

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, 刨花板主要应用领域已由传统家具板材逐步拓展至墙板、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。针对三层刨花板表层与芯层的结构差异, 提出基于环氧大豆油的双层协同改性聚氨酯胶黏剂策略。

以不同形态的杨木 (*Populus* sp.) 刨花为原料, 制备密度分别为 0.50、0.55、0.60 g/cm³ 的三层刨花板。对照组表层、芯层均以异氰酸酯 (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)。通过测试刨花板的静曲强度 (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, 在三种低密度条件下, 改性组均实现轻量化与高性能的协同提升。其中, 0.55 g/cm³ 改性组刨花板 (施胶量 10%、热压温度 190 °C) 的 MOR、MOE、IB 分别为 12.33 MPa、1 710 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。通过双层协同改性聚氨酯胶黏剂不仅降低 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 (2026) 02-0032-10

Development and Performance of Lightweight High-Strength Particleboards Made with Epoxidized Soybean Oil-Modified Polyurethane Adhesive

ZHANG Jie, LUO Shupin, GAO Li, GUO Wenjing

(Research 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 markets such as wall panels, large-size countertops, and tall door boards. These new applications impose higher requirements for low-density yet high-strength particleboards. To address the structural characteristics of the surface and core layers in three-layer particleboard, a synergistic double-layer polyurethane adhesive modification strategy with

收稿日期: 2025-12-22; 修改日期: 2026-01-29

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“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。Email: zhangjiecaf@163.com

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

epoxidized soybean oil and isocyanate was proposed. 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. In the control group, both the surface and core layers were bonded with polymeric methylene diphenyl diisocyanate (pMDI). In the development 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). 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 particleboards achieved a synergistic improvement in both weight reduction and performance enhancement. In particular, the modified particleboards 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 12.33 MPa, 1 710 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 particleboards, 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 particleboards, thereby providing a feasible technical route for manufacturing lightweight high-strength particleboards.

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6 415万 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探索, 并达到一定的效果^[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有效途径。

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, 其不仅可以开环加成反应制备低黏度、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,提出基于环氧大豆油的双层协同改性聚氨酯胶黏剂策略。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ESO基多元醇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。通过表层与芯层pMDI双层协同改性策略,促进改性pMDI胶黏剂的发展,为制备轻质高强刨花板提供技术路径。

1 试验材料与方法

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%,黏度为150~250 mPa·s (25 °C);聚二甲基硅氧烷硅油(polydimethylsiloxane, PDMS)、去离子水、N,N-二甲基环己胺(N,N-dimethylcyclohexylamine, DMCHA)、四氟硼酸、丙酮、磷酸、乙二醇、丙三醇、聚乙二醇(质量分数99%,分子量200),外购。

环氧大豆油多元醇(Epol)由环氧大豆油和乙二醇在高温下经开环反应制得,羟值约为224 mgKOH/g。

杨木(*Populus sp.*)刨花由湖北某公司提供。表层刨花为通过0.3 mm筛网、留存于1.5 mm筛网的细刨花,含水率约为16%;芯层刨花为通过1.5 mm筛网、留存于6 mm筛网的粗刨花,含水率约为10%。

1.2 试验设备

傅里叶变换红外光谱仪(Vertex 70)、热重分析仪(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(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 试验方法

1.3.1 环氧大豆油改性聚氨酯胶黏剂的制备

1)表层用胶EPA的制备。根据前期研究基础,EPA配方(按质量分数计)为pMDI 60%、ESO 20%、PEG-200 20%。将pMDI与ESO加入烧杯,于室温下经磁力搅拌均质化5 min。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10 s,随即注入模具,经固化脱模后即获得固体胶黏剂。

2)芯层用胶FPU的制备。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(质量分数)为pMDI 70%、Epol 20%,其他助剂10%。将Epol、DMCHA、PDMS、磷酸快速混合3 min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2 000 r/min下搅拌15 s。最后,将混合物在室温下放置24 h,以进行充分的固化与发泡反应。

1.3.2 轻质高强刨花板的制备 采用热压法制备三层轻质高强刨花板,设计3种目标密度0.50、0.55、0.60 g/cm³,板材尺寸为43 cm×40 cm×1.8 cm,表层与芯层刨花的质量比为4:6,施胶量均设定为10%。具体制备过程如图1所示。

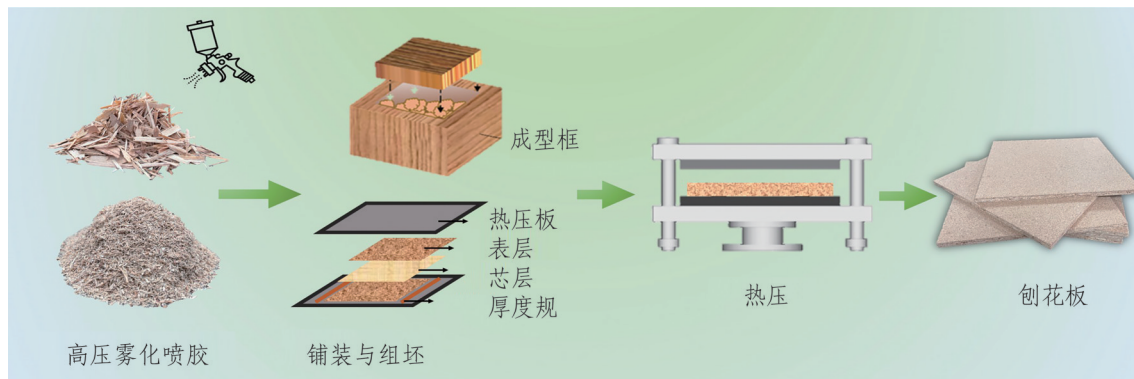


图1 轻质高强刨花板的制备流程

Fig.1 Process of preparing lightweight high-strength particleboards

1) 调控表层细刨花、芯层粗刨花的含水率分别至16%、10%。2) 将表层与芯层刨花转移至不同的滚筒拌胶机, 通过高压喷枪快速进行雾化施胶。改性组表层、芯层胶黏剂分别采用EPA、FPU, 对照组采用pMDI胶。3) 根据设定的板材密度, 手工铺装板坯。4) 热压压力-时间曲线如图2所示, 热压温度设定为190℃。对照组和改性组均制备2块板材。

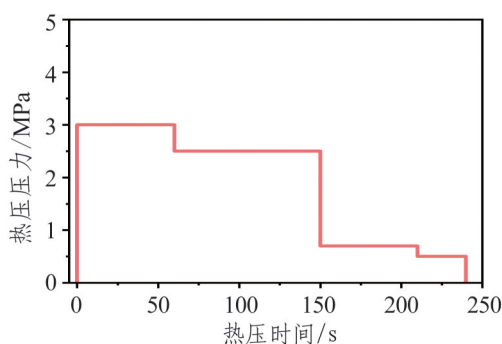


图2 梯度热压工艺

Fig.2 Gradient hot-pressing process

1.4 结构与性能表征

1.4.1 胶黏剂结构与性能

1) 结构表征。① 采用配备ATR模式的傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 对胶黏剂进行官能团表征, 光谱扫描范围在4 000~400 cm^{-1} , 分辨率为4 cm^{-1} , 扫描64次。② 使用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察固化胶黏剂的微观形貌, 采用二次电子模式, 加速电压为5 kV。③ 通过全自动压汞仪测试固化后FPU的孔隙率和孔隙分布。

2) 黏度、热稳定性与固化行为表征。① 采用旋转黏度计测试胶黏剂的黏度, 温度范围从室温到100℃, 主轴转速范围50~100 r/min。② 采用热重分析仪, 在氮气氛围下对固化胶黏剂进行热稳定性分析, 温度范围为室温至800℃, 加热速率为10℃/min。③ 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。

3) 力学性能测试。采用电子万能试验机测试固化EPA胶黏剂的力学性能, 加载速度控制样品在(60±30) s内破坏。

1.4.2 刨花板结构与性能

1) 微观形貌表征。使用SEM观察刨花板芯层试件, 采用二次电子模式, 加速电压为5 kV。

2) 剖面密度测量。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。

3) 其他理化性能测试。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、24 h吸水厚度膨胀率与吸水率进行测试。静曲强度与弹性模量试样尺寸为410 mm×50 mm×18 mm, 内结合强度、24 h吸水厚度膨胀率与吸水率试样尺寸为50 mm×50 mm×18 mm, 每块板材取4块试样, 共8个重复试样。

2 结果与讨论

2.1 改性pMDI胶黏剂的结构与性能

2.1.1 结构表征 为了研究改性pMDI胶黏剂的聚合反应过程, 采用FTIR对原始pMDI胶以及EPA胶、FPU胶进行化学结构分析。如图3a所示, 原始pMDI胶的FTIR曲线在2 240 cm^{-1} 处显示1个强吸收峰, 对应于典型异氰酸酯基团 ($-\text{N}=\text{C}=\text{O}$) 特征峰。随着异氰酸酯基团不断参与聚合反应, EPA和FPU胶中的异氰酸酯基团特征峰显著减弱, 但是由于异氰酸酯基团相对于羟基过量, EPA和FPU胶中仍有剩余未反应的pMDI。EPA和FPU胶中新出现3 500~3 000 cm^{-1} 处的宽峰以及1 740 cm^{-1} 处的特征峰, 对应氨基甲酸酯/脲基团的N—H键以及C=O键, 确认聚氨酯的合成^[18-19]。

图3b展示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 ($\text{R}-\text{NH}_2$) 和二氧化碳气体, 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与木材表面羟基的反应^[18]。

两种改性胶黏剂的SEM (图3c、3d) 揭示其微观形貌区别: EPA胶形成致密的交联网络, 适用于制备刚性的刨花板表层结构; FPU显示三维多孔网络结构, 这有利于确保芯层具有良好的内胶合强度同时降低密度, 达到轻质高强的效果。

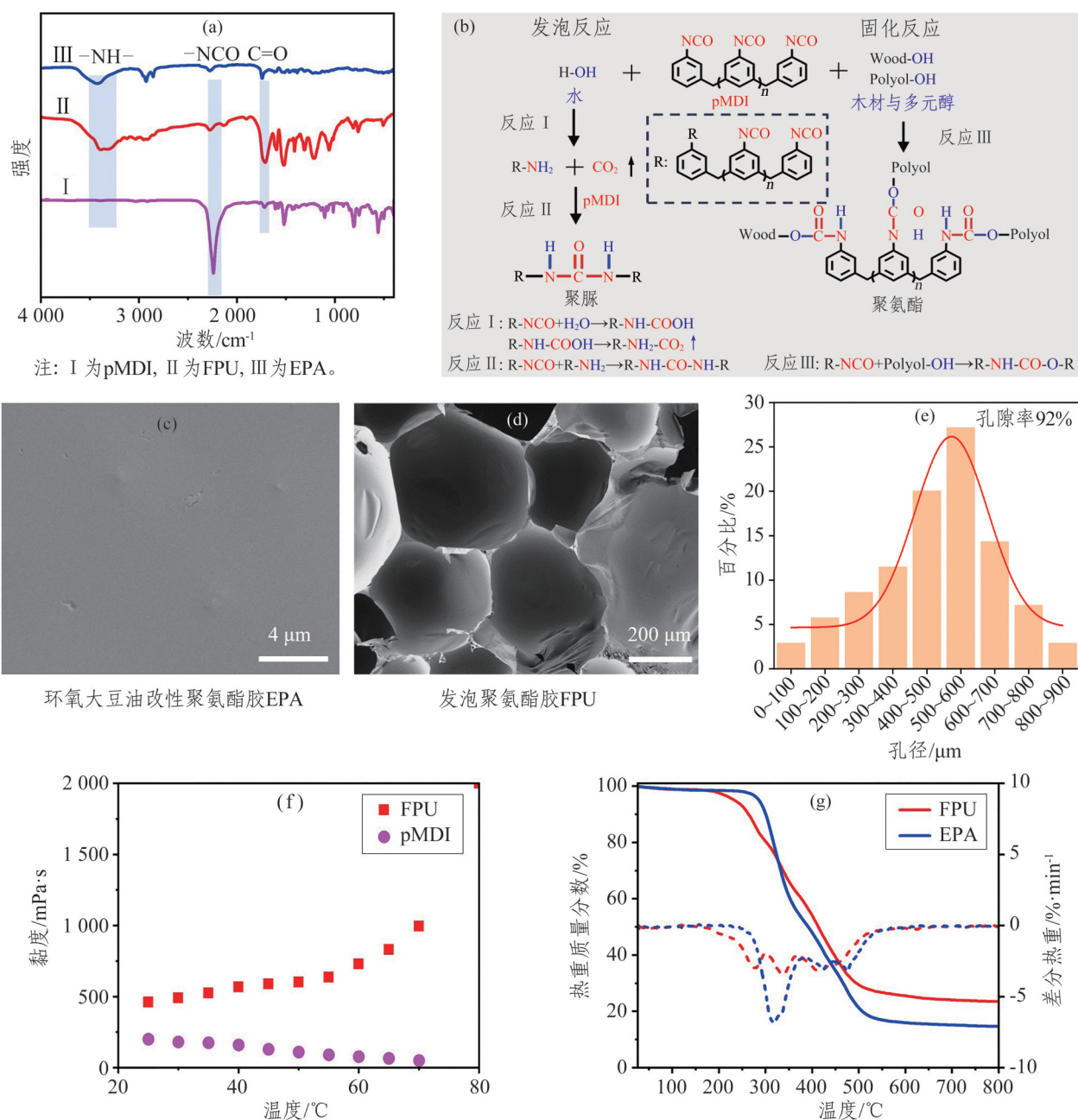


图3 EPA和FPU的结构特征、黏度和热稳定性

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

FPU孔隙结构分析(图3e)显示FPU泡沫的孔径分布均呈合理的正态分布,主要孔径范围为400~600 μm ,约占总孔数的40%~45%,孔隙率约为92%,呈现出高孔隙结构。

2.1.2 黏度、热稳定性与固化行为 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 $\text{mPa}\cdot\text{s}$

提高到约450 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ (图3f),但在50 $^{\circ}\text{C}$ 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。

采用TG-DTG对EPA和FPU两种改性胶的热稳定性进行表征。图3g结果显示固化的改性胶黏剂在室温和热压(190 $^{\circ}\text{C}$)下都具有足够的热稳定性,适合用于制备轻质高强刨花板。

图4显示FPU在板坯铺装与热压前(室温条件

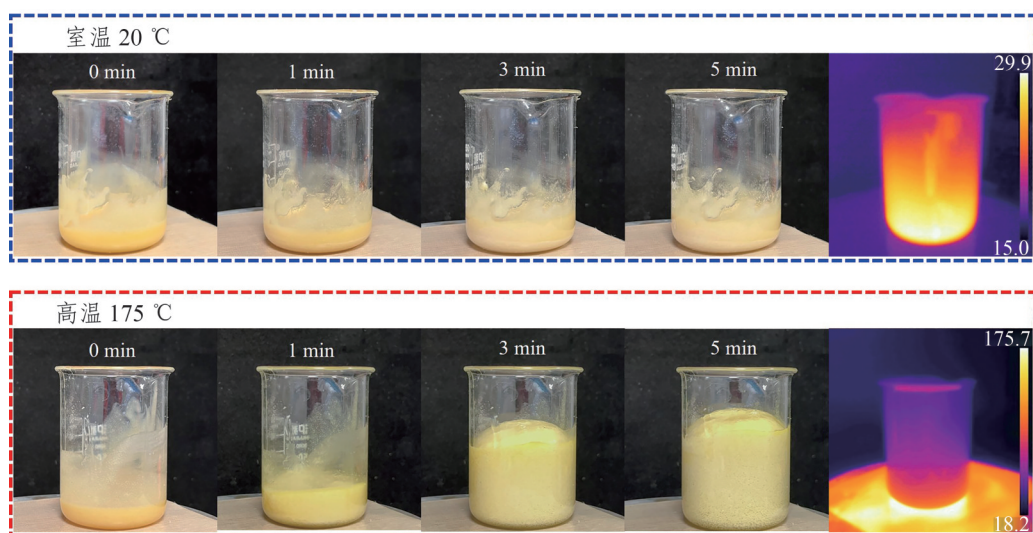


图4 FPU室温和加热175 °C下固化情况

Fig.4 Curing behavior of FPU under room temperature and heating at 175 °C

下) 不会发生预固化, 在室温下具有较长的适用期。一旦进入热压机后加热升温, 胶黏剂迅速发泡固化, 适配轻质高强刨花板的制备工艺。

2.1.3 力学性能 固化后EPA和FPU胶黏剂本体力学性能如图5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。固化后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的内结合强度。

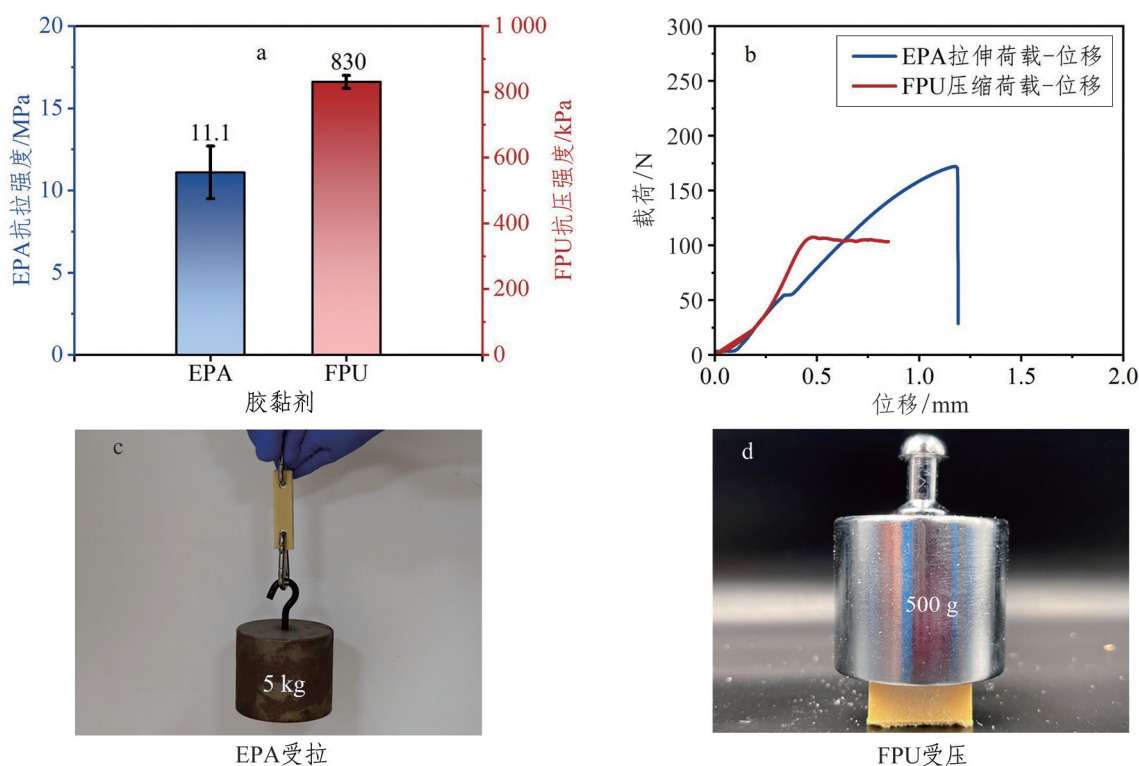


图5 EPA抗拉性能和FPU抗压性能

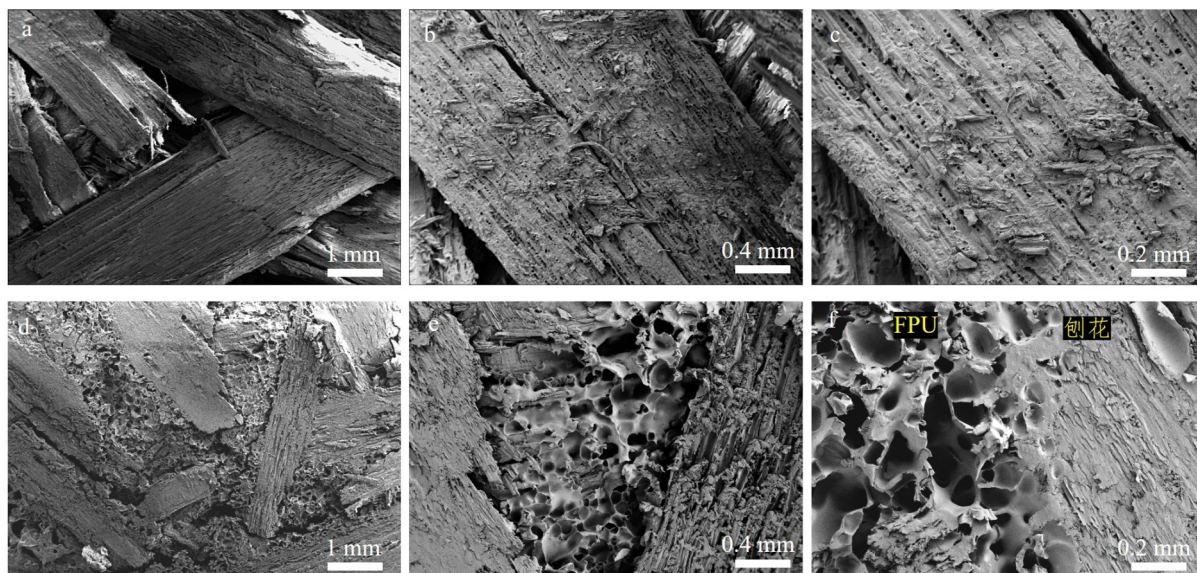
Fig.5 Tensile performance of EPA and compressive performance of FPU

2.2 刨花板结构与性能

2.2.1 微观形貌 为了探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分析 0.55 g/cm^3 板材芯层断裂形貌。如图6a~6c所示,原始pMDI胶制备的对照组刨花板,其芯层由许多相互连接的粗刨花组成,刨花的定向纤维排列得以保留,为板材提供足够的刚度和稳定性。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胶和芯层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6d~6f所示,改性聚氨酯胶制备的改性组刨花板,其芯层刨花之间形成大量多孔硬质泡沫网络。固化的泡沫与刨花具有良好的界面结合。这表明在芯层中大量固化泡沫网络原位填充刨花之间的空隙,在相同的密度下提供更致密的三维多孔胶合网络,有效地增加胶合面积和改善胶合界面,有利于提升胶合强度。图6f显示FPU与芯层刨花界面结合良好,无明显过渡区域。



注: a~c 对照组; d~f 改性组。

图6 刨花板芯层微观形态

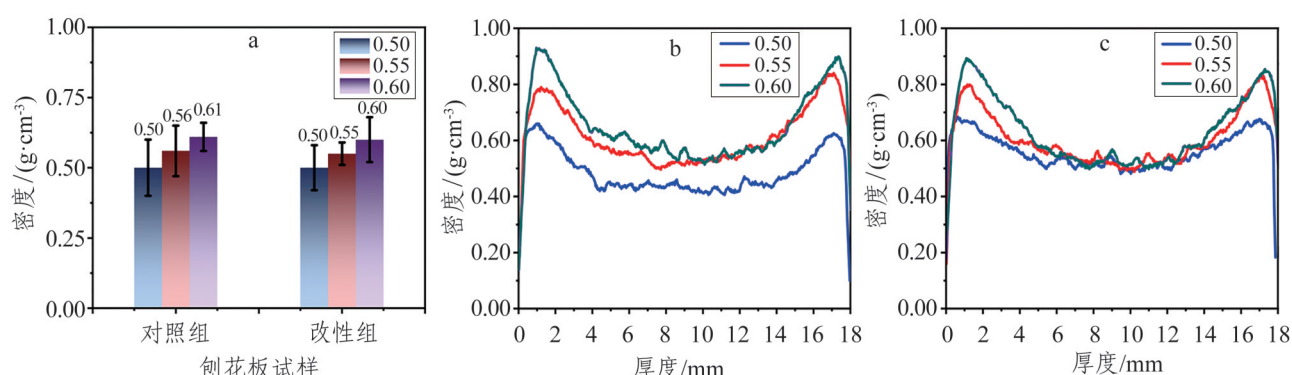
Fig.6 Micromorphology of particleboard core layer

2.2.2 密度 基于原始pMDI和改性聚氨酯胶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。所有刨花板测得的表观密度都非常接近目标设计密度(图7a),密度偏差均小于5%,表明刨花板的密度在生产过程中得到非常精确的控制,采用改性胶黏剂并未对刨花板生产制备过程造成负面影响。

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7b、7c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出现最大峰值和在中间区域出现最小值的轮廓。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。

2.2.3 力学性能 原始pMDI胶和改性聚氨酯胶制备刨花板的静曲强度、弹性模量和内结合强度如图8所示。密度为 0.55 g/cm^3 和 0.60 g/cm^3 时,两组刨花板的静曲强度存在显著差异($P<0.05$),密度为 0.50 g/cm^3 时两组刨花板的静曲强度无显著差异($P>0.05$);胶黏剂对3种密度刨花板弹性模量的影响均不显著($P>0.05$)。改性聚氨酯胶制备的刨花板静曲强度和弹性模量,相对于对照组原始pMDI胶刨花板的均有不同程度的提升(图8a、



注: b、c测试对象分别为对照组、改性组。

图7 刨花板的表观密度和剖面密度曲线

Fig.7 Apparent density and vertical density profiles of the particleboards

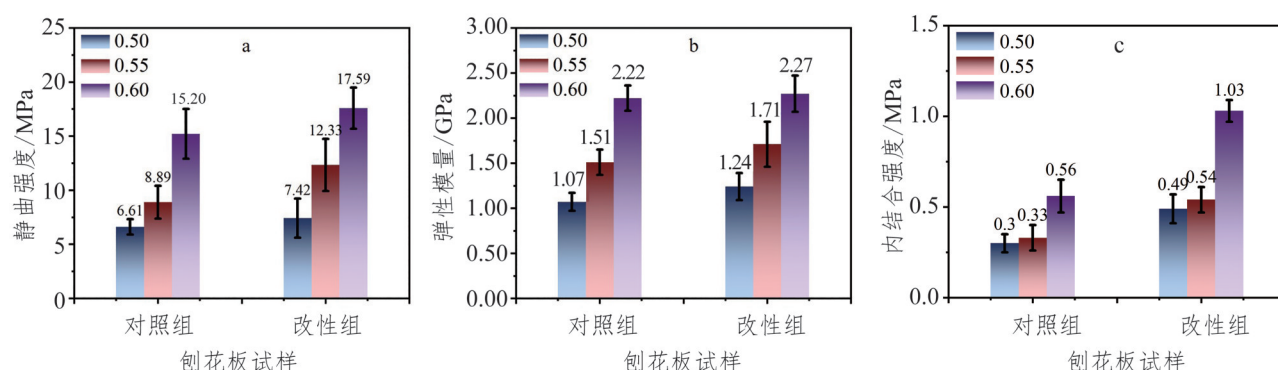


图8 刨花板静曲强度、弹性模量和内结合强度

Fig.8 MOR, MOE and IB of the particleboards

8b)。其中 0.55 g/cm³ 密度改性组的静曲强度由 8.89 MPa 提升至 12.33 MPa, 提升幅度高达 38%, 达到国家标准 GB/T 4897—2015《刨花板》中 P2 型家具用刨花板要求。说明增加设计密度和使用改性胶黏剂均能够提高刨花板的力学性能。这种增强可能归因于芯层 FPU 发泡胶黏剂有效填充了刨花间的空隙, 形成了更紧密的胶合界面, 促进了连续承重网络的形成。此外, 表层 FPU 形成的致密交联网络结构和芯层硬质多孔泡沫结构协同促进了应力传递和能量耗散, 从而提升板材的力学性能。

相同密度采用改性聚氨酯胶制备的刨花板, 其内结合强度比对照组均大幅提升 (图 8c)。0.50、0.55、0.60 g/cm³ 改性聚氨酯刨花板的内结合强度分别为 0.49、0.54、1.03 MPa, 是对照 pMDI 刨花板的 1.63、1.64、1.84 倍, 均高于 GB/T 4897—2015 中 P2 型刨花板内结合强度 ≥0.35 MPa 的要求。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, 有效地增强胶黏剂内聚力。此外, 由发泡反应引起的体积膨胀能够增加胶黏剂和刨花之间的接触面积, 从而加强界面处的机械互锁。这些结果表明采用改性胶黏剂不仅能够降低 pMDI 胶的消耗量, 而且有效地提升板材的力学性能。

2.2.4 耐水性 当板材浸没在水中时, 刨花表面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 (图 9a)。在本试验条件下, 不同密度对照组与改性组刨花板的 24 h 吸水厚度膨胀率差异不明显 (图 9b), 均未超过 10%。不同密度改性组刨花板的 24 h 吸水率均高于对照组刨花板 (图 9c), 这可能是由于对照组未反应的 pMDI 胶在高湿环境中发生二次固化, 阻碍水分渗透, 因此对照组刨花板的吸水率低于改性组^[12]。

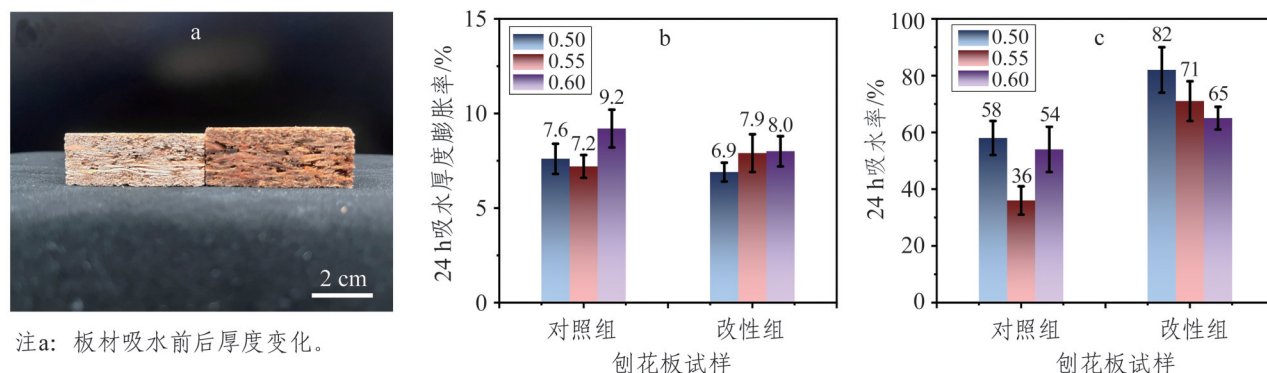


图9 刨花板耐水性

Fig.9 Water resistance of the particleboards

3 结论

1) 针对三层刨花板表层与芯层的结构差异, 提出环氧大豆油的双层协同改性聚氨酯胶黏剂策略, 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, 二者协同作用构建三层刨花板“表层致密、芯层多孔”的复合结构, 实现轻质高强刨花板的制备。

2) 刨花板的结构表征和物理力学性能测试结果显示, 所有板材密度控制良好。三种密度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, 0.55 g/cm³改性组刨花板的MOR、MOE、IB分别为12.33、1 710、0.54 MPa, 相比对照组分别提升38%、13%、63%, 达到GB/T 4897—2015《刨花板》P2型刨花板的要求。

3) SEM观察结果揭示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刨花之间的空隙, 在相同密度下提供更致密的三维多孔交联网络, 有效地增大胶合面积并强化胶合界面强度, 这是板材兼具低密度与高强度的关键。

参考文献:

- [1] 华毓坤. 人造板工艺学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.

Technology, 2022, 36(6): 88-94.

- [4] 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].
- [5] 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.
- [6] 高黎, 罗书品, 郭文静, 等. 超薄刨花板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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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究[J]. 木材工业, 2000, 14(4): 3-6.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 郭文静, 常亮. 无醛胶黏剂人造板产业化应用状况[J]. 国际木业, 2016, 46(9): 4-5.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 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. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.121437.
- [16] 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.
- [17] 陈义桢, 陈婷婷, 曾雍, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
(责任副主编 徐朝阳/编校 曹惠敏、向琴)

(上接第22页)

- [14] 欧智宏, 雷婉若, 李佳豪, 等. 微波膨化处理对蔗渣纤维在回用过程中品质衰变的抑制作用研究[J]. *中国造纸*, 2025, 44(1): 141-147, 154.
OU Z H, LEI W R, LI J H, et al. Study on the inhibitory effect of microwave puffing treatment on the quality deterioration of bagasse fibers during reuse process[J]. *China Pulp & Paper*, 2025, 44(1): 141-147, 154.
- [15] 贾倩倩, 陈嘉川, 张凯, 等. 生物酶预处理改善麦草氧碱制浆性能的研究[J]. *中国造纸学报*, 2022, 37(4): 61-68.
JIA Q Q, CHEN J C, ZHANG K, et al. Research on improving oxygen-alkali pulping performance of wheat straw by biological enzyme pretreatment[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2022, 37(4): 61-68.
- [16] RASHID M M, ABIR N, ISLAM S, et al. Extraction and characterization of a noble cellulose-rich cotton-like convoluted, lightweight and soft fiber from the floral part of the banana plant pseudo stem[J]. *Cellulose*, 2025, 32(5): 3027-3042.
- [17] BADANAYAK P, JOSE S, BOSE G. Banana pseudostem fiber: a critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2023, 20(1). DOI: 10.1080/15440478.2023.2168821.
- [18] ATILGAN A, KRAKOWIAK-BAL A, ERTOP H, et al. The energy potential of waste from banana production: a case study of the Mediterranean Region[J]. *Energies*, 2023, 16(14). DOI: 10.3390/en16145244.
- [19] WANI S, PATIL D. A review on banana pseudostem waste utilization and processing[J]. *Journal of Interdisciplinary Cycle Research*, 2023, 15(7): 478-491.
- [20] TRIPATHI S K, BHARDWAJ N K, CHECHI S, et al. Suitability of banana stem pulp as replacement of softwood pulp for making superior grade unbleached paper from agro residue pulp[J]. *Appita Journal*, 2019, 72(3): 163-178.
- [21] 盛占武. 香蕉茎秆纤维脱胶、改性及其结构性能分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [22] 张美玲, 鲁张含悦, 李翌溶, 等. 香蕉纤维高效低耗脱胶工艺的参数优选[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(1): 323-329.
ZHANG M L, LU Z, LI Y R, et al. Optimizing the parameters for high efficiency and low consumption degumming of banana fiber[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(1): 323-329.
- [23] 周静, 沈葵忠, 房桂干, 等. 漂白竹浆疏水改性纳米纤维化纤维素的制备和表征[J]. *林业工程学报*, 2017, 2(2): 101-106.
ZHOU J, SHEN K Z, FANG G G, et al. Preparation and characterization of hydrophobic nanofibrillated cellulose fiber from bleached bamboo pulp[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2017, 2(2): 101-106.
- [24] 于昕樱, 李英教, 徐树英. 香蕉茎秆纤维提取工艺优化及其表征[J]. *生物质化学工程*, 2024, 58(2): 31-38.
YU X Y, LI Y J, XU S Y. Optimization of extraction process of banana pseudostem fibers and its characterization[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2024, 58(2): 31-38.
- [25] 徐丰, 王东兴, 慈晓雷, 等. 含木质素的纳米纤维素/聚吡咯复合膜的制备及其电容性能研究[J]. *中国造纸*, 2025, 44(10): 105-113.
XU F, WANG D X, CI X L, et al. Preparation and capacitive performance study of the lignin-containing cellulose nanofibril/polypyrrole composite film[J]. *China Pulp & Paper*, 2025, 44(10): 105-113.
- [26] 宋学翠, 管福成, 郭静, 等. 海藻酸钠/羊毛角蛋白纤维的氢键作用及其结构与性能[J]. *大连工业大学学报*, 2022, 41(2): 123-128.
SONG X C, GUAN F C, GUO J, et al. The effect of hydrogen bonding in sodium alginate/wool keratin fibers on their structures and properties[J]. *Journal of Dalian Dalian Polytechnic University*, 2022, 41(2): 123-128.
- [27] 王丽珍, 李晓天, 王俊跃. TEMPO氧化结合高压均质制备向日葵粘皮纤维素纳米纤维[J]. *中国造纸学报*, 2025, 40(2): 26-33.
WANG L Z, LI X T, WANG J Y. Preparation of sunflower straw rind cellulose nanofibers by TEMPO oxidation combined with high-pressure homogenization[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2025, 40(2): 26-33.
- [28] TAER E, AFDAL YUSRA D, AMRI A, et al. The synthesis of activated carbon made from banana stem fibers as the supercapacitor electrodes[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 3346-3349.
- [29] 彭磊, 高萌, 付强, 等. 短切纤维结晶度对间位芳纶绝缘纸性能的影响[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(5): 15-21.
PENG L, GAO M, FU Q, et al. Effect of crystallinity of chopped fibers on properties of meta-aramid insulation paper[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(5): 15-21.
- [30] KUMAR A, SINGH B P, JAIN R K, et al. Banana fibre (*Musa sapientum*): "a suitable raw material for handmade paper industry via enzymatic refining"[J]. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, 2(10): 2278-0181.
(本文编校 向琴)