

二氧化锰/生物炭复合光热材料的合成及其在太阳能界面水蒸发中的性能

凡胜强^{1,2}, 周书豪¹, 钱君超¹, 马汝广¹, 吴正颖¹

(苏州科技大学 1. 材料科学与工程学院, 江苏省环境功能材料重点实验室; 2. 化学与生命科学学院, 苏州 215009)

摘要: 太阳能驱动界面水蒸发技术作为一种高效、可持续产生清洁水的重要方法, 是材料和环境领域的研究热点之一。然而, 低成本、高转换效率的光热材料是制约该技术广泛应用的关键。本研究以山茶花花瓣衍生的生物炭(CC)为载体和结构导向剂, 在 CC 上均匀生长二氧化锰(HMO), 合成了结晶度低且缺陷丰富的 HMO/CC 复合材料。该材料在 250~2500 nm 光谱范围内表现出 94.2% 的高光吸收率和优于单一 HMO 的光热转化能力。HMO/CC 与混合纤维素滤膜(MCE)组装成的 HMO/CC-MCE 光热膜, 呈现出极佳的亲水性以及光热转换性能, 在 $1.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 太阳光照射下, 蒸发速率达到 $1.505 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 蒸发效率为 92.47%, 高于 HMO-MCE (85.00%) 和 CC-MCE (82.64%), 为无膜纯水的 9.9 倍。将 HMO/CC 与聚氨酯(PU)海绵相结合所构建的 HMO/CC-PU 三维蒸发器, 在 $1.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 太阳光照射下, 600 s 内表面温度升高至 68.3°C , 蒸发速率高达 $2.274 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。同时, 该蒸发器在模拟海水中循环测试 15 次依旧保持 $2.271 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率。本研究以生物质衍生生物炭为模板构建复合材料, 为新型光热材料的开发及其在海水淡化及废水处理领域的应用提供了有益参考。

关键词: 二氧化锰/生物炭; 光热材料; 太阳能驱动界面水蒸发; 海水淡化

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)07-0974-09

Manganese Dioxide/Biocarbon Composite Photothermal Material: Synthesis and Performance in Solar Interface Water Evaporation

FAN Shengqiang^{1,2}, ZHOU Shuhao¹, QIAN Junchao¹, MA Ruguang¹, WU Zhengying¹

(1. Jiangsu Key Laboratory for Environment Functional Materials, School of Materials Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. School of Chemistry and Life Science, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Solar-driven interfacial water evaporation technology, as an important approach for efficiently and sustainably generating clean water, is one of the hot research topics in the fields of materials and environment. However, the lack of low-cost and high-efficiency photothermal materials remains a key challenge for the

收稿日期: 2025-09-19; 收到修改稿日期: 2025-12-05; 网络出版日期: 2026-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(52172058); 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目(XTCXSZ2022-13); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX24_1893)

National Natural Science Foundation of China (52172058); Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center for Water Treatment Technology and Materials Project (XTCXSZ2022-13); Jiangsu Provincial Graduate Student Research and Practice Innovation Plan Project (SJCX24_1893)

作者简介: 凡胜强(1998-), 男, 硕士研究生. E-mail: fanshengqiang0127@126.com

FAN Shengqiang (1998-), male, Master candidate. E-mail: fanshengqiang0127@126.com

通信作者: 马汝广, 教授. E-mail: ruguangma@usts.edu.cn; 吴正颖, 教授. E-mail: zywu@mail.usts.edu.cn

MA Ruguang, professor. E-mail: ruguangma@usts.edu.cn; WU Zhengying, professor. E-mail: zywu@usts.edu.cn

widespread application of this technology. In this study, manganese dioxide (HMO) was uniformly grown onto camellia-derived biocarbon (CC) as the support and structure-directing agent, forming a manganese dioxide/biocarbon (HMO/CC) composite with low crystallinity and rich in defects. The resulting HMO/CC exhibits a high solar absorption efficiency of 94.2% in the 250–2500 nm range, as well as superior photothermal conversion capability to single-component HMO. The HMO/CC-MCE photothermal membrane assembled from this composite and mixed cellulose ester (MCE) filter membrane displays excellent hydrophilicity and photothermal conversion capability, achieving an evaporation rate of $1.505 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and an evaporation efficiency of 92.47% under $1.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ solar irradiation, which is better than those of HMO (85.00%) and CC (82.64%), and 9.9 times that of pure water without membrane. A three-dimensional HMO/CC-PU evaporator was then fabricated by integrating HMO/CC with polyurethane (PU) sponge, which can achieve a surface temperature of $68.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ within 600 s and an enhanced evaporation rate of $2.274 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Additionally, the device maintains a stable evaporation rate of $2.271 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ after 15 cycles in a model seawater. In this study, the approach using biomass-derived carbon as a template to construct composites provides a valuable reference for the development of novel photothermal materials and their applications in desalination and wastewater treatment.

Key words: manganese dioxide/biocarbon; photothermal material; solar-driven interfacial water evaporation; desalination

地球表面约四分之三的面积被水覆盖, 但其中大部分是海水, 只有 2.5% 是淡水, 人类能直接使用的淡水资源非常有限^[1]。而且淡水资源的分布极不均衡, 全球超过三分之一的人口生活在缺水地区, 且这一数字仍在增长^[2]。除此之外, 过度开发、污染和气候变化, 使得淡水资源变得更加紧缺^[3]。海水淡化是缓解这一问题的重要方法之一^[4]。近年来, 新兴的太阳能驱动界面水蒸发(Solar-driven interfacial water evaporation, SDIWE)技术在海水脱盐、污水净化等领域引起广泛关注^[5]。该技术利用光热材料在气-液界面将太阳能高效转化为热能, 并通过加热将水变成水蒸气, 从而持续产生清洁水^[5]。

与传统的水蒸发需要加热整个水体不同, SDIWE 技术将太阳能辐射后产生的热量最大程度地限定在气-液界面处, 从而大大提高了太阳能的利用率。不仅如此, SDIWE 技术用于海水脱盐时, 不产生温室气体, 装置简单, 从而成为材料和环境领域的研究热点^[6]。具有广谱光吸收能力以及高效光热转换效率的光热材料是 SDIWE 装置的关键组成部分。目前, 可用于 SDIWE 技术的光热材料主要有金属纳米粒子、半导体材料(如过渡金属氧化物/硫化物/碳化物等)、碳基材料、聚合物及其复合材料等。其中, 半导体材料因种类多、成本低、稳定性好、光热转换效率高等优点备受重视^[6]。 MnO_2 作为一种稳定的黑色无机半导体光热材料, 具有较宽的光谱吸收能力和良好的光热转换效率, 被广泛用于光热水蒸发、光热诊疗、光热催化等领域^[7]。但单一 MnO_2 纳米颗

粒长时间使用存在易团聚、稳定性和光热性能下降的问题。因此, 将 MnO_2 与其它材料复合可进一步提升材料的光热性能^[8-11]。

基于此, 本研究以山茶花衍生炭为基底, 通过水热共组装的方法, 在生物炭上生长 MnO_2 , 构建了 MnO_2 /生物炭(HMO/CC)复合材料。山茶花不仅具有来源广、廉价易得、可再生的优点, 而且能够诱导氧化物、硫化物的定向生长, 抑制晶粒长大^[12]。本研究利用多种技术对所合成材料的微观结构、元素组成、光吸收能力、亲疏水性等进行了测试表征。然后, 将 HMO/CC 用于室内搭建的水蒸发装置, 系统研究了该材料的光热转化和水蒸发性能。针对传统二维蒸发器孔道在海水蒸发时易被上层积累盐分堵塞的问题, 本研究进一步将 HMO/CC 与聚氨酯(PU)海绵复合, 制备了具有多孔结构的 HMO/CC-PU 气凝胶蒸发器, 并测试了该蒸发器在正常水体和模拟海水中的性能, 以期光热材料在海水淡化及废水处理领域的应用提供技术支持。

1 实验方法

1.1 材料的制备

1.1.1 HMO/CC 复合材料

山茶花花瓣采摘于苏州科技大学校园, 经过洗涤、乙醇水溶液浸渍处理, 脱除有机物和色素。晾干后, 将其在 $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 氮气气氛中煅烧 2 h, 获得山茶花

衍生炭(CC)。将 KMnO_4 (0.36 g)、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0.6 g) 分别溶于 35 mL 去离子水中, 混合后转移至反应釜, 并加入上述 CC (0.5 g)。随后, 将混合物在 140 °C 下水热反应 2 h 后, 取出、自然冷却、过滤、洗涤并烘干, 得到二氧化锰/生物炭复合材料, 标记为 HMO/CC。该反应中, 未加入 CC 所合成的材料为 MnO_2 , 标记为 HMO。同时, 利用相同的方法, 以包菜为原料制备了相应的衍生炭(BC), 并且合成了黑色 TiO_{2-x} ^[13] 作为对比样品。此外, 购于阿拉丁试剂有限公司的活性炭(AC)、 Fe_3O_4 和炭黑(CB)也用作对比样品。

1.1.2 HMO/CC-MCE 光热膜

在 80 mL 去离子水中加入 2.0 g 聚乙烯亚胺(PEI) 和 0.16 g HMO/CC, 搅拌 2 h, 得到均匀分散液。然后用直径 50 mm、孔径 0.22 μm 的混合纤维素滤膜(MCE)真空抽滤, 得到 HMO/CC-MCE 光热膜, 在室温自然晾干 12 h, 用于后续性能测试。

1.1.3 HMO/CC-PU 气凝胶

(1)凝胶前体溶液制备: 将 0.1 g 聚乙烯醇(PVA) 溶解于 10 mL 去离子水中, 加热至 90 °C, 搅拌 20 min; 随后加入 0.1 g 海藻酸钠(SA), 并转移至 40 °C 水浴中搅拌 30 min; 最后加入 0.3 g HMO/CC, 搅拌 2 h, 获得均匀黑色溶液。

(2)HMO/CC-PU 气凝胶的制备如图 S1 所示。首先将预处理后的 PU 海绵(2 cm×2 cm×1 cm, 去离子水和乙醇洗涤烘干)浸渍于上述黑色溶液中, 完全浸润后将其放入 1%(质量分数) CaCl_2 溶液中, 静置 30 min 后再于 2%(质量分数)戊二醛溶液中浸渍 2 h。随后, 将负载了 HMO/CC 的 PU 海绵捞出, 挤出多余溶液, 再用去离子水反复洗涤。洗净的海绵于 -20 °C 冷冻干燥 12 h, 再解冻 12 h, 此过程重复 3 次, 得到 HMO/CC-PU 气凝胶。

单一组分的 CC 和 HMO 气凝胶(CC-PU 和 HMO-PU)的制备过程与 HMO/CC-PU 相同。

1.2 材料表征方法

材料的表征方法详见补充材料 S1。

1.3 水蒸发性能测定

本研究搭建了界面式蒸发装置, 以测定不同材料的水蒸发性能。该装置由三部分组成: 光吸收层、隔热层和水传输层。其中, 光吸收层由 HMO/CC-MCE 或 HMO/CC-PU 构成; 隔热层采用聚苯乙烯泡沫; 水传输层采用高亲水性无尘纸。以氙灯模拟太阳光照, 并使用光功率计精确校准实际光照强度(1 个太阳光照=1.0 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)。在实验过程中, 通过电子天平记录水质量变化, 利用红外热像仪监测光

热层表面温度的变化, 并根据监测数据计算蒸发速率。在模拟海水的实验中, 以海盐配制模拟海水, 质量分数分别为 3.5%、10%、15%和 20%。真实海水取自地处东经 121°22'、北纬 32°36' 的黄海。材料蒸发性能的计算方法详见补充材料 S2。

2 结果和讨论

2.1 HMO/CC 复合材料的合成与结构

图 1(a~c)给出了 CC、HMO 以及 HMO/CC 的扫描电镜(SEM)照片。CC 表面光滑, 呈现出比较规则的波纹状褶皱形貌(图 1(a))。这是由花瓣在热处理过程中生物质碳化和细胞收缩导致。水热合成的 HMO 为长纤维状, 长 0.3~0.8 μm 、宽 15 nm(图 1(b))。HMO/CC 由长纳米纤维状 MnO_2 与纳米颗粒组装而成(图 1(c))。

图 1(d)为 HMO 的透射电镜(TEM)照片, 进一步揭示了 MnO_2 的纳米纤维状形貌。其中纤维长 0.3~0.6 μm , 宽 10~15 nm, 与 SEM 结果一致, 也与文献[14]报道的 $\alpha\text{-MnO}_2$ 的形貌一致。HMO/CC 的 TEM 照片(图 1(e, f))显示, 在 HMO/CC 的边缘区域覆盖了一层均匀的碳层, MnO_2 纳米纤维与碳形成较为致密的复合界面。

HMO/CC 的高倍率 TEM (HRTEM)照片(图 1(g))显示纳米纤维具有明显的晶格条纹, 晶格间距 0.69 nm 对应 $\alpha\text{-MnO}_2$ 的(110)晶面。从选区电子衍射(SAED)图案(图 1(h))中可以看到明显的多晶点阵环, 对应 MnO_2 的(310)、(400)、(211)和(411)晶面点阵。同时, 还能看到无定型碳对应的弥散非晶环。利用能谱仪(EDS)分析元素分布情况, 从图 1(i)可以看出, Mn、O 和 C 元素均匀分布于 HMO/CC 中, 进一步确认 C 与 MnO_2 纳米线紧密复合。

图 2(a)为 CC、HMO、HMO/CC 的 X 射线衍射(XRD)谱图。CC 在 $2\theta=20^\circ\sim 30^\circ$ 之间出现一个包峰, 与碳的无定形结构特征相符。HMO 在 $2\theta=12.7^\circ$ 、 18.1° 、 28.8° 、 37.5° 、 41.9° 、 49.8° 、 56.3° 、 60.2° 、 65.1° 和 69.7° 等处出现明显的衍射峰, 分别对应于 $\alpha\text{-MnO}_2$ 的(110)、(200)、(310)、(211)、(301)、(411)、(600)、(521)、(002)和(541)晶面, 与 MnO_2 标准卡片(PDF#44-0141)一致^[15]。HMO/CC 保留了 MnO_2 的特征峰, 但强度显著降低且略微宽化, 说明 MnO_2 的结晶度有所下降。这可能与材料中的缺陷有关^[16], 也可能与碳基体的分散作用或界面应力有关。

图 2(b)为 CC、HMO 和 HMO/CC 的拉曼光谱图。CC 在 1361 和 1603 cm^{-1} 处出现两个明显的振动峰,

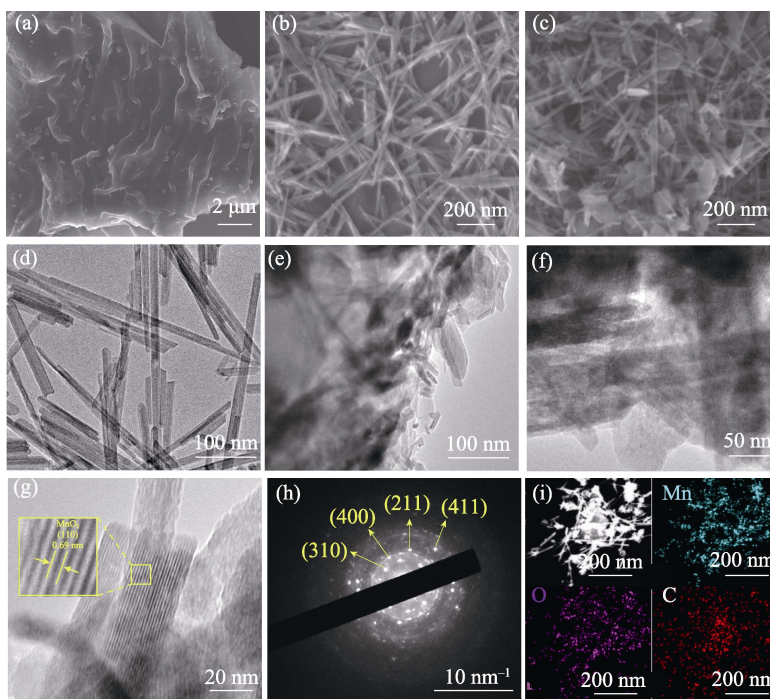


图 1 CC、HMO 和 HMO/CC 的 SEM 和 TEM 表征

Fig. 1 SEM and TEM characterizations for CC, HMO and HMO/CC

(a-c) SEM images of (a) CC, (b) HMO and (c) HMO/CC; (d-f) TEM images of (d) HMO and (e, f) HMO/CC;
(g) HRTEM image, (h) SAED pattern and (i) EDS elemental mappings of HMO/CC

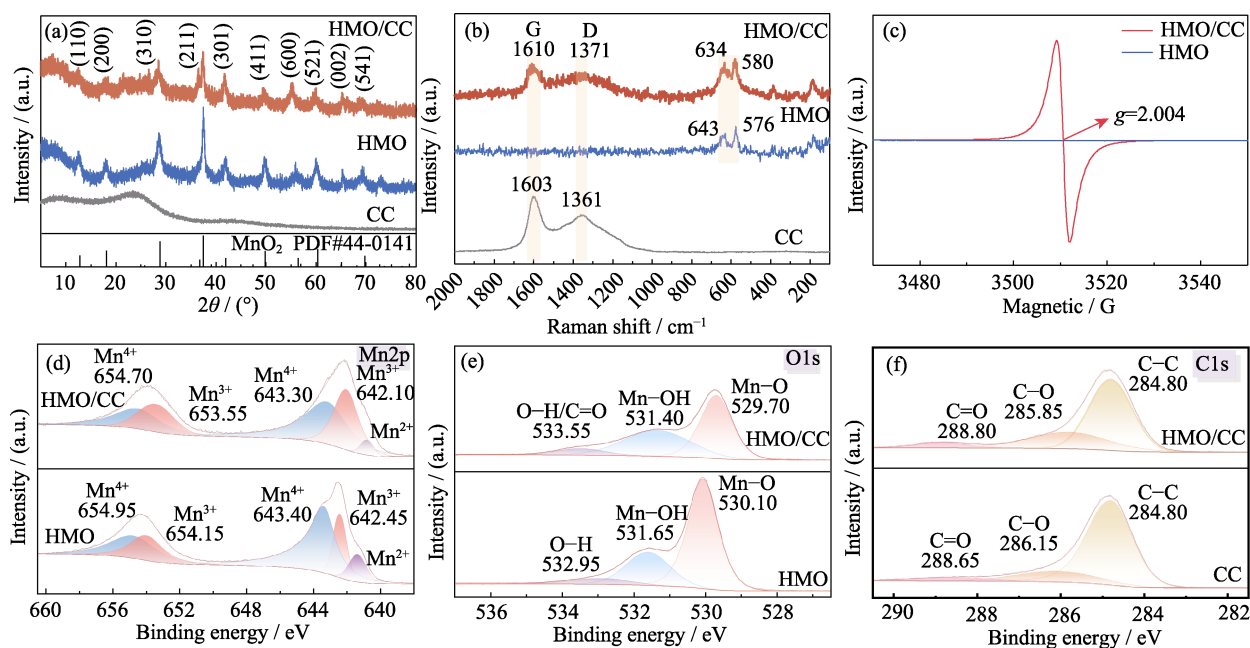


图 2 CC、HMO 和 HMO/CC 的 XRD、拉曼、EPR 和 XPS 结果

Fig. 2 XRD, Raman, EPR and XPS results for CC, HMO and HMO/CC

(a) XRD patterns and (b) Raman spectra of CC, HMO and HMO/CC; (c) EPR results of HMO and HMO/CC; (d) Mn2p and
(e) O1s XPS spectra of HMO and HMO/CC; (f) C1s XPS spectra of CC and HMO/CC. Colorful figures are available on website

归属碳材料的 D 带和 G 带。D 带代表碳材料的缺陷或无序结构(sp^3 杂化), 源于生物质热解过程中炭层的不完全石墨化; G 带对应石墨化碳的平面振动(sp^2 杂化), 源于材料中存在的少量有序石墨微晶。通过

计算, CC 的 D 带与 G 带强度比(I_D/I_G)为 0.84, 说明 CC 含有部分石墨化的多孔碳或含缺陷的碳基材料。纯 HMO 在 643 和 576 cm^{-1} 处出现拉曼振动峰, 分别对应典型斜方锰矿(α - MnO_2)中 Mn-O 骨架的对称

伸缩振动(A_{1g} 模式)和 Mn-O-Mn 桥氧的非对称振动(E_g 模式)^[17]。与 CC 复合后, HMO/CC 分别在 580、634、1371 和 1610 cm^{-1} 处观测到振动峰。位于 1371 和 1610 cm^{-1} 处的两个峰为碳的 D 带和 G 带。与纯 CC 相比, HMO/CC 中的碳峰向高波数方向偏移约 7 cm^{-1} , 说明碳层与 MnO_2 之间存在相互作用^[18]。此外, HMO/CC 中的 MnO_2 与纯 HMO 相比, 峰位发生偏移(643→634 cm^{-1} , 576→580 cm^{-1}), 暗示材料中 MnO_2 晶格略有畸变。结合图 2(a)的 XRD 结果, HMO/CC 的结晶度下降意味着材料中非晶相或缺陷增多, 导致晶体的周期性排列受到扰动。非晶相或缺陷会增加晶格畸变, 进一步影响拉曼峰位。

室温电子顺磁共振(EPR)谱(图 2(c))显示, HMO 在整个测试区间内无明显信号, 而 HMO/CC 在 $g=2.004$ 处有明显的 EPR 信号。该处信号通常与氧空位(V_O)、界面缺陷或表面自由基相关^[19]。这说明在复合材料构建过程中, 引入碳元素使得体系中缺陷位点数量增多。而没有引入碳的 HMO, 其晶格较为完整, 缺陷浓度较低。结合 X 射线光电谱(XPS)分析可知, 引入碳可在材料合成过程中促进高价态锰(Mn^{4+})向低价态锰(Mn^{3+} 、 Mn^{2+})还原, 从而诱导氧空位的生成。根据报道^[20], 缺陷有助于调控载流子行为和增强局部光吸收, 从而使弛豫到能带边缘的电子-空穴对通过热化过程将额外能量转化为热能。

利用 XPS 进一步揭示了 CC、HMO 和 HMO/CC 的元素组成和化学状态。 $\text{Mn}2p$ XPS 精细谱(图 2(d))显示, HMO/CC 中结合能位于 643.30 和 654.70 eV 的峰对应于 Mn^{4+} , 642.10 和 653.55 eV 处的峰对应于 Mn^{3+} ^[21-22]。而 HMO 对应于 Mn^{4+} 的峰出现在 643.40 和 654.95 eV 处, 对应于 Mn^{3+} 的峰位于 642.45 和 654.15 eV 处。与单一 HMO 相比, HMO/CC 中 Mn 的化学位移并不明显, 但 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 比例更高。

如图 2(e)所示, $\text{O}1s$ XPS 光谱图可以拟合为三

种形式的氧: 晶格氧(Mn-O , O^{2-})、缺陷氧(Mn-OH , 表面低配位氧)、吸附态氧或有机氧物种, 分别位于 529.80、531.80 和 533.30 eV 左右^[23]。HMO/CC 中晶格氧结合能(529.70 eV)比纯 HMO (530.10 eV)略低, 这可能是因为缺陷增加了 Mn-O 键晶格氧的电子云密度, 从而减小了其结合能。同时, HMO/CC 位于 531.40 eV 左右的峰面积占比相对于纯 HMO 显著增加。结合上文的 EPR 以及 $\text{Mn}2p$ XPS 结果可以推断, HMO/CC 表面存在较高浓度的氧空位^[24]。这是因为材料高温煅烧时 Mn-O 键断裂, 晶格氧逸出^[24-25]。此外, HMO/CC 的 C=O/O-H 峰从 532.95 eV (HMO 的 O-H 峰)移动到 533.55 eV, 偏移了 0.6 eV, 这与 HMO/CC 中表面缺陷以及 Mn 与 O=C 键的相互作用有关。在图 2(f)中, HMO/CC 的高分辨率 $\text{C}1s$ XPS 光谱图可以拟合成 C-C、C-O、C=O 三个峰, 分别位于 284.80、285.85 和 288.80 eV, 证明了 MnO_2 与 C 成功结合^[17]。与 CC 相比, HMO/CC 中 $\text{C}1s$ 结合能峰的偏移可能与 Mn-O-C 键的形成有关。

2.2 HMO/CC 复合材料的光热性能及润湿性

光热材料的光吸收和转换能力是决定蒸发温度及蒸发性能的关键因素。本研究测试了 CC、HMO 和 HMO/CC 的紫外-可见-近红外(UV-Vis-NIR)吸收和反射光谱图(图 3(a)、图 S2(a))。材料光吸收率的计算方法如补充材料 S3 所示, 相应的计算结果见表 S1, 吸收率见图 S2(b)。HMO/CC 在 UV-Vis-NIR 范围内的光吸收率达到 94.2%, 光吸收性能整体优于单一 CC 和 HMO(图 3(a))。HMO/CC 在紫外区(<400 nm)的光吸收率(6.4%)与 CC 相同, 比纯 HMO (5.9%)略高; 在可见光区(400~760 nm), HMO/CC 的光吸收率为 47.0%, 高于 CC (46.6%)和纯 HMO (44.8%); HMO/CC 在近红外波段(>760 nm)的光吸收率(40.8%)也明显高于纯 HMO (40.2%)和 CC (40.0%)。这主要是 CC 与 MnO_2 之间的协同作用

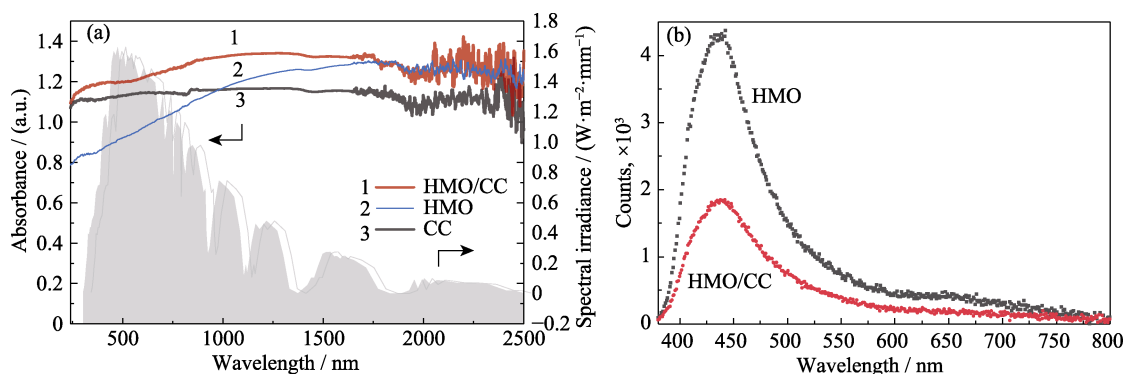


图 3 CC、HMO 和 HMO/CC 的光学性能

Fig. 3 Optical properties of CC, HMO and HMO/CC

(a) UV-Vis-NIR absorption spectra of CC, HMO and HMO/CC; (b) Fluorescence emission spectra of HMO and HMO/CC

所致。HMO/CC 中丰富的缺陷提升了电子传输效率, 促进了材料对整个 UV-Vis-NIR 区域内光的吸收^[26]。图 3(b)为 HMO/CC 和 HMO 的荧光发射光谱图(激发波长为 360 nm)。与单一 HMO 相比, HMO/CC 在 443 nm 处的荧光发射峰强度降低约 58%。这说明 HMO/CC 中光生载流子的复合减少, 非辐射弛豫增加, 有利于材料的光热转化^[8, 26]。

为了测试材料的水蒸发性能, 本研究将 HMO/CC 与吸湿性 PEI 结合, 制备出适合 SDIWE 的 HMO/CC-MCE 光热膜。图 S3(a~f)为空白 MCE 膜($\phi 4.0$ cm 的圆)和 HMO/CC-MCE 膜(材料覆盖部分 $\phi 3.9$ cm)在不同时间点的水接触角的光学图像。如图所示, 在接触空白 MCE 膜约 21 s, 水滴轮廓逐渐收缩并最终被 MCE 膜完全吸收, 说明 MCE 膜具有一定的亲水性(图 S3(a~c))。与之相比, HMO/CC-MCE 光热膜表现出极强的亲水性能, 水滴与该膜表面接触仅 0.01 s 便立即消失(图 S3(d~f))。这是由于 HMO/CC 与 PEI 均具有良好的亲水性。如图 S3(g~i)所示, 水滴与 PEI-MCE 膜表面接触 0.4 s 后便基本消失。HMO/CC-MCE 光热膜卓越的水浸润动力学为蒸发系统的持续水输运提供了重要保障, 可有效规避传统蒸发器中因供水不足导致的效率低下问题。

图 S4(a)为干燥状态下空白 MCE 膜和 HMO/CC-MCE 光热膜表面温度随时间的变化曲线。MCE 在连续 $1.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光照 600 s 后, 表面温度从 13.6°C 逐渐上升至 18.7°C , 升温幅度较小。相比之下, HMO/CC-MCE 的升温速度很快, 表面温度在 100 s 内迅速上升至 51.1°C , 并于 600 s 稳定在 61.2°C , 比纯 MCE 膜表面温度高 42.5°C , 呈现优异的光热转换能力。

图 S4(b)为湿润环境中空白 MCE 膜与 HMO/CC-MCE 光热膜的温度响应结果。在持续 800 s 的光照过程中, HMO/CC-MCE 光热膜表现出快速的温度响应, 最终稳定在 41.3°C , 而空白 MCE 膜仅为 29.8°C 。值得注意的是, 与干燥状态相比, 湿润条件下 HMO/CC-MCE 的最终温度降低了 19.9°C , 这是由于部分能量被转化为水的汽化潜热。尽管如此, HMO/CC-MCE 光热膜仍比 MCE 膜高 11.5°C , 充分验证了 HMO/CC 在实际蒸发应用中的高效光热转换能力。图 S4(c)为使用红外热成像仪实时记录的两种光热膜在湿润状态下表面温度变化的图像, 可以更直观地显示 HMO/CC-MCE 的快速升温过程, 进一步证明了 HMO/CC 具有良好的光热转换能力。

2.3 HMO/CC 复合材料的水蒸发性能

为了探究复合材料与单一材料之间蒸发性能的

差异, 本研究系统考察了无膜纯水以及 MCE、CC-MCE、HMO-MCE、HMO/CC-MCE 四种膜在 1 个太阳光照($1.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)下的蒸发性能。图 4(a, b)中, 与 CC-MCE 和 HMO-MCE 相比, HMO/CC-MCE 的水质量损失最大、蒸发速率最高。在 1 个太阳光照下, HMO/CC-MCE 的蒸发速率为 $1.505 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 显著高于 HMO-MCE ($1.433 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)、CC-MCE ($1.361 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)、MCE ($0.342 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)和无膜纯水($0.250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), 分别是 HMO-MCE、CC-MCE、MCE 和无膜纯水的 1.05、1.11、4.40 和 6.02 倍。此外, HMO/CC-MCE 的蒸发效率为 92.47%, 超过了 HMO-MCE (85.00%)、CC-MCE (82.64%)、MCE (16.14%)和无膜纯水(9.29%)。与其它常见光热材料制备的光热膜相比, HMO/CC 也展现出一定优势, 蒸发速率高于 TiO_{2-x} ($1.415 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)、 Fe_3O_4 ($1.320 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)和 CB ($1.490 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) (图 S5(a))。为进一步考察碳基底对 HMO/CC 蒸发性能的影响, 采用 BC、AC 与 HMO 复合所形成的材料(HMO/BC、HMO/AC), 以及 CC 与 HMO 物理混合材料(HMO-CCmix)作为对比, 并将这些材料与 MCE 组装后用于水蒸发。如图 S5(b)所示, 由 HMO/BC、HMO/AC 和 HMO-CCmix 组成的光热膜蒸发速率分别为 1.433、1.483 和 $1.415 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。这说明由于山茶花特殊的细胞结构, 具有比包菜所得 HMO/BC 更佳的性能。同时, 以活性炭为基底所合成的 HMO/AC 材料也有良好的水蒸发性能。而机械混合样品的水蒸发效率低于原位生长所形成的材料。

图 4(c, d)展示了光照强度对水蒸发性能的影响。随着光照强度的增大, 体系水质量损失率显著提升。具体而言, 在 1.0、2.0 和 $3.0 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照条件下, 基于 HMO/CC 的光热膜水蒸发速率分别达到 1.505、2.412 和 $3.057 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 进一步证实了光照强度对水蒸发性能的正向调控作用。尽管蒸发速率随光强增加持续提高, 体系的蒸发效率却呈现轻微下降趋势。这可能是因为当光功率密度超过 1 个太阳光时, HMO/CC-MCE 对过剩光能的吸收和利用效率略有降低, 导致部分能量未被有效转化为热能^[27]。该结果说明, 在更高光照强度条件下, 优化材料的光吸收能力或热局域化设计将有助于进一步提升蒸发效率。

2.4 HMO/CC-PU 的光热和水蒸发性能

提高蒸发速率对于促进太阳能驱动界面式海水淡化的应用极为重要。目前由于二维光热蒸发器的蒸发速率理论极限较低, 具有三维多孔结构的凝胶被开发应用于太阳能界面水蒸发, 以期突破二维器

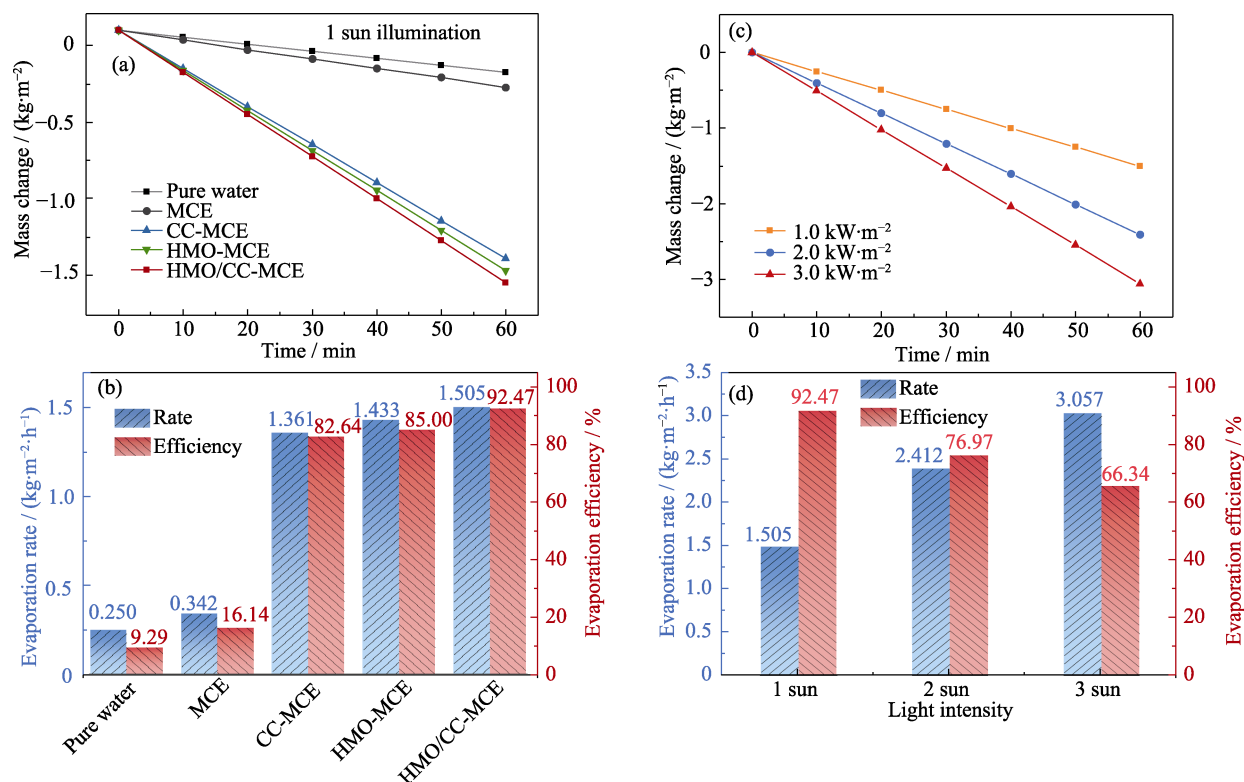


图 4 纯水、MCE、CC-MCE、HMO-MCE 和 HMO/CC-MCE 膜的水蒸发性能

Fig. 4 Water evaporation performance of pure water, MCE, CC-MCE, HMO-MCE and HMO/CC-MCE membranes (a) Mass changes of water, (b) evaporation rates and efficiency of pure water, MCE, CC-MCE, HMO-MCE and HMO/CC-MCE membranes at 1 sun illumination; (c) Mass changes of water, (d) evaporation rates and efficiency of HMO/CC-MCE membrane under different light illuminations. Colorful figures are available on website

件的理论极限。已有报道^[28]显示,凝胶能够调节水分子状态,通过水分子和聚合物链之间的氢键相互作用降低蒸发焓,减少水分子逃逸所需的能量,降低水蒸发时的“能量壁垒”,从而突破超出 1 个太阳光照强度下蒸发速率的理论极限。同时,凝胶基底稳定且用途广泛,可以容纳用于加速太阳能水蒸发的光热材料^[29]。因此,为拓宽材料的应用,本研究利用 SA、PVA、CaCl₂、戊二醛交联,将 HMO/CC 负载到 PU 海绵上,再反复冷冻制成 HMO/CC-PU 气凝胶。

如图 5(a)所示,在 1.0 kW·m⁻² 光照条件下,PU、CC-PU、HMO-PU 和 HMO/CC-PU 四种气凝胶在干燥状态下均表现出快速的光热响应特性,其中 HMO/CC-PU 具有最优异的温升性能,达到稳定状态时的表面温度(600 s 内表面温度升高至 68.3 °C)显著高于其他对比样品。在湿润状态下的测试结果(图 5(b))显示,四种气凝胶在蒸发过程中均保持良好的光热响应,而 HMO/CC-PU 在整个蒸发过程中始终维持最高的表面温度。这充分证实了 HMO/CC 在光热转换方面的独特优势。在 1.0 kW·m⁻² 光照条件下,HMO/CC-PU 气凝胶展现出显著优于其他样品的

水蒸发性能,其累计质量损失曲线斜率最大(图 5(c))。各凝胶样品蒸发速率呈现明显梯度(图 5(d)): 纯水 (0.270 kg·m⁻²·h⁻¹) < PU (1.830 kg·m⁻²·h⁻¹) < CC-PU (1.973 kg·m⁻²·h⁻¹) < HMO-PU (2.116 kg·m⁻²·h⁻¹) < HMO/CC-PU (2.274 kg·m⁻²·h⁻¹)。HMO/CC-PU 的蒸发速率分别是 HMO-PU、CC-PU 和 PU 的 1.07、1.15 和 1.24 倍,更达到纯水蒸发速率的 8.42 倍^[30]。

图 5(e)为 HMO/CC-PU 在不同光照强度条件下的蒸发性能。如图所示,HMO/CC-PU 的水质量损失率随光照强度增加而增大,在 0.5、1.0 和 1.5 kW·m⁻² 光照强度下分别为 1.836、2.274 和 2.657 kg·m⁻²·h⁻¹,达到 2.0 kW·m⁻² 时,蒸汽剧烈逸出,蒸发速率达到 3.168 kg·m⁻²·h⁻¹。水蒸发量的大幅度提高除与光辐射强度的增加有关,也与材料的高光热转化效率、保温装置对热损失的抑制、三维蒸发器的多孔结构等因素有关^[31-32]。同时,HMO/CC-PU 在光照强度为 0.5 kW·m⁻² 时的蒸发效率高 231.2%,与此前 Lu 等^[33]报道的二维聚吡咯修饰的海绵蒸发效率(249%)接近。在整个界面蒸发装置中,光热材料 HMO/CC 的主要作用是将辐射光尽可能转变成热,并将其锁定在蒸发界面。另一方面蒸发效率与 PU 的结构特

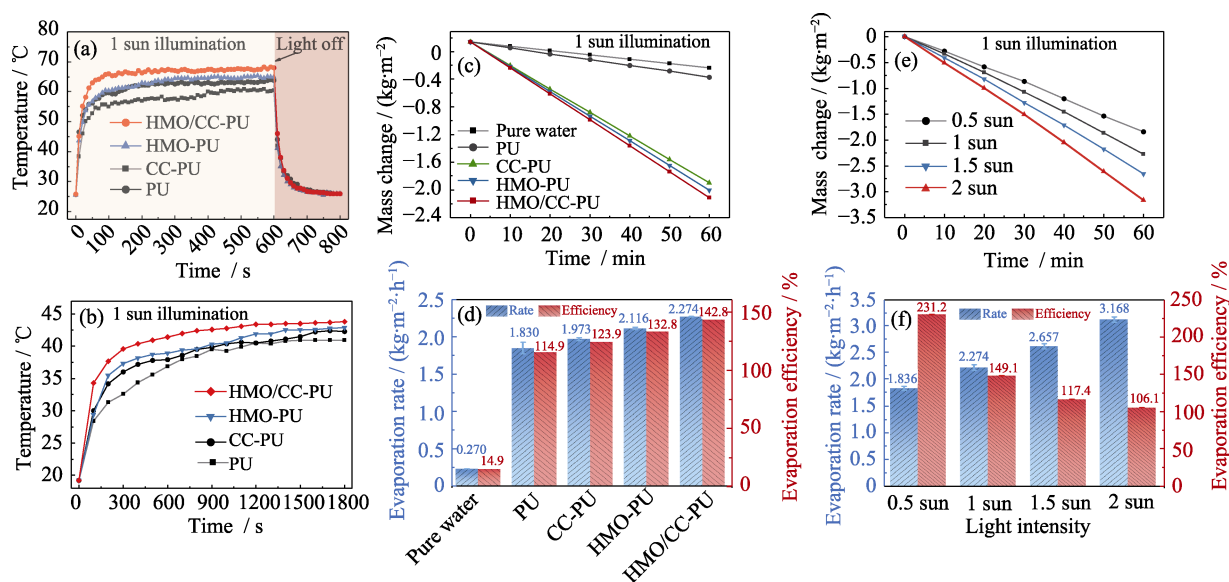


图 5 PU、CC-PU、HMO-PU 和 HMO/CC-PU 气凝胶的光热和水蒸发性能

Fig. 5 Photothermal and water evaporation performance of PU, CC-PU, HMO-PU and HMO/CC-PU sponges

(a, b) Surface temperature evolutions of PU, CC-PU, HMO-PU and HMO/CC-PU sponges at 1 sun illumination under (a) dry and (b) wet states;

(c) Mass changes of water, (d) evaporation rates and efficiency of pure water, PU, CC-PU, HMO-PU and HMO/CC-PU sponges;

(e) Mass changes of water, (f) evaporation rates and efficiency of HMO/CC-PU sponge under different light illuminations. Colorful figures are available on website

性密不可分, PU 的三维多孔结构与低导热性既可以抑制向下传热, 又能增强与环境空气的交换。随着光照强度增加到 $1.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 水蒸发效率达到 149.1%, 进一步提高光照强度 ($1.5 \sim 2.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$), 水蒸发效率依然高于 100% (图 5(f))。根据文献[30]报道, 多数蒸发器在亚日照 (约 $0.5 \sim 1.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) 附近出现效率峰值, 继续增大光照强度, 效率受热损失与热稀释的影响而缓降, 与本研究的发现相符。图 S6(a) 为 HMO/CC-PU 蒸发器在模拟海水 (由海盐配制, 3.5% (质量分数)) 中多次循环蒸发的实验结果。由图可知, HMO/CC-PU 在 15 次循环过程中蒸发速率稳定保持在 $2.271 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。这表明本研究合成的 HMO/CC 材料具有稳定的光热性能。为进一步考察 HMO/CC-PU 的实际应用性能, 本研究将该蒸发器用于不同浓度的模拟海水以及真实海水中。HMO/CC-PU 在纯水与 3.5% (质量分数) 模拟海水中的蒸发速率基本一致, 达到 $2.271 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。随着海盐质量分数的进一步增加, HMO/CC-PU 的蒸发速率受到一定程度的影响, 在质量分数分别为 10%、15% 和 20% (质量分数) 的模拟海水中, 蒸发速率分别为 2.115、1.925 和 $1.875 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在真实海水中, HMO/CC-PU 的蒸发速率为 $1.825 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 S6(b))。为进一步测试 HMO/CC-PU 的耐盐性能, 将 1.0 g NaCl 固体放置在蒸发器表面 (图 S6(c))。在无光照条件下, 10 min 内大部分盐颗粒溶解; 40 min 后, HMO/CC-PU 表面仅有微小盐颗粒存在; 50 min

后, HMO/CC-PU 表面盐颗粒基本消失。该蒸发器显示出良好的耐盐性能, 这归因于三维凝胶蒸发器的多孔特性和高蒸发效率有效促进了盐溶解。

3 结论

本工作以 CC 为结构模板和载体, 采用水热法制备了 HMO/CC 复合材料, 实现了 HMO 纳米线在 CC 表面的均匀生长。HMO/CC 具有大量结构缺陷和极佳的亲水性, 在 UV-Vis-NIR 范围内的光吸收率达到 94.2%, 由此组装的 HMO/CC-MCE 膜在 100 s 内表面温度升至 51.1°C 。由于出色的光热转换能力, HMO/CC-MCE 在太阳能界面水蒸发实验中表现出优于单一 HMO-MCE、CC-MCE 的蒸发速率和蒸发效率, 且远高于无膜纯水。进一步将 HMO/CC 组装成三维 HMO/CC-PU 气凝胶, 该蒸发器的蒸发速率达到 $2.274 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (1 个太阳光照) 和 $3.168 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (2 个太阳光照)。该蒸发器在高浓度模拟海水以及真实海水中均表现出良好的性能, 证明了 HMO/CC-PU 应用于海水净化的巨大潜力。

补充材料

本文相关补充材料可登录 <https://doi.org/10.15541/jim20250365> 查看。

参考文献:

- [1] YANG L, LI N, GUO C, *et al.* Marine biomass-derived composite aerogels for efficient and durable solar-driven interfacial evaporation and desalination. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **417**: 128051.
- [2] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2016, **2**(2): e1500323.
- [3] ZHOU X, LI J, LIU C, *et al.* Carbonized tofu as photothermal material for highly efficient solar steam generation. *International Journal of Energy Research*, 2020, **44**(11): 9213.
- [4] ZHOU M, ZHANG L, TAO S, *et al.* Recent research advances in efficient solar-driven interfacial evaporation. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **489**: 151157.
- [5] JING X X, WU Z Y, SUN L B, *et al.* Research progress on photothermal materials and their application in solar desalination. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2024, **40**(6): 1033.
- [6] ZHOU L, LI X Q, NI G W, *et al.* The revival of thermal utilization from the sun: interfacial solar vapor generation. *National Science Review*, 2019, **6**(3): 562.
- [7] LI S, YANG X, HE Y, *et al.* Hierarchical porous aero-cryogels for wind energy enhanced solar vapor generation. *Cellulose*, 2022, **29**(2): 953.
- [8] WEI W H, HARADA K, YOSHIDA M, *et al.* Mn-MIL-100 derived MnO₂@carbon for the photo-induced thermal catalytic HCHO oxidation. *Separation and Purification Technology*, 2025, **360**: 131129.
- [9] WANG R, HAO Q, FENG J, *et al.* Enhanced separation of photogenerated charge carriers and catalytic properties of ZnO-MnO₂ composites by microwave and photothermal effect. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **786**: 418.
- [10] ZHENG N, CHEN C, TANG M, *et al.* Ultrahigh compressibility and superior elasticity carbon framework derived from shaddock peel for high-performance pressure sensing. *RSC Advances*, 2021, **11**(46): 28621.
- [11] ZHANG C, XIAO P, NI F, *et al.* Converting pomelo peel into eco-friendly and low-consumption photothermal biomass sponge toward multifunctional solar-to-heat conversion. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, **8**(13): 5328.
- [12] TIAN H, YU M, LIU X, *et al.* Plant-cell oriented few-layer MoS₂/C as high performance anodes for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 2022, **424**: 140685.
- [13] BELLARDITA M, GARLISI C, OZER L Y, *et al.* Highly stable defective TiO_{2-x} with tuned exposed facets induced by fluorine: impact of surface and bulk properties on selective UV/visible alcohol photo-oxidation. *Applied Surface Science*, 2020, **510**: 145419.
- [14] MAJIDI M R, FARAHANI F S, HOSSEINI M, *et al.* Low-cost nanowired α -MnO₂/C as an ORR catalyst in air-cathode microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 2019, **125**: 38.
- [15] YANG L W, TIAN X Y, LIU Z Y, *et al.* Performance and mechanism of lanthanum-modified MnO for defluoridation from water: the role of Mn crystal forms. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **492**: 152343.
- [16] LIU J, WANG J, ZHAO M, *et al.* Engineering defective Mn^{δ+}-O_v active structure in α -MnO₂ for efficient low-temperature CO oxidation. *Applied Surface Science*, 2024, **670**: 160602.
- [17] WANG L, GUAN S Y, WENG Y Z W, *et al.* Highly efficient vacancy-driven photothermal therapy mediated by ultrathin MnO₂ nanosheets. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(6): 6267.
- [18] JIANG J, LAI X, FANG Y, *et al.* "One stone two birds" strategy for sustainable water purification: bifunctional photothermic-catalytic manganese oxide/carbon composites enabling solar evaporation, seawater desalination and periodate activation. *Desalination*, 2025, **597**: 118402.
- [19] WANG G, XU H, LU L, *et al.* One-step synthesis of mesoporous MnO₂/carbon sphere composites for asymmetric electrochemical capacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, **3**(3): 1127.
- [20] JIA J, LI L, LIAN X, *et al.* A mild reduction of Co-doped MnO₂ to create abundant oxygen vacancies and active sites for enhanced oxygen evolution reaction. *Nanoscale*, 2021, **13**(25): 11120.
- [21] SAMPATHKUMAR P, MONICA M S, GIRIBABU K, *et al.* Influence of phase structure of MnO₂ for enhancing the electrochemical sensitivity of environmental pollutant chlortetracycline. *Next Materials*, 2024, **2**: 100079.
- [22] JIANG C, GE Y, CHEN W, *et al.* Hierarchically-structured TiO₂/MnO₂ hollow spheres exhibiting the complete mineralization of phenol. *Catalysts*, 2019, **9**(4): 390.
- [23] YANG W, PENG Y, WANG Y, *et al.* Controllable redox-induced *in-situ* growth of MnO₂ over Mn₂O₃ for toluene oxidation: active heterostructure interfaces. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, **278**: 119279.
- [24] ZHANG Y H, ZHANG S, HU N, *et al.* Oxygen vacancy chemistry in oxide cathodes. *Chemical Society Reviews*, 2024, **53**(7): 3302.
- [25] MU G, XIE H, JIAN Y, *et al.* Facile construction and enhanced catalytic activity of Co-Mn oxide with rich amorphous/crystalline interfaces for propane oxidation. *Separation and Purification Technology*, 2024, **348**: 127699.
- [26] KONG J, CHEN H, LI Z, *et al.* Synergistic defect engineering in β -MnO₂ nanorods for energy-efficient photocatalytic air purification. *Chemical Engineering Journal*, 2025, **522**: 167730.
- [27] QIU Y, LEE M, CHEN J, *et al.* Effect of light intensity on solar-driven interfacial steam generation. *Nanoscale*, 2021, **13**: 20387.
- [28] ZHOU X, ZHAO F, GUO Y, *et al.* A hydrogel-based antifouling solar evaporator for highly efficient water desalination. *Energy & Environmental Science*, 2018, **11**(8): 1985.
- [29] ZHOU X, GUO Y, ZHAO F, *et al.* Topology-controlled hydration of polymer network in hydrogels for solar-driven wastewater treatment. *Advanced Materials*, 2020, **32**(52): 2007012.
- [30] YANG Y, ZHAO Y, SHI F, *et al.* Synergistic photothermal-bubbly driving effect on MnO₂/carbon microsphere micromotors assisted by photocatalytic H₂O₂ decomposition. *Catalysis Today*, 2025, **460**: 115487.
- [31] XU Z, ZHANG L, ZHAO L, *et al.* Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still. *Energy & Environmental Science*, 2020, **13**(3): 830.
- [32] KIM H T, PHILIP L, MCDONAGH A, *et al.* Recent advances in high-rate solar-driven interfacial evaporation. *Advanced Science*, 2024, **11**(26): 2401322.
- [33] LU F, WU S L, QUAN L N, *et al.* Twisting two-dimensional photothermal sponges for boosting solar steam generation. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **474**: 145747.

补充材料

二氧化锰/生物炭复合光热材料的合成及其在太阳能界面水蒸发中的性能

凡胜强^{1,2}, 周书豪¹, 钱君超¹, 马汝广¹, 吴正颖¹

(苏州科技大学 1. 材料科学与工程学院, 江苏省环境功能材料重点实验室; 2. 化学与生命科学学院, 苏州 215009)

S1 材料表征方法

材料的晶体结构通过 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)进行分析; 形貌和精细结构通过 JEOL IT-800 型扫描电子显微镜(SEM)和 JEOL 2100F 型透射电子显微镜(TEM)进行观察; 光学性能由 Shimadzu UV-3600 型紫外-可见-近红外光谱仪(UV-Vis-NIR)和 Thermo Fisher DXR 型拉曼光谱仪(Raman)进行测试; 材料表面润湿性通过 Krüss DSA25 型接触角测量仪(CA)进行测定; 材料表面元素组成与化学状态由 Thermo Scientific K-Alpha 型 X 射线光电子能谱仪(XPS)分析获得; 荧光光谱通过 Edinburgh Horiba Fluoromax-型荧光分光光谱仪测定获得; 缺陷态分布则通过 Bruker A300 型电子顺磁共振波谱仪(EPR)进行表征。此外, 光热性能测试时, 采用 CEL-S500 模拟光源, 红外热成像图通过 FLIR E5-XT 型红外热像仪采集。

S2 材料蒸发性能的计算方法

(1)蒸发速率的计算公式如下:

$$\nu = \frac{m_{\text{loss}}}{A_L \cdot t} \quad (\text{S1})$$

其中, ν 为蒸发速率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), m_{loss} 为在太阳能蒸发过程中水质量损失(kg), A_L 为光热材料的受光面积(m^2), t 为光照时间(s)。

(2)蒸发效率 η 采用蒸发水的功率 Q_e 比上太阳辐照的功率 Q_s 获得:

$$\eta = \frac{Q_e}{Q_s} \quad (\text{S2})$$

其中, Q_e 与 Q_s 的计算公式分别为:

$$Q_e = M H_{\text{LV}} \quad (\text{S3})$$

$$Q_s = C_{\text{opt}} \cdot I \cdot A \quad (\text{S4})$$

在蒸发过程中, M 代表净水质量损失(kg), H_{LV} 代表气-液相变总焓, C_{opt} 代表光学浓度, I 代表光功率密度。在计算净水质量损失时, 需用光照条件下的水质量损失(M_{Light})减去装置在黑暗条件下所引起的水质量损失 M_{Dark} , 以消除自然水蒸发对结果的影响, 公式如下:

$$M = M_{\text{Light}} - M_{\text{Dark}} \quad (\text{S5})$$

此外, H_{LV} 为相变焓和显热之和, 公式如下:

$$H_{\text{LV}} = \Delta H_{\text{vap}} + C_p \cdot \Delta T \quad (\text{S6})$$

其中, ΔH_{vap} 代表水的蒸发焓, 本研究在计算过程中采用水在 100 °C 沸腾时的蒸发焓($2256 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_p 表示水的比热容, 取常数 $4.18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ΔT 表示光热材料表面温度在蒸发过程中初始态和终态的差值(°C)。因此, 实际蒸发效率公式如下:

$$\eta = \frac{M(\Delta H_{\text{vap}} + C_p \cdot \Delta T)}{C_{\text{opt}} \cdot I \cdot A} \quad (\text{S7})$$

S3 材料光吸收率的计算方法

材料的光吸收率(A , %)由公式(S8)计算获得:

$$A = 1 - R - T_r \quad (\text{S8})$$

其中, A 代表吸收率; R 代表反射率; T_r 代表透射率。在实际测试过程中, 光热材料通常具有一定厚度, T_r 往往可以忽略不计。因此, 通过 $1 - R$ 来计算吸收率(A)。

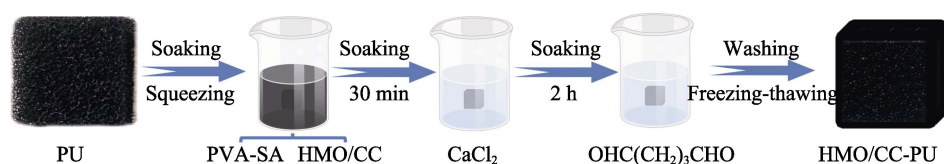


图 S1 HMO/CC-PU 气凝胶的制备流程图

Fig. S1 Flowchart depicting the preparation process of HMO/CC-PU hydrogel

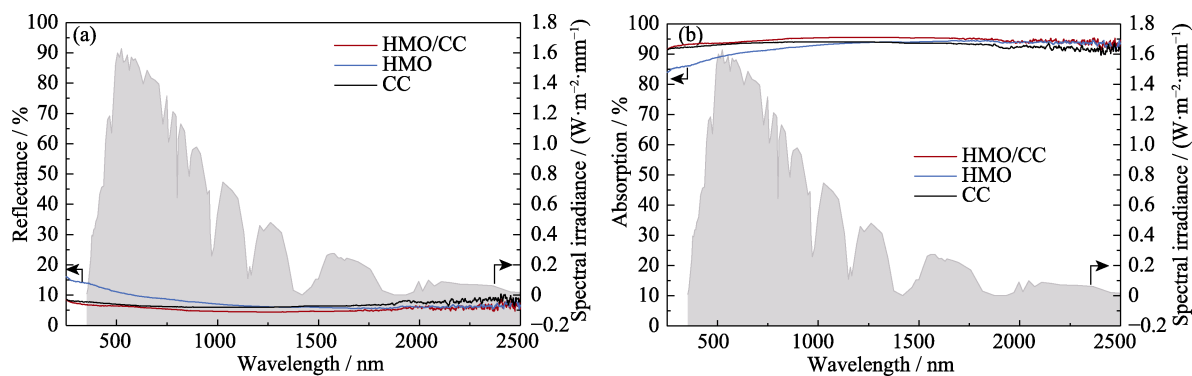


图 S2 CC、HMO 和 HMO/CC 的 UV-Vis-NIR 谱图

Fig. S2 UV-Vis-NIR spectra of CC, HMO and HMO/CC

(a) Reflection; (b) Absorbance

表 S1 CC、HMO 和 HMO/CC 在 200~2500 nm 范围内的光谱吸收率

Table S1 Absorption efficiency of CC, HMO and HMO/CC for spectra in the range of 200–2500 nm

Sample	Total absorption	UV (<400 nm)	Visible (400–760 nm)	Infrared (>760 nm)
Solar spectrum	100%	7%	50%	43%
CC	93.0%	6.4%	46.6%	40.0%
HMO	90.9%	5.9%	44.8%	40.2%
HMO/CC	94.2%	6.4%	47.0%	40.8%

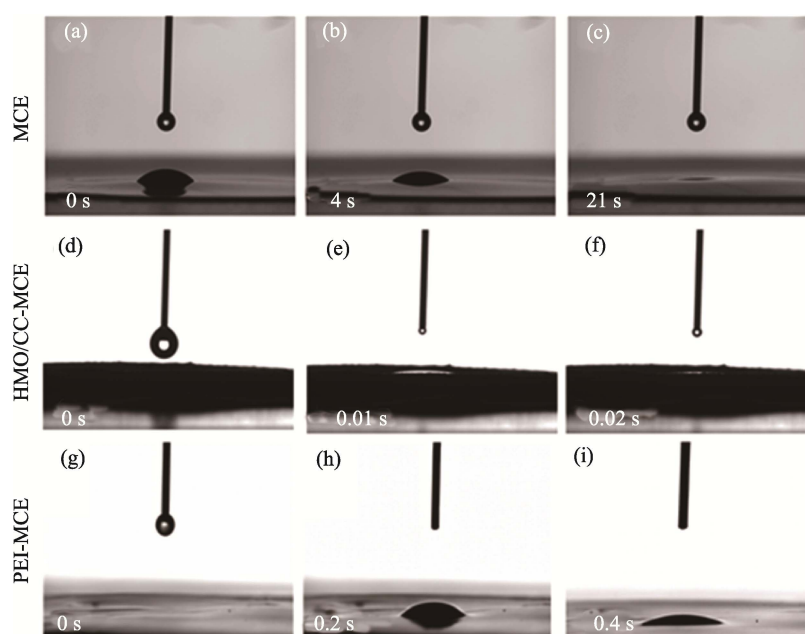


图 S3 膜材料的水接触角

Fig. S3 Water contact angles of membranes

(a-c) MCE; (d-f) HMO/CC-MCE; (g-i) PEI-MCE

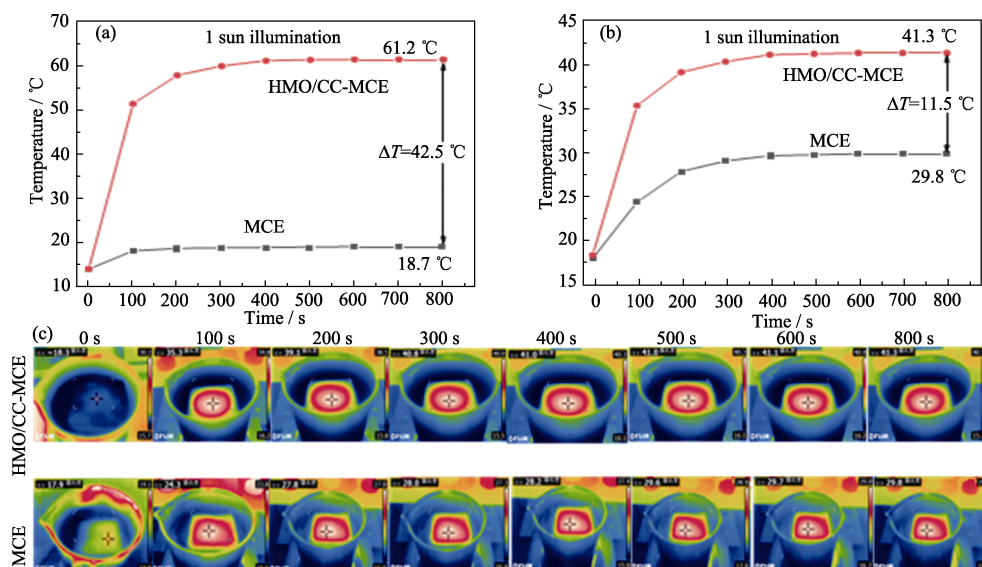


图 S4 MCE 和 HMO/CC-MCE 的光热性能

Fig. S4 Photothermal performance of MCE and HMO/CC-MCE

(a, b) Surface temperature evolutions of MCE and HMO/CC-MCE membranes in the (a) dry and (b) Wet states; (c) Infrared thermographs in the wet state

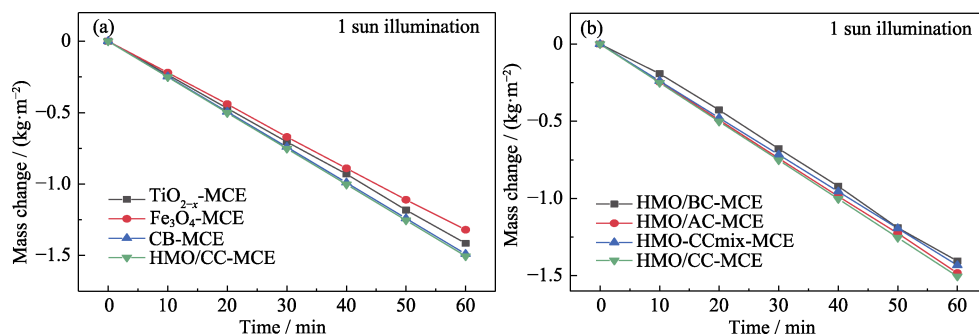


图 S5 HMO/CC 与其它材料的光热性能对比

Fig. S5 Comparison of photothermal performance for HMO/CC and other materials

(a) Mass changes of water for different photothermal materials; (b) Mass changes of water for photothermal materials prepared with different carbon substrates

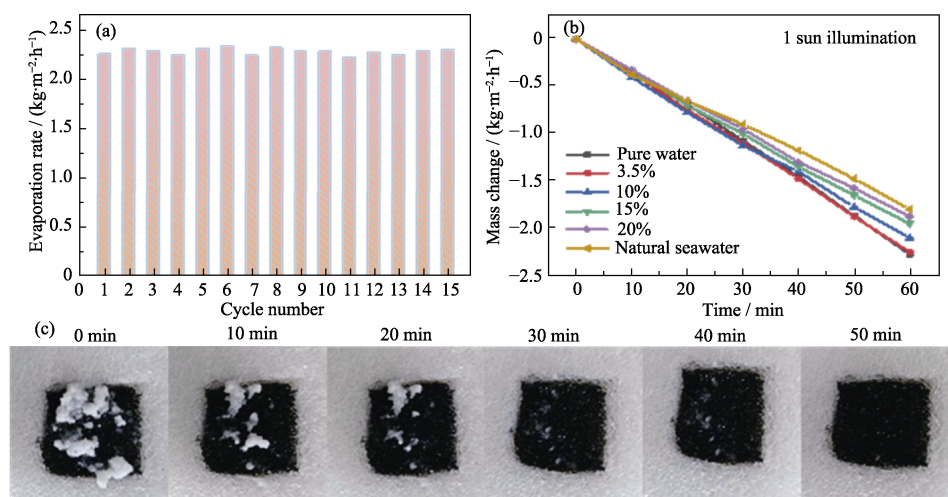


图 S6 HMO/CC-PU 的循环及耐盐性能

Fig. S6 Cycling and salt-resistance performance of HMO/CC-PU

(a) Evaporation rates under 15 cycles; (b) Mass changes in natural seawater and brine with different concentrations; (c) Salt resistance performance of HMO/CC-PU aerogel sponge