高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

碳化稻壳/聚吡咯Janus结构光热蒸发器的制备及抗污染性能

王镇玉, 方　伟, 赵　雷, 陈　辉, 王大珩, 何　漩, 杜　星, 李薇馨
(武汉科技大学先进耐火材料全国重点实验室, 武汉 430081)

摘要　利用太阳能驱动的光热蒸发器进行海水淡化和污水处理是缓解水资源短缺的有效途径之一, 但也存在盐分和污染物在蒸发器中大量沉积的问题, 影响器件的循环蒸发性能. 本文采用聚氨酯复合碳化稻壳粉末制备了具有三维多孔结构的泡沫基体, 进一步在泡沫基体上层修饰疏水性聚吡咯, 构建了上层疏水/下层亲水的不对称润湿性Janus结构光热蒸发器. 研究发现, 该蒸发器在1 kW/m^{2}的太阳光照射下具有1.33 kg·m^{-2}·h^{-1}的最优盐水蒸发效率和1.29 kg·m^{-2}·h^{-1}的污水蒸发效率, 且展现出良好的可循环性能.

关键词　碳化稻壳; 聚吡咯; Janus结构; 光热蒸发器; 抗污染性能
中图分类号　0644　　**文献标志码**　A　　doi: 10.7503/cjcu20250019

Preparation and Anti-pollution Properties of Carbonized Rice Husk/Polypyrrole Janus Solar Evaporator

WANG Zhenyu, FANG Wei*, ZHAO Lei, CHEN Hui, WANG Daheng, HE Xuan, DU Xing, LI Weixin
(*State Key Laboratory of Advanced Refractories*, *Wuhan University of Science & Technology*, *Wuhan* 430081, *China*)

Abstract　Harvesting clean water from seawater and wastewater based on solar-driven evaporators is emerging as one of the most promising ways to alleviate the shortage of water resources today. However, it also faces a typical defect of massive deposition of salts and pollutants in the functional evaporator, which generally influences the cyclic evaporation performance of the device. To address this problem, in this work a featured foam with a 3D porous structure was first prepared by combining polyurethane foam and carbonized rice husk powders. Then, the hydrophobic polypyrrole was introduced in the upper layer of this foam matrix to construct a Janus solar evaporator with asymmetric wettability while the upper layer shows hydrophobicity and the lower layer allows hydrophilicity. The results indicated the Janus solar evapovator demonstrates a maximum brine evaporation rate of 1.33 kg·m^{-2}·h^{-1} and wastewater evaporation rate of 1.29 kg·m^{-2}·h^{-1} under solar irradiation of 1 kW/m^2, combining with good cycle

收稿日期: 2025-01-17. 网络首发日期: 2025-04-30.
联系人简介: 方　伟, 男, 博士, 高级实验师, 主要从事光热转换及光催化技术方面的研究. E-mail: fangwei@wust.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22105151, 52305211)、湖北省重点研究计划项目(批准号: 2022BAA094)、湖北省自然科学基金(批准号: 2024AFB836, 2023AFB626)、武汉市知识创新工程(批准号: 2022010801010306)、绿色化学工程过程教育部重点实验室开放项目(批准号: GCP2022003)、武汉市青年科技昭阳计划项目(批准号: whkx202203)和武汉科技大学“十四五”湖北省优势特色学科(群)项目(批准号: 2023A0305)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos.22105151, 52305211), the Key Research Program of Hubei Province, China (No. 2022BAA094), the Natural Science Foundation of Hubei Province, China(Nos. 2024AFB836, 2023AFB626), the Knowledge Innovation Project of Wuhan, China(No. 2022010801010306), the Open Project of Key Laboratory of Green Chemical Engineering Process of Ministry of Education, China(No.GCP2022003), the Youth Science and Technology Zhaoyang Program of Wuhan, China(No.whkx202203) and “The 14th Five Year Plan” Hubei Provincial Advantaged Characteristics Disciplines(groups) Project of Wuhan University of Science and Technology, China (No.2023A0305).

stability. In addition, the introduction of organic polyurethane networks also endows the Janus evaporator with excellent structural stability, which can be fabricated and tailored to various sizes and shapes for large-scale application.

Keywords Carbonized rice husk; Polypyrrole; Janus structure; Solar-driven evaporator; Anti-pollution property

随着社会的发展和人口的增长，水污染和水资源短缺问题日益严重[1]. 通过开发功能性材料从海水和废水中获取淡水已成为极具前景的研究方向. 传统的海水淡化和废水处理方法(如多效蒸馏[2]、多级闪蒸[3]、电渗析[4]和反渗透技术[5])，不仅需要较高的设备要求，且不可避免地造成了对化石能源的大量消耗. 因此，开发低成本、便携和节能的替代技术对于应对淡水资源问题具有重要意义.

太阳能驱动的界面蒸发技术[6~9]因环保、基础设施水平低等优点而备受关注. 近年来，研究人员通过开发光热材料、优化热管理和设计水通道，有效提高了界面太阳能蒸发器的光热转换效率和蒸发速率[10,11]. 然而，在高浓度盐水以及污水的连续处理过程中，空气/水界面处的溶液浓度会逐渐增加并接近饱和点，最终导致盐以及污染物在光热材料表面积累[12,13]，进而产生增加太阳反射率、减少吸收、阻塞供水和蒸汽逸出等负面影响，最终导致蒸发速率显著降低，并严重影响蒸发器的长期可循环性. 制备具有上层疏水和下层亲水的Janus结构蒸发器[14~16]是目前比较有效的抑制盐沉积的方法之一. Zhu等[17]基于海水的传输和蒸发需求首次报道了一种由亲水性聚丙烯腈(PAN)层和疏水性炭黑/聚甲基丙烯酸甲酯层组成的Janus蒸发器，率先提出利用水传输层亲水性和光吸收层疏水性协同实现高效水蒸发和抗盐沉积，其在1个光强下具有1.3 kg·m^{-2}·h^{-1}水蒸发速率，且能有效阻碍盐的沉积. Zhang等[18]也报道了一种设计合理的柔性膜，具有自组装疏水/亲水卟啉$Ti_3C_2T_x$ MXene结构，卟啉在MXene上自组装产生疏水表面，可有效提高耐盐性. 目前报道的Janus结构蒸发器大多数采用多层二维薄层结构，虽具有优异的光热蒸发速率和抗盐沉积能力，但因受器件制备技术和整体尺寸的影响，普遍存在器件力学强度差、制备程序复杂等问题，不利于大规模应用.

基于此，本文拟通过有机网络骨架结合无机亲/疏水光热材料技术构筑三维Janus结构蒸发器，以在保证高蒸发速率、抗污染的同时优化器件的力学强度. 有机网络骨架采用制备效率高、工艺简单的聚氨酯发泡技术，使骨架结构兼具高韧性和多孔泡沫特性；在此基础上，于发泡前驱体中引入生物质碳化稻壳作为亲水性光热介质，在发泡过程中嵌入碳化稻壳颗粒增强泡沫体的亲水性和光吸收能力；进而，通过引入疏水性聚吡咯对泡沫体上层进行修饰，制备上层疏水、下层亲水的典型Janus结构蒸发器. 研究了蒸发器的微观结构、表界面性质、光热蒸发速率、抗污染性能和力学性质，优化了制备技术，为器件大规模应用提供了参考.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

稻壳，湖北宜昌；聚醚330 N，工业级，常州卓联志创高分子材料科技有限公司；聚氨酯发泡剂A/B组分，工业级，福州进生工贸有限公司；吡咯、*N*,*N*-二甲基甲酰胺(DNF)、三氯化铁($FeCl_3$)和聚偏二氟乙烯，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；十七氟癸基三乙氧基硅烷($C_{16}H_{19}F_{17}O_3Si$)，分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；亚甲基蓝($C_{16}H_{18}N_3ClS$，MB)和甲基橙($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$，MO)，分析纯，上海阿拉丁生化科技有限公司；去离子水(电阻率18.2 MΩ·cm).

NICOLET iS50型傅里叶变换红外光谱分析仪(FTIR)，美国Thermo Fisher Scientific公司；Nova 400 NanoSEM型场发射扫描电子显微镜(SEM)，美国FEI公司；Lambda750S型紫外-可见分光光度计(UV-Vis)，XS500太阳光模拟器，中国中教金源科技有限公司；TIS20红外热成像仪，美国FLUKE公司；PTX-FA210S电子分析天平，中国华志电子科技有限公司；DZDR-S快速导热仪，南京大展检测仪器有限公司；OCA15PRO型接触角测量仪，德国Dataphysi公司；DXR2xi型激光拉曼光谱仪(Raman)，Thermo Fisher Scientific公司；JW-BK132F型比表面积及孔径分析仪，北京精微高博仪器有限公司.

1.2 样品制备

1.2.1 碳化稻壳粉末的制备 将稻壳用去离子水反复清洗，去除杂质，置于80 ℃鼓风干燥箱中干燥12 h. 将50 g稻壳放入坩埚中，用锡纸进行包裹，以5 ℃/min升温速率升温至700 ℃并保温2 h，得到碳化稻壳(CR)，将其研磨成细粉，备用.

1.2.2 疏水性聚吡咯的制备 参考文献[19]的方法，将1 mL吡咯单体分散在100 mL去离子水中，在冰浴的条件下持续搅拌2 h. 将50 mL 0.1 mol/L $FeCl_3$水溶液加入到上述混合溶液中，继续搅拌30 min，待溶液变为墨绿色之后，将其放置在0 ℃条件下静置12 h. 将制备的悬浊液离心分离出聚吡咯，采用去离子水和无水乙醇进行洗涤，干燥，加入0.5%(质量分数)十七氟癸基三乙氧基硅烷溶液，搅拌1 h后，烘干，得到疏水性聚吡咯(PPy).

1.2.3 碳化稻壳/聚吡咯Janus结构蒸发器的制备 将0.9 g碳化稻壳粉末加入到1.2 g聚醚330 N、1.6 g DMF和1.0 g聚氨酯A组分中，混合均匀，得到混合液. 向混合液中加入1.0 g聚氨酯B组分，持续搅拌至均匀，静置10 min，使其自然发泡. 将泡沫体置于120℃烘箱中干燥12 h，使溶剂蒸发，得到碳化稻壳聚氨酯泡沫体. 将其切割为2.0 cm×2.0 cm×0.5 cm的块体，备用，记为CRF；同时，采用相同工艺制作不添加碳化稻壳的空白聚氨酯泡沫体，记为PU.

将0.3 g疏水性聚吡咯和0.5 g聚偏氟乙烯加入到10 mL DMF中，在70 ℃条件下搅拌获得均匀分散的疏水涂料悬浊液. 随后分别移取0.5，1.0和1.5 mL悬浊液，并滴于2.2 cm×2.2 cm×0.3 cm的方形容器中，将提前分割好的CRF块体置于其中，使悬浊液在CRF一端表面自然吸附. 根据疏水涂料用量及疏水层的厚度分别编号为CRF@PPy-1 mm，CRF@PPy-2 mm，CRF@PPy-3 mm，其中，1，2和3 mm分别对应疏水层的厚度.

1.3 光热水蒸发性能测试

样品的光热水蒸发性能采用实验室自组装装置进行测试，采用2 cm×2 cm×5 cm石英比色皿作为蒸发容器，所用蒸发溶液包含去离子水、盐水、MB和MO，采用太阳光模拟器提供光照强度为1 kW/m^2的太阳光，使其垂直照射在样品表面. 采用电子分析天平记录整个水蒸气蒸发过程中体系的质量损失，并采用红外热成像仪测试蒸发系统的表面温度.

2 结果与讨论

2.1 Janus结构蒸发器的表征

不同的疏水层厚度并不影响蒸发器亲水层和疏水层的表面官能团和微观结构，因而选用纯碳化稻壳泡沫CRF和复合样品CRF@PPy-1 mm研究疏水层引入前后器件结构的变化. 图1(A)为CR，PPy和CRF@PPy-1 mm样品的FTIR光谱图，位于1538.2 cm^{-1}处的峰对应于吡咯环的振动，位于960.3和765.8 cm^{-1}处的峰归属于═C—H面外振动，位于1277.9 cm^{-1}处的峰为C—N键的拉伸振动，位于1033.8 cm^{-1}处的峰则属于吡咯环的C—H键和N—H键的面内变形[20]，这些对应的红外吸收峰不仅出现在聚吡咯样品中，在CRF@PPy-1 mm中也有出现，说明聚吡咯已成功负载到复合蒸发器中. 采用激

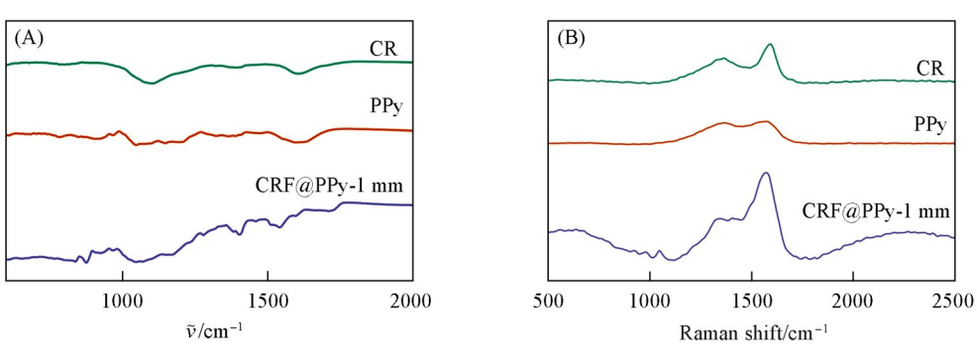


Fig. 1 FTIR(A) and Raman(B) spectra of CR, PPy and CRF@PPy samples

光拉曼光谱仪表征3组样品的物相组成，结果如图1(B)所示．CR样品在1330~1350 cm^{-1}和1580~1600 cm^{-1}范围内出现了2个明显的散射峰，其中1330~1350 cm^{-1}范围内的峰代表碳的特征D带[21]，其峰形较为宽泛，对应于经过热处理后碳化稻壳形成的无序结构；位于1580~1600 cm^{-1}处的峰可能与有机芳环堆砌结构或碳的G带有关[22,23]，在本研究体系中，碳化稻壳的碳化温度为700 ℃，不足以形成结晶度较高的石墨化碳，因而1580~1600 cm^{-1}范围内峰的强度应归属于碳化稻壳中未热解完的芳香环结构．计算CR和CRF@PPy-1 mm样品在1340和1590 cm^{-1}处峰的强度比分别为0.6196和0.3761，可以看出，引入聚氨酯组分后峰的比值明显降低，更加说明1580~1600 cm^{-1}范围拉曼峰的增强不能归因于石墨化程度的提高，而可能是由于有机环的堆砌所致．

采用扫描电子显微镜观察了Janus结构蒸发器的微观结构．如图2(A)和(B)分别为碳化稻壳粉末和PPy的SEM照片，可以看出，经研磨后碳化稻壳的粒径呈现出微米级离散分布状态，从高倍照片可看出，粉末仍一定程度保留稻壳原有的遗态结构；由吡咯单体氧化聚合形成的PPy则直径更小(200~300 nm)，且以纳米团簇的聚集态形式存在．图2(C)和(D)分别为PU和CRF的微观形貌，可见，纯的PU具有规则的圆形气泡孔结构，直径分布在100~500 μm之间，孔壁光滑，且多数展现为封闭状态，这些规则的闭孔结构主要是基于聚氨酯原料中的活泼氢和异氰酸酯根反应，放出大量的热和CO_2气体，使整个结构产生体积膨胀，并最终形成了光滑的封闭泡沫结构；相较之下，CRF中由于加入了大量的CR粉末，在发泡阶段对泡沫的稳定性产生了较大影响，使得壁膜不能承受气体压力升高引起的拉伸而破裂，形成开放的孔道结构，并且孔壁由于CR空间位阻作用而变得粗糙，这种开放的孔结构更有利于光热转换过程中水的传输．图2(E)和(F)分别为复合样品CRF@PPy-1 mm的上层表面和侧面亲/疏水层分界处的SEM照片，从图2(E)可以看出，PPy颗粒的引入未影响CRF的多孔泡沫结构，仅在泡沫孔内壁负载了一层致密均匀的纳米颗粒结构；图2(F)侧面分界处照片清晰展示出分层Janus结构的结构特性，分界处上层泡沫体表面及孔壁相比于下层更加粗糙，这是纳米结构负载的典型特征，从图2(F)中的高倍照片也可看到明显的纳米颗粒层，说明成功构建了上下层具有不同微观结构的蒸发器．

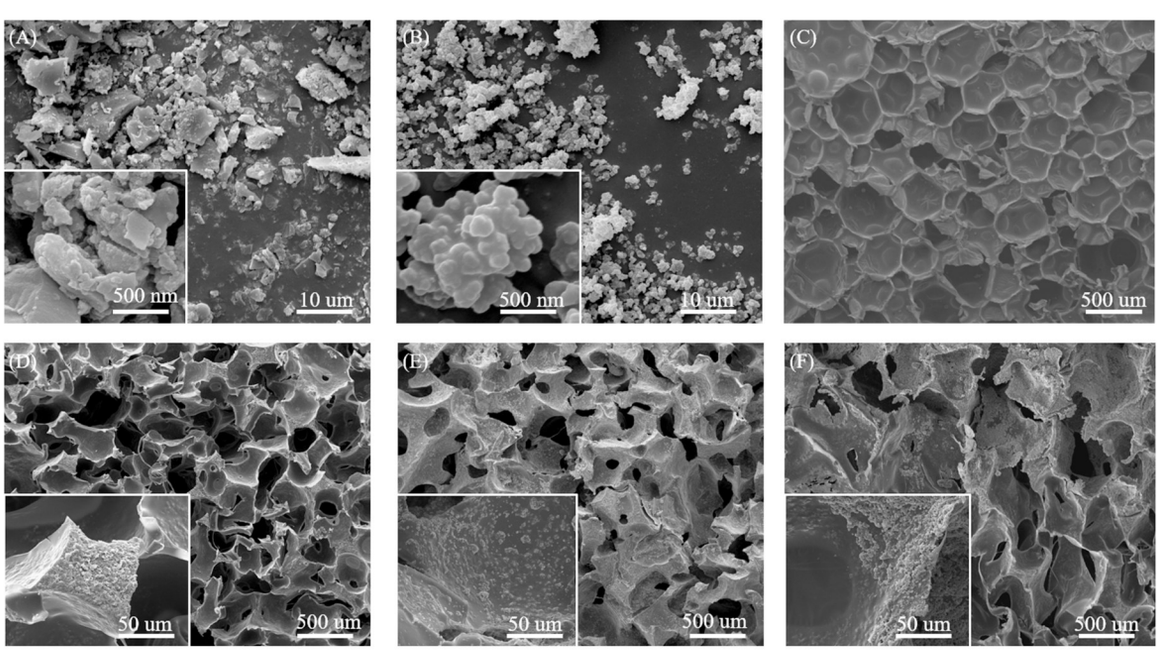


Fig. 2　SEM images of CR(A), PPy(B), PU(C), CRF(D), CRF@PPy-1 mm(E) and CRF@PPy-1 mm(side)(F)

为了探明碳化稻壳在整个蒸发器中的分布情况，对复合样品断面进行了能量色散谱(EDS)面扫描分析．从图3(A)~(D)可以清晰地看到，碳化稻壳具有的Si元素主要分布于泡沫体骨架断口表面，说明碳化稻壳在原位发泡过程中被紧密包覆在聚氨酯有机骨架内部，形成了均匀致密的网络结构，这有助于提高泡沫体的结构稳定性．

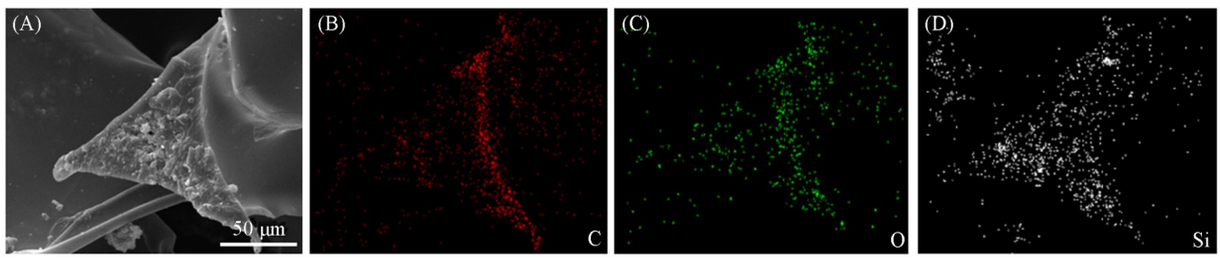


Fig. 3　SEM image(A) and EDS element mapping images(B—D) of CRF@PPy-1 mm

采用BET比表面积及孔径分析仪对PPy，PU和CRF@PPy-1 mm的孔道结构进行表征，图4(A)是样品的氮气吸附-脱附等温线．可见，PPy，PU和CRF@PPy-1 mm样品均表现出Ⅳ型吸附曲线，其在低压区表现出相对缓慢的趋势，并出现H4型回滞环，属于微孔和中孔的混合结构．计算各样品的比表面积可知，PPy的比表面积(4.2 m^2/g)较低，这是由于通过化学氧化法制备的PPy颗粒团聚现象比较严重，内部孔隙率较低．PU的孔道较大且表面光滑，具有16.7 m^2/g的比表面积，而CRF@PPy-1 mm由于表面负载的PPy和内部的CR组分形成了微纳米的层级结构，比表面积明显增加，达到35.1 m^2/g. 图4(B)和(C)为PPy，PU和CRF@PPy-1 mm的介孔和微孔分布曲线图，可以看出，其反映出与吸附-脱附等温线相同的规律，CRF@PPy-1 mm以介孔-中孔为主，而对于光热蒸发器而言，大孔径的孔结构更有利于水的传输和蒸汽逸出．

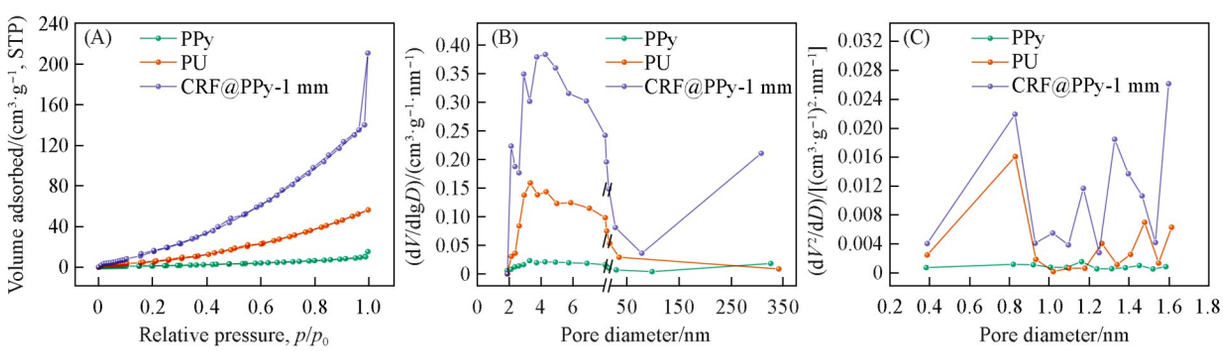


Fig. 4　Nitrogen adsorption-desorption isotherms(A), mesoporous distribution curves(B) and micropore distribution curves(C) of PPy, PU and CRF

为了更直观地分析制备的不同厚度Janus结构蒸发器的基本性质，首先对不同厚度疏水层的样品外观进行了对比分析，由图5(A)可以看出，经不同体积聚吡咯前驱液浸渍后，样品侧面展现出不同的分层区域，聚吡咯上层区域颜色更深，且随着前驱液体积增大，疏水层厚度有所增加．将制备的不同结构泡沫体漂浮于水面以分析其与水的亲润性[图5(B)]，在未引入碳化稻壳前，PU泡沫主要以封闭气孔为主，水分无法进入泡沫体内部，并且本身密度较小，使整个泡沫体完全漂浮在水面，这种结构不利于水的传输；当引入碳化稻壳后，CRF的开孔结构以及碳化稻壳中的Si—OH亲水性基团有效改善了泡沫体对水的亲润性，整体浸没在水中，这可以为水的传输提供便捷的通道，但也存在热量快速向水中扩散导致热损失的问题；对于构筑的双层Janus结构CRF@PPy蒸发器，可以看出下部原有的CRF亲水部分浸入水中，而上层由于疏水性PPy涂层的引入漂浮于水面，漂浮的高度随着疏水层厚度的增加有所上升，与器件设计目标一致．图5(C)分析了原始的PU泡沫、CRF以及CRF@PPy复合样品上层和下层的接触角，可以清晰看出样品在分步制备过程中亲润性的变化．疏水的PU泡沫(接触角132.5°)在引入碳化稻壳后亲水性(接触角63°)和开孔结构有了明显的改善，可作为亲水层为水的传输提供基础；进而，随着PPy疏水层的引入，样品上层和下层分别展现出不同的亲润性，上层疏水(接触角约135°)有利于隔热和抗污染物沉积，下层亲水有利于水的输运．为了表征CRF@PPy复合样品的热管理能力，对CRF和CRF@PPy的导热系数进行了测试，如图5(D)所示，干燥时，CRF和CRF@PPy复合样

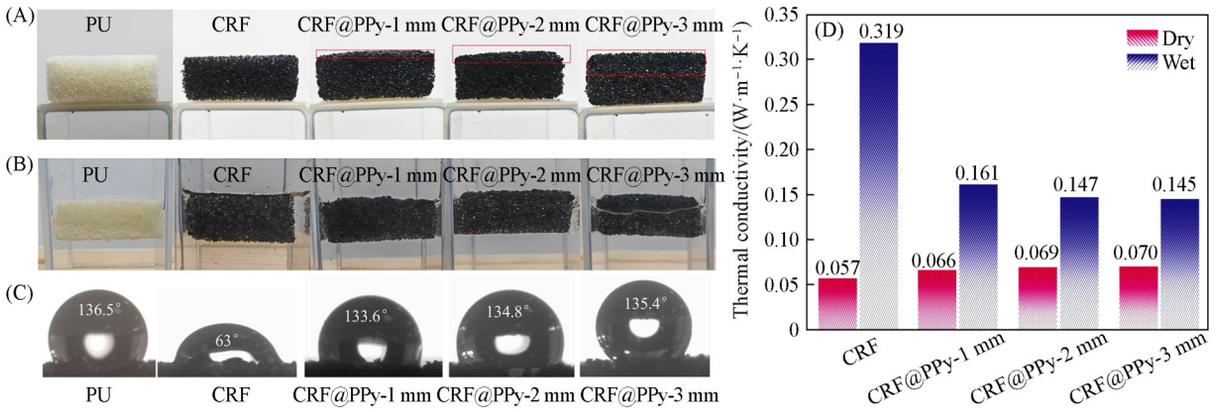


Fig. 5 Photograph of a block of the PU foam, CRF and CRF@PPy-1 mm(A), floating on the water(B), Contact angle(C) and heat conductivity(D) of the original PU foam, CRF and CRF@PPy-1 mm

品均表现出极低的导热系数，这与有机物聚氨酯泡沫的低导热率有关，在表面负载聚吡咯后，复合器件导热率有略微增大；而当器件处于浸湿状态时，导热率变化出现了截然不同的趋势，相比于CRF，引入了疏水层的复合样品具有更低的热导率，且随着疏水层厚度的增加，导热系数逐渐降低，充分说明分层Janus结构有效抑制了热量通过水的传递，有利于光热蒸发过程中热的集中.

采用紫外-可见分光光度计测量了200~2500 nm波长范围内各样品的光吸收性能，如图6(A)所示，纯的PU泡沫在紫外波段有较强的吸收，在可见光和近红外区光吸收较差，不满足光热转换的波段要求；CRF样品因添加了具有宽带光吸收性能的碳化稻壳，在紫外-可见-近红外均有很强的光吸收能力，平均光吸收率达到93.91%；当采用PPy对CRF上层进行修饰后，复合样品的光吸收率得到进一步提升，平均光吸收率均达到96%以上，说明PPy的引入还具备增强蒸发器光吸收和光热转换的效用；此外，比较不同疏水层厚度样品的光吸收曲线还可发现，当PPy层厚度从1 mm增加到2 mm时，样品平均光吸收率有一定程度的提升，从96.97%增加到98.26%，说明该厚度范围还属于光在复合样品多孔结构中的有效传播范围，光仍可通过多重反射和折射被吸收，而当厚度进一步增加至3 mm时，样品光吸

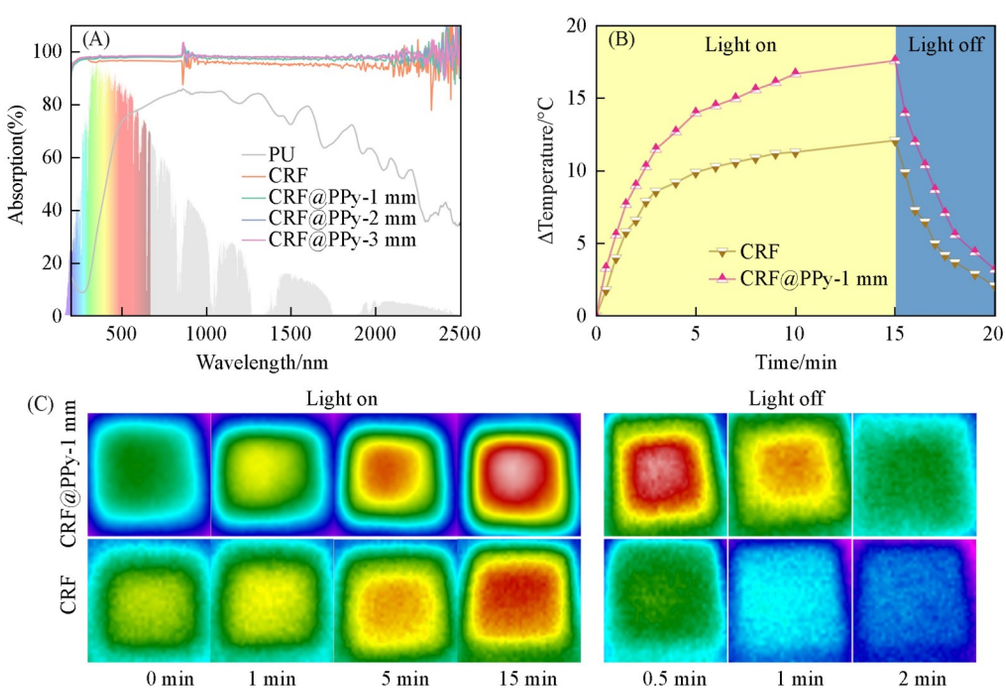


Fig. 6 Light absorption of pure PU foam, CRF and CRF@PPy(A), temperature curves(B) and infrared temperature photograph(C) of CRF and CRF@PPy-1 mm with or without light

收率基本保持稳定，此时疏水层厚度的变化并不再影响光的吸收，只影响水的传输和热量的传递.

为了直观反映Janus结构构筑对器件光热转换性能的影响，首先评估了CRF和CRF@PPy-1 mm样品漂浮于水面时经15 min连续光照的实时温度变化. 如图6(B)和(C)所示，CRF和CRF@PPy-1 mm初始温度分别为28.0和28.2 ℃，经光照后，样品表面温度迅速上升，15 min时CRF@PPy-1 mm表面温度升至45.8 ℃，相比之下，CRF由于存在较大的热量损失温度仅达到40.1 ℃；停止光照后，CRF因整体浸没在水中，表面温度迅速降低，而Janus结构复合样的降温速度明显缓慢得多，充分说明Janus结构既具有优异的光热转换性能还可以有效管理热量.

采用不同疏水层厚度的Janus结构蒸发器进行了光热水蒸发性能测试，结果如图7所示. 图7(A)为样品在光照下表面的实时温度变化曲线，可见，所有样品的表面温度在光照初期都经历一个快速上升的过程，这是由于蒸发器吸收太阳光进行了高效的光热转换，产生了大量的热；之后，随着与下方水以及周围环境的热量交换使得升温速率逐渐变缓，并最终趋于稳定. 比较不同样品的表面温度变化可知，随着疏水层厚度的增加，蒸发器表面平衡温度逐步升高，CRF@PPy-3 mm样品的表面平衡温度达到近60 ℃. 在界面光热蒸发系统中，样品表面的平衡温度实则是光热转换与蒸发器-水以及蒸发器-周围环境热传递的平衡过程，高的表面温度说明体系有较好的热管理能力，但过高的温度也表明蒸发器-水的热传递行为受到抑制，可能会影响水蒸气的产生，因而在进行Janus结构构筑时要兼具热管理、水的传输以及蒸发器-水的热传递过程. 图7(B)示出了不同厚度疏水层蒸发器在纯水体系中的光热水蒸发速率，可以明显看出，Janus结构的构筑有助于提升水蒸发的速率，CRF@PPy-2 mm样品的水蒸发速率最高，达到1.36 $kg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，但随着疏水层厚度继续增加，CRF@PPy-3 mm样品的蒸发速率大幅降低，这可能是由于疏水层的厚度过大，下层的水难以向上输运，进而抑制热量向水的传递.

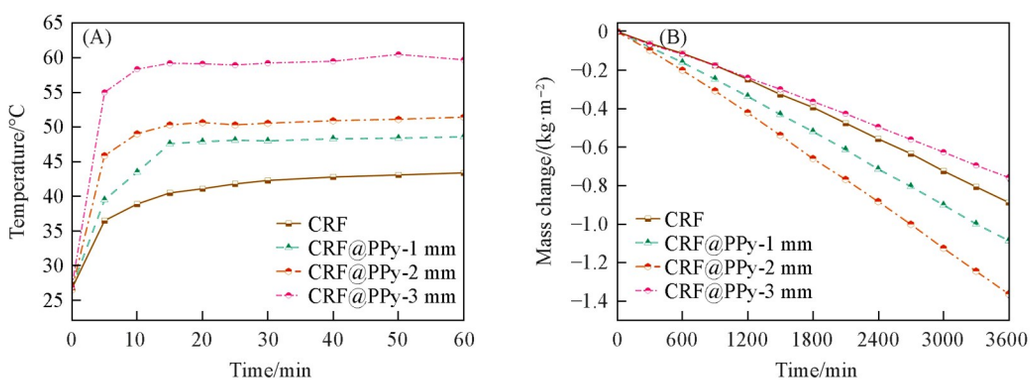


Fig. 7 Surface temperature changes(A) and corresponding mass changes(B) of CRF and CRF@PPy over time at an optical density of 1 kW/m²

2.2 Janus结构蒸发器的抗污染性能

盐和污染物沉积问题是实现持续太阳能海水淡化面临的巨大挑战，为了评估Janus结构蒸发器的抗盐沉积性能，分别测试了CRF和CRF@PPy-2 mm样品在不同浓度NaCl溶液中的水蒸发性能. 如图8(A)~(C)所示，两组样品的蒸发速率均随NaCl浓度的升高而逐渐减小，相比较而言，CRF@PPy-2 mm复合样的减小幅度更小，在3.5%，10%和20%(质量分数)NaCl溶液的相应蒸发速率分别为1.33，1.26和1.18 $kg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，说明Janus结构的构筑有抵抗盐水的效用. 为了更直观反映CRF@PPy Janus结构蒸发器的抗盐效果，对CRF和CRF@PPy-2 mm样品进行循环蒸发实验，采用更接近于海水浓度的3.5%(质量分数)盐水作为蒸发液，每一次循环过后将水分烘干继续测试. 如图8(D)~(G)所示，CRF样品随着循环的进行，表面积累了越来越多的盐粒[图8(G)]，并且循环蒸发速率逐渐降低[图8(D)]；相比较而言，CRF@PPy-2 mm复合样品的表面经4 h循环后并没有出现明显的盐沉积现象[图8(G)]，其循环蒸发速率也能保持长期稳定[图8(E)]，表明CRF@PPy蒸发器具有出色的抗盐沉积性能. 图8(H)和(I)还评价了CRF@PPy蒸发器对有机污染物沉积的抑制效用，选用2.5 mg/L的MB溶液作为蒸发液，对CRF和CRF@PPy-2 mm进行污水蒸发和抗污染实验. 从循环蒸发数据可以看出，在污水环

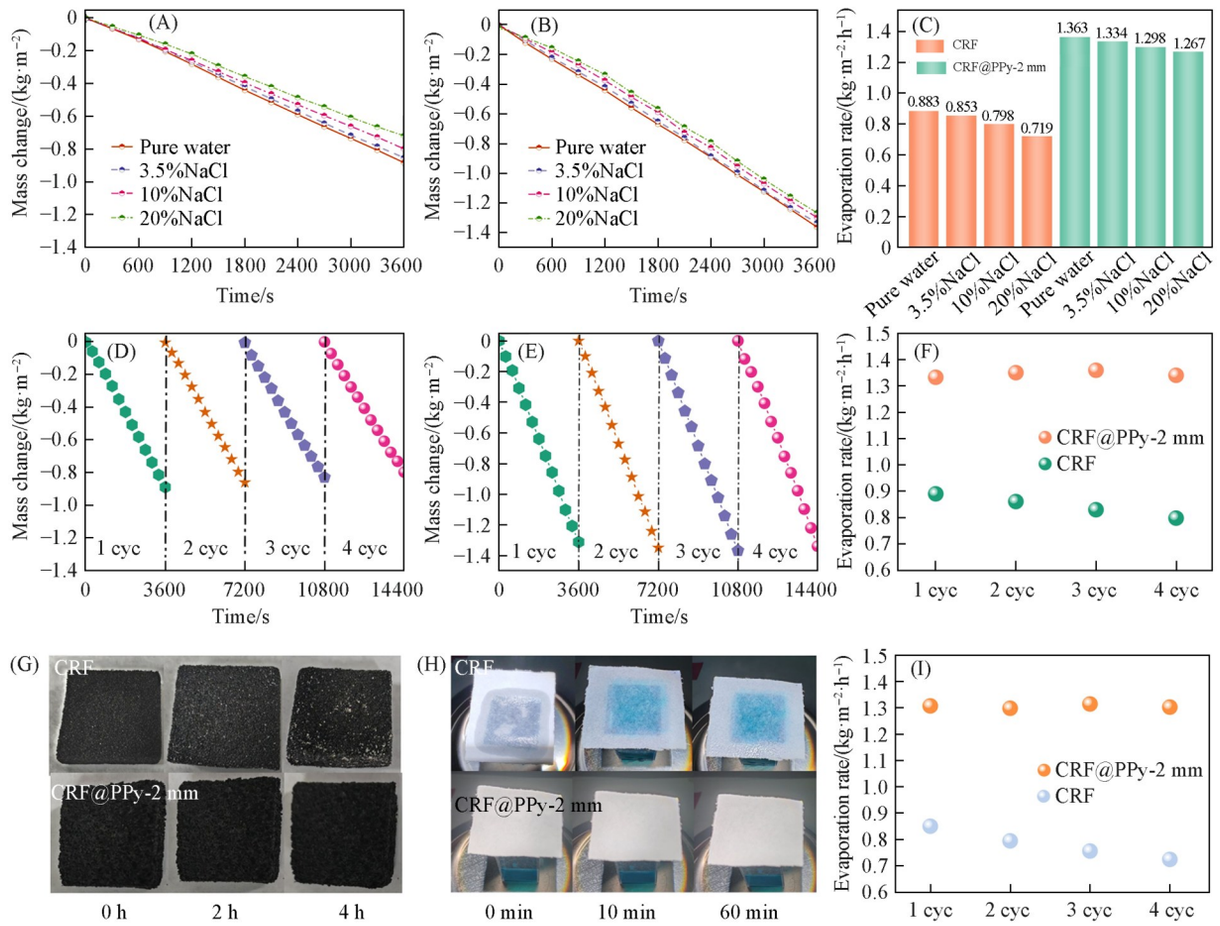


Fig. 8 Mass changes and evaporation rate(C) of CRF(A) and CRF@PPy(B) at different concentrations of brine, mass changes and evaporation rate(F) of CRF(D) and CRF@PPy(E) under cyclic evaporation experiments, anti-salt deposition properties of CRF and CRF@PPy-2 mm(G), anti-fouling properties(H) and cyclic evaporation performance(I) in MB solution

Orange column in (C): CRF; cyan column in (C): CRF@PPy-2 mm.

境中，CRF@PPy复合样品仍展现出优异的抗沉积性能[图8(I)]，样品经4次循环后，蒸发速率稳定保持在约1.32 kg·m^{-2}·h^{-1}；且从样品表面放置的滤纸颜色变化可知，CRF@PPy能很好地阻碍污染物在蒸发器表面沉积[图8(H)]，进一步证明了其优异的抗污染性能.

此外，为了探究有机染料对Janus结构水蒸发性能的影响，图9(A)和(B)分别为针对CRF和CRF@PPy-2 mm在不同浓度的MB水溶液进行水蒸发性能测试结果. CRF@PPy-2 mm在高浓度的MB溶

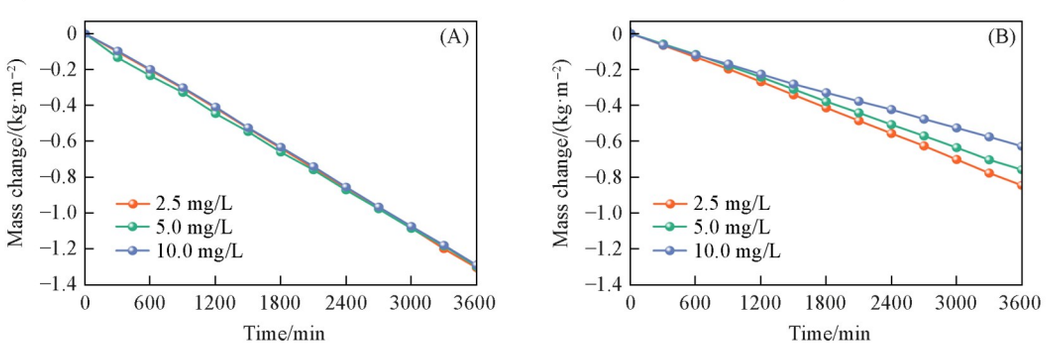


Fig. 9 Mass changes of CRF(A) and CRF@PPy-2 mm(B) in methylene blue(MB) aqueous solutions with varying concentrations

液中能保持1.3 kg·m^{-2}·h^{-1}左右的蒸发速率. 相比之下, 在CRF蒸发过程中, 由于MB在蒸发器表面沉积, 影响了光吸收以及光热转化的进程, 其蒸发速率有明显的下降, 并且随着MB的增大有加剧的趋势, 这进一步验证了Janus结构的抗污染性能.

上述研究都表明制备的CRF@PPy Janus结构蒸发器具有优异的抗盐和抗污染物性能, 但在实际应用中, 界面光热蒸发器需兼具优异的力学性能和可加工性. 聚氨酯骨架的引入极大增强了蒸发器的机械稳定性和柔韧性, 利于大规模的制备和应用. 如图10(A)所示, CRF@PPy复合Janus结构蒸发器可承受200 g的静态负载, 满足光热蒸发器一般使用的要求; 且经反复压缩折叠50次后, 蒸发器仍能恢复到原来的形状, 展现出极好的柔韧性. 为了验证CRF@PPy蒸发器疏水层结构在苛刻条件下的使用稳定性, 将蒸发器分别置于80 ℃热水以及不同pH值溶液中浸泡1 h, 其表面接触角照片如图10(B)所示, 实验前后蒸发器上层接触角没有发生明显变化, 表明蒸发器具有一定的耐环境侵蚀能力. 此外, 由于CRF@PPy蒸发器具备优异的柔韧性、稳定的三维多孔结构、简单的制备工艺, 其可根据应用场景需求裁剪、镶嵌、组合成不同形态的蒸发器产品[图10(C)], 具有极广泛的生产和应用前景.

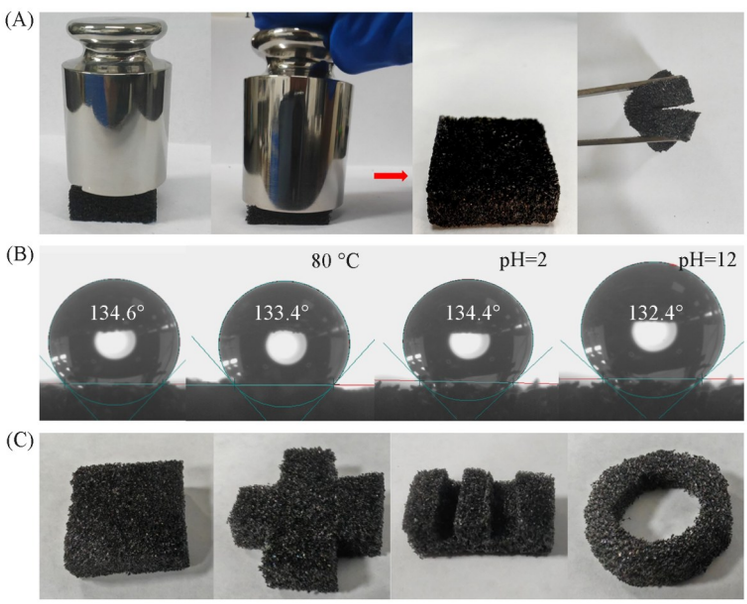


Fig. 10 Photographs of the CRF@PPy under a compressing and releasing (A), contact angle of CRF@PPy-2mm in different environments(B) and evaporators of different shapes(C)

图11为CRF@PPy-2 mm蒸发器放大制备后进行污水户外蒸发实验的数据图. 按图11(A)装置分

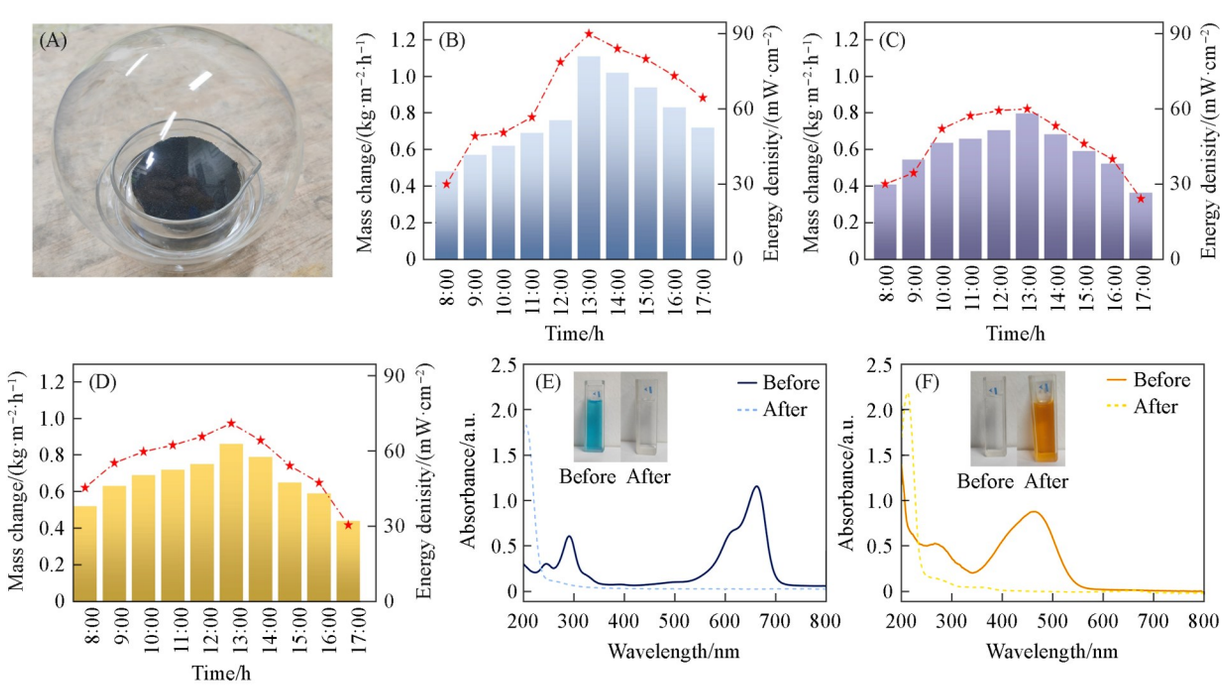


Fig. 11 Outdoor evaporation unit(A), one-day evaporation rate and sunlight intensity of pure water(B), MB solution(C) and MO solution(D) and purification experiments of MB(E) and MO(F)

别进行了纯水、MB和MO溶液的蒸发测试，监测日照全天不同时间段的蒸发速率，并与太阳光强度进行关联分析，比较日照强度不同对蒸发率的影响．如图11(B)~(D)所示，在自然光照条件下，器件仍具有比较优异的光热水蒸发性能，在60和71 mW/cm^{2}的光强下，对2.5 mg/L MB和MO溶液的蒸发速率分别为0.79和0.86 kg·m^{-2}·h^{-1}；同时，对MB和MO溶液蒸发收集的蒸发液进行紫外吸收分析，如图11(E)和(F)所示，对应于有机染料的特征吸收峰(MB：664 nm；MO：463 nm)完全消失，说明制备的Janus结构蒸发器可有效将污水提纯净化，具有实际应用前景．

3 结　　论

采用碳化稻壳构筑三维多孔泡沫，并通过疏水性聚吡咯进行泡沫体改性，成功制备了具有上层疏水和下层亲水的CRF@PPy Janus结构光热蒸发器；Janus结构的设计使复合光热蒸发器在具有较高蒸发速率的同时可有效抵抗盐和污染物的沉积，在1 kW/m^{2}的太阳光照强度下，复合蒸发器最优的盐水蒸发速率为1.33 kg·m^{-2}·h^{-1}，最优的MB溶液蒸发速率为1.29 kg·m^{-2}·h^{-1}，并且在经4 h循环蒸发后蒸发器表面没有明显的盐和污染物沉积，表现出优异的循环稳定性；此外，引入聚氨酯泡沫作为骨架，也使CRF@PPy复合蒸发器具有优异的柔韧性和力学稳定性，能根据需求制作成各种形态的器件，也能长时间稳定应用于复杂环境中．

参　考　文　献

[1] Elimelech M., Phillip W. A., *Energ. Environ. SCI.*, **2011**, *333*(6043), 712—717
[2] Andrés-Mañas J. A., Roca L., Ruiz-Aguirre A., Acién F. G., Gil J. D., Zaragoza G ., *Applied Energy*, **2020**, *258*, 114068
[3] Lv H., Wang Y., Wu L., Hu Y., *Desalination*, **2019**, *465*, 69—78
[4] Alkhadra M. A., Gao T., Conforti K. M., Tian H., Bazant M., *Desalination*, **2020**, *476*, 114219
[5] Anis S. F., Hashaikeh R., Hilal N., *Desalination*, **2019**, *452*, 159—195
[6] Li L., Zhang J ., Nano Energy, **2021**, *81*, 105682
[7] Ma B., Fan D., Zhang G., Liao Y., Shen Z., Lu Y., *Solar RRL*, **2023**, *7*(20), 2300484
[8] Yang Z. H., Cheng H. J., Yang Y., Liu H., Du F. P., Zhang Y. F., *Chem. J. Chinese Universities*, **2022**, *43*(10) , 20220181(杨兆华，成鸿静，杨弋，刘辉，杜飞鹏，张云飞. 高等学校化学学报. **2022**, *43*(10), 20220181)
[9] Jiang Y. L., Xu Y. S., Wang J. K., Li W. H., Song Y., Wang X. Z., Yao Z. P., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, *46*, 20240469(姜艳丽，徐云松，王建康，李伟豪，宋英，汪新智，姚忠平. 高等学校化学学报, **2025**, *46*, 20240469)
[10] Zhao X., Lan Y., Wang T., Jiang Y., Pan J., *J. Mater. Chem. A*, **2022**, *10*(26), 13895—13906
[11] Xu C., Yu X., Liu Y., Zhang X., Liu S., *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2023**, *5*(9), 7375—7389
[12] Dong X., Li H., Gao L., Chen C., Shi X., Du Y., Deng H., *Samll*, **2022**, *18*(13), 2107156
[13] Chen L., He S., Huang W., Liu D., Bi T., Zhang C., Chen C., *Compos. Part. B: Eng.*, **2023**, *263*, 110830
[14] Wang J., Chen Z., Feng L., Yu F., Ran C., Xu N., Jia Z., Li C., Zheng Y., Shi W., Li M., *Nano Energy*, **2023**, *114*, 108631
[15] Lv X., Zhu Y., Du Y., Ma H., Zhang H., Tian W., Li X., Ji J., *Sep. Purif. Technol.*, **2025**, *355*, 129676
[16] Wu H., Wang X., Liu M., Wang Y., Feng S., Wu T., *Desalination*, **2025**, *597*, 118363
[17] Xu W., Hu X., Zhuang S., Wang Y., Li X., Zhou L., Zhu S., Zhu J., *Adv. Energy Mater.*, **2018**, *8*(14), 1702884
[18] Zhang B., Gu Q., Wang C., Gao Q., Guo J., Wong P. W., Liu C. T., An A. K., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, *13*(3), 3762—3770
[19] Fan S., Wang Z., Liang P., Li H., Zhang Y., Fan W., Xu G., *J. Mater. Res. Technol.*, **2022**, *19*, 4337—4949
[20] Wang Z., Yan Y., Shen X., Jin C., Sun Q., Li H., *J. Mater. Chem. A.*, **2019**, *7*(36), 20706—20712
[21] Hao Y. F., Wang Y. Y., Wang L., Ni Z. H., Wang Z. Q., Wang R., Shen Z. X., Coo CK., *Small*, **2010**, *6*(2), 195—200
[22] Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., *Phys. Rev. Lett.*, **2006**, *97*(18), 187401
[23] Bokobza L., Bruneel J. L., Couzi M., *Carbon*, **2015**, *1*(1), 77—94

(Ed.: F, K, S)