)×12 mm (弦),共4组,每组1片,其中1组为对照材。

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》测试地采暖用薄型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样为6个,结果取平均值。

1.5 统计分析

采用SPSS软件进行统计分析。各组数据以均值±标准差表示。不同处理组之间的显著性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,相同小写字母表示差异无统计学意义($P>0.05$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。



2 结果与分析

2.1 番龙眼木材性能分析

2.1.1 质量损失 由TG曲线可知(图2a),番龙眼木材的热降解分为三个阶段:初始阶段温度范围为200~250 °C,木材质量损失约7.9%,主要归因于半纤维素的脱水和炭化^[15]。第二阶段温度范围为250~330 °C,质量损失约60%,表明木材组分发生明显热降解。在此阶段,热解过程主要由纤维素主导,包括脱水、分子重排和热解反应,导致质量损失,并生成CO、左旋葡萄糖及可燃性焦油。第三阶段温度范围为330~450 °C,热降解以木质素为主导^[16]。TG分析说明250 °C热处理不会造成木材严重的质量损失。经230、240和250 °C热处理7 min后,番龙眼木材的质量损失率平均值分别为1.16%、1.72%和2.47%,处在较低水平,说明本研究采用的热处理温度和时间不会造成木材严重降解,有利于保持木材力学性能。

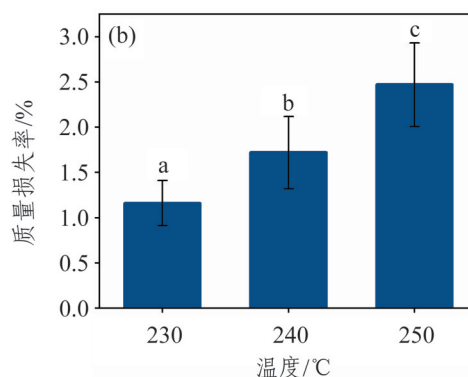


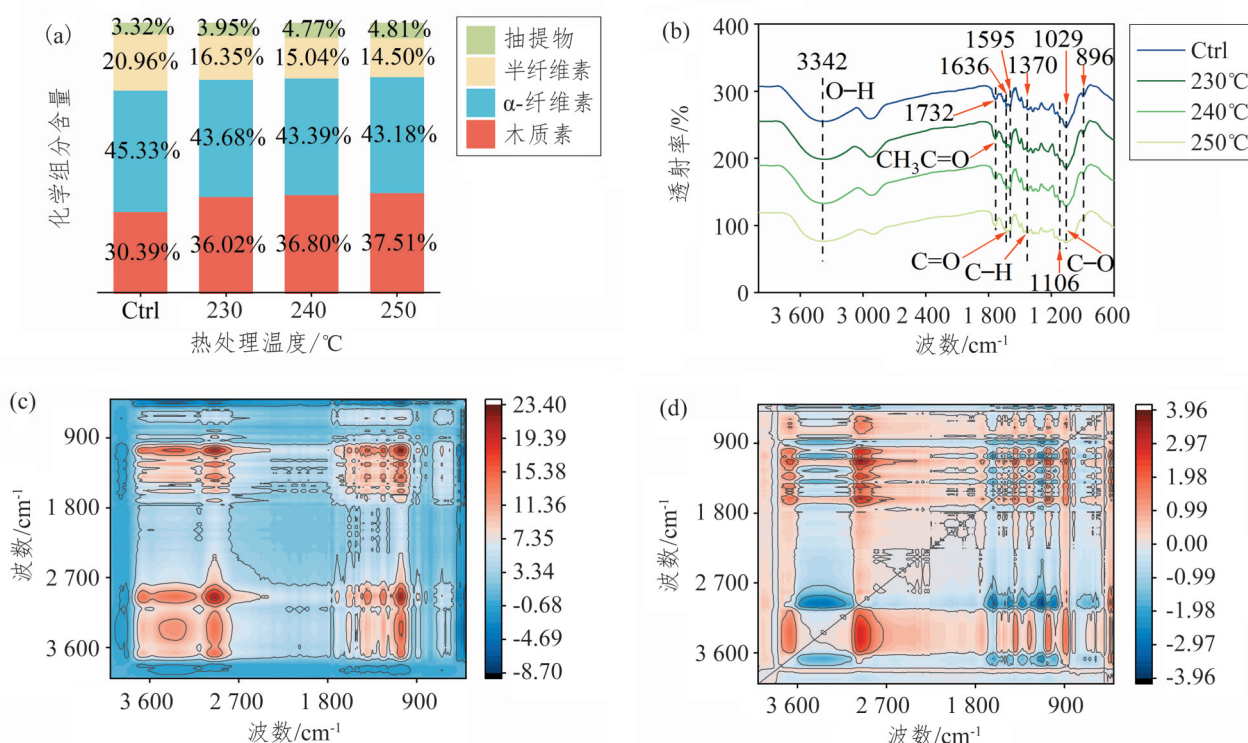
图2 番龙眼加压热处理前的热重曲线和处理后的质量损失

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

2.1.2 化学成分与结构 木材热处理过程中发生的化学结构演变直接决定其宏观性能。如图3a所示,随温度升高,半纤维素显著降解,其含量由20.96%降低至14.50%。相比之下,木质素具有较高的热稳定性,其含量由30.39%上升至37.51%。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”过程^[17]。FTIR 分析结果也证实了这点(图3b)。1 595 cm^{-1} 处木质素芳香环C=C伸缩振动峰增强,1 636 cm^{-1} 处C=O吸收增强亦支持木质素相关结构比例增加。3 342 cm^{-1} 的—OH吸收与1 732 cm^{-1}

的乙酰基($-\text{CH}_3\text{C}=\text{O}$)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,1 732 cm^{-1} 的 $-\text{CH}_3\text{C}=\text{O}$ 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^[18]。

木材尺寸稳定性提升源于协同的组分变化,半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3c)揭示羟基(3 342 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(1 595 cm^{-1})与半纤维素 $\text{CH}_3\text{C}=\text{O}$ (1 732 cm^{-1})



注:a 化学组分,b 傅里叶变换红外光谱,c,d 二维同步与异步光谱。

图3 加压热处理前后番龙眼木材的化学组分与结构

Fig.3 Chemical composition and structure of *Pometia pinnata* wood before and after pressure heat treatment

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3d)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。 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: $1732\rightarrow 1595\rightarrow 1029\rightarrow 1636\rightarrow 896\text{ cm}^{-1}$ [19-20]。综合来看,半纤维素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[21],这将有助于提升木材的尺寸稳定性。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,从而提升木材尺寸稳定性。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。

XRD分析(图4a)表明热处理过程中未发生

相变,然而,对照材的相对结晶度为55.28%,230、240、250 $^{\circ}\text{C}$ 热处理木材的相对结晶度提升至58.34%、59.17%、62.40%(图4b)。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,形成更多结晶结构,可抑制水分渗透,有利于增强木材尺寸稳定性[22]。

2.1.3 表面润湿性 如图5a和图5b所示,木材表面水接触角均随时间延长而逐渐降低。对照组试样水滴在20 s内迅速铺展并被吸收,而热处理试样组在20 s后仍保持较完整形态,其中250 $^{\circ}\text{C}$ 热处理试样最明显,水滴在60 s时仍接近半球形。随着热处理温度升高,木材表面水接触角逐渐增大,表明其疏水性增强。这主要归因于热处理过程中半纤维素降解导致亲水性羟基减少,同时木质素及其降解产物发生缩合反应,在木材表面形成相对疏水的结构层[23]。从图5c可以看出,热处理试样在60 s时的水接触角显著高于对照组试样($P<0.05$),木材疏水性的提升有利于增强木材的尺寸稳定性。

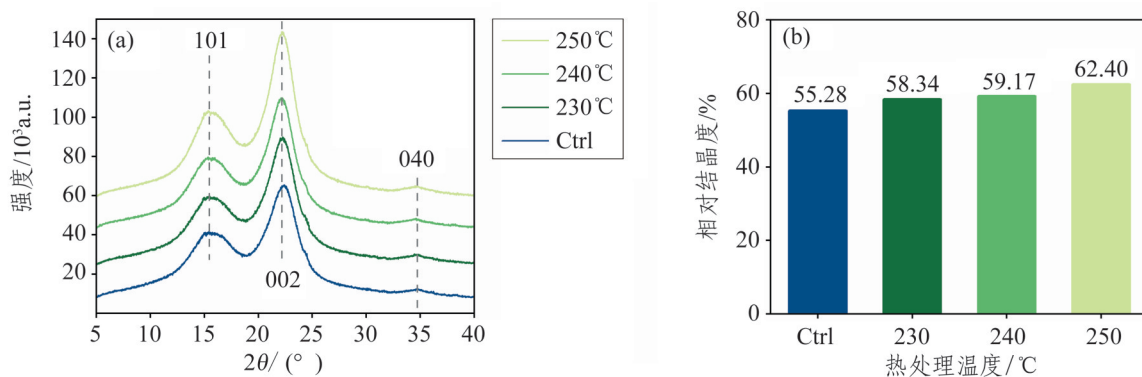
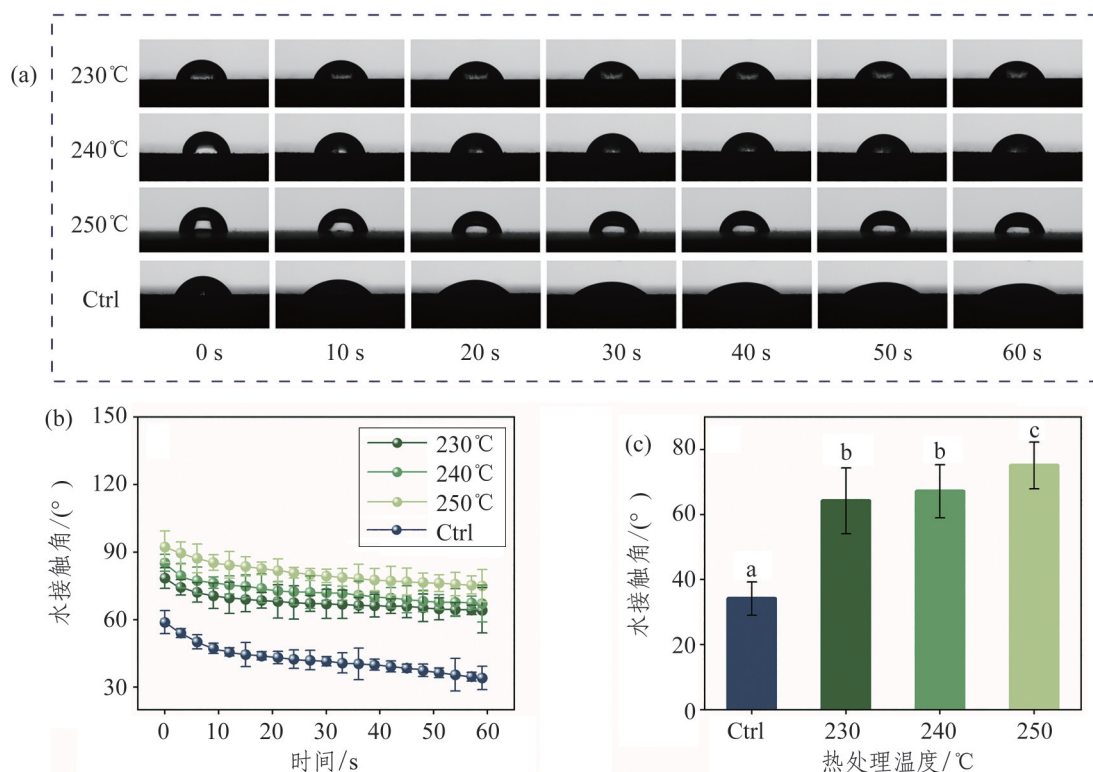


图4 加压热处理前后番龙眼木材的XRD谱图和相对结晶度

Fig.4 XRD spectra and relative crystallinity of *Pometia pinnata* wood before and after pressure heat treatment

注:a 接触角的动态变化图像,b 接触角动态变化,c 60 s时的水接触角。

图5 加压热处理前后番龙眼木材表面润湿性

Fig.5 Surface wettability of *Pometia pinnata* wood before and after pressure heat treatment

2.1.4 尺寸稳定性 不同温度热处理番龙眼木材的吸湿性和吸水性测试结果如图6所示。由图6a可知, 热处理温度对番龙眼木材的平衡含水率有显著影响 ($P<0.05$), 平衡含水率随热处理温度升高降低, 表明木材发生化学变化, 吸湿性减弱。由图6b可知, 试件在前48 h吸水速率较快, 主要与水分进入木材孔隙有关^[24]。对照材的48 h吸水率为48.30%, 经热处理后, 试件吸水率显著降低, 且

随热处理温度升高呈下降趋势, 与何露茜等^[25]的研究结果一致。

热处理前后番龙眼试件的吸湿与吸水湿胀率如图7所示。由图7a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 °C处理后降至1.47%和5.70%, 在250 °C时进一步降至1.14%和4.93%。如图7b所示, 对照材吸湿和吸水

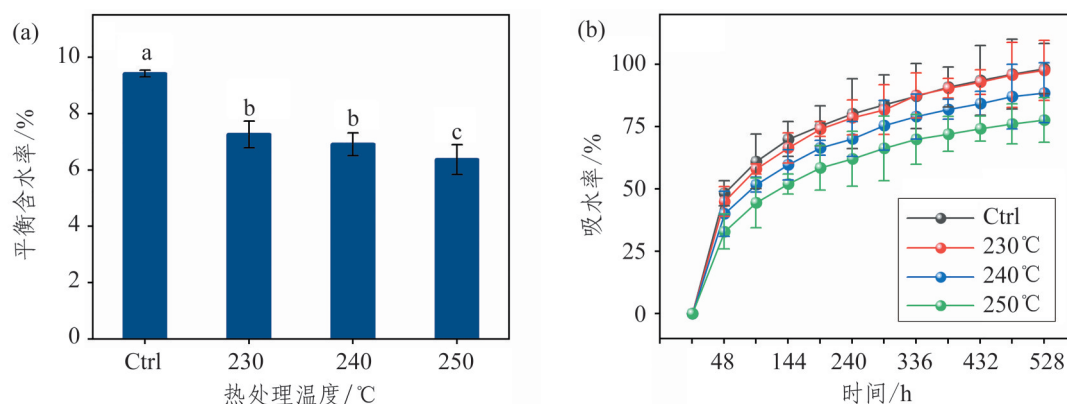


图6 加压热处理前后番龙眼木材的平衡含水率和吸水率

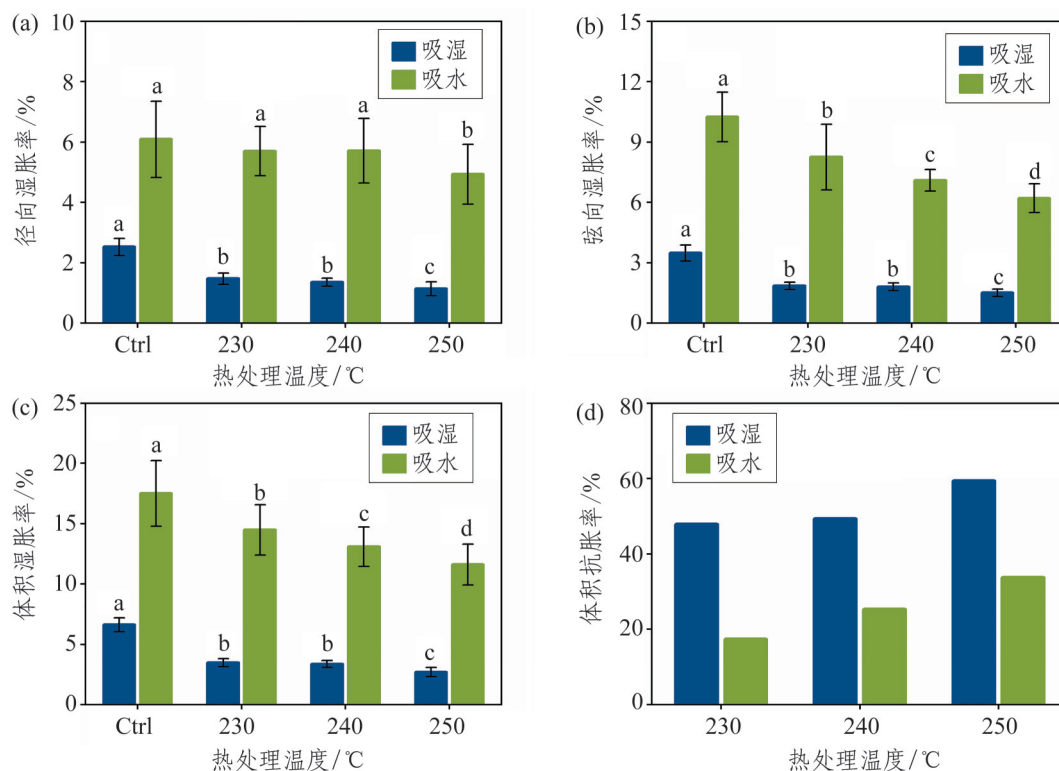
Fig.6 Equilibrium moisture content and water absorption of *Pometia pinnata* wood before and after pressure heat treatment

图7 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.7 Radial, tangential, and volumetric swelling, and anti-swelling efficiency of *Pometia pinnata* wood before and after pressure heat treatment

弦向湿胀率分别为3.48%和10.25%，热处理后降低，在250 °C时达到最低，分别为1.51%和6.21%，体积湿胀率的变化趋势与弦向结果一致（图7c），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7d），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 °C热处理木材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^[26]。

2.1.5 力学性能 如图8所示，对照材的抗弯强度为128.13 MPa。相比之下，230、240和250 °C热处理木材的抗弯强度分别为124.93、117.42和

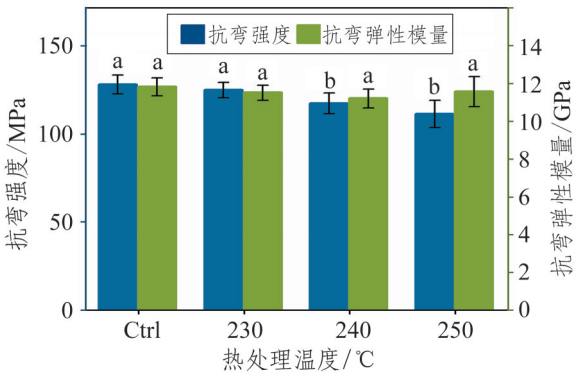


图8 加压热处理前后番龙眼木材的力学性能
Fig.8 Mechanical properties of *Pometia pinnata* wood before and after pressure heat treatment

111.45 MPa，分别下降2.08%、4.94%和9.77%，仅240和250 °C热处理材的抗弯强度较对照组有显著

性差异 ($P<0.05$)。抗弯弹性模量较对照材没有显著性差异 ($P>0.05$)。

如图9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 °C~250 °C处理条件下细胞壁有少量裂纹，并随温度的提高呈增大趋势，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^[27]。

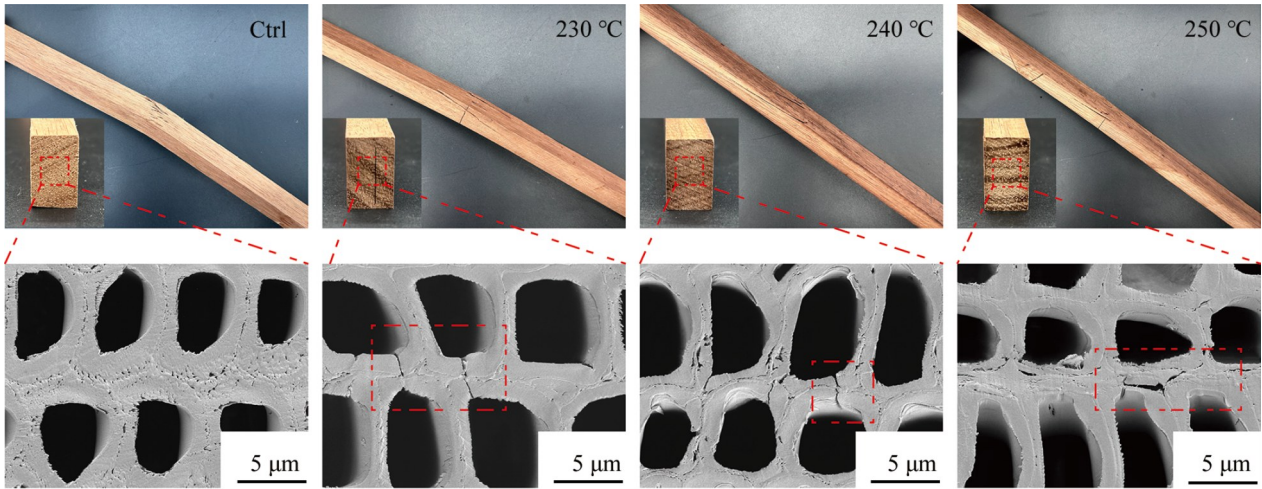


图9 加压热处理前后番龙眼木材的微观形貌
Fig. 9 Microstructure of *Pometia pinnata* wood before and after pressure heat treatment

2.2 地采暖用薄型实木地板性能评价

2.2.1 耐热、耐湿尺寸稳定性 地采暖用薄型实木地板试样的耐热尺寸稳定性测试结果列于表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%，热处理温度能显著降低地板的平衡含水率 ($P<0.05$)。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》的要求，而经高温热处理后，地板的长度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地采暖用薄型实木地板平衡含水率低于对照材。

地板试样在高湿条件下的尺寸稳定性测试结果列于表3，长度和宽度膨胀率受热处理温度的影

表2 番龙眼地板试样的耐热尺寸稳定性

Tab.2 Thermal dimensional stability of *Pometia pinnata* wood flooring

热处理温度/°C	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	0.08±0.008b	0.34±0.058b	6.33±0.22b
240	0.06±0.014c	0.34±0.020b	6.12±0.28bc
250	0.03±0.008d	0.21±0.026c	5.71±0.11c

响显著 ($P<0.05$)，随着处理温度的升高而降低。因此，热处理可显著提升地采暖用薄型实木地板在高湿环境下的尺寸稳定性。尽管对照组地板的耐热和耐湿尺寸稳定性满足 GB/T 35913—2018 的要求，但热处理地板的耐湿尺寸稳定性更优。

表3 番龙眼地板试样的耐湿尺寸稳定性
Tab.3 Moisture-related dimensional stability of *Pometia pinnata* wood flooring

热处理温度/℃	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	0.02±0.003b	0.16±0.014b	6.33±0.45b
240	0.02±0.004b	0.14±0.011c	6.12±0.64bc
250	0.01±0.001c	0.09±0.007d	5.71±0.21c

2.2.2 导热效能 所有地板试样的导热效能均为11℃·h⁻¹，高于GB/T 41547—2022《地采暖用木质地板》不低于8℃·h⁻¹的要求，能够满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。

2.2.3 漆膜性能 由表4结果可知，地板试样的漆膜性能无差异（*P*>0.05），说明热处理未对地板漆膜产生不利影响，所有试样的漆膜附着力、硬度、磨损量均满足GB/T 15036—2018优等品要求。

表4 番龙眼地板试样的漆膜性能
Tab.4 Surface coatings of *Pometia pinnata* wood flooring

热处理温度/℃	附着力等级	硬度等级	磨损量/g
Ctrl	0级	5H	0.20±0.011a
230	0级	5H	0.20±0.014a
240	0级	5H	0.20±0.010a
250	0级	5H	0.20±0.005a

3 结论

1) 以12 mm厚番龙眼木材为研究对象，采用230、240和250℃施加0.68 MPa压力处理7 min的加压热处理方法对其改性，木材的平衡含水率、吸湿和吸水湿胀率显著降低（*P*<0.05），且随着处理温度的增加呈降低趋势。热处理导致的细胞壁亲水基团减少和结晶度提高，是木材尺寸稳定性提升的重要原因。加压热处理引起细胞壁不同程度的微观损伤，但对木材的力学性能影响不显著。

2) 加压热处理木材制备的薄型实木地板的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℃·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》的要求。地板漆膜附着力达到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》优等品要求。

参考文献：

[1] 卢金汉, 吕斌, 杨忠, 等. 地采暖运行工况下木质地板甲醛释放量的变化分析[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(06): 77-84.
LU J H, LYU B, YANG Z, et al. Analysis of Formaldehyde Emission from Wood-Based Flooring under the Ground-Heating Environment [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(06): 77-84.

[2] 贾潇然, 王宏棣, 赵秀. 地采暖用浸渍纸层压木质地板1 m³环境模拟舱甲醛释放回归模型建立[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(6): 49-54.
JIA X R, WANG H D, ZHAO X. Regression model of formaldehyde emissions from laminate flooring in 1 m³ radiant heating simulation chamber[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(6): 49-54.

[3] 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.

[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] T/WJDB 003—2018 地采暖用实木地板铺装、验收及使用规范[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] 周玲玲. 橡木实木地热地板制造技术[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.

[9] 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.

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

[11] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139014>.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117935.
- [18] DING T, GU L, LIU X. Influence of steam pressure on chemical changes of heat-treated Mongolian pine wood[J]. Bioresources, 6(2): 1880-1889.
- [19] 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.
- [20] 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. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119885.
- [21] 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. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139596.
- (上接第31页)
- [11] 洗学权, 唐培朵, 黄正规, 等. 超细碳酸钙和滑石粉改性MDI胶黏剂的性能比较研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(9): 10-14.
XIAN X Q, TANG P D, HUANG Z G, et al. Comparison of properties of MDI adhesive modified by ultrafine calcium carbonate and talcum powder[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(9): 10-14.
- [12] 刘映朋, 田飞宇, 徐皓诚, 等. 纳米改性pMDI胶粘剂的固化行为并双向增强胶合板力学性能和阻燃性能[J/OL]. 复合材料学报, 2026.
LIU Y P, TIAN F Y, XU H Cet al. Curing behavior of nano-filled pMDI resin with bilateral enhancement of mechanical and flame-retarding properties for plywood [J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026. https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251114.009.
- [13] YANG H X, DU G B, LI Z, et al. Superstrong adhesive of isocyanate-free polyurea with a branched structure[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2021, 3(3): 1638-1651.
- [14] BARZEGAR M, LORENZ L F, BEHROOZ R, et al. Improved wood-bond strengths using soy and canola flours with pMDI and PAE[J]. Polymers, 2022, 14(7). https://doi.org/10.3390/polym14071272.
- [15] CAI L J, CHEN Y T, LU Z T, et al. Citric acid/chitosan adhesive with viscosity-controlled for wood bonding through supramolecular self-assembly[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 329. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121765.
- [16] PEDIGE M P H, ASOH T A, HSU Y I, et al. Stimuli-responsive composite hydrogels with three-dimensional stability prepared using oxidized cellulose nanofibers and chitosan[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118907.
- [17] SHAN J Y, QIN A H, LIN Q Q, et al. Citric acid/sucrose-modified pMDI for constructing high-performance straw particleboard based on multiple cross-linked networks[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119842.
- [18] HE H, LU Q, HUANG H H, et al. Biomass bagasse-based hyperbranched adsorbent for the complete removal of low-level Cr(VI) [J]. Cellulose, 2020, 27(14): 8121-8134.
- [19] ZHANG S, LIU C, DING Y, et al. Green, formaldehyde-free bio-adhesive from soybean meal and laccase-oxidized tannin via quinone
- amine crosslinking[J]. Polymers, 2026, 18(8): 954.
- [20] 崔丽荣, 崔峰波, 冉文华, 等. 非等温DSC法研究环氧树脂的固化反应动力学和固化温度[J]. 玻璃纤维, 2024(6): 15-19, 56.
CUI L R, CUI F B, RAN W H, et al. Study on the curing reaction kinetics and curing temperature of epoxy resin by non-isothermal DSC[J]. Fiber Glass, 2024(6): 15-19, 56.
- [21] 于飞, 李宏福, 羊森林, 等. 风电叶片用环氧树脂固化动力学与玻璃化转变温度分析[J]. 热固性树脂, 2023, 38(5): 23-28, 35.
YU F, LI H F, YANG S L, et al. Anylisis on curing kinetics and glass transition temperature of epoxy resin for wind turbine blades[J]. Thermosetting Resin, 2023, 38(5): 23-28, 35.
- [22] ZHANG Y H, ZHU W Q, Lu Y, et al. Nano-scale blocking mechanism of MMT and its effects on the properties of polyisocyanate-modified soybean protein adhesive[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 57: 35-42.
- [23] LUO J L, LUO J, LI X N, et al. Effects of polyisocyanate on properties and pot life of epoxy resin cross-linked soybean meal-based bioadhesive[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(17). https://doi.org/10.1002/app.43362.
- [24] KAWALERCZYK J, KULIŃSKI M, MAJLINGOVÁ A, et al. The effect of wood particles polyesterification with sorbitol and citric acid on the properties of particleboard produced with the use of PF/pMDI adhesive[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2024, 82 (5): 1725-1737.
- [25] LUO J, ZHOU Y, GAO Q, et al. From wastes to functions: a new soybean meal and bark-based adhesive[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(29): 10767-10773.
- [26] 陈钺. 木材加工用功能性异氰酸酯的制备及-NCO基团保护机制研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- [27] SU H, DU G B, REN X Y, et al. High-performance bamboo composites based on the chemical bonding of active bamboo interface and chitosan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125345.
- (责任编辑 余泰伦/编校 曹惠敏、向琴)