

学术前沿专栏:太阳能驱动界面光热蒸发器

【特约主持人】刘山虎:河南大学教授,英国皇家化学会会士

【主持人按语】随着全球人口数量的持续增长和工业化进程的加快,淡水资源短缺问题日益凸显,太阳能驱动的界面水蒸发是通过光热材料高效地将太阳能转化为热能并用于水处理的一种技术,可用于偏远离网地区的淡水获取.本期专栏聚焦光热界面蒸发技术,《基于咖啡渣生物质碳的 Janus 光热蒸发器用于高效抗盐太阳能水净化》针对界面蒸发过程中的抗盐性能开展研究,以废弃咖啡渣和酚醛泡沫等低值材料构筑了具有不对称润湿特性的 Janus 结构光热蒸发器.上层疏水层可以有效阻止盐在蒸发界面沉积,下层亲水结构维持持续供水与离子扩散.在优化条件下,该蒸发器在盐质量分数为 3.5% 的模拟海水户外实验中的日平均产水量为 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,且在连续 14 d 的户外循环蒸发实验中未出现明显盐结晶,显示出良好的抗盐性能.《水凝胶基太阳能驱动界面水蒸发器研究进展》综述了光热界面水蒸发器的材料组成,重点介绍了水凝胶基太阳能界面蒸发器的成型工艺与结构设计策略,讨论了结构调控对蒸发性能的影响规律;对蒸发焓的常用测定方法,以及蒸发焓的变化与水凝胶中水的状态之间的关系进行了介绍;最后探讨了高性能水凝胶基界面蒸发器面临的主要挑战,并展望其未来发展方向.这两篇研究论文虽然关注的光热材料不同,但都集中于光热界面蒸发研究中重要的科学问题,比如蒸发器的结构设计、蒸发焓的调控和抗盐等关键点,为下一代高性能太阳能驱动蒸发体系的设计与性能优化提供了技术支撑.

基于咖啡渣生物质碳的 Janus 光热蒸发器用于高效抗盐太阳能水净化

刘山虎¹,刘小于¹,张盼盼¹,邢方¹,邢瑞敏²

(1.河南大学 化学与分子科学学院,河南 开封 475004;2.河南大学 能源科学与技术学院,郑州 450046)

摘要:以废弃咖啡渣为前驱体,通过热解法制备碳化咖啡渣生物质纳米材料(CG),并将其作为光热材料.采用十八烷基三氯硅烷(OTS)对滴涂 CG 后的亲水性酚醛泡沫(CG@PF)进行表面疏水改性,构建了一种具有 Janus 结构的蒸发器.该蒸发器由上层疏水的 OTS-CG 光热层与下层亲水的酚醛泡沫(PF)供水基底组成,形成具有不对称润湿特性的 Janus 结构.一系列实验结果表明,当滴涂的 CG 质量浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,所制备的 OTS-10-CG@PF 蒸发器性能最佳,在 0.5、1.0 和 $2.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 模拟太阳光辐照下蒸发速率分别达到 0.87 、 2.52 和 $3.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.该蒸发器在户外实验中的日平均产水量为 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,在模拟海水中连续 14 d 的户外循环蒸发实验中未出现明显盐结晶,显示出良好的抗盐性能.此外,OTS-10-CG@PF 对含重金属离子的废水和含有机染料的废水均表现出较好的净化能力,表明其在废水处理领域具有潜在的应用前景.

关键词:光热材料;生物质;Janus 结构;界面蒸发;海水淡化

中图分类号: P747; X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2026)03-0021-08

收稿日期: 2025-09-19; **修回日期:** 2025-12-20.

基金项目:国家自然科学基金(22575076);河南省科技攻关项目(242102240045);水污染控制与绿色资源循环利用国家重点实验室基金(PCRRF25020);中国石油勘探开发研究院项目(RIPED-2019-CL-186).

作者简介(通信作者):刘山虎(1977-),男,河南濮阳人,河南大学教授,博士生导师,研究方向为能源转化及光热界面反应, E-mail: shanhuliu@henu.edu.cn.

引用本文:刘山虎,刘小于,张盼盼,等.基于咖啡渣生物质碳的 Janus 光热蒸发器用于高效抗盐太阳能水净化[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(3):21-28.(Liu Shanhu, Liu Xiaoyu, Zhang Panpan, et al. A Janus photothermal evaporator based on coffee grounds biochar for highly efficient and salt-resistant solar-driven water purification[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(3): 21-28. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.09.19.0001.)

淡水资源短缺是制约全球工农业可持续发展和威胁人类生存的关键挑战之一^[1-3].在自然资源日益紧张的背景下,利用清洁可持续的太阳能进行海水淡化,被视为缓解淡水匮乏的有效途径之一^[4-7].在各类太阳能驱动的海水淡化技术中,界面太阳能蒸汽产生系统因其较高的能量转换效率和操作简单等特点受到广泛关注^[8-9].在持续蒸发过程中,盐分不断浓缩并趋于过饱和,一旦盐结晶速率超过溶解速率,其便会在光热层及输水通道中析出并积聚.盐结晶不仅阻碍水传输,还会降低局部盐结晶溶解效率,最终导致蒸发器结构被破坏,性能衰减^[10-13].面对这一挑战,开发兼具高效性、稳定性与可持续性的太阳能驱动界面蒸发系统显得尤为迫切.生物质材料因其来源广泛、可再生、环境友好等特性,近年来在能源与环境领域受到高度重视^[14-15].它们通常具备丰富的孔隙结构和可调控的表面化学性质,适用于多功能材料的设计与制备,在光热转换和海水淡化方面表现出巨大的潜力^[16].

咖啡渣作为全球广泛产生的厨余废弃物,仅工业端年产量就约达 600 t,是一种典型的生物质资源^[17-18].目前其处理方式仍以填埋和焚烧为主,不仅资源利用率低,还会产生温室气体导致环境污染.咖啡渣有机物含量丰富,包括碳水化合物、蛋白质和纤维素等,固定碳含量高,是一种理想且廉价的生物质碳前驱体,可用于光热转换材料的制备^[19-21].另一方面,酚醛泡沫(phenolic foam, PF)——常作为插花基座使用.然而其在使用后通常被废弃,带来污染问题^[22].该材料具有多孔和低密度的优点,经适当改性后可实现优良的吸水和输水性能,是理想的蒸发器基底材料^[23-24].

本研究将废弃咖啡渣与废弃酚醛泡沫相结合,构建了一种具有 Janus 结构的新型太阳能驱动界面蒸发器.通过热解咖啡渣获得生物质碳材料作为光热转换层,并利用十八烷基三氯硅烷(octadecyltrichlorosilane, OTS)对滴涂碳化咖啡渣生物质材料(carbonized coffee grounds, CG)后的亲水酚醛泡沫进行疏水改性,形成具有不对称润湿特性的 Janus 结构蒸发界面.Janus 结构通过上层疏水层有效阻隔盐分在蒸发界面沉积,同时下层亲水结构维持持续供水与离子扩散,从而在高盐环境中实现长期稳定蒸发,克服了传统亲水蒸发器因盐结晶导致的性能衰减问题.评价了该蒸发器在不同光照强度以及高盐环境下(质量分数 10% 和 20% NaCl 溶液)的蒸发性能与长期运行稳定性,深入分析了其抗盐机制,并考察了其对含有重金属离子和有机染料废水的净化能力,为其在实际废水处理与海水淡化中的应用提供了实验依据与理论支持.

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

实验过程中所使用的试剂有:十八烷基三氯硅烷(质量分数 95%)、正己烷和无水乙醇,均为分析纯,未经进一步纯化直接使用;咖啡渣和酚醛泡沫亦未经纯化处理,直接用于实验.

表征及测试过程中使用的主要仪器包括:JSM-7500F 型场发射扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、Bruker D8 Advance 型 X 射线粉末衍射仪(XRD)、SB-5200D 型氙灯光源、FLIR E8xt 型红外热成像仪、F-P400 型行星式球磨机、SC16000E 型全自动接触角测量仪以及 UH5700 型紫外-可见分光光度计.

1.2 实验步骤

将咖啡渣过筛后用去离子水洗涤以去除杂质,于 60 °C 烘箱中烘干.将干燥后的咖啡渣置于 5%(质量分数)的 KOH 溶液中浸泡 24 h,期间缓慢搅拌以混合均匀.将浸泡后的咖啡渣过滤,并用去离子水反复洗涤直至滤液呈中性后,于 60 °C 烘箱中充分干燥.

取适量干燥后的咖啡渣置于瓷舟中,在管式炉 N₂ 气氛下以 10 °C · min⁻¹ 的升温速率分别加热至 300、500、700 和 900 °C,并在目标温度下保温 2 h.待冷却至室温后,使用行星式球磨机对碳化咖啡渣(CG)进行两次研磨处理.不同碳化温度(300、500、700 和 900 °C)所得的样品分别标记为 CG300、CG500、CG700 和 CG900.

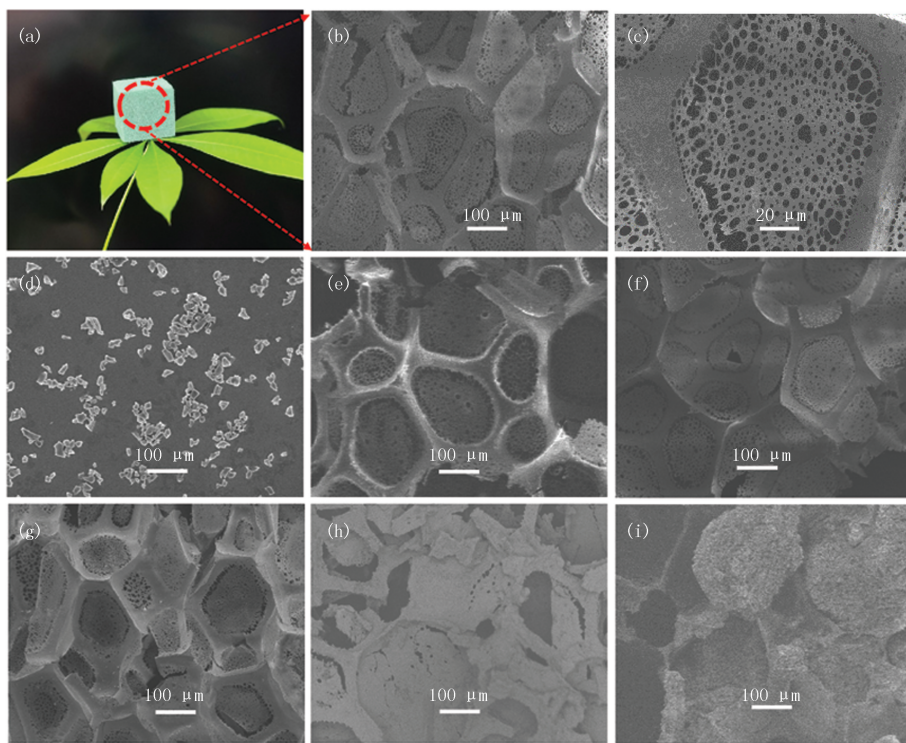
将废弃酚醛泡沫切割成规格为 3 cm × 3 cm × 5 cm 的长方体,使用无水乙醇清洗以去除杂质,于 60 °C 鼓风干燥箱中干燥至恒重.分别取适量 CG 样品配制质量浓度为 1、5、10 和 20 mg · mL⁻¹ 的无水乙醇分散浆液,每次取 5 mL 均匀滴涂于 PF 表面.室温干燥 24 h 后,所得样品分别记为 1-CG@PF、5-CG@PF、10-CG@PF 和 20-CG@PF.

为构建 Janus 结构,采用十八烷基三氯硅烷进行疏水改性.将 OTS 与去离子水按体积比为 1 : 50 混合

并经超声处理促进其水解,随后用正己烷稀释其至体积分数为 1%。使用移液枪取 20 μL 上述溶液,均匀滴涂于 CG@PF 样品上表面,并于室温下干燥 24 h。最终所得疏水改性样品分别记为 OTS-CG@PF、OTS-1-CG@PF、OTS-5-CG@PF、OTS-10-CG@PF 和 OTS-20-CG@PF。

2 结果与讨论

图 1(a)展示了 PF 的实物照片,该轻质材料可置于叶片表面。PF 具有多孔结构,孔直径约为 200 μm (图 1(b-c)),这种结构有利于水分的传输。如图 2(a)所示,通过外部观察,不同碳化温度下的 CG 分散液颜色差异较大。未经碳化的咖啡渣(spent coffee grounds, SG)分散液为黄褐色,随着碳化温度的升高,CG 分散液的颜色逐渐加深,CG500、CG700、CG900 分散液呈现出黑色。图 2(b)展示了不同碳化温度下所得的 CG 系列的 X 射线衍射图谱。所有样品均在碳元素特征峰位置出现衍射信号,表明其主体为无定形碳结构。故碳化温度对产物的物相组成影响不显著。紫外-可见-近红外吸收光谱分析表明(图 2(c)),当碳化温度达到 500 $^{\circ}\text{C}$ 及以上时,CG 系列在宽光谱范围内均表现出 95% 以上的光吸收率,证实其是理想的光热材料。基于对能源消耗和制备成本的综合考量,本研究选择 CG500(图 1(d))用于后续蒸发器的构建。将不同质量浓度的 CG500 滴涂于 PF 表面形成 CG@PF,将 OTS 溶液滴涂于 CG@PF 表面,形成 Janus 结构。随着 CG500 质量浓度的提高(样品标记为 OTS- x -CG@PF),PF 孔结构逐渐被覆盖(图 1(e-i))。当 CG500 质量浓度较高时(OTS-20-CG@PF),PF 孔结构被完全覆盖并出现颗粒团聚现象,阻碍了水分的传输和水蒸气的逸出。在较低质量浓度下(OTS-1-CG@PF 和 OTS-5-CG@PF),多孔结构仍清晰可见。OTS-10-CG@PF 中 PF 骨架仅被部分覆盖,其大孔结构仍得到保留。



(a) PF, (b-c) PF, (d) CG500, (e) OTS-CG@PF, (f) OTS-1-CG@PF, (g) OTS-5-CG@PF, (h) OTS-10-CG@PF, (i) OTS-20-CG@PF.

图1 样品的实物照片(a)和SEM图(b-i)

Fig.1 Photograph(a) and SEM images(b-i) of samples

物体表面的润湿性主要由其粗糙度与表面能共同决定^[25-26]。本研究中,通过在 PF 表面沉积 CG 颗粒以增大粗糙度,并利用 OTS 修饰降低其表面能。如图 3(a-c)接触角测试结果所示,原始 PF 表现出良好的亲水性,能够快速吸水。经 OTS 疏水改性后,所有 OTS-CG@PF 样品均显示出疏水特性。FT-IR 分析结果(图 3(d))表明,PF 在 3 409 cm^{-1} 处存在一个较强的宽吸收峰,对应于酚羟基(-OH)的伸缩振动^[27]。OTS 水解

后生成的硅醇可与 PF 表面 $-OH$ 发生反应,形成自组装单分子疏水层(图 3(e)).该修饰过程仅发生于 PF 表层,其下层仍保持原有的亲水性,因此成功构建了具有 Janus 结构的蒸发器.

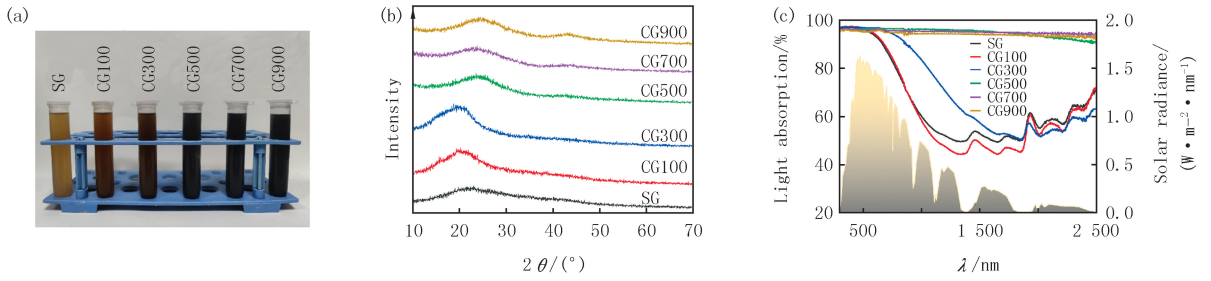


图2 SG及CG系列的无水乙醇分散液(a)、XRD图(b)和紫外-可见-近红外吸收光谱(c)

Fig 2 Anhydrous ethanol dispersions(a), XRD patterns(b) and UV-Vis-NIR absorption spectra(c) of SG and the CG series

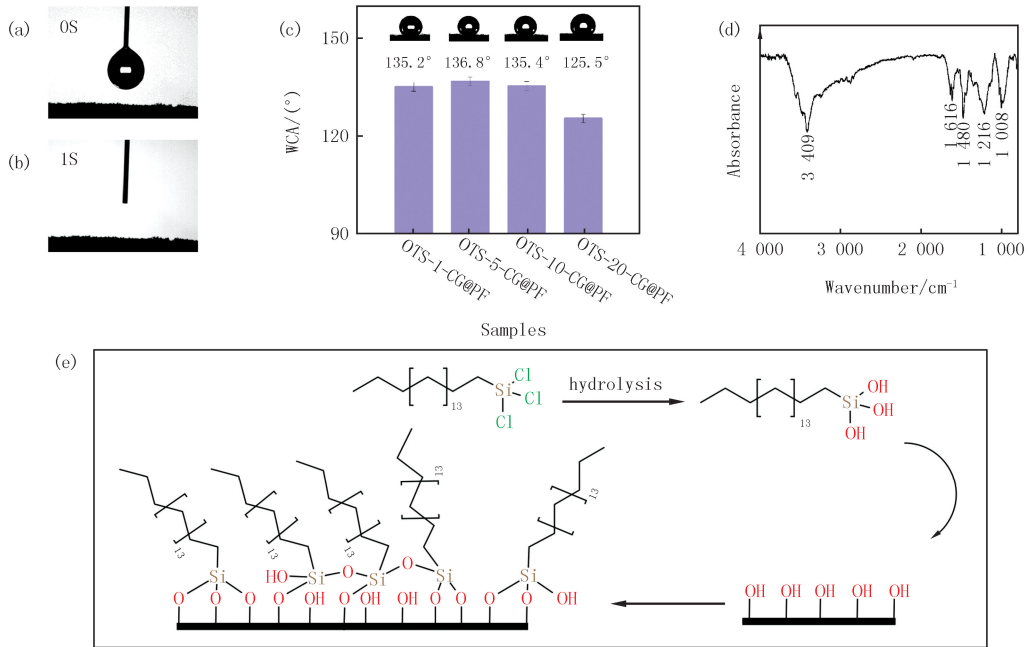


图3 PF和OTS-CG@PF系列的水接触角(a-c)、OTS-CG@PF的红外光谱图(d)和OTS在PF表面自组装疏水涂层的形成过程示意图(e)

Fig 3 Water contact angles of PF and the OTS-CG@PF series(a-c), FT-IR spectrum of OTS-CG@PF(d) and schematic illustration of the formation process of self-assembled hydrophobic coatings(OTS) on PF surfaces(e)

图 4(a)为实验室自制的蒸发装置示意图.以 PF 作为供水基底置于烧杯中,既可实现持续供水,又具备隔热功能.在聚苯乙烯泡沫的辅助下,OTS-CG@PF 材料的隔热性能进一步得到提升.紫外-可见-近红外光吸收测试结果(图 4(b))显示,原始 PF 因含有着色剂而呈绿色,并表现出一定的光吸收能力;滴涂少量 CG 后,其光吸收性能有所提升.随着滴涂质量浓度的增加,材料在宽光谱范围内的吸光度可达 90% 以上.经 1 h 模拟太阳照射后,OTS-10-CG@PF 样品温度升高了 $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 4(d)),表明其具有良好的光热转换能力,为高效水蒸发提供了必要基础.

通过测定蒸发速率对 OTS-CG@PF 系列蒸发器的性能进行了系统评估(图 5).随着 CG 质量浓度的增加(图 5(a)),蒸发速率呈现先升高后略降的趋势:OTS-1-CG@PF 的蒸发速率为 $1.63\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,OTS-5-CG@PF 升高至 $1.83\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,OTS-10-CG@PF 达到最优值 $2.47\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,而 OTS-20-CG@PF 则因孔隙堵塞导致速率下降至 $2.22\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.后续实验选择性能最优的 OTS-10-CG@PF 进行.在不同光照强度下,该蒸发器表现出良好的响应特性:在 $0.5\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光强下,蒸发速率为 $0.87\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;在 $1.0\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光强下可达 $2.52\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;在 $2.0\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光强下进一步提升至 $3.67\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 5(b)). $1.0\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光强下的抗盐测试表明,在 10% NaCl 溶液中,OTS-10-CG@PF 的蒸发速率仍

保持在 $2.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;即使在 20% 的高质量分数盐水中,其仍可维持 $1.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率(图 5(c)).这种优异的蒸发性能得益于 Janus 结构的设计.一方面,蒸发器的光热层与供水层紧密连接,显著减少了热量损失,使热量能够集中于水蒸发,且 PF 本身导热性弱而吸水性强,有效抑制了热量向底部水体的扩散.另一方面,下层亲水结构能够持续供水并促进离子交换,而上层疏水 OTS-CG 层能有效避免盐分在蒸发界面的积累,从而保障了持续高效的水蒸发.

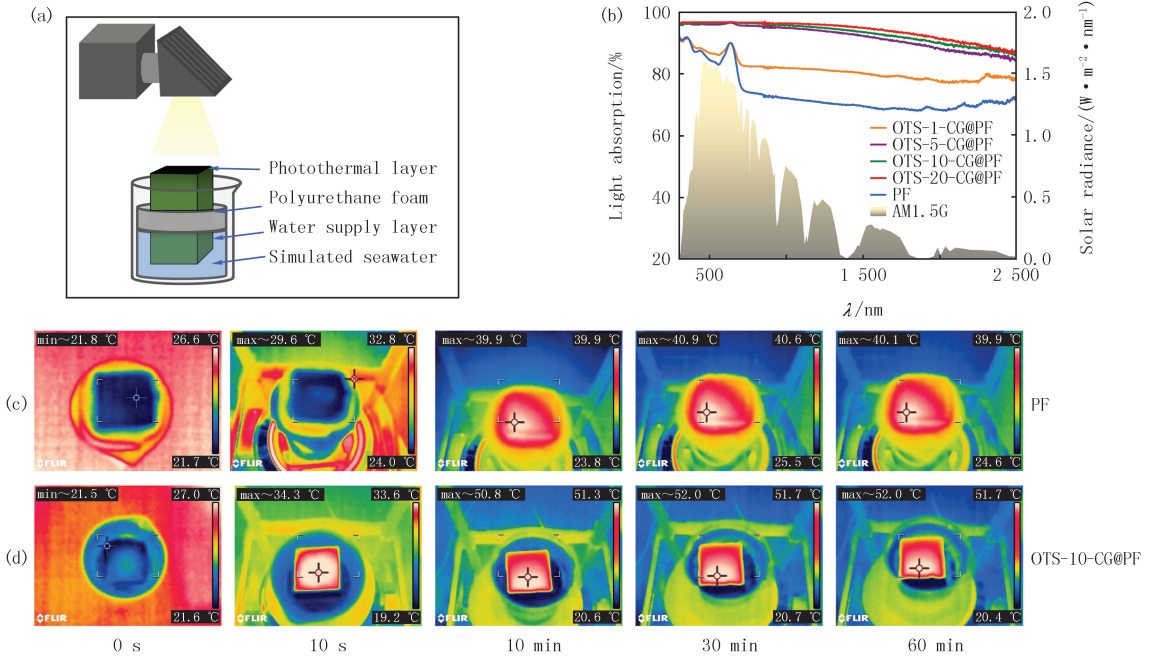
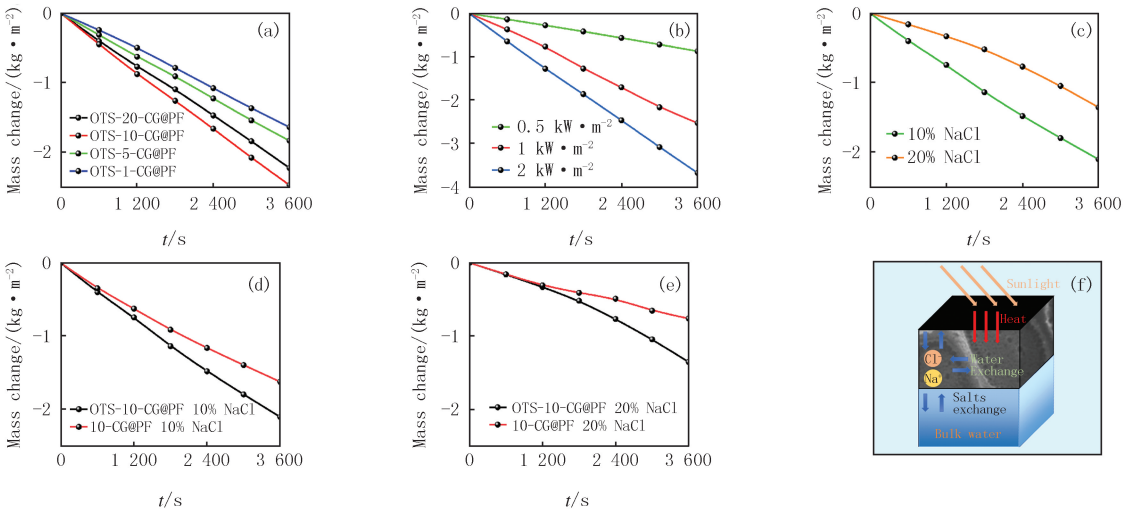


图4 实验室自制太阳能蒸发测试装置示意图(a)、OTS-CG@PF系列的紫外-可见-近红外光吸收光谱(b)以及PF(c)和OTS-10-CG@PF(d)在1 h 连续光照下的红外热成像图

Fig. 4 Schematic diagram of the custom-built solar evaporation testing apparatus(a),UV-VIS-NIR absorption spectra of the OTS-CG@PF series(b),and infrared thermal image of PF(c) and OTS-10-CG@PF(d) under 1 h continuous illumination



(a)OTS-CG@PF系列的蒸发速率,(b)OTS-10-CG@PF在模拟太阳光照下的蒸发速率,(c)OTS-10-CG@PF在10%、20% NaCl溶液中的蒸发速率,OTS-10-CG@PF和10-CG@PF在(d)10% NaCl溶液和(e)20% NaCl溶液中的蒸发速率,(f)OTS-10-CG@PF的抗盐机理.

图5 蒸发速率(a-e)和抗盐机理示意图(f)

Fig. 5 Evaporation rates(a-e) and schematic illustration of the salt-resistant mechanism(f)

OTS-10-CG@PF 蒸发器的抗盐机理如图 5(f)所示.该 Janus 结构通过下层亲水的 PF 基底维持水传输作用,实现持续供水与离子扩散;同时,其关键的上层疏水 OTS-CG 层能有效阻隔盐水与蒸发界面的直接接触.这种非对称设计使得水分以蒸汽形式逸出,而将溶解的盐离子限制在下方水体中或迫使其在疏水层下的

液相区域析出,从而避免了盐结晶在蒸发界面的附着与积累.这与完全亲水的未改性蒸发器(10-CG@PF)形成鲜明对比,后者整体亲水,在 10% 和 20% NaCl 溶液中盐分会随水迁移至蒸发面并直接结晶,最终堵塞通道,导致蒸发性能衰减,进而蒸发速率分别降至约 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 5(d-e)).

户外抗盐性能测试装置如图 6(a)所示,将 OTS-10-CG@PF 蒸发器(尺寸: $6.0 \text{ cm} \times 6.5 \text{ cm} \times 15.0 \text{ cm}$)使用聚苯乙烯泡沫固定后置于模拟海水中.为期 14 d、每天 10 h 的循环实验结果表明,该蒸发器的最大蒸发速率可达 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,最高日产水量为 50.3 g(图 6(b-c)).按比例计算, 1 m^2 该蒸发器每日的产水量可满足成人每日 1.5 kg 的饮用水需求.户外实验中日蒸发速率与产水量的波动(图 6(b))主要由实际环境中光照强度与环境温度的变化所导致.实验结束后,在蒸发器表面未观察到明显的盐结晶现象(图 6(d-e)),证明该系统具有优异的长期稳定性和抗盐沉积能力.值得提出的是,不同于实验室的可控光源,户外太阳辐照受天气与时段的影响,直接引起光热转换能量的波动.此外,户外测试装置对蒸发速率的影响主要表现在两方面:一是户外水收集装置表面附着的水滴对入射光的散射影响了材料对太阳光的吸收.另一方面封闭的水收集装置中存在较高的相对湿度和蒸气压,故其蒸发速率较实验室敞开体系所得数据要低.

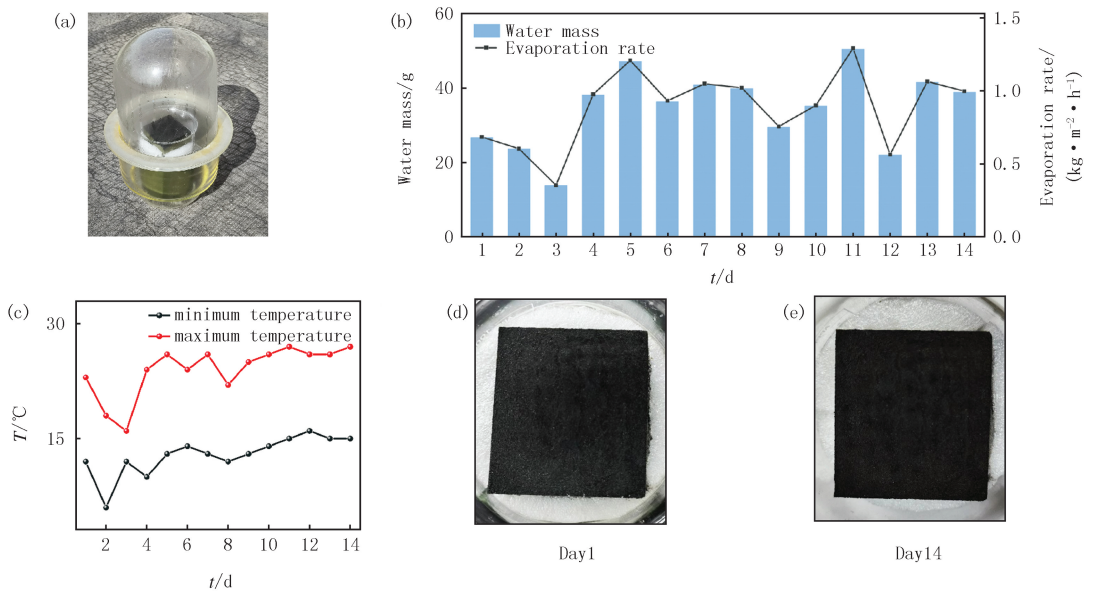


图6 OTS-10-CG@PF的室外工作照片(a)、户外14 d循环的日淡水产量和蒸发速率(b)、户外14 d循环的每日温度(c)和户外14 d循环的Day1及Day14光热层表面对比(d-e)

Fig. 6 Outdoor operation photograph of OTS-10-CG@PF(a), daily freshwater yield and evaporation rate over 14 days of cyclic outdoor testing(b), daily temperatures recorded during the 14-day cyclic outdoor test(c), and surface appearance comparison of the photothermal layer on Day1 and Day14 of the outdoor cyclic test(d-e)

采用 ICP-OES 测定了淡化后水样的离子质量浓度(图 7(a)).淡化处理后,海水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 的质量浓度分别从初始的 $10\ 390$ 、 $1\ 330$ 、 420 和 $340 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 23.91 、 1.51 、 1.14 和 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,离子去除率均超过 99%,各项指标符合世界卫生组织(WHO)饮用水标准.针对含 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 的重金属废水(图 7(b)),净化后各离子质量浓度均低于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率高于 99%.在处理亚甲基蓝(MB)、罗丹明 B(RhB)和甲基橙(MO)等染料废水时(图 7(c-f)),净化后水样的吸光度显著下降,且溶液呈无色透明,表明该蒸发器在染料废水处理方面也具有显著的潜力.

3 结 论

本研究以废弃咖啡渣为原料,成功构建了一种具有 Janus 结构的新型太阳能驱动界面蒸发器(OTS-10-CG@PF).其在不同光照条件下(0.5 、 1.0 、 $2.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)与高盐度水溶液中(10%和 20% NaCl 溶液)均具有高效的蒸发性能.连续 14 d 的模拟海水中户外实测结果表明,其能够保持稳定的蒸发速率和抗盐能力.该蒸发器适用于高盐度海水及多种难处理废水(如含有机染料与重金属离子的废水)的高效净化.本工作实现了

“以废治废”的可持续理念,对于缓解全球淡水危机、推动废弃物循环利用以及开发绿色低碳的水处理技术具有重要的科学价值与应用潜力。

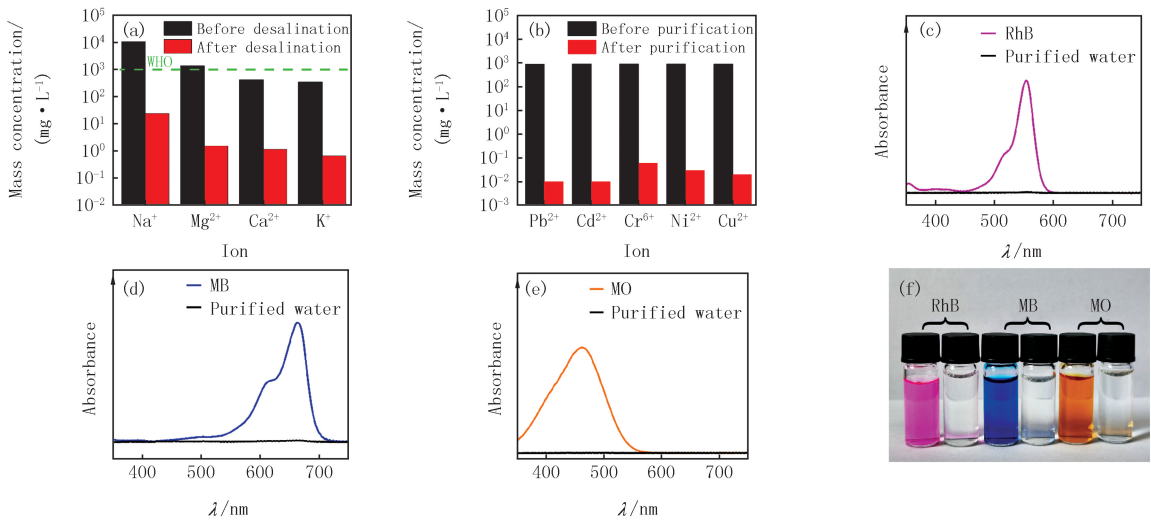


图7 模拟海水和脱盐后淡化水的主要离子质量浓度(a)、模拟金属废水和淡化水的主要离子质量浓度(b)、RhB、MB、MO染料污水纯化前后的紫外可见光谱图(c-e)和染料污水净化前后的照片(f)

Fig. 7 Major ion mass concentrations in simulated seawater and the desalinated water(a), major ion mass concentrations in simulated metal-containing wastewater and the purified water(b), UV-VIS spectra of RhB, MB, and MO dye wastewater before and after purification(c-e), and photographs of the dye wastewater before and after purification(f)

参 考 文 献

- [1] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1500323.
- [2] GLEICK P H. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century[J]. *Science*, 2003, 302(5650): 1524-1528.
- [3] YANG Y, FAN W, YUAN S J, et al. A 3D-printed integrated MXene-based evaporator with a vertical array structure for salt-resistant solar desalination[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(42): 23968-23976.
- [4] CAO T C, WANG L, PATAROQUE K E, et al. Relating solute-membrane electrostatic interactions to solute permeability in reverse osmosis membranes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(11): 5819-5828.
- [5] ALI E, ORFI J, ALANSARY H, et al. Cost analysis of multiple effect evaporation and membrane distillation hybrid desalination system[J]. *Desalination*, 2021, 517: 115258.
- [6] LIU Y, TIAN Y, LIU N, et al. A self-adaptive and regenerable hydrogel interfacial evaporator with adjustable evaporation area for solar water purification[J]. *Small*, 2024, 20(4): e2305903.
- [7] XU W Z, XING Y, LIU J, et al. Efficient water transport and solar steam generation via radially, hierarchically structured aerogels[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(7): 7930-7938.
- [8] CHENG S J, HE E Y, ZHANG P P, et al. Scallion-inspired environmental energy enhanced solar evaporator with integrated water transport and thermal management[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(26): 2423011.
- [9] LIANG C G, YASIN A, ZHANG L S, et al. Solar interfacial evaporator with three-dimensional architecture for seawater desalination[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 702: 135035.
- [10] DAI X J, GUAN H, WANG X, et al. Lamellar wood sponge with vertically aligned channels for highly efficient and salt-resistant solar desalination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(31): 38100-38109.
- [11] LIU J, YAO J H, YUAN Y, et al. Surface-carbonized bamboos with multilevel functional biostructures deliver high photothermal water evaporation performance[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2020, 4(9): 2000126.
- [12] WANG J C, CHEN Z Y, YUAN R D, et al. Innovative dual-mode device integrating capacitive desalination and solar vapor generation for high-efficiency seawater desalination[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2025, 100: 171-179.
- [13] SUN Y, FAN L L, ZHENG W F, et al. Woven cattail leaf slips for large-scale, high-efficient and salt-resistant solar water evaporation[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 186: 115185.
- [14] 靳会杰, 李燕红, 雒廷亮, 等. 生物质花生壳热分解及热分解模拟[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(3): 85-87.
- [15] JIN H J, LI Y H, LUO T L, et al. Thermal decomposition kinetic and simulation of biomass peanut shell[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2012, 40(3): 85-87.
- [16] BATTISTA F, BARAMPOUTI E M, MAI S, et al. Added-value molecules recovery and biofuels production from spent coffee grounds[J].

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 131: 110007.

- [16] 何乃如, 田子谕, 王伟, 等. 甘蔗生物质炭在界面太阳能海水淡化中的应用[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2024, 56(1): 44-52.
HE N R, TIAN Z Y, WANG W, et al. Application of sugarcane biomass carbon in interface solar seawater desalination[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition), 2024, 56(1): 44-52.
- [17] ZHU L F, GUAN X W, LI P, et al. Waste coffee grounds-derived micropores carbon framework as an efficient iodine host for zinc iodine battery[J]. Energy & Environmental Materials, 2025, 8(5): e70045.
- [18] SABERIAN M, LI J, DONNOLI A, et al. Recycling of spent coffee grounds in construction materials; a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 125837.
- [19] CROSSLEY O P, THORPE R B, PEUS D, et al. Phosphorus recovery from process waste water made by the hydrothermal carbonisation of spent coffee grounds[J]. Bioresource Technology, 2020, 301: 122664.
- [20] JUTAKRIDSADA P, PRAJAKSUD C, KUBOONYA-ARUK L, et al. Adsorption characteristics of activated carbon prepared from spent ground coffee[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18(3): 639-645.
- [21] MATA T M, MARTINS A A, CAETANO N S. Bio-refinery approach for spent coffee grounds valorization[J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 1077-1084.
- [22] KHALID R, AMIN H M A, SHAHID M, et al. Integrated photothermal and photocatalytic degradation of micro-/nanoplastics; a mini-review with mechanistic insights and future perspectives[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(32): 26110-26128.
- [23] BORRERO-LÓPEZ A M, NICOLAS V, MARIE Z, et al. A review of rigid polymeric cellular foams and their greener tannin-based alternatives[J]. Polymers, 2022, 14(19): 3974.
- [24] CHEN Y J, XU W, PAN Z, et al. Three-dimensional gas-foamed scaffolds decorated with metal phenolic networks for cartilage regeneration[J]. Materials Today Bio, 2024, 29: 101249.
- [25] HE S F, ZHU Z P, ZHANG B, et al. Wetting thresholds for long-lasting superwettability: From intrinsic wetting boundary to critical roughness value[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454: 140058.
- [26] QING W H, WANG J Q, MA X H, et al. One-step tailoring surface roughness and surface chemistry to prepare superhydrophobic polyvinylidene fluoride(PVDF) membranes for enhanced membrane distillation performances[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 553: 99-107.
- [27] ZHANG J J, MA J X, LIU D M, et al. Localized interfacial activation effect within interconnected porous photothermal matrix to promote solar-driven water evaporation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(19): 10548-10556.

A Janus photothermal evaporator based on coffee grounds biochar for highly efficient and salt-resistant solar-driven water purification

Liu Shanhu¹, Liu Xiaoyu¹, Zhang Panpan¹, Xing Fang¹, Xing Ruimin²

(1. College of Chemistry and Molecular Sciences, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. School of Energy Science and Technology, Henan University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In this study, the carbonized coffee grounds biomass nanomaterials(CG) were derived from waste coffee grounds through pyrolysis, then used as a photothermal material. The hydrophilic phenolic foam coated with CG(CG@PF) was further treated with octadecyltrichlorosilane(OTS) to achieve surface hydrophobicity, ultimately creating an evaporator with a Janus structure. This evaporator consists of an upper hydrophobic layer made of OTS-CG photothermal material and a lower hydrophilic phenolic foam(PF) water supply substrate, resulting in an asymmetric wettability configuration. Experimental results indicate that when $10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ of CG included in the coating, the as prepared OTS-10-CG@PF evaporator exhibits optimal performance. Specifically, it achieves evaporation rates of 0.87, 2.52, and 3.67 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ under simulated solar irradiation of 0.5, 1.0, and 2.0 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. In outdoor experiments, this evaporator produced a daily average of 1.29 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ water and demonstrated no significant salt crystallization over 14 consecutive days of cyclic in simulated seawater, indicating good salt-resistant performance. Moreover, OTS-10-CG@PF demonstrated excellent purification capability for wastewater containing heavy metal ions as well as organic dyes, highlighting its potential application in wastewater treatment.

Keywords: photothermal materials; biomass; Janus structure; interfacial evaporation; desalination