

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025124

微波预热对 pMDI 桉木胶合板板坯升温特性及 板材性能的影响

罗晓西, 陈雪琦, 任一萍, 陈勇平, 常亮

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 为推动聚合二苯基甲烷二异氰酸酯 (polymeric methylene diphenyl diisocyanate, pMDI) 胶合板连续平压生产技术的产业化应用, 研究重点探讨微波预热功率 (0.5、1.0、1.5、2.0 kW) 对 7 层桉木 (*Eucalyptus* spp.) 胶合板 (单板厚度 1.7 mm) 不同含水率 (12%、18%、24%) 板坯升温特性的影响。结果表明: 微波预热功率与板坯含水率对板坯升温速率影响显著 ($P < 0.01$), 板坯的升温速率随着板坯含水率的增加而降低, 随着微波功率的增加而增加; 在微波预热 30~60 s 内, 板坯的升温速率最大。通过对板坯升温数据的线性拟合, 获得微波功率与板坯升温幅度的关系并进行验证, 综合考虑在 60 s 内将板坯升温至 80 °C 的实际生产现状, 最终选定优化的微波预热功率为 3 kW, 板坯含水率为 24%。相同工艺条件下, 微波预热 pMDI 桉木胶合板的胶合强度及 24 h 吸水厚度膨胀率均优于未经微波预热直接热压的胶合板 ($P < 0.05$); 微波预热可降低胶合板的热压时间至 15 s/mm, 制备的胶合板平均胶合强度为 1.09 MPa, 满足 GB/T 9846—2015《普通胶合板》中 I 类桉木胶合板胶合强度的要求; 而直接热压板坯在热压时间为 15 s/mm 时无法成型。研究为微波预热技术在胶合板生产中的工业化应用提供数据支撑与技术参考。

关键词: 桉木胶合板; 聚合二苯基甲烷二异氰酸酯; 微波功率; 升温速率; 升温幅度; 胶合强度; 吸水率

中图分类号: TS653.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2026) 03-0049-08

Effect of Microwave Preheating on Mat Heating Characteristics in Manufacturing of pMDI Eucalyptus Plywood and its Panel Performance

LUO Xiaoxi, CHEN Xueqi, REN Yiping, CHEN Yongping, CHANG Liang

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To promote the continuous flat-pressing technology in manufacturing of plywood using polymeric methylene diphenyl diisocyanate (pMDI), this study investigated the effects of microwave preheating characteristics of seven-layer Eucalyptus veneer mats at power levels (i. e., 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 kW) and tested the bonding strength of the pMDI plywood made. The veneer had a thickness of 1.7 mm and three initial moisture contents of 12%, 18%, and 24%. The results showed that both microwave power and mat moisture content exerted an extremely significant influence on the heating rate of mats ($P < 0.01$). Within the selected range of initial veneer moisture content, the heating rate of the mat decreased with an increase in moisture content and increased with an increase in microwave power. The

收稿日期: 2025-11-10; 修改日期: 2026-01-17

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目“基于数字化协同的林木产品智能制造关键技术”(2023YFD2201500)。

作者简介: 罗晓西 (1999—), 男, 硕士研究生。Email: 1351564821@qq.com

通讯作者: 陈雪琦, 女, 助理研究员。Email: chenxueqi1995@163.com

maximum heating rate of the mat occurred within the microwave preheating duration of 30~60 s. The linear relationship between microwave power and heating amplitude of the mat was obtained and verified. Based on the linear fitting results, combined with the actual production requirement of heating the mat to 80 °C within 60 s, a microwave preheating power of 3 kW and a mat moisture content of 24% were selected as the optimal parameters to make pMDI plywood. It was also found that the bonding strength and the 24 h water absorption rate of plywood with microwave preheating was significantly higher than that of plywood directly hot-pressed without microwave preheating ($P<0.05$). Moreover, microwave preheating reduced the hot-pressing time in manufacturing of pMDI plywood to 15 s/mm, shorter than that of plywood without microwave preheating. The average bonding strength of the plywood made reached 1.09 MPa, which met the performance requirements for type I Eucalyptus plywood specified in GB/T 9846—2015 “*Plywood for general use*”. By contrast, the plywood without microwave preheating failed to produce qualified products. This study could provide data support and technical reference for the application of microwave preheating technology in manufacturing pMDI plywood on the industrial production lines.

Key words: Eucalyptus plywood; polymeric methylene diphenyl diisocyanate (pMDI); microwave power; heating rate; heating amplitude; bonding strength; water absorption rate

胶合板凭借强度均匀、结构稳定等优势，广泛应用于装饰装修与建筑领域。然而我国胶合板生产以中小企业为主，装备自动化水平低，产品性能稳定性有待提升。随着消费者环保意识的增强，对高品质板材需求的提升，亟需引入更先进的胶合板生产模式以突破现有的技术瓶颈^[1]。

聚合二苯基甲烷二异氰酸酯（polymeric methylene diphenyl diisocyanate, pMDI）为无醛添加胶黏剂，其可与木材中的纤维素及水分发生化学反应，形成牢固的氨基甲酸酯键，且生产中不引入甲醛，与人造板工业主流连续平压技术高度适配^[2]。然而，胶合板的多层板坯结构导致热传导路径较长，芯层热量积累存在显著滞后性。传统热压工艺下，胶合板芯层固化度比表层低20%~30%，直接造成胶合强度下降15%及以上^[3]。连续平压装备投资大，对生产效率的追求将进一步压缩板坯热压时的有效加热时间，加剧芯层升温与固化滞后的风险，这一问题已成为制约胶合板连续平压生产的关键技术瓶颈^[4]。

微波技术因兼具高效节能等优势，已在木材加工预热与辅助固化等领域展现出替代或升级传统技术的潜力。微波固化技术用于单板层积材生产，通过整体同步加热克服传统热压芯层固化滞后的问题，缩短工艺周期30%~70%^[5-7]；微波预热

技术用于刨花板与纤维板连续平压生产的板坯预热环节，通过调控微波预热功率，并结合后续热压工艺，可实现快速升温 and 可控固化，避免微波单热源固化设备成本高以及板坯局部过热的风险^[8-10]。

由于微波预热技术具备体积加热的特性，可使板坯从内部快速均匀加热^[11]，因此将其应用于pMDI胶合板连续平压生产线中，可有效缩短胶合板热压时间，从而提升生产效率^[12-13]。然而，该技术在胶合板制备中的应用研究较少，目前尚无微波预热工艺因子对板坯升温特性影响的系统性研究，且关于pMDI胶黏剂与胶合板多层板坯结构的适配性研究尚未深入。

鉴于此，研究基于实验室微波预热平台，实现桉木（*Eucalyptus* spp.）单板板坯的整体均匀升温，为后续胶合板热压工艺优化提供条件。通过分析板坯含水率、微波功率对板坯升温速率及水分流失的影响，筛选适合微波预热的板坯含水率及微波预热功率等优化工艺参数；并基于优化的微波预热工艺，进一步制备pMDI桉木胶合板，探究微波预热工艺对其生产效率及物理力学性能的影响，旨在为pMDI胶合板连续平压生产提供研究基础和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

桉木 (*Eucalyptus* spp.) 单板, 幅面为 30 mm×30 mm, 厚度为 1.7 mm, 初始含水率为 9%~11%, 气干密度为 0.53 g/cm³。外购。

pMDI 胶黏剂: 黏度为 150~250 mPa·s (25 °C), 异氰酸根 (—NCO) 质量分数为 30.5%~32.0%, 密度为 1.22~1.25 g/cm³ (25 °C)。采购自万华化学集团。

1.2 试验设备

柜式微波预热装置 (JS-60), 4 个微波发生器上下各 2 个, 每个微波发生器最大功率为 1 kW, 可无级调节; 光纤温度传感器 (FS-03); 恒温恒湿箱 (HK-225G); 万能力学试验机 (ETM105D); 电热恒温干燥箱 (DHG-9145A); 平板式热压机 (CAP5401); 电子天平 (AB104-S) 等。

1.3 微波预热胶合板制备

1.3.1 胶合板板坯制备 采用喷雾加湿法配合恒温恒湿箱调节单板含水率分别为 12%、18%、24%, 7 块单板纵横交错组坯, 分别将光纤传感器固定在表层、次表层和芯层单板表面中心位置 (图 1), 测量微波预热时不同层单板中心点位置的温度变化。

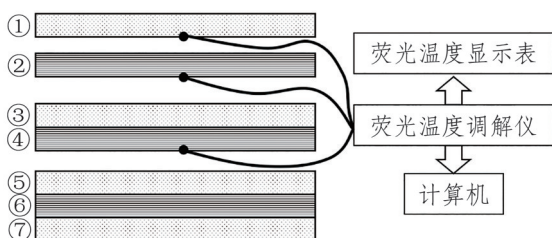


图1 胶合板单板表面测温点示意

Fig.1 Schematic diagram of the positions for measuring surface temperature of veneer during making plywood

1.3.2 微波预热 将板坯置于柜式微波预热装置腔的正中心位置, 为探究安全微波功率区间内板坯的升温规律, 设置梯度间隔为 0.5 kW, 即微波功率分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 kW。试验时打开所有微波发生器, 每个微波发生器的功率为设定功率的 1/4, 确保均匀加热, 每组试验设置 3 个平行样。将光纤传感器连入计算机, 观测记录 0~90 s 内实时温度变化, 并计算板坯在一定时间范围内的

平均升温速率, 计算方法如式 (1) 所示。

$$v = \frac{\Delta T}{t} \quad (1)$$

式中: v 为平均升温速率, °C/s; ΔT 为升温幅度, °C; t 为微波加热时间, s。

通过对测试数据进行拟合, 从而对超出设定微波功率下的升温规律进行预测。最后, 采用优化的微波功率进行验证和后续试验。

1.3.3 胶合板制备 采用优化的微波预热功率、预热时间及板坯含水率制备胶合板。具体操作如下: 首先用细毛刷将 pMDI 胶黏剂均匀涂覆于单板上表面, 单面施胶量为 45 g/m², 施胶完成后按预设方案组坯; 随后将板坯放入微波预热箱进行预热, 微波预热结束后立即移入热压机中进行热压。同步设置对照组试验, 制备未经微波预热直接热压的胶合板 (简称直接热压胶合板)。设置热压压力为 0.9 MPa、热压温度为 190 °C^[14], 热压时间为 15~40 s/mm, 成型胶合板厚度控制在 10 mm 左右, 每个试验条件重复制备 3 块试样。

1.4 性能测试

参照 GB/T 17567—2022 《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》测试胶合板的 I 类胶合强度、24 h 吸水厚度膨胀率与吸水率。分别从 3 块胶合板上取样, 每块板各取表层胶合强度 (第①、②层及第⑥、⑦层单板间胶层的强度) 试件 6 个、芯层胶合强度 (第③、④层及第④、⑤层单板间胶层的强度) 试件 6 个、24 h 吸水厚度膨胀率试件 5 个、吸水率试件 5 个进行测试, 结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 微波预热对板坯温度的影响

2.1.1 微波预热对板坯升温幅度的影响 对板坯表层、次表层、芯层的实时温度取平均值, 在含水率为 12%~24%、微波功率为 0.5~2.0 kW 时, 板坯的升温曲线如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在相同的微波功率条件下, 板坯升温幅度随着板坯含水率的增加总体呈下降趋势。在微波电磁场中, 含水率主要通过影响木材的相对介电系数、损耗角正切值、密度和比热容, 来改变微波预热中板坯温度的变化。其中木材的相对介电系数和损耗角正切值是衡量木材在

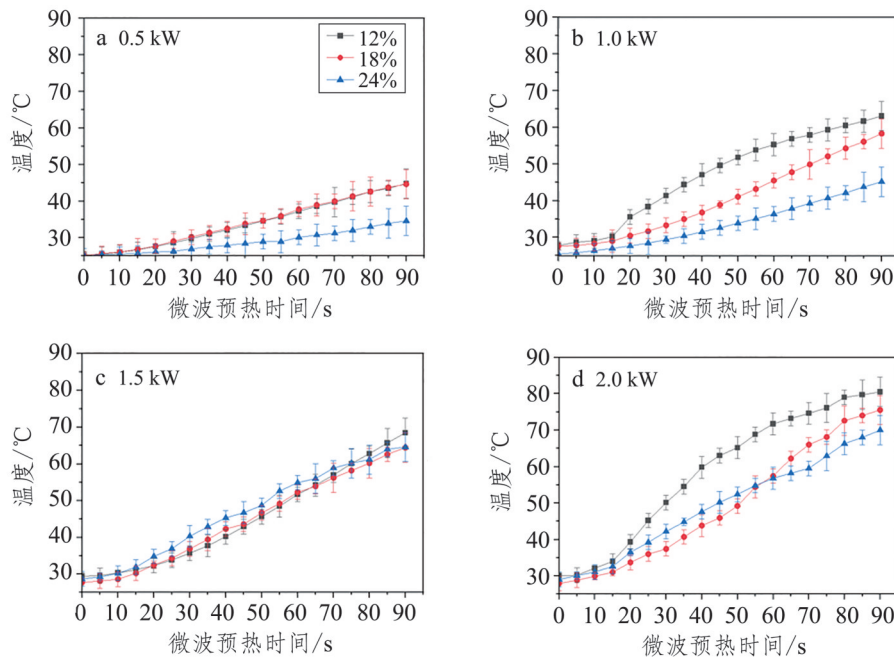


图2 不同微波预热功率时桉木胶合板板坯的升温曲线

Fig.2 Heating curves of Eucalyptus plywood mats under different microwave powers

微波场中将微波能转化为热效率的关键参数^[15-16]。在微波电磁场中,板坯含水率越高,其介电损耗因子(为木材相对介电系数与介电损耗角正切的乘积)越大,将微波能转化为热能的效率越高。但板坯的含水率越高,要将其加热到一定温度所需要吸收的热量就越多。这一现象表明,在微波功率有限的情况下,含水率升高虽然能增强木材对微波的吸收能力,但其自身升温所需的热量消耗更大,最终反而不利于板坯的快速升温。

在相同含水率的条件下,微波功率越高,板坯在相同加热时长内达到的温度也越高。微波功率的提升可增强微波场中的电场强度,进而提高木材的升温幅度^[15]。与含水率通过多参数耦合作用影响木材升温不同,微波功率可通过直接改变输入能量强度调控加热速率,对板坯温度的提升作用更为直接高效。

2.1.2 微波预热对板坯升温速率的影响 仅通过一定时间内的最终升温幅度来表征微波预热的效果,尚不足以全面反映板坯在微波场中的动态加热规律,也无法揭示温度随预处理时间变化的快慢与加热效率的差异。为此,进一步引入升温速率这一指标,量化分析微波预处理条件下板坯的升温特性,从而更准确地评价不同因素对微波加

热效率的影响。研究对每30 s内板坯的平均升温速率进行计算分析,结果见图3。

图3显示,在微波预热30~60 s内,大部分板坯的升温速率最大。在0~30 s的微波预热初期,木材极性分子在微波场中的极化响应效率较低,导致木材的微波吸收效率较低;在30~60 s的微波预热中期,随着温度升高,分子热运动加剧,木材极性分子在微波电场中的极化能力提高,木材吸收微波能并转化为热能的能力增强^[15],升温速率显著提升($P<0.05$);在60~90 s的微波预热后期,木材中水分开始蒸发,一方面导致板坯含水率快速下降,直接造成木材介电损耗因子降低,即微波能吸收效率下降;另一方面,水分蒸发所需的汽化潜热将板坯吸收的微波能量分流,导致用于升温的能量减少^[16],这两个因素共同作用使60~90 s内升温速率显著降低($P<0.05$)。对微波预热功率和板坯含水率与板坯升温速率之间的显著性进行分析(表1),结果显示微波预热功率与板坯含水率对板坯升温速率影响显著($P<0.01$)。

2.1.3 微波预热升温规律预测 已有研究表明,pMDI胶发生剧烈固化的反应温度为100 °C^[17]。为避免pMDI胶提前大规模固化,宜将微波预热后板坯的温度控制在100 °C以内。综合考虑生产成本和

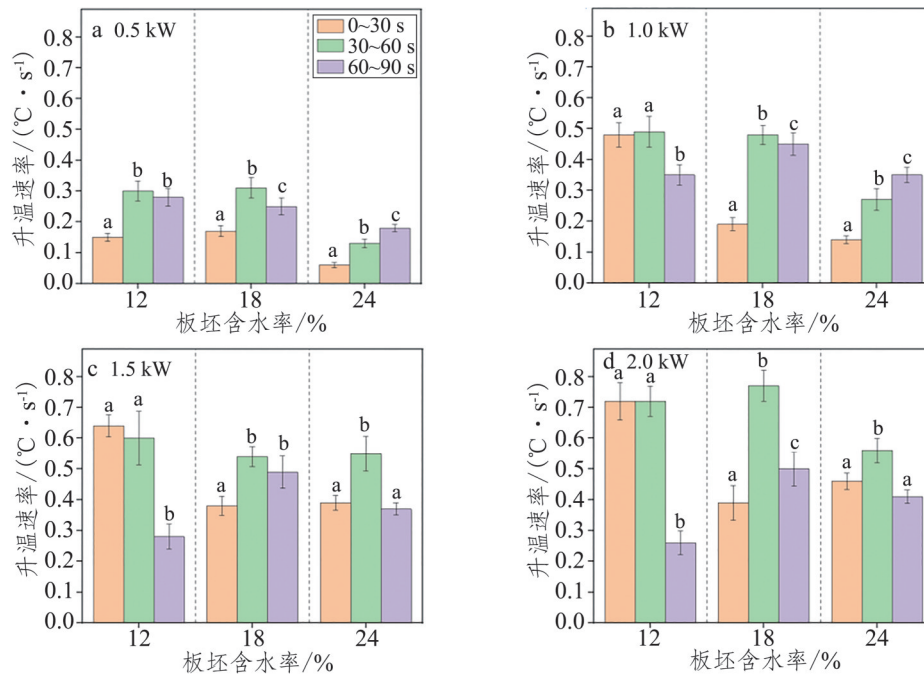


图3 不同微波预热时段桉木胶合板板坯的升温速率

Fig.3 Heating rate of Eucalyptus plywood mats under different microwave preheating periods

表1 桉木胶合板板坯升温速率的方差分析

Tab.1 Variance analysis of heating rate of Eucalyptus plywood mats

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	0.222	5	0.044	44.332	0	显著
板坯含水率	0.193	3	0.064	64.208	0	**
微波功率	0.029	2	0.015	14.518	0.005	**
误差	0.006	6	0.001			
总和	2.046	12				
R ²	0.974					

注:**为差异极显著($P < 0.01$)。

效率,建议在60 s内将板坯预热至80℃左右。若环境室温为25~30℃,则板坯的升温幅度应控制在50~55℃。根据前述研究结果可知,在所选单板含水率范围内,微波功率为0.5~2.0 kW时,难以在60 s内将板坯加热至80℃。因此,为探究合适的微波功率,对前述测试数据进行拟合,探索微波功率与板坯升温幅度之间的关系,结果见图4。

图4显示,板坯含水率为12%、18%、24%时,拟合模型的决定系数(R^2)分别为0.916、0.996、0.973,拟合效果较好。根据拟合结果,当微波功率增加至3.0 kW时,在所选含水率范围内板坯均可在60 s内升温50~55℃,因此选取微波功率为3.0 kW开展后续试验。

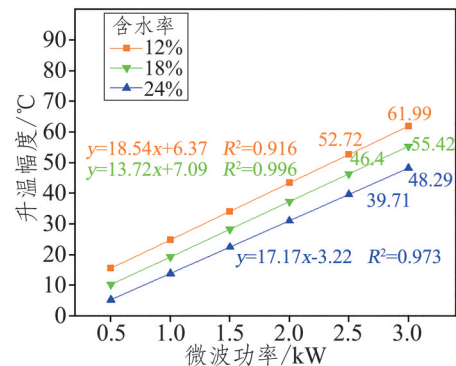


图4 微波功率与桉木胶合板板坯升温幅度的线性拟合

Fig.4 Linear fitting between microwave power and heating amplitude within Eucalyptus plywood mats

为验证拟合结果的可靠性,在微波功率为3.0 kW时,测试不同含水率板坯的表层、次表层与芯层的温度变化,结果如图5所示。

图5显示,微波功率为3.0 kW时,不同含水率的板坯在60 s内均可达到80℃;不同含水率条件下,板坯表层升温均滞后于芯层与次表层。这是因为板坯表层直接与外界接触,预热过程中热量易向周围环境散失;同时预热过程中表层水分蒸发也会带走部分潜热,进一步降低表层温度。而胶合板芯层为相对封闭的多层结构,热量不易散发,致使内部温度持续升高^[18]。

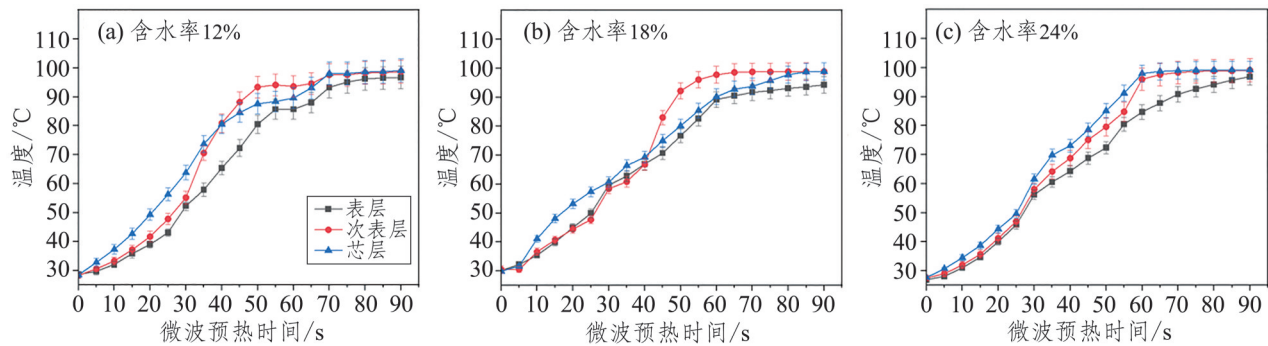


图5 桉木胶合板板坯不同位置的升温曲线(微波功率为3.0 kW)

Fig.5 Heating curves at different positions of Eucalyptus plywood mats under 3.0 kW microwave power

2.2 微波预热对板坯含水率的影响

为探究微波预热对板坯含水率的影响,将不同含水率的单板组坯后,在微波功率为3.0 kW的条件下加热60 s,测量微波预热前后板坯的质量,计算板坯的含水率变化,结果如表2所示。

表2 微波预热对桉木胶合板板坯含水率的影响

Tab.2 Effect of microwave preheating on the moisture content of Eucalyptus plywood mats

初始含水率/%	初始质量/g	预热后质量/g	预热后含水率/%	水分流失率/%
12	609.12	596.62	9.70	2.31
18	656.30	641.44	15.31	3.22
24	696.29	677.27	20.63	3.36

由表2可知,微波预热导致的水分流失随着板坯初始含水率的增大而增加,即板坯含水率越高,微波预热后损失的水分就越多。这是因为高含水率板坯具有更强的微波吸收能力,相同时间内产生更多热量,为水分汽化提供更充足的汽化潜热^[19]。根据前期预试验结果可知,pMDI桉木胶合板制备优化工艺要求板坯含水率控制在20%,根据水分流失率结果,最终确定微波预热pMDI桉木胶合板制备较优工艺参数为板坯含水率24%、微波功率3.0 kW。

2.3 微波预热pMDI桉木胶合板性能

2.3.1 胶合强度 根据前述研究结果,选取含水率为24%的桉木单板,施胶后横纵交错组成7层板坯,经微波功率3.0 kW预热60 s后,立即放入热压机热压制备pMDI胶合板,与未经微波预热直接热压胶合板的表层胶合强度与芯层胶合强度测试结果,如图6所示。

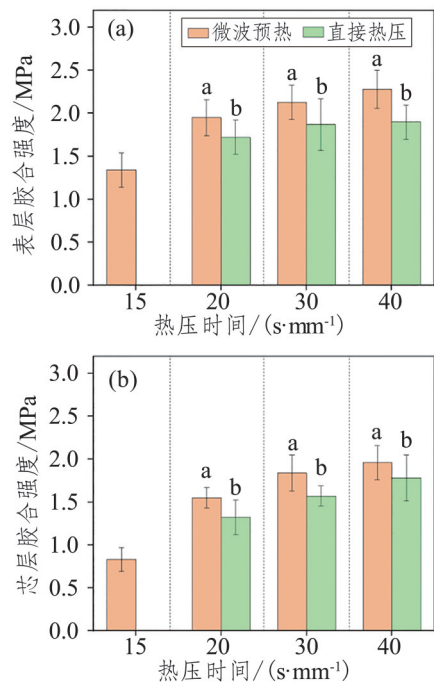


图6 微波预热对pMDI桉木胶合板胶合强度的影响

Fig.6 Effect of microwave preheating on the bonding strength of pMDI Eucalyptus plywood

从图6可以看出,在相同热压条件下,微波预热热胶合板的表层和芯层胶合强度均大于直接热压的胶合板($P < 0.05$)。这是因为微波预热能够有效缩短板坯在热压机内升温至pMDI固化温度的时间,间接延长pMDI胶黏剂的有效固化时长。经微波预热后,热压时间为20 s/mm时,胶合板的表层和芯层胶合强度分别为1.95和1.55 MPa;而直接热压胶合板在热压时间为30 s/mm时,其表层和芯层胶合强度分别为1.87和1.57 MPa。表明微波预热处理可使胶合板达到目标胶合强度所需的热压时间缩短,从而提升热压效率。

为提高制备效率,研究探索进一步缩短热压时间,发现微波预热pMDI桉木胶合板成型的最短热压时间可缩至15 s/mm,此时胶合板的表层和芯层胶合强度分别为1.34和0.83 MPa,平均胶合强度为1.09 MPa,满足GB/T 9846—2015《普通胶合板》中对I类桉木胶合板胶合强度 ≥ 0.70 MPa的要求。而直接热压胶合板在热压时间为15 s/mm时无法成型。

2.3.2 耐水性能 微波预热对pMDI胶合板耐水性能的影响,如图7所示。

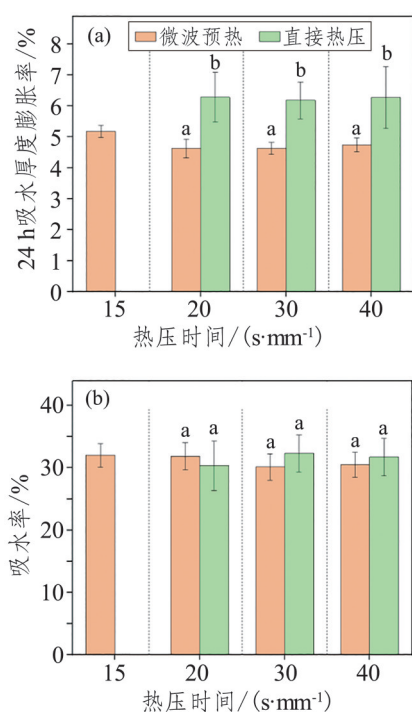


图7 微波预热对pMDI桉木胶合板耐水性能的影响
Fig.7 Effect of microwave preheating on the water resistance of pMDI Eucalyptus plywood

图7a显示,微波预热胶合板的24 h吸水厚度膨胀率低于直接热压胶合板 ($P<0.05$),而微波预热胶合板和直接热压胶合板的吸水率差异不显著(图7b)。这主要是因为微波预热延长pMDI胶黏剂的有效固化时长,使其形成更致密的交联网络,从而有效约束板材厚度方向上的尺寸变化^[20]。但pMDI胶黏剂施胶量相对偏小,微波预热并不能直接改善胶黏剂对木材单板上孔道结构的封闭作用,因此其吸水率仍维持在与直接热压胶合板相近的水平^[21]。

3 结论

1) 通过分析微波预热功率(0.5、1.0、1.5、2.0 kW)对7层pMDI桉木胶合板不同含水率板坯升温特性的影响,发现微波功率和板坯含水率对板坯升温速率影响显著 ($P<0.01$),板坯的升温速率随着板坯含水率的增加而降低,随着微波功率的增加而增加;在微波预热30~60 s内,板坯的升温速率最大。

2) 基于板坯升温数据进行拟合,并结合在60 s内将板坯升温至80 °C的实际生产需求,确定适合微波预热的板坯含水率为24%,微波功率为3.0 kW。在此工艺条件下,微波预热可缩短pMDI桉木胶合板的热压时间至15 s/mm,制备胶合板的表层和芯层胶合强度分别为1.34和0.83 MPa,平均胶合强度为1.09 MPa,满足GB/T 9846—2015《普通胶合板》中对I类桉木胶合板胶合强度 ≥ 0.70 MPa的要求。直接热压板坯在热压时间为15 s/mm时无法成型。

3) 微波预热技术可改善pMDI桉木胶合板厚度方向升温不均的问题,提升板坯芯层升温速率与内部温度的均匀性,具有提高pMDI胶合板连续平压生产线生产效率的潜力,并有助于改善胶合板的胶合强度与耐水性能。研究为工业化生产中微波预热技术的应用提供数据支撑与技术参考,助力pMDI胶合板的连续化、规模化生产。

参考文献:

- [1] 伍艳梅,吕斌.我国人造板产品发展现状及建议[J].中国人造板, 2020, 27(4): 7-11.
WU Y M, LYU B. Analysis on present development status and future prospect of wood-based panels in China[J]. China Wood-Based Panels, 2020, 27(4): 7-11.
- [2] 刘同达,黄腾华,潘礼成,等.脲基超支化氨基树脂与柠檬酸协同改性pMDI木材胶黏剂的制备及性能[J].木材科学与技术, 2026, 40(2): 23-31.
LIU T D, HUANG T H, PAN L C, et al. Preparation and performance of urea-based hyperbranched amino resin and citric acid synergistically modified pMDI wood adhesives[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2026, 40(2): 23-31.
- [3] 刘翔.纤维板和胶合板热压过程中的传热规律研究[D].南京:南京林业大学, 2013.
- [4] 常亮,郭文静,陈勇平,等.人造板用无醛胶黏剂的研究进展及应用现状[J].林产工业, 2014, 41(1): 3-6, 12.
CHANG L, GUO W J, CHEN Y P, et al. Review of research and application of non-formaldehyde adhesives for producing wood-based panels[J]. China Forest Products Industry, 2014, 41(1): 3-6, 12.
- [5] 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.
- [6] NGUYEN THI HUONG GIANG, 张齐生. 竹集成材高频热压过程中板坯内温度的变化趋势[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(2): 167-172.
GIANG NGUYEN THI HUONG, ZHANG Q S. Temperature inside mats of high-frequency, hot pressed, glued and laminated bamboo[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2015, 32(2): 167-172.
- [7] FARAJOLLAH POUR M, EDALAT H, VALIZADEH KIAMAHALLEH M, et al. Microwave-assisted laminated veneer lumber (LVL): Investigation on the effect of preheating time and moisture content on resin penetration and bonding quality[J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 304, 124677. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124677>.
- [8] ZHENG Y, JIANG Z H, SUN Z J, et al. Effect of microwave-assisted curing on bamboo glue strength: Bonded by thermosetting phenolic resin[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 320-325.
- [9] 余妙春, 饶久平, 谢拥群. 中密度纤维板微波预热后板坯内水分和温度的分布[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(6): 47-48, 64.
YU M C, RAO J P, XIE Y Q. Moisture and temperature distribution of MDF mat after microwave preheating[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(6): 47-48, 64.
- [10] 王旭. 微波预热 MDF 板坯的实验研究[J]. 福建林业科技, 2006, 33(1): 36-39.
WANG X. An experimental study of MDF fiber mat preheating by using microwave technology[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2006, 33(1): 36-39.
- [11] 王志闯, 王婷欢, 杨晨, 等. 微波加热中木材内部温度场的电磁-热耦合模拟[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(9): 162-170.
WANG Z C, WANG T H, YANG C, et al. Electromagnetic-thermal coupled modeling of internal temperature field in wood during microwave heating[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 162-170.
- [12] 张正启, 常亮, 邱方亮, 等. 连续平压异氰酸酯胶合板生产工艺与质量控制[J]. 中国人造板, 2025, 32(12): 18-24, 29.
- ZHANG Z Q, CHANG L, QIU F L, et al. Production process and quality control of continuous flat-pressed isocyanate (pMDI) bonded plywood[J]. China Wood-Based Panels, 2025, 32(12): 18-24, 29.
- [13] 瞿国富, 任丁. 胶合板连续压机生产线的解决方案[J]. 中国人造板, 2020, 27(2): 8-12.
QU G F, REN D. Solution of automatic continuous press line for plywood[J]. China Wood-Based Panels, 2020, 27(2): 8-12.
- [14] 潘礼成, 黄强, 李骛, 等. pMDI 桉木胶合板工艺因子对其力学性能影响的研究[J]. 林产工业, 2025, 62(4): 18-26.
PAN L C, HUANG Q, LI A, et al. Research on process factors and performance effects of pMDI Eucalyptus plywood[J]. China Forest Products Industry, 2025, 62(4): 18-26.
- [15] 刘一星, 赵广杰. 木材学[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [16] 杨敏. 微波处理释放木材干燥应力的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [17] 杨平德, 郑凤山. 麦秸刨花板用 PMDI 胶粘剂固化条件的研究[J]. 中国胶粘剂, 2005, 14(1): 37-39.
YANG P D, ZHENG F S. Study on cure conditions of PMDI-based binder in use of wheatstraw particleboard[J]. China Adhesives, 2005, 14(1): 37-39.
- [18] 苗平. 马尾松木材高温干燥的水分迁移和热量传递[D]. 南京: 南京林业大学, 2000.
- [19] GALPERIN A. Moisture content distribution in a thin wood sample heated by microwave energy in a rectangular waveguide[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1990, 25(2): 88-99.
- [20] YOUNESI-KORDKHEILI H, PIZZI A. A comparison between the influence of nanoclay and isocyanate on urea-glyoxal resins[J]. International Wood Products Journal, 2018, 9(1): 9-14.
- [21] 何盛, 林兰英, 傅峰, 等. 六种木材的微波处理实验研究[J]. 微波学报, 2014, 30(4): 90-96.
HE S, LIN L Y, FU F, et al. Experimental study of six species of wood treated by microwave[J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(4): 90-96.
- (责任编辑 徐朝阳 / 编校 向琴)

(上接第37页)

- [17] 王琰, 彭尧, 曹金珍. 木基相变蓄热材料研究进展[J]. 世界林业研究, 2021(6): 45-49.
WANG Y, PENG Y, CAO J Z. Research progress in wood-based phase change materials for thermal storage[J]. World Forestry Research, 2021(6): 45-49.
- [18] WANG J A, YUE H, DU Z L, et al. Flame-retardant and form-stable delignified wood-based phase change composites with superior energy storage density and reversible thermochromic properties for visual thermoregulation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(9): 3932-3943.
- [19] CHEN X, GAO H Y, TANG Z D, et al. Metal-organic framework-based phase change materials for thermal energy storage[J/OL]. Cell Reports Physical Science, 2020, 1(10): 100218. DOI: 10.1016/j.xcrp.2020.100218.
- [20] 谢成, 刘志明, 吴鹏, 等. 聚乙二醇木材复合相变储能材料的制备及表征[J]. 林业科学, 2012, 48(9): 120-126.
XIE C, LIU Z M, WU P, et al. Preparation and characterization of polyethylene glycol wood composite phase change materials[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(9): 120-126.
- [21] 何林韩, 凌凯莉, 刘士瑞, 等. 脱木素对木基复合相变储能材料封装效率及热性能的影响[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(2): 42-47, 59.
HE L H, LING K L, LIU S R, et al. Effect of delignification on the packaging efficiency and thermal properties of wood-based composite phase change heat storage materials[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(2): 42-47, 59.
- [22] ZHANG S P, XIONG P, YANG X J, et al. Novel PEG functionalized graphene nanosheets: enhancement of dispersibility and thermal stability[J]. Nanoscale, 2011, 3(5): 2169-2174.
- [23] ZHANG G, WU W H, YAO M, et al. A graphene@Cu-MOF hybrid synthesized by mechanical ball milling method and its flame retardancy and smoke suppression effect on EP[J/OL]. Chemosphere, 2024, 346: 140521. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140521.
- [24] NGUYEN C C, TRAN N M Q, et al. Thermal conductivity of metal-organic frameworks (MOFs)[J/OL]. Chemical Physics Reviews, 2025, 6(4): 041305. DOI: 10.1063/5.0263097.
- (责任编辑 王小青 / 编校 曹惠敏、向琴)