

• 综述 •

低蒸发焓水凝胶用于太阳能驱动水净化

任佳欣¹, 陈玲¹, 龚江¹, 瞿金平^{1,2}, 牛冉^{1,2*}

(1. 能量转换与存储教育部重点实验室, 生物医用与防护材料湖北省工程研究中心, 华中科技大学化学与化工学院, 武汉 430074; 2. 广东省高分子先进制造技术及装备重点实验室, 汽车与机械工程学院(华南理工大学), 广州 510641)

摘要: 日益严重的水资源短缺和水体污染引发了人们对先进水净化技术的研究兴趣。太阳能驱动的界面蒸发利用清洁的太阳能来分离水和杂质, 被认为是解决缺水 and 污染最环保、经济的技术。低蒸发焓水凝胶基光热转换材料由于其高蒸发速率、可加工性、可控性和多功能性, 成为最有潜力的太阳能蒸发器材料。首先, 本综述回顾了水凝胶的关键概念, 这些概念证明了其在太阳能驱动的界面蒸发系统中的优势, 如快速水传输和低蒸发焓; 其次, 总结了水凝胶的制备方法包括引入的光热材料以及水凝胶的设计策略, 以提高水凝胶的整体性能。水凝胶蒸发器的多种功能在抗盐、光降解、杀菌和发电等方面得到了扩展。基于水凝胶的上述优势, 本综述进一步提出了适用于实际使用环境的水凝胶蒸发器的设计概念和策略。

关键词: 太阳能界面蒸发; 水凝胶; 低蒸发焓; 设计原则

Low Vaporization Enthalpy Hydrogels for Solar Water Purification

REN Jia-xin¹, CHEN Ling¹, GONG Jiang¹, QU Jin-ping^{1,2}, NIU Ran^{1,2*}

(1. *Key Laboratory of Material Chemistry for Energy Conversion and Storage, Ministry of Education, Hubei Engineering Research Center for Biomaterials and Medical Protective Materials, School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;*
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Technique and Equipment for Macromolecular Advanced Manufacturing, School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

Abstract: Increasing concerns over water scarcity and pollution leads to growing research interest in advanced water purification technologies. Solar-driven interfacial evaporation, which is driven by clean solar energy for separation of water and impurities, has been considered the most eco-friendly and cost-effective technology to solve water shortage and pollution. Hydrogel-based materials with low evaporation enthalpy outperform most of other potential materials for photothermal conversion due to their breakthrough evaporation rates, processability, controllability and versatility. In this review, we first review the key concepts of hydrogels that show benefits in solar-driven interfacial evaporation systems, including water transport and low evaporation enthalpy. Secondly, we present the fabrication methods of hydrogel evaporators, the incorporated light absorbers, as well as the design strategies of micro/nanostructures for overall hydrogel performance enhancement. Finally, some of the multiple functions of hydrogel evaporators are introduced, such as salt-blocking, photo-degradation, sterilization, and electricity generation. Considering the benefits of the above hydrogel mechanisms and technologies, we further propose design concepts for hydrogel evaporators required in practical applications.

Keywords: Solar-driven interfacial evaporation; Hydrogel; Low vaporization; Design principle

收稿: 2023-05-29; 修回: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(2021XXJS036, 3004013134)和广东省高分子先进制造技术及装备重点实验室开放课题资金(2022kft03)

* 通讯联系人: 牛冉, E-mail: niuran@hust.edu.cn

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2023.11.003

水资源对人类生存和社会进步至关重要。世界卫生组织统计结果显示,全球每年有 32 亿人面临缺水问题,而每年有超过 4200 亿立方米的废水排入河流、湖泊和海洋,污染了 5.5 万亿立方米的淡水^[1]。传统的海水淡化技术如反渗透和多级闪蒸等,存在高成本和低效率的问题。而最近开发的太阳能净水技术主要采用清洁可再生的太阳能生产淡水并去除杂质,具有能量损失低、性能优异的优点。当前应用的太阳能净水技术主要包括底部、本体和界面加热三种方式。其中,底部和本体加热方式加热整个水体导致显著的热损失和低效率^[2]。然而,太阳能驱动的界面蒸发可以有效地防止由体积加热引起的大量能量损失,减少光热材料的使用并进一步提高蒸发性能。

如今,碳基材料^[3]、无机半导体^[4]、等离子体纳米颗粒^[5]和聚合物/水凝胶^[6]是太阳能驱动界面蒸发最常见的光热转换材料。其中一些材料仍然面临诸如稳定性不足、效率低和成本高等问题。具有三维交联网络结构的水凝胶材料已经广泛应用于界面太阳能净水。水凝胶可以通过改变分子网络结构的交联密度调节水在凝胶中的不同状态,包括游离水、结合水和中间水^[7]。水凝胶中间

态水含量增加,可以降低水的蒸发焓,提高蒸发速率。同时,在水凝胶中加入不同类型的光吸收剂(如有机填料和无机填料)会影响水凝胶的蒸发焓,这主要是因为水凝胶的结构很容易被破坏(图 1)。水凝胶的微纳结构也会通过影响水传输、光吸收、蒸发焓调节太阳能净水能力,如水蒸发速率和能量利用效率(图 1)。另外,水凝胶的流变特性使其适用于多种加工技术,包括 3D 打印^[8]、模板法^[9]等。由于综合了低成本和易于加工的优势,水凝胶蒸发器的多种功能如耐盐性^[10]、抗菌^[11]、热电转化^[12]和光催化降解^[13]已被广泛研究(图 1)。

1 太阳能驱动界面蒸发的机理

在太阳能驱动界面蒸发中,光吸收、光热转化、热管理、水传输和水蒸发的能量需求(蒸发焓)是影响蒸发器性能的关键因素。在这一部分我们主要介绍水凝胶中孔结构和蒸发焓增强蒸发性能的机理及调控手段。

1.1 毛细作用增强水传输

在水凝胶中聚合物链上的亲水基团,如羟基(—OH)、磺酸基(—SO₃H)、氨基(—NH₂)和羧基

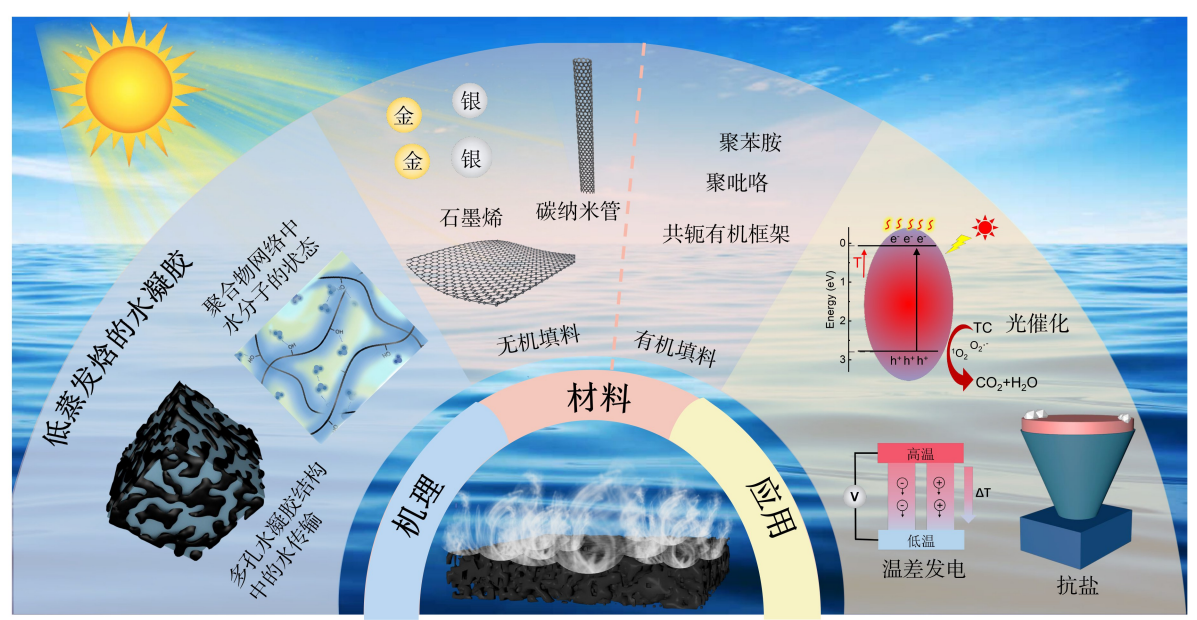


图 1 低蒸发焓水凝胶蒸发器的示意图。(1)低蒸发焓水凝胶的机理示意图,包括多孔结构中的水输运和聚合物网络中的水状态;(2)水凝胶中的无机和有机光吸收填料;(3)水凝胶在耐盐、抗菌、热电转化和光催化降解中的应用

Figure 1 Schematic drawing of low vaporization enthalpy hydrogel evaporators in solar-driven interfacial evaporation. (1) Schematic illustration of the mechanism of low vaporization enthalpy hydrogel including water transport in porous structures and water states in polymer networks; (2) Inorganic and organic fillers used as light absorbers in hydrogels; (3) Salt resistance, antibacterial, thermoelectric conversion and photocatalytic degradation applications of hydrogel evaporators.

(—COOH)使水凝胶具有亲水性^[14~16]。这些亲水性官能团可以通过氢键和静电作用与水分子非共价结合。由于氢键在蒸发过程中被破坏,水分子可以有效地动态转移补充。在水凝胶分子网络有效蒸发过程中,水分子主要通过内部间隙的毛细泵送和微米通道中的分支扩散实现动态运动和充足的水供应(图 2a 和 2b)^[17,18]。因为水凝胶是一种具有多孔结构的介质,所以通过多孔介质中的水移动模型对水传输进行模拟和计算,并由扩散曲折度(τ)解释^[19]:

$$\tau = \left(\frac{l}{l_0}\right)^2 = \left(\frac{x_0^2}{x^2}\right) \quad (1)$$

其中 l 是实际距离, l_0 是两个位置之间的最小直线路径。方程(1)的另一个说法为无孔介质($\overline{x_0^2}$)和多孔介质($\overline{x^2}$)中扩散颗粒的均方位移之比。 τ 为分子流过介质的难易程度,材料的几何性质和扩散性质对 τ 具有至关重要的影响。当与爱因斯坦的布朗运动方程相结合时,穿过多孔水凝胶的有效扩散系数 D_{gel} 可以表示为方程(2):

$$D_{\text{gel}} = D_{\text{sol}} \left(\frac{l}{l_0}\right)^2 \quad (2)$$

其中 D_{sol} 是水在本体溶液中的扩散系数。当水凝胶的浓度保持恒定时,孔隙率保持不变,此时控制水凝胶内部溶胀行为和水传输速率的是孔径^[20]。随着水凝胶孔径的增加,其曲折度减少,促使水更快地通过材料(图 2a)。为了进一步揭示水凝胶网络中的水传输特性,科研人员进行了数值模拟。COMSOL 模型中重叠的圆圈表示连接的孔洞,其中考虑了液态水和湿空气^[20]。在太阳光照射下,由于相互连通孔隙的存在,水被向上吸引并在顶部蒸发。由于孔隙的高度互连性,水和蒸汽的传输路径基本上是直的,只有最小的扩散障碍。然而,过量供水或大量通道与水接触将不可避免地造成热量损失,并导致蒸发效率降低。此外,水凝胶内的多孔结构也作为蒸发过程中绝热的气孔道,使水蒸发产生的蒸汽逃逸^[21],因此在太阳能蒸发器的设计中,平衡水的输送以及水含量至关重要。

1.2 水蒸发焓降低

蒸发焓是物质从液态转化为具有相同温度和压力的气态过程中吸收的热量。传统的水蒸发在很大程度上依赖于外部的热能输入,从而破坏水

分子之间的氢键。水蒸发的重要特征是水以分子簇(cluster)的形式从液态变为气态^[22]。当水分子被受限在聚合物网格中时它们倾向于由几个到几十个组成团簇的形式而非单个水分子的形式离开聚合物^[23]。当水以团簇形式蒸发时需要打开更少的氢键,因此需要更少的能量^[24]。

水凝胶作为一种含有亲水基团的聚合物网络,与水分子之间具有有效相互作用。在聚合物网络中,这种作用主要体现在不同状态水分子的存在,即自由水、中间水和结合水^[7]。通过强非共价作用力被聚合物链吸引并形成稳定氢键的水分子被称为“结合水”(BW)。而游离水(FW)不受聚合物强吸引作用力的影响,具有类似于本体水的性质,既不受束缚也不自由的水分子被称为中间水(IW)。因为与结合水产生较少的氢键,并且与自由水的分子簇也有较弱的吸引力,IW 具有较低的氢键能,蒸发所需的能量比游离水或结合水也更少。因此,IW 也被称为活化水^[25]。

中间态水需要较少的能量来蒸发也是水凝胶低蒸发焓的主要原因。亲水官能团的存在是水凝胶低蒸发焓的必要条件。水凝胶中中间水的含量可以通过改变水凝胶网络的密度来调节,从而有效调控蒸发焓。例如,当交联剂浓度恒定时,随着亲水基团含量和聚合物链密度的增加,中间水含量显著上升(图 2c)^[26];随着高分子链密度的降低,亲水基团的含量降低,中间水的比例下降(图 2d)。

2 制备用于界面光热转化的低蒸发焓水凝胶

水凝胶由于独特的低蒸发焓特点,已被广泛应用于太阳能海水淡化。传统的水凝胶包括聚乙烯醇(PVA)^[9]、聚丙烯酰胺(PAAm)^[29]、藻酸钠(SA)^[30]、壳聚糖(CS)^[31]等。这些水凝胶大多由具有亲水基团的聚合物组成,其中的亲水基团满足低蒸发焓要求。为了实现光热转化,水凝胶中需要引入具有高光吸收和光热转化效率的材料,主要包括无机填料和有机填料两类。本节总结最近开发的各種水凝胶光热转化材料,并讨论不同光吸收剂对水凝胶的影响以及高效光热转换材料的设计原则。

2.1 无机填料水凝胶

在水凝胶中用作光吸收填料的无机材料,包

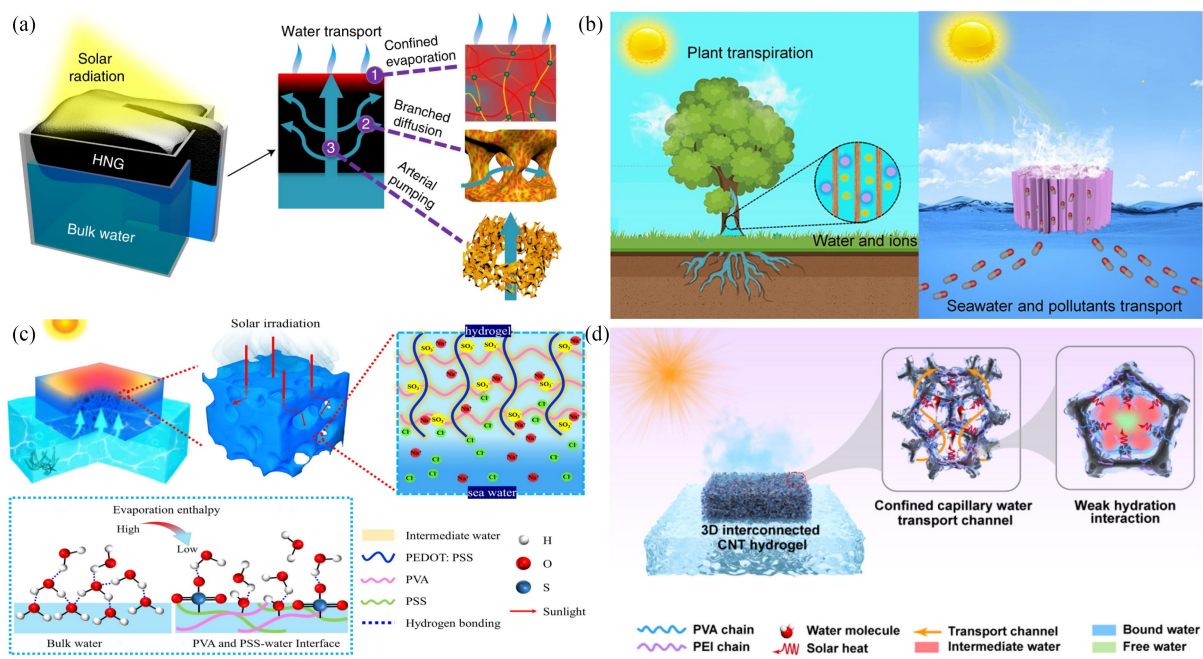


图 2 太阳能水蒸发过程中水凝胶内部的分级水传输和水状态。(a)水凝胶内部水传输的策略:内部间隙的主泵送、微米通道的分支扩散和分子网格的蒸发^[17](2018 Springer Nature 版权许可);(b)水凝胶的毛细作用加速水传输^[27](2022 American Chemical Society 版权许可);(c)水凝胶蒸发器中间水的产生^[26](2022 Elsevier 版权许可);(d)在 CNT 水凝胶蒸发器中的弱水合毛细水传输通道^[28](2022 Elsevier 版权许可)

Figure 2 The hierarchical water transport and water states inside hydrogel during solar water evaporation. (a) Internal water transport strategy of hydrogel: arterial pumping of the internal gap, branched diffusion of the micron channel, and confined evaporation of the molecular mesh (Reprinted with permission from Ref. [17]; Copyright 2018 Springer Nature); (b) Capillary pumping of hydrogels for rapid water transport in hydrogels (Reprinted with permission from Ref. [27]; Copyright 2022 American Chemical Society); (c) Formation of intermediate water in hydrogel evaporator (Reprinted with permission from Ref. [26]; Copyright 2022 Elsevier); (d) Weakly hydrated capillary water transport channels in a CNT hydrogel evaporator (Reprinted with permission from Ref. [28]; Copyright 2022 Elsevier)

括贵金属颗粒^[32]、无机半导体^[33]、碳材料^[11]、液态金属^[34]以及其他材料^[35],由于其突出的光吸收效果和简单的制备工艺,已在太阳能水净化中广泛应用。

碳基材料因成本低、宽光谱吸收的特点在水凝胶体系中具有显著吸引力。例如 Gong 等^[36]使用碳纳米管作为光吸收剂与 PVA 和木质素磺酸钠(SLS)混合制备了复合水凝胶蒸发器。由于 SLS 中有许多磺酸基和羟基,水凝胶和水分子之间的静电作用和氢键都得到了加强。此外, SLS 还改善了水凝胶的水合作用,并精确地改变了水分子的类型,这有利于水的蒸发焓显著降低($\sim 1525 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$)和蒸发速率加快($\sim 2.09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) (图 3a)。为促进高效太阳能海水淡化, Yang 等^[37]通过同时将 MXene 和 rGO 纳米片互穿到 PVA 和 CS 的网络中,制备了具有可控表面形貌

的 2D 纳米结构嵌入式复合水凝胶。PVA 和 CS 的 $-\text{OH}$ 和 $-\text{NH}_2$ 为降低水凝胶蒸发器的蒸发焓奠定了基础。该蒸发器的蒸发焓低达 $\sim 905 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 蒸发速率高达 $\sim 3.62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 3b)。Niu 课题组^[38]使用碳黑作为光吸收剂与 PVA 混合通过真空发泡技术制备了水凝胶泡沫蒸发器。所制备的三维(3D)蒸发器具有可控的形状和多孔结构,为快速供水和蒸汽逃逸提供了众多通道。通过将蒸发器与水体隔离,消除了蒸发器向本体水的热传导,从而极大地促进了光热汽化。由于这些优点,3D 蒸发器在 1 个标准太阳光辐照下达到 $3.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率,太阳能到蒸汽的转换效率为 95.6% (图 3c)。与碳基材料相比,金属和半导体材料具有微纳结构可控的优势,为水凝胶系统开辟了新的可能性。Tan 等^[34]探索了一种新型低共熔镓铝(EGaIn)/聚苯胺(PANi)复合

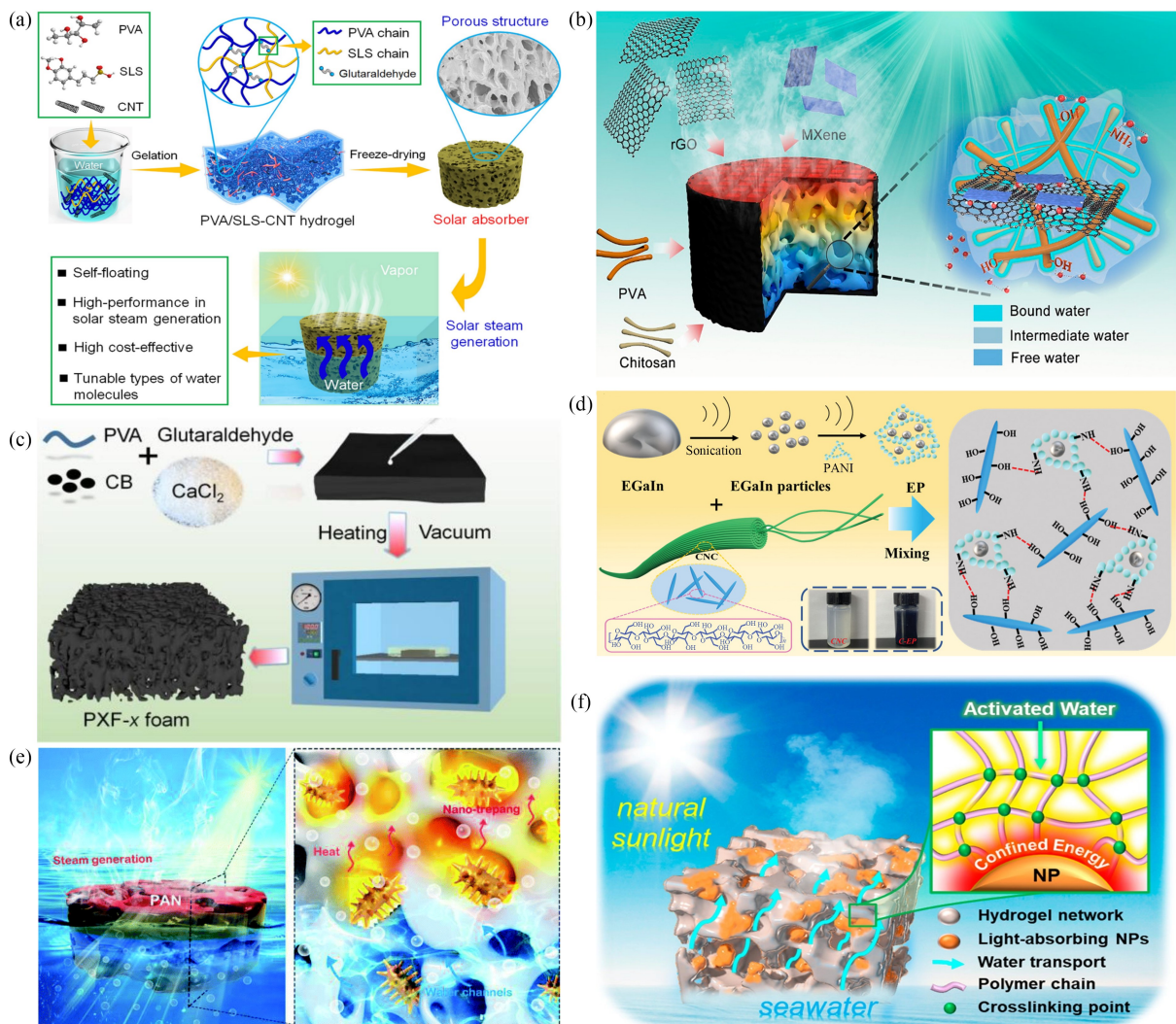


图3 无机填料水凝胶。(a)基于CNT光吸收剂的PVA/SLS水凝胶蒸发器^[36](2022 Elsevier 版权许可);(b)MXene/rGO 2D纳米结构嵌入的复合水凝胶^[37](2021 American Chemical Society 版权许可);(c)基于PVA/CB的自漂浮3D水凝胶^[38](2023 Elsevier 版权许可);(d)新型EGaIn/PANi作为双网络水凝胶蒸发器中的光吸收剂^[34](2022 John Wiley and Sons 版权许可);(e)将Au纳米粒子引入PVA水凝胶中形成分级结构的水凝胶蒸发器^[32](2012 The Royal Society of Chemistry 版权许可);(f)基于Ti₂O₃纳米颗粒的漂浮海绵状水凝胶蒸发器^[39](2019 American Chemical Society 版权许可)

Figure 3 Inorganic filler hydrogels. (a) PVA/SLS hydrogel evaporator based on CNT as light absorber (Reprinted with permission from Ref. [36]; Copyright 2022 Elsevier); (b) 2D nanostructure-embedded hybrid hydrogel based on MXene/rGO (Reprinted with permission from Ref. [37]; Copyright 2021 American Chemical Society); (c) The self-floating 3D hydrogel based on PVA/CB (Reprinted with permission from Ref. [38]; Copyright 2023 Elsevier); (d) Novel EGaIn/PANi as the light absorber in double network hydrogel evaporator (Reprinted with permission from Ref. [34]; Copyright 2022 John Wiley and Sons); (e) Au NPs incorporated into PVA hydrogels to form hydrogel evaporators of hierarchical structure (Reprinted with permission from Ref. [32]; Copyright 2012 The Royal Society of Chemistry); (f) Floating sponge-like hydrogel evaporator based on Ti₂O₃ nanoparticles (Reprinted with permission from Ref. [39]; Copyright 2019 American Chemical Society)

物光吸收剂,并用纤维素纳米晶体(CNCs)作为分散剂。为调节允许通过的热量,采用由双网络PVA/PAAm水凝胶和水/乙二醇溶剂组成的太

阳能蒸发器,其蒸发速率为 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由于设计的协同作用,该水凝胶还具有多重传感功能、类皮肤特性和产电的功能(图3d)。Lee等^[32]

制备了具有广谱吸光、不依赖聚集、多共振效应的光吸收体。通过改变纳米颗粒结构的各向异性和形态,他们制备了具有海胆结构的 Au 纳米粒子,其在整个太阳光谱中表现出优异的光吸收性能。最后,将海胆结构的 Au 纳米粒子添加到 PVA 溶液中,并通过化学交联产生分级结构的水凝胶蒸发器,该蒸发器蒸发速率为 $\sim 2.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 3e)。Yu 等^[39]首次提出了利用纳米级微小太阳能吸收体三氧化二钛(Ti_2O_3)纳米颗粒实现能量纳米受限和水活化协同的思路,即将热量限制在很少的水上。同时,亲水性聚合物的三维网络可以显著降低太阳能驱动的界面蒸发所需的能量,实现低蒸发焓($\sim 1553 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$)以及高蒸发速率($\sim 3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) (图 3f)。

此外,引入低成本的 Cu^[37] 和 Al^[5]、低毒的 Fe_3O_4 ^[40]、超吸收炭黑和其他材料也可以实现广泛的太阳能吸收、光热转换和太阳能驱动的界面蒸发。然而,由于无机太阳能吸收剂固有的疏水性,在水凝胶系统中添加无机光吸收剂时仍存在问题。根本问题是无机光吸收剂的分散性差,并且通过弱静电作用吸附在聚合物上,导致吸附剂与聚合物链的连接脆弱,并会被外部能量(如光照、外部机械力等)破坏,从而使水凝胶的蒸发焓不稳定,难以控制。因此,当无机材料作为光吸收剂加入水凝胶系统时,它们必须牢固地结合,以防止对水凝胶的蒸发焓产生影响。

2.2 有机填料水凝胶

除了上述无机填料外,有机共轭聚合物也经常被用作太阳能驱动界面蒸发中的太阳能吸收剂^[7]。由于 sp^2 杂化碳的共轭主链,共轭聚合物含有不同的能级和可变的带隙,从而产生与无机半导体相当的特性。目前,已经开发了多种方法来降低共轭聚合物的带隙并将主吸收峰红移到近红外区域,这可以有效地增强光吸收体对全光谱的响应性,提高光热转换效率。对于共轭聚合物,通常通过氧掺杂来调节带隙。此外,有机太阳能吸收剂与水凝胶网络具有更强的兼容性,从而提高了材料的可加工性。

Yu 等^[7]报道了在 PVA 和 CS 水凝胶体系中添加聚合吡咯(Py)单体,制备了具有水状态可调的光热转换水凝胶蒸发器。该工作首次提出了一种调节光热转换材料内水状态从而降低蒸发焓的策略,即通过调节 CS 的浓度有效控制蒸发焓。在

最优条件下,该蒸发器的蒸发焓低达 $\sim 881 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$,蒸发速率高达 $\sim 3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 4a)。Zhao 等^[41]利用冻干的聚(3,4-亚乙基二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)纳米纤维作为太阳能光吸收剂,并将其与含有戊二醛(GA)交联剂的 PVA 溶胶混合。PVA 链上羟基对 PEDOT:PSS 的二次掺杂导致材料内部连续的物理和化学交联并产生富含 PEDOT 半晶和 PVA 晶区的水凝胶网络结构。亲水性 PVA 和 PSS 可以有效地转移水分以补偿蒸发,使水凝胶具有高拉伸性和强稳健性,而富含 PEDOT 的区域显示出明显的光吸收和光热转换效果。研究表明,该水凝胶蒸发器具有宽光谱吸收($\sim 99.7\%$)、高蒸发速率($\sim 2.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、优异的能量效率($\sim 98.0\%$)和低蒸发焓($1238 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$) (图 4b)。Qian 等^[25]通过静电自组装将带相反电荷的聚(3-(甲基丙烯酰氨基)丙基三甲基氯化铵)和聚对苯乙烯磺酸钠组装为太阳能蒸发器,并在其中引入聚苯胺作为吸光剂实现光热转化(图 4c)。Thomas 等^[42]采用原位生长的策略制备了由共轭有机框架(COF)和石墨烯组成的有亲水和疏水区域的水凝胶蒸发器。通过对两个润湿区的精细调控,杂化水凝胶表现出优异的光吸收、最佳的含水量和低水蒸发能耗。当暴露在一个太阳辐照度下时,该水凝胶以约 $3.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率蒸发水,使其成为高效的太阳能蒸发器(图 4d)。

2.3 水凝胶蒸发器的制备

水凝胶是一种可塑性极强的材料,通过多种先进成熟的制造工艺,可以制备出结构相对可控的水凝胶蒸发器^[43]。水凝胶的可塑性在于它的前体是溶胶,可以通过多种方法成型,如化学交联、物理交联等。因此,水凝胶结构的可控性使我们能够通过多种加工方法有效地调节其微观结构,并最终达到所需的效果。

Cheng 等^[8]制备了适用于 3D 打印的 SA-CS/CB 油墨。在特定的印刷环境下,将具有交错拓扑结构的圆柱形结构印刷并浸泡在各种交联剂溶液中,得到具有分级结构的多孔 SA-CS/CB 水凝胶蒸发器。固定在 SA-CS 中的 CB 可以收集太阳辐射并将其转化为热能,用于加热水,表现出优异的光吸收,同时 SA-CS 中的分级多孔结构使蒸发器表现出超强的水传输。此外,水凝胶网络中含有丰富的 $-\text{COOH}$ 和 $-\text{OH}$,可以通过螯合或形成

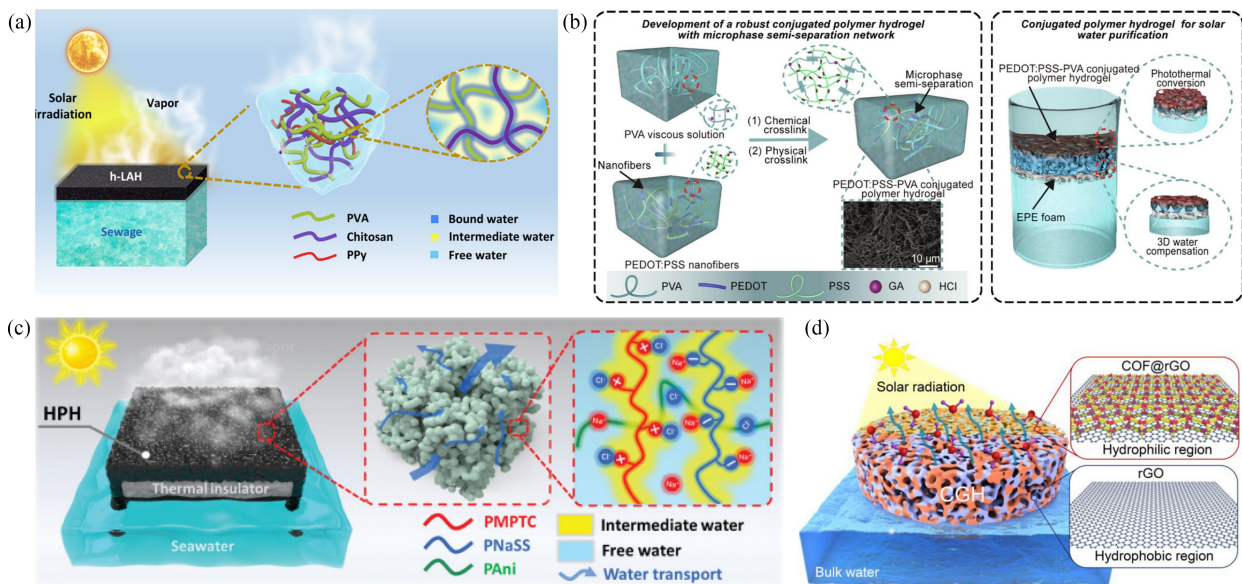


图 4 有机填料水凝胶:(a)将作为光吸收剂的 PPy 渗透到 PVA 和 CS 基体中而产生的水凝胶蒸发器^[7](2019 Creative Commons Attribution License (CCBY4.0 版权许可));(b)微相分离 PEDOT:PSS-PVA 水凝胶蒸发器^[41](2022 Elsevier 版权许可);(c)分层多孔聚离子复合物/聚苯胺水凝胶^[25](2014 The Royal Society of Chemistry 版权许可);(d)具有亲水和疏水区域的 COF/rGO 水凝胶蒸发器^[42](2022 American Chemical Society 版权许可)

Figure 4 Organic filler hydrogels: (a) a hydrogel evaporator created by infiltrating PPy as light absorber into a PVA and CS matrix (Reprinted with permission from Ref. [7]. Distributed under a Creative Commons Attribution License (CCBY4.0)); (b) Robust microphase semi-separated PEDOT:PSS-PVA hydrogel evaporator (Reprinted with permission from Ref. [41]; Copyright 2022 Elsevier); (c) Hierarchically porous polyion complex/polyaniline hydrogel (Reprinted with permission from Ref. [25]; Copyright 2014 The Royal Society of Chemistry); (d) Two-region COF/rGO hydrogel evaporator with hydrophilic and hydrophobic properties (Reprinted with permission from Ref. [42]; Copyright 2022 American Chemical Society)

氢键对大量有机污染物和金属离子进行稳定的吸收。基于这些优势,这种 3D 打印的水凝胶表现出约 $1.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发率和约 90.6% 的蒸发效率(图 5a)。受植物蒸腾作用启发,Niu 课题组^[27]通过定向冷冻干燥法制备了一种具有定向通道的 PVA/氮化碳/PPy 复合水凝胶蒸发器。竖直排列的微通道不仅有利于水从本体到蒸发器表面的快速输送,还有利于太阳光在内部的多重反射和吸收以实现最佳的光吸收和光热转化。因此,这种水凝胶蒸发可以达到 $2.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发率和约 92.5% 的能量效率(图 5b)。该方法制备的水凝胶结构可控性高,但是其成本高,不适用于大规模制备。Yu 等^[21]利用自组装模板法制备了一种具有低孔隙率、孔径大小可控、互连的水凝胶蒸发器。首先将聚甲基丙烯酸甲酯的牺牲微球置于包含聚合物骨架、交联剂和引发剂的溶液中。之后,在凝胶化过程中,牺牲微球自组装成密堆积的模板,并且相邻的微球间互相接触。最

后,在高温下进行快速地溶剂清洗以去除微球模板,得到具有连通孔的水凝胶蒸发器(图 5c)。该制备方法因为使用了有机溶剂和微球做牺牲模板,不环保且成本高,不适用于水凝胶的大规模制备。有别于上述两种方法,Niu 课题组利用霍夫迈斯特(Hofmeister)效应,通过冷冻辅助盐析的方法制备了分子和微孔结构可调的多孔水凝胶蒸发器^[12]。该方法操作简单、成本低,对多种水凝胶体系具有普适性,适用于水凝胶的大量制备。相互连接的多孔结构赋予水凝胶可调节的水传输速率和出色的脱盐性能,而 PVA 可变的结晶度使水凝胶具有可调的水状态。得益于这些特性,水凝胶显示出 $3.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率和 97.2% 的能量效率(图 5d)。

3 低蒸发焓水凝胶蒸发器的多种应用

3.1 阻隔盐分

含有高达 30% 盐分的高盐废水是现代工业的

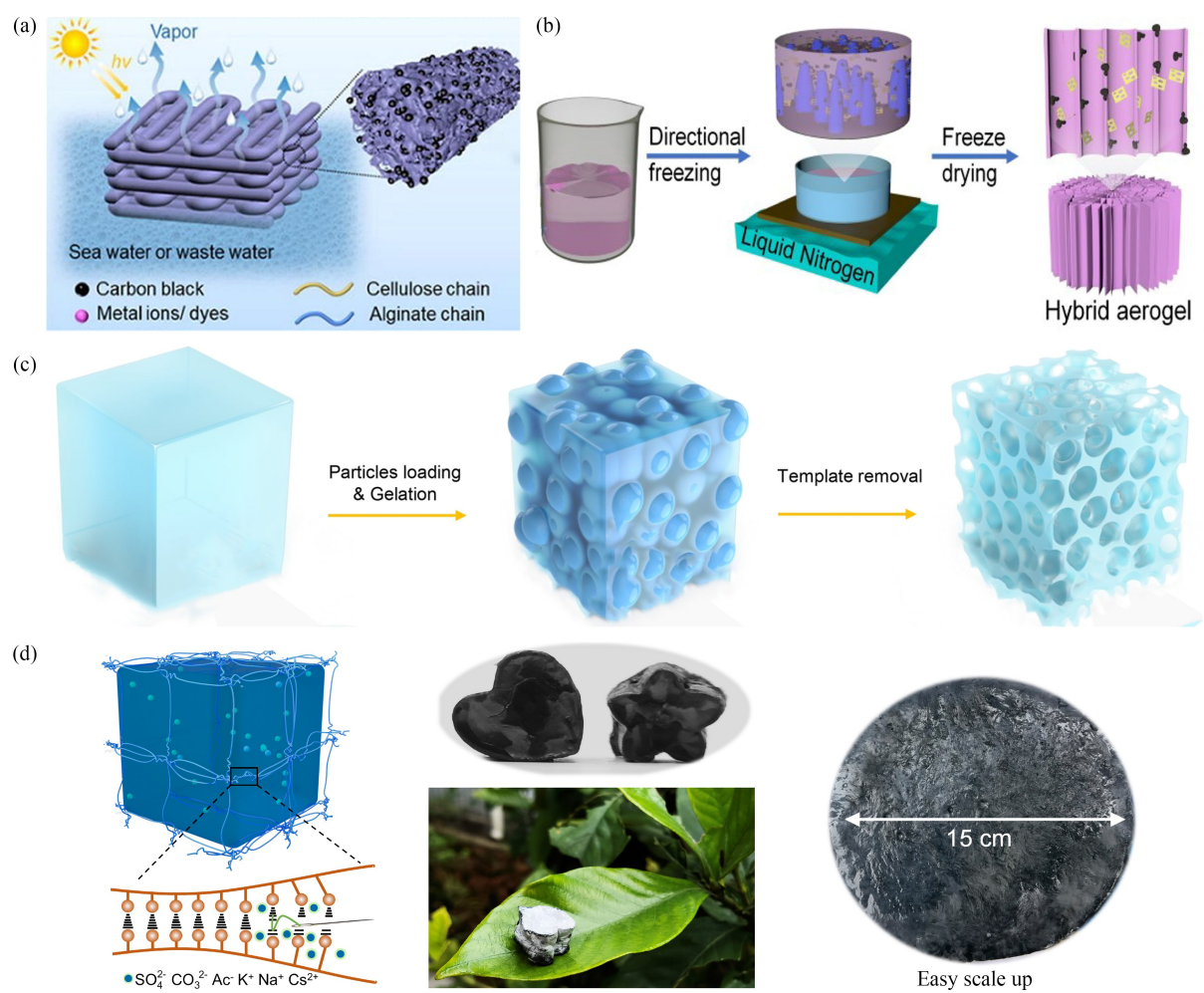


图 5 水凝胶的制备:(a)3D 打印多层多孔 SA-CS/CB 水凝胶^[8](2022 Elsevier 版权许可);(b)通过定向冷冻干燥制备的具有竖直通道的水凝胶蒸发器^[27](2022 American Chemical Society 版权许可);(c)通过自组装模板法制备的具有低曲折度和可调节孔径的多孔水凝胶蒸发器^[21](2021 John Wiley and Sons 版权许可);(d)基于 Hofmeister 效应通过冷冻盐析法制备的多孔水凝胶蒸发器^[12](2023 Elsevier 版权许可)

Figure 5 Preparation of hydrogels: (a) 3D printed multi-layered porous SA-CS/CB hydrogel (Reprinted with permission from Ref. [8]; Copyright 2022 Elsevier); (b) Hydrogel evaporators with vertically-aligned channels induced by directional-freeze drying method (Reprinted with permission from Ref. [27]; Copyright 2022 American Chemical Society); (c) Porous hydrogel evaporator with low tortuosity and adjustable pore size prepared by self-assembly template method (Reprinted with permission from Ref. [21]; Copyright 2021 John Wiley and Sons); (d) Porous hydrogel evaporators prepared by freeze-soak method based on Hofmeister effect (Reprinted with permission from Ref. [12]; Copyright 2023 Elsevier)

主要污染物之一。在处理高盐废水时,界面太阳能蒸发系统的压力相对较高。这主要反映在蒸发过程中蒸发界面的离子扩散受到抑制,以及蒸发表面的盐浓度增加,导致其沉积在太阳能蒸发器上^[44]。这将大大降低蒸发器的光吸收效率和蒸发性能。目前,一些研究人员已经提出了一些抑制盐垢的措施,如反复冲洗或化学清洗。然而,这些技术注定会对生态系统造成污染。此外,清洗的方法会导致溶液中宝贵矿物盐的浪费。与抗盐相

比,通过适当的策略收集盐也是一种资源回收的新方法。

目前的抗盐策略主要从设计水凝胶的网络结构、等级孔结构和化学结构来实现。从分子网络的角度出发,Yu 等^[45]利用两性离子水凝胶(PZHs)独特的反聚电解质效应成功地抵抗了盐。盐水中离子的存在对聚合物链上相反电荷的静电作用产生干扰,导致链的扩张和高水合度聚合物网络的形成,并进一步诱导更多中间态水的出现,

进而加快蒸发速率。同时,这也导致了多级孔结构的形成,有利于水的快速运输。在一个标准太阳光下,PZHs 蒸发器显示出极低的蒸发焓($\sim 817.4 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$),超高蒸发速率($\sim 4.14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)和出色的光热转换效率($\sim 94\%$)(图 6a)。Zheng 等^[14]发现并设计了具有宽竖直通道、辐射容器和多孔壁的层级结构用于高盐自排水,以实现在高浓度盐水中高效稳定脱盐(图 6b)。该体系由环氧交联大豆蛋白提取物(SPI)/羟乙基纤维素(HEC)通过冷冻浇铸的方法制备。该水凝胶独特的溶胀能力和分级结构的强毛细泵送、快速离子对流和扩散以及低纵向热导率($0.5517 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)确保了其在长时间内的耐盐性。

根据 Donnan 效应,物体表面固定电荷(阴离子,如 COO^-)对反离子(阳离子,如 Na^+)的吸引将反离子固定在水传输层。由于反离子受限所产生的高化学势阻碍了盐离子向水传输层的扩散,导致盐的积聚大大减少。为了提供稳定有效的盐水处理过程,Zhu 等^[46]利用 Donnan 效应开发了一种具有等级结构的新型耐盐蒸发器,即包括上部的太阳能吸收体、中间的供水系统和下部的隔热底座(图 6c)。太阳能蒸发器具有介孔结构的壁带有负电荷,使蒸发器免受盐的影响。这种基于 Donnan 效应的太阳能蒸发器可以有效地消除盐的积累,并维持约 $1.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和约 80% 的能量效率。

对蒸发器的结构进行设计在抗盐中具有更高的普适性。Li 等^[10]设计了一种基于 PVA 的超耐盐水凝胶蒸发器,通过局部盐结晶实现持续的太阳能驱动界面蒸发。该蒸发器为平截圆锥体结构(图 6d),允许盐优先在边缘结晶,以在高浓度的盐水中保持稳定的太阳能净水性能。该水凝胶蒸发器的毛细泵送和溶胀增强了盐水的传输,导致盐可以在蒸发过程中重新溶解。同时,他们设计了一个 3D 平截圆锥体结构蒸发器,其横截面在垂直于盐水流动方向连续增长,从而实现通过蒸发器的最佳径向盐水输送。质量守恒表明,如果盐水前沿的面积增加,就会出现盐水前沿流动变慢的情况;反之亦然。由于盐水入口和蒸发器边缘之间的距离很大,所以会产生一个径向的盐水含量梯度。相反,随着盐水流动面积的增加,毛细力的径向分量也在增加。随着时间的推移和盐浓度的增加,盐会优先沿着边缘结晶。在盐度为 10 wt%~25 wt% 的盐水

中,平均蒸发率被计算为 $2.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

3.2 灭菌、发电和光降解

存在于饮用水中的细菌对人体有严重的危害。蒸汽消毒作为最传统的消毒方式,它的优点是成本低、效果好,因此被广泛应用^[47]。然而,传统的蒸汽消毒主要由电力驱动,这不可避免地导致高投资成本。消毒与太阳能水蒸发相结合,将成为消除饮用水中细菌和病毒最经济和生态可接受的技术,特别适用于普通家庭。我们课题组通过原位诱导 PVA 与互穿淀粉化学交联的方法制备了多功能混合水凝胶蒸发器,用于高效的太阳能水净化^[48]。由于淀粉含有大量的羟基,水凝胶呈现出更强的机械性能、更高的水合能力、可调节的中间水比例和太阳能蒸汽效率。更重要的是,互穿淀粉赋予了水凝胶对重金属离子和有机染料的吸附能力以及抗菌功能(图 7a)。

光热驱动界面水蒸发过程中高温的光热材料不可避免地向环境释放能量,造成能量的浪费。将界面余热再次利用是提高太阳能整体使用效率的有效途径之一。以塞贝克原理(Seebeck effect)为基础,我们将高温水凝胶材料表面与本体水的温差利用起来,实现了水电联产^[12]。该水凝胶蒸发器在一个太阳光照射下具有 $3.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率,效率为 97.2%,输出功率密度为 $0.65 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 7b)。该方法为同时解决偏远地区水和电缺乏的问题提供了低成本的策略。

有机污染物在工业废水中占比很高,它比无机污染物更危险、更难补救。使用光催化技术来降解有机污染物已经被认为是最环保和经济的选择。然而,光催化剂的回收和重复使用也是光催化技术中必须解决的问题。这些问题可以通过太阳能驱动的界面蒸发中光吸收体的吸附和浓缩特性来解决。此外,光降解的效率可以通过催化位点的局部加热而得到提高。因此,稀缺淡水的多维问题可以通过结合光催化和光热蒸发来解决。许多研究者已经开始关注这个问题,但是水凝胶蒸发器在该领域的应用仍需开发。An 等^[13]揭示了 MXene 组装水凝胶膜(MAPs)在光热蒸发和光降解一体化的水净化中的应用。水凝胶的动态亲水网络与膜的渗透性相结合,为蒸汽生成和光降解提供了有吸引力的介质,这两点在设计中都得到了利用(图 7c)。MXene 与 PVA 和卟啉分子间的相互作用,构成了 MAP 水凝胶膜的多功能聚合

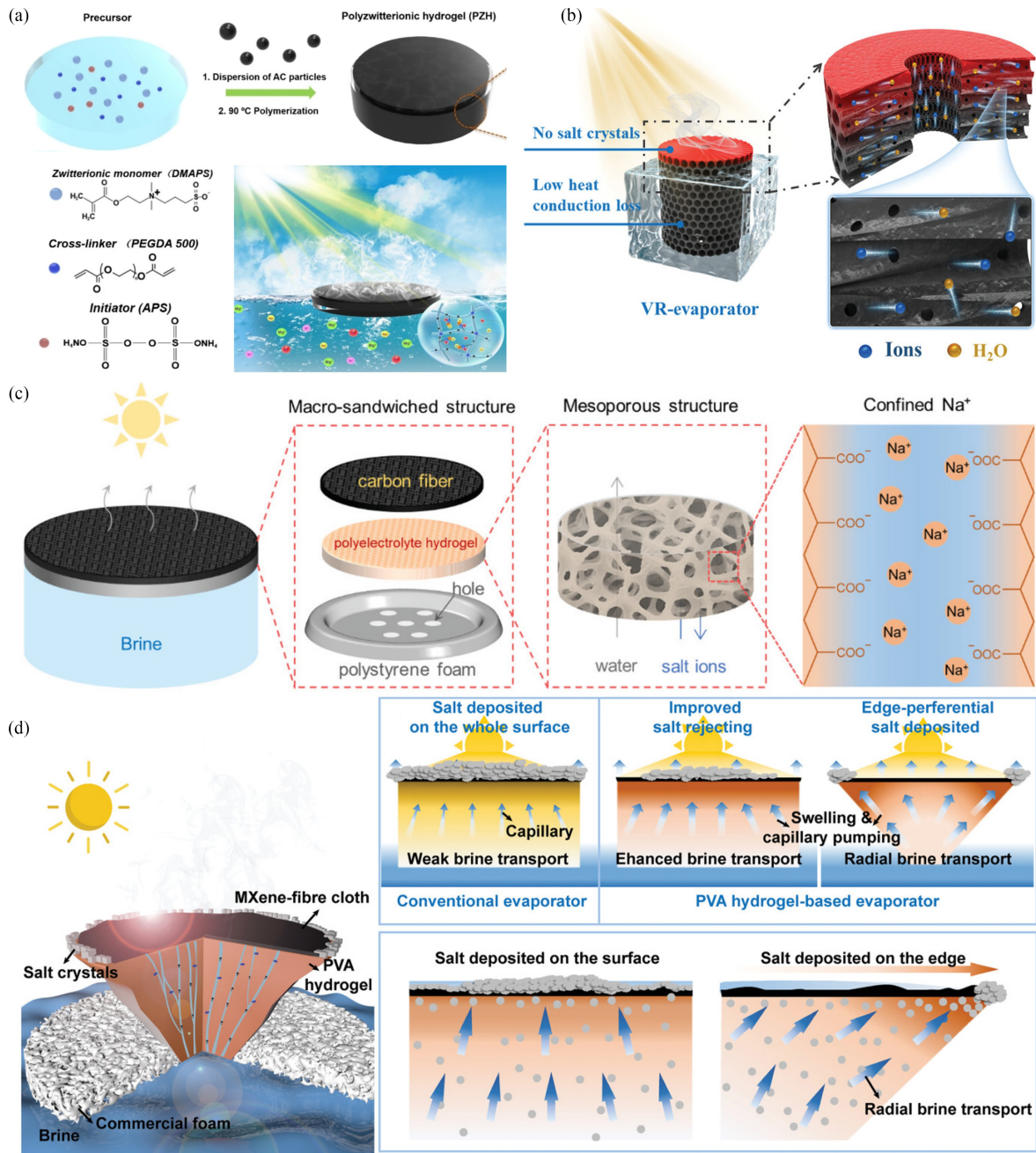


图 6 抗盐(化学结构、物理结构、外部装置和局部结晶):(a)两性离子水凝胶实现了用于太阳能脱盐的化学结构和高耐盐性^[45](2023 John Wiley and Sons 版权许可);(b)具有冷冻铸造垂直辐射耐盐结构的 3D 水凝胶蒸发器^[14](2022 John Wiley and Sons 版权许可);(c)基于 Donnan 效应的一种具有等级结构的耐盐蒸发器^[46](2021 John Wiley and Sons 版权许可);(d)一种用于太阳能水蒸发的特殊 3D 水凝胶蒸发器,具有耐盐和定向结晶性能^[10](2021 John Wiley and Sons 版权许可)

Figure 6 Salt-blocking (chemical structure, physical structure, external device, and localized crystallization): (a) Polyzwitterionic hydrogel realizes chemical structure and high salt resistance for solar desalination (Reprinted with permission from Ref. [45]; Copyright 2023 John Wiley and Sons); (b) 3D hydrogel evaporator with freeze-cast vertical radiation salt-resistant structure (Reprinted with permission from Ref. [14]; Copyright 2022 John Wiley and Sons); (c) A salt-tolerant evaporator with a hierarchical structure based on the Donnan effect (Reprinted with permission from Ref. [46]; Copyright 2021 John Wiley and Sons); (d) An exceptional 3D hydrogel evaporator for solar water evaporation that is salt-resistant and may be used for targeted crystallization (Reprinted with permission from Ref. [10]; Copyright 2021 John Wiley and Sons)

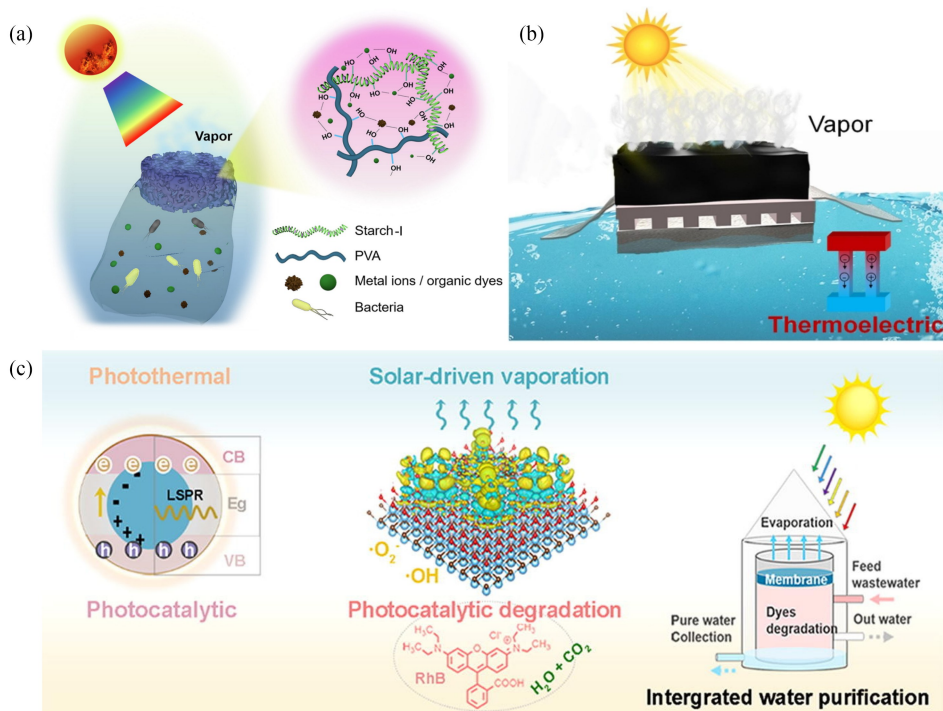


图 7 水凝胶蒸发器的多功能应用(如灭菌、发电和光降解)。(a)基于 PVA 的抗菌水凝胶蒸发器^[48](2022 Elsevier 版权许可);(b)热量收集用于发电的界面太阳能蒸发系统^[12](2023 Elsevier 版权许可);(c)通过自组装制备的具有水蒸发和光降解的 MAP 双功能水凝胶^[13](2022 Elsevier 版权许可)

Figure 7 Versatile applications of hydrogel evaporators (sterilization, electricity generation, and photodegradation). (a) PVA-based antibacterial hydrogel evaporator (Reprinted with permission from Ref. [48]; Copyright 2022 Elsevier); (b) Interfacial solar steam generation system for heat harvesting and conversion to electricity (Reprinted with permission from Ref. [12]; Copyright 2023 Elsevier); (c) Self-assembled MAP hydrogels with water evaporation and photodegradation functions (Reprinted with permission from Ref. [13]; Copyright 2022 Elsevier)

物层和层间交联剂,引导了水凝胶膜的构建。强烈的耦合接触和电荷重新分配,特别是在 MXene 和卟啉之间,有利于 MAP 水凝胶膜亲水动态网络的稳定性、协同增加光热效应和光降解能力。该 MAP 的产水速率达到 $1.82 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,对污染物的光降解能力达 90.5%,可以有效地利用太阳能净化水。

4 结论和展望

界面太阳能蒸发技术已经被不同研究背景的学者研究。作为最受欢迎的界面光热转换材料,水凝胶被广泛用于太阳能驱动的界面蒸发。本综述主要关注水凝胶增强蒸发的机理、制备方法和多功能集成。尽管取得了各种进展,但提高基于水凝胶太阳能蒸发器能力的重大障碍仍然存在。(1)机理研究:水凝胶中水蒸发机理仍需深入研究,包括能量和质量的转移、蒸发界面处的分子扩散动力学,从而进一步降低水蒸发所需要的能量。

(2)材料优化和新材料开发在进一步推进太阳能水净化方面具有深远的价值和相关性。例如,设计具有特定方向的材料来提高蒸发性能是更有意义的。例如,水凝胶分子网络的调整主要表现为分子网络间距的调整和不同吸水网络的引入,这样就可以有效地调整各种状态水的比例,有效地调节蒸发焓和蒸发性能。同时水凝胶的蒸发效率在加入各种光吸收剂后会发生显著变化。因此,对光吸收剂的亲水改性可以有效地避免其对水凝胶蒸发焓的影响,预计可以提高其蒸发性能。(3)功能开发:将水凝胶材料的其他功能整合到界面光热蒸发系统中也是非常有价值的。尽管许多研究人员已经发明了几种多功能的界面蒸发系统,如耐盐性、发电和光降解。然而,在其多功能集成之间仍有明显的制衡。如抗菌剂主要通过高温蒸汽灭菌,这就需要光热转换材料的耐高温性。光降解的发生主要是因为产生的氧化自由基,而氧化自由基很容易破坏水凝胶的网络结构。因

此,在创建这个多功能应用的整个过程中,各种功能之间存在权衡。(4)应用发展及实际应用:进一步实施界面太阳能海水淡化技术在解决缺水问题上的实际应用仍面临许多困难和挑战,需要更多的科研人员来解决。为了实现真正的实际应用,挑战主要包括:开发成本较低的材料并选择更高效、通用的处理和制造技术来降低成本,这有利于后期产品的大规模推广;以及构建更具可扩展性的系统设备来提高冷凝水生产效率。

参考文献:

- [1] Salehi, M. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environ. Int.*, **2022**, 158, 106936.
- [2] Tao, P.; Ni, G.; Song, C. Y.; Shang, W.; Wu, J. B.; Zhu, J.; Chen, G.; Deng, T. Solar-driven interfacial evaporation. *Nat. Energy*, **2018**, 3 (12), 1031-1041.
- [3] Ghasemi, H.; Ni, G.; Marconnet, A. M.; Loomis, J.; Yerci, S.; Miljkovic, N.; Chen, G. Solar steam generation by heat localization. *Nat. Commun.*, **2014**, 5, 4449.
- [4] Yuan, B. H.; Sui, Y.; Dong, J.; Lv, X. B.; Guo, M. Y.; Xiao, Y.; Yang, L. X.; Yang, H. W.; Bai, L. J.; Wang, W. X.; Wei, D. L.; Liang, Y.; Chen, H. A high-efficiency solar water evaporation-photocatalysis system achieved by manipulating surface wettability and constructing heterojunction. *Appl. Surf. Sci.*, **2023**, 611, 155678.
- [5] Zhou, L.; Tan, Y. L.; Wang, J. Y.; Xu, W. C.; Yuan, Y.; Cai, W. S.; Zhu, S. N.; Zhu, J. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. *Nat. Photonics*, **2016**, 10(6), 393-398.
- [6] Zhou, Y. E.; Lu, Q. C.; Liu, Q. D.; Yang, H. Z.; Liu, J. L.; Zhuang, J.; Shi, W. X.; Wang, X. Architecting hybrid donor-acceptor dendritic nanosheets based on polyoxometalate and porphyrin for high-yield solar water purification. *Adv. Funct. Mater.*, **2022**, 32(15), 2112159.
- [7] Zhou, X. Y.; Zhao, F.; Guo, Y. H.; Rosenberger, B.; Yu, G. H. Architecting highly hydratable polymer networks to tune the water state for solar water purification. *Sci. Adv.*, **2019**, 5(6), eaaw5484.
- [8] Yuan, J.; Lei, X.; Yi, C. Q.; Jiang, H. Q.; Liu, F.; Cheng, G. J. 3D-printed hierarchical porous cellulose/alginate/carbon black hydrogel for high-efficiency solar steam generation. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 430, 132765.
- [9] Guo, Y. H.; Zhao, F.; Zhou, X. Y.; Chen, Z. C.; Yu, G. H. Tailoring nanoscale surface topography of hydrogel for efficient solar vapor generation. *Nano Lett.*, **2019**, 19(4), 2530-2536.
- [10] Li, L.; He, N.; Jiang, B.; Yu, K. W.; Zhang, Q. A.; Zhang, H. T.; Tang, D. W.; Song, Y. C. Highly salt-resistant 3D hydrogel evaporator for continuous solar desalination via localized crystallization. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31 (43), 2104380.
- [11] Guo, Y. H.; Dundas, C. M.; Zhou, X. Y.; Johnston, K. P.; Yu, G. H. Molecular engineering of hydrogels for rapid water disinfection and sustainable solar vapor generation. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(35), 2102994.
- [12] Ren, J. X.; Chen, L.; Gong, J.; Qu, J. P.; Niu, R. Hofmeister effect mediated hydrogel evaporator for simultaneous solar evaporation and thermoelectric power generation. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 458, 141511.
- [13] Zhang, B. P.; Wong, P. W.; An, A. K. Photo-thermally enabled MXene hydrogel membrane with integrated solar-driven evaporation and photodegradation for efficient water purification. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 430, 133054.
- [14] Liu, X. H.; Chen, F. X.; Li, Y. K.; Jiang, H. J.; Mishra, D. D.; Yu, F.; Chen, Z. H.; Hu, C. Q.; Chen, Y.; Qu, L. T.; Zheng, W. T. 3D hydrogel evaporator with vertical radiant vessels breaking the trade-off between thermal localization and salt resistance for solar desalination of high-salinity. *Adv. Mater.*, **2022**, 34(36), e2203137.
- [15] Zhao, Q.; Wu, Z. X.; Xu, X. Y.; Yang, R. P.; Ma, H. D.; Xu, Q. L.; Zhang, K. Y.; Zhang, M. M.; Xu, J. K.; Lu, B. Y. Design of poly(3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate-polyacrylamide dual network hydrogel for long-term stable, highly efficient solar steam generation. *Sep. Purif. Technol.*, **2022**, 300, 121889.
- [16] Yang, L.; Li, N.; Guo, C.; He, J. T.; Wang, S. X.; Qiao, L. F.; Li, F. B.; Yu, L. M.; Wang, M.; Xu, X. F. Marine biomass-derived composite aerogels for efficient and durable solar-driven interfacial evaporation and desalination. *Chem. Eng. J.*, **2021**, 417, 128051.

- [17] Zhao, F.; Zhou, X. Y.; Shi, Y.; Qian, X.; Alexander, M.; Zhao, X. P.; Mendez, S.; Yang, R. G.; Qu, L. T.; Yu, G. H. Highly efficient solar vapour generation *via* hierarchically nano-structured gels. *Nat. Nanotechnol.*, **2018**, 13(6), 489-495.
- [18] Zhou, X. Y.; Zhao, F.; Guo, Y. H.; Zhang, Y.; Yu, G. H. A hydrogel-based antifouling solar evaporator for highly efficient water desalination. *Energy Environ. Sci.*, **2018**, 11(8), 1985-1992.
- [19] Ghanbarian, B.; Hunt, A. G.; Ewing, R. P.; Sahimi, M. Tortuosity in porous media: a critical review. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **2013**, 77(5), 1461-1477.
- [20] Zhao, F.; Guo, Y. H.; Zhou, X. Y.; Shi, W.; Yu, G. H. Materials for solar-powered water evaporation. *Nat. Rev. Mater.*, **2020**, 5(5), 388-401.
- [21] Guo, Y. H.; de Vasconcelos, L. S.; Manohar, N.; Geng, J. F.; Johnston, K. P.; Yu, G. H. Highly elastic interconnected porous hydrogels through self-assembled templating for solar water purification. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2022**, 61(3), e202114074.
- [22] Ludwig, R. Water: from clusters to the bulk. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2001**, 40(10), 1808-1827.
- [23] Zwier, T. S. The structure of protonated water clusters. *Science*, **2004**, 304(5674), 1119-1120.
- [24] 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.
- [25] Zhu, F. B.; Wang, L. Q.; Demir, B.; An, M.; Wu, Z. L.; Yin, J.; Xiao, R.; Zheng, Q.; Qian, J. Accelerating solar desalination in brine through ion activated hierarchically porous polyion complex hydrogels. *Mater. Horiz.*, **2020**, 7(12), 3187-3195.
- [26] Li, C. C.; Zhu, B.; Liu, Z. X.; Zhao, J. T.; Meng, R. R.; Zhang, L. S.; Chen, Z. G. Polyelectrolyte-based photothermal hydrogel with low evaporation enthalpy for solar-driven salt-tolerant desalination. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 431, 134224.
- [27] Niu, R.; Ding, Y.; Hao, L. A.; Ren, J. X.; Gong, J. A.; Qu, J. P. Plant-mimetic vertical-channel hydrogels for synergistic water purification and interfacial water evaporation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(40), 45533-45544.
- [28] Zhao, L. M.; Yang, Z. P.; Wang, J. J.; Zhou, Y. R.; Cao, P.; Zhang, J.; Yuan, P.; Zhang, Y. Y.; Li, Q. W. Boosting solar-powered interfacial water evaporation by architecting 3D interconnected polymeric network in CNT cellular structure. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 451, 138676.
- [29] Sun, Y.; Gao, J. P.; Liu, Y.; Kang, H. Y.; Xie, M. H.; Wu, F. M.; Qiu, H. X. Copper sulfide-macroporous polyacrylamide hydrogel for solar steam generation. *Chem. Eng. Sci.*, **2019**, 207, 516-526.
- [30] An, N.; Jiang, Y. H.; Wang, Z. W.; Sun, Q. Y.; Guo, B.; Gao, B. Y.; Zhou, W. Z.; Li, Q. Efficient water purification and desalination using hydrogel and aerogel solar evaporators based on different carbon materials. *Sep. Purif. Technol.*, **2022**, 301, 122003.
- [31] Yu, F.; Chen, Z. H.; Guo, Z. Z.; Irshad, M. S.; Yu, L.; Qian, J. W.; Mei, T.; Wang, X. B. Molybdenum carbide/carbon-based chitosan hydrogel as an effective solar water evaporation accelerator. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2020**, 8(18), 7139-7149.
- [32] Huang, Z. M.; Li, S. L.; Cui, X.; Wan, Y. P.; Xiao, Y. F.; Tian, S.; Wang, H.; Li, X. Z.; Zhao, Q.; Lee, C. S. A broadband aggregation-independent plasmonic absorber for highly efficient solar steam generation. *J. Mater. Chem. A*, **2020**, 8(21), 10742-10746.
- [33] Cui, T. Y.; Cai, W.; Chu, F. K.; Li, Z. X.; Zheng, Y. P.; Gui, Z.; Hu, Y. Enhanced light trapping effect of hierarchical structure assembled from flower-like cobalt tetroxide and 3D-printed structure for efficient solar evaporation. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 451, 139102.
- [34] Wei, Z. C.; Wang, Y. B.; Cai, C. Y.; Zhang, Y. X.; Guo, S. A.; Fu, Y.; Tan, S. C. Dual-network liquid metal hydrogel with integrated solar-driven evaporation, multi-sensory applications, and electricity generation *via* enhanced light absorption and Bénard-marangoni effect. *Adv. Funct. Mater.*, **2022**, 32(41), 2206287.
- [35] Sun, Z. Y.; Wang, J. J.; Wu, Q. L.; Wang, Z. Y.; Wang, Z.; Sun, J. E.; Liu, C. J. Plasmon based double-layer hydrogel device for a highly efficient solar vapor generation. *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29(29), 1901312.
- [36] Hao, L.; Liu, N.; Bai, H. Y.; He, P. P.; Niu,

- R. ; Gong, J. High-performance solar-driven interfacial evaporation through molecular design of antibacterial, biomass-derived hydrogels. *J. Colloid Interface Sci.*, **2022**, 608, 840-852.
- [37] Lu, Y. ; Fan, D. Q. ; Wang, Y. D. ; Xu, H. L. ; Lu, C. H. ; Yang, X. F. Surface patterning of two-dimensional nanostructure-embedded photo-thermal hydrogels for high-yield solar steam generation. *ACS Nano*, **2021**, 15(6), 10366-10376.
- [38] Chen, L. ; Ren, J. X. ; Gong, J. ; Qu, J. P. ; Niu, R. Cost-effective, scalable fabrication of self-floating xerogel foam for simultaneous photothermal water evaporation and thermoelectric power generation. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 454, 140383.
- [39] Guo, Y. H. ; Zhou, X. Y. ; Zhao, F. ; Bae, J. ; Rosenberger, B. ; Yu, G. H. Synergistic energy nanoconfinement and water activation in hydrogels for efficient solar water desalination. *ACS Nano*, **2019**, 13(7), 7913-7919.
- [40] Zahmatkesh, B. B. ; Niazmand, H. ; Goharshadi, E. K. Synergistic effect of Fe_3O_4 nanoparticles and Au nanolayer in enhancement of interfacial solar steam generation. *Mater. Res. Bull.*, **2023**, 162, 112178.
- [41] Zhao, Q. ; Liu, J. Y. ; Wu, Z. X. ; Xu, X. Y. ; Ma, H. D. ; Hou, J. ; Xu, Q. L. ; Yang, R. P. ; Zhang, K. Y. ; Zhang, M. M. ; Yang, H. J. ; Peng, W. S. ; Liu, X. M. ; Zhang, C. C. ; Xu, J. K. ; Lu, B. Y. Robust PEDOT: PSS-based hydrogel for highly efficient interfacial solar water purification. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 442, 136284.
- [42] Li, C. X. ; Cao, S. J. ; Lutzki, J. ; Yang, J. ; Konegger, T. ; Kleitz, F. ; Thomas, A. A covalent organic framework/graphene dual-region hydrogel for enhanced solar-driven water generation. *J. Am. Chem. Soc.*, **2022**, 144(7), 3083-3090.
- [43] Shi, Y. ; Ilic, O. ; Atwater, H. A. ; Greer, J. R. All-day fresh water harvesting by microstructured hydrogel membranes. *Nat. Commun.*, **2021**, 12(1), 2797.
- [44] Zhang, L. D. ; Zhang, Y. ; Zou, M. M. ; Yu, C. L. ; Li, C. X. ; Gao, C. ; Dong, Z. C. ; Wu, L. ; Song, Y. L. A bionic-gill 3D hydrogel evaporator with multidirectional crossflow salt mitigation and aquaculture applications. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(24), 202300318.
- [45] Lei, C. X. ; Guan, W. X. ; Guo, Y. H. ; Shi, W. ; Wang, Y. Y. ; Johnston, K. P. ; Yu, G. H. Polyzwitterionic hydrogels for highly efficient high salinity solar desalination. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2022**, 61(36), e202208487.
- [46] Zhao, W. ; Gong, H. ; Song, Y. ; Li, B. ; Xu, N. ; Min, X. Z. ; Liu, G. L. ; Zhu, B. ; Zhou, L. ; Zhang, X. X. ; Zhu, J. A. Hierarchically designed salt-resistant solar evaporator based on donnan effect for stable and high-performance brine treatment. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(23), 2100025.
- [47] van Doornmalen, J. ; Kopinga, K. Review of surface steam sterilization for validation purposes. *Am. J. Infect. Control*, **2008**, 36(2), 86-92.
- [48] Chen, L. ; Ding, Y. ; Gong, J. ; Xie, H. ; Qu, J. P. ; Niu, R. Molecular engineering of biomass-derived hybrid hydrogels for solar water purification. *J. Colloid Interface Sci.*, **2022**, 626, 231-240.