

甘蔗生物质炭在界面太阳能海水淡化中的应用

何乃如¹, 田子谕¹, 王伟^{2,3*}, 桓茜^{2*}, 靳浩斌², 白帅丽^{2,4}

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 陕西工业职业技术学院航空工程学院, 咸阳 712000;

3. 西安工业大学光电工程学院, 西安 710021; 4. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205)

摘要: 太阳能驱动的界面水蒸发作为环保、高效、可持续的海水淡化技术,在近年来受到广泛关注。快速的水运输、高效的光热转换是实现持续、稳定蒸发的关键。多级孔道的生物质衍生蒸发器在太阳能水蒸发应用中展示出高效、环保、可持续的应用潜力。以废弃的甘蔗节为原料,利用冷冻干燥和高温碳化工艺制备了具有天然多级孔道结构的生物质基蒸发器,并研究了材料的光吸收、水运输和蒸发性能以及不同风速下对流空气对蒸发器的蒸发性能和热损失的改善作用。结果表明:具有发达的多级孔道结构的生物质基蒸发器展示出了高达 92.8% 的太阳光吸收率。在一倍太阳光强下展示出 1.55 kg/(m²·h) 的蒸发速率和 77.6% 的光热转换效率。此外,在风速 2 m/s 的条件下,蒸发器的蒸发速率展示出了高达 2.27 kg/(m²·h) 的蒸发速率和 91.6% 的光热转换效率,显示了对流效应对淡水产出速率的增强和对热损失的抑制作用。

关键词: 太阳能驱动水蒸发; 空气对流; 多级孔道结构; 生物质材料

中图分类号: P747, TK519

文献标志码: A

文章编号: 1000-5463(2024)01-0044-09

Application of Sugarcane Biomass Carbon in Interface Solar Seawater Desalination

HE Nairu¹, TIAN Ziyu¹, WANG Wei^{2,3*}, HUAN Xi^{2*}, JIN Haobin², BAI Shuaili^{2,4}

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Aeronautical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China;

3. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

4. School of Mechanical Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205)

Abstract: Solar-driven interfacial water evaporation, as an environmentally friendly, efficient, and sustainable desalination technology, has received extensive attention in recent years. Fast water transport and efficient photothermal conversion performance are the key points to achieve continuous and steady evaporation. Biomass-derived evaporators with multi-level pores demonstrate the potential for efficient, eco-friendly, and sustainable applications in solar water evaporation. A biomass-based evaporator with a natural porous structure was designed from discarded sugarcane knots using freeze-drying and high-temperature carbonization methods, and its light absorption, water transport, and evaporation capabilities were studied. It is reported that convective air with different wind speeds has an improving effect on the evaporation performance and heat loss of the evaporator. The results showed that the biomass-based evaporator with a well-developed microchannel structure had a solar absorption of 92.8%, an evaporation rate of 1.55 kg/(m²·h) and a light-to-heat conversion efficiency of 77.6% under 1 sun. Furthermore, at a wind speed of 2 m/s, the evaporation rate and the photothermal conversion efficiency of the evaporator reached 2.27 kg/(m²·h) and 91.6%, respectively, showing the enhancement of the freshwater yield rate by convective effects and the suppression of heat loss.

Keywords: solar-driven water evaporation; air flow; multi-level channel structure; biomass materials

收稿日期: 2023-12-15

《华南师范大学学报(自然科学版)》网址: <http://journal-n.scnu.edu.cn>

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2021M692506); 陕西省创新能力支撑计划项目(2023KJXX-079); 陕西省教育厅科研计划项目(23JK0308)

* 通信作者: 王伟, Email: wangwei05@sxpi.edu.cn; 桓茜, Email: huanqian@sxpi.edu.cn

淡水资源短缺和化石能源枯竭已迫在眉睫,寻求一种环保、高效、可持续的水资源生产策略刻不容缓^[1]。太阳能作为一种无二次污染、可持续利用的清洁能源,是一种能有效解决淡水资源危机的能源策略。近年来,太阳能驱动的水蒸发技术应运而生,它利用具有自浮性、高光吸收率和快速水传输能力的光热材料,在液体与气体的界面上实现高效且持续的淡水生产。

常见光热材料主要为等离子体^[2]、半导体^[3]、复合材料^[4]等,这些材料成本昂贵、制备工艺复杂、不利于广泛推广,且部分材料对环境存在二次污染的潜在可能。对此,生物质多孔碳材料近年来被提出用于高效的海水淡化^[5]。生物质碳具有高效的光学吸收、独特的孔道结构、快速的水运输能力,且制备工艺简单、成本低,便于广泛推广,因此,近年来多种生物质材料被探索和研究^[6]。得益于自然衍生的孔隙结构,生物质碳具备了动态的水输送、迅速的光热响应能力,有效解决了以往传统蒸发材料存在蒸发速率和光热转换效率均低的问题^[7]。然而,蒸发器的固有热损失限制了蒸发速率的进一步增强。对此,朱嘉教授团队提出通过引入对流空气来调控材料表面散热和蒸汽扩散,增强了蒸发器的蒸发速率,进而实现高效持续的光热转换^[8]。

前期研究了三维生物质光热材料的太阳能海水脱盐性能,研究表明三维结构有效提升了材料的蒸发性能^[9]。本文借助废弃生物质甘蔗节的天然孔隙结构,制备了一种多级孔道结构的生物质碳蒸发器,研究生物质碳的微孔道结构、亲水性和热传导行为,通过引入不同风速的对流空气,研究不同对流风速对蒸发器蒸发性能的调控作用,分析了蒸发器在自然环境下的蒸发性能。这种对流空气增强蒸发性能的策略有望实现高效的海水淡化。

1 实验方法

1.1 主要试剂与仪器

主要试剂:氯化钠(NaCl)、无水乙醇均为分析纯,市售。实验用水为自制蒸馏水。

主要仪器:冷冻干燥机(CTFD-10S,青岛永合创信)、高温管式炉(OTF-1200X,合肥科晶)、氙灯光源(CEL-S500,北京中教金源)、光功率密度计(CEL-FZ-A,北京中教金源)、扫描电子显微镜

(SEM, Sigma 300, 德国蔡司)、紫外-可见光-近红外分光光度计(UV-VIS-NIR, UV-3600, 日本岛津)、X射线光电子能谱仪(XPS, ESCALAB 250Xi, 美国赛默飞)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, Nicolet iS20, 美国赛默飞)、视频接触角测定仪(JY-82C, 承德鼎盛)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Agilent 5110, 美国)。

1.2 多孔碳材料的制备

选取废弃的甘蔗节为实验原材料,通过真空冷冻干燥和高温碳化工艺制备碳化甘蔗节(Carbonized Sugarcane Knot, CSK)为脱盐蒸发器。具体步骤:(1)剥离甘蔗节外皮,沿其生长方向切割为长、宽、高为20、20、10 mm的立方块;(2)在冷冻干燥机内冷冻4 h,随后在真空状态下冷冻干燥48 h,获得多孔的甘蔗节;(3)在N₂气氛的高温管式炉中以5 °C/min的速率升温至碳化温度,设定不同的碳化温度(分别为400、500、600、700 °C),保温时间为2 h,获得了CSK-400、CSK-500、CSK-600、CSK-700的生物质基多孔碳;(4)依次使用蒸馏水和无水乙醇清洗和浸泡CSK,清洁其内部残留杂质。

1.3 多孔碳材料的表征

CSK的顶部及侧面孔道结构的形貌由SEM观测;CSK的反射光谱采用UV-VIS-NIR仪测试,波长范围为200~2 500 nm;CSK的红外光谱采用FT-IR仪测试,以4 cm⁻¹的分辨率,测试波数范围从400~4 000 cm⁻¹;CSK的元素组成及价态采用XPS仪测试;CSK的表面温度实时变化情况采用FLIR E4红外成像仪所记录;CSK的表面亲水性和接触角采用视频接触角测定仪测量;淡化前后海水的离子浓度采用ICP-OES仪测试。

1.4 太阳能水蒸发性能测试

样品的室内蒸发性能采用图1A所示的蒸发平台测试,包括太阳光模拟器(CEL-S500, AM 1.5 滤光片)、分析天平(PX124ZH, 奥豪斯)、光功率密度计(CEL-FZ-A, 中教金源)、风速仪(AS-H10, 艾沃斯)、风扇(ZCWY1413)。

在温度为25 °C、相对湿度为45%的蒸发环境中,以太阳光模拟器为模拟光源,辐照材料进行热蒸发,光照强度通过光功率密度计调节,光照强度为一个标准太阳(1 kW/m²),并使用红外相机以3 min为间隔记录样品表面温度的变化情况。自然环境下的蒸发测试和水收集来意图由图1B所示,实时记

录自然环境的温度、湿度、光强的变化,并通过分析天平实时记录样品的质量变化(2023-11-26)。利

用水收集装置冷凝和收集淡水,研究甘蔗生物炭太阳能海水淡化的应用效果。

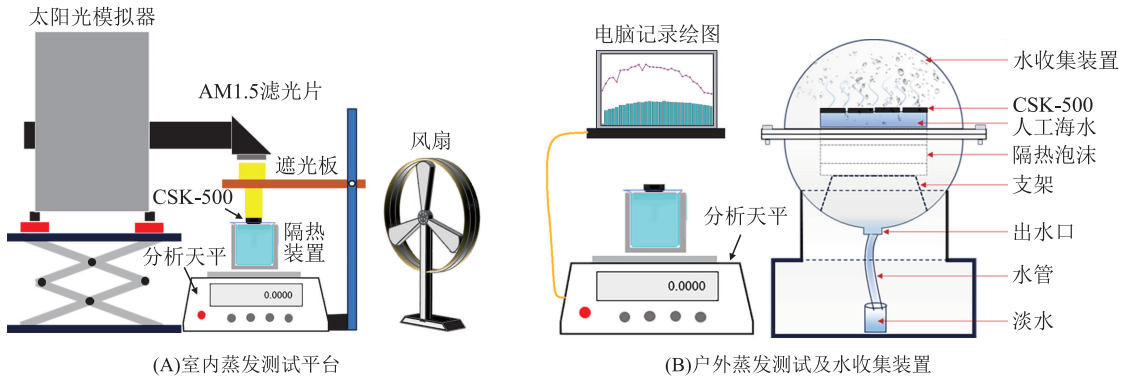


图 1 界面水蒸发测试平台和水收集装置

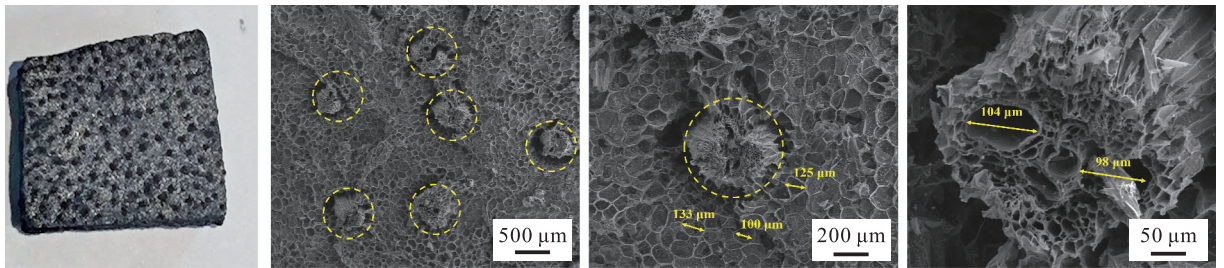
Figure 1 Interfacial water evaporation test platform and water collection device

2 结果与讨论

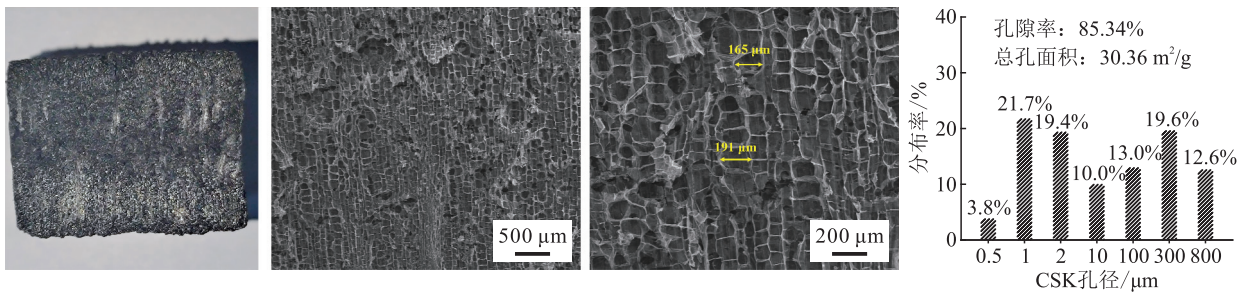
2.1 表面形貌及孔隙特征

结合冷冻干燥和高温碳化工艺,制备了具有发达孔隙网络的 CSK,其形貌保留了天然微孔通道结构(图 2)。在垂直于甘蔗节生长方向上,CSK 表面密集分布着蜂窝状的孔道,这些孔道均匀分布在粗壮的管束周围(如圆圈所示),发达的孔道结构负责对蒸发水的运输,起到了快速水供给和循环的作

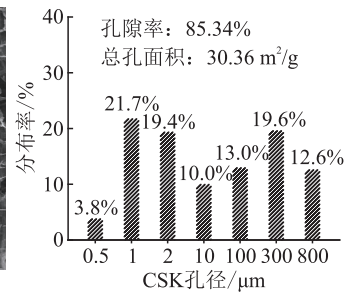
用^[10]。同时,管束表面分布着大尺寸孔道(约 100 μm)和密布的细小孔隙,增强了蒸发器对水的运输和循环能力。此外,CSK 的侧壁分布着大量微米级通道,表明其具有横向水扩散能力,材料具有一个交联的多级孔道的水运输结构,且侧壁拥有的大量孔道拓展了水蒸气的扩散路径和水的运输通道,从而加速水蒸气的产生(图 2B)。CSK 的孔隙分布情况(图 2C)显示,孔隙率和总孔面积分别达到 85.324%和 30.36 m^2/g ,碳化甘蔗蒸发器主要以微米级孔隙分布为主。



(A)垂直于生长方向的SEM图像



(B)平行于生长方向的SEM图像



(C)CSK的孔隙分布

图 2 CSK 蒸发器在垂直和平行于生长方向的平面 SEM 图像及其孔隙分布

Figure 2 SEM images of CSK evaporator perpendicular and parallel to growth direction and pore distribution

2.2 结构成分及其亲水性能

高效的界面蒸发需要在蒸发过程中持续不断地向蒸发器表面输送水量,因此,有必要评估光热蒸发器的水运输能力,进一步研究和分析 CSK 的亲水特性。CSK 的水接触角测试结果如图 3 所示,在 5 s 内,水滴已完全渗入样品中,显示了良好的亲水性,同时也证明 CSK 具有持续的水供给能力。



图 3 CSK 的亲水性能

Figure 3 Hydrophilic property of CSK

为了进一步验证 CSK 的亲水性能,采用红外光谱分析表面元素组成和官能团。CSK 的红外光谱如图 4 所示,在波数为 1 115.01、1 583.33、3 438.87 cm^{-1} 处的峰对应于 C—C、C=O、O—H 的典型官能

团^[11]。这些亲水性官能团为 CSK 提供了对液态水高效的运输能力。

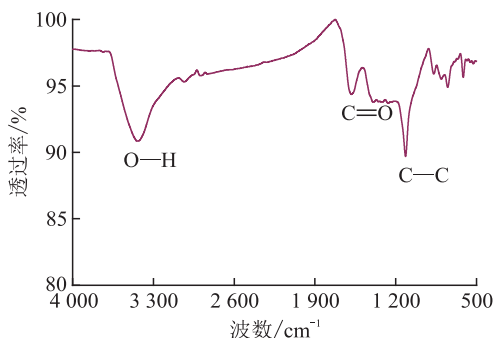


图 4 CSK 的红外光谱

Figure 4 FT-IR spectrum of CSK

XPS 光谱分析结果(图 5)表明:CSK 的主要元素为 C(248.01 eV)、N(398.76 eV)、O(531.79 eV)(图 5A)。同时,CSK 的 C 1s 的精细谱(图 5B)中,结合能为 284.53、286.02、287.10 eV 处的特征峰分别代表 C—C、C—O、C=O。N 1s 的精细谱(图 5C)显示了 C—N 和 —N= 的特征峰,分别位于 400.47、398.37 eV。结果表明:CSK 含有典型的亲水官能团^[12]。

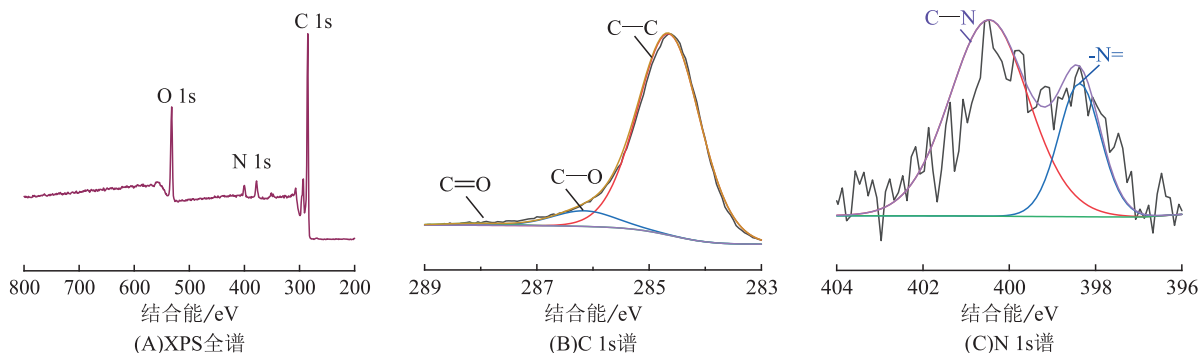


图 5 CSK 的 XPS 谱

Figure 5 XPS spectra of CSK

2.3 光热蒸发性能

光热蒸发器在液-气界面处高效的光热转换性能驱动了蒸汽的快速产出。对此,评估了 CSK 的光吸收能力。结果显示了干燥的 CSK (CSK-dry) 在 200~2 500 nm 波段的光学吸收率可达 91.6%,表明了良好的光学吸收能力(图 6A)。同时,在湿润条件下,CSK (CSK-wet) 的光学吸收能力略微提升,CSK-wet 的吸收率增强至 92.8%。

通过图 1A 展示的测试平台评估在 400、500、

600、700 $^{\circ}\text{C}$ 碳化温度下 CSK 的蒸发性能。图 6B 展示了在 1 h 内不同碳化温度的 CSK 的质量变化,其中 CSK-400、CSK-500、CSK-600、CSK-700 的蒸发速率分别达到 1.20、1.55、1.45、1.41 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,光热转换效率分别为 74.4%、77.6%、77.5%、76.4%,表明 CSK 具有良好的光热转换能力(图 6C)这利益于 CSK 高的光学吸收以及优异的亲水性。此外,1 h 内 CSK 的表面并无盐的累积,蒸发处于稳定状态(图 6B)。

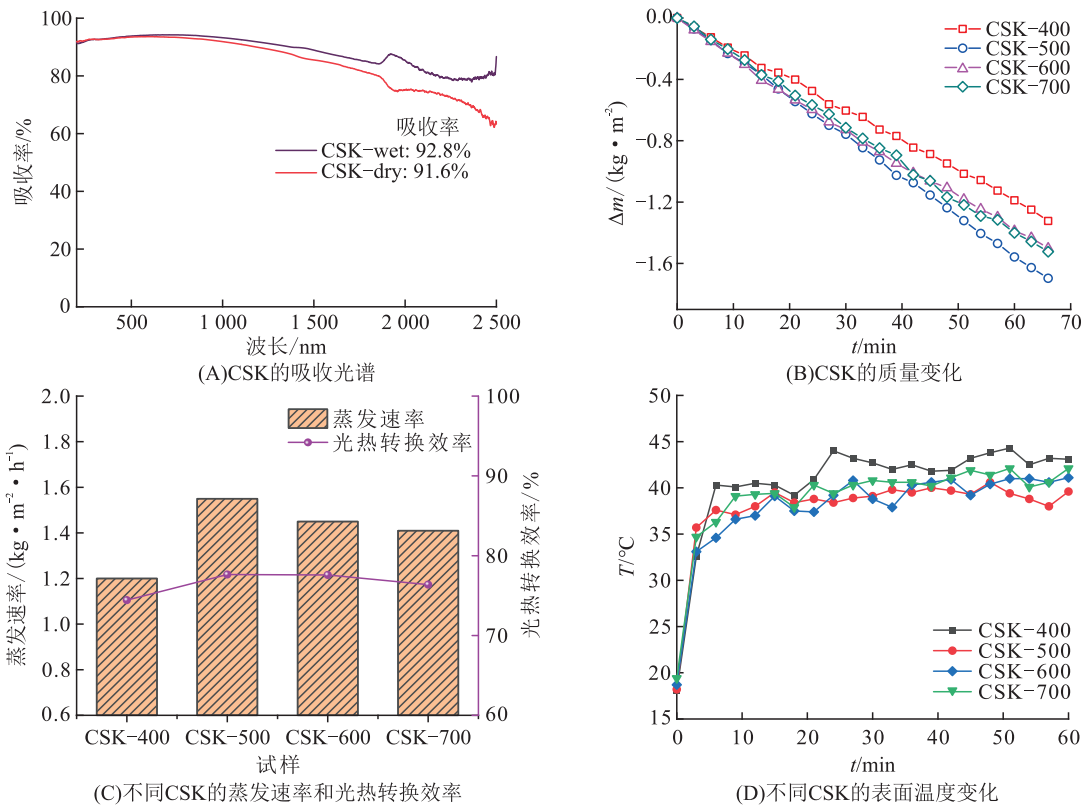


图 6 不同碳化温度下 CSK 的蒸发性能评估

Figure 6 Evaluation of evaporation performance of CSK at different carbonization temperatures

进一步对比 CSK 的表面温度随光照时间的变化情况。由图 6D 可知,蒸发器 CSK 在光照 10 min 时的表面温度达到 35 °C 以上,表明 CSK 具有快速的热响应和光热转换能力。对比 CSK-400、CSK-500、CSK-600、CSK-700 的表面温度变化,4 个样品的平均温度分别为 41.6、38.8、38.9、39.9 °C,表明 CSK-500 在蒸发过程中具有较小的热损失。因此,CSK-500 展示出优异的光热水蒸发能力。

2.4 高盐度下水蒸发性能及其结盐现象

为了进一步分析样品的耐盐性能,分别测试蒸发器 CSK-500 在质量分数为 5%、10%、15% 的 NaCl 溶液中的蒸发性能和盐结晶现象。图 7A 展示了蒸发器 CSK-500 在不同盐浓度溶液中的质量变化,结果显示蒸发器 CSK-500 在 3.5% 和 5% NaCl 溶液中的蒸发性能相对稳定,而在 10%、15% NaCl 溶液中的蒸发性能呈现下降趋势。同时,蒸发器 CSK-500 在 3.5%、5%、10%、15% NaCl 溶液中的蒸发速率和光热转化效率分别为 1.55、1.36、1.12、0.77 kg/(m²·h) 和 77.64%、70.43%、70.35%、67.40% (图 7B)。

对比分析 4 个盐浓度下样品的表面温度变化情况(图 7C),结果表明:CSK-500 在 3 min 内的表面温度迅速升高至 35 °C 以上,且在 0.5 h 时温度达到 45 °C 左右。同时,CSK-500 在 3.5% 和 5% NaCl 溶液中的表面温度变化稳定(图 7D),然而 CSK-500 在高盐浓度下的表面温度较高,并且随着时间增加逐渐升高(归因于表面的盐沉积)。此外,图 7E 展示了 CSK-500 在 3.5%、5%、10%、15% NaCl 溶液中的实时蒸发速率。结果显示 CSK-500 在 3.5% NaCl 溶液中的蒸发性能稳定,在 5% NaCl 溶液中的蒸发速率略微下降,在 10% 和 15% NaCl 溶液中的蒸发速率呈明显下降趋势。另外,CSK-500 在 3.5% 和 5% NaCl 溶液中蒸发 1 h 后其表面没有形成结晶盐,然而在 10% 和 15% NaCl 溶液中,大量结晶盐分布在表面(图 7F)。综上所述,CSK-500 在高盐浓度下由于结晶盐的影响引起水的运输和循环能力变差,导致蒸发速率急剧下降,相反在较低盐浓度(3.5% 和 5%)溶液中 CSK-500 展现了一定的抗盐能力。

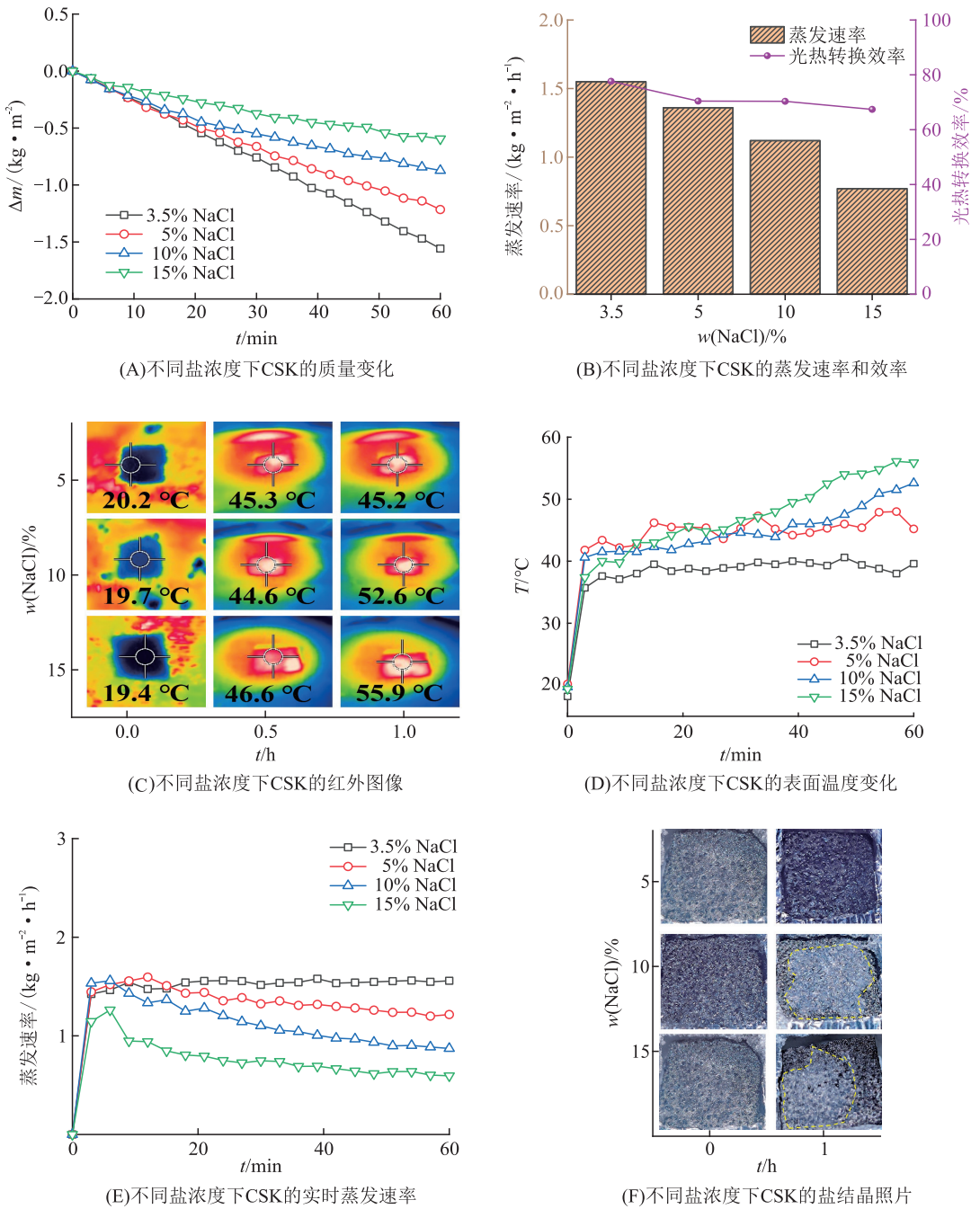


图 7 不同盐浓度下 CSK 的抗盐性能测试

Figure 7 Salt resistance tests of CSK at different salt concentrations

2.5 对流对界面水蒸发的影响

近年来,通过抑制蒸发器的热损失和优化蒸发性能以获得更高的蒸发速率和光热转换性能,引起了研究学者的广泛关注^[13-14]。研究表明,引入对流空气可提升材料的散热和蒸发速率^[15-17]。为此,基于室内蒸发测试平台(图 1A),测试了 CSK-500 在不同风速下的蒸发性能(图 8)。图 8A 展示了在不同风速下 CSK-500 的质量变化情况。结果显示:对流空气的引入增强了 CSK-500 的界面蒸发性能。在

1、2、3、4 m/s 风速下,CSK-500 蒸发速率和光热转换效率分别为 1.82、2.27、3.19、5.70 kg/(m²·h) 和 81.3%、91.6%、90.1%、84.5%(图 8B),因此,对流气体可以增强 CSK-500 的蒸发性能。同时,红外相机捕获 CSK-500 在 1、2、3、4 m/s 风速下的表面温度均低于无对流空气时的表面温度,对流空气降低了 CSK-500 与环境间的温度差,从而降低材料的热损失,光热转换能力得到优化,最终增强蒸发性能(图 8C、D)^[18-19]。

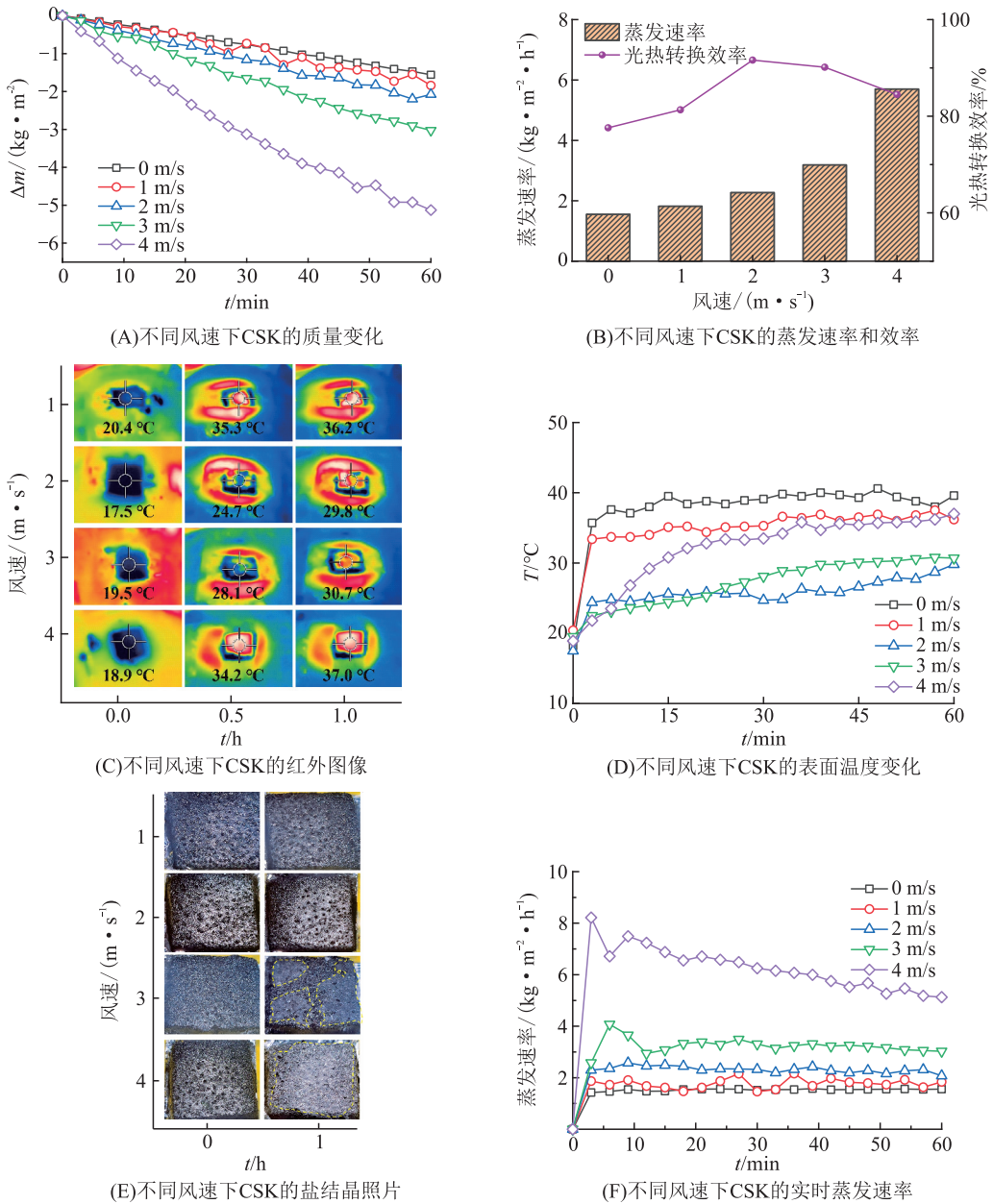


图8 对流增强的界面水蒸发

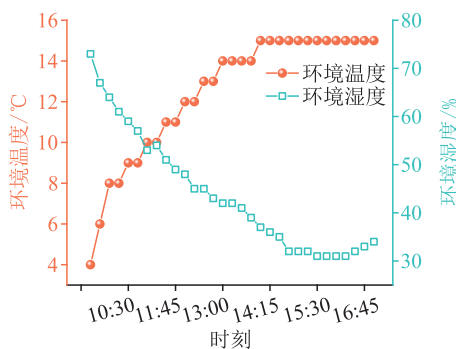
Figure 8 Convection-enhanced evaporation of interfacial water

虽然对流空气对CSK-500的蒸发速率具有较显著的提升作用,但随着风速增加至3、4 m/s,CSK-500表面开始出现结晶盐,且随着风速的增加,盐结晶情况逐渐严重(图8E)。这一结果导致在3 m/s风速下,CSK-500的蒸发速率出现轻微下降趋势,而在4 m/s风速下,CSK-500的蒸发速率急速下降(图8F)。对比1 m/s和2 m/s风速下的蒸发速率变化情况,CSK-500在1 m/s风速下的蒸发速率呈现较小的波动,并无明显的下降趋势,而在2 m/s风速下的蒸发速率稳定(图8F)。这是由于随着风速

的增加,蒸发速率增大,蒸发水的损耗加剧,然而水供给速率有限,致使盐在表面形成结晶,且随着风速增加,盐结晶情况加剧。综合0、1、2、3、4 m/s风速下的蒸发速率变化情况,结果表明:对流风速的增加对CSK-500界面处的水消耗有着增强的影响,而合适的风速(2 m/s)下CSK-500的蒸发性能更加稳定,过大的风速导致CSK-500的水运输能力无法满足过快的蒸发,使得盐沉积在材料表面。因此,合适风速下的对流空气对CSK-500的蒸发性能具有增强作用。

2.6 自然环境下水蒸发/脱盐实验

采用蒸发测试平台和水收集装置(图 1B)评估了自然环境下 CSK-500 的蒸发性能(图 9),测试时间在 2023 年 11 月 26 日,早上 9:30 至下午 17:00。在户外环境中,CSK-500 的蒸发性能稳定,平均蒸发速率达到 $1.47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,表明 CSK-500 具有良好的光热转换和水蒸发性能。此外,为了进一步评估 CSK-500 的脱盐能力,测试水收集装置中水在淡化前后的离子浓度(图 10A)。结果显示 CSK-500 具有优异的脱盐能力,淡化后的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 B^{3+} 的离子浓度均低于世界卫生组织(WHO)所规定的标准值^[20]。



(A) 环境温度和湿度随时间的变化

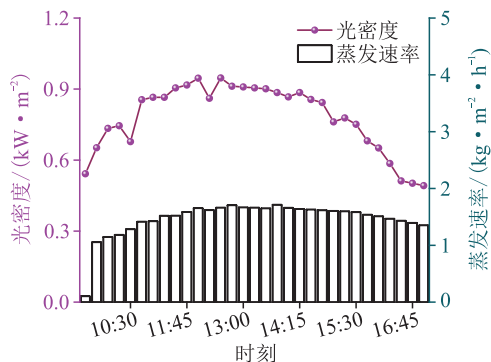
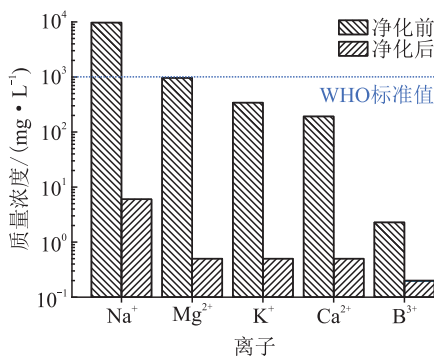


图 9 光密度和蒸发速率随时间的变化

Figure 9 Variations of light density and evaporation rate over time



(B) 淡化前后海水离子浓度的变化

图 10 CSK-500 在自然环境下的蒸发性能

Figure 10 Evaporation performance of CSK-500 in natural environment

3 结论

孔隙高度发达的 CSK 蒸发器展示了优异的亲水性和高达 92.8% 的吸收率,在一个标准太阳光强下,CSK-500 在 3.5% 盐浓度下的蒸发速率和光热转换效率分别达到 $1.55 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、77.6%。研究发现,引入对流空气(2 m/s)有效增强 CSK-500 的蒸发性能,并表现出高达 $2.27 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的蒸发速率和 91.6% 的光热转换效率。然而,过大的对流空气(4 m/s)导致蒸发器蒸发性能的不稳定性,表面出现盐的结晶。所以,适度空气对流可以有效增强蒸发器的蒸发性能和改善热行为,该策略可被应用于太阳能海水淡化领域。

参考文献:

[1] 赵春波,赵嵘,戚剑飞,等. 面向双碳目标的水淡技术: 生物质碳用于界面太阳能光蒸汽转化技术的研究进

展[J]. 材料导报,2023,37(12):5-17.

ZHAO C B,ZHAO R,QI J F, et al. Utilizing biochars in interfacial solar vapor conversion and seawater desalination: potential value for “Double Carbon” goals and state of the art[J]. Materials Reports,2023,37(12):5-17.

[2] 李心,郭琳,黄金的,等. 碳材料/甲壳素复合水凝胶高效太阳能海水淡化[J]. 材料导报,2022,36(12):189-194.

LI X, GUO L, HUANG J D, et al. Carbon material/Chitin composite hydrogel for efficient solar desalination [J]. Materials Reports,2022,36(12):189-194.

[3] LIN Z, YING L, JING Y, et al. 3D self-assembly of aluminum nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination[J]. Nature Photonics,2016,10(6):393-399.

[4] YE M, JIA J, YING L, et al. Synthesis of black TiO_x nanoparticles by Mg reduction of TiO_2 nanocrystals and their application for solar water evaporation[J]. Advanced Energy Materials,2017,7(4):1601811/1-7.

[5] WANG J, WANG W, LI J, et al. Universal strategy to pre-

- pare a flexible photothermal absorber based on hierarchical Fe-MOF-74 toward highly efficient solar interfacial seawater desalination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(38): 45944-45956.
- [6] XU N, HU X, XU W, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(28): 1606762/1-5.
- [7] LI Z, WANG C, LEI T, et al. Arched bamboo charcoal as interfacial solar steam generation integrative device with enhanced water purification capacity[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2019, 3: 1800144/1-10.
- [8] LI J, WANG X, LIN Z, et al. Over 10 kg m⁻²h⁻¹ Evaporation rate enabled by a 3D interconnected porous carbon foam[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 928-937.
- [9] 王伟, 田子谕, 桓茜, 等. 三维光热材料的制备及其太阳能脱盐性能[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 55(6): 9-16.
- WANG W, TIAN Z Y, HUAN X, et al. Preparation and solar desalination performance of 3D photothermal materials[J]. *Journal of South China Normal University(Natural Science Edition)*, 2023, 55(6): 9-16.
- [10] KUANG Y, CHEN C, HE S, et al. A high-performance self-regenerating solar evaporator for continuous water desalination[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1900498/1-10.
- [11] WANG W, TIAN Z, HUAN X, et al. Carbonized sweet potato-based evaporator for highly efficient solar vapor generation[J]. *Energy Technology*, 2024, 12: 2300671/1-9.
- [12] LU Y, WANG X, FAN D, et al. Biomass derived Janus solar evaporator for synergic water evaporation and purification[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, 25: e00180/1-7.
- [13] ZHOU L, TAN Y, JI D, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation[J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501227/1-8.
- [14] WILSON H, SUH Y, LIM H, et al. A low-cost plant transpiration inspired 3D popsicle design for highly efficient solar desalination[J]. *Desalination*, 2023, 563: 116731/1-8.
- [15] WANG Y, WU X, GAO T, et al. Same materials, bigger output: a reversibly transformable 2D-3D photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation[J]. *Nano Energy*, 2021, 79: 105477/1-9.
- [16] LIU X, LIU Z, DEBESH D, et al. Evaporation rate far beyond the input solar energy limit enabled by introducing convective flow[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 429: 132335/1-13.
- [17] ZHANG Q, YANG X, DENG H, et al. Carbonized sugarcane as interfacial photothermal evaporator for vapor generation[J]. *Desalination*, 2022, 526: 115544/1-13.
- [18] WANG W, TIAN Z Y, HE N R, et al. Biomass derived evaporator with highly interconnected structure for eliminating salt accumulation in high-salinity brine[J]. *Desalination*, 2024, 574: 117232/1-11.
- [19] MI L, ZHANG Z, ZHANG X, et al. A natural gain strategy of passive cycling water vapour escape toward efficient freshwater purification[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11: 21577-21585.
- [20] PHAM T, NGUYEN T, NGUYEN T, et al. Durable, scalable and affordable iron (III) based coconut husk photothermal material for highly efficient solar steam generation[J]. *Desalination*, 2021, 518: 115280/1-9.

【责任编辑:谭春林 责任校对:谭春林 英文审校:曾妹倩,邓乾霞】