



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Biochemical Engineering—Article

抗多种污染的仿海藻全亲水自漂浮太阳能光热蒸发器

文驰宇^{a,#}, 郭洪爽^{a,#}, 朱迎男^a, 白浩宇^{b,c}, 赵维强^a, 王新生^{b,c}, 杨静^a, 曹墨源^{b,c,*}, 张雷^{a,*}

^a Frontier Science Center for Synthetic Biology & Key Laboratory of Systems Bioengineering (Ministry of Education), Department of Biochemical Engineering, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

^b Haihe Laboratory of Sustainable Chemical Transformations, School of Materials Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China

^c State Key Laboratory of Chemical Engineering, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

^d Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621900 Sichuan, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 January 2021

Revised 11 May 2021

Accepted 15 June 2021

Available online 12 April 2022

关键词

超亲水

仿生

自漂浮

抗污

太阳能蒸发器

摘要

强亲水材料可以在太阳能驱动的海水蒸馏中实现快速的液态水运输和盐结晶溶解。然而,强亲水材料在水中饱和吸水,通常具有与水相近甚至大于水的密度,无法独立自漂浮,从而难以将热量集中在空气/水界面进行界面蒸馏。自然界中,具有内部微气泡的海藻可以漂浮在水面以保证吸收太阳能,从而进行光合作用。受此启发,本研究开发了一种全亲水自漂浮(SIFS)的太阳能光热蒸发器。蒸发器中密集填充的空心玻璃微球赋予蒸发器独立自漂浮和隔热的性能,不需要额外提供浮力支撑,能将热量集中在空气/水界面。两性离子磺基甜菜碱凝胶作为黏合剂和涂层,使蒸发器具有全亲水性,从而保证持续的水运输,溶解潜在的盐结晶,克服油污、微生物腐蚀和蛋白质吸附。凭借其独特的全亲水自漂浮性质和优异的抗污性能,该蒸发器有望为新型功能材料的设计和解决复杂环境下光热海水蒸馏的实际问题提供新的思路。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

随着全球人口的不膨胀、工业制造业的蓬勃发展和水污染的加剧,能源危机和淡水资源短缺已成为人类面临的最紧迫的两个问题[1–7]。太阳能取之不尽、用之不竭,海洋则蕴藏着丰富的水资源,因此,利用太阳辐射将海水蒸馏成淡水是一种符合可持续发展的策略,有望满足人类不断增长的淡水需求[8–11]。与整体加热相比,界面加热将入射太阳能限制在蒸发产生的界面处,降低热损失从而提高光热转换效率[12–13]。因此,太阳能界面蒸馏技术

由于装置简单、绿色节能,被认为是长期海水淡化的最佳选择[14–16]。

基于新型光热材料,如碳纳米管、氧化石墨烯、聚吡咯和碳化生物物质,以及创新的结构设计[17–26],太阳能光热蒸馏海水淡化技术已经在水蒸发速率和光热转换效率方面取得了重大突破。然而,由于海洋是一个复杂的系统,实际应用中蒸发器的长期稳定性仍然受到以下问题的限制[27–30]: ①海水蒸发形成的盐结晶可能增强光反射、堵塞水运输通道[31–32]; ②海面溢油事件时有发生,蒸发器可能受到油污染,减慢蒸发速度,缩短使用寿命;

* Corresponding authors.

E-mail addresses: moyuan.cao@tju.edu.cn (M. Cao), lei_zhang@tju.edu.cn (L. Zhang).

These authors contributed equally to this work.

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2023, 20(1): 153–161

引用本文: Chiyu Wen, Hongshuang Guo, Yingnan Zhu, Haoyu Bai, Weiqiang Zhao, Xinsheng Wang, Jing Yang, Moyuan Cao, Lei Zhang. Fully Superhydrophilic, Self-Floatable, and Multi-Contamination-Resistant Solar Steam Generator Inspired by Seaweed. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.029>

③海洋中的大量微生物在蒸发器上黏附和繁殖可能会导致蒸发器堵塞和腐蚀[33]；④海上常有风浪，可能对蒸发器结构造成破坏，使蒸发器撕裂；⑤太阳能输入蒸发器并转换成热量，使光热材料表面温度偏高，可能对蒸发器造成破坏[34]。

面对这些挑战，研究人员设计、开发并优化得到各种新型太阳能界面蒸发系统[35–39]。在以往的研究中，通常通过设计疏水表面或利用附加的支撑结构使蒸发器漂浮在空气/水界面，达到界面蒸发的目的[40–43]。然而，这些暴露的疏水表面会增加蒸发器被污染的风险，缩短其使用寿命。同时，常用的附加支撑材料，如聚苯乙烯泡沫，可能会增加微塑料排放的风险，对自然环境造成危害[44]。

在太阳能驱动的光热蒸馏中，超亲水材料可以促进液态水的快速输送和盐结晶的再溶解。同时，超亲水材料的水化层可以有效隔离各类污染物，在复杂应用环境中保护蒸发器，使蒸发器正常运行。将热量限制在空气/水界面进行局部加热是实现高光热转换效率和高蒸发速率的关键[45–46]。然而，超亲水性和自漂浮性通常是相互矛盾的。一般来说，超亲水的材料可以被水完全润湿，密度与水相似甚至高于水，从而下沉到水底而无法漂浮在空气/水界面。然而，在海洋中，部分海藻具有超亲水表面和类似水凝胶的结构，但它们仍然能够漂浮在海面进行光合作用[47]。研究发现，这些漂浮海藻的细胞具有气泡结构，降低了海藻的整体密度[48]。多个气泡聚集形成复合气泡，在不同种类海藻细胞中，气泡的尺寸和形状也不同[49]。这些气泡结构使海藻整体密度降低，从而能自行独立漂浮在水面上而不依赖其余支撑结构。将这种类型的中空结构应用于两性离子水凝胶，以实现独立的漂浮和产生界面太阳能蒸汽[50]。

本研究受到海藻启发，开发了一种全亲水但可独立自漂浮（SIFS）的太阳能蒸发器。该蒸发器具有宽带光吸收、隔热、独立自漂浮性质，可以克服来自复杂应用环境的结盐堵塞、油污染、生物黏附，实现高效且长期稳定的海水蒸馏淡化。炭黑（CB）作为光热转换材料被分散在蒸发器中，使其太阳能吸收率达到96.35%。空心玻璃微球（HGB）被密集填充在蒸发器中，降低蒸发器整体密度并将热量限制在表面，使蒸发器能够自漂浮在水面上进行界面蒸汽生成。两性离子磺基甜菜碱（ZSB）水凝胶被用作黏合剂和防污材料：超亲水ZSB对水分子具有强亲和性，可以保证蒸发器中连续的液态水运输，因此，潜在的盐结晶可以被溶解而不是作为固体沉积在蒸发器上[51]。此外，ZSB水凝胶可以结合大量水分子形成水化

层，保护蒸发器不与杂质直接接触[52–53]，使蒸发器可以克服多种污染物的黏附。与常用的聚苯乙烯泡沫（PS-f）相比，SIFS蒸发器表面大肠杆菌（*E. coli*）和金黄色葡萄球菌（*S. aureus*）的黏附率显著降低（>97%）。在一个太阳照度下，SIFS蒸发器的光热转换效率为63.27%，蒸汽产生速率为 $1.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在人工海水和不同模拟废水中保存30 d，该蒸发器仍可保持结构完整和表面清洁，表明该蒸发器具有稳定和耐用的性质。

2. 实验部分

2.1. 材料

ZSB（95%）、*N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺（MBAA, 99%）和过硫酸铵（APS, 99%）购自美国Sigma公司，CB（20 nm）购自德国Degussa公司，羟基-2-甲基苯丙酮（HMPF, 98%）购自中国Adamas公司，HGB（100 μm ）购自美国3M公司，原油由中国海洋石油集团有限公司赞助，本研究中使用的去离子水（DI）由美国Millipore系统纯化。

2.2. SIFS蒸发器的制备

称取8 mmol ZSB单体、0.04 mmol MBAA交联剂和0.017 mmol APS引发剂溶于2 mL去离子水配制水凝胶前体溶液。将HGB加入前体溶液，涡旋混合后静置于冰箱4 $^{\circ}\text{C}$ 环境中。30 min后，混合物分层，取出上层润湿的HGB加入适量CB，充分搅拌混合后转移到聚四氟乙烯（PTFE）模具中，并用载玻片密封。将模具置于37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下热交联4 h，得到固体SIFS复合凝胶。同时，制备纯ZSB水凝胶和不含CB的ZSB/G水凝胶作为对照。

2.3. 基于SIFS蒸发器的光热蒸馏

将不同厚度（1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm）的SIFS和ZSB/G水凝胶切成尺寸为1 cm \times 1 cm的试样，漂浮于装满人工海水的透明比色皿中。使用装配有AM 1.5滤光片的氙灯光源提供模拟太阳光，并调节光照强度为 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。比色皿置于光源下进行光热蒸发实验，每隔30 min记录比色皿质量，两次质量差作为被蒸发的水的质量。实验过程中使用红外相机记录复合凝胶的光热行为。

2.4. SIFS蒸发器的抗污性能

SIFS蒸发器的抗污性能通过蛋白质、细菌和油（豆油和原油）污染测试以及抗盐堵塞测试进行评估。

在蛋白质吸附测试中，以异硫氰酸荧光素标记的牛血

清白蛋白 (FITC-BSA) 为模型蛋白质, 所有样品在测试前都经质量分数为 0.9% 的 NaCl 清洗。将 FITC-BSA 溶于 PBS 缓冲液配置成 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 浓度的溶液与待测样品在黑暗中共孵育 30 min。用 PBS 缓冲溶液轻柔冲洗样品三次, 然后用倒置荧光显微镜观察并用 ImageJ 软件统计样品表面蛋白黏附情况。

在细菌黏附测试中, 分别挑取固体平板上的大肠杆菌单菌落和金黄色葡萄球菌单菌落接种到 LB (Luria-Bertani) 液体培养基中, 在 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下 $220 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 过夜培养。然后, 将菌液用 0.9% NaCl 稀释到 $1 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 浓度待用。将无菌待测样品和 1 mL 细菌稀释液在 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 下共孵育 2 h。取出待测样品, 用 0.9% NaCl 轻柔漂洗三次以去除未黏附的细菌。将待测样品置于干净的孔板中, 加入 1 mL 0.9% NaCl 使样品完全浸没, 对孔板进行间歇性超声处理 50 s, 样品表面黏附的细菌被剥离并分散在 0.9% NaCl 中。取 $100 \text{ } \mu\text{L}$ 细菌稀释液涂布平板, $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 过夜培养, 对平板上大肠杆菌菌落和金黄色葡萄球菌菌落进行计数, 计算相应样品上的细菌黏附密度。此外, 将 SIFS 复合凝胶样品置于含有 $1 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 大肠杆菌的 LB 培养基中培养三天, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 测试观察样品表面的细菌黏附和增殖。

选用白色 ZSB/G 样品进行抗油污实验以达到更好的视觉观察效果。将润湿的样品完全浸入原油和油红染色的大豆油中, 再以去离子水简单冲洗, 观察样品表面的油污黏附。

复合凝胶的抗盐堵塞性质通过盐溶解、盐降解和盐吸收实验表征。在盐溶解实验中, 测试样品漂浮于质量分数为 3.6% 的 NaCl (与海水盐度相同) 水溶液中, 将 NaCl 固体施加到样品上, 观察样品表面的盐溶解情况[37]。

在盐降解实验中, 将测试样品置于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥 48 h 至质量 m_1 , 然后将样品置于人工海水中降解 2 h, 接着将样品用去离子水洗涤并完全溶胀至质量 m_2 [63]。此操作循环 5 次, 通过公式 (1) 计算样品的溶胀比 R :

$$R = \frac{m_2}{m_1} \quad (1)$$

在盐吸收实验中, 将测试样品在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥 48 h 至质量 m_3 , 然后将样品置于 3.6% NaCl 水溶液中完全溶胀 24 h 至质量 m_4 , 接着将样品置于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥 3 d 至恒重 m_5 。样品拒盐率 φ 通过公式 (2) 计算[62]:

$$\varphi = 1 - \frac{m_5 - m_3}{0.036(m_4 - m_3)} \quad (2)$$

样品的长期抗盐性质通过连续 30 h 的 3.6% NaCl 水溶液蒸发实验表征。

3. 结果与讨论

3.1. SIFS 蒸发器的设计与制备

部分种类海藻可以漂浮在水面, 从而获取足够的太阳能进行光合作用和新陈代谢。超亲水海藻保持自漂浮性能的原因是细胞中含有大量微气泡, 减轻了海藻整体密度。受到海藻气泡结构的启发, 本研究选用 HGB 来实现超亲水材料的自漂浮 (见图 1 及附录 A 中的图 S1)。采用 ZSB 水凝胶构建蒸发器的整体结构, 具有广谱太阳能吸收的 CB 颗粒赋予该蒸发器优异的光热效应, 表面亲水内部空心的 HGB 被密集填充在蒸发器中提供浮力并起到隔热效果。同时, 也制备了纯 ZSB 水凝胶和不含 CB 的白色 ZSB/G 水凝胶用作对比。

ZSB、ZSB/G 和 SIFS 水凝胶的化学性质由 X 射线光电子能谱 (XPS) 和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测试表征, XPS 图谱以 284.8 eV 的 C 1s 峰进行校准。FTIR 图谱如图附录 A 中的图 S2 所示, 1465 cm^{-1} 和 1074 cm^{-1} 处的信号峰可归属于 ZSB 成分中的 $-\text{N}(\text{CH}_3)_2^+$ 和 $-\text{SO}_3^-$ 官能团[54]。 1094 cm^{-1} 处的信号是由 Si—O—Si 桥引起的, 1192 cm^{-1} 处的肩峰是由 Si—O—Si 的不对称伸缩引起的, 806 cm^{-1} 处的峰可归属于 Si—O—Si 的对称伸缩[55–56]。XPS 图谱如附录 A 中的图 S3 所示, 102 eV ($1 \text{ eV} = 1.602176 \times 10^{-19} \text{ J}$)、 168 eV 和 402 eV 处的峰分别对应于 SIFS 和 ZSB/G 中的 Si、S 和 N 元素, 而在 ZSB 中没有检测到明显的 Si 信号。

干燥的 SIFS 水凝胶密度约为 $0.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 可以被放置在蒲公英上而不影响蒲公英的形态[见附录 A 中的图 S4 (b)]。完全润湿后, SIFS 水凝胶密度升高到约 $0.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 仍然低于水的密度, 因此 SIFS 水凝胶具有独立且稳定的自漂浮性[见附录 A 中的图 S4 (a)]。纯 ZSB 水凝胶虽然具有优异的亲水性、生物相容性和防污性, 但是力学性能仍然有待提升。即使是高固含量的 ZSB 水凝胶, 其压缩模量也仅有 0.11 MPa , 这限制了它们在实际复杂环境中的应用。与纯 ZSB 水凝胶相比, HGB 密集填充的 ZSB/G 和 SIFS 水凝胶的压缩模量升高到 0.41 MPa (见附录 A 中的图 S5), 提高了 3.56 倍。因此, 增强的机械强度使一块边长 1 cm 、厚度 5 mm 的 SIFS 蒸发器能够支撑 1 kg 的重量而不坍塌, 如附录 A 中的图 S4 (b)、(c), 有助于保证恶劣环境中蒸发器的耐久性。

与天然海藻相似, 包覆了 ZSB 水凝胶的 SIFS 蒸发器具有典型的超亲水特性和水下超疏油性 (见图 1 及附录 A 中的图 S6、视频 S1 和 S2) [57]。ZSB 水凝胶具有 $-\text{N}(\text{CH}_3)_2^+$ 和 $-\text{SO}_3^-$ 强电荷基团, 可以通过离子溶剂化

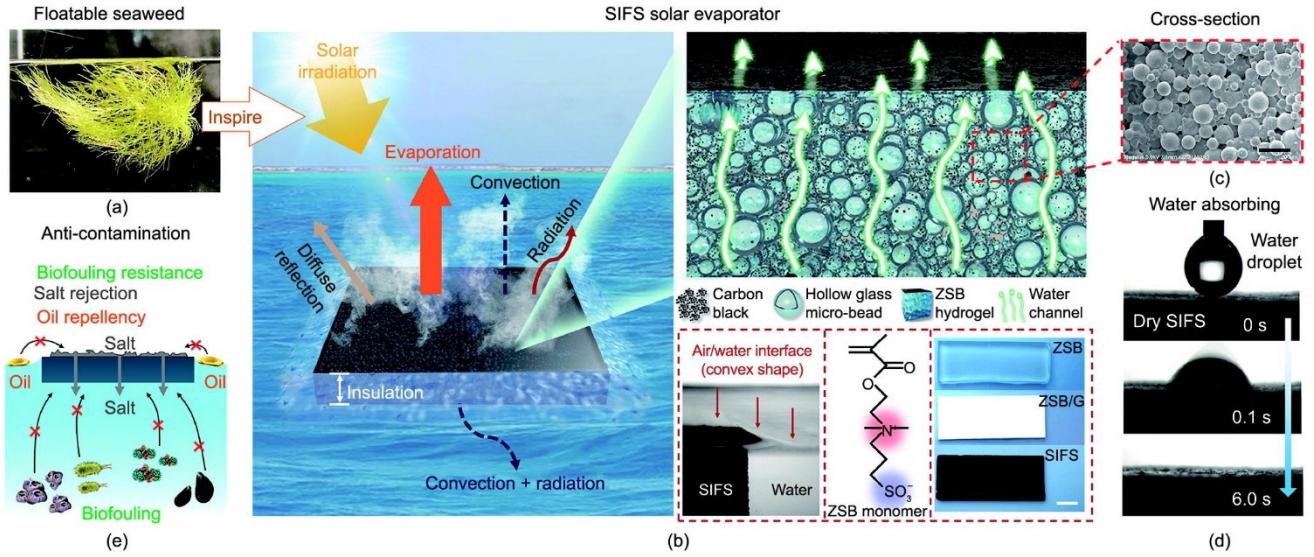


图 1. SIFS 蒸发器的示意图和表面性质。(a) 海藻依靠微气泡结构实现全亲水自漂浮。(b) 填充 HGB 和光热转换材料的全亲水自漂浮蒸发器具有广谱太阳能吸收特性，可实现连续蒸汽产生，并同时克服多种污染物黏附。ZSB 单体的分子结构，ZSB、ZSB/G 和 SIFS 水凝胶的光学图像显示在底部（比例尺：1 cm）。漂浮的 SIFS 蒸发器表面与液态水相连，形成连续的具有坡度的空气/水界面。(c) SIFS 水凝胶的截面图，ZSB 水凝胶作为黏合剂使 HGB 密集填充在内部（比例尺：100 μm ）。(d) SIFS 试样具有超亲水性，干燥的 SIFS 水凝胶可以快速捕获水滴。(e) 离子溶剂化效应诱导的水化层赋予 SIFS 蒸发器抗多种污染的特性，包括生物黏附、结盐堵塞和油污染。

作用吸引水分子。这些水分子以动态平衡的方式结合在 ZSB 周围，形成水化层[58]。这种水化层使 ZSB 材料具有超亲水特性，也使基于 ZSB 的 SIFS 蒸发器表现出优异的水亲和性，如图 1 (e)。同时，从 ZSB/G 和 SIFS 水凝胶截面可以看出其内部密集填充了 HGB，由于 HGB 的球形结构，微球之间会留下缝隙，缝隙彼此相通，构成曲折但四通八达的微米通道，保证液态水的通畅运输[见图 1 (c) 及附录 A 中的图 S7]。

进一步研究了 SIFS 蒸发器的传热行为，为后期的优化设计提供依据。经测试，纯 ZSB 水凝胶的导热系数为 $0.47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。加入 HGB 后，贮存在其中的空气 ($0.03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) 起到了隔热作用，赋予了 ZSB/G 和 SIFS 水凝胶更好的隔热性能[11]，使导热系数降至 $0.28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，远低于水的导热系数 ($0.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) [59]。因此，由于传热被抑制，热损失被降低，SIFS 蒸发器能更好地将热量集中在空气/水界面，进行光热蒸发[60]。

3.2. SIFS 蒸发器的独立自漂浮性质

部分超疏水材料的自漂浮能力来源于不完全润湿。空气被困在材料和水之间的空隙中，提供支撑。这类漂浮结构是不稳定的，一旦水和材料之间的空气溢出，材料就会被润湿并沉没。得益于 HGB 的空心结构，即使将 SIFS 完全润湿并在水中按压-释放 20 次，SIFS 蒸发器也能稳定地漂浮在水面[见图 2 (a) 及附录 A 中的视频 S3]。更重要的

是，SIFS 蒸发器的自漂浮性是固有的，而不依赖于整体结构，无论蒸发器完整还是被损坏成碎片，它的每一部分都可以漂浮在水面上，并在太阳照射下产生蒸汽[见图 2 (b) 及附录 A 中的视频 S4]。这一点区别于部分依赖于附加支撑物的蒸发器，一旦支撑物破损或发生脱离，蒸发器就可能沉没失效。

为了评估 SIFS 蒸发器的稳定性，对蒸发器进行了一系列处理，包括煮沸、超声处理、酸处理和碱处理，各 1 h。如图 2 (c) 所示，经过处理后，SIFS 蒸发器无明显变化，没有发生泄漏或降解。这一结果表明，SIFS 蒸发器具有优异的化学稳定性，这对于在复杂的真实环境中实现长期应用是至关重要的。

通过测定 SIFS 水凝胶的水扩散系数，并与 ZSB 和 ZSB/G 水凝胶进行比较，评估 SIFS 水凝胶的水运输性能[图 2 (d)、(e)]。干燥至恒重的样品被完全浸没在 3.6% NaCl 溶液中进行水吸收，一定时间后取出，记录样品的初始质量和质量随时间的变化。水凝胶的吸水性能由公式 (3) [61] 计算：

$$D_w = \frac{\pi l^2}{16} \left[\frac{d(M_t/M_\infty)}{d(t^{1/2})} \right]^2 \quad (3)$$

式中， D_w 是水的扩散系数； l 是样品的厚度； M_t 表示在时间 t 时吸收的水的质量； M_∞ 表示最终吸收的水的质量； $d(M_t/M_\infty)/d(t^{1/2})$ 是 M_t/M_∞ 的线性部分在 $M_t/M_\infty < 0.6$ (60% 饱和吸水率) 区域内对 $t^{1/2}$ 的函数的斜率[62]。纯 ZSB 在 786 s 达到 60% 吸水率，相应的水扩散系数为 $3.59 \times$

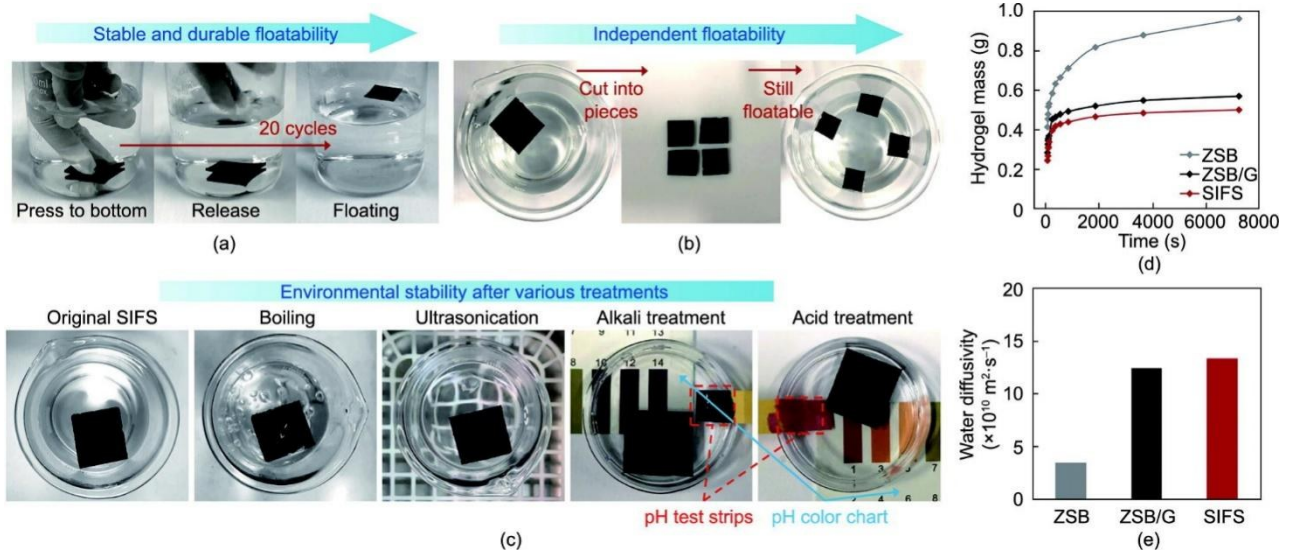


图2. SIFS蒸发器的独立自漂浮性质。SIFS蒸发器的自漂浮性质稳定且不依赖于整体结构，经多次循环按压（a）或被切成碎片（b）仍可自漂浮。（c）SIFS蒸发器可以在各类严苛环境中保持稳定，如煮沸、超声处理、酸和碱处理各1 h。（d）三种水凝胶在3.6% NaCl溶液中的质量变化。（e）三种水凝胶的水扩散系数。

$10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。而ZSB/G和SIFS蒸发器分别在226 s和211 s达到相同程度的吸水率，相应的水扩散系数分别为 $12.50 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $13.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，是纯ZSB水凝胶的3.48倍和3.72倍（见附录A中的图S8、表S1、表S2）。显著增强的水扩散得益于ZSB/G和SIFS水凝胶内部互相连通的通道。将一张干燥的滤纸覆盖在润湿的SIFS水凝胶表面，从附录A中图S9和视频S5可以看出，滤纸在接触SIFS水凝胶表面的瞬间就被完全浸湿，证实SIFS水凝胶表面存在由超亲水两性离子分子诱导的水膜。滤纸继续被浸润，润湿线持续移动，说明SIFS水凝胶可以为滤纸提供持续的水泵送。这些结果表明，含有HGB的水凝胶显示出明显加快的吸水速率，结合图1（c）中SIFS样品的截面形貌，可以推测：致密堆积的HGB由于其球面结构而留下了大量的空隙和孔洞，这些孔相互连接，形成网状微通道，与水凝胶内部固有的纳米通道结合，保证持续的水运输。

3.3. 光热海水淡化

由于 π 电子的跃迁，CB纳米粒子和氧化石墨烯等黑色碳基材料显示出优异的太阳能吸收和光热转换性能[63]。与ZSB（50.13%吸收，25.38%反射）和ZSB/G（78.00%吸收，10.92%反射）水凝胶相比，掺入CB的SIFS蒸发器表现出96.35%的广谱太阳能吸收和1.83%的低反射率[见图3（a）及附录A中的图S10]。样品的蒸发性能通过室内实验和户外实验分别测试，厚度1~5 mm的白色ZSB/G和黑色SIFS水凝胶被用于室内光热蒸发实验，系统的实际蒸发焓通过对比实验计算（见附录A中的

图S12）[64]。热转换效率根据公式（4）[65]计算：

$$\eta = \frac{m(C_p \times \Delta T + \Delta H_{\text{vap}})}{C_{\text{opt}} I} \quad (4)$$

式中， η 是光热转换效率； m 是蒸发速率； C_p 是纯水比热容； ΔT 是水蒸气温度和环境温度差； ΔH_{vap} 是实际蒸发焓； $C_{\text{opt}} I$ 是太阳能入射功率密度。经测试，SIFS蒸发器的实际蒸发焓约为 $1707.2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，低于纯水蒸发焓，这可以用“水团簇理论”（water cluster theory）来解释[66–67]。水能够以单个分子或包含几个分子的团簇形式蒸发，当水从聚合物凝胶网络蒸发时，它更倾向于以团簇形式逸出，而不是单分子形式。因此，SIFS水凝胶中的水表现出比常规水更低的实际蒸发焓[68]。如图3，由于更厚的蒸发器填充了更多HGB，具有更好的隔热性，因此随着厚度增加，ZSB/G和SIFS水凝胶的水蒸发速率、表面温度和光热转换效率都逐步升高。在此期间，5 mm厚度的SIFS蒸发器达到最佳稳定状态，在 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照强度下蒸发速率为 $1.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，光热转换效率为63.27%，与已报道的工作相当（见附录A中的表S3）。作为对照，纯水蒸发速率为 $0.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，而ZSB/G蒸发器由于缺少光热材料，蒸发速率比SIFS蒸发器低63%，为 $0.50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

用红外相机记录5 mm SIFS蒸发器在300 min照射过程中的表面温度，如附录A中的图S13所示。经过5 min光照，SIFS蒸发器表面温度从 $19.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $28.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，上升了 $8.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。经过300 min蒸发实验，SIFS蒸发器表面温度最终达到了 $51.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ，容器内液面也明显下降，说明液态水被蒸发。为了对SIFS蒸发器的传热行为有更好的研究，借助COMSOL软件对SIFS蒸发器内部及上下表面附近的

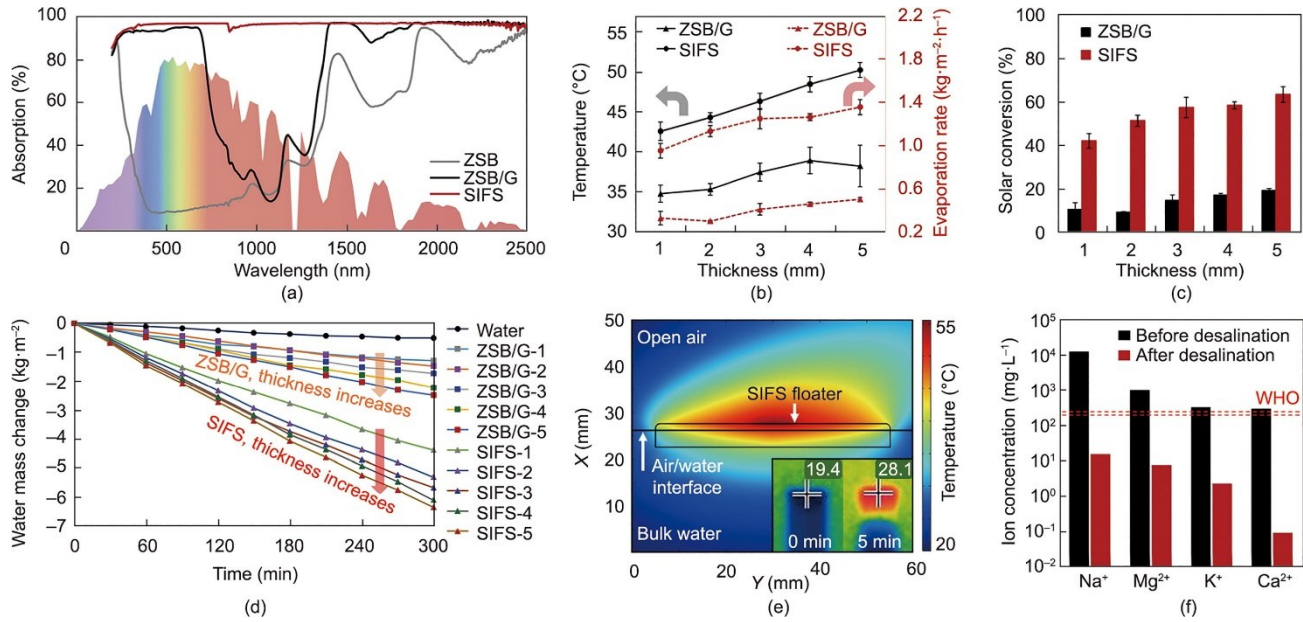


图3. SIFS蒸发器的太阳能蒸发性能。(a) SIFS蒸发器的太阳能吸收光谱, 平均吸收率为96.35%。不同厚度的ZSB/G和SIFS测试样在1个太阳照射下光照300 min的水蒸发速率和表面温度变化 (b), 以及相应的太阳能转换效率 (c)。(d) 太阳能蒸发实验中水量随时间的变化。(e) 使用COMSOL软件模拟漂浮在空气/水界面上的5 mm厚度SIFS蒸发器的温度分布, 以及5 mm厚度的SIFS蒸发器在1个太阳照射下的红外热相图 (右下)。(f) 人工海水经SIFS蒸发器脱盐前后几种主要离子的浓度。

热分布进行了模拟计算, 如图3 (e) 所示。蒸发器顶部28%暴露在空气中, 底部72%浸入水中, 与其密度相对应。光照下, 热量集中在SIFS蒸发器上表面, 使蒸发器呈现高温状态。于是, 在温差驱动下, 上表面向上方空气和下方液态水传热。由于HGB的隔热作用, SIFS蒸发器的导热系数降至 $0.28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 具体在附录A中的图S14中表现为SIFS蒸发器上、下表面之间有明显的温度梯度分布。与SIFS蒸发器下表面直接接触的液态水温度并未明显上升, 说明大部分热量被局限在上表面用于蒸发, 而不是传导至下方用于加热整体液态水。

采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 对人工海水淡化前后的水质进行评估。经过蒸发和冷凝处理, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 4种主要离子的浓度急剧降低, 远低于世界卫生组织 (WHO) 建议的使用标准[图3 (f)] [69]。同时, 制备了各种人工废水样品, 包括医疗废水 (artificial medical wastewater, AMW)、生活废水 (artificial domestic wastewater, ADW)、工业废水 (artificial industrial wastewater, AIW)、含油废水 (artificial oily wastewater, AOW) 和印染废水 (artificial printing and dyeing wastewater, APW), 将SIFS蒸发器放置在模拟废水中进行长期稳定性测试。经30 d的共孵育, SIFS蒸发器结构完好, 未发生降解、泄漏 (见附录A中的图S15)。这些结果表明, SIFS蒸发器可以提供远高于WHO标准的纯净水, 并可以对海水和废水进行长期脱盐。

3.4. 抗多种杂质污染

太阳能海水蒸馏过程中蒸发器内部盐浓度升高, 盐分积累析出形成结晶, 可能影响蒸发器的高效性和长期稳定性。避免蒸发器被结盐堵塞的策略之一是使用超亲水材料构建通畅的液态水运输通道, 快速溶解潜在的盐结晶, 同时, 超亲水材料还具有抗污性质, 可以克服油污和生物污染物的附着。

两性离子材料是一种超亲水材料, 其特点是在同一单体上分布着等量正负电荷, 整体显示出强极性和高偶极矩, 而又处于电荷平衡状态[70]。由于强极性基团, 两性离子材料可以通过离子溶剂化作用吸引水分子形成水化层, 表现出超亲水性。这种高度亲水的表面可以被完全润湿以提供连续的水运输, 从而将潜在的盐结晶重新溶解回海中[71]。此外, 从热力学角度看, 各类污染物穿过两性离子材料的水化层到达材料表面需要耗费大量的能量, 而两性离子表面的最大Gibbs自由能极高, 因此不容易被污染物附着[72]。

SIFS蒸发器的抗生物黏附性能通过FITC-BSA蛋白质吸附和大肠杆菌、金黄色葡萄球菌黏附实验考察, 光热蒸发器中常用的聚苯乙烯泡沫 (PS-f) 和密胺泡沫 (M-f) 被用作对照。如附录A中的图S16所示, 在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ FITC-BSA溶液中浸泡30 min后, 大量蛋白质吸附在聚苯乙烯泡沫表面, 荧光强度高达16.4, 密胺泡沫表面也有比较显著的蛋白质污染, 荧光强度为2.6。这些吸附在材料

表面的蛋白质增加了材料的总表面积，在材料上留下纳米或微米结构，为微生物黏附提供锚定位点，加剧生物污染。纯ZSB水凝胶抗蛋白吸附性能优异，表面几乎没有荧光信号。如图4(a)所示，和细菌悬浮液共孵育2 h后，聚苯乙烯泡沫和密胺泡沫受到大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的严重污染。聚苯乙烯泡沫是现有研究中使用最广泛的漂浮支撑和隔热材料，其表面大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的黏附密度分别为 2.391×10^4 CFU·cm⁻²和 3.896×10^4 CFU·cm⁻²。与聚苯乙烯泡沫相比，两性离子SIFS水凝胶对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的黏附率分别降低了97.93%和97.00%。此外，样品被浸泡在含有大肠杆菌的培养基中共培养三天，通过SEM图像观察表面细菌附着。如图4(a)和附录A中的图S17，经简单漂洗后，SIFS蒸发器依然保持表面洁净，没有明显菌落附着。与之相反，聚苯乙烯泡沫上有严重的细菌污染。

SIFS水凝胶用于接触角测试，白色ZSB/G水凝胶用于原油自清洁实验以便于更好区分水凝胶和原油。如图4(b)和附录A中的图S18所示，当被完全湿润时，SIFS水凝胶表面会有一层水膜，水下油接触角为149.8°。其接触

角 θ_{OW} 可以用公式(5)表示[73]:

$$\cos\theta_{OW} = \frac{\gamma_{OA}\cos\theta_O - \gamma_{WA}\cos\theta_W}{\gamma_{OW}} \quad (5)$$

式中， γ_{OA} 、 γ_{WA} 和 γ_{OW} 分别表示油/空气、水/空气和油/水界面的表面张力。 θ_O 和 θ_W 分别为表面的油接触角和水接触角。对于超亲水材料SIFS水凝胶，由于 γ_{OA} 显著低于 γ_{WA} ， $\cos\theta_O$ 和 $\cos\theta_W$ 都大于0且小于1， $\gamma_{OA}\cos\theta_O$ 一般低于 $\gamma_{WA}\cos\theta_W$ 。因此， $\cos\theta_{OW}$ 的值为负值，表明 θ_{OW} 为钝角，SIFS具有水下疏油性能，这与图4(b)一致。疏油性赋予了SIFS自清洁性能，即使浸泡在原油中，也可以通过简单的冲洗恢复到清洁状态(见附录A中的视频S6-S8)。

SIFS水凝胶的耐盐性通过盐溶解、盐降解、盐吸收和盐水长时间蒸发实验评估。在盐溶解实验中，固体盐被直接施加在漂浮在水面的SIFS蒸发器上，由于超亲水ZSB分子诱导的水膜，固体盐立即被湿润并逐渐溶解到液态水中，如图4(c)。在盐降解实验中，经过5个循环的测试，SIFS水凝胶可以在盐水中保持稳定的溶胀率，说明水凝胶没有被明显降解，如附录A中的图S19。在盐吸收实验中，由于SIFS的高尺寸稳定性和低溶胀率，蒸发

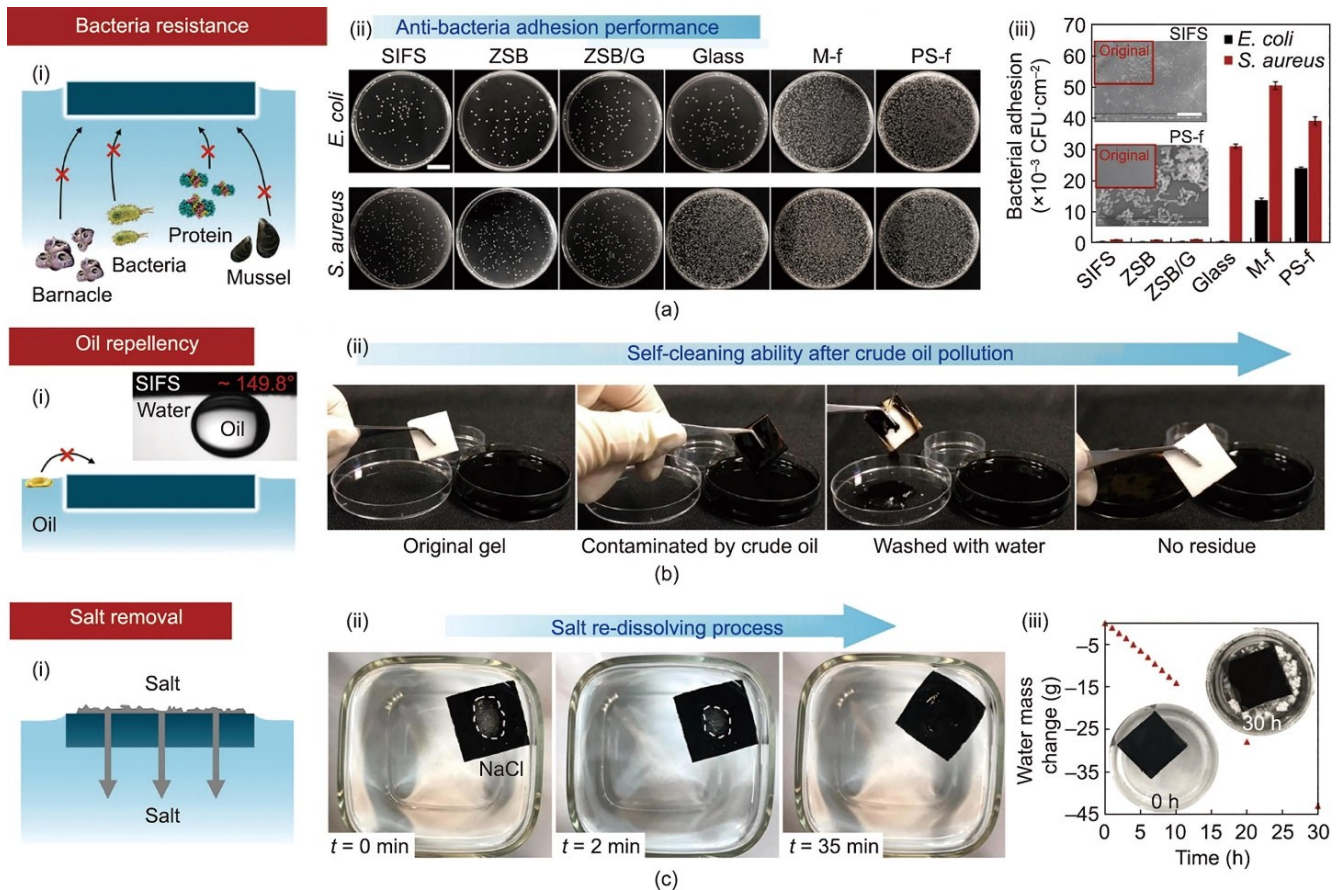


图4. SIFS蒸发器可以克服多种污染。(a) SIFS水凝胶抗生物黏附示意图(i);不同材料表面的细菌黏附光学图片(比例尺:2 cm)(ii)和数据记录(iii)。(b) SIFS蒸发器的水下疏油示意图和水下油接触角(i);经原油污染后ZSB/G水凝胶的自清洁性能(ii)。(c) SIFS水凝胶的抗盐示意图(i);施加到SIFS水凝胶上的固体盐被瞬间润湿并逐渐溶解(ii);SIFS水凝胶能连续30 h蒸发盐水而不在表面产生盐结晶(iii)。

器表现出88.16%的高拒盐率,如附录A中的图S20。SIFS蒸发器的长期耐盐性通过盐水长时间蒸发实验评估。光照下,SIFS蒸发器漂浮在3.6% NaCl溶液表面光热生产淡水,期间每隔30 min轻晃容器,模拟自然水域中的波浪。随着实验进行,水被蒸发,溶液盐浓度逐渐升高直至饱和。连续工作30 h后,SIFS蒸发器上没有观察到盐沉积,而容器底部有大量盐结晶析出,如图4(c)。该结果表明SIFS蒸发器可以在盐溶液中有效避免表面和内部结盐,有望在海水环境中进行稳定而持久的淡水生产。

3.5. 废水净化和户外实验

理想的太阳能界面蒸发系统不仅能淡化海水,还应该具有普适的水处理性能,能够对各类废水进行净化。本研究配制了不同类型的模拟废水(AIW、ADW、AOW、AMW、APW),使SIFS蒸发器漂浮在废水样品上进行300 min光照,对蒸发器进行废水净化能力的表征。如图5(b)所示,APW和ADW中SIFS蒸发器的蒸发能力与人工海水相似,而AOW、AMW和AIW中SIFS的蒸发速率略有下降,这可能是由油的扩散和溶液黏度增加所致。净化前后废水样品的吸收光谱如附录A中的图S21所示,原始废水在检测波长范围内有较强的吸收,而净化后的废水与去离子水吸收光谱相似,没有明显的吸收信号。

通过体外细胞增殖实验检测了不同水样的细胞毒性,包括ZSB、ZSB/G和SIFS水凝胶的浸出液(L-ZSB、L-ZSB/G和L-SIFS)、用SIFS蒸发器净化得到的水(EW),以及原始的AIW、ADW、AOW、AMW和APW废水。

去离子水被用作对照,将去离子水处理的细胞存活率设定为100%。废水是一个复杂的体系,其中可能含有有害成分,如重金属离子。重金属离子会对人类及其他动物的神经、肝脏、骨骼和其他器官造成损害;同时,重金属离子也会抑制重要酶的功能,从而影响代谢[74]。如图5(c)所示,经废水处理过的细胞存活率显著低于去离子水处理的细胞,尤其是AIW和AOW处理的细胞,存活率分别低至23.48%和21.79%。与之相反,L-ZSB、L-ZSB/G、L-SIFS和EW处理的细胞存活率与去离子水处理的细胞存活率相比差异不大,说明SIFS蒸发器无毒无害,不对水源造成二次污染,经SIFS蒸发器生产的淡水水质安全。

户外实验于2019年冬季12月在天津市进行。日间光照强度为200~1000 W·m⁻²,气温为-5~10 °C,空气湿度为20%~40%,SIFS蒸发器尺寸为10 cm × 15 cm,如图5(d)所示。入射太阳能被SIFS蒸发器吸收,转化为热能加热液态水产生水蒸气。透明容器提供了一个密闭的蒸发环境,同时可以作为冷端将蒸汽冷凝,容器顶部贴有商用防雾膜以减少入射光损失。将该装置放置在阳光下,经过5 min光照,容器壁面有大量水滴出现[图5(e)],说明液态水被蒸发形成水蒸气,水蒸气又冷凝形成了清洁淡水。装置中收集的淡水的质量变化、SIFS蒸发器的温度、液态水和环境温度随时间的变化都记录在图5(f)中。可以看出,随着入射光强度的增加,SIFS蒸发器表面温度从16.9 °C上升到31.2 °C,升高了14.3 °C。随着日落,环境温度和SIFS蒸发器表面温度都有所下降。整个集水过程中SIFS蒸发器表面最高温度为31.2 °C,低于室内实验

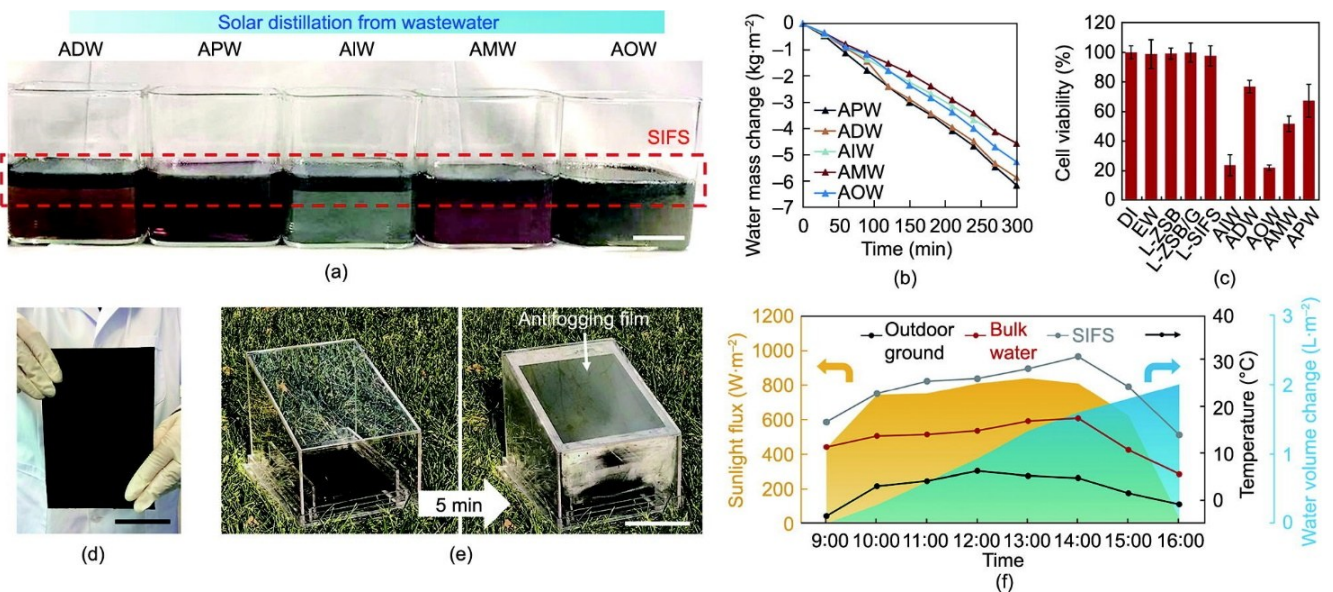


图5. SIFS蒸发器用于废水净化和室外蒸发。(a)模拟废水图片(比例尺:2 cm);(b)模拟废水光热蒸发;(c)不同水样的细胞毒性;(d)室外实验中使用的SIFS蒸发器的光学图像(比例尺:5 cm);(e)装置在自然光照下5 min内即可产生蒸汽;(f)室外实验期间光照强度、集水量、环境温度、液态水温度和SIFS蒸发器表面温度变化。

温度 (51.6 °C), 这可能是由冬季户外温度过低和大风造成的。经过 7 h 的蒸发, 该装置收集了约 30 mL 清洁水, 相当于 $2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ 的收集速率, 说明该装置具有太阳能光热蒸馏生产淡水的潜力。

4. 结论

受海藻微气泡结构的启发, 通过简便的方法将 ZSB、HGB 和 CB 集成在一起, 开发了一种全亲水但可以独立漂浮的 SIFS 蒸发器, 可实现稳定的太阳能海水蒸馏, 适合在实际环境中长期使用。SIFS 蒸发器中密集填充的 HGB 赋予其低密度和隔热性, 即使被完全润湿或损坏撕裂, 该蒸发器也能进行界面蒸发。CB 具有广谱太阳能吸收和光热转换性能, 确保 SIFS 蒸发器仅消耗取之不尽的太阳能和用之不竭的海水来生产淡水。ZSB 水凝胶作为黏合剂构建了 SIFS 蒸发器的整体结构, 更重要的是, 得益于 ZSB 优异的水化性能, SIFS 蒸发器可以克服包括蛋白吸附、微生物黏附、结盐堵塞、油污染等多种污染。最终, SIFS 蒸发器实现 $1.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 63.27% 的光热转换效率, 有望满足社会不断增长的淡水需求, 为复杂环境条件下的海水淡化和废水净化提供解决思路。

致谢

本研究受到国家自然科学基金 (21621004、21961132005、22078238、21908160 和 21805204)、天津市自然科学基金 (19JCQNJC05100 和 20JCQNJC00170)、天津市青年人才托举工程项目 (TJSQNTJ-2018-17) 和中国博士后科学基金 (2019M651041) 的资助。

Compliance with ethical guidelines

Chiyu Wen, Hongshuang Guo, Yingnan Zhu, Haoyu Bai, Weiqiang Zhao, Xinsheng Wang, Jing Yang, Moyuan Cao, and Lei Zhang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.029>.

References

- [1] Elimelech M, Phillip WA. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science* 2011;333(6043):712–7.
- [2] Gao M, Zhu L, Peh CK, Ho GW. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production. *Energy Environ Sci* 2019;12(3):841–64.
- [3] Wu X, Gao T, Han C, Xu J, Owens G, Xu H. A photothermal reservoir for highly efficient solar steam generation without bulk water. *Sci Bull* 2019; 64(21):1625–33.
- [4] Zhu L, Gao M, Peh CK, Ho GW. Solar-driven photothermal nanostructured materials designs and prerequisites for evaporation and catalysis applications. *Mater Horiz* 2018;5(3):323–43.
- [5] Zhang Y, Ravi SK, Tan SC. Food-derived carbonaceous materials for solar desalination and thermo-electric power generation. *Nano Energy* 2019; 65: 104006.
- [6] Wang Y, Wu X, Shao B, Yang X, Owens G, Xu H. Boosting solar steam generation by structure enhanced energy management. *Sci Bull* 2020; 65(16): 1380–8.
- [7] Hu X, Zhu J. Tailoring aerogels and related 3D macroporous monoliths for interfacial solar vapor generation. *Adv Funct Mater* 2020;30(3):1907234.
- [8] Ni F, Qiu N, Xiao P, Zhang C, Jian Y, Liang Y, et al. *Tillandsia*-inspired hygroscopic photothermal organogels for efficient atmospheric water harvesting. *Angew Chem Int Ed Engl* 2020;59(43):19237–46.
- [9] Xu Z, Zhang L, Zhao L, Li B, Bhatia B, Wang C, et al. Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still. *Energy Environ Sci* 2020;13(3):830–9.
- [10] Kim H, Yang S, Rao SR, Narayanan S, Kapustin EA, Furukawa H, et al. Water harvesting from air with metal–organic frameworks powered by natural sunlight. *Science* 2017;356(6336):430–4.
- [11] Li T, Liu H, Zhao X, Chen G, Dai J, Pastel G, et al. Scalable and highly efficient mesoporous wood-based solar steam generation device: localized heat, rapid water transport. *Adv Funct Mater* 2018;28(16):1707134.
- [12] Jiang M, Shen Q, Zhang J, An S, Ma S, Tao P, et al. Bioinspired temperature regulation in interfacial evaporation. *Adv Funct Mater* 2020;30(14):1910481.
- [13] Ghasemi H, Ni G, Marconnet AM, Loomis J, Yerci S, Miljkovic N, et al. Solar steam generation by heat localization. *Nat Commun* 2014;5(1):4449.
- [14] Shi L, Shi Y, Zhuo S, Zhang C, Aldrees Y, Aleid S, et al. Multi-functional 3D honeycomb ceramic plate for clean water production by heterogeneous photo-Fenton reaction and solar-driven water evaporation. *Nano Energy* 2019;60:222–30.
- [15] Ge J, Zong D, Jin Q, Yu J, Ding B. Biomimetic and superwetable nanofibrous skins for highly efficient separation of oil-in-water emulsions. *Adv Funct Mater* 2018;28(10):1705051.
- [16] Yao Y, Lv T, Li N, Chen Z, Zhang C, Chen T. Selected functionalization of continuous graphene fibers for integrated energy conversion and storage. *Sci Bull* 2020;65(6):486–95.
- [17] Zhao F, Guo Y, Zhou X, Shi W, Yu G. Materials for solar-powered water evaporation. *Nat Rev Mater* 2020;5(5):388–401.
- [18] Gao B, Nakano S, Harada H, Miyamura Y, Sekiguchi T, Kakimoto K. Single-seed casting large-size monocrystalline silicon for high-efficiency and low-cost solar cells. *Engineering* 2015;1(3):378–83.
- [19] Nandakumar DK, Ravi SK, Zhang Y, Guo N, Zhang C, Tan SC. A super hygroscopic hydrogel for harnessing ambient humidity for energy conservation and harvesting. *Energy Environ Sci* 2018;11(8):2179–87.
- [20] Liang H, Liao Q, Chen N, Liang Y, Lv G, Zhang P, et al. Thermal efficiency of solar steam generation approaching 100% through capillary water transport. *Angew Chem Int Ed Engl* 2019;58(52):19041–6.
- [21] Xiao M, Wang S, Thaweesak S, Luo B, Wang L. Tantalum (oxy)nitride: narrow bandgap photocatalysts for solar hydrogen generation. *Engineering* 2017;3(3): 365–78.
- [22] Zhang Y, Ravi SK, Vaghasiya JV, Tan SC. A barbecue-analog route to carbonize moldy bread for efficient steam generation. *iScience* 2018;3:31–9.
- [23] Hu X, Xu W, Zhou L, Tan Y, Wang Y, Zhu S, et al. Tailoring graphene oxide-based aerogels for efficient solar steam generation under one sun. *Adv Mater* 2017;29(5):1604031.
- [24] Zhang B, Song C, Liu C, Min J, Azadmanjiri J, Ni Y, et al. Molten salts promoting the “controlled carbonization” of waste polyesters into hierarchically porous carbon for high-performance solar steam evaporation. *J Mater Chem A* 2019;7(40):22912–23.
- [25] Yang M, Schäffler R, Repmann T, Orgassa K. Moisture absorption and desorption in an ionomer-based encapsulant: a type of self-breathing

- encapsulant for CIGS thin-film PV modules. *Engineering* 2020;6(12):1403–7.
- [26] Huang Q, Jiang F, Wang L, Yang C. Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering* 2017;3(3):318–29.
- [27] Chen C, Kuang Y, Hu L. Challenges and opportunities for solar evaporation. *Joule* 2019;3(3):683–718.
- [28] Liu H, Huang Z, Liu K, Hu X, Zhou J. Interfacial solar-to-heat conversion for desalination. *Adv Energy Mater* 2019;9(21):1900310.
- [29] Zhang C, Liang HQ, Xu ZK, Wang Z. Harnessing solar-driven photothermal effect toward the water–energy nexus. *Adv Sci* 2019;6(18):1900883.
- [30] Zhang P, Li J, Lv L, Zhao Y, Qu L. Vertically aligned graphene sheets membrane for highly efficient solar thermal generation of clean water. *ACS Nano* 2017;11(5):5087–93.
- [31] He J, Zhang Z, Xiao C, Liu F, Sun H, Zhu Z, et al. High-performance salt-rejecting and cost-effective superhydrophilic porous monolithic polymer foam for solar steam generation. *ACS Appl Mater Interfaces* 2020;12(14):16308–18.
- [32] Wang F, Hu Z, Fan Y, Bai W, Wu S, Sun H, et al. Salt-rejection solar absorbers based on porous ionic polymers nanowires for desalination. *Macromol Rapid Commun* 2021;42(4):2000536.
- [33] Ling N, Forsythe S, Wu Q, Ding Y, Zhang J, Zeng H. Insights into *Cronobacter sakazakii* biofilm formation and control strategies in the food industry. *Engineering* 2020;6(4):393–405.
- [34] He J, Fan Y, Xiao C, Liu F, Sun H, Zhu Z, et al. Enhanced solar steam generation of hydrogel composite with aligned channel and shape memory behavior. *Compos Sci Technol* 2021;204:108633.
- [35] Dong Y, Wu ZS, Ren W, Cheng HM, Bao X. Graphene: a promising 2D material for electrochemical energy storage. *Sci Bull* 2017;62(10):724–40.
- [36] Han N, Liu K, Zhang X, Wang M, Du P, Huang Z, et al. Highly efficient and stable solar-powered desalination by tungsten carbide nanoarray film with sandwich wettability. *Sci Bull* 2019;64(6):391–9.
- [37] Ni G, Zandavi SH, Javid SM, Boriskina SV, Cooper TA, Chen G. A salt-rejecting floating solar still for low-cost desalination. *Energy Environ Sci* 2018;11(6):1510–9.
- [38] Xu N, Zhu P, Sheng Y, Zhou L, Li X, Tan H, et al. Synergistic tandem solar electricity–water generators. *Joule* 2020;4(2):347–58.
- [39] Zeng Y, Yao J, Horri BA, Wang K, Wu Y, Li D, et al. Solar evaporation enhancement using floating light-absorbing magnetic particles. *Energy Environ Sci* 2011;4(10):4074–8.
- [40] Sun C, Wen B, Bai B. Recent advances in nanoporous graphene membrane for gas separation and water purification. *Sci Bull* 2015;60(21):1807–23.
- [41] Li R, Zhang L, Shi L, Wang P. MXene Ti_3C_2 : an effective 2D light-to-heat conversion material. *ACS Nano* 2017;11(4):3752–9.
- [42] Xu N, Li J, Wang Y, Fang C, Li X, Wang Y, et al. A water lily-inspired hierarchical design for stable and efficient solar evaporation of high-salinity brine. *Sci Adv* 2019;5(7):aaw7013.
- [43] Ni G, Li G, Boriskina SV, Li H, Yang W, Zhang T, et al. Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration. *Nat Energy* 2016;1(9):16126.
- [44] Kane IA, Clare MA, Miramontes E, Wogelius R, Rothwell JJ, Garreau P, et al. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. *Science* 2020;368(6495):1140–5.
- [45] Tao P, Ni G, Song C, Shang W, Wu J, Zhu J, et al. Solar-driven interfacial evaporation. *Nat Energy* 2018;3(12):1031–41.
- [46] Guo Y, Zhou X, Zhao F, Bae J, Rosenberger B, Yu G. Synergistic energy nanoconfinement and water activation in hydrogels for efficient solar water desalination. *ACS Nano* 2019;13(7):7913–9.
- [47] Walsby AE, Booker MJ. Changes in buoyancy of a planktonic blue-green alga in response to light intensity. *Br Phycol J* 1980;15(4):311–9.
- [48] Bowen CC, Jensen TE. Blue-green algae: fine structure of the gas vacuoles. *Science* 1965;147(3664):1460–2.
- [49] Cohen-Bazire G, Kunisawa R, Pfennig N. Comparative study of the structure of gas vacuoles. *J Bacteriol* 1969;100(2):1049–61.
- [50] Zhao Y, Yu C, Lan H, Cao M, Jiang L. Improved interfacial floatability of superhydrophobic/superhydrophilic Janus sheet inspired by lotus leaf. *Adv Funct Mater* 2017;27(27):1701466.
- [51] Geng H, Bai H, Fan Y, Wang S, Ba T, Yu C, et al. Unidirectional water delivery on a superhydrophilic surface with two-dimensional asymmetrical wettability barriers. *Mater Horiz* 2018;5(2):303–8.
- [52] Wen C, Guo H, Bai H, Xu T, Liu M, Yang J, et al. Beetle-inspired hierarchical antibacterial interface for reliable fog harvesting. *ACS Appl Mater Interfaces* 2019;11(37):34330–7.
- [53] Zhang L, Cao Z, Bai T, Carr L, Ella-Menye JR, Irvin C, et al. Zwitterionic hydrogels implanted in mice resist the foreign-body reaction. *Nat Biotechnol* 2013;31(6):553–6.
- [54] Phiri I, Eum KY, Kim JW, Choi WS, Kim SH, Ko JM, et al. Simultaneous complementary oil–water separation and water desalination using functionalized woven glass fiber membranes. *J Ind Eng Chem* 2019;73:78–86.
- [55] Prakash I, Muralidharan P, Nallamuthu N, Satyanarayana N, Venkateswarlu M, Carnahan D. Preparation of $NiAl_2O_4/SiO_2$ and Co^{2+} -doped $NiAl_2O_4/SiO_2$ nanocomposites by the sol-gel route. *J Am Ceram Soc* 2006;89(7):2220–5.
- [56] Prakash I, Nallamuthu N, Muralidharan P, Venkateswarlu M, Satyanarayana N. Synthesis of $SiO_2/CoFe_2O_4$ nanocomposite by base catalyst assisted *in-situ* sol-gel process. *AIP Conf Proc* 2010;1276(1):227–32.
- [57] Cai Y, Lu Q, Guo X, Wang S, Qiao J, Jiang L. Salt-tolerant superoleophobicity on alginate gel surfaces inspired by seaweed (*Saccharina japonica*). *Adv Mater* 2015;27(28):4162–8.
- [58] He K, Duan H, Chen GY, Liu X, Yang W, Wang D. Cleaning of oil fouling with water enabled by zwitterionic polyelectrolyte coatings: overcoming the imperative challenge of oil–water separation membranes. *ACS Nano* 2015;9(9):9188–98.
- [59] Li C, Jiang D, Huo B, Ding M, Huang C, Jia D, et al. Scalable and robust bilayer polymer foams for highly efficient and stable solar desalination. *Nano Energy* 2019;60:841–9.
- [60] Hogan NJ, Urban AS, Ayala-Orozco C, Pimpinelli A, Nordlander P, Halas NJ. Nanoparticles heat through light localization. *Nano Lett* 2014;14(8):4640–5.
- [61] Wang JH. Self-diffusion coefficients of water. *J Phys Chem* 1965;69(12):4412.
- [62] Zeng J, Wang Q, Shi Y, Liu P, Chen R. Osmotic pumping and salt rejection by polyelectrolyte hydrogel for continuous solar desalination. *Adv Energy Mater* 2019;9(38):1900552.
- [63] Liu G, Xu J, Wang K. Solar water evaporation by black photothermal sheets. *Nano Energy* 2017;41:269–84.
- [64] Guo Y, Zhao F, Zhou X, Chen Z, Yu G. Tailoring nanoscale surface topography of hydrogel for efficient solar vapor generation. *Nano Lett* 2019;19(4):2530–6.
- [65] Zhou J, Gu Y, Liu P, Wang P, Miao L, Liu J, et al. Development and evolution of the system structure for highly efficient solar steam generation from zero to three dimensions. *Adv Funct Mater* 2019;29(50):1903255.
- [66] Miyazaki M, Fujii A, Ebata T, Mikami N. Infrared spectroscopic evidence for protonated water clusters forming nanoscale cages. *Science* 2004;304(5674):1134–7.
- [67] Fujii A, Mizuse K. Infrared spectroscopic studies on hydrogen-bonded water networks in gas phase clusters. *Int Rev Phys Chem* 2013;32(2):266–307.
- [68] Zhao F, Zhou X, Shi Y, Qian X, Alexander M, Zhao X, et al. Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels. *Nat Nanotechnol* 2018;13(6):489–95.
- [69] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4th Ed. Geneva: World Health Organization; 2011.
- [70] Shao Q, Jiang S. Molecular understanding and design of zwitterionic materials. *Adv Mater* 2015;27(1):15–26.
- [71] Mu P, Zhang Z, Bai W, He J, Sun H, Zhu Z, et al. Superwetting monolithic hollow-carbon-nanotubes aerogels with hierarchically nanoporous structure for efficient solar steam generation. *Adv Energy Mater* 2019;9(1):1802158.
- [72] Wei Q, Becherer T, Angioletti-Uberti S, Dzubiella J, Wischke C, Neffe AT, et al. Protein interactions with polymer coatings and biomaterials. *Angew Chem Int Ed Engl* 2014;53(31):8004–31.
- [73] Jung YC, Bhushan B. Wetting behavior of water and oil droplets in three-phase interfaces for hydrophobicity/philicity and oleophobicity/philicity. *Langmuir* 2009;25(24):14165–73.
- [74] Malik A. Metal bioremediation through growing cells. *Environ Int* 2004;30(2):261–78.