

# PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发性能及水质净化研究

胡子艳<sup>1</sup>, 张林江<sup>1</sup>, 白波<sup>1,2\*</sup>, 胡娜<sup>2</sup>, 王洪伦<sup>2</sup>

(1. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;  
2. 中科院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

**摘要:**将聚多巴胺(PDA)负载在聚丙烯中空纤维(PPHF)膜上制备 PDA@PPHF 复合材料,研究了其在太阳能驱动下的界面蒸发性能及水处理性能。结果表明,在 1 个太阳光强下,PDA@PPHF 复合材料的水蒸发效率达到 80.84%,是纯水自然蒸发效率的 4.2 倍。此外,PDA@PPHF 复合材料在 1 kW/m<sup>2</sup> 太阳能驱动下进行了海水除盐和重金属以及染料废水净化,展现出良好的净水效果。实验结果表明,其有潜力应用于海水淡化、废水净化等领域,缓解水资源短缺问题。

**关键词:**聚多巴胺;聚丙烯中空纤维膜;光热转换;界面水蒸发;除盐;废水净化

中图分类号:TB34

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)03-0149-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.03.030

## Interfacial evaporation and water purification performances of PDA@PPHF driven by solar energy

HU Zi-yan<sup>1</sup>, ZHANG Lin-jiang<sup>1</sup>, BAI Bo<sup>1,2\*</sup>, HU Na<sup>2</sup>, WANG Hong-lun<sup>2</sup>

(1. The Ministry of Education's Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

**Abstract:** PDA@PPHF compound material is prepared through loading polydopamine (PDA) on polypropylene-based hollow fiber (PPHF) membrane. The interfacial evaporation performance and water treatment performance of PDA@PPHF composite material driven by solar energy are studied. It is found that the evaporation efficiency of water by PDA@PPHF composite material at one solar intensity (1 kW·m<sup>-2</sup>) reaches 80.84%, 4.2 times the natural evaporation efficiency of pure water. In addition, PDA@PPHF composite material is driven by 1 kW·m<sup>-2</sup> solar energy intensity for seawater desalination, heavy metal wastewater purification and dye wastewater purification, showing good water purification effect. The results show that the material has the potential application in seawater desalination, wastewater purification and other aspects to provide fresh water to alleviate the shortage of water resources.

**Key words:** polydopamine; polypropylene-based hollow fiber membrane; photothermal conversion; interfacial water evaporation; desalination; wastewater purification

太阳能驱动界面蒸发技术是水处理技术中最具发展潜力的技术之一<sup>[1]</sup>,在海水淡化<sup>[2]</sup>、废水净化<sup>[3]</sup>等领域中用来缓解淡水资源紧缺危机。研究发现,影响太阳能驱动界面高效水蒸发包含 2 个重要因素<sup>[4]</sup>:具备高效的光热材料,用于太阳能捕获和界面加热;具备显著的毛细作用,将水分连续输送至蒸发界面持续蒸发。

光热材料是太阳能驱动界面蒸发技术核心之一<sup>[5-6]</sup>,聚多巴胺(PDA)是一种具有黏性的光热材料,近年逐渐应用于污染水体的净化与修复<sup>[7-8]</sup>。

同时,充足的水供应在太阳能驱动水界面蒸发过程中也起着重要作用。聚丙烯中空纤维(PPHF)膜具有狭长的中空纤维结构,能够通过毛细作用力将水分连续输送至蒸发界面。凭借优异的机械性能、热稳定性、化学稳定性,PPHF 膜被广泛应用到水处理领域<sup>[9]</sup>,但是用于太阳能驱动界面蒸发技术却鲜少报道。

基于此,笔者将 PDA 负载在 PPHF 膜上制备了 PDA@PPHF 复合材料,并研究其应用于太阳能驱动界面蒸发技术中的蒸发性能和净水效果。

收稿日期:2021-04-06;修回日期:2022-01-09

基金项目:长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102291403);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021SF-497);陕西省水利厅项目(2015slkj-02)

作者简介:胡子艳(1996-),女,硕士研究生,主要从事新型功能材料方面的研究工作,1368946572@qq.com;白波(1972-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事纳米复合物的制备及应用研究,通讯联系人,baibochina@163.com。

## 1 材料与实验

### 1.1 主要材料及仪器

PPHF 膜,广州海科滤膜有限公司生产;三羟甲基氨基甲烷(tris),上海麦克林生化科技有限公司生产;盐酸多巴胺,上海麦克林生化科技有限公司生产;盐酸,西安试剂厂生产。

电子扫描显微镜(JEOL 7800);傅里叶变换红外光谱(Perkin Elmer FT-IR System 2000);紫外-可见光吸收光谱(Hitachi U4100);无接触式红外温度计(GM320, BENETECH);接触角测量仪(JC2000D1);氙灯(PLS-SXE300C/300CUV)。

### 1.2 材料制备

将 PPHF 膜浸泡在 80% 的乙醇溶液中 1 h 去除杂质。配置浓度为 10 mmol/L 的 tris 缓冲溶液,将盐酸多巴胺溶于缓冲溶液中配置成 2.0 g/L 的多巴胺溶液,通过盐酸调节 pH 至 8.5,预处理后的 PPHF 膜浸入多巴胺溶液中,常温常压条件下磁力搅拌反应。待反应完成后用乙醇、去离子水反复清洗干净,最后将制备的 PDA@PPHF 复合材料在 60℃ 烘箱中干燥烘 3 h 备用。

### 1.3 材料表征

利用电子扫描显微镜对样品的表面形貌进行观察;通过傅里叶变换红外光谱研究材料化学结构;利用紫外-可见光吸收光谱对材料吸光度进行检测;利用无接触式红外温度计检测材料在太阳光辐照过程中的表面温度,评估材料光热性能;利用 JC2000D1 型接触角测试仪对样品表面纯水接触角进行测量,表征材料亲水性能。

### 1.4 太阳能驱动界面水蒸发性能测试

为了研究 PDA@PPHF 复合材料界面水蒸发性能,设计了简易的太阳能驱动界面水蒸发装置,将 20 根 PDA@PPHF 复合材料竖直插入聚苯乙烯泡沫中形成蒸发装置。分别研究了纯水(PW)、PPHF 膜、PDA@PPHF 复合材料在太阳光辐照下蒸汽产生特性。在太阳能驱动界面水蒸发性能测试实验中,蒸发装置放入盛有 50 mL 蒸馏水的玻璃烧杯中,将其放置于分析天平上,以实时测量实验过程中水质质量变化。使用带有可调光学元件的氙灯模拟太阳光。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PDA@PPHF 太阳能驱动界面水蒸发机制

PDA 不仅具有出色的光热性能,而且富含氨

基、羟基等极性官能团,能够显著增强 PDA@PPHF 复合材料表面亲水性。因此,设计了简单、低成本的 PDA@PPHF 蒸发装置,如图 1 所示。从图 1(a)中可以看出,PDA@PPHF 蒸发装置主要由低导热率的聚苯乙烯泡沫(EPS)和 PDA@PPHF 复合材料两部分组成。EPS 主要用于支撑 PDA@PPHF 复合材料,使其下端浸入水中,上端作为光热区域。PDA@PPHF 复合材料将水分由下向上输送至顶部光热区域,在水-空气界面产生水蒸汽,其工作机制如图 1(b)所示。由图 1(b)中可以看出,由于 PPHF 独特的中空结构,不仅为蒸汽的产生提供较大的蒸发面积,而且光线能够在中空结构内多次折射,使 PPHF 上负载的 PDA 涂层更加高效吸收太阳能并转化为热能加热水分产生水蒸汽。PPHF 通过毛细作用力将水分连续输送至上部蒸发层,PDA 的引入使 PPHF 的亲水性进一步提高,以保持蒸发界面稳定的水分供应,达到持续蒸发的目的。垂直狭长的一维输水路径不仅实现了水层分离,还有效减少热量向大容积水体的传导损失。

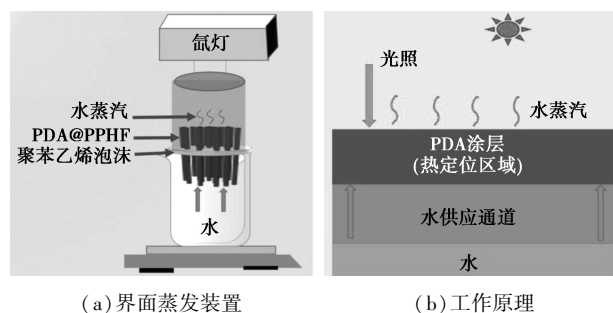


图 1 PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发装置和工作原理图

### 2.2 形貌与结构分析

为了探究 PPHF 膜及 PDA@PPHF 复合材料的表面形貌,利用电子扫描显微镜对样品进行检测分析,结果如图 2 所示。原 PPHF 膜为白色,当反应时间增长,膜的颜色逐渐加深。反应到达 24 h 后,膜颜色再无明显变化,反应达到平稳过程。由图 2(a)、图 2(b)中可以看出,原始 PPHF 膜表面较为平整,呈现不规则的网格状,具有丰富的孔结构,有利于水分传输。由图 2(c)、图 2(d)中可以看出,PDA@PPHF 复合光热材料表面为致密的平面结构,出现纳米尺度的粗糙度。这是由于 DA 对 PPHF 膜的修饰过程与单分子自组装膜形成过程类似<sup>[8]</sup>,PDA 的引入使 PPHF 膜表面粗糙度发生改变,出现波纹状的岛状结构<sup>[9]</sup>。PPHF 膜表面形态与粗糙度的改变进一步证明 PDA 附着在 PPHF 膜表面。

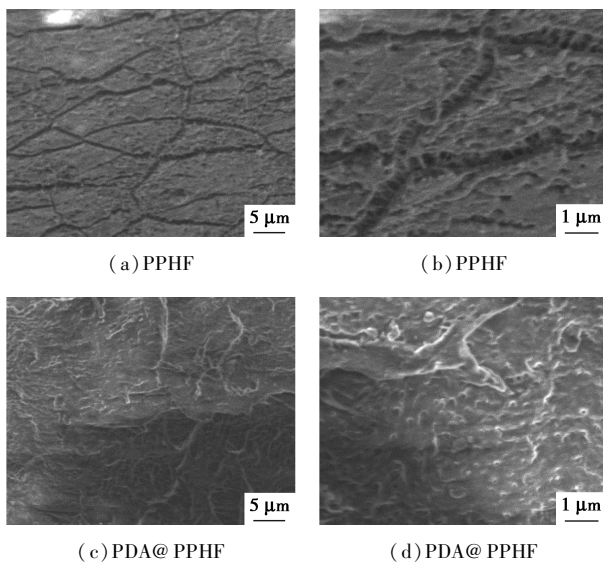


图2 不同放大倍数的 PPHF、PDA@PPHF 的 SEM 图

通过傅里叶变换红外光谱仪研究了 PDA、PPHF 膜和 PDA@PPHF 复合材料的化学结构,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,PDA 在  $3\ 700\sim 3\ 000$ 、 $1\ 650\sim 1\ 500$ 、 $1\ 287\ \text{cm}^{-1}$  等处均有特征峰。 $3\ 700\sim 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$  处为 PDA 中 O—H 和 N—H 拉伸振动吸收峰<sup>[10]</sup>。在  $1\ 650\sim 1\ 500\ \text{cm}^{-1}$  处存在芳族拉伸振动吸收峰<sup>[11]</sup>,在  $1\ 287\ \text{cm}^{-1}$  处存在 C—N 拉伸振动吸收峰<sup>[12]</sup>。PPHF 膜在  $3\ 398$ 、 $2\ 941$ 、 $2\ 882$ 、 $1\ 404$ 、 $1\ 192$ 、 $885\ \text{cm}^{-1}$  处均有特征峰。 $3\ 398\ \text{cm}^{-1}$  处为不饱和 C—H 伸缩振动吸收峰<sup>[13]</sup>, $2\ 941\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 882\ \text{cm}^{-1}$  处为—CH<sub>2</sub> 拉伸振动吸收峰<sup>[14]</sup>, $1\ 404\ \text{cm}^{-1}$  处为—CH<sub>3</sub> 弯曲振动吸收峰<sup>[15]</sup>, $1\ 192\ \text{cm}^{-1}$  处为 C—C 拉伸震动吸收峰<sup>[16]</sup>, $885\ \text{cm}^{-1}$  处为 C—H 面外弯曲振动吸收峰<sup>[16]</sup>。与 PPHF 膜相比,PDA@PPHF 复合材料在  $3\ 700\sim 3\ 000$ 、 $1\ 617$ 、 $1\ 519$ 、 $1\ 283\ \text{cm}^{-1}$  等处出现新吸收峰,表明 PPHF 膜表面成功引入 PDA。

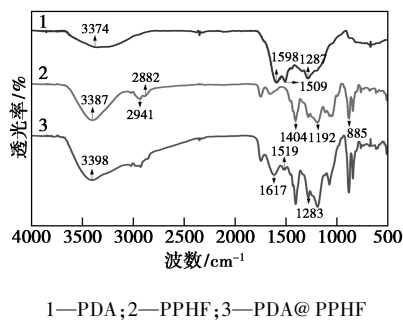
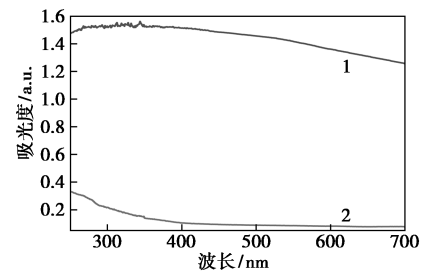


图3 PDA、PPHF、PDA@PPHF 的傅里叶变换红外光谱

### 2.3 光热性能分析

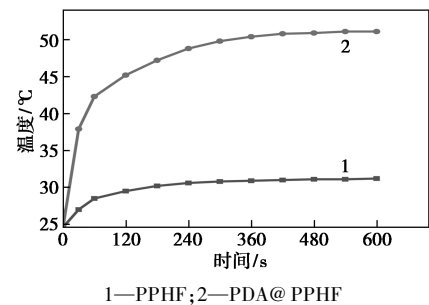
有效吸收太阳辐射能量并转化为热量是太阳能驱动界面高效水蒸发的重要因素。为了探究 PDA@PPHF 对太阳光的吸收,检测了 PPHF 膜和 PDA@PPHF 复合材料对紫外-可见光的吸光度,如图 4 所示。由图 4 中可以看出,PPHF 膜极低的吸光度表明其仅能吸收小部分的太阳光。相比 PPHF 膜,PDA@PPHF 复合材料对紫外-可见光的吸光度大幅提高,可达 1.58 左右,这归因于 PDA 分子特定的  $\pi\rightarrow\pi^*$  电子跃迁,使得 PDA@PPHF 光热复合材料高效率吸收太阳光。



1—PDA@PPHF;2—PPHF

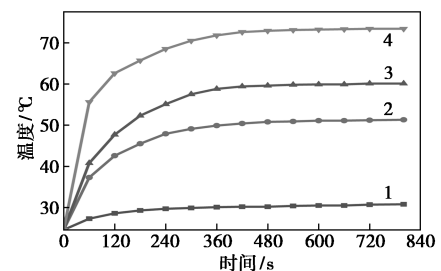
图4 PPHF、PDA@PPHF 的紫外-可见光吸收光度

为探究 PDA@PPHF 复合材料的光热转换性能,记录了 1 个太阳光强下材料表面温度随时间变化情况,结果如图 5(a) 所示。由图 5(a) 中可以看出,PPHF 膜表面温度在 120 s 左右趋于稳定,约为



1—PPHF;2—PDA@PPHF

(a) PPHF、PDA@PPHF 表面温度-时间关系



1—0.5SUN;2—1SUN;3—1.5SUN;4—2SUN

(b) 不同光照强度下 PDA@PPHF 表面温度-时间关系

图5 不同材料的光热转化性能

31℃。PDA@PPHF 复合材料表面温度在 360 s 左右达到平稳,约为 51.3℃。PDA@PPHF 复合材料表面温升明显高于 PPHF 膜表面温升,表明 PDA 具有有效的光热转换性能。当改变光强辐照 PDA@PPHF 复合材料,其表面温度随时间变化曲线如图 6(b)所示。由图 6(b)中可以看出,随着光照强度的增加,PDA@PPHF 复合材料表面温升随之增加,进一步表明 PDA@PPHF 复合材料具有良好的光热转换性能。

#### 2.4 亲水性分析

良好的亲水性是太阳能驱动界面高效水蒸发必不可少的条件。材料的亲水性可以通过表面纯水接触角来表征。利用接触角测试仪对 PPHF 膜、PDA@PPHF 复合材料的表面纯水接触角进行测量,结果如图 6 所示。当液滴滴落在 PPHF 膜和 PDA@PPHF 上,纯水接触角均迅速变化,短时间内变为 0°。从图 6(a)中可以看出,PPHF 膜纯水接触角为 82.5°,经过 4.5 s 左右变为 0°。从图 6(b)中可以看出,PDA@PPHF 复合材料纯水接触角为 69.5°,经过 1.2 s 左右变为 0°,水滴完全浸润 PDA@PPHF,表明其具有良好的亲水性。与 PPHF 膜相比,PDA@PPHF 复合材料的纯水接触角和浸润速度发生显著变化,这是由于 PDA 含有大量的亲水基团如羟基、氨基等,使得材料的亲水性明显改善<sup>[12]</sup>。

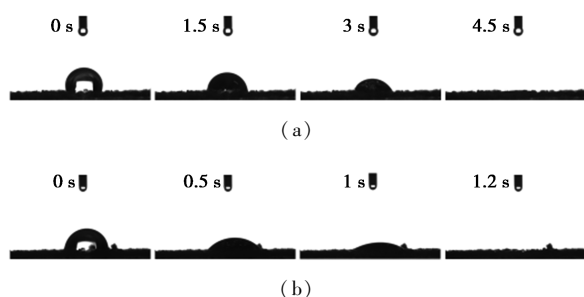


图 6 PPHF 膜、PDA@PPHF 的纯水接触角

#### 2.5 太阳能驱动界面水蒸发性能测试

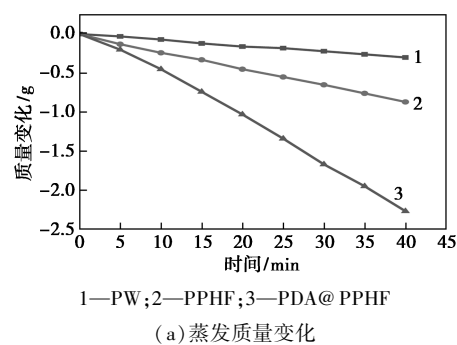
在 1 个太阳光强下记录蒸发纯水的质量变化,以准确地评估热转换效率。蒸发速率计算式为<sup>[17]</sup>:

$$m = \Delta m / (s \times t) \quad (1)$$

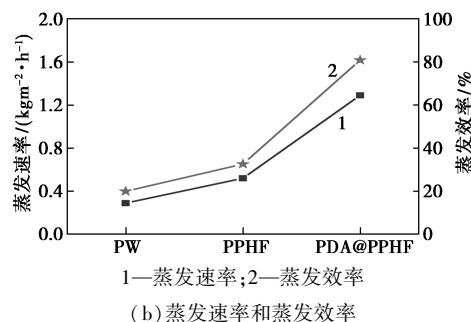
其中: $m$  为蒸发速率; $\Delta m$  为质量变化; $s$  为蒸发面积; $t$  为蒸发时间。

在稳定蒸发阶段拟合质量变化曲线,获得 1 kW/m<sup>2</sup> 辐照下所有样品的水质量损失,结果如图 7(a)所示。从图 7(a)中可以看出,PPHF 蒸发装置质量损失为 0.362 kg/m<sup>2</sup>,明显高于纯水的质量损失 (0.21 kg/m<sup>2</sup>),归因于 PPHF 的精准一维输水结构

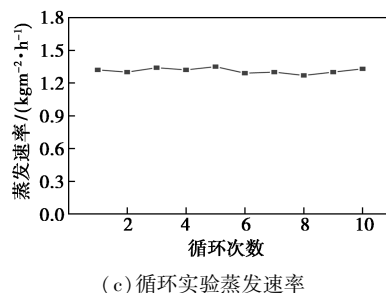
能够避免热量直接传导至大容积水中。说明通过合理的结构设计减少热损失在太阳能驱动界面水蒸发过程中的重要性。PDA@PPHF 蒸发装置质量损失为 0.903 9 kg/m<sup>2</sup>,是用 PPHF 膜蒸发装置的 2.5 倍,因为聚多巴胺层能够高效吸收太阳光并转化为热能加热水分,极大地提高了能量利用率。



(a) 蒸发质量变化



(b) 蒸发速率和蒸发效率



(c) 循环实验蒸发速率

图 7 蒸发性能测试结果

蒸发效率是一个关键的性能指标,其计算式为<sup>[17]</sup>:

$$\eta = (m \times h_{LV}) / (q_i \times C_{opt}) \quad (2)$$

其中: $\eta$  为蒸发效率; $m$  为稳定蒸发速率; $h_{LV}$  为水-蒸汽相转换焓; $q_i$  为归一化太阳强度,1 kW/m<sup>2</sup>;  $C_{opt}$  为一个太阳光强的倍数, $C_{opt}$  为 1。

纯水、PPHF 膜蒸发装置和 PDA@PPHF 蒸发装置的蒸发速率和蒸发效率如图 7(b)所示。由图 7(b)中可以看出,纯水的蒸发速率和蒸发效率分别为 0.21 kg/(m<sup>2</sup>·h)、19.43%,PPHF 膜蒸发装置的蒸发速率和蒸发效率为 0.31 kg/(m<sup>2</sup>·h)、32.59%,PDA@PPHF 蒸发装置的蒸发速率和蒸发效率显著

提升,分别为  $1.29 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $80.84\%$ , PDA@PPHF 蒸发装置性能约为纯水的 4.2 倍。结果表明 PDA 光热涂层的引入和精准一维输水结构的设计显著提高了水蒸发率和太阳能热转换效率。

在 1 个太阳光强下重复 10 次蒸发实验,结果如图 7(c) 所示。由图 7(c) 中可以看出,PDA@PPHF 蒸发装置可保持稳定的蒸发速率。利用电导率仪测量了 3.5% 的 NaCl 初始水溶液(世界海水的平均盐度)和净化后水的盐度,结果如表 1 所示。由表 1 中可以看出,经过 PDA@PPHF 蒸发装置处理后,初始水溶液的盐度从超过  $31\ 000 \text{ mg}/\text{L}$  降至小于  $100 \text{ mg}/\text{L}$ ,盐度水平显著减低,表明 PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发装置具有优异的除盐性能。此外,还对 PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发装置处理染料溶液和重金属离子废水性能进行了探究,结果如表 2、3 所示。由表 2、3 中可以看出,净化后水中的重金属离子质量浓度、甲基橙和亚甲基蓝质量浓度均大幅降低,说明通过太阳能蒸发可以有效纯化水。因此,利用丰富的不可饮用水资源包括海水、重金属废水、染料废水,通过太阳能蒸发可以实现水的脱盐和净化。

表 1 3.5 wt% NaCl 溶液、净化水、WHO 标准盐度

样品	盐水	净化水	WHO 标准
盐度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	31159	78	1000

表 2 净化前后溶液中重金属离子质量浓度  $\text{mg}/\text{L}$

	$\text{Mn}^{2+}$	$\text{Cd}^{2+}$	$\text{Ag}^+$	$\text{Cu}^{2+}$	$\text{Zn}^{2+}$
原溶液	1000	1000	1000	1000	1000
净化水	2.498	0.853	0.014	1.101	0.649

表 3 净化前后亚甲基蓝和甲基橙质量浓度  $\text{mg}/\text{L}$

	甲基橙	亚甲基蓝
原溶液	10	10
净化水	0.22	0.18

### 3 结论

利用 DA 氧化自聚合在 PPHF 上制备了 PDA@PPHF 复合材料,通过结构设计构建了高效的 PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发装置并用于太阳能蒸汽产生,其具有优异的特性:PDA 层可实现有效的光热转换;纤维结构实现了快速水扩散和毛细泵补充,以达到持续蒸发;合理的结构设计抑制了热

损失。因此,PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发装置在  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$  照度下具有  $1.29 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的水蒸发速率和  $80.84\%$  的蒸发效率。同时,PDA@PPHF 太阳能驱动界面蒸发装置显示出良好的稳定性、除盐和废水净化效果。凭借制备方法简便、高效率 and 低成本等优势,PDA@PPHF 复合材料可应用于太阳能驱动界面蒸发技术处理废水。

### 参考文献

- [1] Luo Xiao, Wu Dongxu, Huang Congliang, *et al.* Skeleton double layer structure for high solar steam generation [J]. *Energy*, 2019, 183:1032-1039.
- [2] Hu Na, Xu Yongjian, Liu Zetan, *et al.* Double-layer cellulose hydrogel solar steam generation for high-efficiency desalination [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 243:116480.
- [3] Zhang Linjiang, Bai Bo, Hu Na, *et al.* Efficient 3D-interfacial solar steam generation enabled by photothermal nanodiamonds paint-coat with optimized heat management [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 171:115059.
- [4] Zhu Mingshan, Chen Penglei, Liu Minghua. Graphene oxide wrapped Ag/AgX (X=Br, Cl) nanocomposite as a highly efficient visible-light plasmonic photocatalyst [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(6): 4529-4536.
- [5] Sun Peng, Wang Wanlin, Zhang Wang, *et al.* 3D interconnected gyroid Au-CuS materials for efficient solar steam generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(31):34837-34847.
- [6] Bai Binglin, Yang Xiaohong, Tian Rui, *et al.* A high efficiency solar steam generation system with using residual heat to enhance steam escape [J]. *Desalination*, 2020, 491:114382.
- [7] Zhao Baisong, Zheng Zili, Liu Wei, *et al.* Combination of nanolamellae and PDA coating on promoting the long-term adhesion, proliferation, and differentiation of osteoblasts [J]. *Polymer*, 2020, 196:122462-122493.
- [8] Bai Binglin, Yang Xiaohong, Tian Rui, *et al.* A high efficiency solar steam generation system with using residual heat to enhance steam escape [J]. *Desalination*, 2020, 491:114382.
- [9] Liu Zhen, Pan Qianqian, Xiao Changfa. Preparation and vacuum membrane distillation performance of a silane coupling agent-modified polypropylene hollow fiber membrane [J]. *Desalination*, 2019, 468:114060-114069.
- [10] Fan Junbing, Song Yongyang, Wang Shutao, *et al.* Directly coating hydrogel on filter paper for effective oil-water separation in highly acidic, alkaline, and salty environment [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(33):5368-5375.
- [11] Wang Kunpeng, Hou Deyin, Qi Peng, *et al.* Development of a composite membrane with underwater-oleophobic fibrous surface for robust anti-oil-fouling membrane distillation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 537:375-383.

(下转第 158 页)

性提升,可以有效地处理重金属离子溶液,去除率整体在 95% 以上,通量分别达到了 497.73、516.17、563.09 L/(m<sup>2</sup>·h),相比 M0 得到显著提高。Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Hg<sup>2+</sup>截留率可达 96.31%、97.72%、96.47%。

(2)改性膜对 3 种重金属离子抗污染性均有提升,对 Pb<sup>2+</sup> 的抗污染性最强,通量恢复率为 85.70%,相比 M0 提升了 23.13%。

(3)改性膜截留率受溶液中的离子浓度影响较小,仍然保持较高截留率,可在高盐溶液中发挥优势。

(4)pH 影响膜表面电位,当 pH 逐渐升高到 9 前截留率逐渐下降;当 pH 升高到 9 后因为溶液中金属带电中性,截留率有一定上升。

### 参考文献

- [1] Nguyen X S,张高科,廖庆玲.废水中重金属离子处理方法的研究进展[J].山东工业技术,2017,(12):53-54.
- [2] Zhang X,Song L,Zeng X,et al.Effects of electron donors on the TiO<sub>2</sub> photocatalytic reduction of heavy metal ions under visible light[J].Energy Procedia,2012,17:422-428.
- [3] Peng G, Tian G. Using electrode electrolytes to enhance electrokinetic removal of heavy metals from electroplating sludge[J].Chemical Engineering Journal,2010,165(2):388-394.
- [4] 张轩,宋小三,王三反,等.PVDF 膜的应用与污染改性分析[J].水处理技术,2021,47(8):8-13.
- [5] 张仁伟,刘四华,汤超,等.PVDF 超疏水微孔膜调控研究[J].膜科学与技术,2020,40(3):7-13,21.
- [6] Cui X,Choo K H.Natural organic matter removal and fouling control in low-pressure membrane filtration for water treatment[J].Environ Eng Res,2014,19:1-8.
- [7] Teow Y,Ooi B,Ahmad A.Fouling behaviours of PVDF-TiO<sub>2</sub> mixed-matrix membrane applied to humic acid treatment[J].Water Process,2017,15:89-98.
- [8] Susan L, Ismail S, Ooi B, et al. Surface morphology of pvdf membrane and its fouling phenomenon by crude oil emulsion[J]. Water Process,2017,15:55-61.
- [9] Meng F,Chae S R,Drews A,et al.Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material[J].Water Res,2009,43:1489-1512.
- [10] Goh P,Lau W,Othman M,et al.Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies[J].Desalination,2018,425:130-155.
- [11] Arahman N,Satria S,Razi F,et al.The effect of Ca and Mg ions on the filtration profile of sodium alginate solution in a Polyethersulfone-2-(methacryloyloxy) ethyl phosphorylcholine membrane[J].Water,2018,10:1207.
- [12] Park S, Lee K S, Bozoklu, et al. Graphene oxide papers modified by divalent ions-enhancing mechanical properties via chemical cross-linking[J].ACS Nano,2008,2(3):572-578.
- [13] 汪洋.氧化石墨烯(GO)基金属纳米颗粒与聚偏氟乙烯(PVDF)膜改性研究[D].上海:上海应用技术大学,2020.
- [14] Saeedi-Jurkuyeh A, Jafari A J, Kalantary R R, et al. A novel synthetic thin-film nanocomposite forward osmosis membrane modified by graphene oxide and polyethylene glycol for heavy metals removal from aqueous solutions[J].Reactive & Functional Polymers, 2020,146:1-12.
- [15] 马聪,黄敬云,王亮.GO/PVDF 共混超滤膜的制备及其抗生物污染性能研究[J].膜科学与技术,2018,38(4):64-69.
- [16] Selvanathan V, Yahya R, Shahiduzzaman M, et al. Ionic liquid infused starch-cellulose derivative based quasi-solid dye-sensitized solar cell; Exploiting the rheological properties of natural polymers[J].Cellulose,2021,28:1-13.
- [17] 李春.离子液体在高性能聚偏氟乙烯材料中的应用研究[D].南昌:东华理工大学,2014.
- [18] 房平,王琪,张壮,等.离子液体/聚偏氟乙烯共混膜的制备及性能研究[J].化工新型材料,2020,48(12):52-56.
- [19] Rajasekaran M, Ayappa K Ganapathy. Influence of surface hydrophilicity and hydration on the rotational relaxation of supercooled water on graphene oxide surfaces[J].Physical chemistry chemical physics:PCCP,2020,22(28):16080-16095.
- [20] Wang S, Li X, Liu Y, et al. Nitrogen-containing amino compounds functionalized graphene oxide: Synthesis, characterization and application for the removal of pollutants from wastewater: A review[J]. Journal of Hazardous Materials,2017,342:177-191.
- [21] Fan Q, Yang Y, Hao Y K, et al. Preparation of three-dimensional PANI/GO for the separation of Hg(II) from aqueous solution[J]. Journal of Molecular Liquids,2015,212:557-562. ■
- [12] Wang Zhangxin, Hou Deyin, Lin Shihong. Composite membrane with underwater-oleophobic surface for anti-oil-fouling membrane distillation[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 50(7): 3866-3874.
- [13] Sun Fei, Li Tingting, Zhang Xiayun, et al. In situ growth polydopamine decorated polypropylene melt-blown membrane for highly efficient oil/water separation[J]. Chemosphere, 2020, 254: 126873.
- [14] Jai Prakash Chaudhary, Nilesh Vadodariya, Sanna Kotrapannavar Nataraj, et al. Chitosan-based aerogel membrane for robust oil-in-water emulsion separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(44): 24957.
- [15] Yang Xi, He Yi, Zeng Guangyong, et al. Bio-inspired method for preparation of multiwall carbon nanotubes decorated superhydrophilic poly(vinylidene fluoride) membrane for oil/water emulsion separation[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 321: 245-256.
- [16] Yang Jin, Chen Yu, Jia Xiaohua, et al. Wood-based solar interface evaporation device with self-desalting and high antibacterial activity for efficient solar steam generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(41): 47029-47037.
- [17] Gao Minmin, Zhu Liangliang, Peh Connor Kangnuo, et al. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(3): 841-864. ■

(上接第 153 页)