

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025144

基于环氧大豆油改性聚氨酯胶黏剂的轻质高强刨花板制备与性能研究

张杰, 罗书品, 高黎*, 郭文静

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京, 100091)



摘要: 随着刨花板产业发展, 刨花板的主要应用领域已突破传统家具板材的单一范畴, 逐步拓展至墙板、大幅面台面板、高门板等新兴领域, 这些新的应用场景对刨花板提出低密度、高强度的性能要求。针对三层刨花板芯层与表层的结构差异, 提出环氧大豆油-异氰酸酯的协同双层聚氨酯胶黏剂改性的策略, 对照组芯层、表层均以异氰酸酯 (polymeric methylene diphenyl diisocyanate, pMDI) 为胶黏剂, 改性组表层采用高强度环氧大豆油改性聚氨酯胶黏剂 (Epoxy soybean oil modified polyurethane adhesive, EPA)、芯层采用轻量化发泡聚氨酯胶黏剂 (Foamable polyurethane, FPU), 以不同形态的杨木 (*Populus alba* L.) 刨花为原料制备密度为 0.50、0.55、0.60 g/cm³ 的三层刨花板。通过测试静曲强度 (Modulus of Rupture, MOR)、弹性模量 (Modulus of Elasticity, MOE)、内结合强度 (internal bond strength, IB) 以及 24 h 吸水厚度膨胀率和吸水率, 并结合扫描电子显微镜观察微观形貌与胶黏剂分布, 探究胶黏剂对板材性能的调控机制。结果表明, 三种低密度条件下, 改性组均实现了轻量化与高性能的协同提升。其中, 0.55 g/cm³ 的改性组 (10% 施胶量、190°C 梯度热压) MOR、MOE、IB 分别为 12.3 MPa、1710 MPa、0.54 MPa, 达到国家标准 GB/T 4897—2015《刨花板》P2 型板材的要求。微观形貌表征结果显示, 改性组芯层形成三维多孔交联网络, 是板材兼具低密度与高强度的关键。通过协同双层 pMDI 胶黏剂改性不仅降低 pMDI 消耗, 而且优化板材的综合性能, 为制备轻质高强刨花板提供了技术路径。

关键词: 轻质高强刨花板; 环氧大豆油; 发泡聚氨酯胶黏剂; 异氰酸酯胶黏剂; 三维多孔交联网络

中图分类号: TS653 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (XXXX) XX-0001-10

Preparation and Performance of Lightweight High-Strength Particleboard Based with Epoxidized Soybean Oil -Modified Polyurethane Adhesive

ZHANG Jie, LUO Shu-pin, GAO Li*, GUO Wen-jing

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

Abstract: With the continuous development of the particleboard industry, its major applications have expanded beyond traditional furniture panels to emerging fields such as wall panels, large-format countertops, and tall door panels. These new application scenarios impose higher requirements for low-density yet high-strength particleboard. To address the distinct structural characteristics of the surface and core layers in three-layer particleboard, a synergistic double-layer polyurethane adhesive modification

收稿日期: 2025-12-22; 修改日期: 2026-01-29

基金项目: “十四五”重点研发计划课题“轻质高强刨花板制造与应用关键技术”(2021YFD2200603)。

作者简介: 张杰 (1997-), 男, 博士研究生。zhangjiecaf@163.com

通讯作者: 高黎, 女, 副研究员, Email: gaoli@caf.ac.cn

strategy based on epoxidized soybean oil and isocyanate was proposed. In the control group, both the surface and core layers were bonded with polymeric methylene diphenyl diisocyanate (pMDI). In the modified group, the surface layer was bonded with a high-strength epoxidized soybean oil-modified polyurethane adhesive (EPA), while the core layer was bonded with a lightweight foamable polyurethane adhesive (FPU). Three-layer particleboards with target densities of 0.50, 0.55, and 0.60 g/cm³ were manufactured from poplar (*Populus* sp.) particles of different geometries. The mechanical properties, including modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond strength (IB), as well as the 24 h thickness swelling and water absorption, were evaluated. In addition, scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the microstructure and adhesive distribution in the panels, so as to elucidate the mechanisms by which the adhesives regulated panel performance. The results showed that, at all three low-density levels, the modified boards achieved a synergistic improvement in both weight reduction and performance. In particular, the modified board with a density of 0.55 g/cm³ (10% adhesive content and gradient hot pressing at 190 °C) exhibited MOR, MOE, and IB values of 12.3 MPa, 1710 MPa, and 0.54 MPa, respectively, meeting the requirements for Type P2 particleboard specified in the Chinese national standard GB/T 4897—2015, Particleboard. Microscopic observations revealed that a three-dimensional porous cross-linked network was formed in the core layer of the modified board, which was the key to achieving both low density and high strength. Overall, the synergistic double-layer pMDI-based adhesive modification strategy not only reduced pMDI consumption, but also improved the overall performance of the boards, thereby providing a feasible technical route for the manufacture of lightweight high-strength particleboard.

Key words: lightweight high-strength particleboard; epoxidized soybean oil; foamable polyurethane adhesive; isocyanate adhesive; 3D porous crosslinked network

刨花板作为重要的人造板材, 凭借优良的机械性能和可加工性, 广泛应用于家具、建筑、包装等领域^[1-3]。截至2024年底, 中国刨花板年产能已达6415万m³/年^[4]。随着刨花板在墙板、大幅面台面板、高门板等领域的大量应用, 低密度、高强度已成为核心需求^[5-7]。传统家具型刨花板的密度通常在0.65~0.70 g/cm³范围内, 降低密度不仅会降低板材的力学性能, 而且对板材的尺寸稳定性、耐久性和加工性能产生负面影响^[8]。为了实现轻质高强刨花板的制备, 已有研究从优化刨花形态、调整板坯结构、改善铺装技术等方面进行了探索并达到了一定的提升效果^[9-11]。胶黏剂作为重要的组成成分, 通过优化胶黏剂的设计与配方是实现板材轻量化的一种途径。

当前, 刨花板胶黏剂主要采用脲醛树脂(urea-formaldehyde resin, UF)胶黏剂和异氰酸酯(polymeric methylene diphenyl diisocyanate, pMDI)。pMDI是一种具有高功能性和反应性的聚合物, 由

于其黏度可控、黏合性良好和无甲醛添加, 已成为制备轻质高强刨花板的理想胶黏剂^[12-15]。然而, 当刨花板设计密度大幅下降时, 纯pMDI与木质原料的胶合效果会快速降低^[16]。环氧大豆油(epoxidized soybean oil, ESO)作为可再生原料, 具有官能团丰富、成本低廉的优势, 其不仅可以通过开环加成反应可制备低黏度、绿色环保的ESO基多元醇(epoxy soybean oil polyol, Epol), 还可以参与异氰酸酯与小分子醇类单体的交联反应, 有望在减少异氰酸酯用量的同时, 改善板材物理力学性能, 适合作为异氰酸酯胶黏剂的改性剂。目前通过丙烯酸酯化的ESO改性异氰酸酯已成功制备出可用于刨花板的胶黏剂^[17]。虽然这种胶黏剂通过自由基共聚与共价交联反应能够成功固化, 但仍存在固化速率慢以及胶合强度不佳的问题。为改善这些问题, 进一步在胶黏剂配方中引入高反应性活泼氢化合物以及小分子交联剂以制备性能优异且与刨花板工艺相匹配的改性胶黏剂。

本研究针对三层刨花板“表层致密、芯层多孔”的复合结构需求，提出了环氧大豆油-异氰酸酯的协同双层聚氨酯胶黏剂改性策略。表层采用环氧大豆油改性聚氨酯胶黏剂（Epoxy soybean oil modified polyurethane adhesive, EPA）作为胶黏剂，满足表层致密化与力学支撑需求；芯层采用Epol与pMDI制备的发泡聚氨酯胶黏剂（Foamable polyurethane, FPU），成型过程中形成微泡孔满足芯层的轻量化需求。以期通过表层与芯层的pMDI的双层协同改性策略不仅促进了改性pMDI胶黏剂的发展，而且为制备轻质高强刨花板提供参考。

1 试验材料

1.1 试验材料

环氧大豆油（ESO，环氧值 ≥ 6.6 ）、聚合亚甲基二苯基二异氰酸酯（pMDI，异氰酸根质量分数为30.5%~32.0%，25℃黏度为150~250 mPa·s）、聚二甲基硅氧烷硅油（PSF）、去离子水、N,N-二甲基环己胺（PC8）、四氟硼酸、丙酮、磷酸、乙二醇、丙三醇、聚乙二醇（99%，分子量200），外购。

环氧大豆油多元醇（Epol）通过环氧大豆油和乙二醇高温下开环反应制取，羟值约为224 mg-KOH/g。

杨木（*Populus sp.*）刨花由湖北宁丰新材料科技有限公司提供，芯层粗刨花是孔径1.5 mm和6 mm筛网间的混合形态刨花，表层用刨花是孔径0.3 mm和1.5 mm筛网间的细刨花，表层刨花含水率约为16%，芯层刨花含水率约为10%。

1.2 试验设备

红外光谱仪（FTIR, Vertex 70）、热重分析仪（TGA, STA 449 F5）、微机控制电子万能试验机（ETM105D）、热压机（BY61×61/30）、扫描电子显微镜（SEM, Gemini SEM 300）、全自动压汞仪（V 9620）、X射线剖面密度仪（DENSE-LAB Mark 3）、电热恒温鼓风干燥箱。

1.3 环氧大豆油改性聚氨酯胶黏剂的制备

1.3.1 表层用胶EPA制备

根据前期研究基础，EPA配方为60% pMDI、20% ESO、20% PEG-200，将pMDI与ESO加入烧

杯，于室温下经磁力搅拌均质化5min。随后在持续搅拌下加入PEG-200，使异氰酸酯基团与羟基的物质的量比达到设定值（约1:0.4）。将液态混合物迅速转移至高速剪切机中反应10s，随即注入模具，经固化脱模后即获得固体胶黏剂。

1.3.2 芯层用胶FPU制备

包括混合原料、搅拌、固化和发泡等过程。根据前期研究基础，FPU配方为70%pMDI，20%Epol，以及10%其他助剂，将Epol、PC8、PSF、磷酸快速混合3min以获得悬浮液。随后，将pMDI快速加入到悬浮液中，并将混合物在2000 r/min下搅拌15秒。最后，将混合物在室温下放置24小时以进行充分的固化与发泡反应，然后切割成一定尺寸（5 cm×5 cm×2 cm）试样用于进一步表征。

1.4 轻质高强刨花板的制备

采用热压法制备幅面尺寸为43 cm×40 cm×1.8 cm的三层轻质高强刨花板，表芯层重量比为4:6，芯层和表层施胶量设定为10%；密度分别设定为0.50、0.55、0.60 g/cm³，具体制备过程如图1所示：

- 1) 分别调控表层细刨花与芯层粗刨花的含水率至16%和10%。改性组表芯层分别采用EPA、FPU，对照组采用pMDI。
- 2) 将芯层与表层刨花转移至不同的滚筒拌胶机，根据配方将不同的胶黏剂通过高压喷枪快速进行雾化施胶。
- 3) 根据设定的板材密度，手工在成型框中将施胶后的杨木刨花分层均匀铺装。
- 4) 将18 mm厚的厚度规放置于热压板之间，置于热压机内热压。梯度热压工艺如图2所示，热压温度设定为190℃；对照组和改性组每组均制备2块板材。

1.4 性能表征与测试

1.4.1 胶黏剂性能

1) 官能团表征。采用配备ATR模式的红外光谱仪（FTIR）对胶黏剂进行表征，光谱扫描范围在4000 - 400 cm⁻¹，分辨率为4 cm⁻¹，扫描64次。

2) 热稳定性分析。采用热重分析仪对固化胶黏剂进行热稳定性分析，氮气氛围，温度范围为

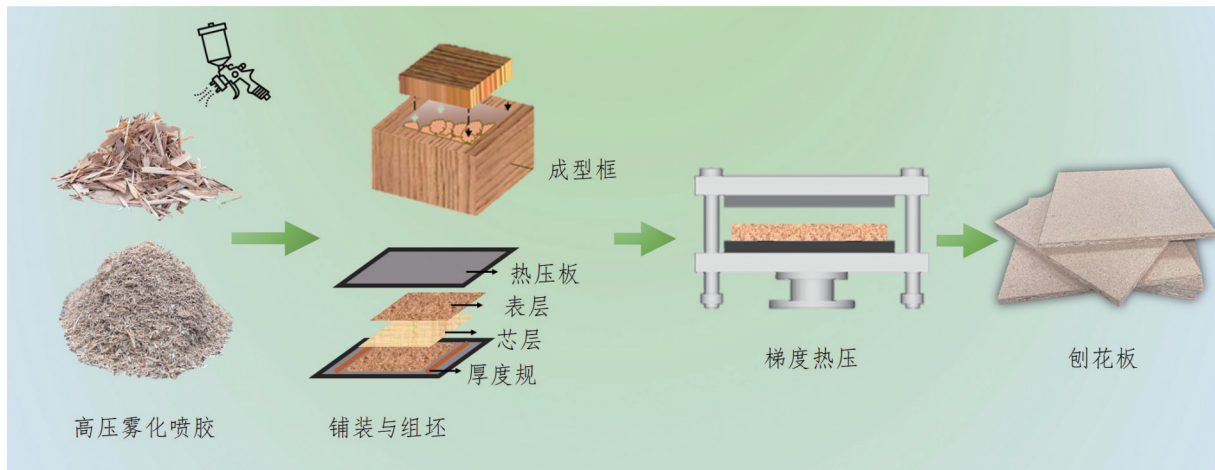


图1 轻质高强刨花板的制备流程

Fig.1 Preparation process of lightweight high-strength particleboard

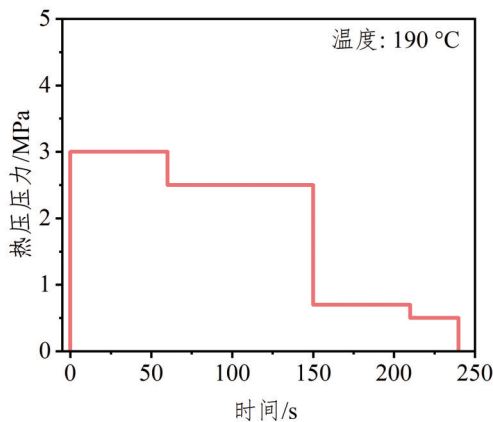


图2 梯度热压工艺

Fig.2 Gradient hot-pressing process

室温至 800 °C，加热速率为 10 °C/min。

3) 胶黏剂黏度表征。混合后的胶黏剂的黏度由旋转黏度计进行测试，温度范围从室温到 100 °C，主轴转速范围：50 至 100 r/min。

4) 固化胶黏剂的力学性能表征。所有固化 EPA 胶黏剂的力学性能均由电子万能试验机测定，加载速度控制样品在 60±30s 内破坏。

5) 胶黏剂孔隙结构表征。通过全自动压汞仪测试固化后 FPU 的孔隙率和孔隙分布。

6) 胶黏剂发泡与固化过程表征。通过红外成像仪对室温与高温环境下 FPU 的发泡与固化过程进行表征。

1.4.2 刨花板性能

1) 理化性能：依据 GB/T 17657—2022 《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》对刨花板的

内结合强度、静曲强度与弹性模量、24h 吸水厚度膨胀率与吸水率进行测试。静曲强度与弹性模量的试样尺寸为 410 mm×50 mm×18 mm；内结合强度、24h 吸水厚度膨胀率与吸水率的试样尺寸为 50 mm×50 mm×18 mm，每块板材取 4 块试样，共 8 个重复试样。

2) 微观形貌：使用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察固化胶黏剂以及刨花板芯层试件断裂微观形貌，采用二次电子模式，加速电压为 5 kV。

3) 剖面密度：采用剖面密度仪对刨花板厚度方向密度分布进行测量。试样尺寸为 50 mm×50 mm×18 mm，每组试样为 6 个。

2 结果与讨论

2.1 改性 pMDI 胶黏剂的性能表征

2.1.1 化学结构

为了研究改性 pMDI 胶黏剂的聚合反应过程，采用 FTIR 对原始 pMDI 以及改性胶黏剂 EPA 与 FPU 进行了化学结构分析。如图 3a 所示，原始 pMDI 曲线在 2240 cm⁻¹ 处显示了一个强吸收峰，对应于典型的异氰酸酯基团特征峰 (NCO)。随着异氰酸酯基团不断参与聚合反应，EPA 和 FPU 中的 NCO 特征峰显著减弱，但是由于异氰酸酯基团相对于羟基的过量摩尔比，EPA 和 FPU 中仍有剩余的未反应的 pMDI。EPA 和 FPU 中新出现 3 000~3 500cm⁻¹ 处的宽峰以及 1 740cm⁻¹ 处的特征峰对应了氨基甲酸酯/脲基团的 N-H 键以及 C=O 键，确认了聚氨酯的合成^[18-19]。图 3b 展示了改性胶黏剂在发泡

与固化过程中潜在的化学反应。FPU的发泡机理主要归因于pMDI中的异氰酸酯基团与水反应形成不稳定的氨基甲酸, 然后迅速分解为伯胺(R-NH₂)和二氧化碳(CO₂)气体, 所得的伯胺与过量的异氰酸酯基团反应形成稳定的聚脲结构, 这是泡沫的骨架结构^[20]。聚氨酯胶黏剂的固化过程主要涉及以下化学反应: pMDI与EpoI多元醇以及PEG的交联反应, 以及pMDI与木材表面的羟基的反应^[18]。

2.1.2 黏度与热稳定性

黏度是喷胶过程中需要考虑的一个重要因素。EPA的原料在室温混合后发生放热反应, 胶黏剂内部温度快速上升促进了交联反应, 胶块快速丧失流动性, 因此无法用黏度计表征。尽管FPU的室温黏度从250 mPa·s提高到约450 mPa·s(图3c), 但在50℃以下仍具有良好的流动性, 且未出现堵塞喷枪或板坯提前固化等问题。随着温度的不断升高, 混合物的黏度显著增加, 这主要归因于FPU的逐渐固化过程。耐热性也是胶黏剂设计的一个重要参数, 采用TG-DTG对胶黏剂的热稳定性进行表征。结果显示固化的改性胶黏剂在室温和热压(190℃)下都具有足够的热稳定性, 适合用于制备轻质高强刨花板。SEM揭示了两种改性胶黏剂微观形貌的区别(图3e~f), 结果显示EPA形成了致密的交联网络, 适合用于制备刚性的刨花板表层结构。FPU显示出了三维多孔网络结构, 这有利于确保芯层具有良好的内胶合强度同时降低密度, 以期达到轻质高强的效果。此外, 孔隙结构分析显示FPU泡沫的孔径分布均呈合理的正态分布, 主要孔径范围约为400~600微米, 约占总孔数的40%~45%, 孔隙率约为92%, 呈现出高孔隙结构(图4)。

图5显示FPU铺装与热压前(室温条件下)不会发生预固化, 在室温下具有较长的适用期。一旦加热升温胶黏剂迅速发泡固化, 这表明FPU在室温下铺装与组坯环节不会预固化, 而进入热压机后迅速发泡固化, 非常地适配刨花板的制备工艺。

2.1.3 固化胶黏剂力学性能

固化后EPA和FPU胶黏剂本体力学性能如图6

所示, 固化后EPA本体抗拉强度可达11.1 MPa, 可以轻松拉动5 kg质量砝码。这种高强度EPA胶黏剂非常适合用于粘接表层细料, 提供更强大的表层强度以改善板材整体的静曲强度与弹性模量。此外, 固化后的FPU胶黏剂的抗压强度达到了830 kPa, 优于一般聚氨酯泡沫材料。这种轻量化FPU胶黏剂适合用于刨花板芯层, 提供更多的三维多孔交联网络以改善板材芯层的内结合强度。

2.2 微观形貌

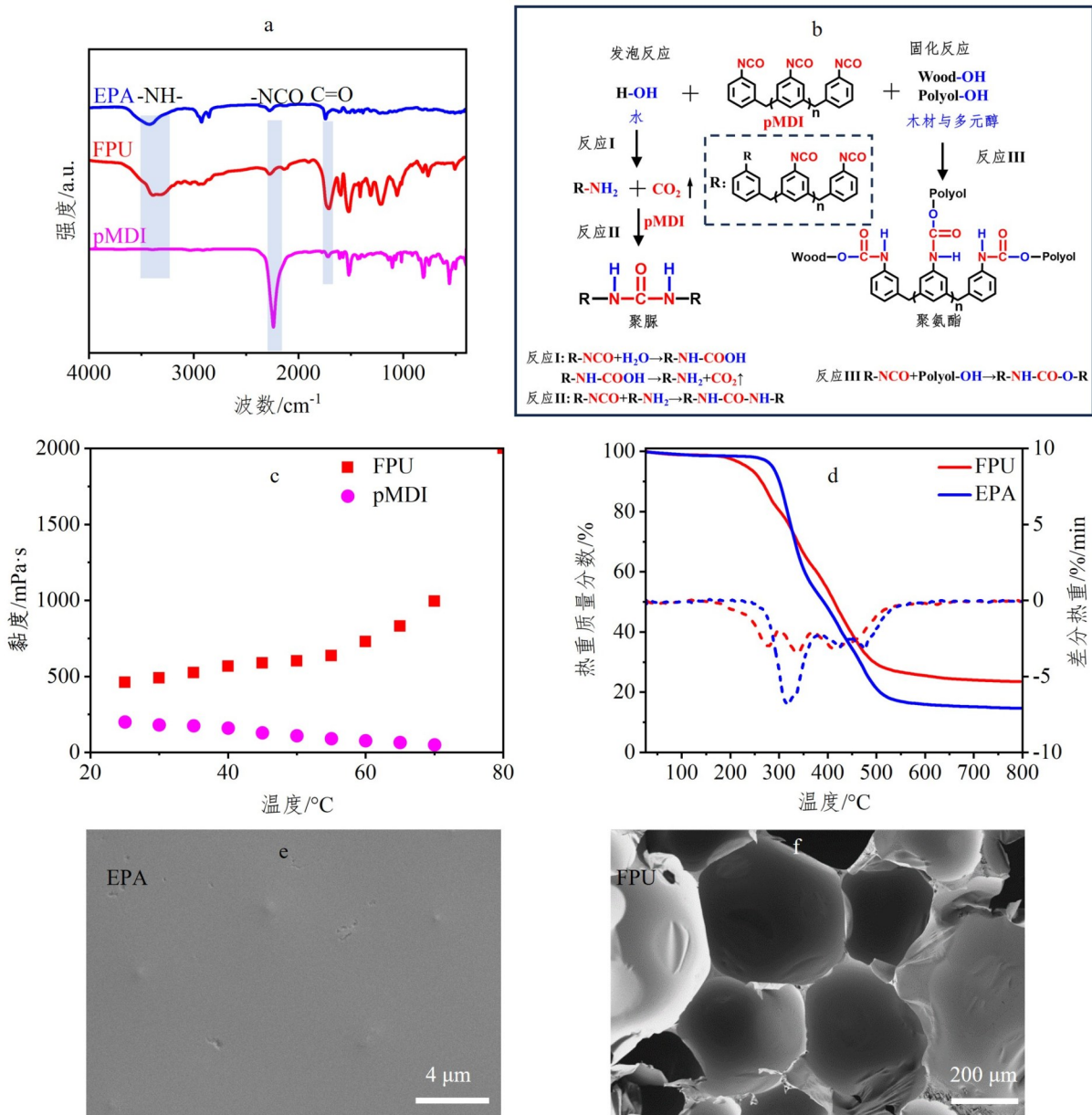
为了研究刨花板的微观结构和胶黏剂的分布情况, 利用扫描电子显微镜(SEM)分析了0.55 g/cm³板材芯层断裂形貌。如图7a~c所示, 对于用原始pMDI制备的对照组刨花板, 板材的芯层由许多相互连接的粗刨花组成, 木刨花的定向纤维排列得以保留, 这为板材提供了足够的刚度和稳定性。木刨花表面存在的大量羟基为与pMDI胶合提供了的—定的结合位点, 通过化学共价交联与相邻的木刨花形成共价胶合体系。胶黏剂主要分布在刨花表面, 相邻刨花之间有一定的空隙, 这表明pMDI和芯层木刨花之间的胶接面积有限(只限于两个相邻刨花的共同粘结区域)。

如图7d~9f所示, 用改性胶黏剂制备的刨花板在芯层木刨花之间形成了大量多孔硬质泡沫网络。固化的泡沫与木刨花具有良好的界面结合, 并显示出极强的内结合强度。这表明在芯层中大量固化泡沫网络原位填充木刨花之间的空隙, 在相同的密度下提供了更致密的三维多孔胶合网络, 有效地提高了胶合面积和胶合界面。这些微观结果对应于先前的物理和力学性能测试结果, 改性胶黏剂在芯层中构建了更强的三维多孔交联网络, 不仅降低了密度, 还增强了内聚力, 从而提高了板材的内结合强度。图7f显示FPU与芯层刨花界面结合良好, 无明显过渡区域。

2.3 刨花板性能分析

2.3.1 密度

基于原始pMDI和改性胶黏剂制备的刨花板的表观密度和板材剖面密度的测试结果如图7所示。结果显示所有刨花板测得的表观密度都非常接近目标设计密度(图8a), 分别为0.50、0.55和0.60 g/cm³, 密度偏差均小于5%, 表明刨花板的密度在



a FTIR 谱图; b 化学反应机理; c 黏度; d TG-DTG 曲线图; e EPA 的 SEM 图像; f FPU 的 SEM 图像。

图3 EPA和FPU的结构特征、粘度、热稳定性和形态

Fig.3 Structural characteristics, viscosity, thermal stability, and morphologies of EPA and FPU

生产过程中得到非常精确的控制, 并且采用改性胶黏剂并未对生产制备过程造成负面影响。此外, 剖面密度曲线能够反映板材沿厚度方向的密度分布, 从而判断刨花板的结构合理性。如图8b~c所示, 所有刨花板呈现出典型U形剖面密度曲线, 即在表层有两个对称的最大峰值, 在芯层有一个最小值。板材的内结合强度强烈依赖于芯层的刨花结合, 而静曲强度主要受表层强度的影响。因此, 三层刨花板的理想密度分布包括高密度表层和中等密度芯层, 相应的剖面密度曲线应该显示

出在两个表面上具有峰值和低中间区域的轮廓。此外, 改性组板材相比于对照组板材的表芯层密度差异更小, 呈现出更为均匀的剖面密度曲线变化规律。

2.3.2 力学性能 基于原始pMDI和改性胶黏剂制备的刨花板的静曲强度(MOR)和弹性模量(MOE), 通过方差分析发现, 改性胶黏剂对三种密度的板材MOR的影响经计算得出的p值分别为0.95、0.006和0.01, 说明改性胶对密度0.55 g/cm³和0.60 g/cm³板材的MOR影响非常显著; 但改性

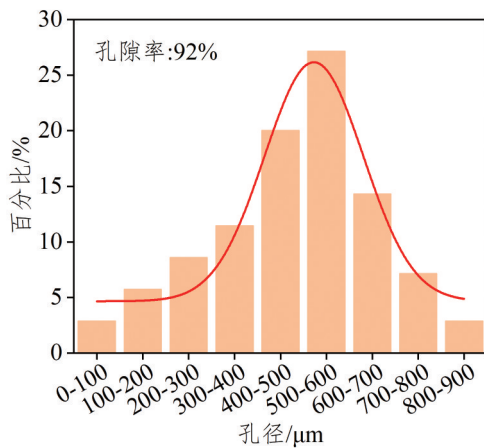


图4 固化后FPU胶黏剂的孔隙率与孔径分布

Fig.4 Porosity and pore size distribution of cured FPU adhesive

胶黏剂对三种密度的板材的MOE的影响不显著。在三种密度条件下，采用改性胶黏剂制备的刨花

板相比于原始pMDI对照组的MOR和MOE均有着不同程度的提升(图9)。其中0.55 g/cm³密度条件下改性组的静曲强度由8.9 MPa提升至12.3 MPa，提升幅度高达38%，达到了国家标准GB/T 4897—2015《刨花板》中P2型家具用刨花板要求(图8b-c)。增加设计密度和使用改性胶黏剂均能够提高板材的力学性能。这种增强可能归因于芯层FPU发泡胶黏剂的体积膨胀，其有效填充了木刨花间的空隙，形成了更紧密的粘结界面，从而促进了连续承重网络的形成。此外，表层FPU形成的致密的交联网络结构和芯层硬质多孔泡沫结构协同促进了更有效的应力传递和能量耗散，从而有效地改善了板材的力学性能。这些结果表明采用改性胶黏剂不仅能够降低pMDI的消耗量，还有效地改善了板材的力学性能。

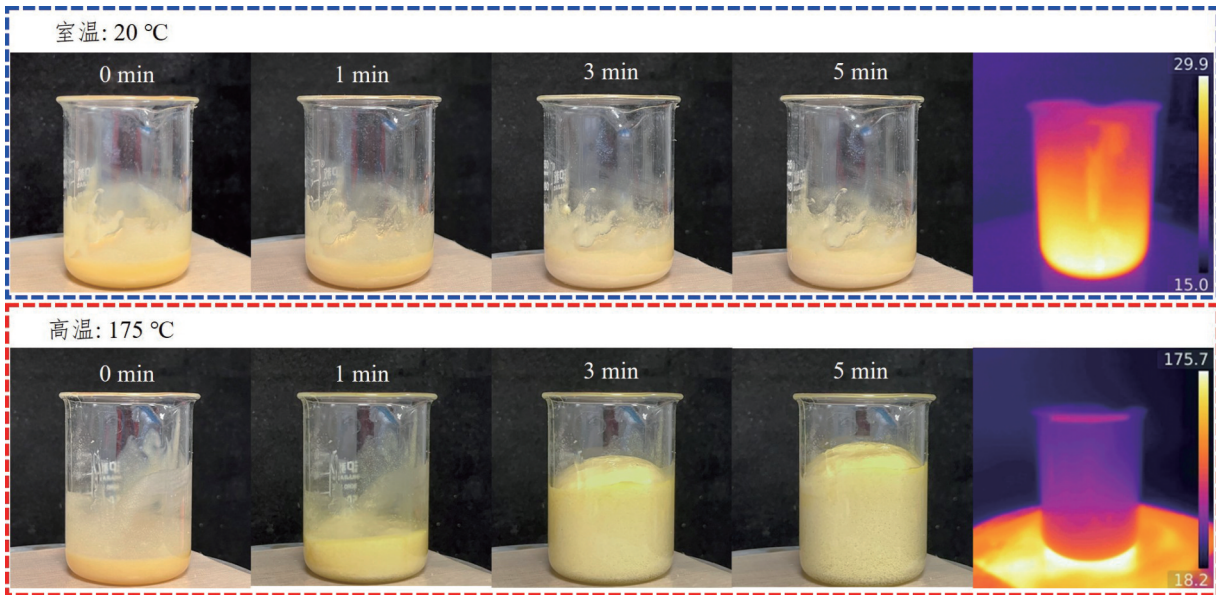


图5 FPU室温和加热下固化情况

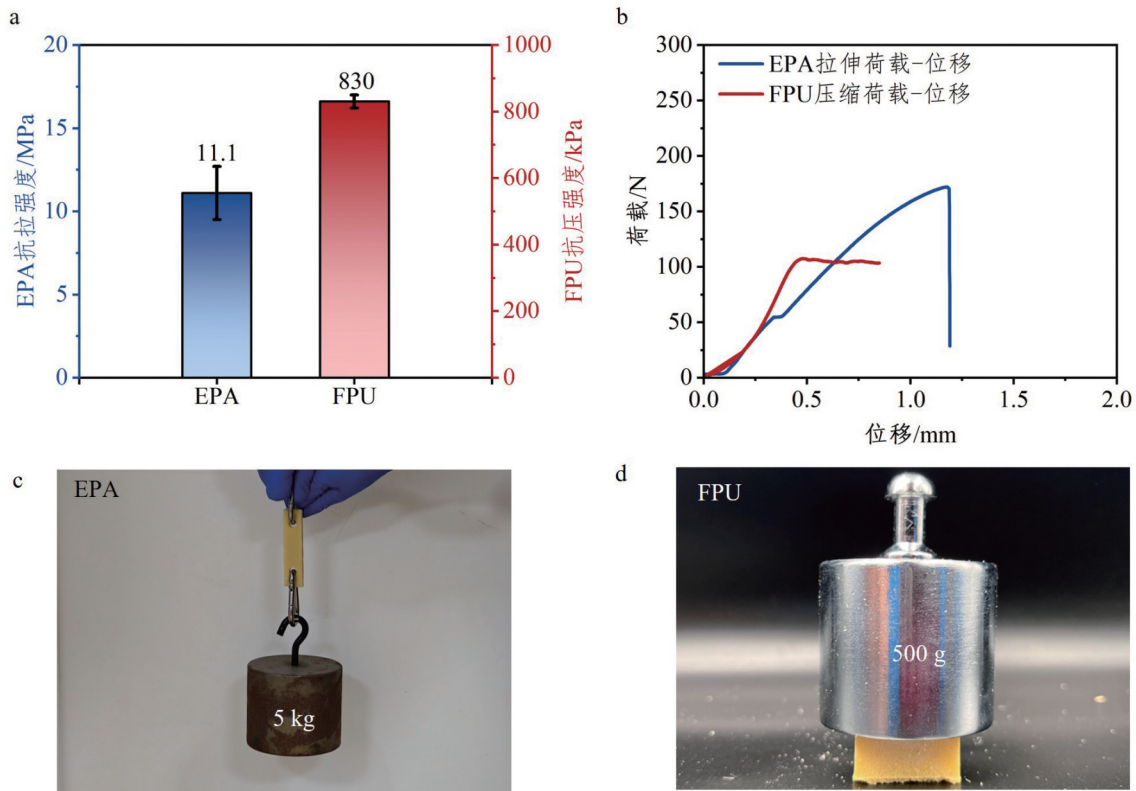
Fig.5 Curing behavior of FPU under room temperature and heating

基于原始pMDI和改性胶黏剂制备的刨花板的内结合强度，通过方差分析发现，改性胶黏剂对三种密度的板材内胶合强度的影响均非常显著，相同密度条件下采用改性胶黏剂制备的刨花板相比于原始pMDI对照组的内结合强度均有较大幅度的提升(图10)。在三种密度条件下，改性组的内结合强度分别为0.49 MPa、0.54 MPa、1.03 MPa(分别是对照组的1.63、1.64、1.84倍)，均高于中国国家标准P2型刨花板内结合强度的要求(≥0.35

MPa)。这些结果可能归因于芯层FPU的聚合反应形成高度交联的聚氨酯三维网络结构，有效地增强了胶黏剂内聚力。此外，由发泡反应引起的体积膨胀能够增加了胶黏剂和木刨花之间的接触面积，从而加强了界面处的机械互锁。

2.3.3 耐水性

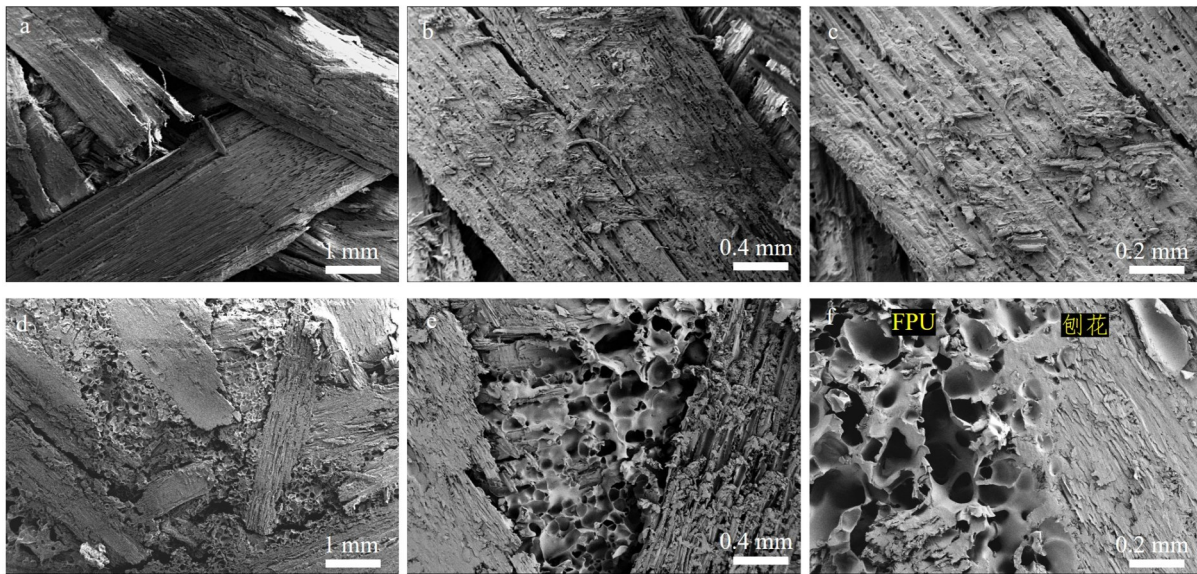
刨花板的耐水性与其尺寸稳定性密切相关，因为水分子渗入板材内部将不可避免地导致体积膨胀和质量增加(图10a)。基于原始pMDI和改性



a 固化后EPA和FPU的力学性能;b 荷载-位移曲线;c EPA受拉示意图;d FPU受压示意图。

图6 EPA抗拉性能和FPU抗压性能

Fig.6 Tensile properties of EPA and compressive properties of FPU



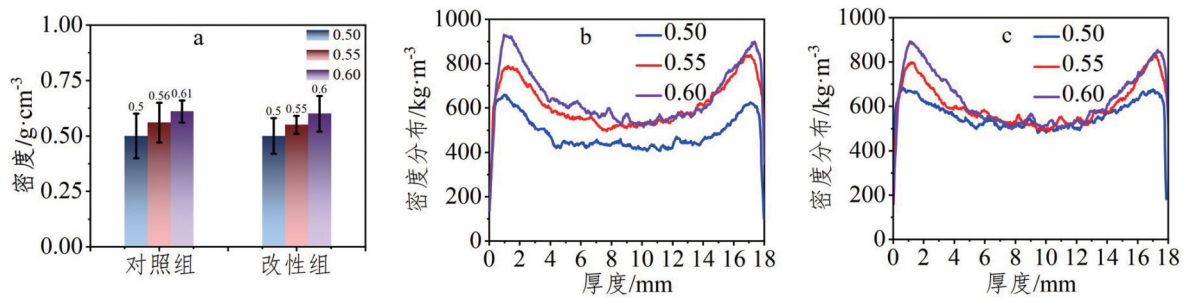
a~c 对照组; d~f 改性组。

图7 刨花板芯层微观形态

Fig.7 Micromorphology of particleboard core layer

胶黏剂制备的刨花板的24h吸水厚度膨胀率(TS)和吸水率(WA)的测试结果如图11b~c所示。当板材浸没在水中时，木刨花表面上丰富的极性亲水基团(如羟基)会吸收大量水分子从而导致板

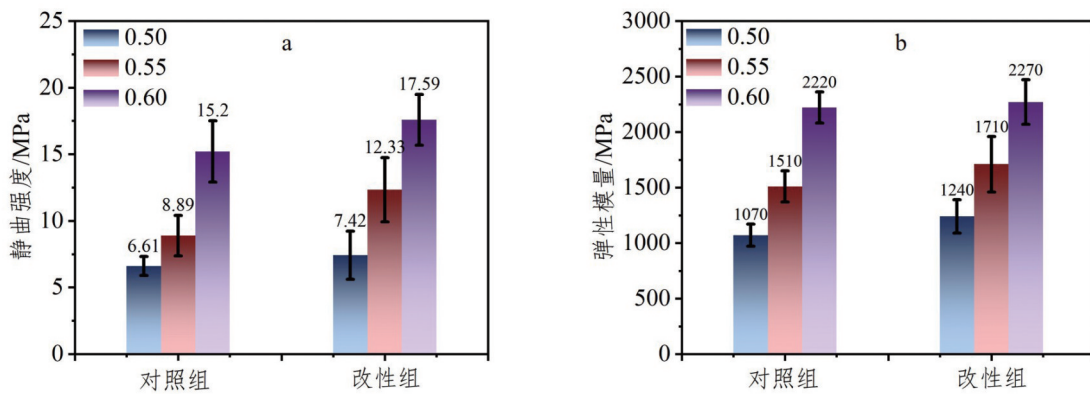
材体积膨胀和质量增加。结果显示不同密度条件下的对照组与改性组的24h吸水厚度膨胀率差异不明显，均未超过10%。不同密度条件下24h吸水率结果显示，相比于对照组的58%、36%、



a表观密度;b、c 对照组、改性组的剖面密度曲线

图8 刨花板的表观密度和剖面密度曲线

Fig.8 Apparent density and vertical profile density profiles of the particleboards



a静曲强度;b弹性模量

图9 刨花板静曲强度和弹性模量

Fig.9 MOR and MOE of particleboards

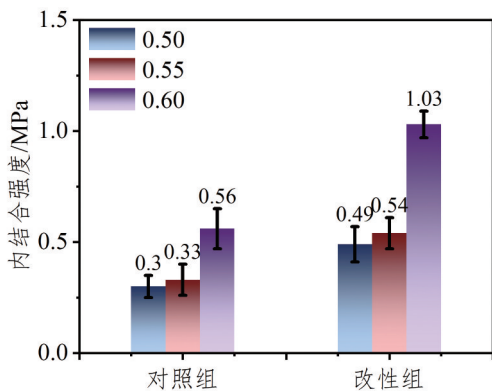


图10 刨花板的内结合强度

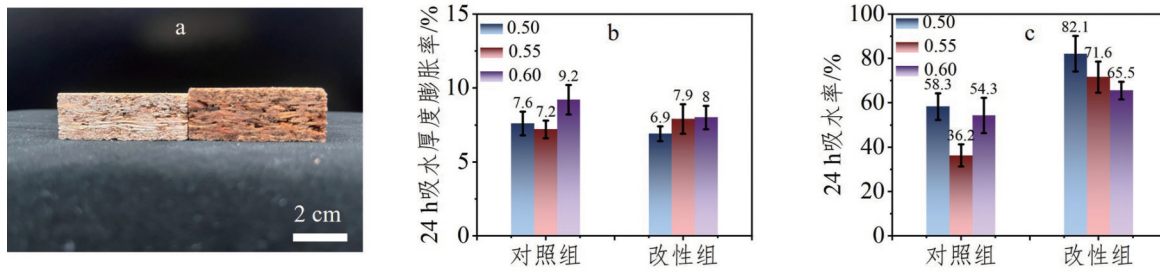
Fig.10 Internal bond strength of particleboards

54%，改性组普遍增加至82%、71%、65%。这可能是由于对照组未反应的pMDI在高湿环境中发生了二次固化，阻碍了水分渗透，导致了对照组吸水率低于改性组^[12]。

3 结论

1) 采用环氧大豆油-异氰酸酯的协同双层聚氨酯胶黏剂改性策略实现轻质高强刨花板的制备，表层使用高强度聚氨酯胶黏剂(EPA)可形成致密交联网络，芯层使用轻量化发泡聚氨酯胶黏剂(FPU)可形成三维多孔结构，二者协同作用构建了三层刨花板“表层致密、芯层多孔”的复合结构。

2) 刨花板的物理力学、内结合强度、以及防水性能测试结果显示，所有板材密度控制良好。三种密度下改性组刨花板相比于对照组均实现了轻量化与高性能的协同提升。其中，0.55g/cm³的改性组MOR、MOE、IB分别为12.33 MPa、1710 MPa、0.54 MPa，相比对照组分别提升38%、13%、63%，达到了中国国家标准GB/T 4897—2015《刨花板》P2家具型的要求。



a 板材吸水前后厚度变化; b 24h吸水厚度膨胀率; c 24h吸水率

图11 刨花板的耐水性

Fig.11 Water resistance of particleboards

3) 扫描电子显微镜观察结果揭示了改性组板材性能提升的机理在于大量固化泡沫网络原位填充木刨花之间的空隙, 在相同的密度下提供了更致密的三维多孔交联网络, 有效地增大了胶合面积并强化了胶合界面强度, 这是板材兼具低密度与高强度的关键。

参考文献:

- 华毓坤. 人造板工艺学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- 郭文静, 常亮, 高黎, 等. 中国刨花板产业创新发展近况及展望[J]. 中国人造板, 2024, 31(3): 57-61.
GUO W J, CHANG L, GAO L, et al. Current status and prospects of innovation and development of China particleboard industry[J]. China Wood-Based Panels, 2024, 31(3): 57-61.
- 吕城龙, 姚艳, 王军锋, 等. 异氰酸酯胶黏剂在桉木刨花板中的渗透及界面力学性能[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(6): 88-94.
LÜ/LV/LU/LYU) C L, YAO Y, WANG J F, et al. Penetration of isocyanates adhesive in Eucalyptus wood particleboards and mechanical properties of bonding interphase[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(6): 88-94.
- 中国林产工业协会, 国家林业和草原产业发展规划院. 2025中国人造板产业报告[R], 北京, 2025.
- 罗书品, 高黎, 郭文静. 轻质刨花板研究进展[J]. 中国人造板, 2019, 26(1): 1-5.
LUO S P, GAO L, GUO W J. Review of research progress on low-density particleboard[J]. China Wood-Based Panels, 2019, 26(1): 1-5.
- 高黎, 罗书品, 郭文静, 等. 超薄大刨花制备轻质刨花板的生产工艺简介[J]. 中国人造板, 2020, 27(7): 14-17.
GAO L, LUO S P, GUO W J, et al. Production technology of light-weight particleboard with large thin flakes[J]. China Wood-Based Panels, 2020, 27(7): 14-17.
- 罗书品, 高黎, 王超, 等. 木材树种对刨花/EPS泡沫复合轻质刨花板性能的影响[J]. 木材工业, 2020, 34(1): 6-10.
LUO S P, GAO L, WANG C, et al. Effect of wood species on properties of wood/EPS foam low-density particleboard[J]. China Wood Industry, 2020, 34(1): 6-10.
- WANG D H, SUN X S. Low density particleboard from wheat straw and corn pith[J]. Industrial Crops and Products, 2002, 15(1): 43-50.
- 曾钦志, 饶久平, 吴纯初, 等. 杉木间伐材制造厚型轻质刨花板的研发[J]. 木材工业, 2000, 14(4): 3-6.
ZENG Q Z, RAO J P, WU C C, et al. Study on low density particleboard from Chinese fir thinnings[J]. China Wood Industry, 2000, 14(4): 3-6.
- Luo S P, Gao L, Guo W J. Effect of face layer manipulation on the density profile and properties of low density particleboard[J]. Wood Research, 2020, 65(1): 125-134.
- Wong E D, Zhang M, Wang Q, et al. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard[J]. Wood Science and Technology, 1999, 33(4): 327-340.
- 郭文静, 常亮. 无醛胶粘剂人造板产业化应用状况[J]. 国际木业, 2016, 46(9): 4-5.
GUO W J, CHANG L. Industrial application of formaldehyde-free adhesive wood-based panels[J]. International Wood Industry, 2016, 46(9): 4-5.
- 孙萍, 张健, 刘红光, 等. UF/PMDI与PMDI胶黏剂制备轻质刨花板性能对比研究[J]. 林产工业, 2021, 58(6): 7-12.
SUN P, ZHANG J, LIU H G, et al. Study on the performance of UF/PMDI and PMDI adhesives for preparing light-weight particleboards [J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(6): 7-12.
- 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: 119842.
- LI M, WANG Y, TANG Y B, et al. Sustainably modified UF/pMDI hybrid resin: Extended shelf life, low emissions, and particleboard bonding performance[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 233: 121437.
- 高黎, 罗书品, 郭文静, 等. 次表层增强型五层结构刨花板的生产工艺与性能[J]. 中国人造板, 2025, 32(4): 1-4.
GAO L, LUO S P, GUO W J, et al. Production technology and properties of subsurface enhanced five-layer particleboard[J]. China Wood-Based Panels, 2025, 32(4): 1-4.
- 陈义桢, 陈婷婷, 曾雅, 等. 异氰酸酯改性大豆油基木材胶黏剂的制备与性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 313-318.
CHEN Y Z, CHEN T T, ZENG Y, et al. Effects of isocyanate usage on the properties of soybean oil-based adhesives and their plywoods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(13): 313-318.
- ZHANG J, LUO S P, GAO L, et al. Utilizing agricultural residue peanut husk in the manufacture of particleboard using foamable polyurethane adhesive[J]. Polymer Composites, 2026, 47(5): 4609-4623.
- CHEN H Y, YAN N. Application of Western red cedar (Thuja plicata) tree bark as a functional filler in pMDI wood adhesives[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 113: 1-9.
- ZHANG J, LUO S P, GAO L, et al. Development of lightweight particleboards using epoxidized soybean oil foamable adhesive[J]. Polymer Composites, 2025, 46(S2): S819-S834.