

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025138

微波-尿素协同处理对压缩密实化木材尺寸稳定性及抗弯性能的影响

李思仪, 王志闯, 王婷欢, 余晖, 王孜, 何正斌, 王振宇, 伊松林

(林木资源高效生产全国重点实验室, 木材科学与工程北京市重点实验室, 木质材料科学与应用教育部重点实验室,
北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)



摘要: 以毛泡桐 (*Paulownia tomentosa*) 木材为研究对象, 首先采用微波预处理, 然后经尿素溶液 (质量分数为 30%) 软化后热压制备压缩密实化木材 (简称为压缩木材), 主要探究不同微波预处理时间对压缩木材尺寸稳定性及抗弯性能的影响。结果表明, 当热压温度为 170 °C 时, 随着微波预处理时间的延长, 木材增重率和密度均显著增加 ($P < 0.01$), 与未处理材相比, 分别提高了 7.42%~136.13% 和 10.71%~39.29%, 剖面密度分布趋于均匀。微波-尿素协同处理对压缩木材的尺寸稳定性具有显著作用 ($P < 0.01$), 当微波预处理时间为 10~50 s 时, 压缩木材的吸水回复率、湿胀率较对照组 (仅热压处理的木材) 分别降低 44.95%~60.81%、31.08%~50.00%。压缩木材的抗弯强度和弹性模量均随微波预处理时间的延长呈先增加后降低的趋势, 在微波预处理时间为 40 s (临界时间) 时达到最大, 较未处理材分别提升了 45.45% 和 37.62% ($P < 0.05$)。微波-尿素协同处理发挥了二者的作用: 微波处理引发木材内部膨化, 使尿素溶液充分渗透到木材细胞壁中, 在热压过程中尿素发挥软化作用, 并与细胞壁发生交联反应, 从而有效降低压缩木材的变形回复率并提升其抗弯性能。研究结果为高稳定性压缩木材的制备与应用提供理论基础。

关键词: 微波预处理; 尿素; 压缩密实化木材; 细胞壁; 尺寸稳定性; 抗弯性能

中图分类号: S781; S792.43 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 02-0049-09

Effect of Microwave-Urea Synergistic Treatment on the Dimensional Stability and Bending Properties of Compression-Densified Wood

LI Siyi, WANG Zhichuang, WANG Tinghuan, YU Hui, WANG Zi, HE Zhengbin,
WANG Zhenyu, YI Songlin

(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering,
Key Laboratory of Wooden Material Science and Application of Ministry of Education, School of Material Science and Technology,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This study investigated the effect of microwave pretreatment time on the dimensional stability and bending properties of compression-densified wood (referred as densified wood). *Paulownia tomentosa* was pretreatment by microwave, then softened by urea solution (mass fraction of 30%), and followed by hot-pressing to produce densified wood. The results showed that when the hot pressing

收稿日期: 2025-12-12; 修改日期: 2026-01-30

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“高能微波膨化木质重组材料制造关键技术”(2023YFD2201402)。

作者简介: 李思仪 (2002—), 女, 硕士研究生。Email: Lisiyi0615@bjfu.edu.cn

通讯作者: 何正斌, 男, 教授。Email: hzbcailiao@bjfu.edu.cn

temperature was 170 °C, the weight percent gain and density of densified wood significantly increased ($P<0.01$) with the extension of microwave pretreatment time. Compared with untreated wood, these two indexes were increased by 7.42%~136.13% and 10.71%~39.29%, respectively, with the density profile becoming relatively uniform. Microwave urea synergistic treatment significantly improved the dimensional stability of densified wood ($P<0.01$). When the microwave pretreatment time was 10~50 s, the set recovery rate and swelling efficiency were decreased by 44.95%~60.81% and 31.08%~50.00%, respectively, compared with control group (treated only by hot-pressing). Both bending strength and modulus of elasticity of densified wood were initially increased and then decreased with the extension of microwave pretreatment time, reaching their maximum at a microwave pretreatment time of 40 seconds (critical time), which increased by 45.45% and 37.62%, respectively, compared with untreated wood ($P<0.05$). The combined effect of microwave-urea was demonstrated, i.e., microwave treatment induced puffing within the wood, allowing the urea solution to fully penetrate the wood cell walls. During hot-pressing, urea softened and crosslinked with the cell walls, effectively reducing the set recovery rate of densified wood and improving its bending performance. The research results could provide a theoretical basis for the preparation and application of high-performance densified wood.

Key words: microwave pretreatment; urea; compression-densified wood; cell wall; dimensional stability; bending property

木材压缩密实化是在不显著破坏木材结构的条件下对其进行压缩,从而增加单位体积内木材的质量,改善物理力学性能^[1]。但压缩密实化木材(简称为压缩木材)在使用过程中存在变形回复的问题。因此,对压缩变形进行永久固定是木材压缩密实化技术面临的关键问题^[2]。

木材中存在大量的极性基团,在微波场作用下,水分和其他极性物质吸收微波并将微波能转化为热能,从而对木材快速加热^[3]。微波处理过程中纤维素、半纤维素发生降解,吸湿基团减少,压缩木材的平衡含水率及等温吸湿性能降低,尺寸稳定性改善^[4]。赵世超^[5]利用功率为900 W的微波处理毛竹(*Phyllostachys edulis*)后并进行压缩,发现竹材中的半纤维素发生降解,细胞壁吸湿基团减少,从而改善其尺寸稳定性。在75 kWh/m³以上微波能量密度作用下,木材内部水蒸汽压力增大,导致其膨化,内部产生孔隙,促进浸渍液均匀向内渗透^[6]。徐恩光^[7]利用微波膨化木浸渍酚醛树脂后热压,使压缩木材的抗弯强度提高1.58倍,吸水体积湿胀率小于5%。尽管微波处理有助于降低木材的吸湿性能,但短时间的微波处理对木材吸湿基团的降解程度有限,难以实现压缩变形的长期固定;但若通过延长微波处理时间或提高功

率来强化效果,则可能引发木材结构损伤,影响力学性能^[8]。

尿素是木材压缩处理工艺中常用的软化剂,具有低毒、高效的优势^[9]。尿素能够增加木材塑性,防止热压过程中细胞壁破坏,并与木材组分中的羟基发生反应,提高尺寸稳定性^[10]。LIN等^[11]对尿素浸渍的松木(*Pinus* spp.)进行150 °C热处理,发现吸水率及平衡含水率分别下降10.80%和15.22%。然而,由于尿素的分子量远大于水分子,其作为软化剂在木材中的扩散和渗透能力相对较差,导致浸渍不均匀,尤其在较大尺寸的木材中更为明显。这种渗透不均可能导致后续压缩过程中表层过度塑化、芯层塑性不足,进而影响压缩木材的整体性能。

现有研究仍多聚焦于微波或尿素单独处理,缺乏针对二者协同作用机制及其对木材改性效果的系统研究。鉴于此,本研究提出一种微波-尿素协同处理木材的方法,旨在结合二者优势,利用微波预处理打开木材内部孔隙来改善尿素渗透的均匀性,同时通过微波与尿素的协同作用,促进木材中吸湿基团的降解,从而更有效地提升压缩木材的尺寸稳定性和抗弯性能。

以质地轻、纹理美观、易加工的毛泡桐

(*Paulownia tomentosa*) 为研究对象, 通过探究微波-尿素协同处理对泡桐压缩木材化学成分、尺寸稳定性及抗弯性能的影响, 旨在为低密度人工林木材开发利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

毛泡桐: 取自河南省许昌市, 含水率 13%, 气干密度 0.27 g/cm^3 , 尺寸为 300 mm (轴向) $\times$ 100 mm (弦向) $\times$ 25 mm (径向), 共计 66 块。

尿素: 软化剂, 固体, 外购。

1.2 仪器设备

微波设备 (MGX-G200-9)、热压机 (XLB)、X 射线剖面密度测定仪 (DENSE-LAB)、扫描电子显微镜 (Regulus8100)、万能力学试验机

(ETM104B)、傅里叶变换红外光谱仪 (Nicolet 6700)、元素分析仪 (OWT-EA3100)、X 射线光电子能谱仪 (Thermo Fisher K-Alpha)。

1.3 试验方法

1.3.1 微波预处理 压缩木材的制备过程如图 1 所示。将木材含水率调至纤维饱和点 30% 左右, 置于微波设备中进行处理, 根据 II 型微波膨化处理工艺^[12]的要求, 选择 7.2 kW 的微波功率进行试验。结果表明在此功率下木材的渗透性得到有效提升, 且未出现因微波作用过强导致力学性能下降的问题。因此选择 7.2 kW 作为固定微波功率, 分别处理 0、10、20、30、40 和 50 s, 每个时间条件下处理 9 块板材, 获得微波处理材。根据微波预处理时间将试样命名为“时间-MW”。

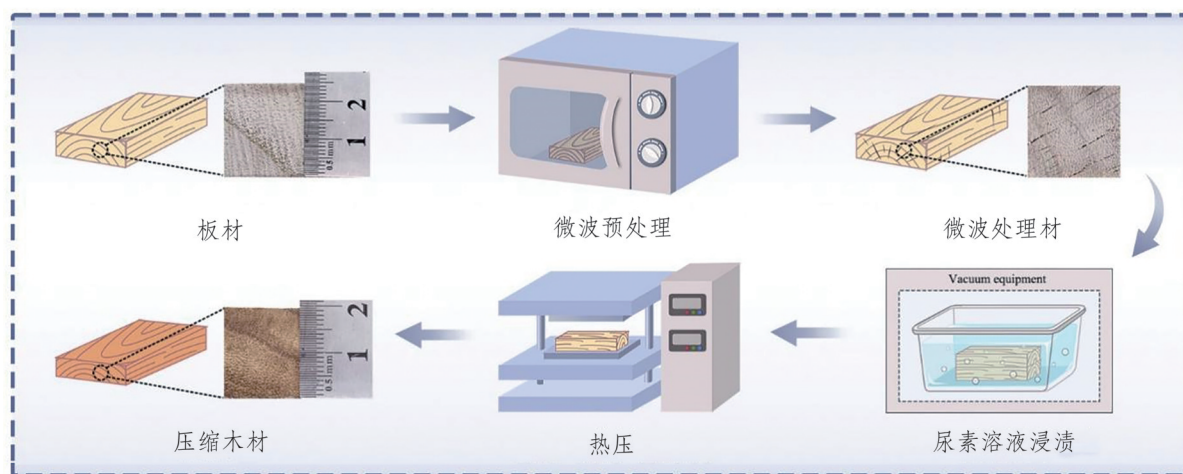


图1 压缩木材的制备工艺流程

Fig.1 Preparation of processing densified wood

1.3.2 浸渍 将微波处理材置于质量分数 30% 的尿素溶液中浸渍, 使其充分软化。为确保浸渍效果, 在 -0.1 MPa 的条件下每 10 min 进行一次放气与抽真空, 重复 6 次后, 得到尿素浸渍材。根据微波预处理时间将试样命名为“时间-UW”。

1.3.3 热压 热压温度结合木材常规热处理温度区间 ($160 \sim 230 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 确定^[13], 考虑到现有工业生产中对木材浅色外观的需求, 增设 $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理条件, 并在 $120 \sim 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间内均匀选取 3 个温度水平 ($120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 各处理 3 块板材, 以探究热压温度的影响。在 $4 \sim 6 \text{ MPa}$ 的压力下对木材进行压缩密实化处理, 压缩至目标厚度 20 mm 后

停止, 控制压缩率为 20%, 继续保压 2 h 后降至室温, 取出试样。根据微波预处理时间将试样命名为“时间-UDW”。对照组有两组, 一组为仅压缩处理的木材, 记为“DW”; 另一组为未处理材, 记为“Control”。

1.4 性能检测

1.4.1 物理性能

1) 增重率 (weight percent gain, WPG)。按公式 (1) 计算, 结果取 8 个有效试样的平均值。

$$\text{WPG} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为浸渍前试样的绝干质量, g; m_2 为浸渍

后试样的绝干质量, g。

2) 密度。参照 GB/T 1927.5—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第5部分: 密度测定》测试绝干密度 (ρ)。在试样各相对面的中心位置测量弦向、径向、纵向尺寸, 计算体积, 称样品质量。密度按公式 (2) 计算, 结果取8个有效试样的平均值。

$$\rho = \frac{m_0}{V_0} \quad (2)$$

式中: m_0 为木材绝干质量, g; V_0 为木材绝干状态下的体积, cm^3 。

采用 X 射线剖面密度测定仪测量压缩木材的密度分布, 扫描速度为 0.1 mm/s。

3) 尺寸稳定性。将尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm 的压缩木材试样置于去离子水中, 通过真空浸渍使其质量达到恒定^[14]。按公式 (3) 计算试样沿厚度方向的吸水回复率 T , 结果取8个有效试样的平均值。

$$T = \frac{t_r - t_0}{t_u - t_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: t_r 为压缩木材试样吸水后再绝干的厚度, mm; t_u 为压缩前试样的绝干厚度, mm; t_0 为压缩后试样的绝干厚度, mm。

将试样在 20 °C、65% 相对湿度的环境中进行吸湿, 时间 28 d, 待试样质量恒定后测量其沿厚度方向的尺寸变化, 每组测量8个试样。根据 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》和 GB/T 1927.4—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第4部分: 含水率测定》, 按公式 (4) 和公式 (5) 计算样品的湿胀率 (α) 及平衡含水率 (E)。

$$\alpha = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$E = \frac{m'_2 - m'_1}{m'_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中: L_1 为试样吸湿后的径向尺寸, mm; L_0 为试样绝干时的径向尺寸, mm; m'_2 为试样达到平衡状态的质量, g; m'_1 为试样绝干时的质量, g。

1.4.2 微观构造 选取优化微波预处理时间处理的试件, 在其中心位置制取规格为 5 mm×5 mm×5 mm 的试样, 对样品表面进行喷金处理, 观察木材细胞及细胞壁结构。

1.4.3 化学结构 对优化微波预处理时间处理的试件进行化学结构表征。

1) 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析。将样品粉碎并筛选 100 目的木粉, 扫描范围为 4 000~500 cm^{-1} , 扫描次数 32 次, 分辨率为 4 cm^{-1} 。

2) X 射线光电子能谱分析 (XPS)。测定未处理材及压缩木材的元素全谱, 并对 C、N、O 元素进行高分辨率图谱分析与分峰拟合。使用 Al-K α 射线, 全谱扫描步长 1 eV, 精细谱扫描步长 0.1 eV。

1.4.4 抗弯性能 根据 GB/T 1927.9—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第9部分: 抗弯强度测定》测试抗弯强度和弹性模量, 试样尺寸为 300 mm×20 mm×20 mm。两支座的跨距为 240 mm, 加载速度为 5 mm/min, 每组重复 6 次。

1.4.5 数据分析 使用 SPSS 对测量数据进行分析。采用单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著性差异来检验各组试件间尺寸稳定性及抗弯性能的显著性差异。统计显著性被设定为 95% 的置信水平。

2 结果与讨论

2.1 压缩木材的物理性能

协同处理材的增重率以及压缩木材的密度及剖面密度测试结果, 如图 2 所示。由于不同热压温度下压缩木材的密度差异不大, 故以 170 °C 为例分析其密度的变化趋势。

图 2a 显示, 协同处理木材的增重率随微波处理时间的延长而逐渐升高。未经微波处理的木材增重率为 13.34%, 微波处理 10~50 s 后, 木材增重率介于 14.33%~31.50%, 较未经微波处理材提升 7.42%~136.13%。当微波预处理时间大于 20 s 时, 其对增重率的提升具有极显著效果 ($P<0.01$)。这是由于微波作用破坏了木材细胞壁上的纹孔等结构^[15-16], 有利于软化剂渗透进入。

压缩木材的密度随微波预处理时间的延长而逐渐增大。当微波预处理时间为 10~50 s 时, 压缩木材的密度达到 0.31~0.39 g/cm^3 , 与未处理材相比提高了 10.71%~39.29% (图 2b)。当微波处理时间大于 30 s 时, 其对压缩木材密度的提升具有极显著效果 ($P<0.01$)。

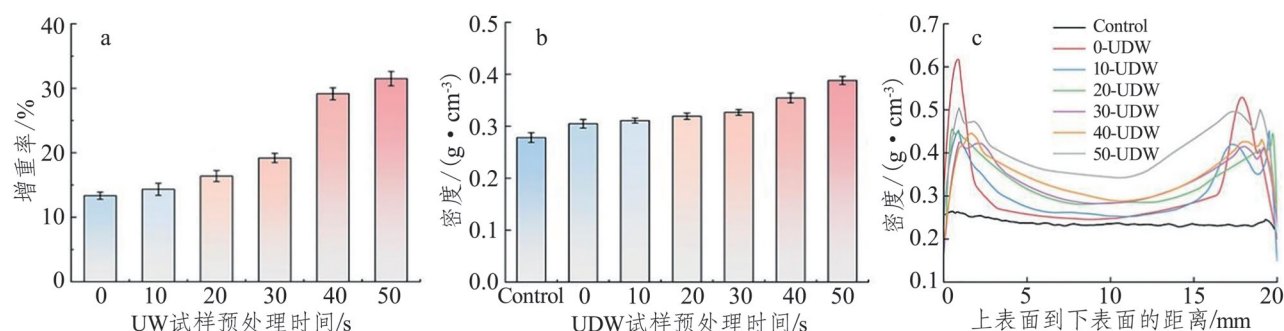


图2 微波预处理时间对压缩木材增重率、密度及剖面密度的影响

Fig.2 Effect of microwave pretreatment time on weight percent gain, density, and density profile of densified wood

未处理材的密度沿厚度方向均匀分布, 平均值为 0.24 g/cm^3 。压缩后剖面密度分布曲线呈两侧高、中心低的“U”型分布(图2c)。未经微波预处理的压缩木材密度峰值最高, 达到 0.62 g/cm^3 ; 经微波预处理后, 压缩木材表层的密度峰值均降低, 芯层密度随微波预处理时间延长而逐渐升高, 密度梯度趋于缓和。当微波预处理时间为30 s时, 压缩木材的密度峰值降至 0.42 g/cm^3 , 剖面密度均匀性最佳。这是由于在致密化过程中, 热量从木材表面逐渐传递到中心, 木材吸热升温, 内部温度低于表面^[17-18], 使压缩木材表层密度更高。经微波预处理后, 木材中心层的膨化效果优于表层^[7], 中心位置形成的孔隙促进了液体向木材内部渗透, 使表层和芯层的增重率差异减小, 压缩更均匀。

2.2 压缩木材的尺寸稳定性

不同温度热压处理压缩木材的吸水回复率测试结果, 如图3所示。

由图3可知, 热压温度对压缩木材的吸水回复率具有极显著影响 ($P < 0.01$), 且随处理温度的升

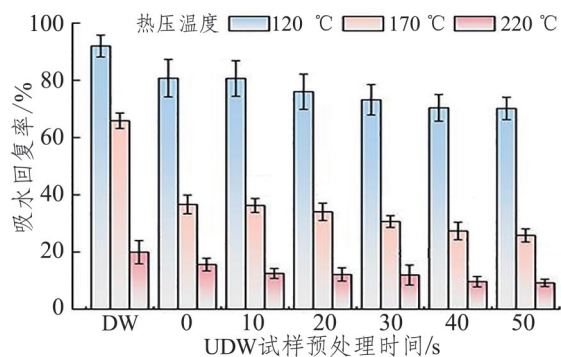


图3 不同热压温度对压缩木材吸水回复率的影响

Fig.3 Effect of hot-pressing temperature on the set recovery rate of densified wood

高吸水回复率呈显著下降的趋势。当热压温度从 $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$, DW组试样的吸水回复率从 91.99% 降至 19.96% , 减小了 78.30% 。这是由于在高温条件下木材中的亲水性基团被部分降解或被疏水性基团取代, 使得木材细胞壁中吸湿基团数量减少^[19], 吸水回复率降低。

在 120 、 170 和 $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 三种热压温度条件下, 与DW组相比, 经协同处理压缩木材的吸水回复率分别下降 $12.33\% \sim 23.73\%$ 、 $44.95\% \sim 60.81\%$ 、 $37.27\% \sim 53.86\%$ 。其中, 在 $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下吸水回复率的降幅最大, 这是由于尿素的分解温度为 $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 分解后生成氨气和异氰酸, 异氰酸与木材中的羟基发生反应消耗吸湿基团, 从而减少吸湿基团数量, 使压缩木材的吸湿性降低^[11]; 在 $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 尿素仅对木材细胞壁起填充作用, 无法与木材组分间发生交联, 因此对降低吸水回复率的效果有限; 在 $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 半纤维素发生降解, 木材中的吸湿基团大量减少^[20-21], 此时热压温度对降低木材吸水回复率起主导作用。为充分发挥微波-尿素协同处理效果, 优先选择 $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热压温度。

压缩木材的吸水回复率随微波预处理时间的延长呈现逐渐下降的趋势。在 $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 当微波预处理时间为 $10 \sim 50 \text{ s}$ 时, 压缩木材的吸水回复率为 $25.82\% \sim 35.27\%$ 。由于短时间的微波处理对木材的作用效果有限, 尿素的浸渍率较低, 故当微波处理时间为 $10 \sim 20 \text{ s}$ 时, 压缩木材吸水回复率变化不显著, 当微波处理时间大于 30 s 时, 其对吸水回复率有极显著作用 ($P < 0.01$)。

为进一步探究微波预处理与尿素改性对压缩

木材尺寸稳定性的影响,测试170℃热压处理的各组试样的湿胀率和平衡含水率,结果如图4所示。

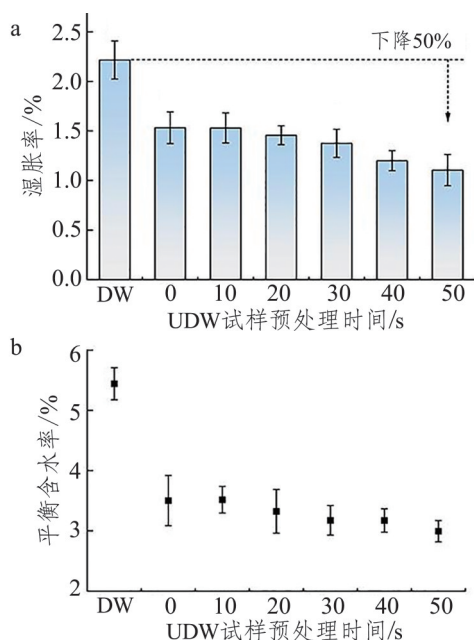


图4 170℃时压缩木材的湿胀率和平衡含水率
Fig.4 Swelling efficiency and equilibrium moisture content of densified wood compressed at 170 °C

图4a显示,尿素处理对降低压缩木材的湿胀率具有极显著效果 ($P<0.01$)。与DW组相比,0-UDW组试样的湿胀率降低31.08%。引入微波后与

尿素产生协同效应,压缩木材的变形回复率进一步降低,且整体随微波处理时间的延长而下降。当微波处理时间为10~50 s时,UDW组试样的湿胀率为1.11%~1.53%较DW组下降31.08%~50.00%。但值得注意的是,较短时间的微波处理(10~20 s)对变形回复率的影响不显著,此时尿素对固定压缩变形起主导作用;微波处理时间延长至40~50 s时,湿胀率的下降趋于平缓,考虑减少能耗,处理时间选择40 s为宜。后续微观形貌观察和化学结构表征均选择微波预处理40 s的试样进行。

由图4b可知,微波预处理及尿素改性后,压缩木材的平衡含水率降低,且随着微波处理时间的延长呈逐渐下降的趋势。当微波预处理时间为40 s时,UDW组试样的平衡含水率达到3.17%,比DW组减少了41.73%。这是由于微波预处理能够促进半纤维素降解,使木材中吸湿位点减少;同时微波膨化产生的孔隙促进尿素溶液的渗透^[22-23],使尿素在热压过程中分解生成异氰酸,能够与木材中的游离羟基发生反应,从而降低UDW组试样的吸湿性^[9]。

2.3 压缩木材的微观形貌

未处理材和微波预处理40 s试样的扫描电镜图,如图5所示。

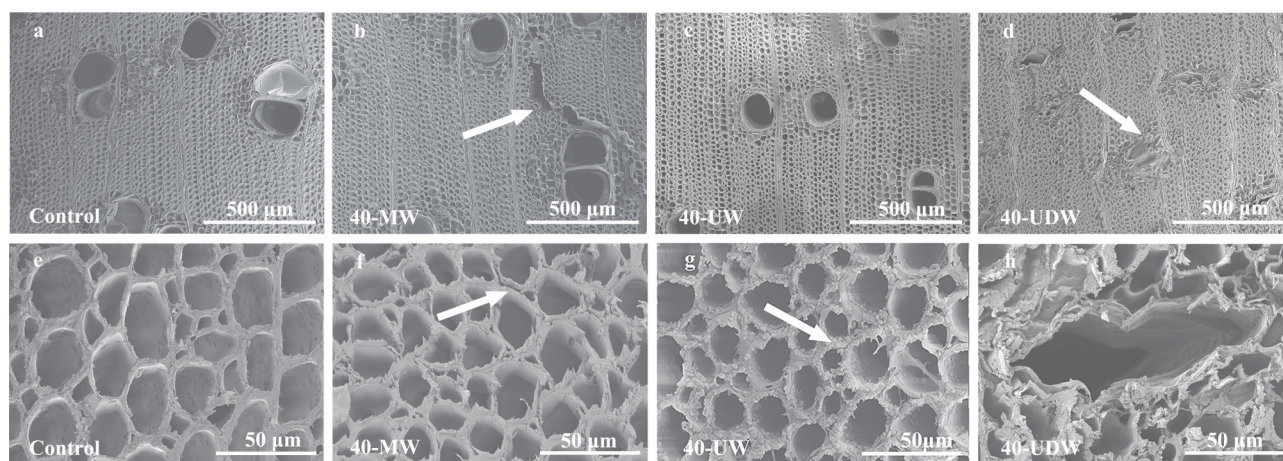


图5 未处理材和不同条件处理材的扫描电镜图
Fig.5 SEM images of untreated and treated wood under different conditions

未处理材的细胞形态完整,细胞壁光滑(图5a、5e);经微波预处理后,木材细胞壁出现裂纹,木纤维之间发生分离(图5b、5f),这是由于微波使木材内部水分汽化并产生蒸汽压,木材内部发生开裂等破坏,进而提升其渗透性^[24]。浸渍处理后

尿素附着在木材细胞壁上,并填充了微波处理产生的裂隙(5c、5g),这为细胞壁的软化及后续压缩处理提供了有利条件。图5d、5h为压缩木材的微观结构,发现经压缩后木材的导管发生挤压变形,形成了较为致密的结构。

2.4 压缩木材的化学结构

图6a为未处理材、尿素浸渍材及压缩木材(微波预处理40 s)的红外光谱图。与未处理材相比,尿素浸渍材在 $3\ 338\text{ cm}^{-1}$ 及 $1\ 604\text{ cm}^{-1}$ 处出现新的吸收峰,分别来自 NH_2 基团中N-H的伸缩振动及弯曲振动^[25],证实尿素分子成功引入。经热压处理后, NH_2 基团的特征吸收峰消失,表明在此过程中尿素发生分解。压缩木材在 $3\ 340\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应O-H的伸缩振动,与未处理材相比该吸收

峰强度降低,这是由于微波处理促进了木材中吸湿基团的降解。 $1\ 733\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应半纤维素中乙酰基、羰基和羧基的C=O伸缩振动^[26],微波预处理40 s后,该吸收峰的强度显著降低且向低波数方向移动,这是由于半纤维素的降解及氨基甲酸酯基团的接枝^[10]。压缩木材在 $1\ 324\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为纤维素- CH_2 的摆动振动吸收带,与未处理材相比几乎没有发生变化,说明微波及热压处理后木材中的纤维素基本保持稳定^[27]。

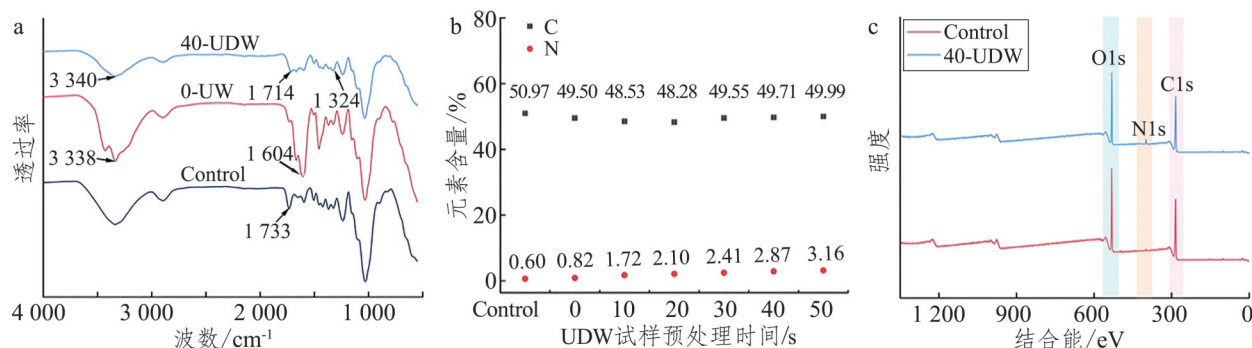


图6 未处理材和不同处理材的化学结构分析

Fig.6 Chemical structure analysis of untreated and treated wood under different conditions

图6b为各处理材中C、N元素含量。随微波预处理时间的延长,C元素含量略有降低,N元素含量逐渐升高,这是由于微波处理有助于尿素浸渍量增加。当微波预处理时间为50 s时,压缩木材中的N元素含量为3.16%,结合红外光谱中 NH_2 特征峰的消失,进一步证明了尿素在热压过程中发生了分解。

图6c为未处理材及微波-尿素联合改性后压缩木材的XPS全谱,未处理材的C1s和O1s峰分别位于 284.1 eV 和 532.1 eV ^[28]。与未处理材相比,压缩木材中检测到的N元素特征峰增强,这一结果与元素分析相互印证。

表1为未处理材及压缩木材中C1s、O1s、N1s化学态的结合能与相对含量。C1对应C-C、C-H,主要来源于木材中的木质素及抽提物^[29],其相对含量在协同处理后下降,这是由于在较高的热压温度下木材内部的抽提物挥发;C2对应C-O-C和C-OH^[30],协同处理后C2相对含量增加,这可能是由于尿素分解后与木材组分反应生成了氨基甲酸酯(C-O-C)^[12]。此外,尿素的引入及其反应后形成的C-N键也可能促使C2峰增强^[13]。C3对应

C=O,主要来源于半纤维素和木质素,经协同处理后其相对含量降低,这是由于在较高的热压温度下部分半纤维素发生降解^[31]。N1s谱在 399.0 eV 处有一个峰值,对应木材中的C-N键^[10],压缩木材在此处相对含量提高,进一步说明尿素分子引入木材。

表1 未处理材及压缩木材的XPS参数

Tab.1 XPS parameters of untreated and densified wood

元素	谱峰编号	Control		40-UDW	
		结合能/eV	相对含量/%	结合能/eV	相对含量/%
C	C1	284.0	38.29	284.0	34.88
	C2	285.7	21.23	285.7	23.62
	C3	287.0	12.39	287.2	12.02
O	O1	530.5	1.68	530.2	1.84
	O2	531.9	25.62	531.8	24.71
N	N1	399.1	0.79	399.0	2.93

2.5 压缩木材的抗弯性能

不同处理材的抗弯性能测试结果见图7。微波-尿素协同处理可提升压缩木材的抗弯强度与弹性模量,且二者随微波预处理时间的延长呈先上升后下降的变化趋势。当微波预处理时间增至20~40 s时,压缩木材的抗弯强度和弹性模量提升显著

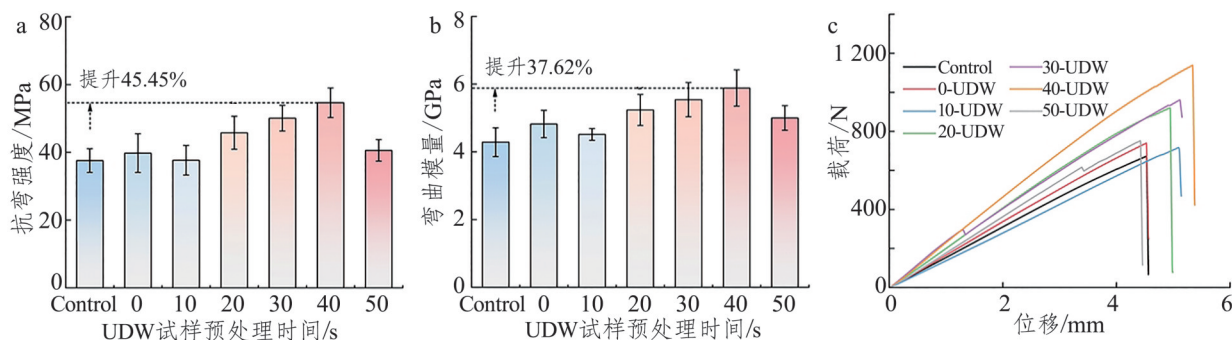


图7 未处理材和压缩木材的抗弯性能及位移-载荷曲线

Fig.7 Bending properties and load-displacement curve of untreated and densified wood

($P < 0.05$), 在处理 40 s 时达到最大值, 分别为 54.63 MPa 和 5.89 GPa, 相较于未处理材提高了 45.45% 和 37.62%。这是由于微波预处理使木材内部形成更多微观孔隙, 在细胞壁上为尿素与木材的作用提供更多位点, 从而增强了细胞壁之间的连接^[9]。

值得注意的是, 当微波预处理时间为 10 s 时, 压缩木材的抗弯强度和弹性模量略有降低, 但差异并不显著, 可能是短时间的微波处理对改善尿素的渗透效果有限, 微波处理造成的破坏效应大于软化剂的增强效应。经微波预处理 50 s 后, 压缩木材的抗弯强度和弹性模量均出现大幅度下降。

由此可知, 微波处理 40 s 为压缩木材抗弯性能变化的“临界时间”, 超过该时间后, 木材中的水分剧烈汽化, 细胞内外产生较大压强差, 导致木材内部和表面产生更多的微裂纹^[22]。这些裂缝成为木材中的薄弱结构, 在后续压缩过程中形成了应力集中点, 最终导致压缩木材在较低的载荷下就会发生破坏^[8]。

压缩木材的载荷-位移曲线 (图 7c) 显示, 当微波预处理时间为 40 s 时, 压缩木材的刚度 (曲线斜率) 最大, 与未处理材相比提高了 43.73%。综合上述分析可知, 微波预处理 40 s 为最佳的工艺条件, 可最大限度改善压缩木材的抗弯性能。

3 结论

1) 以毛泡桐木材为原料, 通过真空浸渍质量分数为 30% 的尿素溶液软化木材, 结合热压处理促进尿素与木材组分发生交联, 实现协同改性, 成功制备压缩密实化木材。

2) 与天然材相比, 微波预处理材的增重率显著增加 ($P < 0.01$), 提高了 7.42%~136.13%; 经尿素改性及 170 °C 热压后, 20% 压缩率时木材密度亦显著增加 ($P < 0.01$), 提高了 10.71%~39.29%; 吸水回复率、湿胀率及平衡含水率均随微波预处理时间的延长而显著降低 ($P < 0.01$); 抗弯强度和弹性模量在微波预处理 40 s 时达到最大, 较未处理材分别提高了 45.45% 和 37.62%, 实现尺寸稳定性及抗弯性能的综合提升。

研究结果为人工速生林木材的利用及压缩密实化工艺提供了新途径, 未来将进一步探究该改性工艺对其他速生树种的普适性, 促进速生材树种的高值化应用。

参考文献:

- [1] GAO Z Z, SUN J Y, WEI Z K, et al. Epoxy-aminated lignin impregnation combined with densification for enhanced mechanical properties and deformation fixation of wood[J]. *Polymers*, 2025, 17 (10). <https://doi.org/10.3390/polym17101406>.
- [2] 黄荣凤. 木材塑性变形的湿热固定技术及机理研究进展[J]. *林业科学*, 2022, 58(2): 206-216.
HUANG R F. Advances in wood plastic deformation fixation by hygro-thermal treatments and the fixation mechanisms[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(2): 206-216.
- [3] AKBAR M I, ARMYNAH B, TAHIR D. Comprehensive review of wood-based composites as microwave absorbers: utilizing wood-derived materials such as carbon, metal/metal oxides, and polymer composites as fillers[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 220. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119397.
- [4] 徐恩光, 林兰英, 李善明, 等. 微波处理对樟子松木材等温吸湿特性的影响[J]. *木材科学与技术*, 2021, 35(1): 20-25.
XU E G, LIN L Y, LI S M, et al. Effect of microwave treatment on moisture sorption isotherm of mongolian scotch pine[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2021, 35(1): 20-25.
- [5] 赵世超. 不同湿热预处理结合压缩对竹材细胞与性能的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024.
- [6] 吕少一, 傅峰, 李善明, 等. 环氧树脂填充微波膨化樟子松木材的结构及性能[J]. *木材科学与技术*, 2022, 36(2): 48-53.

- LYU S Y, FU F, LI S M, et al. Structure and properties of microwave puffed mongolian scotch pine wood filled with epoxy resin[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(2): 48-53.
- [7] 徐恩光. 樟子松微波膨化木性能及其树脂强化处理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [8] 王振宇, 林兰英, 傅峰, 等. 木材高强微波处理及其结构失效机制研究进展[J]. 林业工程学报, 2022, 7(4): 13-21.
- WANG Z Y, LIN L Y, FU F, et al. Research progress on high-intensity microwave treatment and failure mechanism of wood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(4): 13-21.
- [9] WANG Z C, WEI R J, WANG T H, et al. Eco-friendly densified wood obtained by combining urea and hot-pressing treatment[J]. Holzforschung, 2025, 79(10): 541-551.
- [10] LIN C F, KARLSSON O, DAS O, et al. High leach-resistant fire-retardant modified pine wood (*Pinus sylvestris* L.) by in situ phosphorylation and carbamylation[J]. ACS Omega, 2023, 8(12): 11381-11396.
- [11] LIN C F, MYRONICHEVA O, KARLSSON O, et al. A new wood-modification process based on in situ grafting of urethane groups: biological resistance and dimensional stability of carbamylated scots pine wood[J]. Wood Material Science & Engineering, 2023, 18(3): 1160-1162.
- [12] VINDEN P, TORGOVNIKOV G, HANN J. Microwave modification of Radiata pine railway sleepers for preservative treatment[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2010, 69(2): 271-279.
- [13] 蒋军, 杜静静, 徐信武, 等. 热处理木材性能改良与工艺优化研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1712-1725.
- JIANG J, DU J J, XU X W, et al. Research progress on performance improvement and process optimization of thermally treated wood[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2024, 41(4): 1712-1725.
- [14] RAN Y Y, LU D, JIANG J Y, et al. Deep eutectic solvents-assisted wood densification: a promising strategy for shape-fixation[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 471. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144476.
- [15] MASCARENHAS F J R, SIMOES R M D S, DIAS A M P G, et al. Moisture and temperature profiles of heart wood *Pinus pinaster* Ait. wood specimens during microwave drying[J]. Forests, 2024, 15(6). <https://doi.org/10.3390/f15060944>.
- [16] 王瑜瑶, 马尔妮. 不同预处理方法对木材细胞壁孔隙结构影响[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(11): 140-151.
- WANG Y Y, MA E N. Effects of different pretreatment methods on the pore structure of wood cell wall[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(11): 140-151.
- [17] WU J W, FAN Q, WANG Q W, et al. Improved performance of poplar wood by an environmentally-friendly process combining surface impregnation of a reactive waterborne acrylic resin and unilateral surface densification[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121022.
- [18] 黄荣凤, 高志强, 冯上环, 等. 含水率非均匀分布木材在热板加热下温度分布的变化规律[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(1): 40-47.
- HUANG R F, GAO Z Q, FENG S H, et al. Temperature distribution in wood with uneven moisture distribution during preheating process by press platens[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 40-47.
- [19] 何露茜, 张天放, 阮智勇, 等. 高温热处理对三种热带阔叶树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.
- [20] 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>.
- [21] 任安捷, 赵洋, 王新洲, 等. 高温热处理对中山杉木材物理力学性能的影响[J]. 林业工程学报, 2024, 9(4): 25-33.
- REN A J, ZHAO Y, WANG X Z, et al. Effect of high-temperature heat treatment on the physical and mechanical properties of *Taxodium* hybrid 'Zhongshanshan' wood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(4): 25-33.
- [22] ZHANG Y, LIN L, FU F. High-permeability wood with microwave remodeling structure[J]. Forests, 2021, 12(11). <https://doi.org/10.3390/f12111432>.
- [23] LI Y H, GAO J J, WANG B, et al. Microwave-assisted heat treatment for sustainable wood modification: enhanced dimensional stability and selective control of volatile organic compound emissions[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13(29): 11557-11568.
- [24] GUO J, WANG Z Y, HE Z B, et al. Eco-friendly processing strategies for constructing thermal and sound-insulating wood[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 534. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.147080.
- [25] OKTAY S, KIZILCAN N, BENGÜ B. Oxidized cornstarch-urea wood adhesive for interior particleboard production[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 110. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102947.
- [26] HUANG W Z, JIN Y X, GUO Y, et al. Fabrication of high-performance densified wood via high-pressure steam treatment and hot-pressing[J]. Polymers, 2024, 16(7): 939.
- [27] 黄荣凤, 何啸宇, 王艳伟, 等. 基于空气与蒸汽介质组成比及其压力调控的木材压缩变形永久固定[J]. 木材科学与技术, 2025, 39(4): 2-20.
- HUANG R F, HE X Y, WANG Y W, et al. Permanent setting of compressive deformation in surface-compressed wood through regulation of air-steam medium composition and pressure[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2025, 39(4): 2-20.
- [28] HUANG Y G, LI G Y, CHU F X. Modification of wood cell wall with water-soluble vinyl monomer to improve dimensional stability and its mechanism[J]. Wood Science and Technology, 2019, 53(5): 1051-1060.
- [29] ZHANG X, FAN Q, CHEN C F, et al. Enhanced mechanical performance and fire resistance of poplar wood: unilateral surface densification assisted with N/P doped acrylic resin impregnation[J]. Construction and Building Materials, 2023, 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132470>.
- [30] BI Z J, MORRELL J J, LEI Y F, et al. Eco-friendly and mildly modification of wood cell walls with heat treated wood extracts to improve wood decay resistance[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 184. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115079.
- [31] RAO J, LYU Z, CHEN G, et al. Hemicellulose: structure, chemical modification, and application[J]. Progress in Polymer Science, 2023, 140. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2023.101675.

(责任编辑 王小青/编校 向琴)