

全竹基可降解包装材料的制备与性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.1003

李知函^{1,2} 陈成²
朱琦¹

1. 广东彩乐智能包装
科技有限公司
广东 中山 528462
2. 中南林业科技大学
化学与化工学院
湖南 长沙 410004

摘要:为提升竹纤维包装材料的阻隔性与疏水性,通过冻融循环预处理与水热法从毛竹中绿色提取半纤维素,再利用辛烯基琥珀酸酐对半纤维素进行酯化改性,制备两亲性半纤维素衍生物(OSAHC),并应用于竹纤维纸表面涂布,制备具有良好阻隔和耐水性能的竹纤维改性包装纸材料。从纸张的微观结构及其力学性能、阻隔性能测试结果发现,OSAHC涂层可有效填充纸张的孔隙、与纤维形成强氢键,并在表面形成致密疏水层;涂布量为6%时,改性纸张的抗张指数提升至20.6 N·m/g;涂布量为10%时,水蒸气透过率和氧气透过率分别显著降低至114 g/(m²·d)和472 mL/(m²·d)。樱桃采后保鲜实验证实了改性纸张的保鲜效果与商用聚乙烯膜相当。OSAHC为高值化利用竹子、开发高性能“以竹代塑”包装材料提供了有效路径。

关键词:竹纤维; 半纤维素; 包装材料; 阻隔性能

中图分类号: TB484.6; TQ352.7

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2026)01-0023-07

引文格式: 李知函, 陈成, 朱琦. 全竹基可降解包装材料的制备与性能研究[J]. 包装学报, 2026, 18(1): 23-29.

1 研究背景

在国家“双碳”战略目标引领下,利用可再生低碳原料的绿色制造以替代石化基材料,成为我国制造业转型升级的关键路径之一^[1-3]。竹子作为一种高效固碳植物,具有生长速度快、分布范围广等特点,3~5年即可成材,其单位面积固碳效率是木材的1.4倍。900多个竹种遍布于全球多个国家,资源潜力巨大^[4-5]。中国竹林面积与竹材产量在全球均位居首位,且竹材加工技术也处于国际领先水平。这为“以竹代塑”提供了坚实的资源基础和技术支撑^[6-9]。然而,竹子中的纤维素和半纤维素含量较高,丰富的羟基基团易在潮湿环境中吸附水分子,引发纤维润胀、形变及界面结构失稳,这严重限制了竹纤维材料在食品包装、

功能薄膜等高阻隔、高耐水性领域的应用^[10]。因此,针对竹纤维包装材料的固有缺陷,开展结构调控与性能提升研究具有重要现实意义。

半纤维素作为植物细胞壁的主要组分之一,是一种来源广泛、可生物降解的天然多糖,具有良好的成膜性、生物相容性和自然可降解性,已广泛应用于生物医学、食品添加和精细化妆等领域^[11]。然而,在传统制浆和纺织产业中,常通过碱处理、氯漂等工艺去除半纤维素以纯化纤维素,这导致大量半纤维素作为副产物被废弃或低值利用,未能充分发挥其高值化潜力^[12-13]。近年来,针对半纤维素基薄膜的研究日益增多。常见改性策略包括与增塑剂或其他天然聚合物复配、通过物理交联或化学改性(如酯化、接枝等)来提升疏水性和力学性能,以及引入纳米填料以增强

收稿日期: 2025-10-10

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目(24B0233)

作者简介: 李知函,男,副教授,博士,主要从事生物质资源绿色应用研究, E-mail: lizhlive@163.com

阻隔性能^[14-17]。这些研究证实了半纤维素作为膜材料的潜力,但也揭示了一些共性问题:其一,半纤维素本身亲水性强,导致所制备薄膜在高湿环境下的阻隔性能和耐水性显著下降;其二,单一材料制成的薄膜常有机械强度不足和脆性问题,需通过复配或改性手段增强;第三,常规化学改性会使用有机溶剂或强酸/碱,这增加了环境负担并影响其生物可降解性。

基于此,本研究拟以竹材加工过程中的半纤维素为研究对象,通过绿色提取与功能化改性,提升其疏水性、阻隔性及与竹纤维的界面相容性,进而用于竹纤维纸基材料的表面增强与功能化构建,开发出兼具高阻隔性、高耐水性与生物可降解性的竹基包装材料。

2 实验部分

2.1 实验材料、试剂与仪器

1) 实验材料及试剂

3年生毛竹,湖南省益阳市某林场,其主要化学组分如表1所示;漂白竹浆板,福建青山纸业。辛烯基琥珀酸酐(octenyl succinic anhydride, OSA),分析纯,上海高鸣化工有限公司;无水乙醇、氢氧化钠和乙酸,分析纯,上海阿拉丁试剂有限公司;实验用水为去离子水。

表1 毛竹中主要化学组分的质量分数

Table 1 Mass fraction of chemical composition in moso bamboo %

纤维素	木质素	半纤维素	灰分
45.6	25.1	22.8	1.9

2) 实验仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR), NICOLET380型,美国赛默飞科技公司;电子万能试验机, CMT6104型,中国深圳万测试验设备有限公司;扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM), Phenom Pure型,赛默飞世尔科技公司。

2.2 毛竹半纤维素的绿色提取

将毛竹切片、粉碎后过100目筛,取50g竹粉按固液比1:10与去离子水混合,在-20℃条件下进行5次冻融循环,随后将混合物转移至蒸煮锅,在170℃下水热提取,提取液经旋蒸浓缩后,用乙醇沉淀,冷冻干燥得到毛竹半纤维素(hemicellulos, HC)。

2.3 辛烯基琥珀酸酐酯化半纤维素衍生物的制备

将毛竹半纤维素与去离子水配制成质量分数为

20%的溶液并调整pH至8.5,常温搅拌下缓慢滴加OSA溶液(OSA与无水乙醇体积比为1:3),反应5h后调节体系的pH至6.5终止反应。产物依次用95%乙醇和去离子水洗涤2次,冷冻干燥即可得到辛烯基琥珀酸酐酯化半纤维素衍生物(OSAHC)。

2.4 防水阻隔改性竹纤维包装纸的制备

将化学漂白竹浆板疏解分散后,在纸页成形器上抄造定量为80g/m²的纸张。将OSAHC分散在去离子水中配制成一定浓度的涂布乳液,使用涂布机对纸张表面进行涂布,通过调整施胶棒运转高度和速度控制涂布量(质量分数在3%~10%),随后经辊压机热压成型,制得防水阻隔改性竹纤维包装纸。

2.5 防水阻隔改性竹纤维包装纸的性能测定

纸张的撕裂度、抗张强度、水蒸气阻隔性能及氧气阻隔性能参照标准GB/T 12914—2018《纸和纸板抗张强度的测定 恒速拉伸法(20mm/min)》、GB/T 1037—2021《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》和GB/T 1038.1—2022《塑料制品 薄膜和薄片 气体透过性试验方法 第1部分:差压法》进行测试。

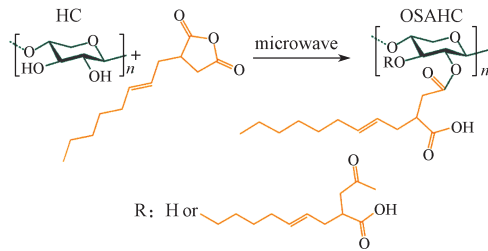
3 结果与讨论

3.1 OSAHC的化学结构表征

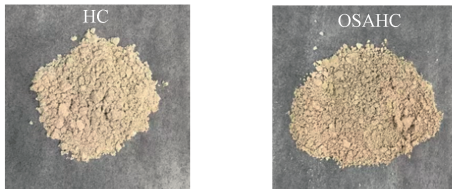
本研究采用冻融循环预处理结合水热法从毛竹中提取HC。冻融循环预处理利用水结晶产生的物理爆破力有效破坏竹材致密的细胞壁结构,增大其孔隙率,从而为后续水热渗透创造微纳通道^[18-20]。该处理方式不仅促进了水分子的扩散,也有助于高效断裂木质素与半纤维素间的连接键,进而诱导半纤维素溶出,实现其绿色高效提取,最终得率为12.7%。

通过酯化改性(酯化反应方程式见图1a),在HC骨架上同时引入羧基与长链烷基,制备得到具有两亲性的半纤维素衍生物(见图1b)。为验证其化学结构演变,采用FTIR对HC及OSAHC的特征官能团进行表征分析,结果如图1c所示。在HC的FTIR谱图中,3400cm⁻¹处的宽吸收峰为C2、C3位上羟基(—OH)的伸缩振动峰;2922cm⁻¹处的较宽吸收峰为C—H的伸缩振动峰;1640cm⁻¹处的吸收峰为吸附水的弯曲振动峰,表明其具有较强的亲水性;1044cm⁻¹处的吸收峰为糖苷键C—O的伸缩振动峰;897cm⁻¹处的吸收峰为D-木糖单元之间β-糖苷键的特征峰^[21-22]。在OSAHC的FTIR谱图中,

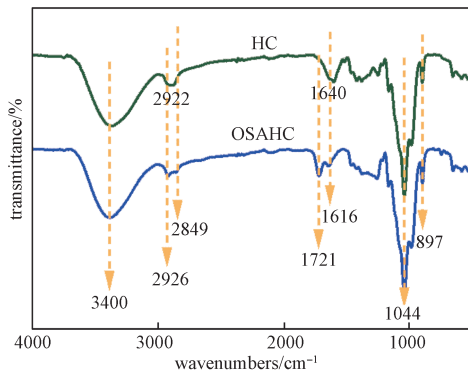
1721 cm^{-1} 处出现了新的特征吸收峰, 归因于羰基 ($\text{C}=\text{O}$) 的伸缩振动, 表明酯化反应成功^[23]。此外, 2922 cm^{-1} 处的信号峰分裂为 2926 和 2849 cm^{-1} 处两个信号峰, 分别归因于 OSAHC 接枝侧链中 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 上 $\text{C}-\text{H}$ 的伸缩振动^[24-25], 进一步证明烯烃长链已经被成功接枝至 HC 主链。



a) 半纤维素酯化反应路线



b) 半纤维素衍生物样品



c) FTIR 谱图

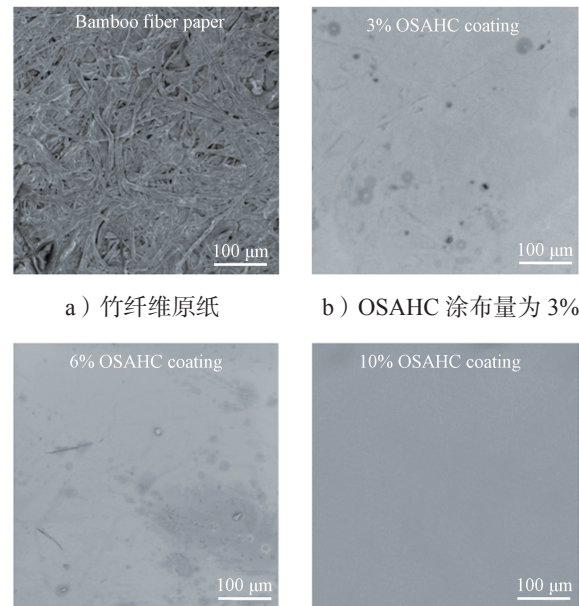
图 1 半纤维素酯化反应路线与半纤维素衍生物样品及其 FTIR 谱图

Fig. 1 Reaction of hemicellulose esterification and the samples of hemicellulose derivatives and their FTIR spectra

3.2 OSAHC 涂布对竹纤维纸形貌结构的影响

通过 SEM 对 OSAHC 涂布前后竹纤维纸的表面形貌进行观察, 结果如图 2 所示。未涂布的原纸 (见图 2a) 呈现出典型的纤维素纤维交织结构, 细长的竹纤维间存在大量微米级的孔隙。孔隙为气体和水分提供了快速扩散渗透的通道, 导致原纸气密性与耐水性不佳^[26]。此外, 较大的比表面积也使纸张易于吸湿, 水分子进入后会削弱纤维间氢键, 引起结构失稳及力

学性能下降。经 OSAHC 溶液涂布后, 纸张表面形貌发生了显著变化。在涂布量为 3% 时, OSAHC 可在纤维表面成膜并部分填充纤维间孔隙 (见图 2b)。OSAHC 分子中的羟基、羧基等极性基团与竹纤维表面羟基形成氢键, 增强界面结合, 并在纤维-涂层界面构建交联网络, 有助于提升纸张整体结合强度。同时, OSAHC 中通过酯化引入的辛烯基长链烷基具有疏水性, 在成膜过程中自发取向排列, 初步在纤维表面形成疏水屏障^[27]。随着涂布量增至 6% 与 10% (见图 2c 和 2d), OSAHC 逐渐形成连续、均匀的薄膜, 纤维间孔隙被充分填充, 纸张表面趋于平整致密。高涂布量下涂层的完整性显著提高, 表面缺陷减少, 形成更有效的物理阻隔层, 可延长气体与水分子的扩散路径, 从而提升材料的阻隔性能。



a) 竹纤维原纸

b) OSAHC 涂布量为 3%

c) OSAHC 涂布量为 6%

d) OSAHC 涂布量为 10%

图 2 竹纤维原纸与 OSAHC 涂布竹纤维纸的 SEM 图

Fig. 2 SEM of untreated bamboo fiber paper and OSAHC-coated bamboo fiber paper

3.3 OSAHC 涂布对竹纤维纸张物理力学性能的影响

OSAHC 涂布对竹纤维纸张基本物理力学性能的影响如图 3 所示。未涂布的竹纤维原纸表现出良好的抗张和耐破性能, 这是由于竹纤维本身具有较高的力学强度, 以及成纸过程中纤维间形成的机械缠绕和表面羟基构成的氢键网络, 共同构建了有效的应力传递体系^[28]。随着 OSAHC 涂布量从 3% 增加至 6%, 纸张的抗张指数由 15.8 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{g}$ 显著提升至 20.3 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{g}$ 。这一增强效应可归因于 OSAHC 涂层在涂布与后续热

压过程中渗入纤维孔隙,其分子链上的羟基、羧基与纤维表面羟基形成更强氢键结合,在纤维交叉点起到“黏合剂”作用,从而改善应力传递效率,使载荷分布更均匀。纸张耐破指数呈现相同变化趋势,进一步印证 OSAHC 对纤维界面结合的整体增强效果。然而,当涂布量继续增至 10% 时,抗张指数增长趋于平缓。这是由于在较低涂布量下,OSAHC 主要作用于纤维结合区域,有效强化界面;而在高涂布量下,纤维表面活性位点趋于饱和,后续涂覆形成的厚涂层其内聚强度可能低于已优化的纤维-界面结合强度,因此对抗张指数的贡献增量有限。OSAHC 涂布通过界面工程显著增强纸张力学性能,有助于提升包装材料的耐用性与可靠性。较高的抗张与耐破性能使纸制品在储运过程中更能抵抗外力冲击,降低包装破损风险,进而拓宽其应用范围。

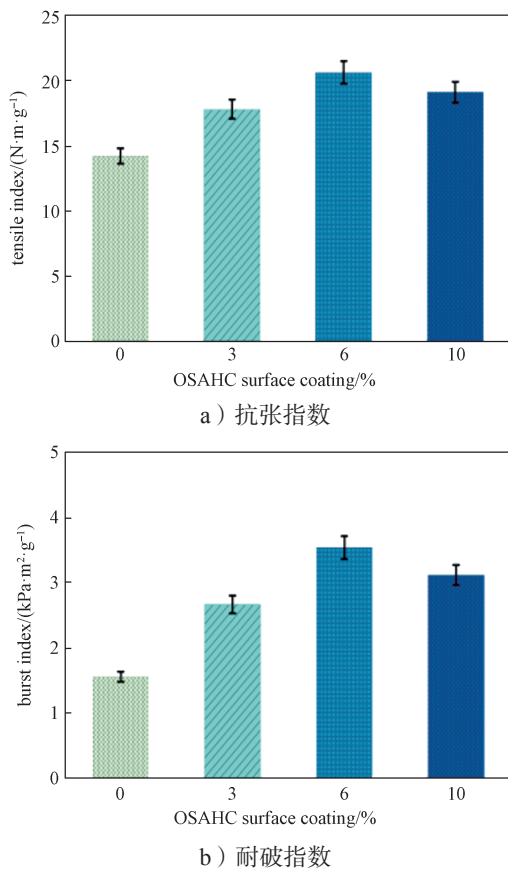


图3 竹纤维原纸与 OSAHC 涂布竹纤维纸的抗张指数与耐破指数

Fig. 3 Tensile index and burst index of untreated bamboo fiber paper and OSAHC-coated bamboo fiber paper

3.4 OSAHC 涂布对竹纤维纸阻隔性能的影响

阻隔性能作为包装材料的核功能指标,其中

水蒸气和氧气阻隔能力直接影响产品的保质与防护效果。如图 4 所示,未涂布的竹纤维原纸因其多孔亲水的纤维网络结构,水蒸气透过率(water vapor transmission rate, WVTR)与氧气透过率(oxygen transmission rate, OTR)均较高,表明其阻隔性能较差。经 OSAHC 涂布后,纸张的 WVTR 与 OTR 均显著下降,且随涂布量增加呈持续降低趋势。当涂布量从 3% 增至 10% 时, WVTR 从 529 g/(m²·d) 降至 114 g/(m²·d), OTR 从 2100 mL/(m²·d) 降至 472 mL/(m²·d)。阻隔性能提升主要源于物理填充与化学改性的协同作用。在物理层面,OSAHC 在涂布与热压过程中填充了纤维间孔隙,形成连续致密的薄膜,显著延长了气体分子的扩散路径^[29]。在化学层面,OSAHC 分子中引入的辛烯基长链烷基具有较强的疏水性,能够有效阻碍极性水分子的渗透;同时,其形成的致密涂层也增加了非极性氧气分子的扩散能垒^[30]。

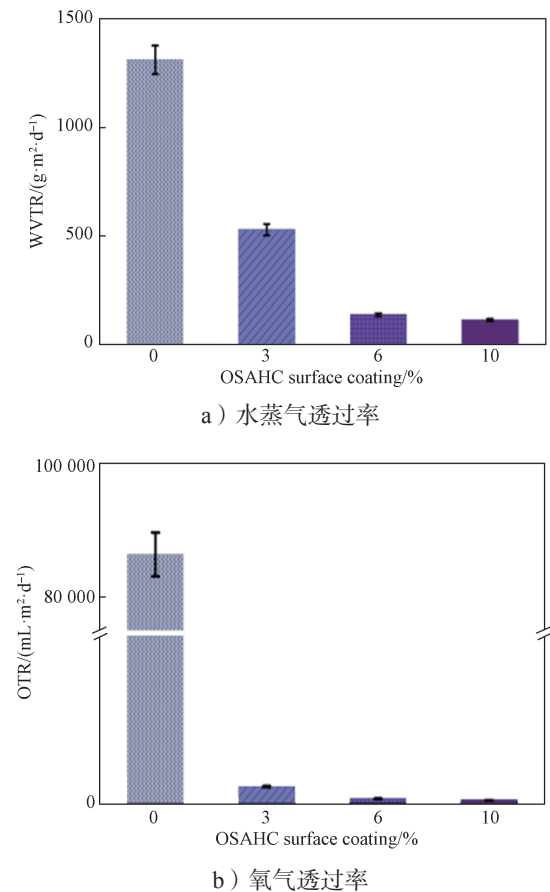
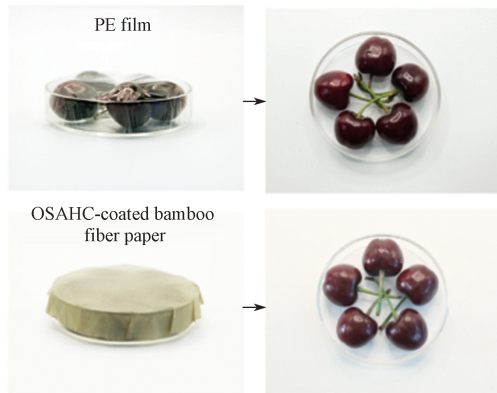


图4 竹纤维原纸与 OSAHC 涂布竹纤维纸的水蒸气透过率与氧气透过率

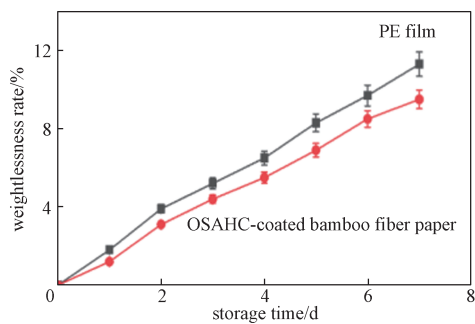
Fig. 4 Water vapor transmission rate and oxygen transmission rate of untreated bamboo fiber paper and OSAHC-coated bamboo fiber paper

3.5 OSAHC 涂布竹纤维纸对樱桃保鲜的影响

为评估 OSAHC 涂布竹纤维纸的实际应用潜力, 本研究以商业低密度聚乙烯 (polyethylene, PE) 保鲜膜为参照, 考察了两种材料对樱桃冷藏保鲜 (7 d) 的效果, 结果如图 5 所示。



a) 第 7 天保鲜效果



b) 失重率

图 5 PE 膜与 OSAHC 涂布竹纤维纸对樱桃的保鲜效果
Fig. 5 Preservation effect of PE film and OSAHC-coated bamboo fiber paper on cherries

从图 5 可知, 由 OSAHC 涂布竹纤维纸包装的樱桃, 在关键鲜度指标上达到了与 PE 膜包装相近的保鲜效果。具体而言, 两种包装内樱桃的色泽变化无显著差异。同时, OSAHC 组樱桃的失重率小于 PE 组, 这直接验证了 OSAHC 涂层所赋予纸张的优异水蒸气阻隔性能, 可有效抑制果实水分蒸发, 维持其饱满度。色泽的稳定则表示, OSAHC 涂层所形成的适度气体屏障能够调控包装内部的 O_2/CO_2 浓度, 将樱桃的呼吸强度抑制在合理范围内, 并延缓由多酚氧化酶主导的褐变过程。综上所述, OSAHC 涂布竹纤维纸在樱桃保鲜方面展现出与传统 PE 膜相当的性能。同时, 由于竹纤维基材与半纤维素涂层的生物可降解性与可再生性, OSAHC 涂布竹纤维纸更具环境友好优势。这为开发以竹子为基础的高性能、可持续全竹基包装

材料, 提供了有力的技术与理论依据。

4 结论

本研究通过绿色提取毛竹的半纤维素并进行化学修饰制备了疏水阻隔涂层, 并用于提升竹纤维包装纸的综合性能, 以实现竹资源的高值化全组分利用。研究表明, 半纤维素衍生物涂层通过物理填充纤维孔隙, 并与纤维表面形成强界面氢键, 这不仅改善了纸张的力学强度, 更凭借其成膜性与疏水链段构建了高效的物理阻隔层, 从而赋予了竹纤维纸优异的水蒸气与氧气阻隔能力。樱桃保鲜实验结果表明, 涂布改性纸在关键保鲜指标上达到了与传统 PE 膜相当的效果。可见, OSAHC 在食品、果蔬保鲜包装等领域具有广阔的应用前景。本研究不仅是践行国家“双碳”战略和“以竹代塑”的有效探索, 而且为开发基于生物物质、可生物降解的高性能纸基包装材料提供了一条创新且可持续的技术路径。

参考文献:

- [1] 吴义强. 如何提升农林剩余物的碳汇潜力?[J]. 中国环保产业, 2024(9): 27.
- [2] 李晓燕, 张 文. 基于低碳经济的我国造纸业生态化转型模式研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(9): 150-153.
- [3] ZHANG S, WANG X T, XU J Y, et al. Green Manufacturing for Achieving Carbon Neutrality Goal Requires Innovative Technologies: A Bibliometric Analysis from 1991 to 2022[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 140: 255-269.
- [4] LI Z H, CHEN C J, MI R Y, et al. A Strong, Tough, and Scalable Structural Material from Fast-Growing Bamboo[J]. Advanced Materials, 2020, 32(10): e1906308.
- [5] 濮佳莉, 王 鑫, 庞树宇, 等. 竹林碳汇及竹材制品碳足迹研究现状[J]. 中国造纸, 2023, 42(8): 37-45.
- [6] 申贵仓, 郭占强, 刘君霞, 等. 中国“以竹代塑”主要政策及成效进展[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(5): 1-6, 11.
- [7] 刘美仙, 程 峥, 毛凯韵, 等. 以竹代塑产品在包装领域应用现状[J]. 包装工程, 2024, 45(11): 22-33.
- [8] 李敏文, 黄静旭, 李知函, 等. PLA/PBAT/竹粉可降解复合材料的制备及性能[J]. 包装学报, 2024, 16(6): 1-9.

- [9] 秋 荷. 建筑建材领域“以竹代塑”工程材料现状与发展趋势[J]. 中国人造板, 2024, 31(12): 41.
- [10] ZHU J W, REN W T, GUO F, et al. Structural Elucidation of Lignin, Hemicelluloses and LCC from both Bamboo Fibers and Parenchyma Cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274: 133341.
- [11] RAO J, LV Z W, CHEN G G, et al. Hemicellulose: Structure, Chemical Modification, and Application[J]. Progress in Polymer Science, 2023, 140: 101675.
- [12] SU Q Y, HE D, LUO J P, et al. A Cascaded Process to Upgrade Bleached Bamboo Pulp into Dissolving Pulp and Arabinoxylan[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 345: 122584.
- [13] DUAN C, TIAN C C, FENG X M, et al. Ultrafast Process of Microwave-Assisted Deep Eutectic Solvent to Improve Properties of Bamboo Dissolving Pulp[J]. Bioresource Technology, 2023, 370: 128543.
- [14] 徐 忠, 高 阳, 冯欣宁, 等. 玉米皮半纤维素/壳聚糖/甘油复合膜制备及性质研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 174-180.
- [15] 刘庚玫, 张 琛, 倪永浩, 等. 半纤维素基复合保鲜膜的制备及其性能研究[J]. 中国造纸, 2022, 41(6): 8-12.
- [16] SUTAY KOCABAŞ D, ERKOÇ AKÇELİK M, BAHÇEGÜL E, et al. Bulgur Bran as a Biopolymer Source: Production and Characterization of Nanocellulose-Reinforced Hemicellulose-Based Biodegradable Films with Decreased Water Solubility[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 171: 113847.
- [17] 徐 成, 江太君, 胡 灿. 过氧化二异丙苯对竹纤维增强聚烯烃复合材料机械与流变特性的影响[J]. 包装学报, 2022, 14(1): 48-52.
- [18] YANG J Y, YU Q F, LI M F. Freeze-Thaw Assisted Maleic Acid Pretreatment of Eucalyptus to Prepare Cellulose Nanocrystals and Degraded Lignin[J]. Bioresource Technology, 2023, 384: 129365.
- [19] ZENG F Y, WANG S S, LIANG J R, et al. High-Efficiency Separation of Hemicellulose from Bamboo by One-Step Freeze-Thaw-Assisted Alkali Treatment[J]. Bioresource Technology, 2022, 361: 127735.
- [20] ZHU H X, MA Q L, SHENG J, et al. Freeze-Thaw Repetition as an Auxiliary Method to Promote Efficient Separation of Hemicellulose from Poplar[J]. Green Chemistry, 2020, 22(3): 942-949.
- [21] 薛 伟. 半纤维素酯化改性及其超支化聚合物的应用研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [22] 冯万里, 曾新堂, 贾梓裕, 等. 大豆皮半纤维素的提取工艺优化及其酯化改性研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(10): 16-23.
- [23] SHEN F, LING H, GE W J, et al. Self-Assembly Behavior and Conformation of Amphiphilic Hemicellulose-Graft-Fatty Acid Micelles[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 261: 117886.
- [24] HUANG H B, LI Z H, MA Y, et al. High-Performance Arabinoglucuronoxylan-Based Biosurfactants for Oily Sludge Separation[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 303: 120461.
- [25] HUANG H B, LI Z H, QING Y, et al. Amphiphilic Hemicellulose Based-Biosurfactants for the Efficient Hydrocarbons Separation from Oily Sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 140106.
- [26] TODOROVA D, YAVOROV N, LASHEVA V. Improvement of Barrier Properties for Packaging Applications[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2022, 27: 100685.
- [27] HUANG H B, MAO L, WANG W, et al. A Facile Strategy to Fabricate Antibacterial Hydrophobic, High-Barrier, Cellulose Papersheets for Food Packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123630.
- [28] LI Z H, CHEN C J, XIE H, et al. Sustainable High-Strength Macrofibres Extracted from Natural Bamboo[J]. Nature Sustainability, 2022, 5(3): 235-244.
- [29] MAKAROV D E. Barrier Crossing Dynamics from Single-Molecule Measurements[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2021, 125(10): 2467-2476.
- [30] VALENTINI P, GROVER M S, BISEK N J. Molecular Diffusion of Mass and Energy Predicted by Ab Initio Potential Energy Surfaces for Air Components at High Temperatures[J]. Physical Review Fluids, 2024, 9(1): 013401.

(责任编辑: 邓 彬)

Preparation and Performance of Fully Bamboo-Based Biodegradable Packaging Material

LI Zhihan^{1,2}, CHEN Cheng², ZHU Qi¹

(1. Guangdong Caile Packaging Technology Co., Ltd., Zhongshan Guangdong 528462, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: To enhance the barrier properties and hydrophobicity of bamboo fiber packaging materials, hemicellulose was green-extracted from moso bamboo using a freeze-thaw hydrothermal method, and subsequently amphiphilic hemicellulose derivatives (OSAHC) were prepared by esterification modification of hemicellulose with octenyl succinic anhydride and applied to the surface coating of bamboo fiber paper. Bamboo fiber modified packaging paper materials with good barrier and water resistance properties were prepared. Systematic investigations of the microstructure, mechanical performance, and barrier properties of the coated papers revealed that the amphiphilic hemicellulose derivatives effectively filled the paper pores, formed strong hydrogen bonding with the fibers, and created a dense hydrophobic surface layer. At a coating dosage of 6%, the tensile strength of the modified paper increased to 20.6 N·m/g; at a coating dosage of 10%, the water vapor transmission rate and oxygen transmission rate were significantly reduced to 114 g/(m²·d) and 472 g/(m²·d), respectively. The post-harvest preservation experiment of cherries demonstrated that the coated paper achieved a preservation effect comparable to that of commercial polyethylene films. This work provides an effective pathway for the high-value utilization of bamboo and the development of high-performance bamboo-based packaging materials to replace plastics.

Keywords: bamboo fiber; hemicellulose; packaging material; barrier property

.....
(上接第 22 页)

Research Progress of Intelligent Indicator Label in Fresh Food Packaging

DING Qian^{1,2}, WANG Liheng¹

(1. School of Packaging Design of Art, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Philosophy and Social Sciences “Intelligent Evaluation Laboratory of Excessive Packaging Design Management”, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: As an important part of intelligent packaging system, intelligent indicator labels can monitor, sense and record the physical, chemical and biological changes of fresh food during the circulation process in real time, and has become one of the important means to ensure food safety and reduce food loss. Intelligent indicator labels can not only directly monitor the metabolites of fresh food (such as carbon dioxide, ethylene, etc.), but also indirectly reflect the freshness and safety of fresh food from the external environmental status (such as oxygen, temperature, etc.). Among them, the direct factor intelligent indicator labels are mainly categorized into freshness-indicating and ripeness-indicating types, while the indirect factor intelligent indicator labels are mainly categorized into temperature-indicating and leakage-indicating types. On this basis, by combining with information technology such as radio frequency identification (RFID), intelligent indicator labels can also realize remote transmission and visualization of quality information of fresh food, which is conducive to the full-chain supervision of food safety in China.

Keywords: intelligent packaging technology; indicator label; fresh food; information technology; food safety