

学术前沿专栏:太阳能驱动界面光热蒸发器

水凝胶基太阳能驱动界面水蒸发器研究进展

于中振,李长骏,李晓锋,刘骥

(北京化工大学 材料科学与工程学院;有机无机复合材料全国重点实验室,北京 100029)

摘要:太阳能驱动界面水蒸发技术因其可持续性、低成本以及在偏远和离网地区的高适应性,已成为缓解全球淡水资源短缺问题的重要途径之一.在众多用于构筑太阳能驱动界面蒸发器的基体材料中,水凝胶凭借其优异的亲水性、可设计的网络结构、高度可调的物理化学特性以及能够有效降低水蒸发焓的独特优势而备受关注.系统综述了近年来基于水凝胶材料的太阳能界面蒸发器的研究进展,重点讨论其制备方法、结构设计策略及性能提升机制,并进一步探讨了高性能水凝胶基界面蒸发器面临的主要挑战,展望其未来发展方向.

关键词:光热转换;水凝胶;界面蒸发;海水淡化

中图分类号:P747

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)03-0029-15

近年来,随着全球人口数量的持续增长以及工业化进程的加快,淡水需求急剧攀升,淡水资源短缺问题日益凸显^[1-2].尽管传统海水淡化技术在大规模淡水生产应用中取得了显著成效,但其高度依赖复杂设备和化石能源,不仅能耗高、成本大,还伴随着温室气体排放和环境污染等问题,不利于可持续发展^[3-4].相比之下,太阳能驱动界面水蒸发技术作为一种依托绿色可再生能源的海水淡化途径,可通过光热材料高效地将太阳能转化为热能,以驱动海水的蒸发与淡化.该技术具有绿色环保、成本低廉以及在偏远和离网地区适应性高等优点,被认为是实现可持续淡水生产的理想技术路线,近年来受到广泛关注.

随着太阳能驱动光热水蒸发技术的不断发展,蒸发系统的加热方式已从传统的底部加热、本体加热逐步发展至能量利用效率更高的界面加热模式^[5].基于界面光热转化加热模式的蒸发器通常将光热层置于气-液界面,通过选择性加热薄层界面水以快速产生蒸汽,有效避免对大量本体水直接加热导致的热量损失,从而显著提升能量利用效率^[6].在此类系统中,尽管光热材料决定了光吸收与光热转换效率,蒸发器的整体性能在很大程度上也依赖于基体材料的设计与调控.理想的蒸发器基体材料不仅需要具备良好的水传输能力以确保光热蒸发界面持续供水^[7-8],还应具有良好的表面化学活性,如富含羟基、羧基等亲水基团,以调控与水分子的界面相互作用,从而降低水的蒸发焓和蒸发能耗^[9].此外,基体材料的微纳结构设计对液体输运、蒸汽扩散及热流调控也具有重要影响^[10-11].目前,构筑界面光热蒸发器的基体材料主要包括生物质衍生材料、无机材料以及高分子材料等.其中,高分子水凝胶材料因兼具良好的亲水性、可设计的分子网络结构和高度可调的物理化学性质,受到广泛关注,被认为是构筑高性能蒸发器的理想基体材料.水凝胶的高含水量和柔性高分子网络不仅有助于实现高效的水输运和热管理,还可通过分子结构设计实现对力学性能、溶胀行为、稳定

收稿日期:2025-11-18;**修回日期:**2025-12-07.

基金项目:国家自然科学基金(U1905217).

作者简介(通信作者):于中振(1966—),男,山东泰安人,北京化工大学教授,博士,研究方向为功能复合材料,E-mail:yuzz@buct.edu.cn.

引用本文:于中振,李长骏,李晓锋,等.水凝胶基太阳能驱动界面水蒸发器研究进展[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(3):29-43.(Yu Zhongzhen, Li Changjun, Li Xiaofeng, et al. Research advances in hydrogel-based solar-driven interfacial evaporators[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(3):29-43. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.11.18.0003.)

性和水蒸发焓等关键属性的有效调控.此外,在水凝胶体系中引入多种高性能光热填料,可构建具有协同效应的复合体系,从而显著提升整体蒸发性能.

总体而言,水凝胶基太阳能驱动界面蒸发器已成为实现高效、可持续淡水生产的重要研究方向.然而,当前对于水凝胶基蒸发器的材料-结构-性能之间的内在联系仍缺乏系统性总结,围绕其加工成型方法与层级结构设计策略等关键问题的探讨也相对有限.鉴于此,本文系统综述了近年来水凝胶基太阳能界面蒸发器的研究进展,重点介绍其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,并总结了该领域当前面临的主要挑战与未来发展趋势,为下一代高性能太阳能驱动蒸发体系的设计与优化提供参考.

1 光热界面水蒸发器材料组成

1.1 光热转换材料

在太阳能驱动界面蒸发体系中,光热转换材料是实现能量产生的核心部分,其主要功能是高效吸收太阳光并将光能转化为热能,进而通过局域加热驱动水蒸发.因此,光热材料的合理选择与结构设计对提升整体蒸发性能至关重要.太阳通过辐射不同波长的光子向外界释放能量,其中波长在 150~4 000 nm 范围内的光子约占总能量的 99%.然而,由于地球大气层的臭氧、水蒸气和其他气体分子会选择性吸收特定波长范围的光子,因此最终到达地表的太阳辐射波长主要分布在 250~2 500 nm,其中红外光区(>760 nm)、可见光区(400~760 nm)和紫外光区(<400 nm)的能量占比分别为 43%、50%和 7%.理想的光热转换材料不仅应在上述波长范围内具有高的光吸收率和光热转换能力,还应具备化学稳定性、结构可调性以及与基体材料良好的相容性,以确保长期稳定运行和能量利用的最大化^[12].目前,已有包括金属、半导体、碳材料、MXene(二维过渡金属碳化物/氮化物)以及共轭高分子在内的多种光热材料体系被广泛用于太阳能驱动界面水蒸发器的构筑中.

1.1.1 金属材料

金属纳米颗粒是最早被开发的光热转换材料之一.受到光照时,金属内部的自由电子可被特定波长的入射光激活,当自由电子振荡频率与入射光频率相匹配时会发生局域表面等离子体共振,随后通过电子-声子耦合过程产生热量,从而产生显著的局部加热效应^[13].

目前常见的金属光热转换材料包括铝^[14]、金^[15-16]、银^[17-18]和铜^[19]等.ZHOU 等^[14]将铝纳米颗粒沉积在纳米多孔阳极氧化铝膜(AAM)上,同时实现了高光吸收率(>96%)和高光热转换效率(约 90%)(图 1(a)).HONG 等^[16]将亲水金纳米棒作为光热材料负载于多孔聚二甲基硅氧烷(PDMS)泡沫中,制备出蒸发速率高达 $4.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发器(图 1(b)).除固态金属外,液态金属也已被广泛用于构建高效光热蒸发体系^[20-21].WEI 等^[21]开发了一种由聚苯胺(PANi)、镓钢合金和纤维素纳米晶体组成的复合材料,其兼具宽的光吸收范围和良好溶液加工性,该复合体系与亲水性聚合物结合制备的水凝胶蒸发器,在标准太阳光强下实现了 $1.50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的水蒸发速率(图 1(c)).

1.1.2 半导体材料

半导体材料具有成本低、合成工艺简便、低毒性和化学稳定性好等优点,已被广泛用于太阳能光热转换体系.常见的半导体光热材料主要包括金属氧化物、金属硫化物和金属氮化物^[22-23].当能量高于禁带宽度的光子入射时,价带电子将被激发至导带并产生空穴载流子,随后电子-空穴结合过程中通过辐射或非辐射弛豫引起晶格振动,从而实现光能到热能的转化^[13].然而,许多传统半导体材料因带隙较宽,仅能响应部分太阳光谱,导致光吸收范围受限,从而限制了光吸收强度与光热转换效率.

为提升半导体材料的光热性能,研究者提出了带隙调控、元素掺杂及复合体系构筑等一系列策略,并通过与不同基体材料复合,制备出具有高光吸收率、高蒸发速率和良好稳定性的蒸发器^[24-26].例如,HU 等^[27]通过高温煅烧氧化石墨烯包裹的四氧化三铁,制备出可在动态磁场作用下发生变形的锥形阵列蒸发器.得益于其分层结构设计和动态蒸发调控,该蒸发器实现了高达 $5.90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率(图 2(a)).YANG 等^[28]通过高温烧结二氧化钛(TiO_2)获得不同类型的钛氧化物($\lambda\text{-Ti}_3\text{O}_5$ 、 $\beta\text{-Ti}_3\text{O}_5$ 、 Ti_4O_7),并系统研究了它们的光吸收率和光热转换能力.结果表明, $\lambda\text{-Ti}_3\text{O}_5$ 的光吸收率可高达 96.4%,其与聚乙烯醇(PVA)复合制备的三维蒸发器的水蒸发速率可以达到 $6.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 2(b)).

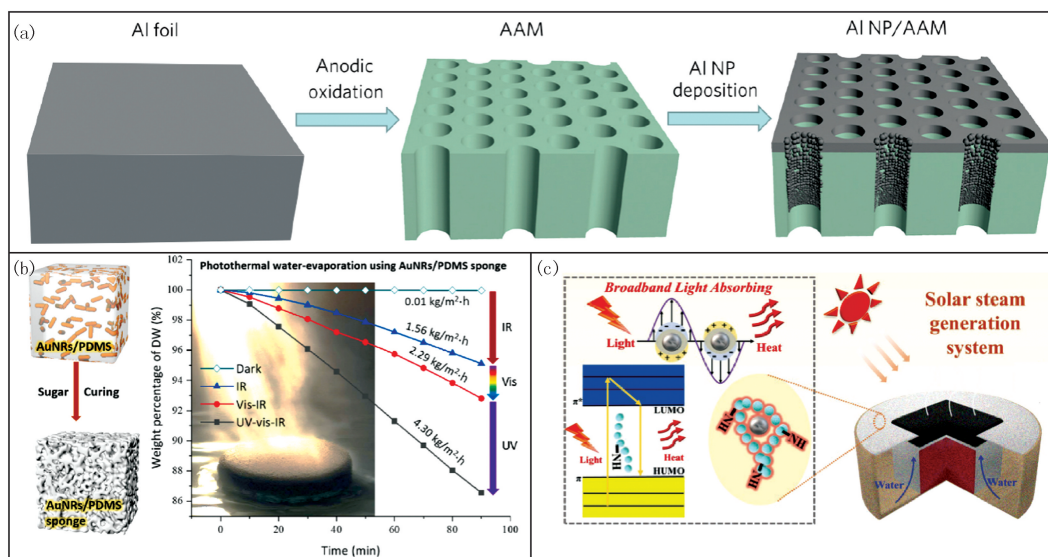


图1 Al/AAM复合薄膜^[14] (a)、金纳米棒/PDMS蒸发器^[16] (b)和镓铟合金/聚苯胺/纤维素纳米晶复合水凝胶蒸发器^[21] (c)

Fig.1 Al/AAM composite membrane^[14] (a), Au nanorod/PDMS evaporator^[16] (b) and eutectic gallium-ndium/polyaniline/cellulose nanocrystals composite hydrogel evaporator^[21] (c)

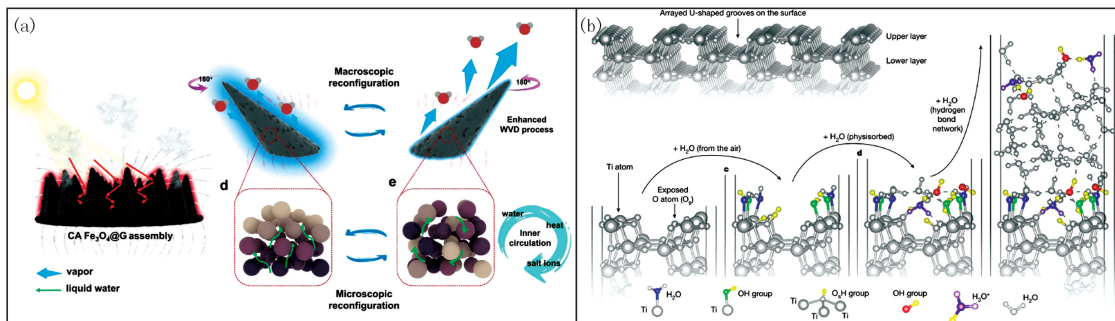


图2 锥形阵列蒸发器^[27] (a)和 λ -Ti₃O₅/PVA蒸发器^[28] (b)

Fig.2 Conical array evaporator^[27] (a) and λ -Ti₃O₅/PVA evaporator^[28] (b)

1.1.3 碳材料

碳是自然界中最丰富的元素之一,碳原子可通过不同杂化方式形成种类丰富的同素异形体,如碳量子点、富勒烯、碳纳米管、石墨烯等^[29-30].碳材料普遍具有光吸收能力强、来源广泛及稳定性好等特点,因而在光热界面蒸发领域得到了广泛的关注与应用^[31-32].例如,CHEN等^[33]将炭黑分散到PVA水溶液中,经过戊二醛化学交联制备了炭黑/PVA水凝胶蒸发器.纯PVA水凝胶在250~2500 nm的光吸收率不足20%,炭黑的加入使复合材料的光吸收率提高至约96%,并将其在1 kW·m⁻²光强照射下的上表面平衡温度从35.6 °C提高至60.5 °C(图3(a)).LIU等^[34]受丝瓜内部三维多孔结构启发,采用静电纺丝方法制备了聚丙烯腈(PAN)/碳纳米管(CNT)纳米纤维,经多巴胺沉积及壳聚糖交联后形成多孔气凝胶蒸发器,其光吸收率高达94.8%,水蒸发速率达到2.13 kg·m⁻²·h⁻¹(图3(b)).此外,石墨烯也被广泛应用于太阳能驱动界面水蒸发系统.ZHANG等^[35]将氧化石墨烯和乙醇的混合溶液倒入模具中,经定向冷冻、冷冻干燥、热处理以及氧等离子体处理,制备了内部具有竖直排列通道的还原氧化石墨烯膜,其水蒸发速率达到1.62 kg·m⁻²·h⁻¹(图3(c)).

1.1.4 高分子材料

除上述典型的无机光热材料外,有机共轭高分子也可以通过 π 共轭电子结构吸收光子能量,将太阳能转化成热能.近年来,研究人员已开发出多种共轭高分子光热材料,并与基体材料复合用于构筑太阳能驱动界面蒸发器.聚吡咯(PPy)因其合成方法简单、稳定性高等优点而被广泛研究^[36].QI等^[37]采用电化学聚合方法制备了具有周期性金字塔结构且致密的PPy光热膜,得益于PPy优异的光吸收与光热转换能力以及超薄结构设计带来的水输运路径和固气界面优化,该光热膜实现了1.12 kg·m⁻²·h⁻¹的水蒸发速率,并能够有效拦截本体水中的挥发性有机物(VOC)(图4(a)).除PPy外,聚苯胺(PANi)和聚多巴胺(PDA)也表现出较为

优异的光热性能和可加工性,被广泛应用于构筑太阳能界面蒸发器^[38].例如,LI等^[39]利用 PANi、GO 和 MXene 的协同组装,制备了可任意塑形的复合凝胶蒸发器,使其蒸发速率在一个太阳光强 (1 kW/m^2 ,下同) 照射下达到 $2.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;得益于其高可塑性,该复合凝胶蒸发器经过表面图案化处理,蒸发速率可进一步提升至 $3.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 4(b)).PENG 等^[40]在聚醚砜微滤膜表面原位聚合 PANi,并在其上生长沸石咪唑骨架(ZIF-8),构筑了具有优异的光吸收和光热转换能力的复合膜水蒸发器;值得注意的是, PANi 表面 ZIF-8 的孔径介于水分子与 VOC 分子之间,可充当分子筛,从而实现高达 99% 的 VOC 拦截率(图 4(c)).目前,聚(2,3-二氢噻吩并-1,4-二恶英)-聚(苯乙烯磺酸盐)等新型共轭高分子也逐渐被应用于光热界面蒸发体系,进一步拓宽了材料范围与设计思路^[41-42].

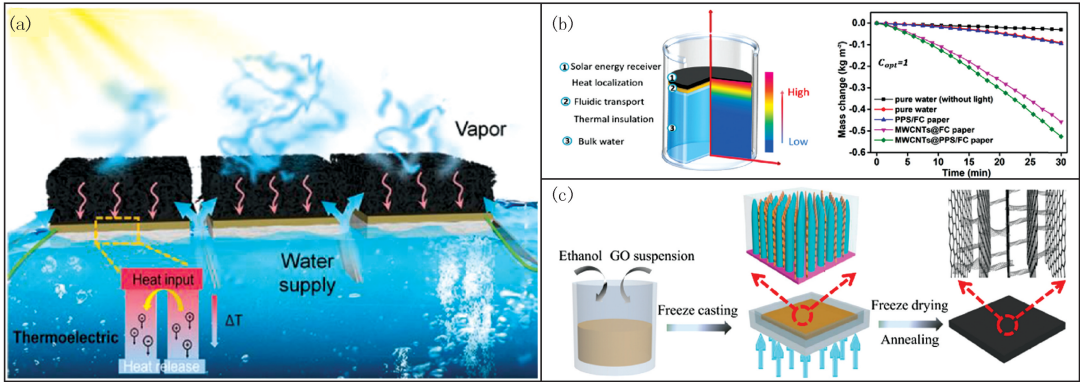


图3 炭黑/PVA水凝胶蒸发器^[33](a)、多孔气凝胶蒸发器^[34](b)和还原氧化石墨烯膜^[35](c)

Fig. 3 Carbon black/PVA hydrogel evaporator^[33](a), porous aerogel evaporator^[34](b) and reduced graphene oxide membrane^[35](c)

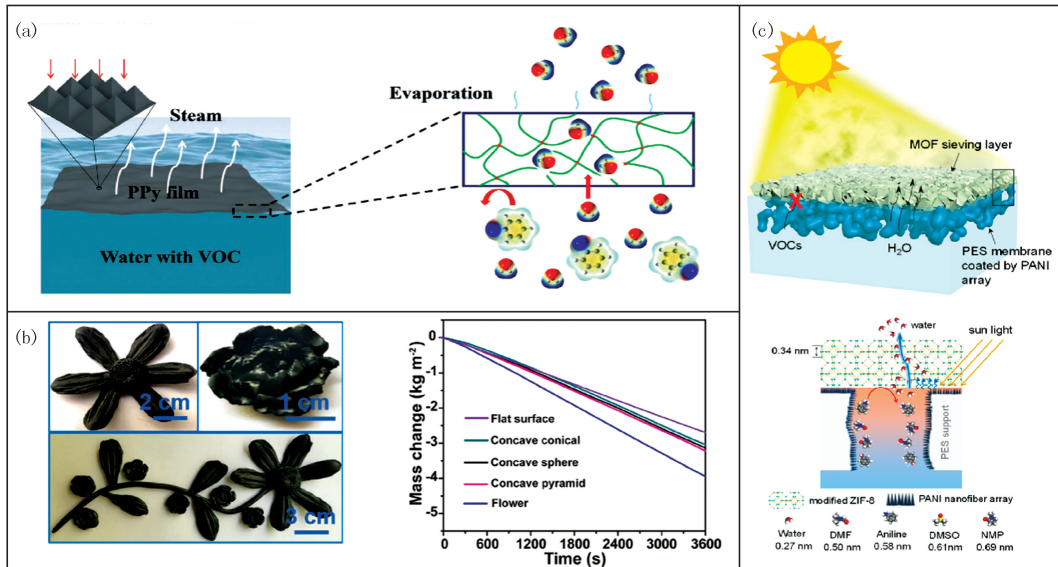


图4 金字塔形膜^[37](a)、PANi/GO/MXene 杂化蒸发器^[39](b)和 PANi/ZIF-8 复合膜^[40](c)

Fig. 4 Pyramid-shaped membrane^[37](a), PANi/GO/MXene hybrid evaporator^[39](b) and PANi/ZIF-8 composite film^[40](c)

1.2 基体材料

在太阳能驱动界面蒸发体系中,光热材料负责光能吸收与转化,仅依靠光热转换材料的结构设计往往难以构筑符合实际应用需求的稳定蒸发结构.因此,通常需要将光热材料与具有机械支撑、水运输、热管理及其他功能特性的基体材料结合,以构建高效稳定的蒸发系统.目前,常用的基体材料主要包括无机材料(如陶瓷、碳材料、金属材料)以及天然或人工合成的高分子材料等.

1.2.1 无机材料

无机材料凭借其优异的力学性能和结构稳定性,被广泛用于太阳能蒸发器的构筑,典型代表包括陶瓷、金属和碳材料^[43-45].SHI 等^[46]通过高温煅烧制备了负载铜、铁、锰氧化物(CuFeMnO_4)的圆柱形陶瓷蒸发

器,其内部存在大量直径为 0.1 cm、深度为 0.5 cm 的蜂窝结构,这种高纵横比结构能够实现多次光反射以显著提升光吸收,使光吸收率可达 98.2%,在一个太阳光强下的水蒸发速率达到 $1.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 5(a)). YAO 等^[47]设计了由铜板与铜泡沫组成的金属基双层界面蒸发器,上层铜板经激光刻蚀可形成周期性锥形阵列结构增强光的多重反射效应,使光吸收率达到 96%;而下侧多孔铜泡沫经与 PVA 和壳聚糖复合后冻干成型,用于支撑和持续疏水;该蒸发器在一个太阳光强下的蒸发速率达到 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 5(b)). 然而,金属材料普遍存在亲水性不足的问题,作为基体材料时往往需要与其他亲水组分复合才能实现持续高效的水传输.

此外,一些兼具可调表面化学结构与优异光热性能的无机功能材料,如氧化石墨烯^[48-49]和 MXene^[50-51]等,可通过界面相互作用组装形成具有三维多孔结构的基体材料,实现光热层、支撑层、输水层和功能层的一体化设计.例如,LI 等^[52]通过化学还原和定向冷冻制备出具有垂直孔道结构的还原氧化石墨烯凝胶,并在其内部引入 MXene 纳米片以增强光热转化与水输运性能,实现了高达 $2.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率(图 5(c)). 另一项研究中,LI 等^[53]采用真空辅助抽滤 MXene/氯化亚铁水分散液,利用亚铁离子与 MXene 表面羟基之间的配位作用构筑交联结构,制备出 MXene 基气凝胶薄膜蒸发器,其展现出优异的光热转换和快速水输运能力,在一个太阳光强下实现了 $1.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率(图 5(d)).

1.2.2 高分子材料

高分子材料在工业体系和自然界中广泛存在,凭借其可设计的分子结构、高亲水性、可调的性能以及丰富的成型方式,已成为太阳能蒸发器中最具潜力的基体之一.高分子材料可分为天然高分子材料和人工合成高分子材料.天然高分子材料在自然界中广泛存在,普遍具有独特的天然微结构,可直接用作高性能蒸发器的基体.其中,木材是典型代表.树木在长期进化过程中形成了垂直排列的微米级导管结构和坚固的木质部,能够凭借毛细力和蒸腾作用在高负压下实现高效的水输运^[54-56].此外,天然高分子材料还具有来源广泛、成本低、力学性能良好和亲水性等优点^[57-58].LU 等^[59]以巴沙木为基体,经脱木质素处理后在其内部天然孔道中负载 ZIF-8 和 PDA,制得 ZIF-8/PDA/巴沙木蒸发器;巴沙木内部丰富的竖直孔道(直径数十微米)有助于水的快速输送,使蒸发器在一个太阳光强下能保持 $2.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的水蒸发速率(图 5(e)).SUN 等^[60]将 CNTs 和 TiO_2 纳米颗粒分散于壳聚糖溶液中,并涂敷在玉米秆表面制备蒸发器,不仅实现了快速向上的毛细输水能力,玉米秆侧壁的径向孔道还能促进蒸发层表面的高浓度盐水回流以抑制盐分累积,使蒸发器在长期运行中能保持稳定、高效的蒸发性能($2.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)(图 5(f)).除上述材料外,竹子^[61-62]、蘑菇^[63]、向日葵^[64]、金针菇^[65]等多种天然生物质材料也被用作蒸发器基体材料,表现出良好的性能.因此,依据不同地区的植物资源构筑具有本地化与可再生特征的生物质基蒸发器,能够有效降低材料获取与加工成本,为区域性水资源短缺提供具有可持续性的技术方案^[66-67].

与天然高分子相比,人工合成高分子材料可通过调控分子量、链结构及官能团种类与含量,实现对材料微观结构、界面化学及宏观性能的精确设计与优化.值得注意的是,使用富含亲水基团的高分子材料作为基体材料,可有效调控水分子的氢键网络,增加中间态水分子比例,从而显著降低水的蒸发焓并提高蒸发速率^[68].目前,已有多种可作为太阳能界面蒸发器基体材料的高分子材料被开发出来,包括聚(*N*-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)^[69-70]、聚丙烯腈(PAN)^[71-72]、聚乙烯醇(PVA)^[73]、聚丙烯酰胺(PAM)^[74]、海藻酸钠(SA)^[75-77]、壳聚糖(CS)^[34,78]、明胶^[79-80]以及淀粉^[81]等.需要指出的是,上述多种天然与人工高分子材料在含水条件下均可形成具有三维交联网络结构的水凝胶.水凝胶网络不仅能够提供连续的水输运通道与优异的界面润湿性,还可通过分子设计调控链段柔性、孔结构与界面化学,从而实现水蒸发焓降低、热管理优化和蒸发界面的稳定维持.然而,水凝胶基体材料在实际应用过程中仍面临着水传输速率较低、力学性能不足、微米级孔道难以构筑以及在长时间运行中的结构稳定性难以维持等问题,这对其制备方法与设计策略提出更高要求.因此,系统梳理和总结水凝胶的成型方式、网络结构设计及其对蒸发性能的调控机制,对于推动高性能水凝胶基蒸发器的发展具有重要意义.接下来将重点介绍水凝胶基太阳能界面蒸发器的主要成型方式与结构构筑策略.

2 水凝胶基水蒸发器成型方式

水凝胶是一类由亲水性聚合物通过物理或化学交联形成的稳定三维网络结构,可在保持形状稳定的同

时吸附并储存大量水分。因其良好的成型性、可调的微观结构以及优异的润湿性,水凝胶已成为当前太阳能界面蒸发器中最具潜力的基体材料之一。值得注意的是,水凝胶的成型方式直接决定了其网络结构、孔隙形貌及力学稳定性,并对水运输和蒸发行为产生关键影响。因此,从成型方法角度对水凝胶进行系统设计具有重要意义。根据交联机理的不同,水凝胶的成型方式通常包括物理交联(依靠氢键、静电作用或疏水相互作用形成可逆结构)和化学交联(通过共价键连接获得高稳定性网络)两大类。

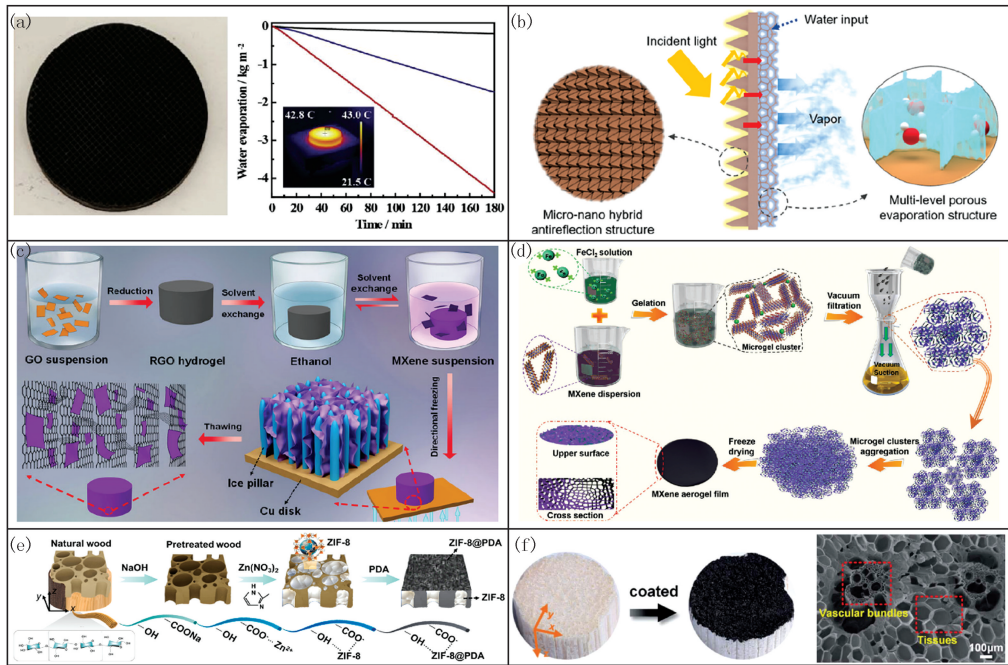


图5 CuFeMnO_4 /多孔陶瓷蒸发器^[46] (a)、双层界面蒸发器^[47] (b)、还原氧化石墨烯/MXene水凝胶^[52] (c)、MXene薄膜^[53] (d)、ZIF-8/PDA/巴沙木蒸发器^[59] (e)和CNT/ TiO_2 /玉米秆蒸发器^[60] (f)

Fig. 5 CuFeMnO_4 /porous ceramic evaporator^[46] (a), double-layer interface evaporator^[47] (b), RGO/MXene hydrogel^[52] (c), MXene membrane^[53] (d), ZIF-8/PDA/balsa wood evaporator^[59] (e) and CNT/ TiO_2 /corn stalk evaporator^[60] (f)

2.1 物理交联

物理交联主要依靠分子间较弱的非共价作用(如氢键、静电力或范德华力)形成可逆的网络结构,无需引入化学试剂,具有工艺简便、环境友好等优势。例如,PVA分子链含有大量羟基,能通过分子间氢键自组装形成有序排列的结晶区域,作为物理交联点,通过简单的冻融处理,可进一步促进结晶区域的形成,获得结构稳固的PVA水凝胶及其复合材料。在冷冻过程中,冰晶会挤压PVA链,使其在冰晶边缘处富集并增强分子间氢键作用;而在随后的融化阶段,水凝胶可保持以冰晶为模板的孔道特征,有助于提升水的传输能力。随着冻融循环次数增加,结晶区域逐渐增多,网络结构更加致密,从而显著增强水凝胶的力学性能。DONG等^[82]将10%(质量分数)的PVA溶液进行定向冷冻处理,发现经过5次冻融循环后水凝胶的结晶峰明显增强。ZHANG等^[83]将PVA/MXene溶液经3次冻融处理后得到多孔水凝胶蒸发器,其蒸发速率达到 $1.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图6(a))。

海藻酸钠是一类含有大量羧基的线性多糖,可通过多价阳离子实现物理交联,得到结构稳定的海藻酸钠水凝胶。ZHANG等^[84]将高浓度海藻酸钠/炭黑溶液分别浸泡于氯化钙、氯化铜、氯化铝和氯化铁溶液中,系统研究了离子类型和离子价态对水凝胶溶胀行为和结构稳定性的影响规律,获得了结构优化的水凝胶蒸发器,蒸发速率在一个太阳光强照射下可达 $1.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。YU等^[85]将海藻酸钠/还原氧化石墨烯悬浮液注射到10%(质量分数)氯化钙溶液中制得复合水凝胶纤维,并将其编织成宏观蒸发器件,实现了高效水传输和优异的耐盐性能,水蒸发速率达到 $4.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图6(b))。

壳聚糖分子链含有丰富的氨基,在酸性溶液中氨基可质子化带正电而溶解,而较高pH条件下,氨基去质子化,分子间静电斥力减弱,氢键及疏水相互作用增强,从而形成物理交联网络。因此,通过调控溶液的pH,可实现壳聚糖分子链的自组装与凝胶化,构筑稳定的水凝胶材料。ZHANG等^[86]将酸性壳聚糖溶液与

炭黑混合后冷冻,并在碱溶液中诱导增强壳聚糖分子链之间的相互作用,得到具有稳定结构的多孔壳聚糖/炭黑复合水凝胶,其在一个太阳光强下的水蒸发速率高达 $4.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,且具有优异的长期运行性。REN 等^[87]将棉织物浸渍于壳聚糖/炭黑溶液中,经模压和冷冻干燥制得复合材料蒸发器,在一个太阳光强下实现了 $2.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率(图 6(c))。

2.2 化学交联

化学交联通过引入交联剂或引发聚合反应,在聚合物链间形成共价键连接,可显著提升水凝胶网络的结构稳定性与抗溶胀能力。例如,由于 PVA 具有较强亲水性,仅依靠氢键交联网络作用形成的水凝胶,在实际使用中易发生溶胀或结构松弛,通常需要引入化学交联剂以增强结构稳定性。ZHAO 等^[88]在 PVA 溶液中加入戊二醛与盐酸形成化学交联网络,经过进一步循环冻融处理后,即可得结构稳定性大幅提升的 PVA 水凝胶蒸发器,其在一个太阳光强下的水蒸发速率可达到 $3.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

自由基聚合是构筑结构稳固水凝胶蒸发器的另一重要途径,常用的单体包括丙烯酰胺(AM)、*N*-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)、丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)以及[2-(甲基丙烯酰基氧基)乙基]二甲基-(3-磺酸丙基)氢氧化铵(DMAPS)等^[89]。例如,XU 等^[90]以过硫酸钾引发 NIPAM 聚合制备了聚异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)水凝胶,并通过进一步与聚多巴胺和海藻酸钠复合,获得了兼具温度响应和优异蒸发性能的水凝胶蒸发器(图 6(d))。在另一项研究中,XU 等^[91]将含丙烯酰胺、交联剂和光引发剂的悬浮液注入模具,经过径向冷冻和紫外辐照固化,得到了具有独特径向排列通道结构的聚丙烯酰胺(PAM)水凝胶;在该水凝上表面负载光热组分多壁碳纳米管后,其光热蒸发速率可达 $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

综上所述,物理与化学交联方法为水凝胶基蒸发器的构筑提供了多样化的成型路径。物理交联工艺简便,且无需额外化学试剂,但其交联点主要依赖弱相互作用,由此得到的水凝胶蒸发器在长期运行中的结构稳定性通常受到限制。相较之下,化学交联则通过形成共价键显著提升水凝胶网络的力学强度和环境耐受性,但其工艺过程往往更为复杂,需要使用交联剂或引发聚合反应。通过将物理交联与化学交联相结合,并配合合理的网络结构调控,有望在水凝胶的机械性能和蒸发性能之间实现优化平衡。在下一节中,将进一步讨论水凝胶基蒸发器的结构设计策略及其对蒸发性能的影响。

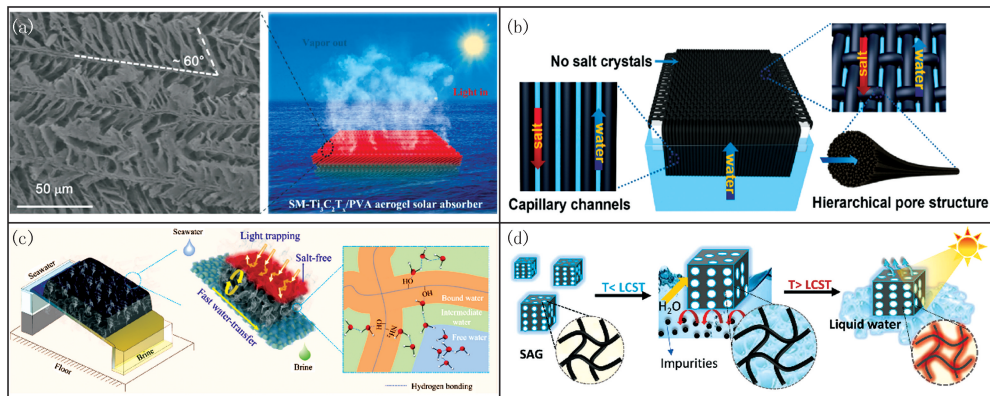


图6 PVA/MXene水凝胶^[83] (a)、RGO/SA水凝胶纤维织物^[85] (b)、棉纤维织物/壳聚糖/炭黑蒸发器^[87] (c)和PNIPAM水凝胶^[90] (d)
Fig. 6 PVA/MXene hydrogel^[83] (a), RGO/SA hydrogel fiber fabrics^[85] (b), cotton fiber fabric/CS/CB evaporator^[87] (c) and PNIPAM hydrogel^[90] (d)

3 水凝胶基水蒸发器结构设计

在水凝胶基蒸发器中,结构设计是决定其整体蒸发性能的关键因素之一。尽管光热材料的种类与水凝胶的成型方式会显著影响其光热蒸发性能,但结构层面的优化同样至关重要。为实现高效的光热蒸发过程,结构设计需在多尺度上实现对光捕获、水输运与能量管理的协同优化。在微观尺度上,通过构筑稳定的供水通道(如微米尺度孔道)可加速水分递送并提升蒸发效率;同时,表面微结构设计可增大气-液界面面积并增强对光捕获能力。在宏观尺度上,合理的几何构型有助于进一步提升光吸收、抑制热损失并促进环境能量的有效利用。此外,针对海水淡化应用,耐盐结构设计对于维持蒸发器在高盐环境下的长期稳定运行尤为重要。基

于此,本节将从微观结构、宏观结构与耐盐结构设计3方面系统阐述水凝胶基蒸发器的结构调控策略,并探讨其对蒸发性能的影响机制与典型实现路径。

3.1 微观结构设计

水凝胶的微观结构主要包括内部孔道结构和光热与蒸发面的微形貌,这些结构特征分别决定了水凝胶基蒸发器的水传输速率、光吸收能力与气-液界面面积,从而直接影响整体蒸发性能。

3.1.1 内部孔道结构

在水凝胶基蒸发器工作过程中,内部供水通道结构主要决定水分向蒸发表面的输运效率,进而影响蒸汽生成速率和能量利用效率。当水凝胶结构过于致密时,其内部水分子仅能依靠渗透作用缓慢迁移,难以及时补充蒸发表面消耗的水分,无法支撑高速率蒸发。更重要的是,在淡化海水过程中,蒸发会不断提高蒸发器内部的盐离子浓度,若回流水通道不足或水输运速率过低,则高浓度盐水难以及时扩散或回流至水体中,最终在蒸发器中诱发盐晶析出,进一步堵塞供水通道并遮掩蒸发表面,导致水蒸发速率不断下降。为此,在水凝胶内部构筑微米级甚至分级互联的孔道结构,可利用毛细力实现快速供水与有效盐扩散,从而确保界面持续湿润,并抑制盐分在蒸发表面富集,实现长期稳定的高效蒸发。

水凝胶蒸发器微孔道结构的构筑通常在成型过程中实现,常用策略包括冻筑法^[92-93]、发泡法^[94]以及牺牲模板法^[95]等。LIU等^[96]采用环氧交联和不同冷冻方式制备了具有不同孔道特征(如各向同性无规结构、单取向孔道及垂直-径向双向孔道)的大豆蛋白/羟乙基纤维素/炭黑水凝胶蒸发器,并系统研究了孔道结构对蒸发器传热-水输运性能的影响,优化后的蒸发器在蒸发20%的高质量分数盐水中仍能保持 $3.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率(图7(a))。发泡法是一种低成本且易规模化的孔道构筑方法。MA等^[73]在PVA/氧化石墨烯悬浮液中加入十二烷基磺酸钠(SDS),通过高速搅拌诱导大量气泡生成,并通过冻融固化形成互联微孔道结构,所构筑的水凝胶蒸发器蒸发速率达到 $4.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图7(b))。此外,LIU等^[97]通过搅拌聚合制备的PAM/MoS₂水凝胶内部自发形成了分级孔结构,显著增强了水输运能力,实现了高达 $3.297 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率。另一种常见且可控性较高的策略是利用可溶性粒子作为牺牲模板构筑多孔网络结构,牺牲模板法具有较高的结构可控性,可实现更为精确的孔隙尺寸与形貌调节。例如,GUO等^[95]采用聚甲基丙烯酸甲酯微球作为牺牲模板,将其分散于PVA基前驱体溶液中,经化学交联固化后,将所得水凝胶浸泡于丙酮溶液中溶解并移除微球,从而构筑出具有特定多孔结构的水凝胶蒸发器(图7(c))。

另一方面,多数亲水性聚合物在吸水后会显著溶胀,其三维网络结构可能引起孔道尺度由微米级向纳米级收缩,使原本依赖毛细力驱动的快速供水转变为以渗透压为主导的缓慢输运模式,从而导致水输运速率下降。为解决这一问题,研究者提出了将水凝胶与具有固有微米级孔道的多孔基体材料复合的设计策略,二者结合既可以保留水凝胶高亲水性和界面调控能力的优势,又利用多孔骨架提供稳定的毛细通道,实现持续且高效的水供应。例如,QIU等^[98]在三聚氰胺泡沫内部原位聚合水凝胶,构筑了同时具备毛细力和渗透压双模式供水的复合蒸发器。在高光强照射下,水凝胶因蒸发失水而收缩,暴露出泡沫骨架中贯通的三维微米孔道,从而维持毛细力驱动的快速供水,使蒸发器即使在 $8 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的超强光照下仍能保持充足的水供应和稳定的蒸发性能。相较之下,未结合多孔骨架的纯水凝胶在高光照下会持续收缩,导致供水逐渐不足并引发性能衰减。

3.1.2 表面设计

光热-蒸发表面的结构调控是提升界面蒸发性能的另一关键途径。通过优化表面形貌和微结构特征,可同时改善表面润湿性、增强光吸收、扩展有效蒸发面积、提升热管理能力并优化蒸发行为。例如,GUO等^[99]利用不同模板制备了表面具有周期起伏结构的PVA水凝胶,结果表明,相较于平整表面,该结构不仅有助于局域热量富集、减少热散失,还显著扩大了气-液界面面积,使蒸发速率从平整表面的 $1.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高至 $2.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。LU等^[100]在PVA/CS水凝胶基蒸发器表面引入凹槽结构,通过马兰戈尼效应增强水流动,实现了蒸发速率从 $1.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 到 $3.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的提升(图7(d))。此外,GUO等^[101]通过十八烷基三氯硅烷对PVA水凝胶表面进行选择性的疏水改性,通过构建具有空间分布差异的亲疏水区域调控界面水分布,使蒸发速率从 $3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高至 $4.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3.2 宏观结构设计

在更高尺度层次上,宏观三维结构的构筑可进一步提升水凝胶的光捕获和热管理能力,同时大幅增加有

效蒸发面积并促进对环境能量利用,从而实现整体蒸发性能的显著提升.通常可通过将前驱体溶液倒入特定模具中进行交联固化,构筑具有特定几何特征和三维结构的水凝胶蒸发器.例如,SHI 等^[102]将 PPy、戊二醛和盐酸溶液依次加入 PVA 溶液中并模压交联,制得具有仿森林宏观结构和锥形表面形貌的 PVA/PPy 水凝胶蒸发器,该蒸发器在一个太阳光强下的蒸发速率可达 $3.64 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,并可以在夜间实现大气集水;因其低接触阻力、高亲水性和内部多孔结构,该蒸发器的水收集速率可保持在 $5.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 8(a)).近年来,3D 打印与化学交联相结合的方法为构筑精确可控的宏观结构提供了新的技术途径.YANG 等^[103]利用烯丙基缩水甘油酯醚(AGE)接枝单宁酸(TA)改性的液态金属(EGaIn)与 PVA 复合制备可打印材料,通过 3D 打印构筑了具有规则锥形阵列结构的水凝胶蒸发器,该结构可通过诱导太阳光多重反射以增强光吸收,同时扩大气-液界面面积,使蒸发器的蒸发速率和能量效率分别达到 $2.96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 96.93% (图 8(b)).CHEN 等^[104]在纤维布上喷涂含硫化铜、纤维素纳米纤维和壳聚糖的复合溶液,并经层叠组装形成三维开放式中空光热蒸发结构,通过增加宽度以及调控侧壁上的狭缝尺寸,有效提升了界面蒸发效率与环境能量利用能力,在一个太阳光强下实现了 $3.938 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的水蒸发速率(图 8(c)).

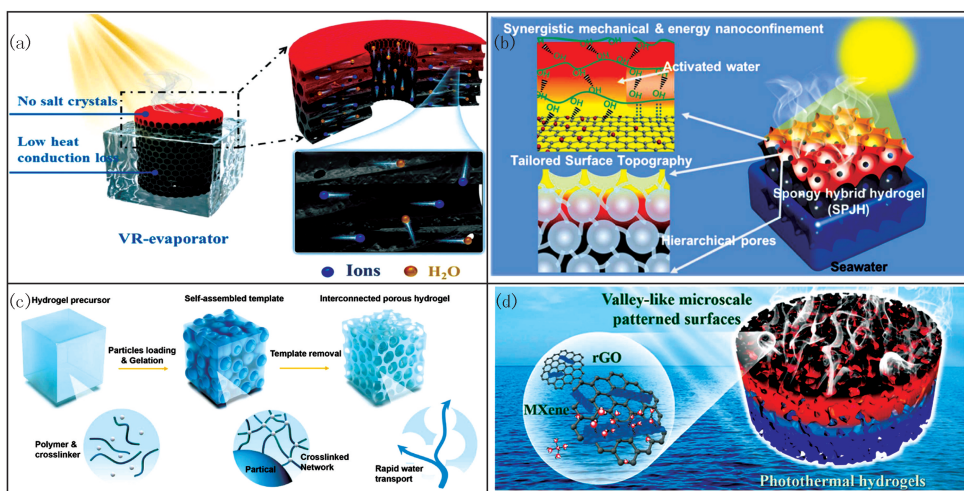


图7 具有双向通道的水凝胶蒸发器^[96] (a)、搅拌发泡制备PVA/还原氧化石墨烯水凝胶^[73] (b)、牺牲模板法构筑多孔PVA水凝胶^[95] (c)和具有表面图案的PVA/CS水凝胶^[100] (d)

Fig. 7 Hydrogel evaporator with bidirectional channels^[96] (a), PVA/reduced graphene oxide hydrogel prepared by stirring foaming^[73] (b), porous PVA hydrogel prepared by sacrificial template method^[95] (c) and PVA/CS hydrogel with surface pattern^[100] (d)

3.3 耐盐结构设计

随着太阳能驱动界面水蒸发技术的不断发展及其水蒸发速率的不断提升,蒸发器在海水淡化过程中更易遭遇盐晶析出引发的通道堵塞、界面遮蔽及性能衰减等问题,难以实现长期稳定运行.因此,通过结构设计赋予水凝胶蒸发器优异的耐盐能力,对推进其实际应用意义重大.当前,提高水凝胶基蒸发器耐盐性能的策略主要包括以下三类.第一类策略是在水凝胶内部构建分级孔道结构,以促进盐分扩散和盐水回流,从而避免盐分在蒸发表面和水输运通道中富集^[105].例如,YANG 等^[106]将氧化石墨烯、纤维素纳米纤维和聚丙烯酸混合后,通过 3D 打印制备了同时具有 2 mm 大孔和数十微米小孔的分级孔结构蒸发器,同时实现了快速供水与高效盐扩散,其水通量达到了 $29.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,在高光强下仍可保持长时间稳定淡化性能(图 8(d)).第二类策略是构建界面润湿性差异化的不对称结构,以抑制盐分向光吸收-蒸发表面的迁移和析出.LI 等^[107]将 PNIPAM 与四氧化三铁(Fe_3O_4)混合溶液通过静电纺丝制成纤维膜,并在其下方再生成一层聚丙烯腈(PAN)纳米纤维膜.由于 PNIPAM 升温后会表现出疏水性,可在光热蒸发过程中限制高浓度盐水上移至光吸收-蒸发表面,使盐仅能在 PNIPAM 和 PAN 层之间析出,避免其遮掩蒸发器表面造成光吸收损失;而在夜间降温时,PNIPAM 可恢复亲水性,促进盐溶解,从而实现了蒸发器的动态自清洁与长周期稳定运行.第三类策略是利用聚两性离子电解质构建水凝胶蒸发器以增强离子调控.聚两性离子电解质水凝胶的分子链同时含有正、负离子基团,可通过与离子发生静电配位,降低盐离子的迁移速率并抑制其在界面处积聚,从而实现离子迁移调控型耐盐性能^[108-109].

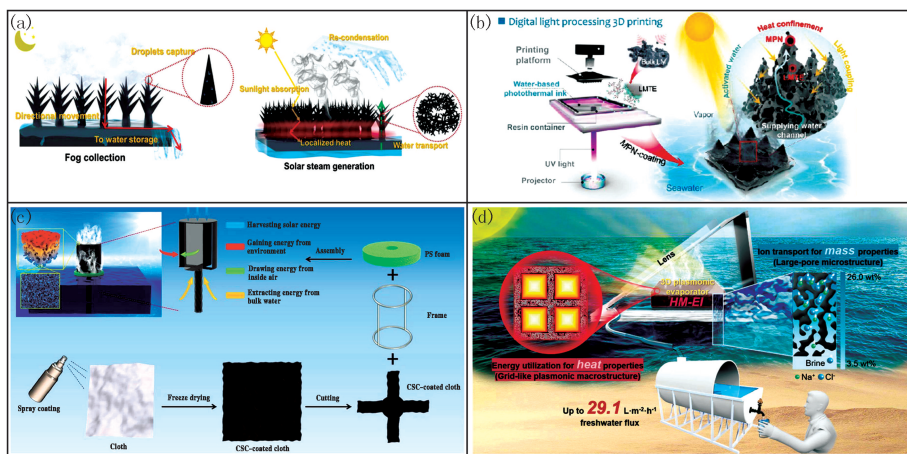


图8 PVA/PPy水凝胶^[102] (a)、锥形阵列水凝胶蒸发器^[103] (b)、三维镂空蒸发器^[104] (c)和3D打印水凝胶^[106] (d)

Fig. 8 PVA/PPy hydrogel^[102] (a), conical array hydrogel evaporator^[103] (b), 3D hollow evaporator^[104] (c) and 3D printed hydrogel^[106] (d)

4 水凝胶基水蒸发器的水蒸发焓

水凝胶由大量亲水高分子链构成,链上的亲水基团(如羟基、羧基、氨基等)可与水凝胶蒸发器中的水分子形成氢键,使其内部水分子表现为结合水、中间水和自由水三类状态.其中,处于中间态的水分子更易脱离束缚而蒸发.近年来的研究表明,提高中间态水分子的占比可有效降低整体蒸发焓,从而提高蒸发器的水蒸发速率.本节将介绍水凝胶中水的状态类型及其与蒸发焓降低的关系,并总结常用的蒸发焓测定方法及其适用性与局限性.

4.1 水凝胶基蒸发器中水的状态

ZHAO等^[88]在研究PVA水凝胶蒸发器的蒸发行为时发现,与纯水相比,PVA蒸发器的蒸发潜热显著降低,展现出大幅提升的蒸发速率.基于此,研究者提出,当水处于液态时,水分子通常以氢键相互作用为基础形成动态水团簇,并趋于维持较低能量的构型.在纯水环境中,这些团簇分布相对均匀.然而,当水分子进入水凝胶网络后,聚合物链上的亲水基团会与部分水分子形成氢键相互作用,从而改变其原有团簇结构,使水分子呈现三类不同状态.与高分子链形成强氢键作用被称为结合水,其被牢固束缚,不易参与蒸发过程.几乎不与高分子链发生相互作用的为自由水,其蒸发行为类似纯水.处于弱束缚状态、与聚合物链存在较弱氢键为中间水,其更易从水凝胶网络中逸出.蒸发过程中,中间水比自由水具有更低的脱离能垒,因此更容易从孔道逃逸进入空气,从而使水凝胶整体的蒸发焓降低.通过差示扫描量热(DSC)、拉曼光谱等表征方法可进一步验证水凝胶中水状态的差异,从而解释其蒸发焓降低的本质原因.

4.2 水蒸发焓的测定方法

4.2.1 DSC 测量水蒸发焓

利用DSC测量纯水和水凝胶中液态水转变为气态水的能量吸收过程,是研究水凝胶蒸发焓的重要手段之一.测试通常在蓝宝石热容量标定后进行,将纯水和水凝胶分别置于打开的铝坩埚中,在氮气保护($20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)、升温速率 $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下记录二者在 $30 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的热流变化,即可得到纯水和水凝胶中水的热容值.典型结果表明,纯水的DSC曲线出现尖锐峰,对应水的快速汽化过程^[88].而水凝胶的DSC曲线往往出现宽峰,热流逐渐衰减,反映其内部水分子受到高分子网络影响处于不同状态,因而呈现渐进式蒸发行为.值得注意的是,通过DSC完全脱水所得的蒸发焓通常高于界面蒸发实验中的有效蒸发焓,这是因为水凝胶蒸发器在工作过程中不会完全失水,而是保持动态补水状态.因此,DSC更适用于定性比较水凝胶与纯水的蒸发行为差异,而非提供现实情况下的绝对蒸发焓值.

4.2.2 拉曼光谱分析

拉曼光谱可用于区分水凝胶中水分子的氢键状态,一般在 $3000 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 处出现宽峰,通过拟合可

分解为4个主要子峰.在 $3\ 230\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰对应具有4个氢键的水分子,即两个质子和两个电子对参与氢键作用,为自由水.而位于 $3\ 510\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 630\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰则是由于水分子的对称和不对称伸缩引起的,对应形成弱氢键的中间水^[11,109].通过峰面积比例可估算中间水和自由水的相对含量,为解释蒸发焓降低提供直接证据.然而,拉曼光谱仅能表征水凝胶内中间水和自由水的比例,无法给出绝对蒸发焓值,因此需与实际蒸发实验或DSC测量结合使用.

4.2.3 饱和碳酸钾法测定等效水蒸发焓

ZHOU等^[68]提出通过在饱和碳酸钾环境下比较纯水与水凝胶的蒸发速率,推算水凝胶的等效蒸发焓.其将水合后的水凝胶薄片与纯水分别置于盛有饱和碳酸钾溶液的密闭容器中,并调控水凝胶薄片的暴露面积与纯水的气-液界面面积一致.该密闭容器被放置在 $25\ ^\circ\text{C}$ 的黑暗环境中,其内部相对湿度稳定约维持在45%.达到稳态后,通过测量纯水和水凝胶的质量变化,可依据下式计算水凝胶的等效蒸发焓: $U_{\text{in}} = E_w \times m_w = E_h \times m_h$,其中, U_{in} 为环境输入能量, m_w 和 E_w 分别是纯水的质量变化和蒸发焓, m_h 和 E_h 分别是水凝胶的质量变化和等效蒸发焓.该方法是基于环境对纯水和水凝胶的能量输入相同的关键假设.因此,已知纯水在 $25\ ^\circ\text{C}$ 下蒸发焓的前提下,通过比较二者的蒸发速率即可推算水凝胶的等效蒸发焓.值得注意的是,ZHENG团队^[110]通过实验发现,在恒温恒湿的密闭容器中,水凝胶表面温度通常低于纯水表面温度,意味着水凝胶实际接收到的环境能量高于纯水.此外,由于水凝胶孔道中的液体存在凹液面,其实际蒸发界面面积往往较大,进一步使所得等效蒸发焓被低估,无法准确反映水凝胶的真实蒸发焓.因此,发展更加准确、高效、可量化的水凝胶蒸发焓测定方法仍是未来的研究重点之一.

5 总结与展望

水凝胶基太阳能驱动水蒸发体系凭借其优异的亲水性、可设计的网络结构以及高度可调的物理化学特性,在界面蒸发应用中表现出独特优势.水凝胶中亲水性高分子链上丰富的官能团可通过与水分子的界面相互作用,调节水分子的结合状态,从而显著降低蒸发焓.与此同时,水凝胶体系具备良好的成型适应性,可通过多尺度结构设计实现光捕获增强、水输运速率提升、力学性能提高及耐盐性能改善,从而在高蒸发速率、高能量利用效率和长期运行稳定性之间实现有效平衡,为高效、可持续的太阳能蒸发海水淡化应用提供了新型材料平台.然而,水凝胶基蒸发器仍面临一些关键挑战,包括水输运速率与蒸发速率不匹配、能量利用效率不足、抗污抗菌能力欠缺以及工程化适配性仍需提升等.未来,为进一步推动水凝胶基蒸发器的性能突破与实际应用,可从以下几个方向展开研究:

(1)未来研究应聚焦于开发兼具低蒸发焓、低水含量、优异隔热特性与高水输运能力的新型水凝胶基体材料,同时结合多尺度结构设计,进一步增强光吸收能力、降低热量损失、提高能量效率,从而推动水凝胶基蒸发器在蒸发速率与整体性能方面取得突破.

(2)在真实海水或复杂废水环境中,微生物滋生、油污沉积以及无机盐结垢等问题会导致输水通道堵塞、表面遮蔽和性能衰减,从而严重影响淡水产率与产水质量的可靠性.因此,未来有必要发展具备抗菌、防污、抗结垢与自清洁功能的水凝胶蒸发器,通过调控界面化学、构筑动态可恢复结构或引入主动清洁机制,以实现复杂水环境下的长期稳定运行.

(3)在实际工程应用中,水凝胶蒸发器通常需与密闭腔体及冷凝收集模块配套运行.然而,目前多数研究主要聚焦于界面蒸发材料端的性能提升,而对冷凝阶段的潜热回收、冷凝行为调控以及光学损失管理关注不足,导致系统整体能量利用率提升受限.未来亟需从蒸发-冷凝全过程的协同优化出发,通过促进蒸汽高效逸散、加速冷凝水滴成核与脱附、提升冷凝潜热回收效率,并抑制蒸汽和冷凝水富集所造成的光散射与折射损失,以实现太阳能蒸发装置在光-热-水转换效率上的系统级提升.

(4)水凝胶材料在分子结构调控、界面化学设计及宏观形貌构筑方面均具有高度可设计性,为多功能耦合提供了广阔空间.未来可进一步探索将太阳能驱动界面蒸发与光催化污染物降解、湿气发电、大气水收集、辐射冷却等过程进行集成,构建多功能协同的复合系统,拓展水凝胶基蒸发器在清洁能源生产、环境净化及资源循环利用等领域的应用潜力.

参 考 文 献

- [1] LORD J, THOMAS A, TREAT N, et al. Global potential for harvesting drinking water from air using solar energy[J]. *Nature*, 2021, 598(7882): 611-617.
- [2] ZHANG W, CHEN Y Z, JI Q H, et al. Assessing global drinking water potential from electricity-free solar water evaporation device[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 6784.
- [3] GUO P H, LI T T, WANG Y, et al. Energy and exergy analysis of a spray-evaporation multi-effect distillation desalination system[J]. *Desalination*, 2021, 500: 114890.
- [4] GUAN K C, FANG S, ZHOU S Y, et al. Thin film composite membrane with improved permeance for reverse osmosis and organic solvent reverse osmosis[J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 688: 122104.
- [5] TAO P, NI G, SONG C Y, et al. Solar-driven interfacial evaporation[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(12): 1031-1041.
- [6] WU J, QU J, YIN G, et al. Omnidirectionally irradiated three-dimensional molybdenum disulfide decorated hydrothermal pinecone evaporator for solar-thermal evaporation and photocatalytic degradation of wastewaters[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 637: 477-488.
- [7] FAN H Q, GAO A L, ZHANG G F, et al. A design of bifunctional photothermal layer on polysulfone membrane with enclosed cellular-like structure for efficient solar steam generation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 415: 128798.
- [8] WANG Z X, WU X C, HE F, et al. Confinement capillarity of thin coating for boosting solar-driven water evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(22): 2011114.
- [9] WEI D, WANG C B, ZHANG J, et al. Water activation in solar-powered vapor generation[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(47): e2212100.
- [10] PU L, MA H J, DONG J C, et al. Xylem-inspired polyimide/MXene aerogels with radial lamellar architectures for highly sensitive strain detection and efficient solar steam generation[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(11): 4560-4568.
- [11] TIAN Y K, SONG R, LI Y J, et al. Biomimetic structural design of fabric for low-cost, scalable, and highly efficient off-grid solar-driven water purification[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(19): 2309470.
- [12] ZOU Y, YANG P, YANG L, et al. Boosting solar steam generation by photothermal enhanced polydopamine/wood composites[J]. *Polymer*, 2021, 217: 123464.
- [13] GAO M M, ZHU L L, PEH C K, 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.
- [14] ZHOU L, TAN Y L, WANG J Y, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 393-398.
- [15] CHANG C, YANG C, LIU Y M, et al. Efficient solar-thermal energy harvest driven by interfacial plasmonic heating-assisted evaporation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(35): 23412-23418.
- [16] HONG J, KIM Y. Photothermal water evaporation by hydrophilic/hydrophobic PDMS sponge containing gold nanorods under UV, visible, and infrared irradiation[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 682: 132930.
- [17] SHI Y Y, ZHANG C F, WANG Y H, et al. Plasmonic silver nanoparticles embedded in flexible three-dimensional carbonized melamine foam with enhanced solar-driven water evaporation[J]. *Desalination*, 2021, 507: 115038.
- [18] ZHANG M, XU W H, LI M F, et al. In situ reduction of silver nanoparticles on chitosan hybrid copper phosphate nanoflowers for highly efficient plasmonic solar-driven interfacial water evaporation[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18(1): 30-39.
- [19] DUAN H Y, WANG M X, ZHANG Z W, et al. Biomass-derived photothermal carbon aerogel for efficient solar-driven seawater desalination[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(2): 109295.
- [20] YANG S D, HE Y S, BAI J W, et al. Synergistic dual-mechanism localized heat channeling and spectrum-tailored liquid metal hydrogels for efficient solar water evaporation and desalination[J]. *Small*, 2023, 19(43): e2302526.
- [21] WEI Z C, WANG Y B, CAI C Y, et al. Dual-network liquid metal hydrogel with integrated solar-driven evaporation, multi-sensory applications, and electricity generation via enhanced light absorption and Bénard-Marangoni effect[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(41): 2206287.
- [22] YANG M Q, TAN C F, LU W H, et al. Spectrum tailored defective 2D semiconductor nanosheets aerogel for full-spectrum-driven photothermal water evaporation and photochemical degradation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(43): 2004460.
- [23] ZHANG H P, WANG Y, LIU Y G, et al. Efficient solar evaporation by $[\text{Ni}(\text{phen})_3][\text{V}_{14}\text{O}_{34}\text{Cl}]$ Cl hybrid semiconductor confined in mesoporous glass[J]. *ChemSusChem*, 2020, 13(11): 2945-2951.
- [24] WANG T X, GAO S Y, WANG G, et al. Three-dimensional hierarchical oxygen vacancy-rich WO_3 -decorated Ni foam evaporator for high-efficiency solar-driven interfacial steam generation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 602: 767-777.
- [25] HUANG W, SU P W, CAO Y, et al. Three-dimensional hierarchical Cu_xS -based evaporator for high-efficiency multifunctional solar distillation[J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104465.
- [26] ZHENG H T, FAN J H, CHEN A Y, et al. Enhancing solar-driven water purification by multiscale biomimetic evaporators featuring lamellar MoS_2/GO heterojunctions[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(4): 3115-3124.
- [27] HU Y J, MA H Y, WU M M, et al. A reconfigurable and magnetically responsive assembly for dynamic solar steam generation[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4335.
- [28] YANG B, ZHANG Z M, LIU P T, et al. Flatband $\lambda\text{-Ti}_3\text{O}_5$ towards extraordinary solar steam generation[J]. *Nature*, 2023, 622(7983): 499-506.
- [29] CHAO W X, LI Y D, SUN X H, et al. Enhanced wood-derived photothermal evaporation system by in situ incorporated lignin carbon quantum dots[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405: 126703.
- [30] HUANG H, ZHAO L, YU Q, et al. Flexible and highly efficient bilayer photothermal paper for water desalination and purification; self-

- floating, rapid water transport, and localized heat[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(9): 11204-11213.
- [31] KONG Y, GAO Y, GAO B Y, et al. Tubular polypyrrole enhanced elastomeric biomass foam as a portable interfacial evaporator for efficient self-desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 445: 136701.
- [32] HU J J, PAZUKI M M, LI R X, et al. Biomimetic design of breathable 2D photothermal fabric with three-layered structure for efficient four-plane evaporation of seawater[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(14): e2420482.
- [33] CHEN L, REN J X, GONG J, et al. Cost-effective, scalable fabrication of self-floating xerogel foam for simultaneous photothermal water evaporation and thermoelectric power generation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140383.
- [34] LIU Y, LIU H J, XIONG J, et al. Bioinspired design of electrospun nanofiber based aerogel for efficient and cost-effective solar vapor generation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131539.
- [35] ZHANG P P, LI J, LV L X, et al. Vertically aligned graphene sheets membrane for highly efficient solar thermal generation of clean water[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 5087-5093.
- [36] XIE Z J, ZHU J T, ZHANG L B. Three-dimensionally structured polypyrrole-coated *Setaria viridis* spike composites for efficient solar steam generation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(7): 9027-9035.
- [37] QI D P, LIU Y, LIU Y B, et al. Polymeric membranes with selective solution-diffusion for intercepting volatile organic compounds during solar-driven water remediation[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(50): e2004401.
- [38] SHU L, ZHANG X F, WANG Z G, et al. Cellulose-based bi-layer hydrogel evaporator with a low evaporation enthalpy for efficient solar desalination[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 327: 121695.
- [39] LI X P, LI X F, LI H G, et al. Reshapable MXene/graphene oxide/polyaniline plastic hybrids with patternable surfaces for highly efficient solar-driven water purification[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(15): 2110636.
- [40] PENG Y B, WEI X, WANG Y J, et al. Metal-organic framework composite photothermal membrane for removal of high-concentration volatile organic compounds from water via molecular sieving[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(5): 8329-8337.
- [41] ZHAO Q, LIU J Y, WU Z X, et al. Robust PEDOT:PSS-based hydrogel for highly efficient interfacial solar water purification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 442: 136284.
- [42] FAN J C, LI H R, TANG S S, et al. Compensation strategy for constructing high-performance aerogels using acrylamide-assisted vacuum drying and their use as water-induced electrical generators[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139685.
- [43] XU R Q, CUI H Z, SUN K Y, et al. Controllable 3D interconnected featured pore structure of transition metal borides-carbonitride/MoS₂ for efficiently solar evaporation and wastewater purification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137275.
- [44] WANG C, PAN J, LYU F C, et al. Electroconductive high-entropy metallic oxide ceramic composites with outstanding water evaporation ability and biocompatibility[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2024, 7(4): 109.
- [45] FU J N, LI Z, LI X, et al. Hierarchical porous metallic glass with strong broadband absorption and photothermal conversion performance for solar steam generation[J]. *Nano Energy*, 2023, 106: 108019.
- [46] SHI L, SHI Y, ZHUO S F, et al. Multi-functional 3D honeycomb ceramic plate for clean water production by heterogeneous photo-Fenton reaction and solar-driven water evaporation[J]. *Nano Energy*, 2019, 60: 222-230.
- [47] YAO H Z, ZHANG P P, YANG C, et al. Janus-interface engineering boosting solar steam towards high-efficiency water collection[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(10): 5330-5338.
- [48] ZHOU Q X, LI H, LI D D, et al. A graphene assembled porous fiber-based Janus membrane for highly effective solar steam generation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 592: 77-86.
- [49] KONG Y, DAN H B, KONG W J, et al. Self-floating maize straw/graphene aerogel synthesis based on microbubble and ice crystal templates for efficient solar-driven interfacial water evaporation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(46): 24734-24742.
- [50] SUN Y, YI F, LI R H, et al. Inorganic-organic hybrid membrane based on pillararene-intercalated MXene nanosheets for efficient water purification[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(14): e202200482.
- [51] ZHANG B P, WONG P W, AN A K. Photothermally enabled MXene hydrogel membrane with integrated solar-driven evaporation and photodegradation for efficient water purification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 133054.
- [52] LI W, LI X F, CHANG W, et al. Vertically aligned reduced graphene oxide/Ti₃C₂T_x MXene hybrid hydrogel for highly efficient solar steam generation[J]. *Nano Research*, 2020, 13(11): 3048-3056.
- [53] LI X P, LI X F, LI H G, et al. 2D ferrous ion-crosslinked Ti₃C₂T_x MXene aerogel evaporators for efficient solar steam generation[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2021, 5(12): 2100263.
- [54] POCKMAN W T, SPERRY J S, OLEARY J W. Sustained and significant negative water pressure in xylem[J]. *Nature*, 1995, 378(6558): 715-716.
- [55] BRODERSEN C R, RODDY A B, WASON J W, et al. Functional status of xylem through time[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2019, 70: 407-433.
- [56] NOVICK K A, FICKLIN D L, BALDOCCHI D, et al. Confronting the water potential information gap[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(3): 158-164.
- [57] GHAFURIAN M M, NIAZMAND H, EBRAHIMIA-BAJESTAN E, et al. Wood surface treatment techniques for enhanced solar steam generation[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 2308-2315.
- [58] WU J, ZHANG T T, QU J, et al. Hydrothermally modified 3D porous loofah sponges with MoS₂ sheets and carbon particles for efficient solar steam generation and seawater desalination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(24): 29457-29467.
- [59] LU Y, FAN D Q, SHEN Z Y, et al. Design and performance boost of a MOF-functionalized-wood solar evaporator through tuning the hydrogen-bonding interactions[J]. *Nano Energy*, 2022, 95: 107016.
- [60] SUN Z Z, LI W Z, SONG W L, et al. A high-efficiency solar desalination evaporator composite of corn stalk, Mcnts and TiO₂: ultra-fast capillary water moisture transportation and porous bio-tissue multi-layer filtration[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(1): 349-357.
- [61] CHEN Y D, GU D X, ZHAO Y J, et al. A Fe-Ni-MOF-74@bamboo photothermal evaporator for efficient solar steam generation[J]. *De-*

salination, 2024, 570: 117091.

- [62] WU Y T, KONG R, MA C L, et al. Simulation-guided design of bamboo leaf-derived carbon-based high-efficiency evaporator for solar-driven interface water evaporation[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2022, 5(4): 1323-1331.
- [63] XU N, HU X Z, XU W C, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(28): 1606762.
- [64] SU X, HAO D Z, SUN M Y, et al. Nature sunflower stalk pith with zwitterionic hydrogel coating for highly efficient and sustainable solar evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(6): 2108135.
- [65] DENG J Y, XIAO S N, WANG B, et al. Self-suspended photothermal microreactor for water desalination and integrated volatile organic compound removal[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(46): 51537-51545.
- [66] JIN Y, HAO G Y, HAMMOND W M, et al. Aridity-dependent sequence of water potentials for stomatal closure and hydraulic dysfunctions in woody plants[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(7): 2030-2040.
- [67] YUE Y Y, WANG Y, BAI Y, et al. A loofah-based all-day-round solar evaporator with phenolic lignin as the light-absorbing material for a highly efficient photothermal conversion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 477: 147298.
- [68] ZHOU X Y, ZHAO F, GUO Y H, et al. A hydrogel-based antifouling solar evaporator for highly efficient water desalination[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(8): 1985-1992.
- [69] ZHANG P P, LIU F, LIAO Q H, et al. A microstructured graphene/poly(N-isopropylacrylamide) membrane for intelligent solar water evaporation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(50): 16343-16347.
- [70] WU J F, CUI Z W, YU Y, et al. Multifunctional solar evaporator with adjustable island structure improves performance and salt discharge capacity of desalination[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(35): 2305523.
- [71] MA W J, LU T, CAO W X, et al. Bioinspired nanofibrous aerogel with vertically aligned channels for efficient water purification and salt-rejecting solar desalination[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(23): 2214157.
- [72] XIA M, CAI D, FENG J B, et al. Biomimetic hygroscopic fibrous membrane with hierarchically porous structure for rapid atmospheric water harvesting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(26): 2214813.
- [73] MA C, LIU Q L, PENG Q Q, et al. Biomimetic hybridization of Janus-like graphene oxide into hierarchical porous hydrogels for improved mechanical properties and efficient solar desalination devices[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(12): 19877-19887.
- [74] LI H, SUN J, QIN S L, et al. Zwitterion functionalized graphene oxide/polyacrylamide/polyacrylic acid hydrogels with photothermal conversion and antibacterial properties for highly efficient uranium extraction from seawater[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(32): 2301773.
- [75] LIU C K, PENG Y, ZHAO X Z. Flower-inspired bionic sodium alginate hydrogel evaporator enhancing solar desalination performance[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 273: 118536.
- [76] ZHAO Y J, YOU D Y, CHEN Y D, et al. Highly efficient 3D evaporator for interfacial solar steam generation and wastewater treatment[J]. *Energy Technology*, 2024, 12(1): 2300586.
- [77] XIAO J X, GUO Y, LUO W Q, et al. A scalable, cost-effective and salt-rejecting MoS₂/SA@melamine foam for continuous solar steam generation[J]. *Nano Energy*, 2021, 87: 106213.
- [78] LU H L, LI M, WANG X Y, et al. Recyclable physical hydrogels as durable and efficient solar-driven evaporators[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 138257.
- [79] YING L R, LIANG F, HUANG Z, et al. Self-floating gelatin aerogel integrated urchin-like MoS₂/Mo₅N₆/C with hybrid photothermal enhancement for salt-resistant solar desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 474: 145709.
- [80] MA X, LI Z Y, DENG Z, et al. Efficiently cogenerating drinkable water and electricity from seawater via flexible MOF nanorod arrays[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(14): 9048-9055.
- [81] XU Y L, XIAO X, FAN X F, et al. Low cost, facile, environmentally friendly all biomass-based squid ink-starch hydrogel for efficient solar-steam generation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(45): 24108-24116.
- [82] DONG X Y, GUO X, LIU Q Y, et al. Strong and tough conductive organo-hydrogels via freeze-casting assisted solution substitution[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(31): 2203610.
- [83] ZHANG H M, SHEN X, KIM E, et al. Integrated water and thermal managements in bioinspired hierarchical MXene aerogels for highly efficient solar-powered water evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(19): 2111794.
- [84] ZHANG P P, ZHAO F, SHI W, et al. Super water-extracting gels for solar-powered volatile organic compounds management in the hydrological cycle[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(12): 2110548.
- [85] YU J Y, YUN J H, ZANG S, et al. Hydrogel fiber fabric combining rapid water transport, thermal localization, and large-scale production for ultra-high salt-resistant solar desalination[J]. *Nano Energy*, 2023, 117: 108847.
- [86] ZHANG T T, YANG J, YANG Y F, et al. Deformation-resistant sponge-like hydrogel evaporators for efficient solar steam generation and high salinity desalination[J]. *Desalination*, 2025, 602: 118599.
- [87] REN H H, HU J J, PAZUKI M M, et al. 2D cotton fabric coated with 3D chitosan/carbon-black aerogel for continuous efficient solar desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 514: 163276.
- [88] ZHAO F, ZHOU X Y, SHI Y, et al. Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(6): 489-495.
- [89] SUN J J, NI F, GU J C, et al. Entangled mesh hydrogels with macroporous topologies via cryogelation for rapid atmospheric water harvesting[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(27): 2314175.
- [90] XU X H, OZDEN S, BIZMARK N, et al. A bioinspired elastic hydrogel for solar-driven water purification[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(18): 2007833.
- [91] 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.
- [92] WANG W, WANG Y, ZHENG J, et al. A vasculature hydrogel combined with Prussian blue for solar-driven vapor generation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(23):12608-12615.
- [93] HUANG P, HUANG C, SUN Y X, et al. Bio-inspired magnetically induced self-assembling Janus solar evaporator with antifouling and antiscaling properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 501:157824.
- [94] WANG H, ZHANG R J, YUAN D, et al. Gas foaming guided fabrication of 3D porous plasmonic nanoplatform with broadband absorption, tunable shape, excellent stability, and high photothermal efficiency for solar water purification[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(46):2003995.
- [95] GUO Y H, DE VASCONCELOS L S, MANOHAR N, et al. Highly elastic interconnected porous hydrogels through self-assembled templating for solar water purification[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(3):e202114074.
- [96] LIU X H, CHEN F X, LI Y K, et al. 3D hydrogel evaporator with vertical radiant vessels breaking the trade-off between thermal localization and salt resistance for solar desalination of high-salinity[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(36):2203137.
- [97] LIU P, HU Y B, LI X Y, et al. Enhanced solar evaporation using a scalable MoS₂-based hydrogel for highly efficient solar desalination[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(37):e202208587.
- [98] QIU Y H, ZHOU Z R, ZHANG C Y, et al. Confined shape-morphing and dual hydration modes for efficient solar steam generation[J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(10):3476-3483.
- [99] GUO Y H, ZHAO F, ZHOU X Y, et al. Tailoring nanoscale surface topography of hydrogel for efficient solar vapor generation[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(4):2530-2536.
- [100] LU Y, FAN D Q, WANG Y D, et al. Surface patterning of two-dimensional nanostructure-embedded photothermal hydrogels for high-yield solar steam generation[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(6):10366-10376.
- [101] GUO Y H, ZHAO X, ZHAO F, et al. Tailoring surface wetting states for ultrafast solar-driven water evaporation[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(7):2087-2095.
- [102] SHI Y, ILIC O, ATWATER H A, et al. All-day fresh water harvesting by microstructured hydrogel membranes[J]. *Nature Communications*, 2021, 12:2797.
- [103] YANG S D, ZHANG H, SUN X, et al. 3D-printed liquid metal-in-hydrogel solar evaporator: merging spectrum-manipulated micro-nano architecture and surface engineering for solar desalination[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(7):5847-5863.
- [104] CHEN Y Q, WANG Y D, XU J, et al. A 3D opened hollow photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation[J]. *Solar RRL*, 2022, 6(7):2200202.
- [105] YANG H, SUN Y H, PENG M W, et al. Tailoring the salt transport flux of solar evaporators for a highly effective salt-resistant desalination with high productivity[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2):2511-2520.
- [106] YANG H, LI D, ZHENG X D, et al. High freshwater flux solar desalination via a 3D plasmonic evaporator with an efficient heat-mass evaporation interface[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(47):2304699.
- [107] LI H N, YANG H C, ZHU C Y, et al. A self-descaling Janus nanofibrous evaporator enabled by a "moving interface" for durable solar-driven desalination of hypersaline water[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(39):20856-20865.
- [108] ZHANG X, CONG H B, MA L, et al. Jellyfish-inspired sustainable and facile porous zwitterionic hydrogel sponge for efficient solar thermal desalination and water purification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 487:150754.
- [109] LEI C X, GUAN W X, GUO Y H, et al. Polyzwitterionic hydrogels for highly efficient high salinity solar desalination[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(36):e202208487.
- [110] CARATENUTO A, ZHENG Y. Critical assessment of water enthalpy characterization through dark environment evaporation[J]. *Science Advances*, 2024, 10(38):eadn6368.

Research advances in hydrogel-based solar-driven interfacial evaporators

Yu Zhongzhen, Li Changjun, Li Xiaofeng, Liu Ji

(College of Materials Science and Engineering, State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Solar-driven interfacial evaporation technology has emerged as a promising approach to alleviate the global freshwater scarcity due to its sustainability, low cost, and high applicability in remote and off-grid areas. Among the diverse material candidates for fabricating solar-driven interfacial evaporators, hydrogels have attracted significant attention owing to the combination of their intrinsic hydrophilicity, designable network structures, and highly tunable properties. This review systematically summarizes recent progress in hydrogel-based solar-driven interfacial evaporators, emphasizing methods, structural design strategies, and mechanisms for performance enhancement. Finally, the challenges and future research directions for advancing high-performance hydrogel-based evaporators are discussed.

Keywords: solar-thermal conversion; hydrogel; interfacial evaporation; seawater desalination