

冷链物流用木基纤维保温包装材料的制备及性能的研究

王攀登, 余广荣, 蒋晨光, 郭佳琪, 刘子畅, 寇金宝, 石岩
(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 制备木基纤维保温包装材料, 并提高它的保温性能。**方法** 以轻质天然木材为原料, 通过化学脱木素制备木材纳米纤维多孔材料, 再对木材纳米纤维多孔材料表面闭孔处理, 制备出木基纤维保温材料。**结果** 基于瞬态平面热源法, 当纤维同向平行放置时, 木基纤维保温材料的导热系数为 $0.019 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 当纤维异向交叉放置时, 木基纤维保温材料的导热系数为 $0.023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 表明开发的这种材料有较好的保温性能。此外根据该种保温材料的缓冲系数-最大应力曲线可知, 当最大静应力 $\sigma_m=0.63 \text{ MPa}$ 时, 沿纤维同向平行叠放时, 木基纤维保温材料的最小缓冲系数 $C=3.5$; 沿纤维异向交叉叠放时, 木基纤维保温材料的最小缓冲系数 $C=4.2$, 可见保温材料的缓冲性能均与发泡聚苯乙烯 (EPS)、发泡聚乙烯 (EPE) 的缓冲性能相近。**结论** 制备的轻质木基纤维保温材料兼具较好的保温和缓冲性能, 有望用于冷链物流代替塑料保温材料。**关键词:** 木材纤维; 多孔材料; 保温材料; 缓冲性能; 包装材料
中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)05-0018-06
DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.003

Preparation and Properties of Wood-based Fiber Thermal Insulation Packaging Material for Cold Chain Logistics

WANG Pan-deng, YU Guang-rong, JIANG Chen-guang, GUO Jia-qi,
LIU Zi-chang, KOU Jin-bao, SHI Yan

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare wood-based fiber thermal insulation packaging material and improve its thermal insulation property. Wood nanofiber porous material was made from natural lightweight wood by chemical delignification and then subject to surface close hole processing to obtain wood-based fiber thermal insulation packaging material. Based on transient plane source method, the thermal conductivity of wood-based fiber thermal insulation material was $0.019 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ when fibers were placed in parallel along the same direction, and was $0.023 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ when fibers were placed crosswise along the opposite direction, indicating that the developed material had good thermal insulation property. In addition, according to the buffer coefficient visa maximum stress curve of this thermal insulation material, under the maximum static stress (σ_m) of 0.63 MPa , the wood-based fiber thermal insulation material had the minimum buffer coefficient ($C=3.5$) when stacked in parallel along the same direction of fibers, and had the minimum buffer coefficient ($C=4.2$) when stacked crosswise along the opposite direction of fibers, indicating that its cushioning property was similar to that of EPS and EPE. The lightweight wood-based fiber thermal insulation material prepared has good thermal insulation and cushioning property, which can be used as a substitute of plastic thermal insulation packaging material for cold chain logistics.

KEY WORDS: wood fiber; porous material; thermal insulation material; cushioning property; packaging material

收稿日期: 2022-12-29

基金项目: 国家重点研发计划政府间重点专项项目 (2022YFE0125100); 天津市大学生创新创业训练计划项目 (202110069126)

作者简介: 王攀登 (1998—), 男, 硕士生, 主攻生物质基功能材料。

通信作者: 石岩 (1975—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为生物质资源的高值化利用。

根据中物联冷链委和中商产业研究院的数据, 2021 年我国食品冷链物流的需求量达到 3.01 亿 t, 未来仍然会保持高速增长^[1]。随着冷链物流的快速发展, 我国每年约产生几亿个泡沫箱及 10 多亿个冰点等冷链耗材, 这些材料的生产原料多来源于石油等不可再生资源, 且使用后大部分成为生活垃圾被直接丢弃处理, 回收利用的不到 10%, 给环境带来严重的负担^[2-3]。随着国家和民众对环保的重视, 冷链包装必须走上绿色化之路。根据绿色包装标准化、减量化、重复使用和循环再生的原则, 以瓦楞纸箱、可降解材料、复合保温纸箱^[4]及循环共享聚丙烯发泡材料制成的保温箱代替一次性塑料泡沫箱将成为未来新型的冷链包装形式。目前, 在冷链运输中已投入使用的复合保温纸箱有以波纹牛皮纸作为内衬的保温包装和全淀粉基发泡缓冲材料作为内衬的保温包装。波纹牛皮纸是牛皮纸经过专用设备压制成的波纹状纸垫, 能够更好地降低热传导, 减少对流和辐射造成的热量损耗。除了保温作用, 牛皮纸垫还具备防震减震的作用, 能够确保在长途运输过程中产品的完整性, 减少颠簸、挤压、碰撞造成的产品损坏^[5], 然而牛皮纸吸潮后缓冲性能下降。广州绿发材料研发的淀粉基发泡缓冲材料已经广泛用于工业品缓冲包装、生鲜制品的包装与保鲜等领域。与传统泡沫箱、珍珠棉等产品相比, 淀粉基发泡缓冲材料可为物流缓冲包装及相关制品提供良好的缓冲保护, 且可降解, 造型设计可以通过模具设计灵活改变。淀粉材料对外界的温湿度变化较为敏感, 需对其进行处理以适应不同领域的包装^[6-8]。

在绿色环保的趋势下, 针对冷链物流包装难降解、难回收等问题, 急需研究替代塑料的冷链物流用生物基保温包装材料, 该新型包装材料应具有良好的保温隔热性能, 还要具备良好的缓冲防护性能, 从而能维持运输过程的低温状态, 确保产品的品质, 减少产品的磕碰损坏; 此外还要质轻, 防水防结露, 最好也能在冷链物流包装中循环使用。考虑到木材纤维多孔材料具有相对密度低、比强度高、比表面积大、隔音、隔热、透气性好等优点^[9-10], 实验室以质轻、木质素含量较低的巴尔沙木为原料, 通过原木的化学脱木素和脱木素木材纤维多孔材料的表面闭孔处理制备兼具保温性能和缓冲性能的木基纤维保温包装材料^[11], 该种保温材料作为内衬可与瓦楞纸箱一起用于代塑保温包装材料。

1 试验

1.1 试验材料与设备

主要材料: 巴尔沙木原木, 上海态迪玩具有限公司; 亚氯酸钠 (纯度为 80%), 上海麦克林生化科技有限公司; 氢氧化钠 (分析纯), 天津市化学试剂供销公司; 冰醋酸 (分析纯), 天津渤化化学试剂有限公司。

主要仪器: HH-S 油浴锅, 江苏科析仪器有限公司; ATS.V360 冻干机, 科仪创智 (北京) 科技发展有限公司; AGS-X 100 kN 万能试验机, 日本 SHIMADZU; 2500S 导热系数仪, 瑞典 Hot Disk; Phenom XL 扫描电镜, 荷兰 Phenom-World; Autosorb iQ 全自动气体吸附分析仪, 美国康塔; JC2000D2 型接触角测量仪, 上海中晨数字技术设备有限公司。

1.2 方法

1.2.1 脱木素木材的制备

1) 将天然弦切巴尔沙原木切至 50 mm×50 mm×10 mm 长方体薄木块 (如图 1), 配制 200 mL 质量分数为 2% 的 NaClO₂ 溶液, 固液比 (g/mL) 为 1:100, 滴加冰乙酸调其 pH 至 4.6, 将巴尔沙木块在溶液中浸泡 48 h, 使溶剂充分浸润巴尔沙原木后再在恒温油浴锅中 80 °C 下蒸煮 6 h, 以除去天然原木中的木质素大分子, 同时, 酸性亚氯酸钠释放 ClO₂ 气体对木材进行漂白。

2) 将步骤 1 蒸煮后获得的木材从溶液中捞出, 用去离子水冲洗表面残留溶剂, 再将其在质量分数为 8% 的 NaOH 溶液中以 80 °C 继续蒸煮 8 h, 进一步脱除半纤维素和木质素小分子, 最后用去离子水洗去脱木素木材内残留溶剂。

3) 将洗净的脱木素木材在 -20 °C 下冷冻 24 h, 再转移至冻干机中, 根据样品尺寸, 在 -40 °C 下干燥 24 h 以上, 使样品中水分完全升华, 以脱木素木材孔隙中冻结的冰晶为模板, 脱木素木材得以保留层状多孔结构。

1.2.2 多孔木材纤维材料的表面闭孔处理

将厚度为 0.1 mm、密度为 0.98 g/cm³ 的乙烯-醋酸乙酯共聚物 (EVA) 膜加热熔融后涂覆在脱木素木材表面, 涂覆后的材料兼具防水性, 可有效解决结露现象所导致材料吸水变性, 涂覆过程也可实现不同形状的材料黏结组合。涂覆使脱木素木材表面闭孔, 从而阻隔木材内部空气与外界的热量交换, 有效减少热传递。

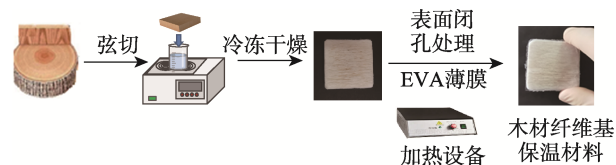


图 1 木材纤维基保温材料的制备工艺过程

Fig.1 Preparation process of wood fiber based thermal insulation material

1.3 表征

1.3.1 巴尔沙木材的组分含量测试

将购置的天然巴尔沙木板用电动锯锯切, 收集锯

切时产生的粉末,再用 BF-08 型号的小型高速粉碎机粉碎后一起过筛,回收 40~60 目的木粉,装在密闭玻璃样品瓶中保存备用,基于 Klason 法测量木质素百分含量,基于聚戊糖法测量半纤维的含量^[12]。

1.3.2 脱木素木材孔隙特征测定

1.3.2.1 微观形貌表征

采用台式扫描电镜观察冷冻干燥后的脱木素木材断面和表面的微观形貌,加速电压为 15 kV。将样品采用液氮冷冻脆断,用导电胶将样品粘在样品台上,并喷金减少电荷聚集。

1.3.2.2 孔隙率测试

比表面积 (Brunauer-Emmett-Teller, BET) N_2 吸附脱附试验使用 Autosorb iQ 全自动气体吸附分析仪进行测试,以获得木材模板的孔径分布。样品在 150 °C 下脱气 5 h,然后在 -196 °C 下通过 N_2 物理吸附进行分析,在 0.1~0.3 的相对压力下收集数据。

1.3.3 木基纤维保温材料的密度测定

按照称量和体积来计算多个木基纤维保温材料的密度,取平均值。

1.3.4 导热系数测试

采用导热系数仪以瞬态平面热源法,根据 GB/T 4857.2—2005 将制得的样品于恒温恒湿箱 (温度 23 °C、相对湿度 50%) 下放置处理 48 h 后,测定木基纤维保温材料的导热系数。将仪器平面热源夹片置于 2 块相同材料的木块上,调整高度使夹片平整并加紧,分别测定纤维同向放置和纤维异向垂直的木基纤维保温材料的导热系数 (如图 2),每个试样测试重复 3 次,取平均值,测量时间为 20 s,加热功率为 800 mW。

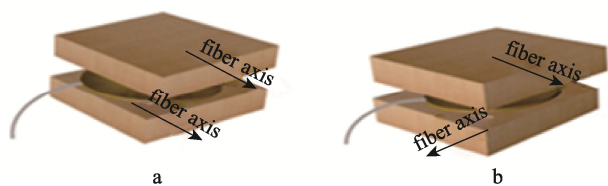


图 2 不同纤维方向的导热系数测量
Fig.2 Diagram for measurement of thermal conductivity in different fiber directions

1.3.5 静态压缩试验

采用万能试验机进行木基纤维保温材料静态压缩性能的测试,将样品裁切成 50 mm×50 mm×10 mm,根据 GB/T 4857.2—2005 《运输包装件基本实验第 2 部分:温湿度调节条件》,将待测试的样品在恒温恒湿箱 (温度 23 °C、相对湿度 50%) 下放置处理 48 h 后,将 2 块保温材料分别按照纤维同向、纤维异向垂直上下堆叠放置进行压缩测试,试样总高度为 20 mm,测试速度为 10 mm/min。

通过对材料进行静态压缩试验,可以获得缓冲材

料的应力-应变 (σ - ε) 曲线,由此计算出不同应力水平情况下的单位体积变形能、缓冲系数 C ,从而得到缓冲系数-最大应力曲线,即 C - σ_m 曲线^[13]。在包装动力学中缓冲系数 C 定义见式 (1)。

$$C = \frac{\sigma}{u} \quad (1)$$

式中: C 为材料的缓冲系数; σ 为材料受到的压缩应力; u 为材料曲线 σ - ε 下的积分面积,是缓冲垫变形时单位体积吸收的能量,即应变能,其计算见式 (2); ε 为材料发生的压变。

$$u = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

1.3.6 防水性能测试

选取极性溶剂水来测定脱木素木材、木基纤维保温材料、发泡聚苯乙烯 (EPS) 和发泡聚乙烯 (EPE) 样品的液滴接触角。接触角大于 90° 的材料具有防水性。利用接触角测量仪连续拍摄液滴自落下起每间隔 1 s 的照片来动态记录 20 s 内液滴接触角的变化,分析研究其表面亲疏水性。每组样品做 6 个平行样,取其平均值即为样品的接触角。

1.3.7 阻燃性能测试

根据 GB/T 2048—2008 对木基纤维保温材料、EPS、EPE 进行垂直燃烧等级测定。样品垂直夹在夹具上,在底端分别施加 2 次火焰,持续时间均为 10 s,记录试样自熄时间,然后按照测试标准对试样进行垂直燃烧等级评定。将木基纤维保温材料、EPE、EPS 分别裁剪成 20 根尺寸为 125 mm×13 mm×1.5 mm 的长条状样品,每种样品分为 4 组,每组 5 根试样,棉花垫裁剪为 50 mm×50 mm×6 mm,在干燥器内干燥 24 h,并在取出 30 min 内使用^[14]。

2 结果与分析

2.1 巴尔沙木材的原料组分分析

由表 1 可知,巴尔沙木的木质素质量分数约为 21.2%,半纤维素质量分数为 23.1%。若木材中的木质素和半纤维素完全被脱除后,巴尔沙木的质量损失率将超过 44.3%。作为质轻的阔叶木,巴尔沙木有比较低的木质素含量,表明巴尔沙木是制备木材多孔纤维材料的极佳选择。

表 1 巴尔沙木材的木质素和半纤维质量分数
Tab.1 Lignin content and hemicelluloses content in balsa wood

酸溶木素 质量分数/%	酸不溶木素 质量分数/%	木质素 质量分数/%	半纤维素 质量分数/%
2.1±0.2	19.1±0.4	21.2±0.4	23.1±0.5

2.2 脱木素木材的孔隙率及微观结构

在 300 倍和 360 倍的放大倍数下分别观察脱木素

木材的表面和断面, 见图 3。可见脱木素处理后原木的表面纤维具有较好的取向(图 3c), 且大的纤维素表面有更细的纤维剥离。脱木素处理后原木断面的孔隙均匀(图 3b), 因为内部木质素和半纤维素的脱除形成层状结构(图 3d), 类似瓦楞纸板的瓦楞结构, 所以该种材料应该具有比原木更好的缓冲性, 且每层具有大量较均匀的蜂窝结构的微米级别孔隙。

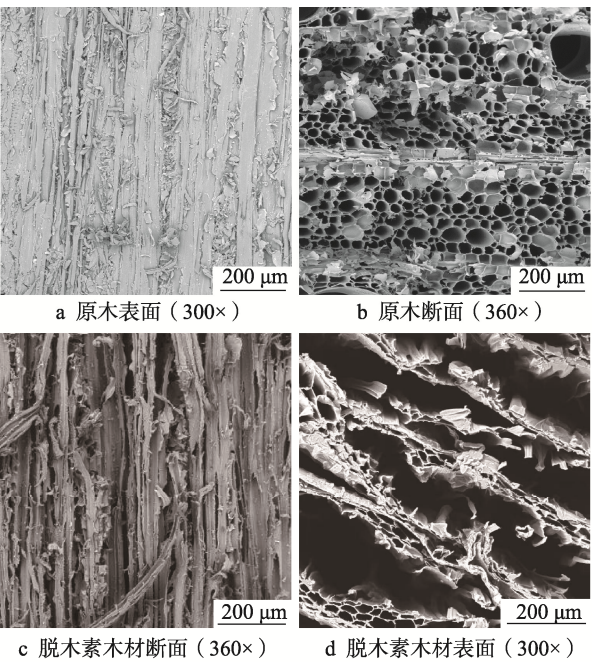


图 3 脱木素前后的木材孔隙特征
Fig.3 Pore characteristics of delignified wood

通过氮气 (N_2) 的物理吸附脱附试验和 BET 模型来估算孔径分布。如图 4 所示, 脱木素后的木材获得的最大比表面积 (SSA) 值为 $13.275\text{ m}^2/\text{g}$, 平均孔径为 8.572 86 nm , 总孔容为 $2.845\times10^{-2}\text{ cm}^3/\text{g}$ 。在扫描电镜断面上未见到纳米级孔, 氮吸附试验表明材料内部还存在纳米级的孔隙。

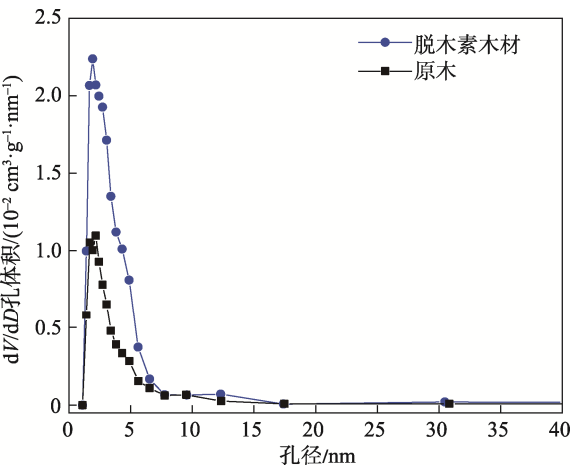


图 4 脱木素前后的木材孔隙分布
Fig.4 Pore distribution of wood before and after delignification

2.3 木基纤维保温材料的平均密度

体积为 25 cm^3 、平均质量为 3.349 3 g 的木基纤维保温材料的平均密度为 $0.073\text{ g}/\text{cm}^3$, 而 EPS 的平均密度为 $0.01\sim0.045\text{ g}/\text{cm}^3$, 发泡聚氨酯 (EPU) 的平均密度为 $0.035\sim0.04\text{ g}/\text{cm}^3$, EPP 的平均密度为 $0.03\text{ g}/\text{cm}^3$, 可见制备的木基纤维保温材料的平均密度与 3 种不同发泡塑料类保温材料 (EPS、EPU、EPP) 的密度相近。

2.4 木基纤维保温材料导热系数的测定

保温材料一般是指导热系数 $\leq 0.12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的材料^[15], 从表 2 可见, 不管纤维同向平行放置, 还是纤维异向交叉放置制得的轻质木基纤维保温材料的导热系数都比 EPS [$0.041\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]、EPU [$0.024\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 和 EPE [$0.0329\sim0.036\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 的导热系数小, 有的接近空气导热系数 [$0.01\sim0.04\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 的最低值。

表 2 制备的生物质基保温材料与常用保温材料的热性能对比

Tab.2 Comparison of thermal properties between prepared biomass based thermal insulation materials and common thermal insulation materials				
保温材料	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热扩散率/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	比热容/ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	探测深度/mm
纤维同向平行放置	0.019	0.020 28	0.929 6	1.26
纤维异向垂直放置	0.023	0.036 44	0.653 1	1.69
空气	0.01~0.04			
EPS	0.041			
EPU	0.024			
EPE	0.032 9~0.036			

2.5 木基纤维保温材料的缓冲性能测试

图 5a 显示木基纤维保温材料在最大应力下的最大应变都达到 90%, 当纤维异向交错 90° 堆叠放置时其最大应力达到 4 MPa , 且随着应变的增加, 纤维异向交错 90° 堆叠放置比纤维同向堆叠放置时所能承受的最大应力大, 这是因为纤维异向交错放置, 受邻层异向纤维的相互牵制, 弥补纤维同向带来的表面缺陷, 增加木基纤维保温材料表面的载荷承载能力, 因而其表现出较好的缓冲性。

图 5b 显示了不同纤维放置方向木基纤维保温材料的缓冲系数, 对于纤维同向放置的木基保温材料, 当 $\sigma_m=0.63\text{ MPa}$ 时, 材料的最小缓冲系数 $C=3.5$ 。对于纤维异向放置的木基保温材料, 当 $\sigma_m=0.13\text{ MPa}$ 时, 材料的最小缓冲系数 $C=4.2$ 。根据包装动力学书上常见缓冲材料的 $C-\sigma_m$ 曲线可得^[16], 当 σ_m 约为 0.5 MPa 时, 同向放置的木基纤维材料的缓冲系数与发泡聚乙

烯泡沫 (EPE)、发泡聚氯乙烯泡沫 (PVC) 和发泡聚苯乙烯 (EPS) 泡沫的近似, 约为 3.5。表明脱木素后的木基纤维材料具有较好的缓冲性能, 验证了 2.2 节中基于微观形貌材料性能的推测。

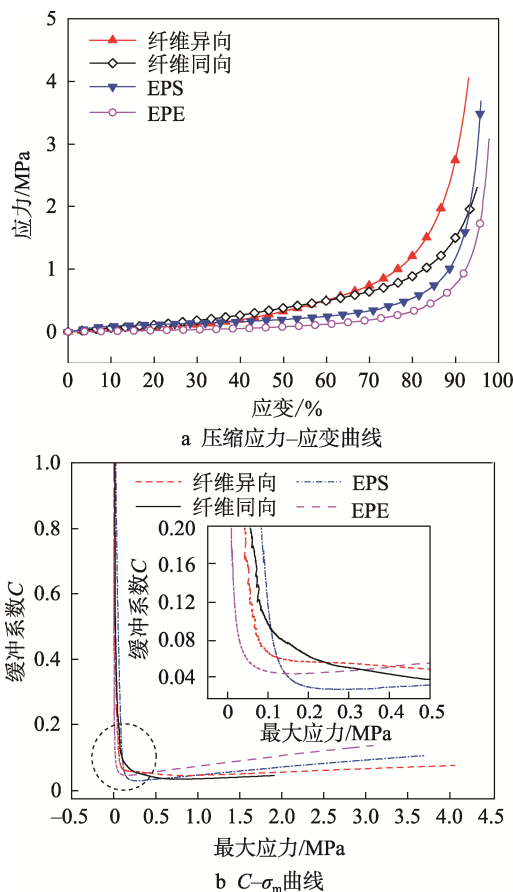


图5 不同保温材料的静压性能
Fig.5 Static compression properties of different thermal insulation materials

2.6 木基纤维保温材料的防水性能测试

如图6所示, 经量角法测得的脱木素木材、木基纤维保温材料、EPS和EPE的接触角分别为 62.33° 、 90.57° 、 87.13° 和 86.37° , 可见本试验制备的木基纤维保温材料的防水性优于EPS和EPE的防水性。

2.7 木基纤维保温材料的阻燃性能测试

如图7所示, 木基纤维保温材料一次点燃离火自熄, 燃烧过程中没有黑烟产生并且有熔滴滴落, 滴落物未引燃棉花垫, 二次点燃12s后燃烧至夹具, 总余焰时间约56s(在50s到250s之间), 阻燃级别达到V1级。EPE试样一次点燃离火自熄, 二次点燃7s后燃烧至夹具, 燃烧过程中有少许黑烟产生并且有熔滴滴落, 滴落物小面积引燃棉花垫, 阻燃级别达到V2级。EPS试样在燃烧时一次点燃持续燃烧, 燃烧过程中有黑烟产生并且有熔滴滴落, 滴落物大面积引燃棉花垫, 阻燃级别达到V2级。

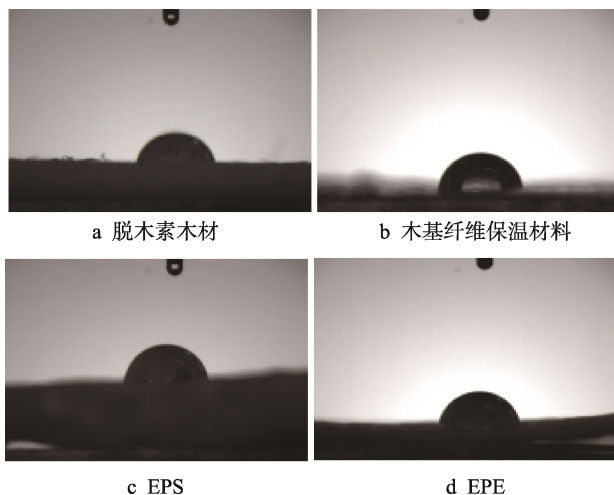


图6 不同材料的接触角
Fig.6 Contact angle of different materials

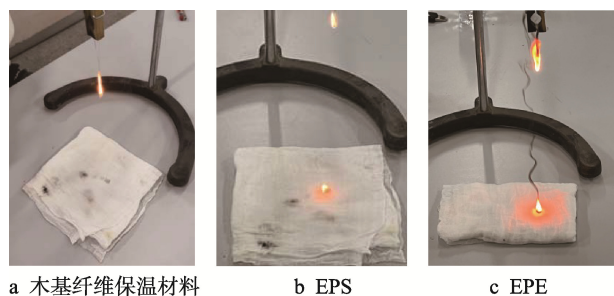


图7 不同保温材料的阻燃性能
Fig.7 Flame retardancy of different thermal insulation materials

3 结语

文中木基纤维保温材料质轻(密度为 0.073 g/cm^3), 不管纤维同向平行放置, 还是异向交叉放置制得的轻质木基保温材料的导热系数都比EPS、EPU和EPE的导热系数小, 有的接近空气导热系数的最低值。当 σ_m 在0.5 MPa左右时, 最终的木基纤维保温材料的缓冲系数C与聚乙烯泡沫、聚氯乙烯泡沫、聚苯乙烯泡沫的近似。与EPS和EPE相比, 文中这种保温材料达到了V1级阻燃且兼具防水性, 因结露现象所导致的材料吸水变性也不那么明显, 具有显著的优势, 有望用于冷链物流代替塑料保温包装材料。

参考文献:

- [1] 秦玉鸣.《中国冷链物流发展报告》[R]. 北京: 中国财富出版社, 2022: 25-26.
QIN Yu-ming. China Cold Chain Logistics Development Report[R]. Beijing: China Logistics Supplypublishing House, 2002: 25-26.

- [2] 周万里, 薛亮. 冷链物流绿色包装研究与设计[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(9): 54-56.
ZHOU Wan-li, XUE Liang. Research and Design of Green Packaging for Cold Chain Logistics[J]. Logistics Engineering and Management, 2021, 43(9): 54-56.
- [3] 吴文杰. 新零售业态下生鲜冷链包装材料对环境污染影响研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(12): 35-40.
WU Wen-jie. Research on Impact of Fresh and Cold Chain Packaging Materials on Environmental Pollution under New Retail Era[J]. Environmental Science and Management, 2020, 45(12): 35-40.
- [4] NAVARANJAN N, FLETCHER GC, SUMMERS G, et al. Thermal Insulation Requirements and New Card-board Packaging for Chilled Seafood Exports[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119: 395-403.
- [5] 佚名. Ranpak 将在美国康涅狄格州建设新的技术研发创新中心[J]. 中华纸业, 2021, 42(22): 21.
Anon. Ranpak will Build a New Technology R&D and Innovation Center in Connecticut, USA[J]. China Pulp & Paper Industry, 2021, 42(22): 21.
- [6] 郑进宝, 李琛. 淀粉基发泡材料制备及性能优化研究进展[J]. 精细化工, 2022, 39(8): 1513-1524
ZHENG Jin-bao, LI Chen. Research Progress in Preparation and Performance Optimization of Starch-Based Foaming Materials[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(8): 1513-1524.
- [7] 杨健根, 单志华, 陈慧, 等. 环境友好生物质泡沫包装材料现状[J]. 皮革科学与工程, 2018, 28(3): 37-40.
YANG Jian-gen, SHAN Zhi-hua, CHEN Hui, et al. Status of Environmentally Friendly Biomass Packaging Materials[J]. Leather Science and Engineering, 2018, 28(3): 37-40.
- [8] 林向阳. 淀粉基发泡材料的力学、防潮性能后加工改进及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 1-9.
LIN Xiang-yang. Post-Processing Improvement and Application of Mechanical and Moisture-Proof Properties of Starch-Based Foaming Materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 1-9.
- [9] 杨亚政, 杨嘉陵, 曾涛, 等. 轻质多孔材料研究进展[J]. 力学季刊, 2007, 28(4): 503-516.
YANG Ya-zheng, YANG Jia-ling, ZENG Tao, et al. Progress in Research Work of Light Materials[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, 28(4): 503-516.
- [10] DAVIS M E. Ordered Porous Materials for Emerging Applications[J]. Nature, 2002, 417(6891): 813-821.
- [11] 孔维炜. 木材纤维基保温包装材料的制备与性能表征[D]. 天津: 天津商业大学, 2022: 1-5.
KONG Wei-wei. Preparation and Characterization of Wood Fiber-Based Thermal Insulation Packaging Materials[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022: 1-5.
- [12] 石淑兰, 何福望. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2012.
SHI Shu-lan, HE Fu-wang. Analysis and Detection of Pulp and Papermaking[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2012.
- [13] 计宏伟. 包装工程实验教程[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 122-125.
JI Hong-wei. Experimental Course of Packaging Engineering[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012: 122-125.
- [14] JIANG Shuai, ZHANG M, LI M, et al. Cellulose-Based Composite Thermal-Insulating Foams to-Ward Eco-Friendly[J]. Flexible and Flame-Retardant. Carbohydrate Polymer, 2021, 273: 118544.
- [15] 江威, 刘倩, 曲军辉. 保温材料自然气候模拟条件下导热系数的研究[J]. 绿色环保建材, 2020(9): 1-2.
JIANG Wei, LIU Qian, QU Jun-hui. Study on Thermal Conductivity of Thermal Insulation Materials under Natural Climate Simulation[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2020(9): 1-2.
- [16] 高德, 计宏伟. 包装动力学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 138.
GAO De, JI Hong-wei. Packaging Dynamics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010: 138.

责任编辑: 曾钰婵