

# 用于光热转化的CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD混合基质膜的制备与应用

唐海燕<sup>#</sup>, 自丽梦<sup>#</sup>, 张冰, 付昱

(东北大学理学院化学系, 沈阳 110819)

**摘要** 采用简单高效的软喷雾技术制备了一种具有优良光热转化性能的金属有机框架(MOFs)基混合基质膜(MMM)。在含有2-氨基对苯二甲酸(H<sub>2</sub>BDC-NH<sub>2</sub>)和间苯二胺(mPD)的混合溶液表面均匀喷涂少量铜离子, 铜离子同步引发MOFs的自组装和单体聚合, 在气/液界面形成大面积的CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM。该方法不仅简单高效, 而且由于铜离子的双重作用, 可以一步合成MOF分布均匀的混合基质膜。所得MMM具有良好的完整性, 表现出优异的太阳能水蒸发能力, 可用于高效海水淡化。

**关键词** 金属有机框架; 混合基质膜; 太阳能水蒸发; 软喷雾

中图分类号 O634

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20230379

## Preparation and Application of CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD Mixed Matrix Membranes for Photothermal Conversion

TANG Haiyan<sup>#</sup>, ZI Limeng<sup>#</sup>, ZHANG Bing, FU Yu\*

(Department of Chemistry, College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract** A kind of metal-organic framework (MOF)-based mixed matrix membranes (MMMs) with excellent photothermal conversion performance was prepared by a simple and efficient soft spray technique in this paper. A small amount of copper ions is uniformly sprayed on the surface of the mixed solution containing 2-aminoterephthalic acid (H<sub>2</sub>BDC-NH<sub>2</sub>) and *m*-phenylenediamine (mPD), and the copper ions simultaneously initiate the self-assembly of MOFs and monomer polymerization to form a large-area CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM with homogeneous MOF at the gas-liquid interface. This method not only is simple and efficient, but also can synthesize mixed matrix membranes with uniform MOF distribution in one step due to the dual action of copper ions. The MMMs obtained by this synchronous synthesis method has good integrity and shows excellent solar water evaporation capacity, which can be used for high-efficiency seawater desalination, and it's expected to play a role in desalination of seawater.

**Keywords** Metal-organic framework; Mixed matrix membrane; Solar water evaporation; Soft spray

淡水资源短缺是一个世界范围内的严峻问题, 迫切需要探索出可靠的淡水净化方法<sup>[1-3]</sup>。太阳能水蒸发是一种利用可持续能源进行大规模水净化的可靠方法<sup>[4-6]</sup>。由于自然条件下水的太阳能吸收率低、能效差, 因此需要将光热转换性能高的材料(即太阳能吸收剂)放置在水的表面, 以实现界面加热<sup>[7]</sup>。常用的太阳能吸收剂有金属纳米颗粒<sup>[8]</sup>、聚合物<sup>[9]</sup>、金属氧化物<sup>[10]</sup>、碳基多孔材料<sup>[11]</sup>及半导体材料<sup>[12]</sup>等。混合基质膜(MMM)是在聚合物基质中加入多孔填料制成的一种复合膜<sup>[13,14]</sup>。由于MMM能够将填

收稿日期: 2023-08-23. 网络首发日期: 2023-12-14.

联系人简介: 付昱, 男, 博士, 教授, 主要从事金属有机框架材料方面的研究. E-mail: fuyu@mail.neu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22175030)和超分子结构与材料国家重点实验室开放课题(批准号: sklssm 202306)资助.

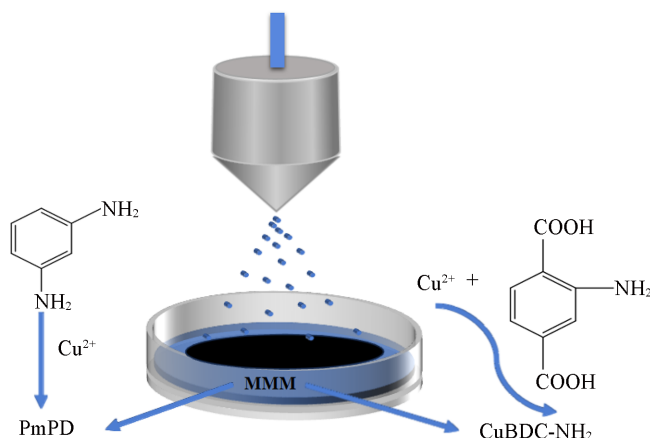
Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.22175030) and the Open Project of the State Key Laboratory of Supramolecular Structure and Materials, China(No.sklssm 202306).

<sup>#</sup> 共同第一作者.

料和聚合物的优点整合到一个系统中, MMM 已经在气体分离<sup>[15]</sup>、药物分离<sup>[16]</sup>、废水处理<sup>[17]</sup>、海水淡化<sup>[18]</sup>和资源回收<sup>[19]</sup>等领域得到了广泛的应用. 金属有机框架(MOF)材料是由金属离子或金属离子簇和有机连接剂构成的<sup>[20-22]</sup>. MOF 基 MMM 由于具有孔隙结构可调、力学性能优异的优点, 已成为分离科学中很有发展前景的一种材料<sup>[23-25]</sup>.

制备 MOF 基 MMM 的常用方法主要有两种<sup>[26]</sup>: 一种是自上而下的方法, 即先合成 MOF 颗粒, 再将其与高分子聚合物混合, 形成 MMM. Liu 等<sup>[27]</sup>提出了一种简便的溶液铸膜方法, 制备了厚度小于 400 nm 的 UiO-66 自支撑混合基质膜; Zhang 等<sup>[28]</sup>提出一种简单、有效的配位驱动原位自组合法, 制备了 ZIF-8/聚苯乙烯磺酸钠杂化膜; Li 等<sup>[29]</sup>提出了一种用间隙密封的 MOF 纳米颗粒制备混合基质膜的新方法, 制备了 ZIF-8/BMA 和 ZIF-8/GMA 膜. 另一种是自下而上的方法, 即先将金属离子与高分子聚合物混合, 然后加入配体, 形成 MOF, 最终形成 MMM. 例如, Zhu 等<sup>[30]</sup>采用界面聚合法, 制备了可增强纳滤性能的 TFN 聚酰胺纳滤膜; Marti 等<sup>[31]</sup>通过在聚酰亚胺基体中原位生长 MOF(UiO-66)并同时固化基体制备了相应的混合基质膜并用于气体分离. 这些方法均可获得具有良好性能的 MMM, 但制备步骤较繁琐, 有待探索一种更加简便的、能使 MOF 和 MMM 同步、快速生长的方法来制备 MMM.

本文开发了一种在可混溶液的液/液界面快速制备大面积薄膜的方法——软喷雾法, 并用于制备 MOF 基 MMM. 在温和的条件下, 雾化的金属离子液滴均匀地喷射到含有有机连接剂和聚合物单体分子的混合溶液表面上, 然后由于金属离子(铜离子)的双重作用, 大规模的 MMM 在气/液界面快速生长, 即金属离子与有机配体自组装并且同时促进单体的聚合, 最终形成 MOF 均匀分布的混合基质膜(Scheme 1). 这种制备方法可以在温和的条件下进行, 并且是一步法制备, 在合成 MOF 期间同步生长聚合物, 而不需要额外的聚合过程. 本文采用这种方法制备了一种均匀、致密、高 MOF 负载量、厚度可调的 MMM. 选择铜离子是因为其不仅可以与 2-氨基对苯二甲酸配合形成 MOF, 还可以促进间苯二胺的聚合, 完成一步法制备. 所形成的混合基质膜为黑色, 有利于光热转化. 值得注意的是, 由于 MOF 的多孔性和聚合物优异的光热转换能力, MMM 可以充当太阳能热膜蒸发器, 表现出出色的太阳能水蒸发性能; 此外, 得到的 MMM 可以漂浮在液体表面上而无需额外的支撑材料, 这不仅节省了资源, 而且有利于在各种环境中的实际应用.



Scheme 1 Preparation process of MMM by soft spray

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

醋酸铜 $[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2]$ 、2-氨基对苯二甲酸( $\text{H}_2\text{BDC-NH}_2$ )及间苯二胺(mPD), 分析纯, 上海安耐吉医药化学有限公司;  $N,N$ -二甲基甲酰胺(DMF)和乙腈( $\text{CH}_3\text{CN}$ ), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司.

SU8010型扫描电子显微镜(SEM), 日本 Hitachi 公司; Empyrean 型 X 射线衍射仪(XRD),  $\text{Cu K}\alpha$  射线,  $\lambda=0.15406 \text{ nm}$ , 荷兰 PANalytical 公司; VERTEX 70 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 德国 Bruker

公司; UTi260B型红外热成像仪(PTI), 优利德科技(中国)股份有限公司; TES-1333型太阳能功率计, 泰仕电子工业(中国台湾)股份有限公司.

## 1.2 实验过程

**1.2.1 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF膜的制备** 采用超声喷涂技术制备 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF膜. 首先, 将 33.2 mg H<sub>2</sub>BDC-NH<sub>2</sub>溶解在 15 mL DMF 和 CH<sub>3</sub>CN(体积比 2:1)的混合物中, 并置于覆盖有尼龙过滤膜基质的玻璃培养皿中. 然后, 将 27.2 mg Cu(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>溶解在 15 mL DMF 和 CH<sub>3</sub>CN(体积比 1:2)的混合物中. 将金属溶液注入超声雾化器, 并以 1 μL/s 的流速均匀地喷洒到 H<sub>2</sub>BDC-NH<sub>2</sub>溶液顶部. 制备过程中培养皿保持在静态条件下, MOF膜作为独立膜漂浮在液体表面. 随后, 小心地从玻璃盘中吸取过量的反应溶液, 使所得薄膜沉积在基底上. 最后, 将 MOF膜于空气中晾干, 即得到 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF膜.

**1.2.2 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM的制备** 采用超声喷涂技术制备 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD复合膜. 首先, 将 33.2 mg H<sub>2</sub>BDC-NH<sub>2</sub>和 300 mg mPD溶解在 15 mL DMF 和 CH<sub>3</sub>CN(体积比 2:1)的混合物中, 置于覆盖有尼龙过滤膜基质的玻璃培养皿中. 然后, 将 27.2 mg Cu(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>溶解在 15 mL DMF 和 CH<sub>3</sub>CN(体积比 1:2)的混合物中. 将金属溶液注入超声雾化器, 并以 1 μL/s 的流速均匀地喷洒到 H<sub>2</sub>(BDC-NH<sub>2</sub>)和 mPD 的混合溶液顶部. 制备过程中培养皿保持在静态条件下, MMM作为独立膜漂浮在液体表面. 随后, 小心地从玻璃盘中吸取过量的反应溶液, 使所得薄膜沉积在基底上. 最后, 将薄膜置于空气中晾干, 即得到 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM.

**1.2.3 太阳能蒸气生成性能测试** 使用太阳能模拟器测试混合膜的太阳能蒸气生成性能. 太阳能蒸气产生试验的室温为 25 °C, 相对湿度为 50%. 用太阳能功率计(TES-1333)确认光源的照明强度. 将装有水的烧杯置于电子天平上, 将膜漂浮在烧杯中的水面上. 在样品被光源预照射 10 min 后, 膜的温度达到稳定状态, 然后每隔 5 min 通过电子天平测量水减少的质量. 在相同条件下的黑暗环境中测定没有光源条件下水的蒸发速率, 并用于校准蒸气生成数据. 根据质量变化参照文献计算能量转化率<sup>[32]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM的制备

通过同步生长策略在气/液界面制备了 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM. 将 Cu<sup>2+</sup>的 DMF/CH<sub>3</sub>CN(体积比 1:2)溶液以缓慢的速度均匀地喷洒到配体 H<sub>2</sub>BDC-NH<sub>2</sub>和 mPD 的 DMF/CH<sub>3</sub>CN(体积比 2:1)混合溶液的表面上, 获得漂浮在气/液界面上的膜. 随着 Cu<sup>2+</sup>用量的增加, 膜的颜色逐渐从绿棕色变为黑绿色. 最后变为黑色, 在吸走多余溶液后, 膜可以在原位紧密地附着到多孔膜基质上, 在室温下自然晾干后, 即得到 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM. 通过调节铜离子的量来控制 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的厚度. 因为 MMM 是由方形纳米片堆叠形成的, 随着喷涂次数的增加, 铜离子的量增加, 方形纳米片的数量增大, 膜的厚度增加.

### 2.2 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM的结构表征

图 1 示出不同放大倍数下 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF膜和 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的表面形貌. 由图 1 可以看出, CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF膜由方形(边长约 80 nm)的水平取向纳米片组成, 并具有典型的层状结构, 这导致了薄膜的取向. 与 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF膜相比, CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 具有更光滑且连续的表面.

图 2 示出 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF, CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 和 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 拟合的 XRD 谱图. CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的 XRD 图谱在 10°~25°之间显示出 4 个主要的衍射峰(2θ=10.30°, 16.82°, 20.67°, 24.73°), 分别对应于 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 的(101), (201), (130)和(202)晶面, 这些衍射峰在 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 及 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 拟合的 XRD 谱图中也可观察到, 与文献[33]报道一致, 表明 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 中存在 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 的晶体结构.

图 3 示出 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 和 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的 FTIR 谱图. 1620 和 1395 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰归属于 COO<sup>-</sup>基团的不对称和对称伸缩振动, 证明 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 中存在配位作用; 1506 cm<sup>-1</sup>处的

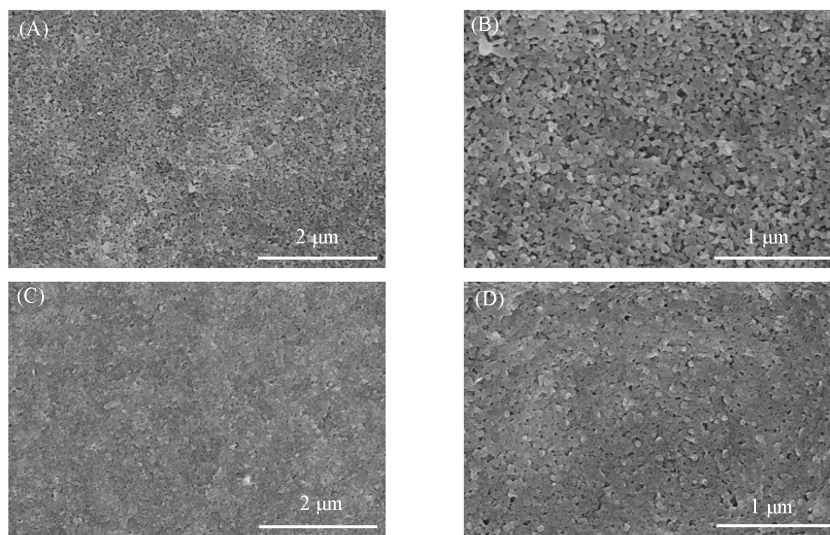


Fig. 1 SEM images of CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF film(A, B) and CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM(C, D) with different magnifications

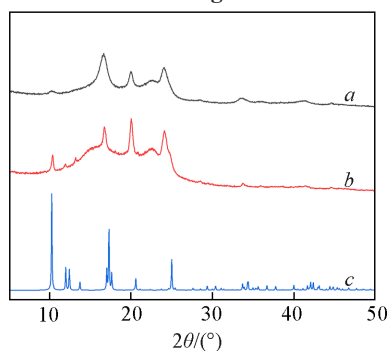


Fig. 2 XRD patterns of CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF(a) CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM(b) and CuBDC-NH<sub>2</sub> simulation(c)

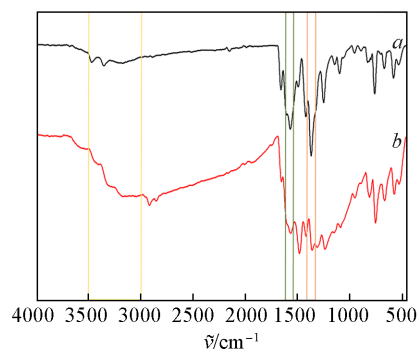


Fig. 3 FTIR spectra of CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF(a) and CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM(b)

吸收峰归属于苯环的伸缩振动. 以上吸收峰在 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 和 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的红外光谱中均可观察到. 在 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的红外光谱中, 1276 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰归属于 PmPD 中的 C—N 伸缩振动, 3500~3000 cm<sup>-1</sup> 之间的宽吸收信号归属于 —NH— 的伸缩振动. 这些特征峰表明 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 已经成功制备.

### 2.3 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的光热性能及应用

研究了干燥和湿润条件下 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 和 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 膜的表面温度随时间的变化关系. 图 4 为 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 膜和 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 在干燥和湿润条件下的升温曲线. 使用光强为 1 kW/m<sup>2</sup> 的模拟太阳光照射膜 10 min, 每隔 20 s 用热成像仪对膜表面温度进行监测. 由图 4 可知, 干燥的 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 膜在照射 350 s 后温度由 24.5 °C 升至 41.3 °C; 干燥的 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 在照射 500 s 后温度由 24.1 °C 升至 50.3 °C; 湿润的 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 升温速度最快, 稳态温度最高, 在照射 300 s 后温度由 25.8 °C 升至 68.3 °C. 这是由于 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 是黑色的, 有利于对光的吸收, 有快速的光热响应和转化

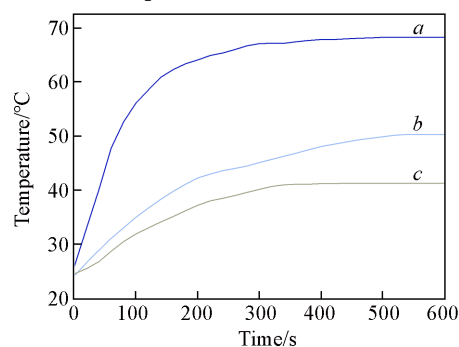


Fig. 4 Temperature rise curves of wet CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM(a), dry CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM(b) and dry CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF membrane(c)

效率. 由上述结果可知, 引入水层后, 混合基质膜表面与空气之间的折射率降低, 导致反射率降低, 从而增强了光吸收<sup>[34]</sup>. 在湿润条件下使用 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 达到稳态温度的速度更快, 温度也更高, 可应用于太阳能水蒸发.

图 5 为升温过程中湿润 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的红外热成像图. 随着时间的延长, 温度逐渐升高, 最终稳定在 68.3 °C.

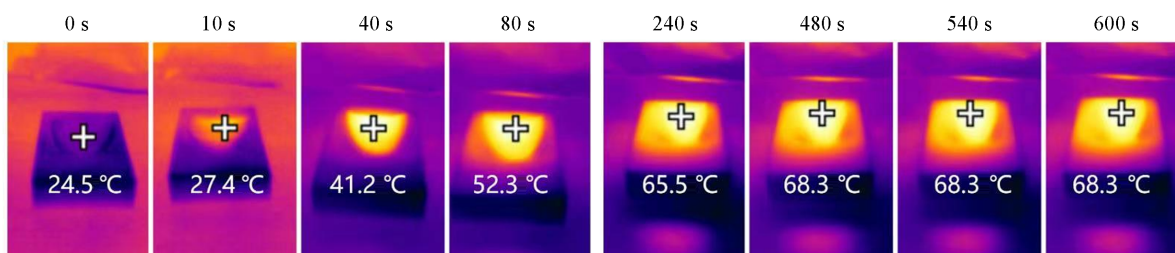


Fig. 5 Infrared images of wet CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM during heating process

为了探究 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的太阳能水蒸发性能, 在 1 kW/m<sup>2</sup> 的光照强度下, 分别对未覆盖膜的去离子水和覆盖了 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 膜、CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 及折叠的 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的去离子水进行太阳能水蒸发实验, 结果见图 6. 在照射 1 h 后, 未覆盖膜的去离子水和覆盖了 CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 膜、CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 及折叠的 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的去离子水的太阳能水蒸气的蒸发速率分别为 0.5095, 0.7690, 0.8823 和 1.0640 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>. CuBDC-NH<sub>2</sub> MOF 膜和 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 均表现出良好的促进水蒸发作用. CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的促进水蒸发作用要强于 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MOF 膜, 其中折叠的 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的光热转换效率最大, 达到了 72.94%. 并且折叠的 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 的太阳能水蒸发速率 (1.0640 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 优于其它典型膜蒸发器<sup>[35,36]</sup>. 这是由于将 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 折叠后, 模拟太阳光能在膜上进行多次反射, 膜多次吸热, 促进了水的蒸发.

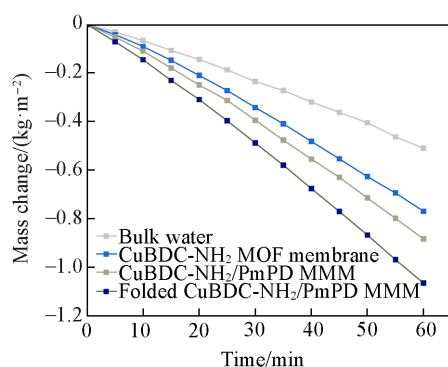


Fig. 6 Mass change curves of water without or with different membranes

Light intensity: 1 kW/m<sup>2</sup>.

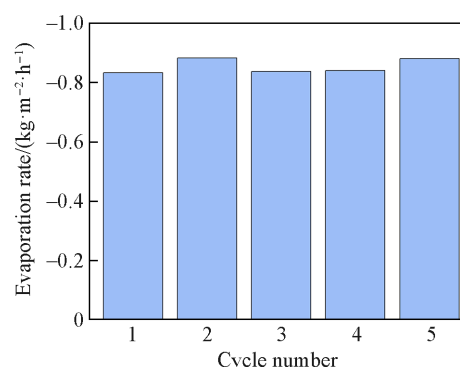


Fig. 7 Evaporation rate of CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM during multiple cycles

此外, 在相同条件下对 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 膜进行了 5 次太阳能水蒸发实验, 结果 (图 7) 表明, 5 次实验的水蒸发速率均在 0.85 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 左右, 表明该膜促进水蒸发的作用较稳定, 重复性良好, 有利于实际应用中降低成本.

综上可知, CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM 具有优异的光热转化性能, 可将光能高效地转化为热能, 具有良好的应用前景.

### 3 结 论

通过独特的同步生长策略, 用温和的超声喷雾技术制备了 CuBDC-NH<sub>2</sub>/PmPD MMM. 所制备的

MMM具有MOF负载量高、无明显缺陷、厚度可调及面积大等优点,具有较好的光热转化性能,对纯水的蒸发速率达到了 $1.0640\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。蒸发过程可以有效地淡化海水,以缓解淡水短缺的危机。这种混合基质膜由于具有优异的光热转化性能,有望在能量转换和分离工程等多个领域获得广泛应用。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Salehi, M., *Environ. Int.*, **2022**, *158*, 106936
- [ 2 ] Zhang P., Liao Q., Yao H., Huang Y., Cheng H., Qu L., *Energy Stor.*, **2019**, *18*, 429—446
- [ 3 ] Liu W. X., Zhang Y., Xu R. F., Zhang Z., *Nat. Resour. Forum.*, **2022**, *46*(2), 179—199
- [ 4 ] Chen C. J., Kuang Y. D., Hu L. B., *Joule*, **2019**, *3*, 683—718
- [ 5 ] Zhang P. P., Liu F., Liao Q. H., Yao H. Z., Geng H. Y., Cheng H. H., Li C., Qu L. T., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **2018**, *57*(50), 16343—16347
- [ 6 ] Li S. Q., Deng Y., Huang J., Wang P., Liu G. L., Xie H. L., *Aggregate*, **2023**, *4*, e371
- [ 7 ] Fuzil N. S., Othman N. H., Alias N. H., Marpani F., Othman M. H. D., Ismail, A. F., Lau W. J., Li K., Kusworo T. D., Ichinose I., Shirazi M. M. A., *Desalination*, **2021**, *517*, 115259
- [ 8 ] Kim M., Lee J. H., Nam J. M., *Adv. Sci.*, **2019**, *6*(17), 1900471
- [ 9 ] Zhao X., Zha X. J., Tang L. S., Pu J. H., Ke K., Bao R. Y., Liu Z. Y., Yang M. B., Yang W., *Nano Res.*, **2019**, *13*(1), 255—264
- [ 10 ] Kim D. H., Cha J. H., Shim G., Kim Y. H., Jang J. S., Shin H., Kim I. D., *Chem.*, **2022**, *8*(4), 1014—1033
- [ 11 ] Cui L. F., Ma C. W., Wang P. F., Che, H. N., Xu, H. L., Ao Y. H., *Appl. Catal. B*, **2023**, *337*, 122988
- [ 12 ] Zhang Y., Li K. L., Liu L., Wang K. P., Xiang J., Hou D. Y., Wang J., *Chemosphere*, **2020**, *256*, 127053
- [ 13 ] Dechnik J., Gascon J., Doonan C. J., Janiak C., Sumbly C. J., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **2017**, *56*(32), 9292—9310
- [ 14 ] Cheng Y. D., Ying Y. P., Japip S., Jiang S. D., Chung T. S., Zhang S., Zhao D., *Adv. Mater.*, **2018**, *30*(47), e1802401
- [ 15 ] Yang Z. Q., Wu Z. J., Peh S. B., Ying Y. P., Yang H., Zhao D., *Engineering*, **2023**, *23*, 40—55
- [ 16 ] Zhang K. C., Ma F. G., Wu Y. L., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *471*, 144549
- [ 17 ] Lin Y. Q., Wu H. C., Yasui T., Yoshioka T., Matsuyama H., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**, *11*(20), 18782—18796
- [ 18 ] Zhao Z. Y., Jiang J. W., *J. Membr. Sci.*, **2020**, *608*, 118173
- [ 19 ] Elakkiya S., Arthanareeswaran G., *Environ. Res.*, **2022**, *204*, 112408
- [ 20 ] Khalil I. E., Fonseca J., Reithofer M. R., Eder T., Chin J. M., *Coord. Chem. Rev.*, **2023**, *481*, 215043
- [ 21 ] Ding M. L., Cai X. C., Jiang H. L., *Chem. Sci.*, **2019**, *10*(44), 10209—10230
- [ 22 ] Wang Q., Astruc D., *Chem. Rev.*, **2019**, *120*(2), 1438—1511
- [ 23 ] Goh S. H., Lau H. S., Yong W. F., *Small*, **2022**, *18*(20), e2107536
- [ 24 ] Jiang X., Li S. W., He S. S., Bai Y. P., Shao L., *J. Mater. Chem. A*, **2018**, *6*(31), 15064—15073
- [ 25 ] Tanvidkar P., Appari S., Kuncharam B. V. R., *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.*, **2022**, *21*(2), 539—569
- [ 26 ] Kalaj M., Bentz K. C., Ayala S. Jr., Palomba J. M., Barcus K. S., Katayama Y., Cohen S. M., *Chem. Rev.*, **2020**, *120*(16), 8267—8302
- [ 27 ] Liu T. Y., Yuan H. G., Liu Y. Y., Ren D., Su Y. C., Wang X. L., *ACS Nano*, **2018**, *12*(9), 9253—9265
- [ 28 ] Zhang R., Ji S. L., Wang N. X., Wang L., Zhang, G. J., Li J. R., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **2014**, *53*(37), 9775—9779
- [ 29 ] Li R. Y., Chen J. P., Freger V., *J. Membr. Sci.*, **2023**, *671*, 121357
- [ 30 ] Zhu J. Y., Hou J. W., Yuan S. S., Zhao Y., Li Y., Zhang R. J., Tian M. M., Li J., Wang J., Bruggen B. V. D., *J. Mater. Chem. A*, **2019**, *7*(27), 16313—16322
- [ 31 ] Marti A. M., Venna S. R., Roth E. A., Culp J. T., Hopkinson D. P., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, *10*, 24784—24790
- [ 32 ] Ma Q. L., Yin P. F., Zhao M. T., Luo Z. Y., Huang Y., He Q. Y., Yu Y. F., Liu Z. Q., Hu Z. M., Chen B., Zhang H., *Adv. Mater.*, **2019**, *31*(17), e1808249
- [ 33 ] Silva B. C. E., Irikura K., Frem R. C. G., Zanon M. V. B., *J. Electroanal. Chem.*, **2021**, *880*, 114856
- [ 34 ] Yang H. C., Liu F., Li H. N., Zhang C., Darling S. B., Xu Z. K., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, *33*, 2304580
- [ 35 ] Tao F. T., Zhang Y. L., Cao S. J., Yin K., Chang X. T., Lei Y. H., Fan R. H., Dong L. H., Yin Y. S., Chen X. B., *Mater. Today Energy*, **2018**, *9*, 285
- [ 36 ] Bae K., Kang G., Cho S. K., Park W., Kim K., Padilla W. J., *Nat. Commun.*, **2015**, *6*, 10103

(Ed.: W, K, M)