

MOF 功能化自清洁聚乳酸多级孔纤维膜的辐射冷却性能

张雨^{1,3}, 吴洋², 李佳琪¹, 徐超², 汪少振¹,
李欣雨¹, 王存民¹, 张生辉², 徐欢²

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 2. 材料与物理学院, 徐州 221116;
3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

摘要 利用微波辅助法精准控制锆基金属有机框架(UiO-66)的尺寸和形貌, 制备了具有高散射效率的 UiO-66 纳米晶; 以其作为高红外辐射功能材料, 结合静电纺丝-电喷雾技术和相分离策略, 进一步构建了 UiO-66 功能化的聚乳酸(PLA)多级孔纤维膜(PLA/UiO-66). 得益于微-纳米结构多级孔和 UiO-66 引入的丰富红外活性基团, PLA/UiO-66 多级孔纤维膜展现出良好的太阳反射率和红外发射率, 当 UiO-66 的添加量(质量分数)为 12% 时, 所制备的 PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜的光学性能更加突出, 其平均太阳反射率和平均红外发射率分别高达 93.9% 和 91.2%, 远高于 Pure PLA 纤维膜. 在户外测试中, PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜的降温幅度明显优于 Pure PLA 纤维膜, PLA/UiO-66-12 纤维膜的平均温度维持在 47.6 °C, 而 Pure PLA 纤维膜的平均温度则高于 50 °C. 由于 UiO-66 的引入有效降低了表面能, 使 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜具有较大的水接触角(128.8°), 确保其具有优异的疏水性和自清洁能力, 为研制高效、可持续的热管理纺织品提供了新策略.

关键词 聚乳酸; 辐射冷却; 多孔纤维膜; 金属有机框架材料; 自清洁性能

中图分类号 O631 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20250239

Efficient Radiative Cooling Performance of MOF-functionalized Self-cleaning Polylactic Acid Fiber Membranes with Multi-scale Pores

ZHANG Yu^{1,3}, WU Yang², LI Jiaqi¹, XU Chao², WANG Shaozhen¹,

LI Xinyu¹, WANG Cunmin¹, ZHANG Shenghui^{2*}, XU Huan²

(1. School of Safety Engineering, 2. School of Material Science and Physics,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100012, China)

Abstract By using the microwave-assisted method, the size and morphology of zirconium-based metal-organic frameworks (UiO-66) were precisely controlled to prepare UiO-66 nanocrystals with high scattering efficiency. Employing the UiO-66 nanocrystals as high-infrared-emissivity functional materials, a UiO-66-functionalized polylactic acid (PLA) (PLA/UiO-66) multi-scale porous fiber membrane was further constructed *via* electrospinning-spraying technology combined with a phase separation strategy. Benefiting from the micro-nano porous design and the introduction of abundant infrared-active groups from UiO-66, the PLA/UiO-66 multi-scale porous fiber membrane

收稿日期: 2025-08-31. 网络首发日期: 2026-01-16.

联系人简介: 张生辉, 男, 博士, 副教授, 主要从事纳米及复合材料方面的研究. E-mail: zhangshenghui@cumt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52404266)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20241645)、中国博士后自然科学基金(2024M753532)及江苏省卓越博士后计划项目(批准号: 2024ZB449)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.52404266), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (No.BK20241645), the China Postdoctoral Science Foundation(No.2024M753532) and the Jiangsu Funding Program for Excellent Postdoctoral Talent, China(No.2024ZB449).

exhibited excellent solar reflectivity and infrared emissivity. Particularly when the UiO-66 addition amount was 12% (mass fraction), the optical performance of the resulting PLA/UiO-66-12 multi-scale porous fiber membrane was even more outstanding, achieving an average solar reflectivity of 93.9% and an average infrared emissivity of 91.2%, far exceeding those of the pure PLA fiber membrane. In outdoor tests, the cooling effect of the PLA/UiO-66-12 multi-scale porous fiber membrane was significantly superior to that of the pure PLA fiber membrane. The average temperature of PLA/UiO-66-12 multi-scale porous fiber membrane remained at 47.6 °C, whereas that of the pure PLA fiber membrane was above 50 °C. While demonstrating excellent cooling performance, the incorporation of UiO-66 effectively reduced the surface energy, endowing the PLA/UiO-66 multi-scale porous fiber membrane with a high water contact angle (128.8°). This ensures the membrane possesses outstanding hydrophobicity and self-cleaning capability, thereby providing a new strategy for developing efficient and sustainable thermal management textiles.

Keywords Poly (lactic acid); Radiative cooling; Porous fiber membrane; Metal-organic framework material; Self-cleaning property

随着科技的高速发展和全球人口数量的激增,人类对自然资源的消耗和温室气体排放日益加剧^[1].同时,绿色植被的减少和臭氧层的破坏进一步加剧了全球气候变暖,导致全球平均气温逐年攀升.高温天气不仅会加剧中暑、热衰竭及热痉挛等热相关疾病的发生风险,还会导致极端气候事件频发,严重破坏基础设施与社会秩序^[2,3].在这一背景下,冷却技术愈发成为保障人体热舒适、维护公众健康以及支撑关键设施与社区稳定运转的关键手段^[4].然而,传统冷却技术主要依赖电动压缩机,存在高能耗的局限,不仅加剧了温室效应,也进一步激化了能源危机^[5].同时,因其便携性不足,难以适应户外工作者的冷却需求.被动日间辐射冷却(PDRC)作为一种零能耗、环境友好、便携且可持续的冷却技术,能够通过材料表面对外太空直接辐射热量,无需额外能量输入^[6].凭借这些优势,PDRC技术已在建筑节能^[7]、光伏冷却^[8]和集水系统^[9]等领域获得广泛应用,展现出其在可持续热管理解决方案方面的潜力与多样化价值.由于人体热容量较低,而辐射冷却器又具备良好的便携特性,该类装置能够实现高效持续的个人热管理(PTM)^[10].

服装作为人体的“第二道皮肤”,不仅承担着遮蔽与装饰的功能,还可有效抵御外界温湿度变化^[11].然而,传统服装采用的棉织物尽管具有吸湿透气的优点,却也存在明显的热光学局限性,其较低的太阳反射率导致容易吸收大量太阳辐射能并迅速转化为热量,致使衣物表面温度升高,进而影响人体的热平衡,在高温或强辐射环境中加剧热不适感^[12].为解决这一问题,冷却织物的研究备受关注^[13,14].通过将纺织品与PDRC技术结合起来促进个人热管理,可有效缓解热应激反应,维持人体处于热舒适状态,从而为公众健康与安全提供更加可靠的保障^[15].聚乳酸(PLA)作为一种环境友好的高分子材料,具有优异的生物相容性和可完全生物降解的特性^[16,17].同时,其还展现出良好的加工普遍性,能够通过多种加工方法进行制备,在服装纺织品制备领域具有广阔前景^[18].然而,聚乳酸固有的光学特性限制了其在辐射冷却领域的应用:一方面,其分子链中的化学键在大气透明窗口波段(8~13 μm)的振动吸收较弱,导致本征红外发射率较低,难以实现高效的热辐射散失^[19];另一方面,其电子结构使其在可见光区域存在一定程度的吸收,降低了太阳光反射能力,从而削弱了日间冷却效果^[20].因此,通过多功能改性或复合结构设计,开发具有高太阳反射率与高红外发射率的高效辐射冷却聚乳酸纤维膜,不仅有助于深化对多学科交叉背景下光热调控机制的理解,也在推动下一代绿色、可持续智能热管理纺织品的发展方面展现出广阔的应用前景^[21,22].

本文利用微波辅助法合成了锆基金属有机框架(UiO-66)纳米晶,有效提升了UiO-66的光散射效率,结合静电纺丝-电喷技术和相分离策略,成功构建了具有多孔结构的PLA/UiO-66多级孔纤维膜.该复合纤维膜呈现出微纳米级的多孔形貌,因其在高湿度环境中采用易挥发溶剂诱导相分离,表面形成了均匀分布的随机纳米孔结构,同时纤维间相互缠结交织形成微米级孔隙,该多级孔结构协同增强了光散射效应,从而显著提升了辐射制冷性能.户外测试结果表明,UiO-66功能化修饰与多孔结构的构建显著改善了纤维膜的辐射冷却效能,为开发高效、可持续的辐射制冷纤维材料提供了重要参考.

1 实验部分

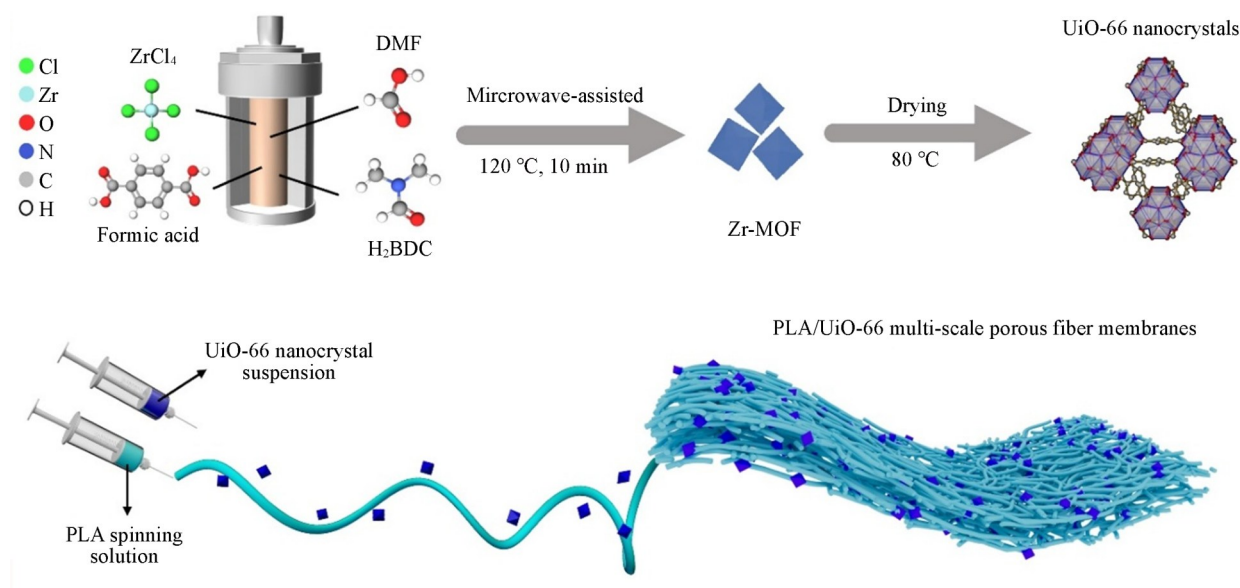
1.1 试剂与仪器

聚乳酸(商品名LLX175, $M_w=1.63 \times 10^5$, *L*-异构体的立体化学纯度为96%), 泰国道恩公司; 氯化锆($ZrCl_4$)、无水乙醇(C_2H_6O), 分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司; 1,4-对苯二甲酸(H_2BDC)、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)、二氯甲烷(DCM)、甲酸(CH_2O_2)及乙二醇(EG), 分析纯, 上海阿拉丁化学有限公司.

TL-Pro-BM型静电纺丝机, 深圳市通力微纳科技有限公司; SU8220型场发射扫描电子显微镜(FESEM), 日本Hitachi公司; Spectrum 3型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 美国PerkinElmer公司; D8-Advance型X射线衍射仪(XRD), 德国布鲁克AXS公司; Lambda-1050s型紫外-可见(UV-Vis)分光光度计, 美国Perkin Elmer公司; TES-1333型太阳能功率表, 台湾泰仕公司; PZ-200SD型水接触角测量仪, 上海中呈数字科技设备有限公司.

1.2 实验过程

1.2.1 微波辅助法制备 UiO-66 纳米晶 Scheme 1(A)示出了UiO-66纳米晶的制备过程. 首先, 将0.60 g $ZrCl_4$ 和1.26 g H_2BDC 混合溶解于120 mL DMF中, 并在室温下超声处理20 min; 然后, 将14 mL甲酸滴加入混合溶液中, 将混合物置于微波反应器中, 在800 W的微波功率下, 于120 °C下加热20 min, 然后冷却至室温, 得到乳白色液体, 即UiO-66纳米晶悬浮液; 最后, 将悬浮液在8000 r/min的转速下离心10 min, 依次用去离子水和无水乙醇清洗若干次后, 得到UiO-66纳米晶白色粉末, 置于80 °C烘箱中干燥24 h.



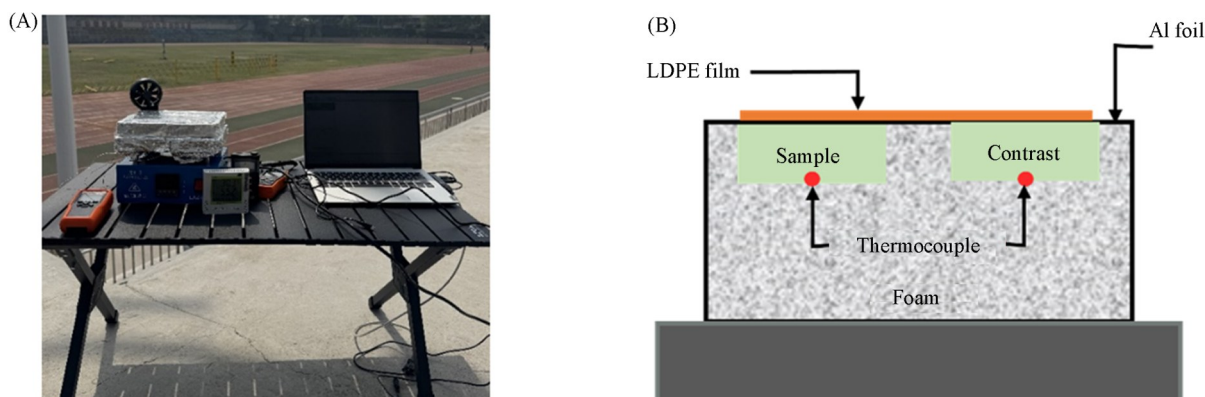
Scheme 1 Preparation process of UiO-66 nanocrystals using microwave-assisted method(A) and the fabrication of PLA/UiO-66 multi-scale porous fiber membranes(B)

1.2.2 Pure PLA 纤维膜的制备 将1.20 g PLA溶解于10 mL DCM/DMF(体积比7:3)混合溶液中, 在室温下搅拌12 h使PLA完全溶解, 得到PLA溶液; 然后将PLA溶液装入5 mL注射器(配有18 G不锈钢针)中, 设置钢针尖端与收集器之间的距离为15 cm, 推进注射速度为1.5 mL/h, 针上施加+15 kV的电压, 集电极上施加-5 kV的电压, 在 (30 ± 5) °C、相对湿度(RH)为 $(40 \pm 5)\%$ 的条件下, 以300 r/min的滚动速度将纤维收集到基底上, 得到Pure PLA纤维膜; 将所制备的Pure PLA纤维膜在40 °C下干燥12 h, 以去除未挥发的有机试剂.

1.2.3 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜静电纺丝液的制备 将 1.20 g PLA 溶解于 10 mL DCM/DMF (体积比 9:1) 混合溶液中, 在室温下搅拌 12 h 使 PLA 完全溶解, 得到 PLA 溶液; 将不同质量的 UiO-66 纳米晶 (0.048, 0.096 和 0.144 g) 加入 10 mL 乙二醇溶液中, 超声 30 min, 得到电喷雾溶液。

1.2.4 静电纺丝-电喷雾和相分离策略制备 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜 制备路线如 Scheme 1(B) 所示。将含有不同质量 UiO-66 纳米晶的电喷雾溶液和聚乳酸纺丝溶液分别装入 5 mL 注射器 (配有 18 G 不锈钢针) 中; 设置钢针尖端与收集器之间的距离为 15 cm, 推进注射速度为 1.5 mL/h, 针上施加 +15 kV 的电压, 集电极上施加 -5 kV 的电压, 在 $(30 \pm 5)^\circ\text{C}$ 及相对湿度为 $(80 \pm 5)\%$ 的条件下, 以 300 r/min 的滚动速度将纤维收集到基底上, 得到 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜; 将 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜在 40°C 下干燥 12 h, 以去除未挥发的有机试剂。当电喷雾溶液中 UiO-66 纳米晶的加入质量分别为 0.048, 0.096 和 0.144 g 时, 将制备的 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜分别命名为 PLA/UiO-66-4, PLA/UiO-66-8 和 PLA/UiO-66-12。

1.2.5 辐射冷却性能测试 为评估纤维材料在日间的辐射冷却特性, 通过低密度聚乙烯 (LDPE) 薄膜封装加热表, 该封装方式既可有效抑制传热, 也能减少热对流的影响 [Scheme 2(A) 和 (B)]。样品下方布置热电偶, 用于实时监测温度变化, 并通过多通道温度记录仪便捷采集温度数据。同时, 使用传感器对环境湿度、风速及太阳辐照度进行同步测量。



Scheme 2 Photos of the self-built experimental testing equipment for outdoor tests(A) and the schematic diagram of the testing experimental setup(B)

1.2.6 水接触角测试 为了评估纤维膜的疏水性, 将纤维膜裁剪成直径为 1 cm 的圆形样品, 随后平整地固定在测试样台上, 使用 PZ-200SD 型接触角测量仪进行测试, 以 5 μL 去离子水为测试液滴, 测定样品表面静态水接触角 (WCA)。

2 结果与讨论

2.1 UiO-66 纳米晶的形貌特征

微波辅助法被广泛应用于金属-有机框架材料 (MOF) 的合成^[23]。为了证明通过微波辅助合成的 UiO-66 纳米晶具有规整且精确的形貌尺寸, 通过扫描电子显微镜观察了其表面形貌。由图 1(A) 和 (B) 可以看出, 在微波和甲酸调节剂的作用下, UiO-66 纳米晶均表现出了高度规整的八面体结构。由图 1(C) 可见, UiO-66 纳米晶平均尺寸约为 700 nm。

通过 FDTD 软件模拟了不同尺寸的 UiO-66 纳米晶对不同波长光的散射效率。由 [图 1(D)] 可见, 平均尺寸为 700 nm 的 UiO-66 纳米晶表现出良好的光散射能力, 散射效率最大能够达到 3.7 左右。同时, 当 UiO-66 纳米晶的尺寸与太阳光波长相当时, 会激发米氏共振。在此条件下, 纳米晶结构内部的电子在电磁场驱动下发生振荡, 可显著提升其散射效率^[24]。同时, SEM 能谱成像的元素分布 [图 1(E)~(G)] 证实了 UiO-66 纳米晶主要由 C, O 和 Zr 等 3 种元素组成, 进一步证明了 UiO-66 纳米晶被成功制备出来。

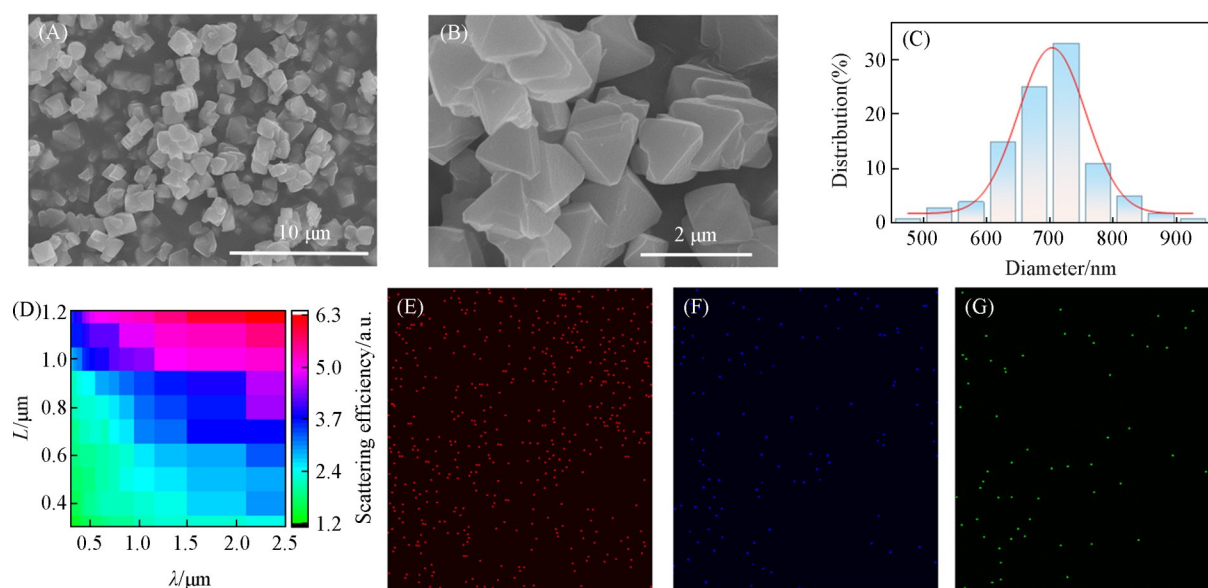


Fig. 1 SEM images(A, B), diameter distribution(C), scattering efficiency(D) and element mappings(E—G) of UiO-66 nanocrystals
(E) C; (F) O; (G) Zr.

2.2 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的形貌分析

为了分析 UiO-66 纳米晶的加入和相分离策略对纤维的影响规律, 通过扫描电子显微镜观察了 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的形貌. 图 2(A₁)和(A₂)示出了 Pure PLA 的纤维形貌. 由于在高湿环境下利用易挥发的 DCM 作为纺丝液的溶剂, 在纺丝过程中诱导产生了非溶剂和溶剂相分离, 在纤维的表面形成了均匀的纳米孔. 由于未添加 UiO-66 纳米晶进行功能化修饰, 纤维的表面光滑, 这会降低太阳反射率^[25]. 随着 UiO-66 的加入, 纤维的形貌发生变化, 纤维表面变得粗糙, 同时纤维表面形成均匀的纳米孔. 但随着 UiO-66 加入量的增大, UiO-66 的团聚现象逐渐明显[图 2(B₁—D₁), (B₂—D₂)]. 团聚会造成局部尺寸过大, 导致局部米氏散射效应减弱, 这可能会增加对光线的吸收, 导致反射率下降.

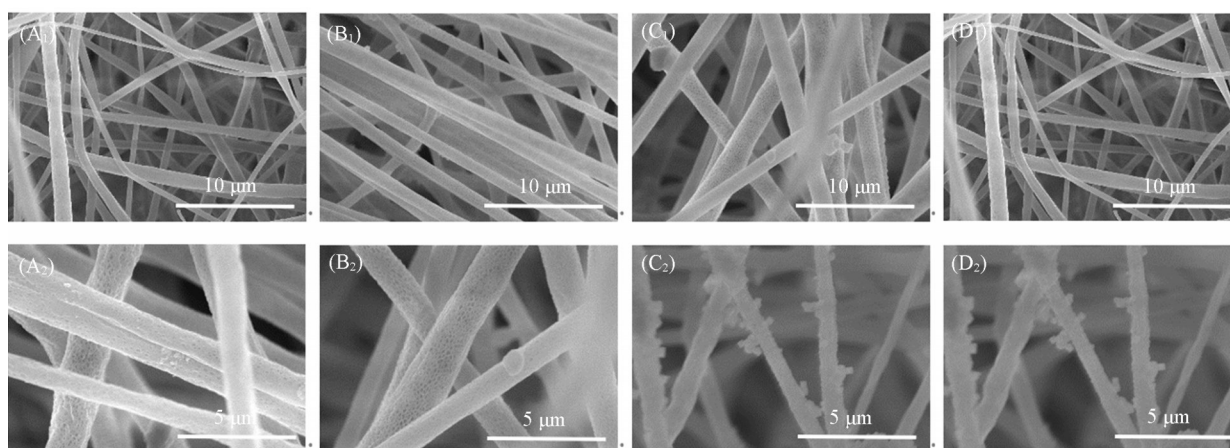


Fig. 2 SEM images of Pure PLA(A₁, A₂), PLA/UiO-66-4(B₁, B₂), PLA/UiO-66-8(C₁, C₂) and PLA/UiO-66-12(D₁, D₂) multi-scale porous fiber membranes

2.3 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的 FTIR 和 XRD 分析

通过 FTIR 和 XRD 对 PLA 纳米纤维膜的微观结构进行了探究. 图 3(A—C)示出 Pure PLA 纳米纤维膜和 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜在全范围(4000~650 cm⁻¹)内的 FTIR 光谱及特征官能团变化情况. 可以看出, 随着 UiO-66 纳米晶对纤维膜功能化的进行, 纤维膜在中红外波段的吸收峰逐渐增强. 当 UiO-66 添加量(与 PLA 的质量比)为 12% 时, 在 1200, 1150, 1050 和 900 cm⁻¹ 处出现明显的 O—H, C—H, C=O

和C—C拉伸振动特征峰. 在阳光的照射下, 这些红外基团的振动加剧, 直接将吸收的热能以特定波长的红外辐射形式发散出去^[26]. 这表明 UiO-66 功能化弥补了 PLA 在大气波段红外基团的不足, 为高效辐射冷却带来了可能性. 由图 3(D)可以推测, UiO-66 纳米晶稳固均匀锚定在 PLA 纤维表面, 有利于发挥纳米晶的优异光学性能.

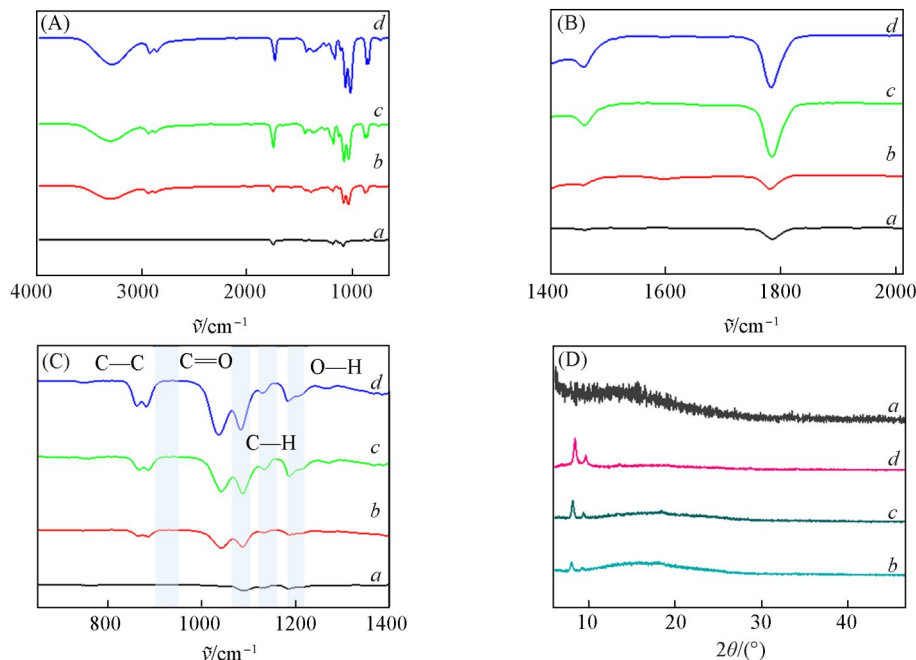


Fig. 3 FTIR spectra(A—C) and XRD patterns(D) of Pure PLA(a), PLA/UiO-66-4(b), PLA/UiO-66-8(c) and PLA/UiO-66-12(d) multi-scale porous fiber membranes

2.4 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的性能分析

2.4.1 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的光学性能 得益于相分离诱导形成的多孔结构, 纤维表面的纳米孔尺寸远小于入射光波长, 从而可诱发瑞利散射; 同时, 纤维与纤维相互缠结构成了微米级孔结构, 进而可引起米氏散射^[27]. 这两种散射机制协同作用, 可显著增强纤维膜的太阳光反射能力. 为了验证孔结构对 PLA 纤维膜太阳光反射率的提升作用, 对样品进行了反射率测试. 由图 4(A)可见, PLA/UiO-66 多级孔纤维膜表现出优异的太阳光反射性能, 其中 PLA/UiO-66-12 的平均太阳光反射率为 93.9%, 远远超过 Pure PLA 纤维膜. 图 4(B)示出了纤维膜的红外发射率测试结果. 与 Pure PLA 纤维膜相比, PLA/UiO-66 多级孔纤维膜表现出更高的红外发射率, 其中 PLA/UiO-66-12 的平均红外发射率为 91.2%, 这是因为 UiO-66 的功能化带来了丰富的红外基团, 同时提供了额外的晶格振动(Zr—O), 为红外发射提供了额外的振动源^[28]. 这表明 UiO-66 的加入和多孔的建立对改善纤维膜光学性能具有重要意义.

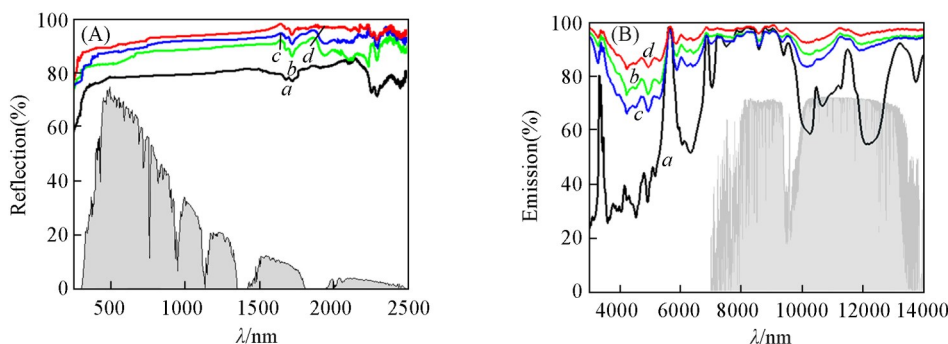


Fig. 4 Reflection(A) and emission(B) spectra of Pure PLA(a), PLA/UiO-66-4(b), PLA/UiO-66-8(c) and PLA/UiO-66-12(d) multi-scale porous fiber membranes

The gray-shaded area in (A) represents the normalized AM 1.5 global solar spectrum, while the gray-shaded area in (B) indicates the atmospheric longwave infrared transmittance.

2.4.2 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的辐射冷却性能 为了探索 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜作为辐射冷却纺织品应用的可能性, 在户外环境下对 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的辐射冷却性能进行了测试. 使用特制的实验装置将样品直接暴露于阳光下, 并测量其温度变化. 实验装置如 Scheme 2(A) 所示: 采用铝箔包裹泡沫盒以最小化热传导, 将样品放置于泡沫盒顶部; 将热电偶安装于带孔的绝缘泡沫盒内部, 用于实时监测并记录盒内温度变化; 在泡沫箱表面覆盖一层低密度聚乙烯薄膜, 以抑制对流热交换, 从而确保对样品辐射冷却性能的准确评估. 为了避免大气窗口中云层的潜在干扰, 选择了在晴朗的天气进行测试, 同步记录太阳光强度、风速和湿度[图 5(A)和(B)]. 由图 5(C) 可见, PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜的温度曲线远远低于其它样品, 平均温度仅有 47.6 °C, 而其它样品的平均温度都高达 50 °C 以上, 这主要是由于 PLA 的多孔结构和 UiO-66 的功能化所致. 温度差计算结果表明, PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜与裸露皮肤的平均温差达到 6.9 °C[图 5(D)], 说明 PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜具有出色的辐射冷却性能.

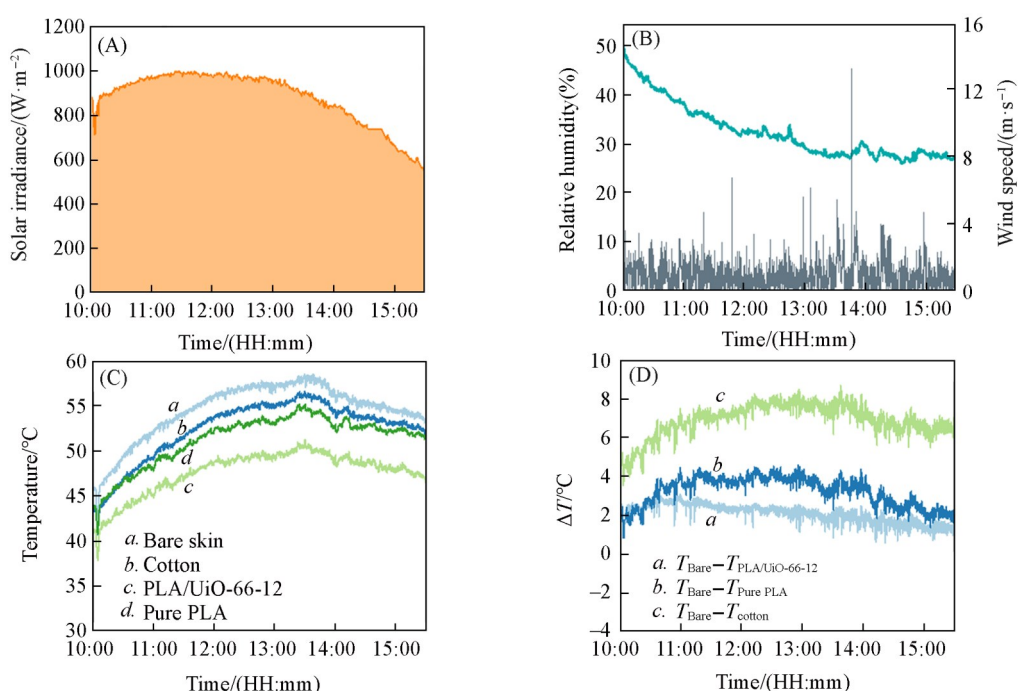


Fig. 5 Solar irradiation(A), wind speed and relative humidity(B), real-time temperature variation curves from outdoor experiments using bare skin, cotton fabric, and Pure PLA and PLA/UiO-66-12 multi-scale porous fiber membranes(C) and temperature difference curves of three porous fiber membranes(D)

2.4.3 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的疏水性能 实验中测量了 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜的水接触角. 由图 6(A)和(B)可见, PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜的水接触角(128.8 °)远高于 Pure PLA 纤维膜(水接触角为 108.7 °), 这主要是由于 UiO-66 功能化修饰在降低纤维膜表面能的同时增加了纤维膜的粗糙度, 使其具有良好的疏水性能. 为了进一步探究其抗污性能, 进一步测试了 PLA/UiO-66 多级孔纤维膜对生活中常见液体(咖啡、可乐、牛奶、茶)的接触角. 由[图 6(C)]可见, PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜

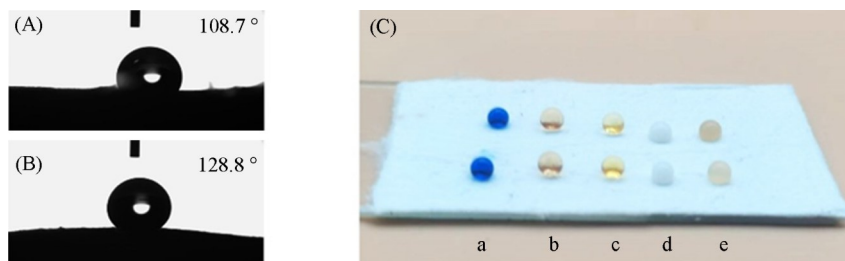


Fig. 6 Water contact angle of Pure PLA(A) and PLA/UiO-66-12(B) multi-scale porous fiber membranes and the contact photos of PLA/UiO-66-12 multi-scale porous fiber for H₂O(a), coffee(b), tea(c), coke(d) and milk(e)

均具有良好的抗污性能, 展现出在实际应用中抵御复杂污染的巨大潜力.

3 结 论

通过微波辅助法精准调控锆基金属有机框架 UiO-66 的尺寸与形貌, 制备了具有高散射效率的 UiO-66 纳米晶; 以其作为高红外辐射功能材料, 结合静电纺丝-电喷技术与相分离策略, 构筑了 UiO-66 功能化的聚乳酸(PLA)多级孔纤维膜. 该纤维膜凭借其微-纳米孔结构和丰富的红外活性基团, 表现出优异的太阳光反射性能与红外发射能力. 当 UiO-66 添加量为 12% 时, 所制备的 PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜光学性能尤为突出, 其平均太阳光反射率和红外发射率分别达到 93.9% 和 91.2%, 显著优于 Pure PLA 纤维膜. 在户外测试中, PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜表现出更显著的降温效果, 平均温度维持在 47.6 °C, 而纯 PLA 纤维膜的平均温度则高于 50 °C. 同时, 与裸露皮肤相比, PLA/UiO-66-12 多级孔纤维膜的降温幅度达到 6.9 °C, 能够在炎热环境下使人体保持舒适. 此外, UiO-66 的引入有效降低了材料表面能, 使纤维膜具备优异的疏水性与抗污染性能. 本文为开发高效、可持续的热管理纺织品提供了一种新策略.

参 考 文 献

- [1] Sun B. L., Hou C. A., Zhao X. N., Wang C. J., Wang D. H., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, 41(4), 771—780
- [2] Ning Y., Zhao B., Min W. P., Li C. L., Liu P. X., Jia Y., Li X. Y., Zhang Y., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, 41(3), 601—610
- [3] Sun H., Hou C. Y., Ji T., Zhou X. Y., Ren Z. H., Song Y. M., *Compos. Part B: Eng.*, **2023**, 250, 110426
- [4] Lin C. L., Li K. Q., Li M., Benjamin D., Zheng J. Z., Wang J. Z., Du S. S., Li Y., Huang B. L., *Adv. Mater.*, **2024**, 37(23), 2409738
- [5] Ding C. F., Lin Y. Y., Chng N. B., Meng N., Wang X. F., Yin X., Yu J. Y., Ding B., *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(34), 2400987
- [6] Fan C. H., Zhang Y. X., Long Z. W., Mensah A., Wang Q. Q., Lv P. F., Wei Q. F., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(29), 2300794
- [7] Cheng N. B., Wang Z. H., Lin Y. Y., Li X. Q., Zhang Y. F., Ding C. F., Wang C., Tan J., Sun X. F., Wang X. F., Yu J. Y., Ding B., *Adv. Mater.*, **2024**, 36(33), 2403223
- [8] Raman A. P., Zhu L. X., Fan S. H., *Nature*, **2014**, 515(7528), 540—544
- [9] Song J. N., Zhang W. L., Sun Z. N., Pan M. Y., Tian F., Li X. H., Ye M., Deng X., *Nat. Commun.*, **2022**, 13(1), 4805
- [10] Tajwar M. A., Ali N., Zhang X. R., Jabeen R., Liu Y. T., Shangguan D. H., Qi L., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, 40(6), 1290—1297
- [11] Liu J. W., Zhou Y. F., Zhou Z. H., Du Y. H., Wang C., Yang X. Q., Lin Z. J., Guo Z. L., Zhao J., Ye L., Zhang H. R., Yan J. Y., *Adv. Energy Mater.*, **2024**, 14(2), 2302662
- [12] Zhang L. Y., Liu J. K., Liu X. L., Zhu X. B., Dai J. Y., Liu X. Q., Yi X. S., *Chem. Eng. J.*, **2024**, 499, 156318
- [13] Po C. H., Alex Y. S., Peter B. C., Liu C., Xie J., Fan S. H., Cui Y., *Science*, **2016**, 353(6303), 1019—1023
- [14] Hu M. M., Yang Y. W., Li K., Zhang Y. L., Dong H. Z., Wang Y., Zhang X. Q., Wang R., Wu J., *Chem. Eng. J.*, **2024**, 502, 157995
- [15] Zhou X., Chen W. X., Zhao Z. X., Peng S. Q., Wu L. X., Weng Z. X., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 6(36), 10443
- [16] Song Y. N., Li Y., Yan D. X., Lei J., Li Z. M., *Compos. Part A: Appl S.*, **2020**, 130, 105738
- [17] Miao D. Y., Cheng N. B., Wang X. F., Yu J. Y., Ding B., *Nano Lett.*, **2022**, 22(2), 680—687
- [18] Xue S. D., Huang G. H., Chen Q., Wang X. G., Fan J. T., Shou D. H., *Nano-Micro Lett.*, **2024**, 16, 153
- [19] Hou B. Y., Wang Y. N., Gong T. Y., Wang R., Huang L. P., Li B. J., Li J. C., *Chem. Eng. J.*, **2024**, 485, 149932
- [20] Wang C. M., Jiang L., Li J. Q., Li X. Y., Zhang Y. F., Yuan H., Zhang M. M., Zhu J. T., Xu H., Lei L., Hou C., Guo Z., He X. J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, 45(10), 20240210(王存民, 江亮, 李佳琪, 李欣雨, 张一帆, 袁慧, 张明明, 朱金佗, 徐欢, 雷磊, 侯冲, 郭震, 何新建. 高等学校化学学报, **2024**, 45(10), 20240210)
- [21] Song X. Y., Tang M. K., Wang C. M., Zhu J. T., Huang S., Xu H., He X. J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, 45(2), 20230352(宋欣译, 唐梦珂, 王存民, 朱金佗, 黄胜, 徐欢, 何新建. 高等学校化学学报, **2024**, 45(2), 20230352)
- [22] Wang Y. B., Cheng F. L., Liu J., Cai W. Q., Ji J. W., Cai C. Y., Fu Y., *Int. J. Biol. Macromol.*, **2024**, 485, 149932
- [23] Yang P., Jiu Y. S., He J. J., Xia Z. C., Chen L., Tang S. C., *Adv. Fiber Mater.*, **2024**, 6, 1765—1776
- [24] Liu X. H., Zhang M. T., Hou Y. Z., Pan Y. M., Liu C. T., Shen C. Y., *Adv. Funct. Mater.*, **2022**, 32(46), 2207414
- [25] Li X. L., Sheng X. X., Fang Y., Hu X. P., Gong S., Sheng M. J., Liu X., Qu J. P., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(18), 2212776
- [26] Helia H., Fatemeh H. S., Hossein E. M., Bahram R., *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 344, 103592
- [27] Wang K., Niu L. Y., Tao L., Zhang Y. X., Zhou X. F., *Solar Energy*, **2021**, 230, 935—942
- [28] Cai C. Y., Chen W. B., Wei Z. C., Ding C. X., Sun B. J., Christoph G., Fu Y., Zhang K., Lin Y., Li X., Zhang Y., *Nano Energy*, **2023**, 114, 108625

(Ed.: W, K, M)