

引用格式: 刘琼瑶, 屈熙, 刘小倩, 等. 薄木-PE 复合层积装饰板的制备与性能优化[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(2): 393–401. LIU Qiongyao, QU Xi, LIU Xiaoqian, *et al.* Preparation and properties optimization of veneer-PE laminated decorative panels[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(2): 393–401.

薄木-PE 复合层积装饰板的制备与性能优化

刘琼瑶¹, 屈熙¹, 刘小倩¹, 方露¹, 常亮²

(1. 南京林业大学 家居与工业设计学院, 江苏 南京 210037; 2. 中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 【目的】以热固性树脂浸渍纸高压装饰层积板 (HPL) 的层压复合结构为基础, 开展薄木-聚乙烯 (PE) 薄膜复合层积装饰板 (WDL) 制备工艺的研究, 为制备性能优异的无醛复合装饰板提供理论依据。【方法】以 PE 和重组装饰薄木为原材料, 采取顺纹组坯的方式热压复合, 制备 5 层结构的薄木-PE 复合层积装饰板, 并采用响应面法 Box-Behnken 模型优化装饰板的热压工艺参数。【结果】热压温度、热压时间对层积装饰板的浸渍剥离性能有显著影响, 而热压压力对其浸渍剥离性能没有显著影响。随着热压温度和热压时间的增加, 浸渍剥离长度逐渐减小。热压温度和时间、热压时间和压力对装饰板的浸渍剥离性能有显著交互作用。薄木-PE 复合层积装饰板的顺纹抗拉强度主要由重组装饰薄木自身的强度和厚度决定, 但在热压过程中热压温度也会影响薄木-PE 复合层积装饰板的顺纹抗拉强度。结合实际生产, 热压温度为 160 ℃、热压时间为 109 s、热压压力为 1 MPa 时, 得到的浸渍剥离长度实际值达到 0 mm, 顺纹抗拉强度达 38.2 MPa。【结论】本研究制备了新型薄木-PE 复合层积装饰板, 无游离甲醛释放, 其耐水性达到了 GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》中 II 类浸渍剥离性能测试要求, 可满足普通室内装修领域的需求, 且后期饰面过程中无需再次添加胶黏剂, 是 HPL 的升级产品。图 8 表 3 参 27

关键词: 聚乙烯膜; 重组装饰薄木; 响应面法; 浸渍剥离长度; 顺纹抗拉强度

中图分类号: S781 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)02-0393-09

Preparation and properties optimization of veneer-PE laminated decorative panels

LIU Qiongyao¹, QU Xi¹, LIU Xiaoqian¹, FANG Lu¹, CHANG Liang²

(1. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] This study aims to prepare wooden decorative laminates-sheets made from polyethylene film (WDL) based on the laminated composite structure of high-pressure decorative laminates made from thermosetting resins impregnated sheets (HPL), which provides a theoretical basis for the preparation of aldehyde-free composite decorative panels with excellent performance. [Method] Polyethylene film and reconstituted decorative veneer were used as raw materials, and the five-layer structural WDL were prepared by hot pressing in the way of smooth-grain grouping. Box-Behnken Response Surface Analysis was used to study the impact of hot-pressing factors on the impregnation peeling performance and tensile strength of the smooth grain and to optimize the process parameters for the preparation of decorative panels. [Result] The impregnation peeling performance of WDL was affected greatly by hot-pressing temperature and hot-pressing time, while hot-pressing pressure had no significant effect on the impregnation peeling performance. The

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-09-18

基金项目: 国家木竹产业技术创新战略联盟科研计划项目 (TIAWBI2023-04)

作者简介: 刘琼瑶 (ORCID: 0009-0009-3400-2120), 从事家居设计与工程研究。E-mail: liuqiongyao@njfu.edu.cn。通信作者: 方露 (ORCID: 0000-0003-1331-7966), 副教授, 博士, 从事绿色家居材料研究。E-mail: fanglu@njfu.edu.cn

peeling length gradually decreased with the increase of hot-pressing temperature and hot-pressing time. Hot-pressing temperature and time, hot-pressing time and pressure also had significant interaction effects on the impregnation peeling performance of WDL. The tensile strength along the grain of WDL was mainly determined by the strength and thickness of the reconstituted decorative veneer, and the hot-pressing temperature also affected the tensile strength of WDL. Low temperature could result in inadequate cementation of the reconstituted decorative veneer and PE, and high temperature could lead to degradation of the hemicellulose in the veneer, all of which adversely affect the tensile strength along the grain of WDL. When the hot-pressing temperature was 160 °C, the hot-pressing time was 109 s, and the hot-pressing pressure was 1 MPa, the impregnation peeling length of the decorative boards under these conditions reached 0 mm, and the tensile strength of the smooth grain reached 38.2 MPa, which was close to the prediction results of the optimization model. [Conclusion] A new type of veneer-PE laminated decorative panels is prepared, which has no formaldehyde release, and its water resistance meets the requirements of the Type II immersion peel test according to GB/T 17657-2022. It can meet the needs of general interior decoration field, and there is no need to add adhesive again in the post-finishing process, which is an upgraded product of HPL. [Ch, 8 fig. 3 tab. 27 ref.]

Key words: polyethylene film; reconstituted decorative veneer; Response Surface Methodology; impregnation peeling length; tensile strength along the grain

热固性树脂浸渍纸高压装饰层积板 (high-pressure decorative laminates made from thermosetting resins impregnated sheets, HPL) 是由不同树脂浸渍的表层纸、装饰纸和多层牛皮纸层积后在高压下热压而成的一种装饰材料^[1]。HPL 的层压复合结构赋予其优异的耐热、耐磨、耐化学等表面性能, 当前 HPL 广泛应用于实验室、医院和商业场所等^[2]。但是由于三聚氰胺甲醛 (MF) 树脂具有硬而脆、稳定性差的特点^[3], 使得 HPL 的韧性较差。在 HPL 芯层加入纳米纤维或使用化学药剂改性浸渍树脂可有效改善 HPL 的脆性问题, 同时赋予 HPL 机械强度、水解稳定性、耐火性等功能^[4-5]。JI 等^[6]以牛皮纸作为 HPL 的底层材料, 在 2 层牛皮纸中间加入无纺布醋酸纤维素 (CA) 纳米纤维垫, 提升 HPL 的弯曲性能。当加入 5 层 CA 纳米纤维垫时, HPL 的断裂伸长率为 27.9%, 屈服强度为 40.8 MPa, 分别比原始 HPL 提高了 4.4 和 5.9 倍。但是使用静电纺丝法制备 CA 纳米纤维存在耗时长和成本高等问题。

HPL 的外观和质感主要由表层装饰纸决定, 近年来, 数码打印和同步对纹技术可以使 HPL 呈现不同的纹理、图案和颜色^[7], 但仍缺乏木质材料特有的自然纹理和亲和触感。重组装饰薄木是利用普通速生材生产的一种饰面材料, 不仅具有天然木材的纹理和质感, 而且原材料来源广泛^[8]。以重组装饰薄木为基本单元, 借鉴 HPL 的层压复合结构, 有望制备出一种性能优异的木质复合装饰板材, 在轨道交通、室内装修、公共场所等领域具有广阔的应用前景。

胶黏剂和胶接技术在木质材料复合中发挥着重要作用, 除了保证胶合质量外, 环保性能、胶接效率和生产能耗均是工业界和学术界关注的重点。近年来, 聚乙烯 (PE) 薄膜以其环境友好性、良好的柔韧性、耐水性和加工性等优势, 成为传统的“三醛胶”木质复合材料的有效替代产品, 广泛用于木质材料的胶接^[9-10]。PE 薄膜具有受热软化、冷却固化的特性^[11], 其对木质材料的胶合是在木材表面熔融软化、流展、渗透和冷却固化的过程^[12-13]。适宜的工艺条件下, 熔融的热塑性树脂大分子在木材多孔性结构中的填充及其对损伤细胞的修复作用^[14], 能够赋予热塑性树脂复合材料优良的力学强度和耐水性能^[15-16]。为了制备一种无醛、性能优异的装饰板, 本研究提出使用 PE 薄膜对重组装饰薄木进行胶合以制备薄木-PE 复合层积装饰板 (wooden decorative laminates-sheets made from polyethylene film, WDL)。通过响应面方法分析热压温度、热压时间、热压压力对装饰板浸渍剥离性能和顺纹抗拉强度的影响, 模拟优化出 WDL 的最佳制备条件, 为推进其应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

重组装饰薄木: 椴木科技木, 购于德清洛舍佳朋木皮厂, 规格为 200 mm×200 mm, 厚度为 0.2 mm,

含水率为 6%~12%；PE 薄膜：购于沐阳登农商贸有限公司，厚度为 0.1 mm，密度为 $0.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 方法

1.2.1 薄木-PE 复合层积装饰板的制备 采取顺纹的方式将重组装饰薄木和 PE 薄膜进行组坯并热压复合，制备 5 层结构的薄木-PE 复合层积装饰板(图 1)。

1.2.2 响应面试验设计 以热压温度、热压时间、热压压力 3 个因素为自变量，以浸渍剥离长度(Y_1)和顺纹抗拉强度(Y_2)为响应值，选用 3 因素 3 水平进行响应面试验设计(表 1)。应用 Design Expert 13，建立数学回归模型，优化 WDL 的热压工艺。为了避免冷却过程中 PE 薄膜收缩产生的内应力，热压结束后对 WDL 进行二次冷压定型处理，定型时间为 4 min，定型压力为 1 MPa。

1.2.3 响应面最佳工艺的验证 根据响应面试验结果，得出最优的热压工艺参数，对最优工艺条件下的 WDL 进行浸渍剥离性能和顺纹抗拉强度的测试，选取测试的数据与响应面模型计算的预测值对比，以验证其可靠性。本研究利用 Design Expert 13 进行数据分析和模型模拟，利用 Origin 2021 绘图。

1.3 测试与表征

浸渍剥离性能：根据国家标准 GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》中浸渍剥离性能测试要求，取尺寸为 $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的试件，将其放在 $(63 \pm 3)^\circ\text{C}$ 热水中浸渍 3 h，然后放置于 $(63 \pm 3)^\circ\text{C}$ 的恒温干燥箱中干燥 3 h。观察并测量试件每个胶层各边剥离的长度，结果精确至 1 mm。测试结果为 6 个试件的平均值。

顺纹抗拉强度：根据国家标准 GB/T 1040.2—2022《塑料 拉伸性能的测定 第 2 部分：模塑和挤塑塑料的试验条件》进行制样，在万能力学试验机上对薄木和 WDL 试样进行载荷-位移和强度的测试，试验速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。测试结果为 6 个试件的平均值。

PE 薄膜拉伸强度：根据国家标准 GB/T 1040.3—2006《塑料 拉伸性能的测定 第 3 部分：薄膜和薄片的试验条件》中 5 型试样的形状和尺寸进行制样，在万能力学试验机上进行测试，试验速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。测试结果为 6 个试件的平均值。

胶接界面形貌：将试样制备成尺寸为 $7 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ($L \times W \times T$) 的样块，把样块导管侧黏附在铜片上，进行喷金处理后，使用环境扫描电子显微镜 (FEI Quanta 200) 观察重组装饰薄木和 PE 薄膜的胶接界面形貌。

2 结果与分析

2.1 响应面试验方差分析

以浸渍剥离长度和顺纹抗拉强度为指标，利用响应面法 Box-Behnken 模型试验考察热压温度、热压时间和热压压力对 WDL 性能的影响。响应面试验方案及结果见表 2。

以表 2 的结果进行响应面回归模型的方差分析，结果见表 3。浸渍剥离长度的拟合模型极显著 ($P < 0.0001$)，决定系数 (R^2)=98.45%，校正决定系数 (R^2_{Adj})=96.45%，与 R^2 接近，说明响应面分析方法对浸渍剥离性能的评估是有效的。顺纹抗拉强度的拟合模型显著 ($P < 0.05$)，且失拟项不显著 ($P > 0.05$)。分析结果中 $R^2=88.98\% > 85\%$ ，说明该模型对 WDL 的顺纹抗拉强度预测结果可信。因此本研究设计方法及模型可较好地反映热压温度、热压时间、热压压力与 WDL 浸渍剥离长度之间的关系。

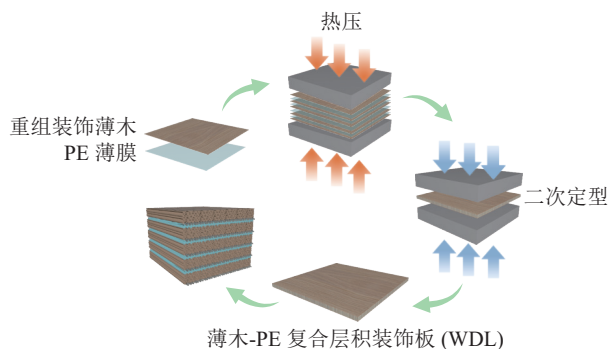


图 1 WDL 的制备流程

Figure 1 Preparation process of WDL

表 1 试验因素和水平

Table 1 Level of experimental factors

水平	因素		
	热压温度(A)/ $^\circ\text{C}$	热压时间(B)/s	热压压力(C)/MPa
-1	130	30	0.50
0	155	90	1.25
+1	180	150	2.00

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Design and results of response surface test

编号	热压温度 (A)/℃	热压时间 (B)/s	热压压力 (C)/MPa	浸渍剥离长度 (Y ₁)/mm	顺纹抗拉强度 (Y ₂)/MPa	编号	热压温度 (A)/℃	热压时间 (B)/s	热压压力 (C)/MPa	浸渍剥离长度 (Y ₁)/mm	顺纹抗拉强度 (Y ₂)/MPa
1	-1	-1	0	33	34.5	10	0	1	-1	0	43.0
2	1	-1	0	1	36.9	11	0	-1	1	8	43.3
3	-1	1	0	11	41.7	12	0	1	1	8	40.5
4	1	1	0	0	33.6	13	0	0	0	3	40.4
5	-1	0	-1	26	38.4	14	0	0	0	2	44.0
6	1	0	-1	0	37.7	15	0	0	0	6	44.2
7	-1	0	1	25	40.8	16	0	0	0	3	42.0
8	1	0	1	0	33.2	17	0	0	0	1	39.5
9	0	-1	-1	25	40.7						

表 3 浸渍剥离性能和顺纹抗拉强度方差分析

Table 3 Variance analysis of impregnation peel performance and endwise tensile strength

方差来源	浸渍剥离长度(Y ₁)/mm				顺纹抗拉强度(Y ₂)/MPa			
	平方和	均方	F	P	平方和	均方	F	P
模型	1 934.44	214.94	49.33	<0.000 1**	173.76	19.31	6.28	0.012 1*
A	1 104.50	1 104.50	253.49	<0.000 1**	24.50	24.50	7.97	0.025 7*
B	288.00	288.00	66.10	<0.000 1**	1.45	1.45	0.47	0.515 0
C	12.50	12.50	2.87	0.134 1	0.50	0.50	0.16	0.698 8
AB	110.25	110.25	25.30	0.001 5**	27.56	27.56	8.97	0.020 1*
AC	0.25	0.25	0.06	0.817 6	11.90	11.90	3.87	0.089 8
BC	156.25	156.25	35.86	0.000 5**	6.50	6.50	2.12	0.189 2
A ²	121.64	121.64	27.92	0.001 1**	98.94	98.94	32.19	0.000 8**
B ²	34.80	34.80	7.99	0.025 5*	1.04	1.04	0.40	0.578 7
C ²	80.59	80.59	18.50	0.003 6**	0.52	0.52	0.17	0.692 3
残差	30.50	4.36			21.52	3.07		
失拟项	16.50	5.50	1.57	0.328 1	3.87	1.29	0.29	0.829 9
纯差	14.00	3.50			17.65	4.41		
总离差	1 964.94				195.28			
R ²		0.984 5				0.889 8		
R _{Adj} ²		0.964 5				0.748 1		

说明：**. 极显著($P<0.01$); *. 显著($P<0.05$)。R². 决定系数; R_{Adj}². 校正决定系数。

2.2 热压因子对 WDL 性能的影响

2.2.1 热压因子对 WDL 浸渍剥离性能的影响 根据表 3 可知：热压温度和热压时间对 WDL 的浸渍剥离性能影响极显著 ($P_A<0.000\ 1$, $P_B<0.000\ 1$)。不同热压温度和热压时间下 WDL 的浸渍剥离长度见图 2，当热压时间固定，升高热压温度可显著降低试件的浸渍剥离长度，温度升高到 180 ℃ 时，试件在Ⅱ类浸渍剥离试验 (63 ℃ 水煮处理) 中几乎观察不到胶层开裂的现象。一方面是由于高温可使熔融 PE 均匀渗透到重组装饰薄木中，形成胶钉结构；另一方面是薄木在高温条件下进行了短时的热处理，表面极性基团降低，两者界面相容性增强。当热压温度不变，延长热压时间同样可以达到增强试件浸渍剥离性能的目的。当在 130 ℃ 热压温度条件下，热压时间延长至 150 s 时 WDL 试件浸渍剥离长度降低到了 11 mm，满足Ⅱ类浸渍剥离性能测试要求 ($\leq 25\ \text{mm}$)。这是因为低温条件下 PE 自身的熔融黏度高，流动性差，需要充足的时间才能在重组装饰薄木表面润湿和渗透。由图 3A 可以看出：热压温度和热压时间的 3D 响应曲面呈现为向下凹状，倾斜度较高，说明两者存在交互作用且极显著 ($P_{AB}=0.001\ 5$)，因此在实际生产中可以根据实际条件选择合适的热压温度和时间范围。

热压压力可以促进木材与胶黏剂之间的结合，适当施加压力有助于良好胶合界面的形成。从图 3B 可以看出：当热压温度一定时，WDL 试件的浸渍剥离长度随热压压力的增加呈先下降后上升的趋势，且两者的响应面等高线图接近圆形，表明两者之间交互作用不显著 ($P_{AC}>0.05$)。这是由于压力的持续增大导致熔融 PE 分子间的作用力增加使树脂整体黏度增大，从而对 WDL 的浸渍剥离性能产生不利影

响。热压温度在 180 ℃ 时, 不同压力条件下试件的浸渍剥离长度均趋近于 0 mm, 由此可见压力增大 PE 的黏度与温度降低其熔融黏度是一个相互抵消的作用。当热压温度较适宜时, 热压压力对 PE 黏度的增大占主导作用; 但热压温度足够高时, 这种反作用会逐步减弱, 此时温度减小 PE 熔融黏度的作用大于压力的增稠作用。

由图 3C 可知: 热压时间和热压压力交互作用的响应面图呈凹陷状, 表明浸渍剥离长度在热压时间为 90~120 s, 热压压力为 0.6~1.2 MPa 时趋于 0 mm。热压时间和热压压力的增加有利于熔融 PE 的渗透, 从而有效提高 WDL 的耐水性, 因此热压时间和热压压力对 WDL 浸渍剥离性能呈显著交互作用 ($P_{BC} < 0.01$)。

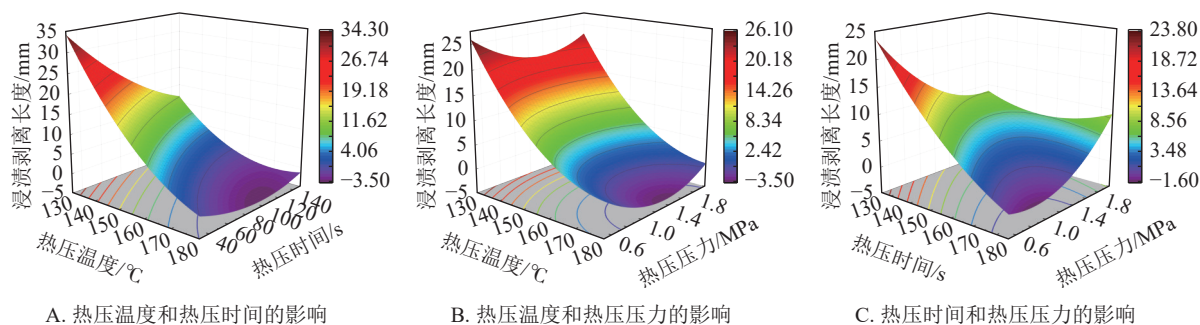
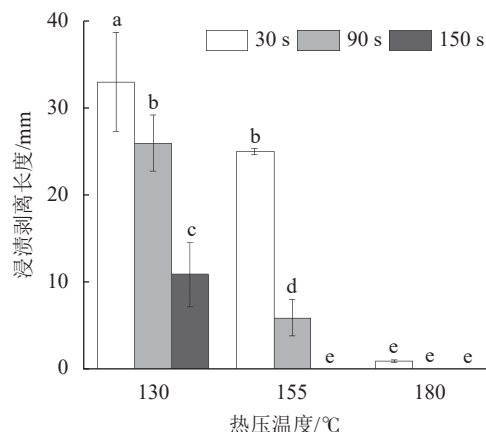


图 3 热压温度、热压时间、热压压力对浸渍剥离性能影响的响应面图

Figure 3 Response surface plots of the effects of hot-pressing temperature, time and pressure on impregnation peeling performance

2.2.2 热压因子对 WDL 顺纹抗拉强度的影响 根据顺纹抗拉强度方差分析结果可知, 热压温度对 WDL 的顺纹抗拉强度有显著影响 ($P_A < 0.05$), 且热压温度和热压时间对其顺纹抗拉强度有显著交互作用 ($P_{AB} < 0.05$)。从图 4 可以看出: 相同热压时间条件下, 热压温度为 155 ℃ 时 WDL 的顺纹抗拉强度最大。这是因为 130 ℃ 时制备的 WDL 未充分结合重组装饰薄木和 PE 薄膜 2 种材料的强度优势, 导致顺纹抗拉强度较低; 而在 180 ℃ 时, 由于热压温度的升高和时间的延长, 渗入薄木中的熔融 PE 量增大, 导致胶层黏结线变薄。

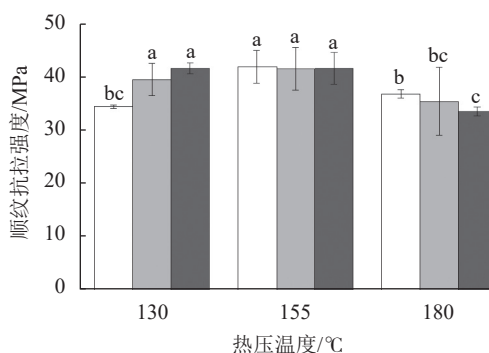
从图 5A 可以看出: PE 受载荷后塑性变形较大, 其拉伸强度为 10 MPa (图 6)。重组装饰薄木的顺纹抗拉载荷-位移曲线如图 5B, 其断裂伸长率较小, 到达最大点时薄木受到最大承载力后发生突然断裂, 原始顺纹抗拉强度达 30.6 MPa (图 6)。WDL 的整体断裂趋势与重组装饰薄木相近 (图 5C), 这是因为 PE 的添加量较少, 对 WDL 的断裂没有显著影响。层压复合之后的顺纹抗拉强度增加到了 39.7 MPa (图 6), 这说明两者复合以后, 重组装饰薄木起着承受载荷的主要作用, 而 PE 既是胶黏材料, 又可作为增强材料。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。热压压力为 1.25 MPa。

图 2 不同热压温度和热压时间下 WDL 的浸渍剥离性能

Figure 2 Impregnation peeling performance of WDL under different hot-pressing temperature and time



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。热压压力为 1.25 MPa。

图 4 不同热压温度下 WDL 的顺纹抗拉强度

Figure 4 Tensile strength along the grain of WDL under different hot-pressing temperatures

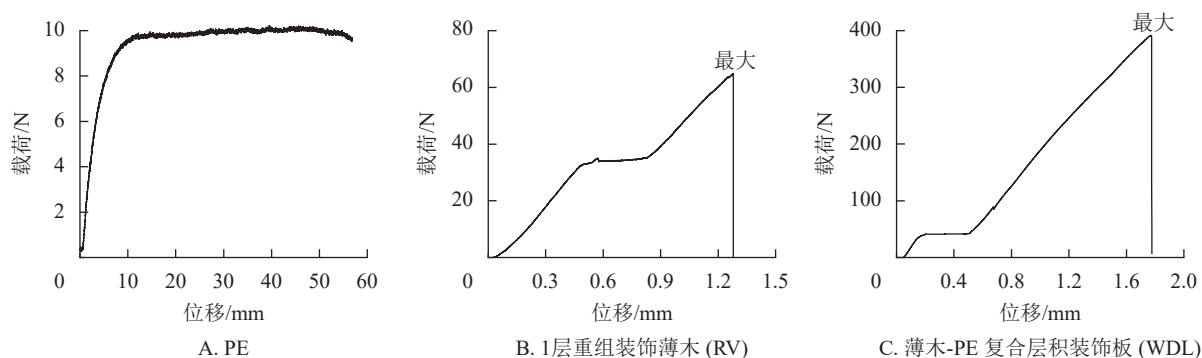


图5 不同材料的顺纹抗拉载荷-位移曲线

Figure 5 Load-displacement curves for tensile strength along the grain of different materials

根据响应面试验结果可知：WDL的顺纹抗拉强度为33~46 MPa，能满足普通室内装修和家具贴面的要求，为了能够应用到轨道运输内饰领域，后续还需增强其强度。

2.3 验证试验

根据 Design Expert 13 对方差分析的结果得到 WDL 的浸渍剥离长度 (Y_1)、顺纹抗拉强度 (Y_2) 为响应值的二次回归方程，分别如式 (1) 与式 (2)：

$$Y_1 = 379.20 - 3.47A - 0.96B - 35.68C + 3.5 \times 10^{-3}AB + 1.33 \times 10^{-2}AC + 1.39 \times 10^{-2}BC + 8.6 \times 10^{-3}A^2 + 7.99 \times 10^{-4}B^2 + 7.78C^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = -179.25 + 2.61A + 0.34B + 14.91C - 1.75 \times 10^{-3}AB - 9.2 \times 10^{-2}AC - 2.83 \times 10^{-2}BC - 7.76 \times 10^{-3}A^2 - 1.38 \times 10^{-4}B^2 + 0.63C^2. \quad (2)$$

通过软件 Design Expert 13 对模型回归方程 Y_1 、 Y_2 进行计算，并综合考虑 WDL 的性能，得到该模型最佳热压工艺参数为：热压温度 160.19 ℃、热压时间 109.11 s、热压压力 0.96 MPa。该工艺参数条件下 WDL 的浸渍剥离长度理论值为 -0.51 mm，顺纹抗拉强度理论值为 41.8 MPa。结合实际生产应用，最终确定制备 WDL 最优工艺参数为：热压温度 160 ℃、热压时间 109 s、热压压力 1 MPa。为了进一步验证回归模型的准确性，验证试验得到试件的浸渍剥离长度为 0 mm，满足 GB/T 17657—2022 中Ⅱ类浸渍剥离测试的要求。顺纹抗拉强度实际值为 38.2 MPa，达到了预测值的 91.39%，实际值与理论预测值拟合度高。本研究数据结果与响应面模型拟合效果好，说明响应面优化的结果可靠。

2.4 胶接界面微观形貌分析

由于木材与 PE 胶接时没有化学反应，主要依靠机械互锁进行结合，重组装饰薄木的多孔结构为其胶合提供了有利条件 (图 7)。PE 受热熔融后受到压力和时间的作用渗透到重组装饰薄木的孔隙结构中，形成连续的胶层和机械啮合结构，但 WDL 是由 5 层重组装饰薄木组成的，不同热压工艺条件下 PE 的渗透程度差异明显。如图 8A1，在低温短时条件下 (130 ℃) 热压复合时，几乎每层 PE 薄膜与重组装饰薄木之间都存在较大的胶接间隙，极大地影响了 WDL 的力学性能和耐水性能；即使延长热压时间到 90 s (图 8A2)，仍存在明显的胶合缺陷。而升高温度到 155 ℃ 时 (图 8B1)，两者的胶合质量得到明显改善。上述分析说明热压温度和热压时间对 WDL 的界面胶接有显著交互作用，且界面胶接的好坏对其整体性能有直接影响，这与前面分析一致。

由最优工艺条件下制备的 WDL 微观形貌图 (图 8C) 可知：该条件下重组装饰薄木和 PE 界面结合更加紧密，此时两者已经达到了良好的胶接状态，且有部分熔融 PE 渗透到薄木导管纹孔中形成更为稳定的胶钉结构，从而提高了 WDL 的耐水性，其浸渍剥离性能与响应面优化结果相吻合。此时顺纹抗拉强度实际值与预测值接近程度为 91.39%，表明模型准确可信。因此该回归模型能够较好地预测和分析热压

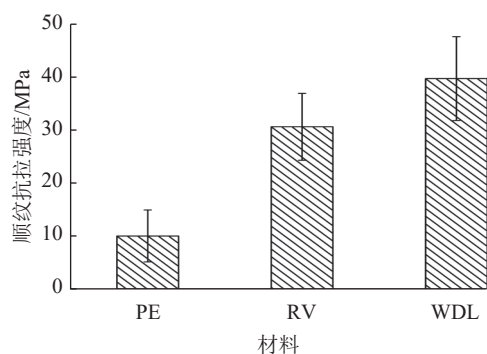


图6 不同材料的顺纹抗拉强度

Figure 6 Tensile strength of different materials

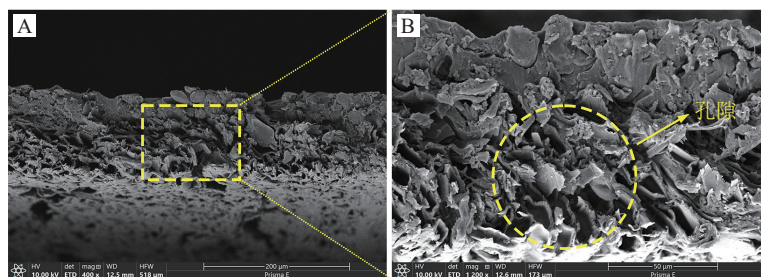
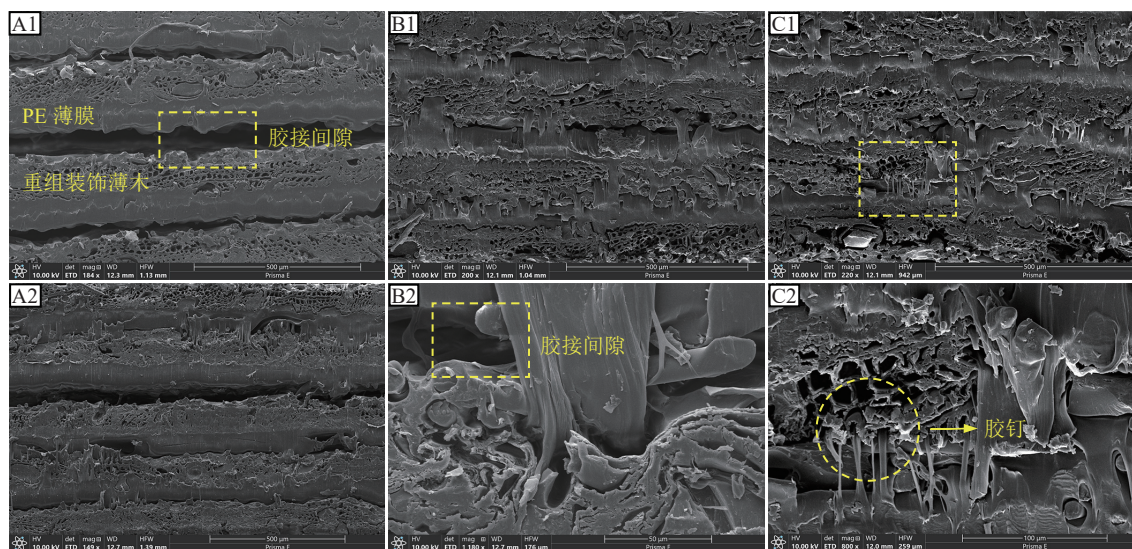


图 7 重组装饰薄木导管侧微观形貌

Figure 7 Microscopic morphology of the side of reconstituted decorative veneer conduit



A1. 热压温度 130℃、热压时间 30 s; A2. 热压温度 130℃、热压时间 90 s;
 B1. 热压温度 155℃、90 s (200×); B2. 热压温度 155℃、90 s (1 180×);
 C1. 热压温度 160℃、109 s (220×); C2. 热压温度 160℃、109 s (800×)。

图 8 不同热压条件下 WDL 的胶接界面微观形貌

Figure 8 Microscopic morphologies of WDL's adhesive interface under different hot-pressing conditions

条件与 WDL 物理力学性能的关系。

从图 8B 和 8C 可以看出：在适宜的温度条件下热压复合时，PE 薄膜与重组装饰薄木之间仍存在胶接间隙，这是因为木材与胶黏剂之间由于表面性质不同造成两者复合时难以形成完善的界面胶接层。因此在后续过程中，需对薄木进行改性处理以降低界面胶合缺陷对 WDL 性能的影响。

3 讨论

本研究使用 PE 薄膜与重组装饰薄木制备无醛复合装饰板，研究热压因子对薄木-PE 复合层积装饰板性能的影响，并阐释了热压温度、热压时间和热压压力对 PE 薄膜与重组装饰薄木的胶合作用机制。

响应面试验结果表明，对 WDL 浸渍剥离性能影响最大的因素是热压温度和热压时间，而热压压力对其性能影响不显著。这是因为 PE 薄膜与重组装饰薄木的胶合主要依靠机械啮合结构，热压温度和热压时间的增加降低了 PE 薄膜的熔融黏度，使其在薄木多孔隙结构中具有更大的渗透性^[17]。两者胶接间隙的减小使得水分子难以进入和储存在 WDL 内部，从而提高其耐水性^[18]。WDL 的顺纹抗拉强度主要取决于重组装饰薄木本身的强度和厚度，但在热压过程中热压温度也会对 WDL 的顺纹抗拉强度产生影响。这是因为低温条件下重组装饰薄木和 PE 薄膜胶接界面的缺陷导致力学性能比较差^[19]；温度过高则会导致薄木中最热敏的半纤维素发生降解^[20-21]，从而降低 WDL 的力学性能。结合响应面试验结果并综合考虑实际生产情况，热压温度为 160℃、热压时间为 109 s、热压压力为 1 MPa 的工艺条件制备装饰板，实际验证顺纹抗拉强度可达 38.2 MPa，与回归方程模型预测值较为接近，其浸渍剥离性能可达 II 类试验要求，耐水性好，且不含甲醛，加之制备工艺简单，具有广阔的发展潜力。

从微观角度看, 紧密的机械互锁结构可以增强 WDL 的耐水性, 但是导热不良体的薄木影响芯层的升温速率^[22-23], 从而不利于熔融 PE 的渗透, 且极性木材与非极性薄膜界面相容性差的问题会导致界面胶接层不完善^[24-25]。因此在后续过程中, 需对重组装饰薄木进行扎孔或化学改性处理^[26], 改善两者之间的界面相容性以降低界面胶合缺陷对 WDL 性能的影响^[27]。

4 结论

本研究采用重组装饰薄木和 PE 薄膜制备的新型无醛薄木-PE 复合层积装饰板, 后期饰面过程中无需额外涂布胶黏剂, 可作为替代 HPL 在室内装修、轨道运输等领域的材料选择。然而所制备的 WDL 抗拉强度低于轨道运输内饰的要求 (≥ 68.8 MPa), 且木质材料遇火易燃, 后续需对其强度和阻燃性进行改进和增强。

5 参考文献

- [1] 全国人造板标准化技术委员会 (SAC/TC 198). 热固性树脂浸渍纸高压装饰层积板 (HPL): GB/T 7911—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
National Technical Committee 198 on Wood-based Panels Standardization of China. *High-pressure Decorative Laminates Made from Thermosetting Resins Impregnated Sheets, (HPL)*: GB/T 7911—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [2] 唐召群, 伍艳梅, 徐明华, 等. 我国高压装饰板生产现状及高质量发展建议[J]. 世界林业研究, 2019, 32(4): 69–74.
TANG Zhaoqun, WU Yanmei, XU Minghua, *et al.* HPL production in China and the suggestions to its high-quality development [J]. *World Forestry Research*, 2019, 32(4): 69–74.
- [3] 刘金明, 张一甫, 甘卫星, 等. 糖基三聚氰胺甲醛树脂木材胶黏剂的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(17): 276–282.
LIU Jinming, ZHANG Yifu, GAN Weixing, *et al.* Research progress on sugar-based melamine formaldehyde resin as wood adhesives [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(17): 276–282.
- [4] TAVERNA M E, TASSARA O, MORAN J I, *et al.* Effect of kraft lignin from hardwood on viscoelastic, thermal, mechanical and aging performance of high pressure laminates [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(3): 585–597.
- [5] CHEN Xiaoyan, AFREEN S, YU Xiao, *et al.* Modified melamine-formaldehyde resins improve tensile strength along with antifouling and flame retardancy in impregnation of cellulose paper [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(63): 36788–36795.
- [6] JI Yujie, XIA Qi, CUI Juqing, *et al.* High pressure laminates reinforced with electrospun cellulose acetate nanofibers [J/OL]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 254: 117461 [2024-04-13]. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117461.
- [7] 彭晓瑞, 吕斌, 王超, 等. 木制品表面装饰新产品和新技术[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(2): 6–11.
PENG Xiaorui, LÜ Bin, WANG Chao, *et al.* New products and technologies of decorative surfaces for wood products [J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2021, 35(2): 6–11.
- [8] 王蕊, 徐德良, 杨勇, 等. 重组装饰单板工业化浸渍及饰面应用[J]. 林业工程学报, 2020, 5(6): 43–48.
WANG Rui, XU Deliang, YANG Yong, *et al.* Industrial resin-impregnation and overlaying application of reconstituted decorative veneers [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(6): 43–48.
- [9] YE Haoran, ZHENG Guiyang, ZUO Shida, *et al.* Lightweight, bacteriostatic and thermally conductive wood plastic composite prepared by chitosan modified biointerfaces [J/OL]. *Applied Surface Science*, 2023, 615: 156313 [2024-04-13]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.156313.
- [10] WANG Yang, YE Haoran, XIA Changlei, *et al.* High-performance poplar-polyethylene laminates based on microwave-assisted acetic acid pretreatment process with potential application in construction [J/OL]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 72: 106731 [2024-04-13]. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106731.
- [11] 陈晋南, 何吉宇. 聚合物流变学及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018: 144–145.
CHEN Jinnan, HE Jiyu. *Polymer Rheology and Its Applications* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2018: 144–145.
- [12] ARYA S, KUMAR R, CHAUHAN S, *et al.* Development of natural fiber reinforced thermoplastic bonded hybrid wood veneer composite [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2023, 368: 130459 [2024-04-13]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130459.
- [13] ZHOU Xiaoyan, CAO Yizhong, YANG Kai, *et al.* Clean plasma modification for recycling waste plastic bags: from improving interfacial adhesion with wood towards fabricating formaldehyde-free plywood [J/OL]. *Journal of Cleaner*

- Production*, 2020, **269**: 122196[2024-04-13]. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.122196](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122196).
- [14] 刘筱涵, 杨培, 周晓燕. 等离子体改性增强农林生物质复合材料界面相容性研究进展[J/OL]. 材料导报, 2024, **38**(13): 23030072[2024-04-13]. DOI: 0.11896/cldb.23030072.
LIU Xiaohan, YANG Pei, ZHOU Xiaoyan, *et al.* Research progress in plasma modification to enhance interfacial compatibility of agro-forestry biomass composites [J/OL]. *Materials Reports*: 2024, **38**(13): 23030072[2024-04-13]. DOI: 0.11896/cldb.23030072.
- [15] 于培静, 张伟, 陈敏智, 等. 等离子体改性热塑性树脂薄膜制备环保胶合板试验[J]. 林业工程学报, 2020, **5**(1): 41–47.
YU Peijing, ZHANG Wei, CHEN Minzhi, *et al.* Plasma-treated thermoplastic resin film as adhesive for preparing environmentally-friendly plywood [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, **5**(1): 41–47.
- [16] 李亚荣, 廖洪强, 高宏宇, 等. 热压成型工艺对 PE-LLD/CFBFA 复合材料性能影响[J]. 工程塑料应用, 2022, **50**(1): 86–91.
LI Yarong, LIAO Hongqiang, GAO Hongyu, *et al.* Effect of hot pressing process on properties of PE-LLD/CFBFA composites [J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, **50**(1): 86–91.
- [17] BIANCHE J J, CARNEIR A D C O, VITAL B R, *et al.* Improving the understanding of wood bonding: behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood [J/OL]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, **112**: 102987[2024-04-13]. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2021.102987](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102987).
- [18] RAO Fei, JI Yaohui, HUANG Yuxiang, *et al.* Influence of resin molecular weight on bonding interface, water resistance, and mechanical properties of bamboo scrimber composite [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2021, **292**: 123458[2024-04-13]. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123458](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123458).
- [19] 查瑶, 饶俊, 关莹, 等. 竹叶/HDPE 复合材料的制备及性能[J]. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(2): 343–349.
ZHA Yao, RAO Jun, GUAN Ying, *et al.* Preparation and properties of bamboo leaf/HDPE composites [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, **37**(2): 343–349.
- [20] ZHENG Siqu, CHEN Muyang, WU Jiabiao, *et al.* Effect of heat treatment on properties and interfacial compatibility of poplar veneer/polyethylene film composite plywood [J/OL]. *Polymer Testing*, 2023, **122**: 108006[2024-04-13]. DOI: [10.1016/j.polymertesting.2023.108006](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108006).
- [21] 徐斌, 王恒旭, 陆杰, 等. 重组竹/玻纤/PET 泡沫复合多层结构保温板制备及性能评价[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(2): 396–402.
XU Bin, WANG Hengxu, LU Jie, *et al.* Preparation and performance evaluation of bamboo scrimber/glass fiber/PET foam multilayer structural insulated panel [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(2): 396–402.
- [22] 陶鑫, 梁善庆, 傅峰. 木质导热复合材料的传热增强机理及制备研究进展[J]. 功能材料, 2022, **53**(2): 2057–2065.
TAO Xin, LIANG Shanqing, FU Feng. Heat transfer enhancement mechanism and preparation technology of wood-based thermal conductive composite [J]. *Journal of Functional Materials*, 2022, **53**(2): 2057–2065.
- [23] CHEN Meiling, SEMPLE K, HU Yu'an, *et al.* Fundamentals of bamboo scrimber hot pressing: mat compaction and heat transfer process [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2024, **412**: 134843[2024-04-13]. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.134843](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134843).
- [24] 秦楠. 加工因素对 HDPE 基本塑复合材料静曲强度的影响[J]. 塑料, 2024, **53**(2): 89–93, 107.
QIN Nan. Influence of processing factors on static bending strength of HDPE-based wood-plastic composite [J]. *Plastics*, 2024, **53**(2): 89–93, 107.
- [25] 杨元强, 张凤波, 张振莉, 等. 聚烯烃木塑复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, **51**(增刊 1): 23–28, 32.
YANG Yuanqiang, ZHANG Fengbo, ZHANG Zhenli, *et al.* Research progress of polyolefin wood-plastic composites [J]. *New Chemical Materials*, 2023, **51**(suppl 1): 23–28, 32.
- [26] WANG Zhangheng, YU Minggong, SUN Zhenyu, *et al.* Enhanced interfacial bonding strength of superhydrophobic wood through chemical etching and silane coupling agent treatment [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2024, **411**: 134825[2024-04-13]. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.134825](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134825).
- [27] 陈文礼, 欧荣贤, 郭雨佳, 等. 多元共挤出木塑复合材料界面结合性能[J]. 复合材料学报, 2025, **42**(1): 465–475.
CHEN Wenli, OU Rongxian, GUO Yujia, *et al.* Interfacial bonding properties of multi-phase co-extruded wood-plastic composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, **42**(1): 465–475.