

# 改性 PU 海绵三维多孔界面蒸发器的制备及性能

王 兴<sup>1</sup>, 郭小静<sup>2\*</sup>, 王慧迪<sup>2</sup>, 张 朵<sup>3</sup>, 薛朝华<sup>1\*</sup>

(1. 陕西科技大学 轻工科学与工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 陕西科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710021; 3. 陕西科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 采用聚乙烯醇 (PVA) 对商用疏水聚氨酯海绵 (简称 PU 海绵) 进行亲水改性, 并在其上面喷涂多壁碳纳米管/聚二甲基硅氧烷 (MWCNTs/PDMS) 复合分散液, 获得一侧超疏水另一侧亲水的三维多孔界面蒸发器。采用 SEM、红外热像仪及紫外-可见-近红外分光光度计对涂层表面形貌、光热响应能力及反射率和透过率进行了测试, 并对构建的三维多孔界面蒸发器的性能进行了评价。结果表明, 由 MWCNTs 含量 (以 PDMS 预聚物质量分数为 0.55% 的四氢呋喃溶液的质量计, 下同) 为 0.5% 的 MWCNTs/PDMS 复合分散液喷涂亲水改性的 PU 海绵制得的三维多孔界面蒸发器表面温度为 81 °C, 吸收率为 98.57%, 具有良好的透水汽性、光热性能、蒸发性能、拒盐性能、脱盐性能、自清洁性能。该三维多孔界面蒸发器在盐水中进行蒸发作用时, 其在 1 个太阳光强 (1.0 kW/m<sup>2</sup>) 下的表面温度为 61.3 °C, 光热转换效率达 96.75%, 在模拟海水 (质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液) 蒸发过程中, 蒸发速率可达 1.80 kg/(m<sup>2</sup>·h), 而 PU 海绵的蒸发速率较低, 仅为 0.44 kg/(m<sup>2</sup>·h)。

**关键词:** 多壁碳纳米管; 界面蒸发; Janus 结构; 光热转换; 功能材料

**中图分类号:** P747; TK519; TQ630 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2023) 03-0584-08

## Fabrication and properties of three-dimensional porous modified PU sponge interfacial evaporator

WANG Xing<sup>1</sup>, GUO Xiaojing<sup>2\*</sup>, WANG Huidi<sup>2</sup>, ZHANG Duo<sup>3</sup>, XUE Chaohua<sup>1\*</sup>

(1. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 2. School of Materials Science & Technology, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

**Abstract:** A 3D porous interfacial evaporator with superhydrophobic front side and hydrophilic backside was prepared from commercially hydrophobic polyurethane sponge (PU sponge), which was modified by hydrophilic polyvinyl-alcohol (PVA) and then sprayed by multi-wall carbon nanotubes/polydimethylsiloxane (MWCNTs/PDMS) composite dispersion. The surface morphology, photothermal response, reflectance and transmittance of the coating were then analyzed by SEM, infrared thermal camera and UV-Visible-near-infrared spectrophotometer, followed by evaluation on the performance of the three-dimensional porous interfacial evaporator constructed. The results showed that, the 3D porous interfacial evaporator obtained with a MWCNTs content (based on the mass of PDMS prepolymer with 0.55% mass fraction tetrahydrofuran solution, the same below) of 0.5% in the MWCNTs/PDMS composite dispersion, exhibited a surface temperature of 81 °C and an absorption rate of 98.57%, as well as good water permeability, photothermal performance, evaporation performance, salt rejection performance, desalting performance and self-cleaning performance. Under one sun illumination (1.0 kW/m<sup>2</sup>), the surface temperature of the 3D porous interfacial evaporator was 61.3 °C, and the photothermal conversion efficiency was 96.75%. In the simulation of seawater (mass fraction of 3.5% NaCl

收稿日期: 2022-07-12; 定用日期: 2022-09-05; DOI: 10.13550/j.jxhg.20220651

基金项目: 国家自然科学基金 (52103263); 中国博士后科学基金 (2020M683410); 陕西省重点研发计划 (2020ZDLGY13-11); 陕西省自然科学基金 (2020JM-506)

作者简介: 王 兴 (1996—), 女, 硕士生, E-mail: 2385234119@qq.com。联系人: 郭小静 (1989—), 女, 讲师, E-mail: guoxiaojing2015@126.com; 薛朝华 (1974—), 男, 教授, E-mail: xuech@sust.edu.cn。

solution) evaporation process, the evaporation rate could reach  $1.80 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , while the unmodified PU sponge evaporation rate was only  $0.44 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ .

**Key words:** multi-walled carbon nanotubes; interfacial evaporation; Janus structure; photothermal conversion; functional materials

随着社会的快速发展和全球淡水资源的短缺, 人类对清洁水的需求不断增加, 如何提高淡水产量已成为亟需解决的问题<sup>[1-2]</sup>。地球上可利用的淡水资源仅占水总量的 0.325%, 而海水资源极其丰富, 海水淡化是解决淡水资源短缺行之有效的方法。目前, 主要通过工厂淡化设备和船用淡化设备来实现海水淡化, 但这些设备存在成本高、操作复杂和能耗高等缺点, 从而限制了其进一步的发展。基于光热转换纳米材料的新型太阳能界面蒸发器具有环保和低成本的特点<sup>[3-4]</sup>, 是近年发展起来的新型海水淡化技术<sup>[5-11]</sup>。

新型太阳能界面蒸发器中太阳能收集和蒸汽产生都发生在空气-水界面的太阳能吸收器上, 太阳能吸收器将光热转换捕获的热能集中在空气-水界面, 并用于加热表面的薄层水体, 使水在低于沸点的温度下产生蒸汽<sup>[12-15]</sup>。例如: HU 等<sup>[8]</sup>采用定向冷冻干燥技术将多壁碳纳米管 (MWCNTs) /碳纳米纤维素 (CNF) 混合液组装成低弯曲度气凝胶, 然后在气凝胶一侧喷涂一层六甲基二硅氮烷 (HDMS) 处理的  $\text{SiO}_2$  作为疏水层, 制备低弯曲度的蒸发器。在一个太阳光强下, 光热转换效率达 80%, 蒸发速率达到  $1.25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。ZHANG 等<sup>[16]</sup>报道了一种柔性自组装疏水/亲水卟啉-碳化钛 ( $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ) MXene 膜。首先, 通过盐酸+LiF 对 MXene 前驱体进行刻蚀处理, 并在去离子水中剥离得到  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene; 然后, 将甲基丙烯酸丁酯加入其中获得了亲水性 MXene 膜, 卟啉在 MXene 上的自组装能有效产生良好的疏水表面, 该膜在光热脱盐过程中表现出高效的输水、热定位和耐盐性, 1 个太阳光强下蒸发速率为  $1.41 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。ZHAO 等<sup>[17]</sup>通过氧基氯化铁 ( $\text{FeOCl}$ ) 模板法合成了聚吡咯 (PPy) 纳米带; 采用化学交联和反复冷冻干燥法制备了力学稳定、多孔的聚乙烯醇 (PVA) 水凝胶。通过将 PPy 纳米带直接加载在 PVA 水凝胶的顶部制备了 PPy 纳米带@PVA 水凝胶蒸发器。在 1 个太阳光强下可实现 98.3% 的太阳吸收率, 光热转换效率为 82.5%。目前研究的大部分太阳能界面蒸发器的光吸收表面都是以亲水或者疏水为主, 但在实际应用时, 暴露在环境中的亲水或者疏水表面的太阳能界面蒸发器会因灰尘污染、雨水侵蚀等影响其光热转换能力, 进一步降低其长期稳定性。超疏水材料具有独特的微纳粗糙结构, 当

水滴接触其表面时, 呈现极小的固液接触面积, 并且其超疏水自清洁性能可防止太阳能界面蒸发器被污染, 保障太阳能界面蒸发器在户外应用时光热转换性能不受影响, 从而有利于长期的海水淡化。三维多孔材料具有更大的蒸发面积和更高的孔隙率, 其不仅可对入射太阳光进行多次散射促进光吸收, 而且有利于水的运输。因此, 制备具有超疏水表面的三维多孔界面蒸发器具有重要意义。

本文拟以商用疏水聚氨酯海绵 (简称 PU 海绵) 为基材, MWCNTs 为光热转换材料、PVA 为亲水物质、聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 为疏水物质来制备一种应用于海水淡化的三维多孔界面蒸发器。利用 MWCNTs 的宽波段高太阳光吸收率 (>95%) 及其光热转换效应提供溶液界面蒸发作用; 利用 MWCNTs 的纳米结构对材料表面粗糙化结合 PDMS 的低表面能性质赋予光热吸收层超疏水性, 使改性 PU 海绵不仅可漂浮于水面, 同时还具有自清洁及阻盐作用; 利用 PVA 的亲水性使其改性的 PU 海绵在底层及内部形成优异的水传输通道。旨在制备一种成本低廉、易扩展的三维多孔超疏水界面蒸发器, 利用该蒸发器表面的自清洁性能以避免光热涂层被污物污染, 从而保障其光热转换效率的持久稳定性, 可为淡水资源短缺且能源匮乏的地区解决用水难题。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

MWCNTs (长度为 10~30  $\mu\text{m}$ , 直径为 10~30 nm), 成都中科时代纳能科技有限公司; 四氢呋喃 (THF), 分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司; PDMS 预聚物 (Sylgard 184, 包括预聚体 A 和固化剂 B 组分), 化学纯, 美国道康宁公司; PVA (1799 型), 分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司; PU 海绵, 1 cm 厚, 中密度, 1.5 m $\times$ 2.0 m, 永嘉海绵制品; NaCl, 分析纯, 天津市天力化学有限公司。

JH-GHX-300 氙灯光源, 骥辉分析仪器 (上海) 有限公司; TES-132 光密度计, 泰仕电子工业股份有限公司; UT58E 万用表, 优利德科技 (中国) 有限公司; JK-804 多路式测温仪, 常州市金艾联电子科技有限公司; E390 红外热像仪, 美国 FLIR Systems 公司; SU-4800 场发射扫描电子显微镜, 日本 Hitachi

公司; Lambda 1050 紫外-可见-近红外分光光度计, 美国安捷伦科技有限公司; S-130 喷枪, 广东优速达公司; 101A-2 电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 华为手机。

## 1.2 三维多孔界面蒸发器的制备

### 1.2.1 PU 海绵的预处理

将半径为 5 cm、厚度为 1 cm 的 PU 海绵浸入无水乙醇中, 在 30 °C、40 kHz 条件下超声清洗 30 min, 然后在 60 °C 下干燥 5 h, 得到处理的 PU 海绵, 备用。

### 1.2.2 PU 海绵的亲水改性

将 9 g PVA 置于 91 g 蒸馏水中, 在 95 °C 磁力搅拌 4 h, 使其完全溶解, 得到质量分数为 9% 的 PVA 水溶液。将处理的 PU 海绵浸渍于上述 PVA 水溶液中 4 h, 取出后在 30 °C 下干燥 24 h, 得到亲水改性的 PU 海绵。

### 1.2.3 MWCNTs/PDMS 疏水化处理亲水改性的 PU 海绵

将预聚体 A 0.5 g 和固化剂 B 0.05 g 加入到 99.45 g THF 中, 在 30 °C 水浴下超声 5 min 至完全溶解, 得到 PDMS 预聚物质量分数为 0.55% 的 THF 溶液, 配制 5 份; 然后, 向上述溶液中分别加入 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 g MWCNTs 超声分散, 形成 MWCNTs 含量 (以 PDMS 预聚物 THF 溶液的质量计, 下同) 分别为 0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9% 的 MWCNTs/PDMS 复合分散液。最后, 将制得的 MWCNTs/PDMS 复合分散液以 50 psi 喷涂于亲水改性的 PU 海绵上表面, 喷涂距离为 20 cm, 在 30 °C 下干燥 10 h, 获得三维多孔界面蒸发器。制备流程示意图如图 1 所示。

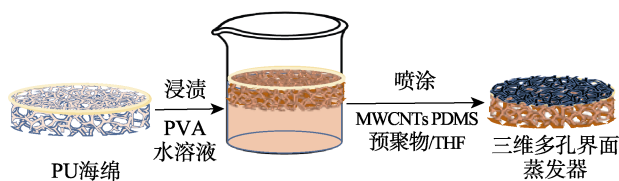


图 1 三维多孔界面蒸发器的制备流程示意图

Fig. 1 Preparation flow chart of 3D porous interface evaporator

## 1.3 测试方法

### 1.3.1 表面形貌及元素分析

采用 SEM 对 PU 海绵的表面形貌进行表征。先将测试样品裁剪为一定大小, 并用导电胶将其固定于样品台上。测试前对样品表面进行溅射喷金 60 s, 提高其导电性能。采用 EDS 对其表面各元素含量以及分布进行分析。

### 1.3.2 透水汽性测试

将半径为 5 cm、厚度为 1 cm 的测试样品置于装有 80 °C 水的烧杯正上方, 采用华为手机对样品的正上方进行拍照, 并称量 0 和 10 min 两个时刻烧

杯内水的质量。

### 1.3.3 光热性能测试

将测试样品置于氙灯光源下, 采用光密度计进行光强度调试, 采用多路式测温仪对样品表面温度进行实时监测, 并采用红外热像仪对样品表面温度进行记录。光热转换效率是从盐水 (指 NaCl 溶液, 下同) 的质量变化以及实验过程中产生的蒸汽评估的。通过式 (1) 进行光热转换效率计算<sup>[18]</sup>:

$$\eta / \% = \frac{vH}{q} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为光热转换效率, %;  $v$  为三维多孔界面蒸发器在 1 个太阳光强 (1.0 kW/m<sup>2</sup>) 下的蒸发速率减去黑暗环境下的自然蒸发速率, kg/(m<sup>2</sup>·h);  $H$  为液-气相变的总焓, J/g;  $q$  为输入太阳通量, kW/m<sup>2</sup>。

### 1.3.4 蒸发性能测试

为模拟海水淡化, 将 3 cm×3 cm×1 cm 测试样品置于装有 180 g 质量分数为 3.5% 盐水的烧杯中, 然后将烧杯置于氙灯光源下, 采用光密度计调节光强为 1.0 kW/m<sup>2</sup>, 使用电子天平测量蒸发过程中盐水的质量变化, 精确度为 0.01 g。在同一天的不同时间测试一系列样品, 所有数据取 3 次测量的平均值。

### 1.3.5 拒盐性能测试

分别配制质量分数为 3.5%、7.0%、10.0% 和 20.0% 的 NaCl 溶液, 将 3 cm×3 cm×1 cm 测试样品分别置于盛有 180 g 上述不同质量分数 NaCl 溶液的 250 mL 烧杯中, 再将烧杯置于氙灯光源下, 采用光密度计进行光强度调试, 分别对测试样品在 0、3、6、24 h 时进行华为手机拍照, 观察其表面盐沉积现象。

### 1.3.6 脱盐性能测试

用胶头滴管将集水装置中收集的水向玻璃皿中滴 5 滴, 将万用表的正负电极头都放入水中并且控制两个电极间的距离一样, 通过屏幕显示的欧姆值评估水的纯度。

### 1.3.7 防污性能测试

将待测样品剪成 5 cm×3 cm×1 cm 大小, 用双面胶平整贴于载玻片上, 然后将载玻片一端靠在培养皿上, 另一端靠在培养皿底部形成一定的倾斜角度。取少量甲基橙放置于样品表面, 用塑料滴管将水滴滴在样品表面, 用华为手机相机记录水滴在有甲基橙的样品表面的状态。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三维多孔界面蒸发器的表面微观形貌

PU 海绵、亲水改性的 PU 海绵、三维多孔界面蒸发器的 SEM 图见图 2。从图 2a 可以看出, PU 海绵具有三维多孔结构, 该结构可为水的输送及水汽

的逃逸提供条件。从图 2b 可以看出, 亲水改性的 PU 海绵的微观结构变化不大。从图 2c 可见, 喷涂的 MWCNTs/PDMS 复合分散液包裹在 PU 海绵框架周围, 三维多孔界面蒸发器仍保持多孔结构, 这对于在海水淡化过程中水蒸气的逃逸非常有益。三维多孔界面蒸发器表面的能量色散 X 射线光谱(EDS)

图(图 2d)表明, C、N、O、Si 均匀分布在亲水改性的 PU 海绵表面。

## 2.2 三维多孔界面蒸发器的透水汽性分析

PU 海绵和三维多孔界面蒸发器的透水汽性测试照片见图 3。图 3a 和 b 分别为将 PU 海绵和三维多孔界面蒸发器放在盛有 80 °C 水的烧杯上。

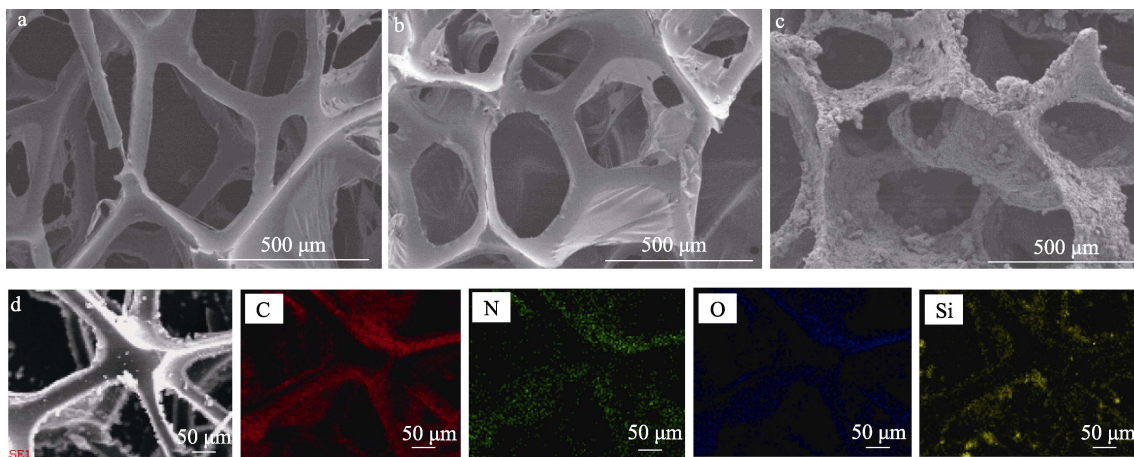


图 2 PU 海绵 (a)、亲水改性的 PU 海绵 (b) 及三维多孔界面蒸发器 (c) 的 SEM 图; 三维多孔界面蒸发器黑色面的 EDS 图 (d)

Fig. 2 SEM image of PU sponge (a), PU sponge after hydrophilic modification (b) and 3D porous interfacial evaporator (c); EDS spectra of the black side of 3D porous interface evaporator (d)

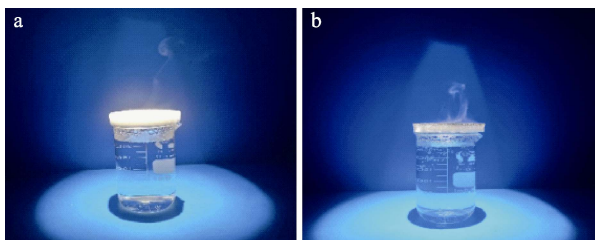


图 3 PU 海绵 (a) 和三维多孔界面蒸发器 (b) 的透水汽性测试照片

Fig. 3 Water vapor permeability test images of PU sponge (a) and 3D porous interfacial evaporator (b)

从图 3 可以看出, 烧杯正上方都有水蒸气通过蒸发器逃逸出来。通过称量烧杯内剩余水量, 发现放置三维多孔界面蒸发器的烧杯中的水在 10 min 内损失 2.52 g, 而放置 PU 海绵的烧杯中水的损失为 2.41 g。这说明三维多孔界面蒸发器具有良好的透水汽性。

## 2.3 三维多孔界面蒸发器的光热性能分析

三维多孔界面蒸发器的实物图见图 4a。其中, 黑色面为 MWCNTs 光热转换层。MWCNTs 作为一种已知的超黑材料, 在整个太阳光谱波长范围中都具有极高的吸光度。MWCNTs 含量分别为 0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9% 时制得的三维多孔界面蒸发器的表面温度变化曲线见图 4b。

从图 4b 可以看出, PU 海绵的表面最高温度为 49 °C, 而 MWCNTs 含量为 0.1% 时, 三维多孔界面

蒸发器表面温度在前 3 min 内迅速上升, 在 5 min 内达到热平衡, 最终表面温度稳定在 69 °C 左右。随着 MWCNTs 含量的逐渐增大, 三维多孔界面蒸发器的表面温度呈先增大后减小的趋势。当 MWCNTs 含量为 0.7% 时, 三维多孔界面蒸发器表面温度最大, 但此时 MWCNTs 出现脱落, 说明一定含量的 MWCNTs 可以提高三维多孔界面蒸发器的光热转换效率。当 MWCNTs 含量为 0.9% 时, 三维多孔界面蒸发器表面温度为 76 °C, 可能因为此时 MWCNTs/PDMS 分散液中 MWCNTs 含量较大, 作为黏合剂的 PDMS 不能牢固地将 MWCNTs 黏附在 PU 海绵框架上, 使 MWCNTs 容易脱落导致温度降低。从图 4c 可以看出, 当 MWCNTs 含量为 0.5% 时, 制备的三维多孔界面蒸发器的反射率 < 1.0%, 透过率 < 1.5%, 其表面温度为 81 °C, 吸收率为 98.57%。所以, 后续以该三维多孔界面蒸发器为实验研究对象。



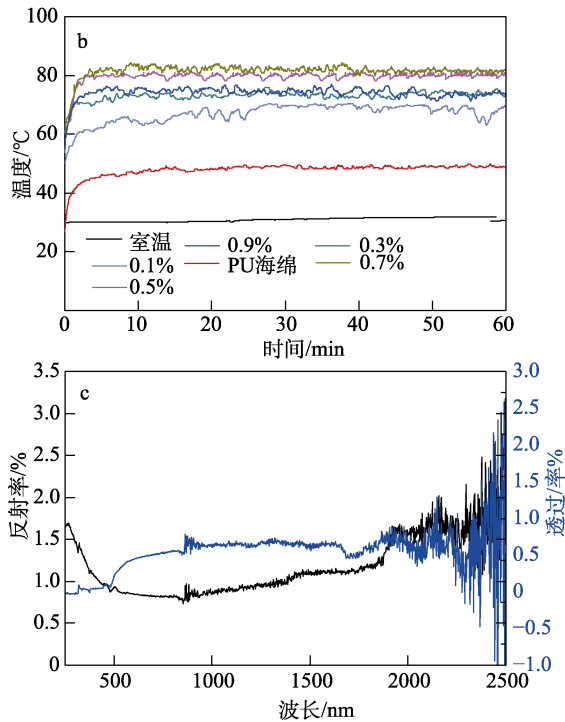


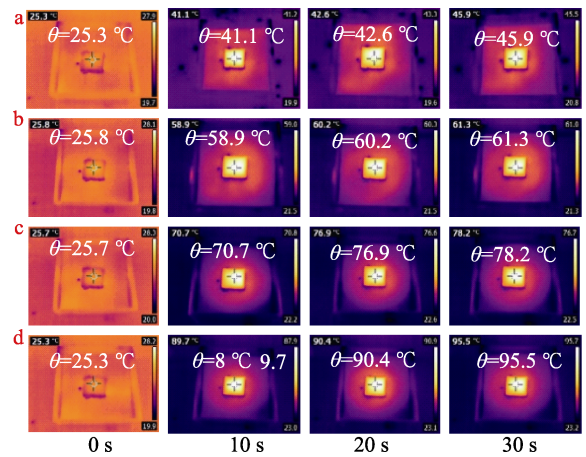
图 4 三维多孔界面蒸发器的实物图 (a); PU 海绵和由不同 MWCNTs 含量制备的三维多孔界面蒸发器的表面温度变化 (b); 由 MWCNTs 含量为 0.5% 制备的三维多孔界面蒸发器的透过率和反射率 (c)

Fig. 4 Photograph of 3D porous interfacial evaporator (a); Surface temperature changes with time of PU sponge and the 3D porous interfacial evaporators coated with various content of MWCNTs (b); Transmittance and reflectance of the 3D porous interfacial evaporator coated with 0.5% content of MWCNTs (c)

通过红外热像仪对不同太阳光强下三维多孔界面蒸发器表面温度进行了记录, 其表面红外热成像图见图 5。

从图 5 可以看出, 在太阳光照射下, 三维多孔界面蒸发器顶面迅速形成一个明显的热区, 这是由于 MWCNTs 具有宽频带和高效太阳能吸收能力, 可以实现较快的太阳能热响应。当三维多孔界面蒸发器在  $0.5 \text{ kW/m}^2$  下光照 30 s 时, 其表面温度从室温迅速升至  $45.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在  $1.0 \text{ kW/m}^2$  下光照 30 s 时, 其表面温度为  $61.3 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在  $1.5 \text{ kW/m}^2$  下光照 30 s 时, 其表面温度为  $78.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在  $2.0 \text{ kW/m}^2$  下光照 30 s 时, 其表面温度可达  $95.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在  $1.0 \text{ kW/m}^2$  光照下, 三维多孔界面蒸发器的光热转换效率达 96.75%, 表明其具有良好的光热转换能力。这可能是由于 MWCNTs 不断地吸收太阳光, 并在亲水/超疏水体系中将吸收的太阳光转化为热能, 促进水的气-液相转变。因此, 水与吸光体之间的相互作用是提高光热转换效率的关键, 在很大程度上会影响水的蒸发

速率。



a— $0.5 \text{ kW/m}^2$ ; b— $1.0 \text{ kW/m}^2$ ; c— $1.5 \text{ kW/m}^2$ ; d— $2.0 \text{ kW/m}^2$

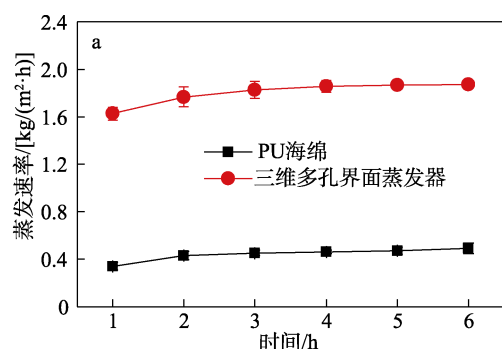
图 5 水面上三维多孔界面蒸发器在 0、10、20、30 s 和不同太阳光强下的表面红外热成像图

Fig. 5 Infrared images of 3D porous interfacial evaporator floating on the water showing the surface temperature under various sun intensity captured at 0, 10, 20 and 30 s

### 2.4 三维多孔界面蒸发器的蒸发性能分析

为评估三维多孔界面蒸发器的蒸发性能, 按 1.3.4 节进行了室内模拟光热水蒸发性能测试, 结果见图 6。

从图 6a 可以看出, 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液连续 6 h 的蒸发过程中, 三维多孔界面蒸发器的蒸发速率为  $1.80 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{h)}$ , 而 PU 海绵的蒸发速率较低, 为  $0.44 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{h)}$ , 说明三维多孔界面蒸发器具有更高效的输水能力。从图 6b 可以看出, 三维多孔界面蒸发器分别在质量分数为 3.5%、7.0%、10.0%、20.0% 的 NaCl 溶液中连续光照 6 h, 蒸发速率随着 NaCl 质量分数的增加而降低, 但在每个 NaCl 溶液中蒸发速率都在 1 h 内迅速增加后, 又有小幅度增加且蒸发速率趋于稳定。通过太阳光照下水分蒸发引起的质量随时间变化的函数来量化蒸汽生成性能。



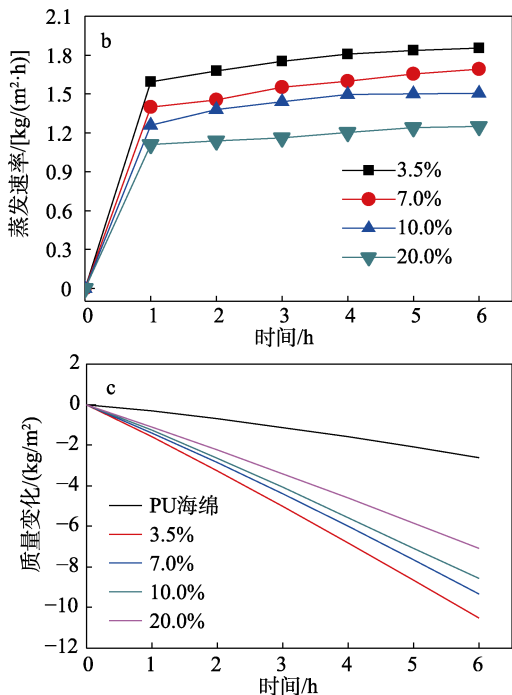


图 6 PU 海绵和三维多孔界面蒸发器连续 6 h 的蒸发速率 (a); 三维多孔界面蒸发器在质量分数为 3.5%、7.0%、10.0%、20.0% NaCl 溶液下 6 h 稳定蒸发速率 (b); 三维多孔界面蒸发器蒸发过程中水的质量变化 (c)

Fig. 6 Evaporation rates of PU sponge and 3D porous interfacial evaporator for continuous 6 h (a); Evaporation rates of 3D porous interfacial evaporator in 6 h for water in NaCl solutions with mass fractions of 3.5%, 7.0%, 10.0% and 20.0% (b); Mass change of water during the working process of 3D porous interfacial evaporator (c)

从图 6c 可以看出, 当三维多孔界面蒸发器在 1 个太阳光强下, 烧杯中 NaCl 溶液的质量损失随 NaCl 质量分数的增加而减少。随着 NaCl 质量分数的增大, 三维多孔界面蒸发器蒸发速率逐渐下降, 这可能是因为盐水的沸点随盐溶液的质量分数增加而增大, 同时 NaCl 在水中分解成 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>, 并在水中扩散开, 如果要通过蒸发作用将水分子转变成水蒸气, 就需要在脱离其他水分子吸引的同时摆脱 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>的束缚。因此, 蒸发高质量分数的盐溶液就需要更高的温度, 这将导致蒸发速率降低。

### 2.5 三维多孔界面蒸发器的拒盐性能分析

三维多孔界面蒸发器的拒盐性能测试见图 7。

从图 7 可以看出, 当 NaCl 溶液质量分数为 3.5% 和 7.0% 时, 三维多孔界面蒸发器表面在 0、3、6 和 24 h 时没有出现 NaCl 结晶。在高盐卤水 (NaCl 质量分数在 10.0%~20.0% 之间) 时, 三维多孔界面蒸发器表面出现少量 NaCl 沉积。说明三维多孔界面蒸发器在海水淡化过程中具有一定的拒盐性, 并且三维多孔界面蒸发器表面的 NaCl 结晶不会堵塞蒸汽溢出通道<sup>[19-20]</sup>。这可能是因为超疏水表面阻挡了 NaCl 溶液向三维多孔界面蒸发器表面的输送, 使

NaCl 溶液在亲水/超疏水界面加热。并且从图 7 还可以看出, 在高盐卤水中出现的 NaCl 结晶是以 NaCl 颗粒的形态存在的, 这可能是因为 NaCl 溶液随毛细作用被输送到光吸收层, 水蒸发掉而 NaCl 结晶来不及溶解而沉积在蒸发器表面, 因此, NaCl 结晶可以通过收集去除。

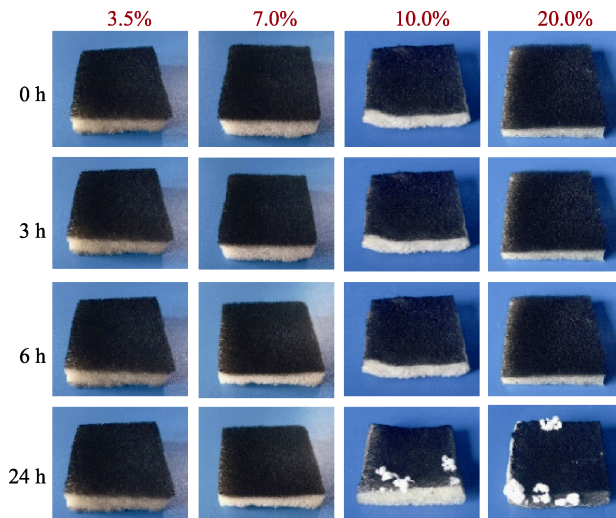


图 7 三维多孔界面蒸发器在不同质量分数 NaCl 溶液 (3.5%、7.0%、10.0%、20.0%) 中工作 0、3、6、24 h 后的照片

Fig. 7 Photographs of 3D porous interfacial evaporator working in NaCl solutions with mass fractions of 3.5%, 7.0%, 10.0%, 20.0% for 0, 3, 6 and 24 h

### 2.6 三维多孔界面蒸发器的脱盐性能分析

三维多孔界面蒸发器的脱盐性能测试见图 8。

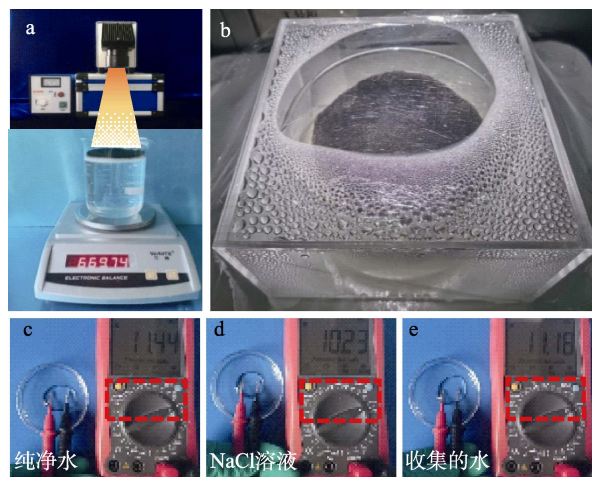


图 8 室内模拟光热测试设备 (a); 集水装置图 (b); 纯净水 (c)、质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液 (d) 和收集的水 (e) 欧姆值检测

Fig. 8 Indoor simulated photothermal testing equipment (a); Water collecting device (b); Ohmic value test of purified water (c), mass fraction 3.5% NaCl solution (d) and collected water (e)

图 8a 为海水蒸发过程的室内模拟光热测试设

备照片。为评估三维多孔界面蒸发器收集水的纯度，从图 8b 可见，首先通过集水装置对水进行收集，然后固定万用表两电极间的距离，通过显示的欧姆值检测水的纯度。从图 8c~e 可以看出，纯净水、质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液和收集水的电阻值分别为 11.44、10.23、11.18 MΩ，NaCl 溶液通过界面蒸发作用后收集的水的欧姆值接近纯净水的值，表明该三维多孔界面蒸发器具有良好的脱盐性能。

### 2.7 三维多孔界面蒸发器的自清洁性能分析

在实际使用中，大部分材料经户外长期使用后不可避免会被污物以及雨水所污染。因此，考察了污物对三维多孔界面蒸发器光热性能的影响，结果见图 9。

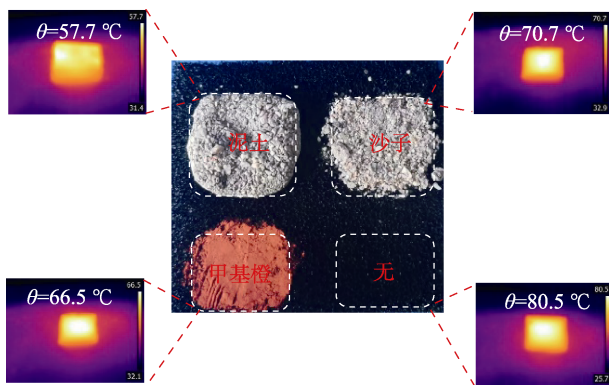


图 9 三维多孔界面蒸发器表面无覆盖物、覆盖泥土、覆盖甲基橙和覆盖沙子区域的光热性能

Fig. 9 Photothermal performance of 3D porous interfacial evaporator without and with covering of soil, methyl orange and sand

从图 9 可以看出，三维多孔界面蒸发器表面被分为覆盖泥土、覆盖甲基橙、覆盖沙子和无覆盖物 4 个区域，三维多孔界面蒸发器在 1.0 kW/m<sup>2</sup> 下经 5 min 照射后，覆盖有泥土、甲基橙、沙子区域的温度分别达到 57.7、66.5、70.7 °C，而无覆盖物的三维多孔界面蒸发器表面可达 80.5 °C。这归因于泥土、甲基橙、沙子对光的吸收性能相对较低。而 MWCNTs 能将吸收的光以热能的形式有效地表现出来。这表明三维多孔界面蒸发器表面的污染物会极大地影响其光热转换性能。因此，赋予光热转换材料自清洁性能尤为重要。

PU 海绵的自清洁测试及三维多孔界面蒸发器的自清洁测试结果见图 10。

从图 10a~c 可见，将水滴滴到 PU 海绵表面的甲基橙上，PU 海绵表面被浸湿并且被染料污染。相比之下，从图 10d~f 可以看出，水滴在具有超疏水性的三维多孔界面蒸发器表面滚落并带走染料，使其表面保持清洁，展现出优异的自清洁能力。

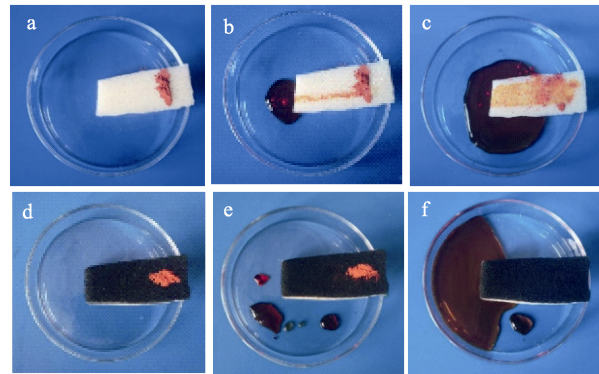


图 10 PU 海绵的自清洁测试照片 (a~c); 三维多孔界面蒸发器的自清洁测试照片 (d~f)

Fig. 10 Self-cleaning tests of PU sponge (a~c) and 3D porous interfacial evaporator (d~f)

### 2.8 三维多孔界面蒸发器的户外蒸发性能分析

将半径为 5 cm 的圆形三维多孔界面蒸发器置于装有 180 g 模拟海水 (NaCl 质量分数为 3.5%) 的 250 mL 烧杯中，并置于户外阳光直射处，其户外蒸发性能测试见图 11。从图 11 可以看出，从 10:00~16:00 时，湿度的范围为 26%~45%，温度的范围为 36.6~43.5 °C，15:00 时蒸发速率最高可达 2.508 kg/(m<sup>2</sup>·h)。这可能是因为在 15:00 时环境温度最高并且三维多孔界面蒸发器可以吸收周围环境的热量来加速水的蒸发。进一步证明，三维多孔界面蒸发器在户外环境下也具有大规模生产清洁水的巨大潜力。

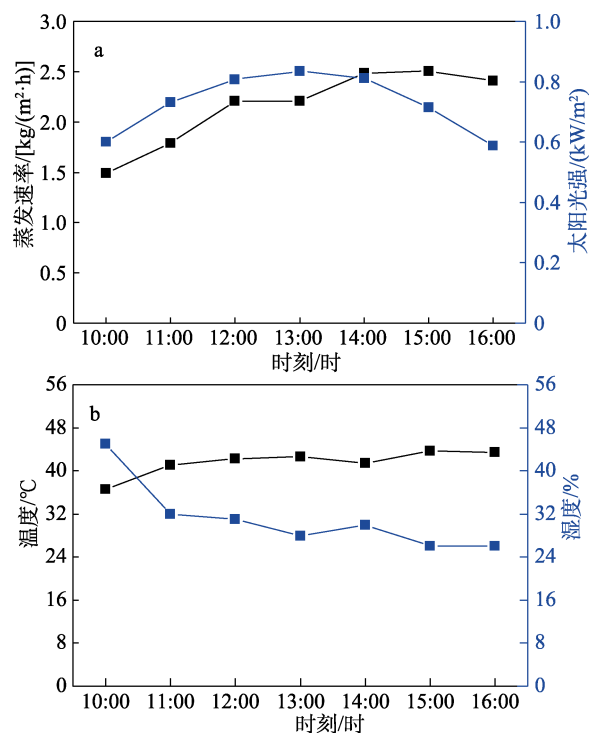


图 11 太阳光强变化和三维多孔界面蒸发器的蒸发速率变化 (a); 温度和湿度测试条件 (b)

Fig. 11 Changes of the solar radiation intensity and evaporation rate of 3D porous interfacial evaporator (a); Temperature and humidity test conditions (b)

## 2.9 三维多孔界面蒸发器的稳定性测试

考虑到三维多孔界面蒸发器在户外的实际应用中会遭受长时间严重的紫外线照射,因此对大小为 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的三维多孔界面蒸发器的超疏水表面的稳定性进行了测试,三维多孔界面蒸发器距离紫外灯(300 W) 25 cm,经不同时间照射后的表面水接触角见图12。

从图12可以看出,随着紫外灯照射时间的延长,三维多孔界面蒸发器表面水滴的接触角从0 h时的 $160.0^\circ$ 降至24 h时的 $156.7^\circ$ 。可能是因为长时间的紫外照射,对三维多孔界面蒸发器表面造成了氧化损伤,导致部分低表面能物质分解,但仍保持超疏水性。表明三维多孔界面蒸发器在24 h照射时间内有着较好的抗紫外线性能。

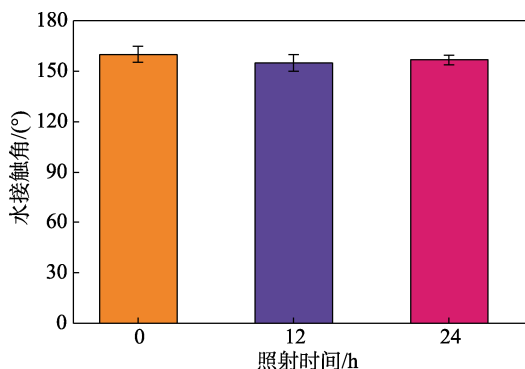


图12 三维多孔界面蒸发器经不同时间紫外灯照射后的表面水接触角

Fig. 12 Surface water contact angle of 3D porous interfacial evaporator after ultraviolet irradiation for different time

采用装有180 g质量分数为3.5%的NaCl溶液的250 mL烧杯评价了三维多孔界面蒸发器连续工作多天的蒸发速率,结果见图13。

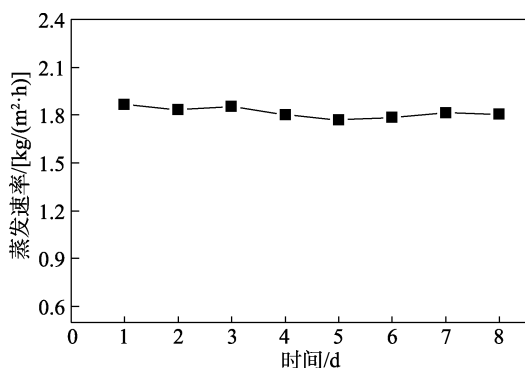


图13 三维多孔界面蒸发器连续工作多天的蒸发速率

Fig. 13 Evaporation rate of 3D porous interface evaporator with continuous working days

从图13可以看出,三维多孔界面蒸发器在每天光照6 h,连续海水淡化8 d,蒸发速率基本保持稳定,表明其在连续8 d的海水淡化中有着较好的稳定性。

## 3 结论

通过采用PVA对PU海绵进行亲水改性,并在其上表面喷涂MWCNTs/PDMS复合分散液,获得亲水/超疏水三维多孔界面蒸发器。该三维多孔界面蒸发器具有良好的光热性能、蒸发性能、拒盐性能、自清洁性能。在海水淡化过程中,三维多孔界面蒸发器在一个太阳光强( $1.0\text{ kW/m}^2$ )下表面温度达 $61.3^\circ\text{C}$ 、吸收率为98.57%,并且蒸发速率可达 $1.8\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。同时,三维多孔界面蒸发器表面的自清洁性能可避免光热涂层被污物污染,从而保障其光热转换效率的持续耐久性。因此,本文制备的三维多孔界面蒸发器可为淡水资源短缺且能源匮乏地区解决用水难题,应用前景广泛。

## 参考文献:

- [1] ZHANG P P, LI J, LV L X, *et al.* Vertically aligned graphene sheets membrane for highly efficient solar thermal generation of clean water[J]. ACS Nano, 2017, 11: 5087-5093.
- [2] LI R Y, ZHANG L B, SHI L, *et al.* Mxene  $\text{Ti}_3\text{C}_2$ : An effective 2D light-to-heat conversion material[J]. ACS Nano, 2017, 11: 3752-3759.
- [3] TAO P, NI G, SONG C Y, *et al.* Solar-driven interfacial evaporation[J]. Nature Energy, 2018, 3: 1031-1041.
- [4] YANG T, LIN H, LIN K T, *et al.* Carbon-based absorbers for solar evaporation: Steam generation and beyond[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2020, 25: e00182.
- [5] QIBLAWEY H M, BANAT F. Solar thermal desalination technologies[J]. Desalination, 2008, 220(1/2/3): 633-644.
- [6] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [7] THIRUGNANASAMBANDAM M, INIYAN S, GOIC R. A review of solar thermal technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 312-322.
- [8] HU R, ZHANG J Q, KUANG Y D, *et al.* A Janus evaporator with low tortuosity for long-term solar desalination[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(25): 15333-15340.
- [9] ZHOU X Y, GUO Y H, ZHAO F, *et al.* Hydrogels as an emerging material platform for solar water purification[J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(11): 3244-3253.
- [10] MA C, LIU Q L, PENG Q Q, *et al.* Biomimetic hybridization of Janus-like graphene oxide into hierarchical porous hydrogels for improved mechanical properties and efficient solar desalination devices[J]. ACS Nano, 2021, 15(12): 19877-19887.
- [11] WERBER J R, OSUJI C O, ELIMELECH M. Materials for next-generation desalination and water purification membranes[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(5): 16018.
- [12] LIU Y M, YU S T, FENG R, *et al.* A bioinspired, reusable, paper-based system for high-performance large-scale evaporation[J]. Advanced Materials, 2015, 27: 2768-2774.
- [13] ZHOU L, TAN Y L, WANG J Y, *et al.* 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination[J]. Nature Photonics, 2016, 10: 393-398.
- [14] LI X Q, XU W C, TANG M Y, *et al.* Oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2016, 113: 13953-13958.
- [15] XU N, HU X Z, XU W C, *et al.* Mushrooms as efficient solar steam-generation devices[J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1606762.
- [16] ZHANG B P, GU Q F, WANG C, *et al.* Self-assembled hydrophobic/hydrophilic porphyrin- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene Janus membrane for dual-functional enabled photothermal desalination[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(3): 3762-3770.
- [17] ZHAO X, CHEN Y Y, CHEN Y, *et al.* Janus polypyrrole nanobelt@polyvinyl alcohol hydrogel evaporator for robust solar-thermal seawater desalination and sewage purification[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(39): 46717-46726.
- [18] LV B, 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.
- [19] XU N, LI J L, WANG Y, *et al.* A water lily-inspired hierarchical design for stable and efficient solar evaporation of high-salinity brine[J]. Science Advances, 2019, 5(7): eaaw7013.
- [20] ANJUM A S, SUN K C, ALI M, *et al.* Fabrication of coral-rect structured nano silica for self-cleaning and super-hydrophobic textile applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 401: 125859.