

生物质基混合水凝胶蒸发膜海水淡化性能研究

邱春霞^{1*}, 王思文², 徐源璐², 刘宇³, 范新飞², 宋成文^{2*}

(1. 交通运输部规划研究院, 北京 100028; 2. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 大连 116026;
3. 国投曹妃甸港口有限公司, 唐山 063200)

摘要: 由于人口持续增长造成的淡水危机日益严重, 太阳能驱动界面蒸发作为一种绿色、低能耗且环境友好的海水淡化技术, 已成为实现淡水开源增量的研究热点。本研究基于简单的凝胶化-冻融工艺, 制备了生物质基混合水凝胶[章鱼墨@聚乙烯醇(PVA)水凝胶]太阳能蒸发膜, 用于高效太阳能驱动界面蒸发。系统地研究了该蒸发膜的微观形貌、结构特征、润湿性能及光热性能等物理性质, 并对其在海水淡化领域的应用前景进行了全面评估。研究表明, 超亲水性与冻融生成的多孔输水通道协同作用, 确保了蒸发膜优异的水供应能力。在标准太阳辐射强度下, 蒸发速率可达 $2.49 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 对应的光热转换效率约为 86.58%。此外, 所制备的蒸发膜展现了较高的耐盐性, 在质量分数为 15% 的盐水中蒸发速率依然可达 $1.33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 并且具有优异的自清洁能力, 在户外海水淡化实验中也展现了良好的脱盐性能。收集的冷凝液中的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的离子浓度均满足世界卫生组织饮用水标准, 显示出其在海水淡化领域广阔的应用前景。

关键词: 生物质; 太阳能界面蒸发; 水凝胶; 海水淡化

中图分类号: TQ427.2+6; TK519 **文献标志码:** A

文章编号: 1007-8924(2025)06-0080-11

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.06.009

随着当代社会人口的持续增长, 淡水危机已成为当前面临的重大全球性问题^[1-2]。海水淡化技术是缓解淡水资源短缺的有效途径之一, 但传统的海水淡化技术往往面临成本高昂、需要大型集中式基础设施以及易产生温室气体等挑战。因此, 迫切需要开发一种经济、清洁且可持续的净水技术。太阳能作为一种绿色、清洁且可再生的能源, 具有显著的环境友好性^[3]。太阳能驱动海水淡化是一种新兴的以不牺牲资源环境为前提的可持续净水技术^[4]。该

技术不仅能够充分利用太阳能, 还能从无法直接利用的海水等废水中获取可饮用淡水, 为解决当前人类面临的水资源短缺问题提供了潜在的解决方案。特别是, 太阳能驱动界面蒸发技术由于其较低的能量损失和相对经济的基础设施成本, 已成为国内外科学家研究的热点领域^[5]。

太阳能驱动界面蒸发技术通过光热材料高效捕获太阳能并将其转化为热能, 其蒸发过程仅限于在水-汽界面处, 从而显著减少了传统太阳能蒸

收稿日期: 2025-04-10; 修改稿收到日期: 2025-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3108300)

第一作者简介: 邱春霞(1979-), 女, 辽宁东港人, 硕士研究生, 研究方向为油污水膜分离技术水处理。* 通讯作者, 邱春霞, E-mail: qiucx@126.com; 宋成文, E-mail: chengwensong@dlnu.edu.cn

引用本文: 邱春霞, 王思文, 徐源璐, 等. 生物质基混合水凝胶蒸发膜海水淡化性能研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(6): 80-90.

Citation: Qiu C X, Wang S W, Xu Y L, et al. Study on preparation and seawater desalination performance of biomass-based mixed hydrogel evaporation membrane[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(6): 80-90.

发系统中由于纯水加热而造成的热量损失^[6]。研究表明,构建高效的太阳能驱动界面蒸发技术需要考虑三个关键因素:优异的光热材料以实现捕获太阳能进行界面加热;出色的热管理以最大限度减少热损失;以及良好的水运输通道以确保充足的水分供应^[7]。其中,光热材料的设计与制备是确保该系统高效蒸发的核心因素。光热材料不仅需要在整个太阳光谱范围内具有高光吸收率,还要具备化学稳定性等特性。现有研究中,等离子体金属材料^[8]、半导体材料^[9]、碳基材料^[10]和生物质材料^[11]已经被应用于太阳能界面蒸发技术。Ying等^[12]通过自掺杂技术将 Ti^{3+} 掺杂进半导体材料 TiO_2 中,成功制备出带隙更窄的 $\text{Ti}^{3+}-\text{TiO}_2$ 光热材料,在一个标准太阳辐射强度下实现了95%的光吸收率和 $1.20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的蒸发速率,光热转换效率达到77.1%。Ai等^[13]通过喷涂工艺将等离子体金属材料ZrC纳米颗粒组装到滤纸上,制备了一种低成本的ZrC薄膜,在一个标准太阳辐射强度下其光吸收率为95%,蒸发速率为 $(1.43 \pm 0.04) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。Lu等^[14]则开发了一种由多孔载体(碱化丝瓜络海绵)和吸光剂(碳化丝瓜络海绵)组成的全生物质丝瓜衍生蒸发膜。该膜在一个标准太阳辐射强度下的蒸发速率为 $1.36 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,光热转换效率为83.7%。其中,生物质材料因其低成本、可持续性和种类丰富等优点,成为当前最具潜力的太阳能界面蒸发材料^[15]。然而,目前大多数生物质材料仍需经过高能耗的碳化或复杂的表面改性进行处理,这限制了其在实际应用中的可拓展性^[16]。

水凝胶作为一种具有降低水蒸发焓能力的三维高分子聚合物网络,因其良好的生物相容性、优异的亲水性能和力学性能等优势,在开发之初便引起了学者们的广泛关注。在溶胀状态下,水凝胶具有较高的含水量和较大的空间,能够可逆地吸收或释放水分子;应用于太阳能海水淡化过程中,它可以使盐离子运输达到平衡,从而避免传统蒸发器中常见的盐结垢问题。此外,水分子与聚合物链之间的相互作用会产生弱结合力的中间水,导致水活化,进而降低蒸发时所需的能量,加速太阳能蒸汽的生成^[17-20]。在此基础上,通过将具有高光热转换效率的生物质光热材料整合到聚合物网络中,不仅可以赋予水凝胶更高效的性能,还可以拓展生物质光热材料的实际应用范围。例如,Lin等^[21]利用木质纤维素水凝胶和木质素衍生碳分别作为基底和光热材料,构建

了全木质纤维素基双层水凝胶蒸发膜,在一个标准太阳辐射强度下其蒸发速率达到 $1.84 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,光热转换效率为86.5%。Dong等^[22]基于常见的生物质废弃物——咖啡渣,通过一步冷冻干燥和离子工艺,将咖啡渣牢固黏附在海藻酸钙骨架上,开发了一种高性能的咖啡渣水凝胶基蒸发器。通过调整蒸发器的宏观形貌制备了六角金字塔形样品,使其在一个标准太阳辐射强度下的实际海水蒸发速率达到 $1.59 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[23]。

章鱼墨来源于章鱼肝脏的墨囊,作为一种可再生生物质材料,来源广泛且易获取。章鱼墨中含有的天然黑色素,具有优异的光吸收能力,这使其成为潜在光吸收剂,适用于制备太阳能界面蒸发膜。本研究设计了一种以章鱼墨为吸光剂的生物质基混合水凝胶,通过简单的凝胶化-冻融工艺将其与聚乙烯醇(PVA)耦合,构建用于太阳能界面海水淡化的生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜(章鱼墨@PVA水凝胶)。并对蒸发膜的微观形貌、结构特征和光热性能等物理性质进行了系统的研究。此外,通过深入探讨蒸发膜的脱盐性能和自清洁性能,全面评估该生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜在实际应用中的发展前景。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用的章鱼墨购自大连市场;盐酸购于天津致远化学试剂有限公司;聚乙烯醇(PVA,1788型)购于上海阿拉丁生化科技有限公司;戊二醛(质量分数50%,分析纯)购于天津市福晨化学试剂厂;氯化钠(分析纯)购于天津市光复科技发展有限公司;去离子水由上海和泰仪器有限公司的超纯水机所制备,用于在实验过程中配制溶液以及清洗样品。

1.2 实验系统

通过扫描电子显微镜(SEM,S4800)和水接触角测量仪(WCA,SDC-200S)对所有样品的形貌和亲疏水性进行研究。采用傅里叶变换红外光谱(FTIR,Nicolet Is5)和紫外-可见-近红外光谱(UV-Vis-NIR,UV3600)测定样品官能团和光吸收能力。采用红外热成像仪(IR-camera,Fluke TiS20)和电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES,725ES)测定样品表面温度以及检测蒸发前后水样中的离子浓度。

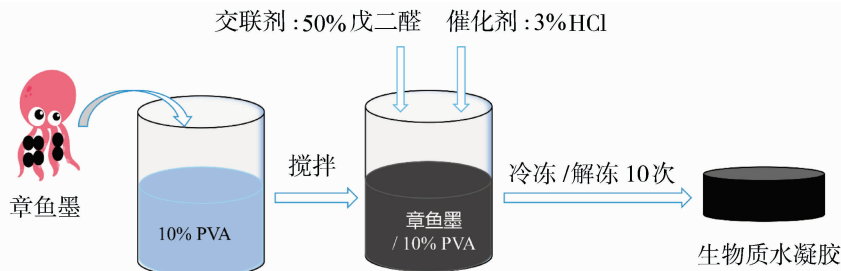


图1 生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜制备过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation process of biomass-based mixed hydrogel solar evaporation membrane

1.3 实验方案

生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜的制备过程如图1所示。首先,将80.0 mg的章鱼墨和3.0 g PVA粉末加入27.0 g去离子水中,在90℃条件下水浴加热搅拌6 h,直至粉末完全溶解。随后,向所得溶液中依次加入120 L交联剂戊二醛和1.5 mL催化剂稀盐酸(体积分数3%),搅拌至混合均匀。接着,将混合均匀的溶液超声处理30 s后迅速倒入表面皿中,并在室温下静置直至凝胶化完成。将已凝胶化的样品浸入去离子水中12 h,以去除未反应的试剂。最后,将样品放置在-25℃冰箱和常温水中进行冷冻-解冻,此冻融循环反复进行10次,最终得到章鱼墨@PVA水凝胶太阳能蒸发膜。为了进行对比,采用相同工艺但不添加章鱼墨,制备了纯PVA水凝胶太阳能蒸发膜。生产单个生物质基水凝胶蒸发膜的成本约为1.35元。

2 理论与方法

实验采用的太阳能水蒸发装置如图2所示。在温度25℃、湿度60%的环境条件下,采用带有标准AM 1.5G滤光片的氙灯太阳光模拟器(PLS-SXE300C,北京泊菲莱科技有限公司)作为模拟光源系统地研究水凝胶基太阳能蒸发膜的蒸发性能。该实验装置是将直径为30 mm、厚度为2 mm的生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜置于具有隔热性能的聚苯乙烯泡沫上,使用无尘纸将烧杯内的水输送至蒸发膜。利用精度为0.000 1 g的电子天平(PX224ZH/E,奥豪斯仪器常州有限公司)实时记录蒸发过程中水的质量变化,并将相关蒸发数据上传至连接在电子天平的电脑上。利用红外热成像仪监测蒸发膜表面温度。利用电感耦合等离子体质谱分析模拟海水淡化处理前后水样中的离子浓度。此外,在自制装置上进行了实际户外蒸发实验(图3)。

该蒸发系统的蒸发速率计算方法为:

$$v = \frac{dm}{S \cdot dt} \quad (1)$$

式中: v 是水蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; m 是水蒸发的质量, kg ; S 是蒸发膜的表面积, m^2 ; t 是光照时间, h 。

光热转换效率可以通过式(2)进行计算:

$$\eta = \frac{m_{\text{ev}} E_{\text{equ}}}{C_{\text{opt}} P_{\text{in}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为光热转换能量效率,%; m_{ev} 为光热蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (去除黑暗条件下自然蒸发速率); E_{equ} 为生物质基混合水凝胶的等效蒸发焓, kJ/kg ; C_{opt} 代表光学浓度; P_{in} 为太阳光密度, $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ 。

在标准太阳辐射($1.0 \text{ kW}/\text{m}^2$)下蒸发系统的能量损失主要包括辐射损失(P_{rad})、对流损失(P_{cv})和传导损失(P_{cd}),详细的能量损失分析计算如下:

1) 根据 Stefan-Boltzmann 定律,辐射损失计算如式(3)所示:

$$P_{\text{rad}} = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: P_{rad} 为辐射损失, W/m^2 ; ϵ 为光的吸收率(本工作中 ϵ 为0.95); σ 为 Stefan-Boltzmann 常数[本工作为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]; T_1 和 T_2 分别为生物质基混合水凝胶蒸发器的平均温度(316.53 K)和环境温度(310.25 K)。因此,经过计算得到辐射热损失为 $41.7 \text{ W}/\text{m}^2$,占总能量的4%。

2) 根据 Newton 定律,对流损失计算如式(4)所示:

$$P_{\text{cv}} = h(T_1 - T_2) \quad (4)$$

式中: P_{cv} 为对流损失, W/m^2 ; h 为对流换热系数[本工作为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]。因此,经过计算得到对流热损失为 $62.8 \text{ W}/\text{m}^2$,占总能量的6%。

3) 根据 Fourier 定律,传导损失计算如式(5)所示:

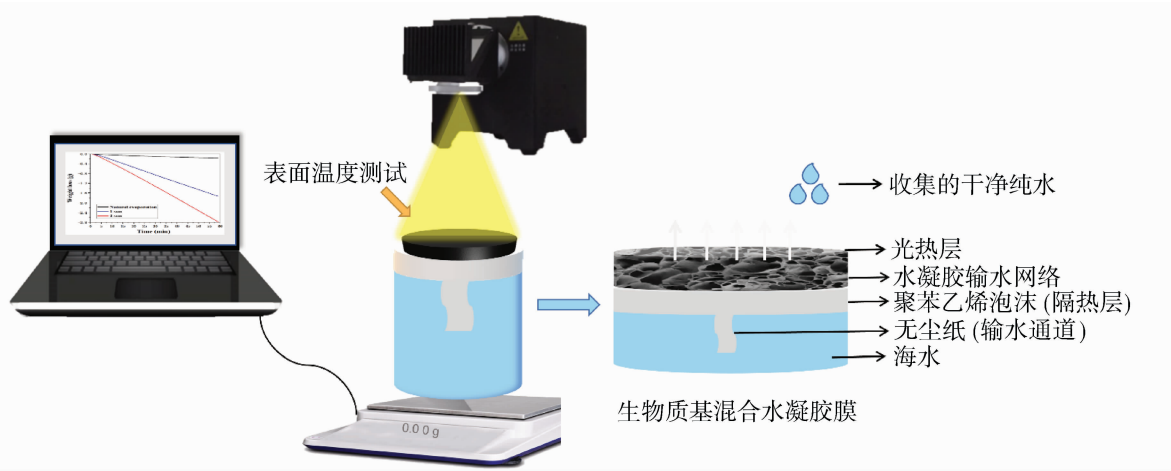


图 2 太阳能蒸发实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solar evaporation experiment

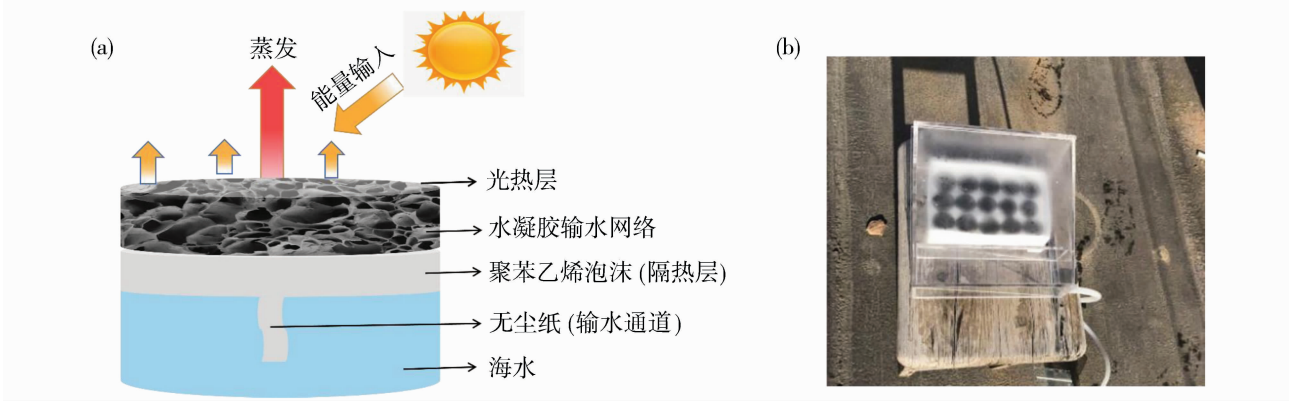


图 3 户外实验装置的原理图(a);户外实验装置的实物图(b)

Fig. 3 Schematic diagram (a) and physical diagram (b) of the outdoor experimental device

$$P_{cd}=Cm\Delta T \tag{5}$$

式中： P_{cd} 为传导热损失,J； C 为水的比热容,4.2 J/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{g}$)； m 为蒸发实验达到稳定状态后纯水的质量,g； ΔT 为体积水的温度差值, $^{\circ}\text{C}$ 。

4) 光吸收率计算如式(6)所示：

$$A=100\%-T-R \tag{6}$$

式中： A 为吸收率,%； T 为透射率,%； R 为反射率,%。

3 结果与讨论

3.1 生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜形貌分析

图 4 展示了纯水凝胶与混合水凝胶冷冻干燥后的表面形貌及微观结构。从水凝胶的横截面可以观察到大量微孔,其中纯水凝胶的微孔尺寸为 137~190 μm ,而生物质基混合水凝胶的微孔尺寸缩小至 80.9~118 μm 。这表明章鱼墨的掺杂显著减小了水凝胶的微孔尺寸。这些内部相互贯通的通道不仅

可通过毛细作用将水分输送到水凝胶表面,还可促进蒸汽的逃逸,从而进一步提升蒸发膜的蒸发性能。

3.2 生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜亲水性分析

表面润湿性是确保蒸发膜在蒸发过程中实现连续供水的关键因素。图 5(a)展示了所制蒸发膜的水接触角特性。实验结果显示,3 μL 水滴完全渗透进纯 PVA 水凝胶和生物质基混合水凝胶样品的时间分别为 1.424 s 和 1.666 s。这表明两种材料均表现出优异的亲水性能,且章鱼墨的掺入并未对蒸发膜的表面润湿性产生显著影响。通过 FTIR 分析了两种水凝胶样品的化学组成。如图 5(b)所示,在 3 600 cm^{-1} ~1 500 cm^{-1} 范围内,两种水凝胶样品中出现在 3 339.05 cm^{-1} 处、2 869.25 cm^{-1} 处和 1 736.68 cm^{-1} 处的特征峰分别对应于亲水性基团 O-H、C-H 和 C-O 的振动,进一步证明了纯 PVA 水凝胶以及章鱼墨掺杂后的生物质基混合水凝胶良好的亲水性。

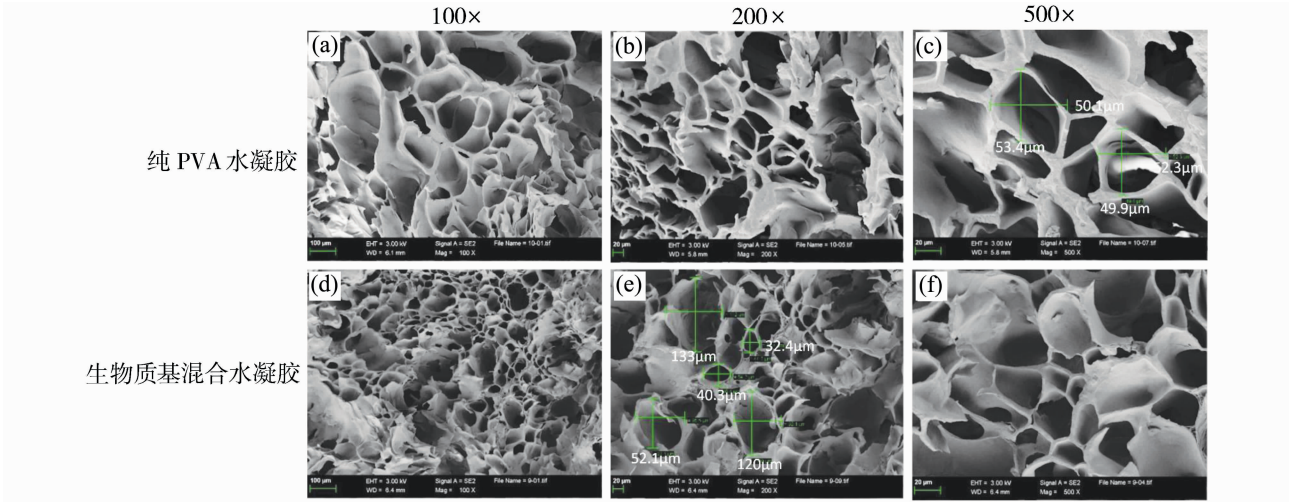


图 4 纯 PVA 水凝胶[(a)~(c)]和生物质基混合水凝胶[(d)~(e)]扫描电镜图

Fig. 4 The SEM images of pure PVA hydrogel [(a)~(c)] and biomass-based mixed hydrogel [(d)~(e)]

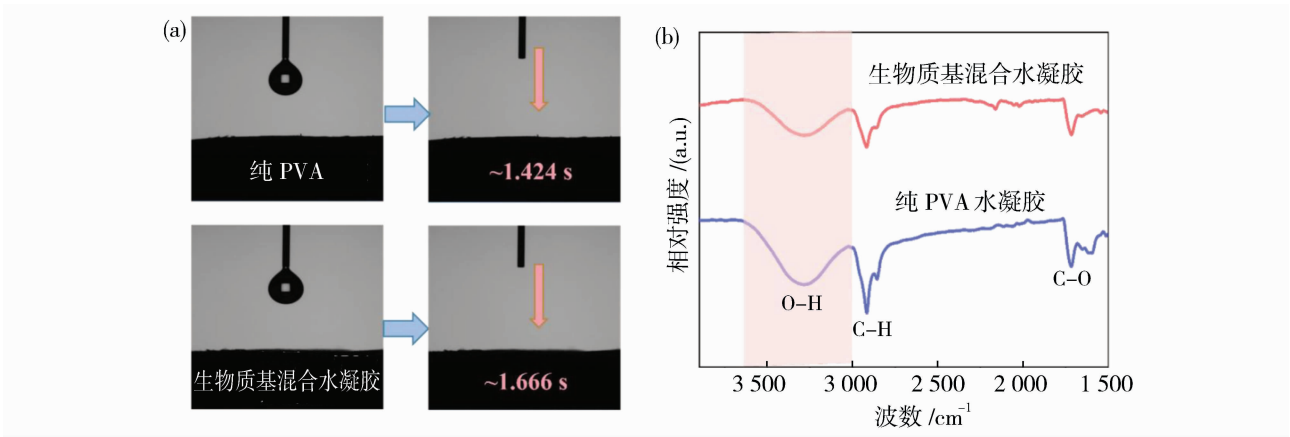


图 5 纯 PVA 水凝胶与生物质基混合水凝胶的水接触角测试图(a)和傅里叶变换红外光谱分析图(b)

Fig. 5 The water contact angle test diagram (a) and the FTIR spectroscopy (b) of pure PVA hydrogel and biomass-based mixed hydrogel

3.3 生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜全光谱吸光能力与光热性能分析

在太阳能驱动界面蒸发的过程中,蒸发膜对全波段太阳光的吸收能力是影响蒸发性能的关键因素。具有宽带光吸收能力的光热材料能够更高效地捕获太阳能,从而显著促进后续的光热转换和最终的太阳能蒸汽生成。如图 6(a)所示,生物质基混合水凝胶在 250~2 500 nm 的全光谱范围内表现出高达 97%的宽带光吸收率,远高于纯 PVA 水凝胶的吸光率,这主要归因于掺杂的章鱼墨优异的光吸收特性。此外,通过红外成像仪对样品表面的光热性能进行了监测。如图 6(b)~6(d)所示,在一个标准太阳辐射强度下,经过 60 min 连续光照实验,生物

质基混合水凝胶蒸发膜的表面温度在10 min内从初始的 24.4 ℃ 迅速升温至 42.5 ℃,并最终稳定在 44.2 ℃。相比之下,纯 PVA 水凝胶基蒸发膜的表面温度从初始的 24.2 ℃ 仅升至35.6 ℃。这一结果证实了生物质基混合水凝胶蒸发膜具有卓越的光热转换性能。

3.4 生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜蒸发性能分析

为了探究章鱼墨掺杂量对生物质基混合水凝胶蒸发膜蒸发性能的影响,在实验初期通过调整不同掺杂量来优化蒸发膜的蒸发性能。如图 7(a)所示,在一个标准太阳辐射强度下,章鱼墨掺杂量分别为 0、40、60、80和100 mg时,对应生物质基混合水凝

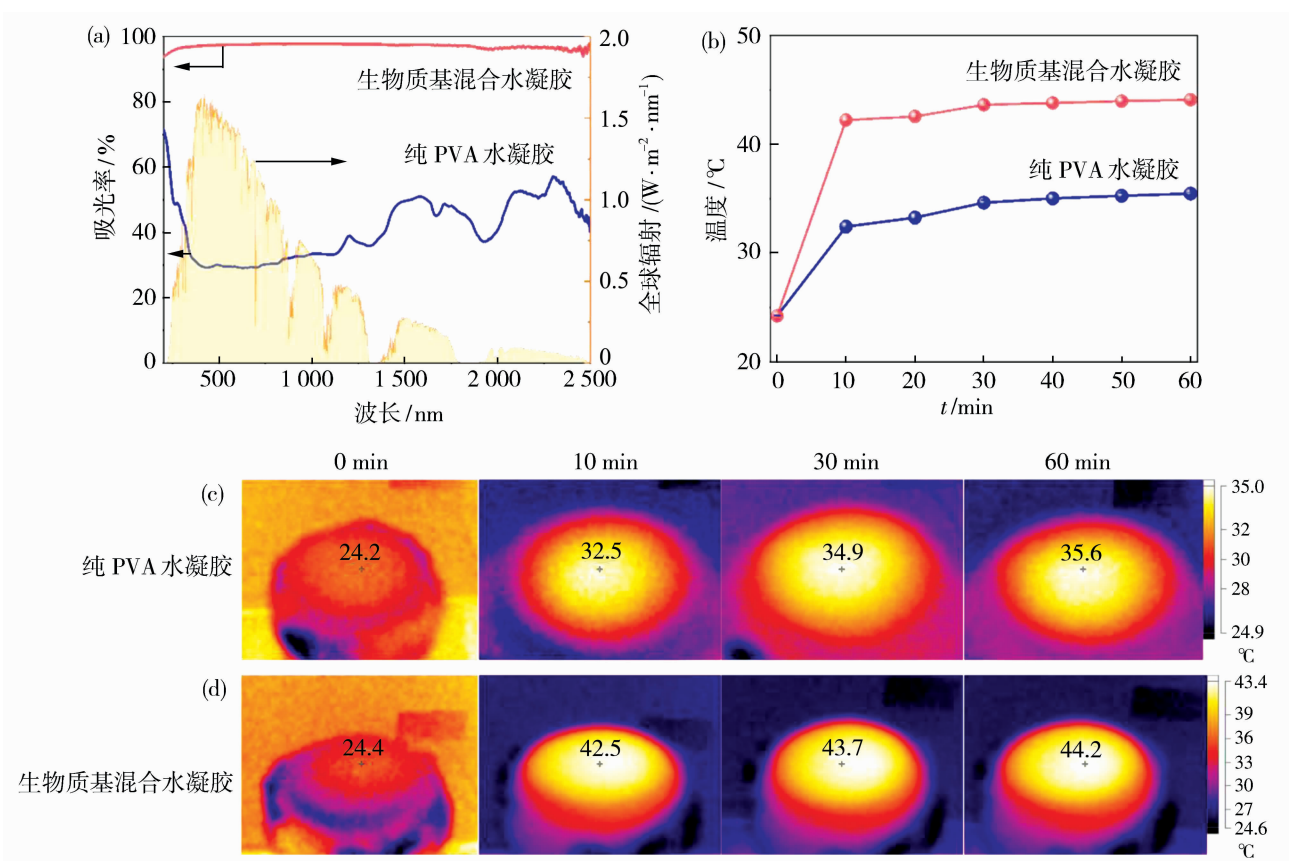


图 6 纯 PVA 水凝胶和生物质基混合水凝胶的紫外-可见-近红外吸收光谱图(a); 不同时间下纯 PVA 水凝胶和生物质基混合水凝胶的表面温度变化(b); 纯 PVA 水凝胶(c)和生物质基混合水凝胶(d)的红外热成像图

Fig. 6 The ultraviolet-visible-near-infrared absorption spectra of pure PVA hydrogel and biomass-based mixed hydrogel (a); the surface temperature changes of pure PVA hydrogels and biomass-based mixed hydrogels at different times (b); the infrared thermal imaging images of pure PVA hydrogel (c) and biomass-based mixed hydrogel (d)

胶蒸发膜在蒸发过程中的水质量损失依次为 1.29、1.98、2.39、2.47 和 2.11 kg/m²。从图中可以看出,随着章鱼墨掺杂量的增加,蒸发膜的蒸发性能逐渐增强,这可能归因于章鱼墨的优异的光热转换能力。当章鱼墨掺杂量为 80 mg 时,蒸发膜表现出最优的蒸发性能。然而,当掺杂量进一步提至 100 mg 时,蒸发性能下降,这可能是由于章鱼墨由许多球形纳米颗粒组成,掺杂量过多时会减少蒸发膜的微米级孔径,导致供水不足,从而影响蒸发性能。此外,还对比了采用无尘纸与未采用无尘纸作为生物质基水凝胶蒸发膜水传输通道时对蒸发性能的影响。如图 7(b) 所示,在采用无尘纸作为水传输通道的情况下,蒸发膜的蒸发速率略高于将其直接放置于资源水表面的情形。这是由于蒸发膜直接接触资源水表面时会传输过量水分,进而吸收蒸发器表面的热量,造成热损失,从而降低蒸发效率。因此,在后续实验中,均选择 80 mg 作为章鱼墨的最佳掺杂量,并采

用无尘纸作为蒸发膜的水传输通道。

为进一步探究制备的生物质基混合水凝胶蒸发膜对蒸发性能的影响,对比了纯水、纯 PVA 水凝胶和生物质基混合水凝胶基蒸发膜在黑暗、一个标准太阳辐射强度条件下水的质量损失[图 7(c)]。在黑暗条件下,纯水、纯 PVA 和生物质基混合水凝胶水的质量损失分别为 0.11 kg/m²、0.29 kg/m² 和 0.31 kg/m²,表明水凝胶基蒸发膜的黑暗蒸发速率均高于纯水。在一个标准太阳辐射强度下,生物质基混合水凝胶蒸发膜在蒸发过程中的水质量损失为 2.47 kg/m²,分别是纯水(0.67 kg/m²)和纯 PVA 水凝胶蒸发膜(1.29 kg/m²)的 3.7 倍和 1.9 倍。图 7(d)展示了纯 PVA 水凝胶和生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜在一个标准太阳辐射强度下的蒸发速率和光热转换效率。生物质基混合水凝胶蒸发膜的蒸发速率为 2.49 kg/(m²·h),而纯 PVA 水凝胶的蒸发速率为 1.25 kg/(m²·h)。其中,生物质基混

合水凝胶的光热转换效率为 86.58%，显著高于纯 PVA 水凝胶的光热转换效率(37.62%)，这一结果进一步验证了生物质基混合水凝胶蒸发膜具备优异的光热转换性能。此外，基于能量平衡原理对系统的能量损失进行了详细分析。在蒸发系统中，能量损失主要包括蒸发热损失(87%)、反射损

失(3%)以及其他形式的能量损失。经计算，蒸发系统的辐射损失为 41.7 W/m²，对流损失为62.8 W/m²。由于本研究中采用聚苯乙烯泡沫作为隔热材料，有效阻止了热量向底部纯水传递，因此底部纯水的温度变化可忽略不计，热传导损失亦可视为 0。

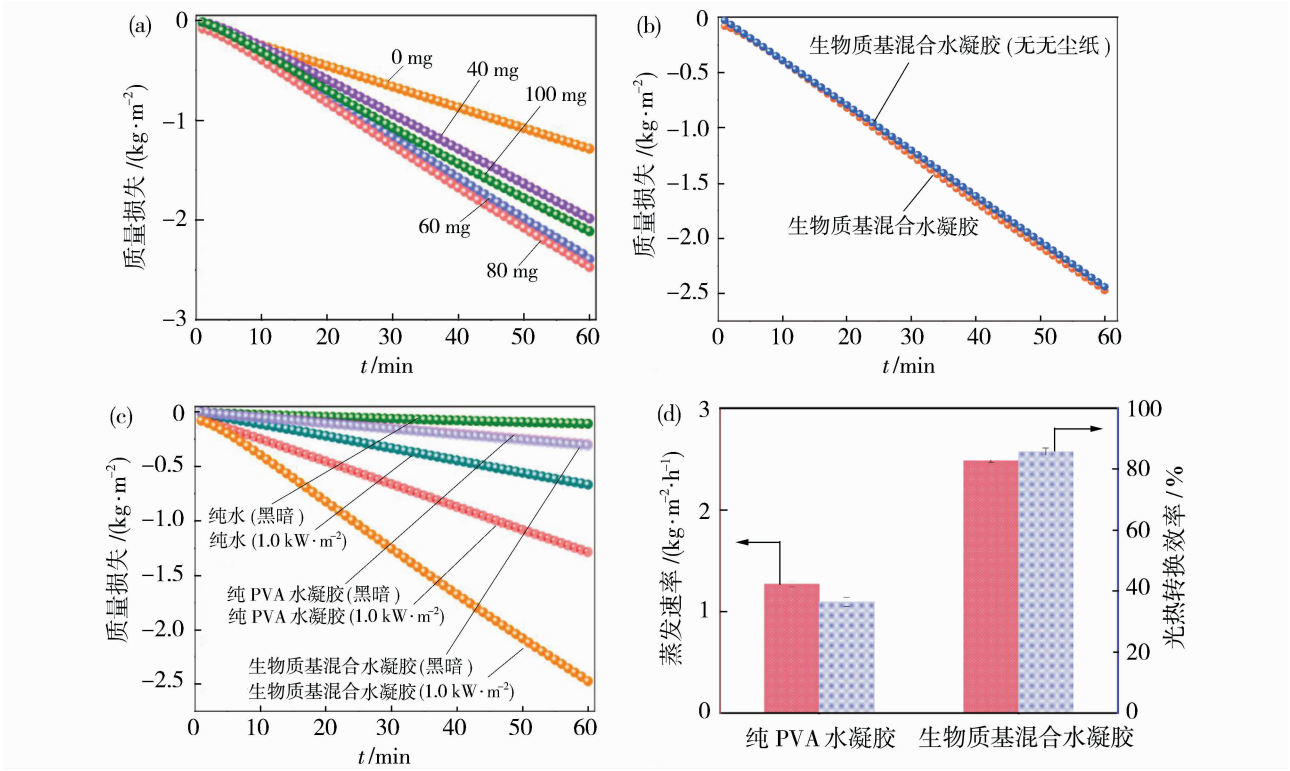


图 7 不同章鱼墨掺杂量下生物质基混合水凝胶蒸发膜的质量损失(a)；采用无尘纸与未采用无尘纸作为蒸发膜水传输通道时太阳能界面蒸发膜的蒸发速率(b)；纯水、纯 PVA 水凝胶及生物质基混合水凝胶三种蒸发系统在黑暗条件下与 1 个标准太阳辐射强度下的质量损失(c)；纯 PVA 水凝胶与生物质基混合水凝胶蒸发膜的蒸发速率及光热转换效率(d)

Fig. 7 The mass loss of the biomass-based mixed hydrogel evaporation membranes with different octopus ink doping amounts (a); the evaporation rates of the solar interface evaporation membranes with and without dust-free paper as the water transport channel (b); the mass loss of three evaporation systems, namely pure water, pure PVA hydrogel, and biomass-based mixed hydrogel, under dark and one standard solar radiation intensity conditions (c) ; the evaporation rates and photothermal conversion efficiencies of pure PVA hydrogel and biomass-based mixed hydrogel evaporation membranes (d)

3.5 生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜脱盐性能分析

在太阳能海水淡化过程中，由于海水的持续蒸发，蒸发膜表面会不断有盐晶体析出。盐的存在不仅会阻碍光的吸收，还会妨碍水分的供应，从而干扰后续的蒸发过程。因此，耐盐性是蒸发膜实现长期稳定海水淡化的重要因素之一。为了系统研究生物质基混合水凝胶蒸发膜在标准太阳辐射强度下的脱

盐性能，分别考察了在不同质量分数的 NaCl 溶液(1.0%、3.5%、5.0%、7.5%、10.0%、15.0%)条件下蒸发膜的蒸发性能。

如图 8(a)所示，在标准太阳辐射强度下，不同 NaCl 溶液浓度对应的生物质基混合水凝胶蒸发膜的蒸发速率分别为 1.78、1.68、1.60、1.59、1.51 和 1.33 kg/(m²·h)，光热转换效率分别为 71.39%、67.28%、63.96%、63.55%、60.36%、53.17%。随

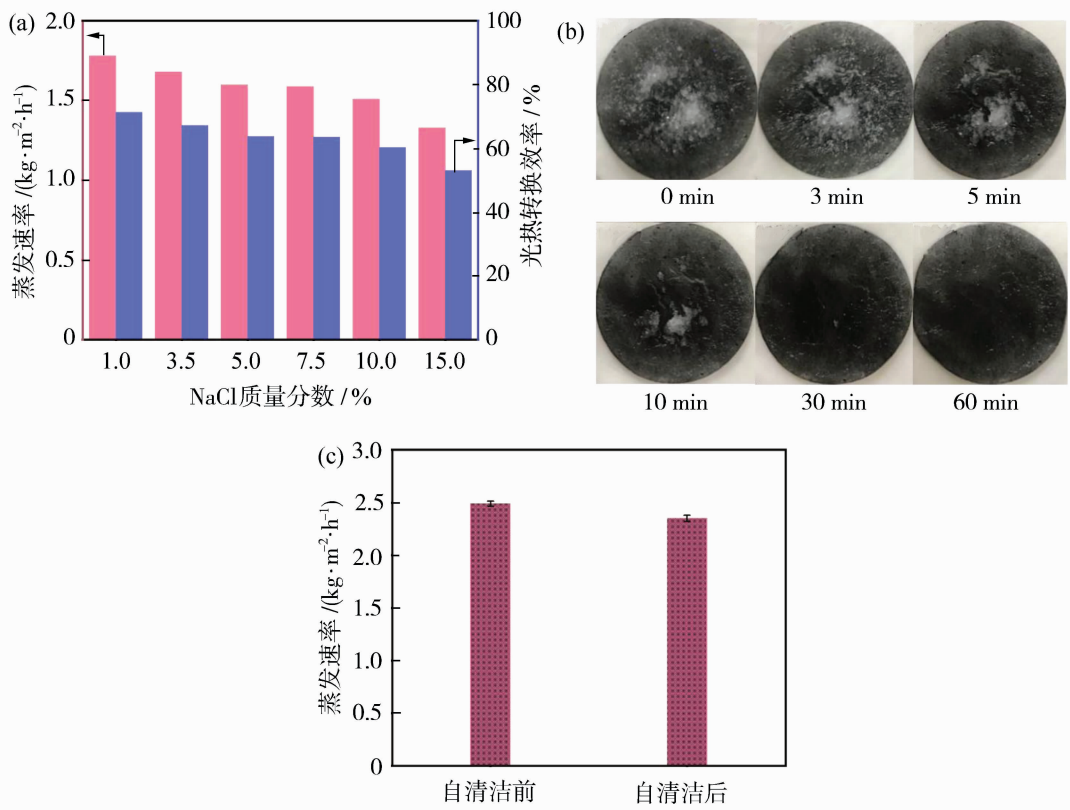


图 8 生物质基混合水凝胶蒸发膜在不同盐度梯度下的蒸发速率和光热转换效率(a) ;自清洁实验(b) ;自清洁前后生物质基混合水凝胶蒸发膜对水的蒸发速率(c)

Fig. 8 Evaporation rate and photothermal conversion efficiency of biomass-based mixed hydrogel evaporation membranes under different salinity gradients (a); self-cleaning experiment (b); evaporation rate of water of the biomass-based mixed hydrogel evaporation membrane before and after self-cleaning (c)

随着 NaCl 溶液浓度的增加,溶液中的饱和蒸气压减小,导致蒸发速率降低,进而影响蒸发膜的蒸发性能,并限制其在高盐度环境中的长期使用效率。然而,在整个蒸发过程中,生物质基混合水凝胶蒸发膜表面并未出现盐结晶现象,表明该蒸发膜对不同浓度的 NaCl 溶液均具有优异的抗盐性能。有趣的是,该蒸发膜还表现出良好的自清洁能力[图 8(b)]。在蒸发膜的表面放置一定质量的 NaCl 晶体后,仅 60 min,蒸发膜表面即可恢复至原状。这是由于该太阳能界面蒸发膜是具有多孔结构的,在毛细管力的作用下会持续向蒸发器上部运输足够量的资源水,使蒸发膜表面始终会有足够量的水补充,运输到蒸发膜的水分子会溶解蒸发膜上部的 NaCl 晶体,并通过蒸发膜内部的多孔结构溶解回下方的资源水中,从而使蒸发膜表面恢复至原状。并且自清洁前后生物质基水凝胶蒸发膜的蒸发性能无明显变化[图 8(c)]。

3.6 生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜在实际海水脱盐中的性能分析

为评估生物质基混合水凝胶蒸发膜在实际应用中的可行性,在大连海事大学环境科学与工程学院屋顶上利用自制的大海水蒸发装置,在自然光照射下进行了连续的户外实验。图 9(a)记录了晴天条件下太阳强度和蒸发膜表面的温度变化。结果显示,在整个时间段内,太阳光照强度的最大值出现在中午 12 时,达到 $820\text{ W}/\text{m}^2$,该蒸发装置的日产水量为 45.31 g ,这对实际海水淡化具有重要的意义。为评价海水淡化性能,采用 ICP-OES 检测了模拟海水在生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜脱盐前后主要离子(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+})的浓度变化。冷凝水中四种主要离子浓度在太阳能海水淡化蒸发实验后显著降低[图 9(b)]。其中, Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的初始质量浓度分别为 1.16×10^4 、 8.34×10^2 、 9.25×10^2 和 $8.34\times 10^2\text{ mg}/\text{L}$ 。经过太阳能海

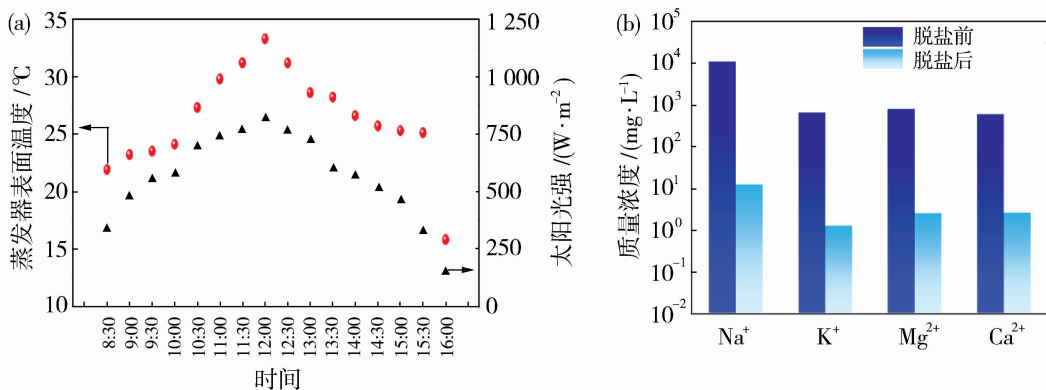


图9 户外实验中光辐射强度及生物质基混合水凝胶蒸发装置表面温度随时间变化的曲线(a); 太阳能海水脱盐前后四种离子浓度比较(b)

Fig. 9 The curve of light radiation intensity and the surface temperature of the biomass-based mixed hydrogel evaporation device over time in outdoor experiments (a); the concentrations of four ions before and after solar-powered seawater desalination (b)

水淡化后,冷凝水中 Na⁺、K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 的浓度分别降低到 1.64×10^1 、2.25、3.19 和 2.89 mg/L,该冷凝水盐度符合世界卫生组织饮用水标准(Na⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 对应小于 200 mg/L、25 mg/L、100 mg/L),证明该生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜具有优异的海水淡化性能。

4 结论

1) 研究团队成功制备了一种新型生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜:该蒸发膜以生物质材料章鱼墨为光吸收剂、PVA 为水凝胶基质,可应用于太阳能蒸汽生成领域。

2) 该新型生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜具有优异的光热性能:在标准太阳辐射强度下,其蒸发速率可达 $2.49 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,光热转换效率约为 86.58%。

3) 该新型生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜具有高耐盐性:在高盐度溶液(质量分数 15.0% NaCl)中运行时,其蒸发速率仍可保持在 $1.33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

4) 该新型生物质基混合水凝胶太阳能蒸发膜具有多功能应用潜力:其具备自清洁能力和海水淡化能力,经其处理得到的冷凝水盐度符合世界卫生组织(WHO)饮用水标准,展现出广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Xu Z R, Li Z, Jiang Y, *et al.* Recent advances in solar-driven evaporation systems[J]. J Mater Chem A, 2020,

8(48): 25571-25600.

- [2] Lyu B W, Gao C, Xu Y L, *et al.* A self-floating, salt-resistant 3D Janus radish-based evaporator for highly efficient solar desalination[J]. Desalination, 2021, 510: 115093.
- [3] Xu C, Yang Q, Wang F, *et al.* Research progress on novel solar steam generation system based on black nanomaterials[J]. Can J Chem Eng, 2018, 96(10): 2086-2099.
- [4] Xu Y L, Mu H C, Han X S, *et al.* A simple, flexible, and porous polypyrrole-wax gourd evaporator with excellent light absorption for efficient solar steam generation[J]. Int J Energy Res, 2021, 45(15): 21476-21486.
- [5] Zang L L, Finnerty C, Zheng S X, *et al.* Interfacial solar vapor generation for desalination and brine treatment: evaluating current strategies of solving scaling[J]. Water Res, 2021, 198(13): 117135.
- [6] Chen C J, Kuang Y D, Hu L B. Challenges and opportunities for solar evaporation[J]. Joule, 2019, 3(3): 683-718.
- [7] Zhou X Y, Zhao F, Zhang P P, *et al.* Solar water evaporation toward water purification and beyond[J]. ACS Mater Lett, 2021, 3(8): 1112-1129.
- [8] Margeson M J, Dasog M. Plasmonic metal nitrides for solar-driven water evaporation[J]. Environ Sci: Water Res Technol, 2020, 6(12): 3169-3177.
- [9] Yu Y, Ming X, Xu Y, *et al.* Quasimetallic molybdenum carbide-based flexible polyvinyl alcohol hydrogels for enhancing solar water evaporation[J].

- Adv Mater Interfaces, 2019, 6(24): 1901168.
- [10] He W, Zhou L, Wang M, *et al.* Structure development of carbon-based solar-driven water evaporation systems[J]. Sci Bull, 2021, 66(14): 1472-1483.
- [11] Yang J, Chen Y, Jia X, *et al.* Wood-based solar interface evaporation device with self-desalting and high antibacterial activity for efficient solar steam generation[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(41): 47029-47037.
- [12] Ying P J, Li M, Yu F L, *et al.* Bandgap engineering in efficient solar-driven interfacial evaporation system[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12: 32880-32887.
- [13] Ai S, Ma M, Chen Y Z, *et al.* Metal-ceramic carbide integrated solar-driven evaporation device based on ZrC nanoparticles for water evaporation and desalination[J]. Chem Eng J, 2021, 429: 132014.
- [14] Lu Y, Wang X, Fan D Q, *et al.* Biomass derived Janus solar evaporator for synergic water evaporation and purification[J]. Sustain Mater Technol, 2020, 25: e00180.
- [15] Zhou X, Li J Y, Liu C, *et al.* Carbonized tofu as photothermal material for highly efficient solar steam generation[J]. Int J Energy Res, 2020, 44(11): 9213-9221.
- [16] Liu C, Hong K W, Sun X, *et al.* An “antifouling” porous loofah sponge with internal microchannels as solar absorbers and water pumpers for thermal desalination[J]. J Mater Chem A, 2020, 8: 12323-12333.
- [17] Lu H Y, Shi W, Zhao F, *et al.* High-yield and low-cost solar water purification via hydrogel-based membrane distillation[J]. Adv Funct Mater, 2021, 31(19): 2101036.
- [18] Zhou X Y, Guo Y H, Zhao F, *et al.* Hydrogels as an emerging material platform for solar water purification[J]. Acc Chem Res, 2019, 52(11): 3244-3253.
- [19] Xu Y L, Lyu B W, Yang Y, *et al.* Facile fabrication of low-cost starch-based biohydrogel evaporator for efficient solar steam generation[J]. Desalination, 2021, 517: 115260.
- [20] Yang M, Luo H, Zou W Z, *et al.* Ultrafast solar-vapor harvesting based on a hierarchical porous hydrogel with wettability contrast and tailored water states[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 14(21): 24766-24774.
- [21] Lin X L, Wang P, Hong R T, *et al.* Fully lignocellulosic biomass-based double-layered porous hydrogel for efficient solar steam generation[J]. Adv Funct Mater, 2022, 32(51): 2209262.
- [22] Dong W C, Zhou F F, Song X J, *et al.* Coffee grounds-based hydrogel as a high-performance and durable evaporator for solar-driven freshwater generation[J]. Mater Today Energy, 2022, 30: 101187.
- [23] Traver E, Karaballi R A, Monfared Y E, *et al.* TiN, ZrN, and HfN nanoparticles on nanoporous aluminum oxide membranes for solar-driven water evaporation and desalination[J]. ACS Appl Nano Mater, 2020, 3: 2787-2794.

Study on preparation and seawater desalination performance of biomass-based mixed hydrogel evaporation membrane

QIU Chunxia¹, WANG Siwen², XU Yuanlu²,
LIU Yu³, FAN Xinfei², SONG Chengwen²

(1. Transport Planning and Research Institute Ministry of Transport, Beijing 100028, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

3. Guotou Caofeidian Port Co., Ltd., Tangshan 063200, China)

Abstract: Due to the increasingly serious freshwater crisis caused by the continuous growth of the population, solar-driven interfacial evaporation, as a green, low-energy consumption and environmentally friendly seawater desalination technology, has become a research hotspot for achieving the increase of freshwater sources. In this study, based on a simple gelatinization-freeze-thaw process, biomass-based

mixed hydrogel [octopus ink@ polyvinyl alcohol (PVA) hydrogel] solar evaporation membrane was prepared for efficient solar-driven interfacial evaporation. The physical properties such as the microscopic morphology, structural characteristics, wetting performance and photothermal performance of the evaporation membrane were systematically studied, and a comprehensive assessment of its application prospects in the field of seawater desalination was conducted. The research results showed that the superhydrophilicity and the porous water delivery channels formed by freeze-thaw cycling acted synergistically to ensure the excellent water supply capacity of the evaporation membrane. Under the standard solar radiation intensity, the evaporation rate could reach $2.49 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the corresponding photothermal conversion efficiency was approximately 86.58%. Furthermore, the prepared evaporation membrane demonstrated high salt tolerance. The evaporation rate could still reach $1.33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in 15% brine concentration, and it had excellent self-cleaning ability. Moreover, it showed good desalination performance in outdoor seawater desalination experiments. The ion concentrations of Na^+ , K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in the collected condensate all met the drinking water standards of the World Health Organization, indicating that it has broad application prospects in the field of seawater desalination.

Key words: biomass; solar interfacial evaporation; hydrogel; seawater desalination

(上接第 60 页)

Preparation and CO_2/H_2 separation performance of boron-doped DDR zeolite membranes

ZHOU Shihang, LI Jingbo, ZHANG Yuting

(State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: DDR zeolite membrane has been attractive in CO_2 separation because of its suitable pore size and good thermochemical stability. However, it has limited selectivity in CO_2/H_2 separation. To address this issue, boron-doped DDR (B-DDR) zeolite membranes were synthesized on four-channel $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ hollow fibers by secondary growth using sodium tetraborate as the boron source. The successful doping of B atoms in DDR zeolite framework was confirmed by XRD, BET surface area and FTIR results. The CO_2 adsorption results demonstrated that the doping of B atoms improved the CO_2 adsorption amount of DDR zeolite. When the molar ratio of sodium tetraborate in precursor was 0.2, the CO_2 permeance of the resultant membrane ($\text{B}_{0.8}\text{-DDR}$ membrane) in the separation of equimolar CO_2/H_2 mixed gas at 298 K was $3.60 \times 10^{-8} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. The CO_2/H_2 selectivity of the membrane was 15.60, which was more than twice of that of the DDR zeolite membrane (5.91). Lowering temperature or increasing feed pressure was beneficial for improving separation selectivity of the B-DDR membrane. The maximum CO_2/H_2 selectivity was achieved when the CO_2 feed concentration was 50% (volume fraction). In addition, the membrane maintained stable separation performance under humid environment, indicating the good tolerance of the membrane to water vapor.

Key words: DDR zeolite membrane; CO_2/H_2 separation; boron doping; sodium tetraborate; hollow fiber