

光热材料在海水淡化领域的近期研究进展与展望^{*}

杨地^a 史潇凡^b 张冀杰^{*,a} 卜显和^{a,c}

(^a南开大学材料科学与工程学院 金属与分子基材料化学天津市重点实验室 天津 300350)

(^b武汉大学化学与分子科学学院 生物医学高分子材料教育部重点实验室 武汉 430072)

(^c南开大学化学学院 元素有机化学国家重点实验室 天津 300071)

摘要 太阳能水蒸发系统成本低、能效高,对缓解能源危机、减少水污染、促进海水淡化具有重要意义。然而,太阳能驱动水蒸发的自然机制往往受到低蒸发率和吸收光谱范围小的影响。其中,局部加热并限制热损失的界面水蒸发策略被广泛认可并作为高性能、可持续的太阳能蒸汽产生的有效途径。随着太阳能水蒸发技术的不断发展,制备绿色、高效的光热材料已成为研究热点。根据光热材料的种类将其划分为:金属材料、半导体材料、碳基材料以及聚合物材料,详细阐述了不同材料的光热转换机制并总结近年来光热材料在海水淡化领域的研究现状及进展;讨论了潜在的光热候选材料,对其未来发展做出了展望。旨在为海水淡化领域中高效光热材料的合理设计和开发提供可行方案,对今后光热材料的发展具有总结和指导意义。

关键词 海水淡化;光热材料;界面蒸发

Recent Research Progress and Prospect of Photothermal Materials in Seawater Desalination^{*}

Yang, Di^a Shi, Xiaofan^b Zhang, Jijie^{*,a} Bu, Xian-He^{a,c}

(^a Tianjin Key Laboratory of Metal and Molecule-Based Material Chemistry, School of Materials Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350)

(^b Key Laboratory of Biomedical Polymers of Ministry of Education, College of Chemistry and Molecular Science, Wuhan University, Wuhan 430072)

(^c State Key Laboratory of Elemento-Organic Chemistry, College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract Solar water evaporation system has appealing advantages of low cost and high energy efficiency, which is of great significance to alleviate energy crisis, reduce water pollution and promote seawater desalination. However, the natural mechanism of solar-driven water evaporation system is often affected via low evaporation rate and small absorption spectrum range. The interface evaporation strategy that locally heats and limits heat loss is widely recognized as a high-performance and sustainable approach for efficient solar steam generation. With the continuous development of solar evaporation technology, the preparation of green and efficient photothermal materials has become a research hotspot. In this review, the photothermal materials were classified into metal materials, semiconductor materials, carbon-based materials and polymer materials according to their types. It elaborated on the photothermal conversion mechanisms of different materials and summarized the research status and progress of photothermal materials in the field of seawater desalination in recent years. The potential candidate photothermal materials were discussed and their future development was forecasted. This review aims to propose practical strategies for the rational design and development of efficient photothermal materials in the field of seawater desalination. The findings summarized in this review are of great significance for the future development of photothermal materials and provide valuable guidance for future research in this area.

Keywords seawater desalination; photothermal material; interfacial evaporation

1 引言

在过去的几十年里,由于人口的增加和气候变化的影响,全球淡水资源正逐步减少。淡水仅占全球水资源

储备的 2.5%,其中可使用的淡水不足 1%^[1]。淡水资源匮乏问题已成为当代社会所面临的重要挑战^[2]。以海水为原料生产淡水,是缓解水资源匮乏的有效途径之一^[3]。为解决这一问题,人们开发了各种先进的技术,如反渗

^{*} Dedicated to the 90th anniversary of *Acta Chimica Sinica*.

^{*} E-mail: zhangjijie@nankai.edu.cn

Received April 20, 2023; published June 25, 2023.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21908113) and the Tianjin Applied Basic Research Project (No. 21JCYBJC00140).

^{*} 庆祝《化学学报》创刊 90 周年。

项目受国家自然科学基金(No. 21908113)和天津市应用基础研究项目(No. 21JCYBJC00140)资助。

透^[4]、电渗析^[5]、膜处理^[6]、高级氧化^[7]和太阳能水蒸发^[8]等用于海水淡化,但多数方法存在成本高、能耗大和环境污染严重等问题,使得这些技术在欠发达地区难以实现.与之相比,太阳能具有绿色洁净、可再生的优点,是人类可以利用的丰富能源.太阳能驱动的水蒸发系统利用太阳能作为唯一的能量输入,直接从海水中去除矿物质来生产淡水,而不需要化石燃料提供动力,可显著降低成本、节约能耗以及减少环境污染^[9].因此,利用太阳能驱动水蒸发来生产淡水被认为是最经济环保的清洁水生产方案之一.

然而,传统的太阳能水蒸发系统是利用光学装置收集阳光,将大量的海水加热到沸点,产生蒸汽,成本高且效率低^[10].近年来,界面式太阳能水蒸发系统(图1)^[11]因其成本低、效率高而备受关注^[12].例如, Miao等^[13]设计了一种简化的太阳能蒸发系统,该系统采用浮动结构,碳纳米管膜作为吸光器,气凝胶层作为隔热层,在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下,水蒸发效率高达 84.6%.在界面式太阳能水蒸发系统中,光热材料是最重要的组成部分之一,它与太阳能的吸收直接相关.光热材料漂浮或悬浮在水中,可将太阳能集中在水面上,避免对水体的加热,减少热损失,实现高效的太阳能界面蒸发过程^[14].

至今,人们已经发现了多种光热材料并将其应用于海水淡化领域中,如金属材料、半导体材料、碳基材料^[15]以及聚合物材料^[16]等.2020年,针对在太阳能蒸汽产生过程中热量通过热传导损失给散装水这一问题, Xu等^[17]在太阳能蒸发表面(SES)和散装水之间引入了冷蒸发面(CES),通过精心控制 CES 的表面积,来自 SES 的传热量可以在到达散装水之前被 CES 充分吸收并用于冷蒸发.这一策略对日后该类材料的设计具有重大借鉴意义.2021年,针对海水淡化过程中太阳能蒸发器上的盐分积累导致太阳能蒸发器应用受限这一问题, Zhu等^[18]设计了一种基于道南效应的耐盐太阳能蒸发器,

该蒸发器能从根本上避免盐的积累,这对未来光热材料的发展具有指导意义.2022年,针对空气-水界面的高温导致海水中挥发性有机化合物(VOCs)挥发进而污染淡水这一问题, Wang 的研究团队^[19]通过设计一系列新颖的材料结构来提供更多的光催化反应位点,进而使其可以持续拦截 VOCs.这些工作为太阳能蒸发技术在海水淡化中的实际应用奠定了基础.

将光热材料用于实际海水淡化生产的技术正在逐步发展.例如, Jiang 的研究团队^[20]制备了一个三维多孔还原氧化石墨烯/炭黑(3DP-HP rGO/CB)太阳能蒸发器,在 10% (w) NaCl 盐水脱盐过程中(光照强度 $8 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$),蒸发率高达 $10.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,显示出高效的耐盐性能.此外, 3DP-HP rGO/CB 蒸发器(图2)在自然光照下可以以高达 $5.6 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的超快产水量净化 10% (w) NaCl 盐水.这项工作展现出太阳能脱盐实际应用的巨大潜力. Jin 等^[21]以柔性木材为基材,单宁酸配合物为吸光材料,进一步卷积形成 3D 锥形木质蒸发器.该蒸发器的水分蒸发速率可达 $1.79 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,对东海海水进行淡化后,收集的淡水符合规定的饮用水标准限值.重复使用十次后,蒸发速率仍可达到 $1.62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.随后,作者在 8:00~16:00 之间利用自制的太阳能水蒸发装置测试了蒸发器在自然条件下的水分蒸发性能.结果表明蒸发 8 h 后,从侧管道收集约 9 mL 淡水,相应的蒸发速率达到 $1.59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.

但目前,海水淡化技术还不够成熟.制约其技术的主要因素是光热材料的吸光范围较窄,隔热性能较差且大多数光热材料在酸、碱和盐的环境中是不稳定的,同时还伴随着制造工艺复杂和原材料价格昂贵等问题.这些都阻碍了光热材料大规模应用的进程^[22].因此,探寻低成本、高效率的光热材料仍在不断进行^[23].本文按照光热材料的类型进行了分类,综述了光热材料在海水淡化领域的研究现状,探讨了该领域面临的挑战,并对其进行了展望和总结.

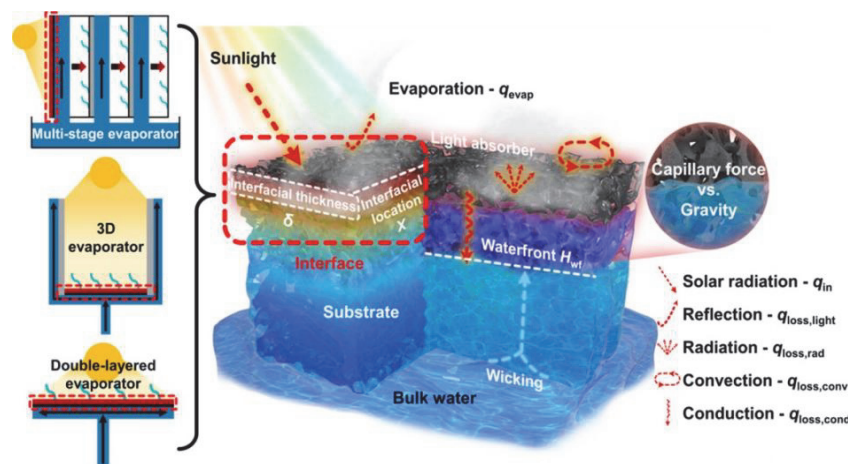


图1 界面太阳能蒸发器示意图

Figure 1 Figure caption schematics of solar interfacial evaporators

Reprinted (Adapted or Reprinted in part) with permission from {ACS Energy. Lett. 2023, 8, 1680.}. © {2023} American Chemical Society.



图2 实际阳光照射下太阳能驱动海水淡化试验的光学照片
Figure 2 The optical photographs of the solar-driven desalination test under the actual sunlight irradiation
Reprinted (Adapted or Reprinted in part) with permission from {ACS Nano 2022, 16, 2511.}. © {2022} American Chemical Society

2 光热转化机理与效率

2.1 光热转换基本原理

在光照下, 光热材料可以吸收一定波长范围的光, 将电子从价带(VB)激发到导带(CB)上. 随后, 处于激发态的电子通过发射光子(即光致发光(PL)或通过非辐射弛豫(即光热效应)释放热能返回基态(图3)^[24]. 根据电磁辐射与物质相互作用的不同机理, 将光热效应的机理分为三类: 等离子体局域加热、电子-空穴的产生和弛豫以及分子热振动.

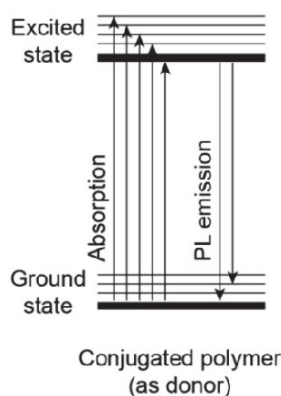


图3 光热效应原理示意图
Figure 3 Schematic diagram of the photothermal effect principle
Reprinted (Adapted or Reprinted in part) with permission from {ACS Appl. Polym. Mater. 2020, 2, 4273.}. © {2020} American Chemical Society.

对于金属材料, 其在光照下, 可以吸收一定波长范围的光. 当入射光的频率与金属中离域电子的振荡频率相匹配时, 电子就会被集体激发而产生共振, 振动的电子通过焦耳机制产生热量. 局部热量增加^[25], 通过热传导实现金属材料升温(图4a). 金属材料由于等离子共振(LSPR)效应而具有很强的光吸收和光热转换能力. LSPR效应与粒子的形状、大小和周围介质息息相关. 通

常来说, 空心结构或形状不对称会拓宽 LSPR 的谱带, 粒子大小或周围介质的变化会引起 LSPR 谱带的移动, 并可能使谱带变宽^[24]. 目前, 金和银是光热转换中最常用的金属^[26], 其他金属(如铝^[27]等), 也在逐渐被开发.

对于半导体材料, 将其暴露在阳光下且单个光子能量高于带隙时, 电子会被激发. 这些被激发的电子返回到低能级状态时, 会以光子形式的辐射弛豫或声子形式的非辐射弛豫放出热量^[28](图4b). 传统的半导体材料带隙较宽, 需要吸收能量较高的入射光, 才能将电子激发. 但随着研究的不断深入, 具有窄带隙的半导体材料不断被发现, 如三氧化二钛^[29], 吸收可见光可激发电子放热, 大大拓展了半导体在光热转换中的应用.

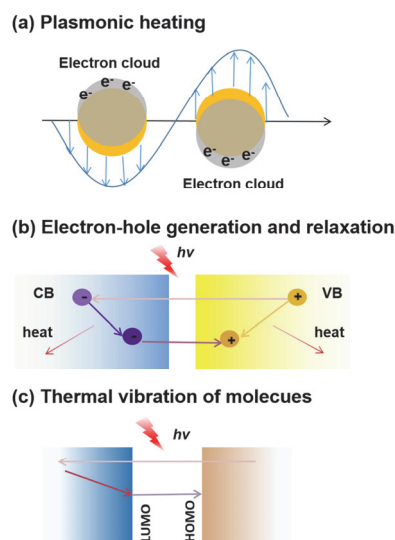


图4 各类光热材料的光热机制
Figure 4 The photothermal mechanisms of various types of photothermal materials

对于碳材料和一些聚合物材料, 该类材料表现出很强的光吸收能力, 可以通过晶格振动将这种能量转换为热量(图4c). 例如, 在类石墨烯同素异形体中, 大量共轭 π 键使电子几乎能在太阳光谱中的每个波长下都被激发, 产生各种 π - π^* 跃迁. 当输入的单个光子能量与分子内的电子跃迁能量相匹配时, 电子吸收光子能量并使其从HOMO上升到LUMO. 被激发的电子通过电子-声子耦合弛豫放出热量, 导致材料升温^[30].

2.2 光热转换效率

在海水淡化过程中, 光热材料吸收太阳能并将其转化为热能, 导致宏观材料升温, 然后通过热传导来实现水的蒸发. 目前, 研究人员主要使用水蒸发速率和太阳能光热转换效率来评价系统的蒸发性能:

水蒸发速率由下列公式表示^[25b].

$$\dot{m} = \frac{dm}{A \times dt}$$

其中, m 为蒸发水的质量; A 为材料的表面积; t 为时间.

太阳能光热转换效率是指该系统将太阳能转化为有效水蒸发的能力, 其计算公式如下所示^[31].

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_e}{Q_s} = \frac{\dot{m} \cdot h_{\text{LV}}}{C_{\text{opt}} \cdot q_i}$$

式中 Q_e 是水蒸发的功率; Q_s 代表太阳照射的功率; $\dot{m}$ 表示光照下水分蒸发率减去黑暗环境下水分蒸发率, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; h_{LV} 是液-汽相变的总焓 ($2.26 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$); C_{opt} 是光学浓度; q_i 为太阳辐照的入射功率密度.

提高水蒸发速率和太阳能光热转换效率一直是海水淡化研究的目标. 目前, 已有研究工作报道, 在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光照强度下, 水的蒸发速率有一个传统的理论极限值 ($\leq 1.47 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)^[32]. 该值可以作为系统设计中性能评估的基准.

3 光热转化材料分类

近年间, 人们提出了各种策略来增强太阳能水蒸发, 其中通过光热材料结构和系统设计并行的策略引起

了研究人员的广泛关注. 一般来说, 为了有效地将太阳能转化为热能, 光热材料需要具备以下几个特点: 较强的光吸收能力和较高的光热转换效率, 且成本低、易回收、制备简单、稳定性优异. 目前研究较多的光热材料包括金属材料、半导体材料、碳基材料和聚合物材料等^[33-35]. 光热材料在界面太阳能蒸发中的研究趋势如图 5 所示. 接下来, 将对这些光热材料进行介绍, 并将这些光热材料的水蒸发速率和光热转换效率列入表 1 中.

3.1 金属材料

金属材料包括金属纳米材料(Au、Ag、Pt、Al、Pd、Ge 纳米颗粒等)^[36]、多孔金属/合金材料(多孔 Al、泡沫 Ni、泡沫 Cu、泡沫 Ti 等)^[37]和金属元素复合材料(CuFeMnO_4 、 TiAlO_x 等)^[38]. 与其他光热转换材料(如碳基材料、有机高分子材料)相比, 金属材料具有以下优点: (1)纳米金属材料的光学性质易于控制(可以实现近乎完美的光吸收). 普通的碳基材料, 如生物质碳材料往往具有 5%~10% 的光学反射率^[39]. (2)对光热材料进行金属掺杂, 可以有效降低热损失(特别是热辐射损失)^[40]. (3)金属基材料往往具有良好的机械性能, 对整

表 1 光热材料的性能参数

Table 1 Performance parameters of photothermal materials

样品	光强/ $(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	水蒸发速率/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	光热转换效率/%	参考文献
Au 纳米颗粒(3.4 nm)	1	—	11	[48]
Au 纳米颗粒(37.7 nm)	1	—	30	[48]
Au/MCE	10	—	85	[49]
Ag 纳米颗粒薄膜	1	1.37	89.3	[51]
AuF	1	—	85	[52]
Ti_2O_3	1	1.32	—	[28]
Li_2TiO_3	2	0.87	—	[56]
$\text{MoN}/\text{Mo}_2\text{N}$	1	1.7	98	[58]
V/MoO_3	1	2.0	93.44	[59]
$\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{NF}$	1	1.29	87.2	[60]
$\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Ni}$	1	1.226	80	[61]
C, N- TiO_2 纳米片@Ti 板	1	1.57	—	[62]
CNPs/PDMS/PVA	0.85	1.26	80	[64]
F-Wood	1	—	72	[68]
2D C/Cu	1	—	65	[75]
N/3D rGO	1	—	80	[77]
3DGN/Wood	1	—	91.8	[78]
SPPU@NCS	1	2.18	—	[79]
HPCNFs	1	1.78	96.13	[80]
PPy-Wood	1	1.014	72.5	[84]
聚吡咯-木棉纤维气凝胶	1	—	82.4	[85]
聚乙烯醇/聚吡咯/壳聚糖	1	3.6	—	[86]
BPF	5	0.57	48.3	[87]
聚酰亚胺/MXene	5	—	50.6	[88]
PFF	1	1.48	87.4	[90]
PPY/BTA	1	1.90	89	[91]

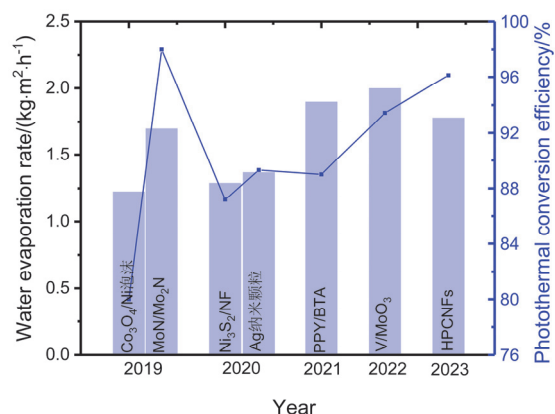


图5 近年间具有代表性的光热材料研究工作水蒸发速率及光热转换效率图

Figure 5 Water evaporation rate and photothermal conversion efficiency diagram of representative photothermal materials research work in recent years

个设备起到保护作用,这有利于设备在海洋环境中的长期保存.尤其是 Au、Ag 纳米颗粒,由于局部表面等离子体共振效应(LSPR)引起金属纳米颗粒电荷集体振荡产生热电子而被认为是优秀的光热转换材料^[41].例如,Chen 等^[42]采用晶种诱导的方法合成了不同直径的 Au 纳米颗粒,结果表明定向调变 Au 纳米颗粒的尺寸可以有效提高光热转换效率.与此同时,各种 Au 结构作为太阳能吸收体被用于海水淡化,包括纳米颗粒^[43]、纳米棒^[44]、空心球^[45]和纳米双锥体^[46].

控制蒸发的局部环境是实现高效蒸发的关键.受此启发,Wang 的团队^[47]利用一种自组装工艺,在空气-水界面上设计了一种金纳米颗粒薄膜(图 6),该薄膜可以通过毛细管流动将液体泵送到表面.研究还发现,Au 的形状和直径对光热转换有显著影响.在另一项工作中,Guo 等^[48]使用直径在 3~40 nm 范围内的 Au 纳米颗粒来实现水蒸发.实验证明,增大 Au 纳米颗粒的直径可以

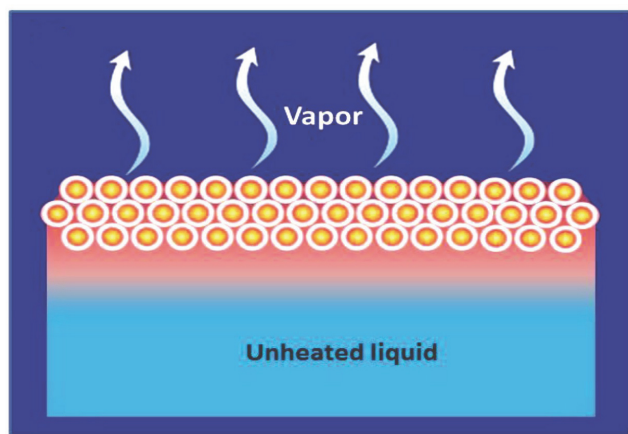


图6 在空气-水界面自组装的金纳米颗粒的浮动等离子体膜辅助下液体的有效蒸发示意图

Figure 6 Schematic illustration of efficient evaporation of liquid assisted by a floating plasmonic film of gold nanoparticles self-assembled at the air-water interface
Reprinted (Adapted or Reprinted in part) with permission from {Small 2014, 10, 3234}. © {2014} John Wiley and Sons.

提高光热效率,在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下,粒径较小的样品(3.4 nm)光热效率约为 11%,而粒径较大的样品(37.7 nm)光热效率为 30%. 吸附效率与吸附系数直接相关,吸附效率随粒径的增大而减小.更重要的是,此研究为进一步研究光热材料特别是贵金属纳米复合材料提供了重要的参考价值.

Wang 等^[49]将 Au 纳米粒子分散在混合纤维素酯膜(MCE)上进行水分蒸发,其太阳能光热转换效率在 $10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下可达 85%. 该工作提出了通过仿生界面太阳能加热来增强太阳能蒸汽产生的方法,对后续光热材料的发展有借鉴意义.与 Au 相比,Ag 因其价格更低且具有相当的光热转换性能而在太阳能热方面展现出更大的潜力^[50].例如,Cao 的研究小组^[51]以西瓜皮提取物为还原剂合成了银纳米颗粒,并构建了一系列不同 Ag 负载量的纳米颗粒薄膜用于太阳能水蒸发系统.实验结果表明,负载 $0.05 \text{ g}\cdot\text{Ag}$ 的纳米颗粒薄膜具有最好的蒸发性能,在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下,蒸发速率为 $1.37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,光热转换效率为 89.3%,超越了许多光热材料.这一工作也表明,用西瓜皮提取液合成的银纳米颗粒是一种理想的海水淡化界面蒸发材料.

大多数金属都具有较窄的太阳能吸收带宽,这限制了光热转换效率的提高.通过合理调节金属材料的吸收中心,有望实现较高的局部加热.基于此,Gao 等^[52]报道了一种廉价的 3D 等离子体太阳能吸收凝胶.其中,金纳米花的宽谱吸收有助于高效的光热转换,而硅胶隔热,减少了热损失.实验证实,该凝胶可有效地用于太阳能水蒸发,在 1 个光照强度($1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)下,等离子体太阳能吸收凝胶的蒸发效率为 85%,比同等条件下纯水的蒸发量高出三倍.并且经过稳定性测试发现此凝胶具有良好的稳定性,有很强的实际应用性.因此,可以通过以下两种方法克服大部分金属固有的窄带吸收:(1)微调纳米粒子的形状和尺寸;(2)纳米颗粒与其他 2D 或 3D 结构材料结合.

3.2 半导体材料

半导体材料具有制备简单、稳定性好、形貌可调、易于功能化等优点.基于此,半导体已经成为研究者广泛关注的一类光热材料.然而,较宽的带隙使其需要吸收高能光子来实现电子-空穴对的有效分离,往往限制了它们的应用^[53].带隙较小的半导体通常具有较大的光吸收范围和高的光子捕获效率,从而使光热转换能力大大增强^[54].因此,选择带隙窄的半导体是拓宽此类太阳能光热材料吸收范围的有效途径.

TiO_x 、TiN、CuS、 MoO_x 等半导体被认为是有效的光热蒸发材料^[55].例如,Wang 等^[28]的研究表明,窄带隙($<0.1 \text{ eV}$)的 Ti_2O_3 具有吸收全光谱太阳能的能力,在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下蒸发速率为 $1.32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,比纯水高出 2.65 倍.Ye 等^[56]先采用 TiO_2 纳米粒子进行锂还原,然后用超薄三氯(1H, 1H, 2H, 2H-全氟辛基)硅烷

(PFOTS)单分子层对其进行表面修饰,最后合成了疏水性钛酸锂。实验结果表明,在 $2\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下钛酸锂薄膜的水蒸发速率为 $0.87\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,比纯水高出 2.4 倍。该工作还指出,高的水蒸发速率、优异的稳定性和耐久性使钛酸锂薄膜在海水淡化中具有潜在的应用价值。

氮化钼(MoN_x)以其低成本、高稳定性和类似于贵金属(VIII 组)的电子结构而闻名,已被广泛用作电催化剂和储能电极材料^[57]。然而,它在光热转换方面的潜力仍有待探索。Zhu 等^[58]报道了双相 $\text{MoN}/\text{Mo}_2\text{N}$ 高效光热材料在太阳能水蒸发系统中的首次应用。结果证实,该材料在整个太阳光谱($200\sim 2500\text{ nm}$)上表现出显著的吸收,且在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光强下水蒸发速率可达 $1.70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,光热转换效率可达 98%。实验还证明了此光热材料具有出色的循环稳定性和可重复使用性。作者认为, MoN_x 材料无疑是未来新兴光热蒸发材料之一,它拓宽了半导体材料在海水淡化领域的应用,具有重大意义。除氮化钼外,另一种半导体材料氧化钼也在海水淡化应用中前景巨大。Wang 等^[59]制备了 V 掺杂的 MoO_3 纳米球材料,并对其太阳能海水蒸发性能(图 7)进行了研究。实验证明,含有 33.3% (摩尔分数) V 掺杂的 MoO_3 纳米球水分蒸发速率在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光照下可达 $2.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

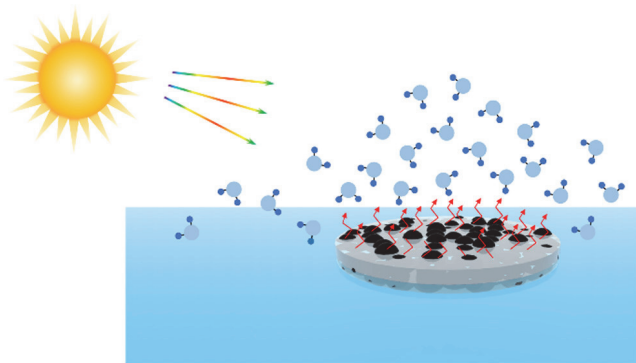


图 7 太阳能蒸发示意图

Figure 7 Solar evaporation diagram

Reprinted (Adapted or Reprinted in part) with permission from {ACS Mater. Lett. 2022, 4, 1584.}. © {2022} American Chemical Society.

Jiang 等^[60]设计了一种宽带半导体泡沫结构,该结构通过泡沫镍(NF)的原位硫化形成了垂直排列的 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{NF}$ 纳米片阵列。研究发现所制备的 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{NF}$ 具有分级多孔结构,大的吸光范围和超亲水的表面。利用这些结构和光热特性,该太阳能蒸发系统在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光照强度下,实现了 $1.29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的水分蒸发率和 87.2% 的光热转换效率。该工作对未来太阳能水蒸发系统的设计有借鉴意义。

Co_3O_4 由于具有相对较窄的带隙($1.5\sim 2.0\text{ eV}$)而被应用于光热材料的设计中。Wang 等^[61]采用水热煅烧法制备了具有纳米级结构的 $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Ni}$ 泡沫材料,并研究

了该复合材料的光热转换性质。 Co_3O_4 的禁带较窄,多层纳米结构固定在三维 Ni 骨架上,增加了光相互作用的长度和吸收时间,因此 $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Ni}$ 泡沫材料具有良好的光吸收性能。在太阳能驱动的水蒸发实验中,蒸发速率可达 $1.226\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,光热转换效率可达 80% 以上(光照强度为 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)。

到目前为止,研究人员已经研究了大量的半导体材料,并在提高其光热转换效率上取得了重大进展。然而,仍然存在一系列的不利因素,如光吸收率低,制约着半导体材料在海水淡化中的应用。在半导体中,光吸收主要取决于其带隙能量,提高半导体光吸收的一种方法是掺杂。此外,掺杂可以改变半导体材料中的纳米结构(窄带隙和带内状态)。例如, Hu 等^[62]通过水热法制备了稳定的 C、N 共掺杂的 TiO_2 纳米片@Ti 板光热材料,在模拟太阳光照射下,其蒸发效率达到 $1.57\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。作者还指出,高的蒸发效率是纳米片结构和掺杂共同作用的结果。类似地, Wang 的小组^[63]制备了 $\text{TiO}_2\text{-Au NW/NPs}$ 光热转换膜,该膜可以高效地收集太阳光。结果表明,在模拟太阳光照射下,蒸发效率可达 90%。

3.3 碳基材料

虽然贵金属纳米粒子具有优异的光吸收性能和光热转换能力,但由于成本昂贵和光吸收率低,在实际应用中具有一定的局限性。而碳基材料具有吸收范围宽、化学稳定性高、原料广、成本低、光热转换效率高等优点,在太阳能应用领域受到了广泛的关注。另外碳基材料密度低,这有利于它们形成漂浮在空气-水界面上的太阳能吸收器^[64]。并且,该类材料还可进行结构优化,以进一步增强光吸收。迄今为止,各种碳基材料包括氧化石墨烯(GO)^[65]、碳纳米管(CNT)^[66]、还原氧化石墨烯(rGO)^[67]、炭黑^[68]、木材^[69]、碳化蘑菇^[70]等被用来制备太阳能驱动的水蒸发器。特别是,以 sp^2 杂化碳原子为主的碳材料,如碳纳米管(CNTs),由于其高的吸光率、优异的热传递性能和机械强度而成为极好的光吸收材料,因此被更广泛地应用于海水淡化领域^[71]。

至今已有多篇报道聚焦在将碳基光热薄膜制备成有效的太阳能蒸汽发生装置。Ghafurian 等^[72]、Miao 等^[13]、Guo 等^[73]开发了 CNT 光热材料。在对比众多 CNT 设计的基础上, Ghafurian 等^[72]的设计思路最为独特。其制备的多壁碳纳米管达到了 94% 的最高蒸发效率。同时, Miao 等^[13]在 CNT 薄膜太阳能蒸发器的设计下,光热转换效率达到 84.6%。Miao 等^[13]和 Guo 等^[73]的研究有共通之处,均通过对隔热层的优化来减少热损失,进而以提高材料太阳能蒸发效率。Wang 等^[64]将碳纳米颗粒(CNPs)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)和聚乙烯醇(PVA)组装成一个太阳能水蒸发器。碳纳米颗粒的加入将泡沫的光吸收率提升至 97%,且不影响固有的低导热性;同时对聚乙烯醇(PVA)进行改性,使其具有亲水性,从而使水能连续输送到空气-水界面上。实验结果表明,在 850

$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下, 蒸发速率和光热转换效率分别可达 $1.26\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 80%.

Xue 等^[68]已经证明, 经过火焰处理的天然木材(F-Wood)可以用作理想的太阳能蒸发器, 在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $3\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光强下, 其光热转换效率分别可以达到 72% 和 81%. 实验结果表明经过火焰处理的木材孔隙结构无序、清晰, 可以有效地输送水分, 起到增大水分蒸发速率的作用. 该工作开拓了天然木材在海水淡化中的应用, 十分具有参考价值. 在此基础上, Chen 等^[74]制作了一种碳纳米管改性的柔性木膜, 木材基质具有高的孔隙结构, 吸光率可达到 98%. 木材的高光吸收率和天然的输水通道有利于太阳能蒸汽的产生, 在 $10\text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的光照强度下, 光热转换效率高达 81%.

Song 等^[75]采用可溶性盐模板法结合超声剥离法制备了二维碳纳米片(2D C), 并用 Cu 纳米颗粒(2D C/Cu)对其进行修饰. 该研究通过改变 Cu 纳米颗粒的含量来优化 2D C/Cu 体系的光热转换效率. 结果发现, 最优的 2D C/Cu 材料在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光强下, 光热转换效率为 65%. 尽管二维光热材料在一定程度上提高了光热转换效率, 但由于水蒸发速率低, 生产工艺复杂、成本高、大规模环境应用不佳等原因, 大多数材料仍处于次优状态. 此时, 三维光热材料由于有效利用三维空间吸收阳光和优异的水传输性能而逐渐引起人们的关注^[76]. 最近, 一项开创性的工作采用化学气相沉积法, 以苯或吡啶为碳源和氮源, 合成了一种氮掺杂的三维多孔石墨烯作为太阳能热吸收体^[77]. 在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下, 其光热转换效率达到 80%, 且该项工作还证明了氮的掺杂通常会打开石墨烯的带隙, 赋予石墨烯半导体特性. 这一工作开拓了氮掺杂的三维多孔石墨烯在海水淡化方面的应用, 具有重要的意义. Kim 等^[78]提出将三维石

墨烯网络(3 DGNs)与木片相结合(图 8). 3 DGNs 有大的光吸收范围, 同时木材具有良好的隔热性能. 在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光强下, 该材料展现出接近 91.8% 的光热转换效率. 随后, Liu 等^[79]受阿拉伯圆顶建筑风格的启发, 设计了一个由天然玉米秸秆形成的 3D 蒸发器. 结果显示该 3D 蒸发器具有优良的蒸汽产生速率, 在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光强下, 水分蒸发速率可达 $2.18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. 这种新颖的结构可以有效地减少热损失, 从而提高太阳能蒸发效率. 以上这些工作将会激发研究者们更多三维光热材料的设计灵感.

尽管有这些进展, 但碳基材料在光热应用中仍有很多问题待解决, 尤其是如何优化碳基材料的多孔结构. 基于上述考虑, Ji 等^[80]开发了一个新系统, 即在碳纳米纤维(CNFs)中引入分级孔进而得到高表面粗糙度的碳纳米纤维(HPCNFs), 并将其用于太阳能水蒸发. 在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光强下, 水分蒸发速率为 $1.78\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 光热转换效率为 96.13%. 与大多数纯碳材料相比, 该系统表现出更高的水分蒸发速率和光热转换效率. 该工作有助于拓展碳基材料在海水淡化领域中的应用.

3.4 聚合物材料

近年来, 聚噻吩(PT)、聚苯胺(PAn)、聚吡咯(PPy)等聚合物光热材料及其衍生物由于其具有分子结构设计、近红外区强吸收、光热转换效率高等特点, 成为一类新型的光热材料^[81]. 除了这些单组分光热材料外, 还可以将上述两种或两种以上的聚合物组合成一种复合材料来集成个体的优点以制备多组分光热剂, 由此形成的复合光热剂显示出更高的光热转换效率^[82].

聚吡咯(PPy)具有大的光吸收范围及高的光热转换效率, 且在室温条件下易于制备, 是一种优异的光吸收

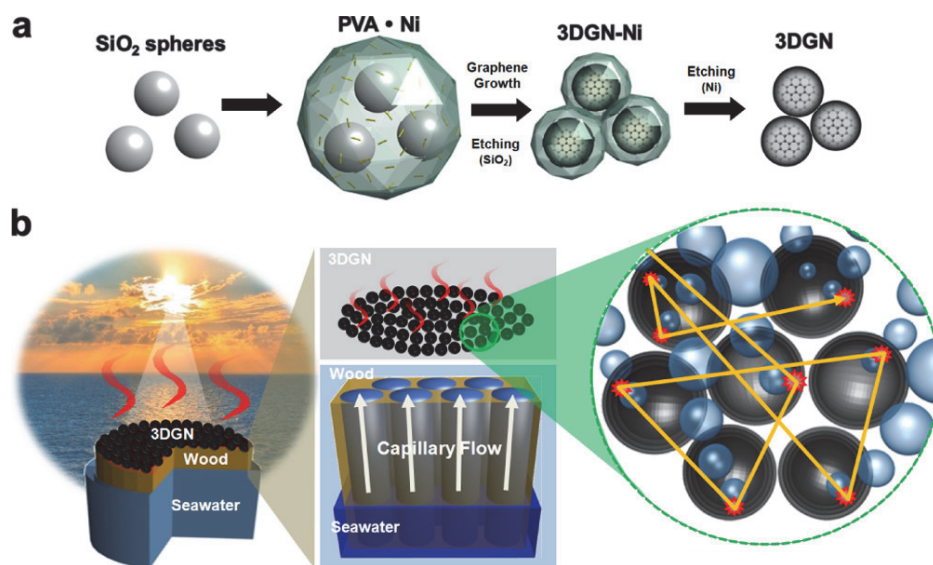


图 8 基于 3DGN 的太阳能海水淡化装置的(a)3DGN 制造过程和(b)工作过程示意图; 插图显示了 3DGN 介孔结构中光的多次散射和气泡的形成
Figure 8 Schematic of (a) 3DGN fabrication procedure and (b) working process of the 3DGN-based solar desalination device; the right inset shows multiple scattering of light and the formation of water bubbles in the mesoporous structure of 3DGN
Reprinted (Adapted or Reprinted in part) with permission from {ACS Appl. Mater. Inter. 2018, 10, 15602.}. © {2018} American Chemical Society.

材料^[83]。例如, Li 等^[84]采用吡咯在天然木材表面进行原位聚合的方法, 研制了一种具有深黑色涂层的木制太阳能界面蒸发系统。结果表明, 制备的 PPY-Wood 复合材料在海水淡化中具有广阔的应用前景。类似的, Mu 等^[85]通过用聚吡咯对 Ca^{2+} 交联的木棉纤维气凝胶进行改性, 制备出了木棉纤维-聚吡咯气凝胶, 并研究了其结构、光吸收和机械强度。实验结果证明, 该气凝胶具有高孔隙率、高吸光率和高机械强度。作为太阳能水蒸发装置, 在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光强下, 光热转换效率达到 82.4%。Zhou 等^[86]还介绍了一种高水合性水凝胶, 由聚乙烯醇和壳聚糖为水合骨架, 聚吡咯为吸光剂。结果表明, 提高氢氧化钠的水合性可以改变水的状态, 从而促进水的蒸发。在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下蒸汽生成速率达到 $3.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

聚酯是一种合成聚合物, 由于其低廉的价格和优异的机械性能, 可将其应用于高效太阳能蒸发。例如, He 等^[87]设计了一种亲水性聚酯织物(BPF), 在 $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下, 蒸发速率达到 $0.57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 几乎是纯水蒸发速率的 3.2 倍, 同时, 光热转换效率达到 48.3%。作者认为优异的光热转换效率是以出色的光吸收能力为前提的。同时实验也证明了 BPF 具有低反射效率, 这可归因于由圆形长丝组成的织物表面的漫反射, 低反射效率有利于增强光热转换效率。类似的, 聚酰亚胺因其耐高温性被研究人员广泛关注。Wang 等^[88]开发了一种聚酰亚胺/MXene 混合气凝胶基复合材料。实验证明, 该材料具有热循环稳定性高、抗热冲击性能好、形状稳定性好等优势, 可用于海水淡化。更重要的是, 在 $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下, 蒸发率达到 50.6%。此复合材料在可持续海水淡化中具有很大的应用潜力。

虽然基于二维光热材料作为光吸收剂的太阳能海水淡化技术得到了广泛的发展, 但理论产水量低, 严重的盐沉积等问题限制了二维光热材料的工业应用。基于此, 用于海水淡化的三维多孔光热材料的研究已经有了一定的发展。Wang 的小组^[89]以聚吡咯改性的玉米秸秆(PMS)为原料制备了新型太阳能蒸发器, 这种新型 PMS 蒸发器具有垂直的血管状结构, 极大地提高了太阳能利用率, 促进蒸发。此外, Wang 等^[90]还设计了一种亲水性 3D 多孔光热纤维毡(PFF), 在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照强度下, 其水蒸发速率为 $1.48 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 蒸发效率达到 87.4%。更重要的是, PFF 在高盐浓度[10% (w) NaCl]条件下具有优异的耐盐性。作者认为优异的蒸发效率可归因于 PFF 的内部三维结构为盐离子迁移循环提供了充足的传输通道。这些工作都证明了太阳能脱盐具有实际工业应用的前景。

另外, 研究人员还发现, 掺杂聚酸可以促进 PPY 水凝胶的形成, 从而导致更高的光热转换效率。受此启发, Wu 等^[91]采用“多元酸掺杂”策略, 通过引入丁烷四羧酸(BTA), 合成了一种新型的 PPY/BTA 水凝胶。PPY/BTA 水凝胶在模拟阳光($1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)下表现出更高

的光热转换效率($\eta=89\%$)。此外, 水的蒸发速率可达 $1.90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 是纯 PPY 产品($1.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)的 1.55 倍。

近年来, 利用简单单体构建具有宽光吸收和高效光热转换的共轭高分子材料也取得了许多进展^[92]。例如, 聚多巴胺和聚吡咯共轭聚合物表现出强烈的光吸收和高的光热转换效率^[93]。Liang 等^[94]通过对 CBT-Cys 键缩合反应的改性和对原料的合理设计, 合成了一种聚-2-苯基苯并双噻唑(PPBBT)及其二己基衍生物。实验证实, 该共轭聚合物具有良好的光热性能, 并在模拟太阳光下($0.8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$)具有与单壁碳纳米管相当的光热转换效率。此策略为后续聚合物材料的开发提供了指导性意见。

聚合物光热材料在海水淡化领域中尽管取得了进展, 但仍面临着一些严峻的挑战: (1)大部分聚合物在整个太阳光谱范围内表现出窄的光吸收范围。(2)普通聚合物容易受酸、碱和有机溶剂的影响。基于此, Wan 等^[95]通过将油性聚合物苯并噻唑融合蒽醌亚胺的衍生物与 2,5-双(三甲基锡基)噻吩的聚合物(E-T)涂覆在三聚氰胺海绵(MFS)上来制备一种高效的太阳能水蒸发器, 该蒸发器在 1 个太阳照射下, 水蒸发速率可达 $2.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。其中, E-T 对近红外光具有高的利用率, 实验还证实了此材料具有优异的耐久性和稳定性, 是最具潜力的太阳能水蒸发器之一。

4 展望

近几年来, 光热材料的设计和开发取得了巨大的进展, 光热转换效率高达 80%以上^[96]。虽然成果显著, 但这些材料中的大多数都面临着瓶颈, 如光吸收范围较窄和热损失较大等^[97]。因此未来仍需要探索更优的光热材料设计方法。基于以上研究现状, 人们提出了各种策略来增强太阳能水蒸发。其中, 共价/金属有机框架因其孔隙率大、组成和结构可设计而在海水淡化领域中脱颖而出。除此之外, 其他类型光热材料的新策略开发也很重要。因此, 笔者认为, 海水淡化领域中光热材料开发的研究重点将主要集中在以下三个方面上。

4.1 COFs 基光热材料的开发

新兴的共价有机框架(COFs)是一类具有大表面积和组成多样性的有机多孔材料, COFs 的拓扑设计和功能修饰特性使其有望成为太阳能海水淡化领域的优秀候选者^[98]。例如, Qiu 等^[99]采用原位生长法制备了一种苯并噻唑基共价有机框架(COF)海绵(BHMS)材料。在 $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的光照下, BHMS 表现出高蒸发速率($1.39 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。该工作首次提出并验证了利用 BHMS 来提高水蒸发速率的新想法, 对未来光热材料的开发提供了思路, 具有重要的借鉴意义。

Darling 等^[100]利用多孔材料作为模板, 在 1,4-苯二醛和吡咯的酸催化下发生脱水反应, 一步合成了模板@卟啉有机框架(POF)材料。这些 POF 基材料在阳光驱动

下表现出较强的水分蒸发性能,其中木材@卟啉有机框架(POF)的光热转换效率最高 $[(79.6 \pm 3.0)\%]$.该研究为基于POF材料的太阳能蒸发器的制造提供了一种通用的、简单的、可扩展的合成策略.然而,上述工作需要将COFs材料负载到多孔基板上,由于基板和光热转换材料之间的分层会导致材料整体的稳定性降低.因此,探索独立式纯COF膜在海水淡化中的应用是有必要的.基于此,Zhang等^[101]设计并合成了富偶氮的共价有机框架(NKCOF-47)材料,通过界面聚合法直接将其形成独立的膜,用于高效的太阳能水蒸发.实验结果表明,NKCOF-47膜在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光照强度下的水分蒸发速率和光热转换效率分别可达 $3.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和94%.作者指出,丰富的光响应基团及高度有序的多孔结构是促使COF膜实现高光吸收和太阳能光热转换效率的原因.CO膜的良好性能和可重复利用性使其成为海水淡化的良好平台.

缺陷工程是一种控制缺陷的组成和定位,同时保持整体结构完整性的方法.缺陷工程策略可以为多孔结晶聚合物提供新的可能性,如催化、离子传导、发光、磁性、热和机械性能^[102].基于此,Li等^[103]提出一种通过缺陷工程将顺磁性自由基引入COFs中的策略.自由基特性赋予COFs高的近红外吸收能力,从而实现太阳光的高效收集.基于自由基COFs(GS-COF-1)构建的太阳能蒸发系统在1个光照强度($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)下表现出最高的水分蒸发速率($1.38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$).此外,一系列工作^[104]也表明,共价有机框架(COFs)材料是一种潜在的光热候选材料,可有效提高光热转换效率.

4.2 MOFs基光热材料的开发

金属有机骨架材料(Metal-Organic Frameworks, MOFs)是一种具有超大比表面积、孔径有序可控等优点的多孔结晶材料,在光热转换领域显示出巨大的应用潜力^[105].

金属有机骨架(MOF)碳纳米结构光热材料由于其优异的光吸收性能、高的化学稳定性和良好的光热转换效率,在太阳能水蒸发中已成为人们关注的焦点.基于此,Chen等^[106]通过水热法制备了具有多孔结构的Cu-MOF衍生碳材料用于光热转换.经研究发现在 500°C 条件下得到的样品光热转换效率最高,在一个光照强度下($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)可达64.42%.作者还指出,孔结构与光热转换效率密切相关.类似地,Ma等^[96]采用简单的溶剂反应将叶状2D MOF的前驱体沉积在不锈钢网上,将其煅烧,然后与聚乙烯泡沫(EPE)结合,从而得到具有高吸光性能(97%)的蒸发器.在一个光照强度下($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$),蒸发器的蒸发速率为 $1.222 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,光热转换效率为84.3%.在海水淡化中表现出优异的性能.

Ma小组^[107]合理设计并制备出Cu-CAT-1 MOF光热材料,如图9所示,在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光照强度下可实现 $1.50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高水分蒸发速率.作者认为,高的光

热转换效率主要是由于Cu-CAT-1 MOF材料大的光吸收范围保证了太阳能的高效利用.Wang等^[108]制备的Fe-MOF-74基材料具有优异的吸光性能、低热导率、超亲水性、优异的耐盐性、高蒸发速率等,且光热转换效率在一个光照强度下($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)为81.5%.纯MOF光热材料的太阳能热利用效率有限,为此,Xu等^[109]提出将纤维素膜与Ni-HITP相结合,改性后的Ni-HITP在一个光照强度下($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)水蒸发速率高达 $2.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

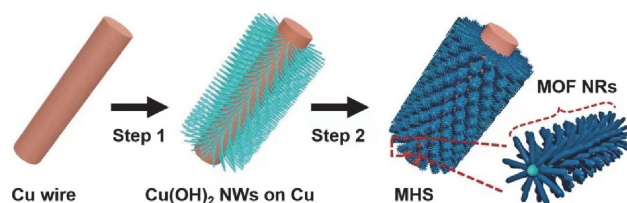


图9 Cu-CAT-1 MOF光催化剂的制备示意图

Figure 9 Schematic illustration of the construction of Cu-CAT-1 MOF photocatalysts

Reprinted (Adapted or Reprinted in part) with permission from {Adv. Mater. 2019, 31, 1808249.}. © {2019} John Wiley and Sons.

Bu的研究小组^[110]设计并制备了一种全新NKU-128 MOF材料.该材料成本低,可柔性折叠弯曲,环境友好,且可通过后修饰优化其亲疏水性.基于此,我们推测此MOF材料未来可用于高效海水淡化.

据我们所了解,MOFs基材料在海水淡化领域中的应用报道屈指可数,上述工作将为日后更多MOFs基光热材料的研究打下基础.制备MOFs基光热材料,可以充分利用MOFs的内部空间,拓宽光吸收范围,具有广阔应用前景.

4.3 其他类型光热材料的开发

太阳能水蒸发效率与光照强度有着密切的关系,目前的研究大多是在聚光条件下进行的.因此,提升非聚光条件下太阳能水蒸发性能对于实际的海水淡化技术应用具有重要意义.一方面,需要进一步减少能量损失.比如在光吸收体和水体之间引入冷蒸发面,来自光吸收体的传导热可以在到达水体之前被冷蒸发面充分吸收并用于冷蒸发.其次,考虑到太阳辐射的间歇性,在水蒸发系统中加入储能部件,有利于蒸发过程的持续进行.另一方面,结合风能、热能、电能和机械能的太阳能蒸发器越来越受到研究者的关注.通过能量协同获得更高的蒸发效率,或者是太阳能蒸发器产生的额外能量被回收利用,这将会成为未来太阳能水蒸发系统的一个发展方向.

5 结论

与传统的太阳能水蒸发系统相比,界面式太阳能水蒸发系统操作简单、成本低、效率高,在海水淡化领域中具有很大的发展潜力.本文主要从光热材料的种类、光热材料的设计与开发以及光热材料所面临的机遇与

挑战三个方面进行了论述. 总结了各种具有强吸收能力的高效光热材料的研究进展, 便于人们对其光热转换机理和应用有一个更全面的认识. 迄今为止, 界面太阳能水蒸发系统已经取得了长足的进展, 不仅开发了各种高效率的光热材料, 而且还通过创新的光热系统设计, 提高了界面太阳能水蒸发系统中光热材料的效率. 尽管取得了一些成绩, 前景光明, 但太阳能自然光照下的光吸收利用率和淡水的实际生产效率还有待进一步提高.

COFs 基光热材料、MOFs 基光热材料以及其他类型的光热材料, 以其自身的优越性, 为光热材料的开发提供了新方向, 在海水淡化领域展现出光明的应用前景. 最后, 我们相信, 合理、高效的界面式太阳能水蒸发系统的设计将在未来蓬勃发展.

作者简介



杨地, 1998 年出生于河南镇平, 2017 年毕业于桂林理工大学, 获学士学位. 目前在卜显和教授指导下攻读硕士学位. 研究兴趣为光催化水分解产氢.



史潇凡, 1997 年出生于安徽合肥, 2019 年毕业于南京航空航天大学, 获学士学位. 2022 年毕业于南开大学, 获材料工程硕士学位, 导师为卜显和教授. 现于武汉大学攻读无机化学博士学位, 导师为邓鹤翔教授. 研究方向为 MOF 基光催化剂的合成与性能研究.



张冀杰, 2012 年和 2018 年在天津大学获得学士和博士学位. 2018 年至今在南开大学材料科学与工程学院卜显和院士课题组从事博士后研究. 主要研究领域涉及功能金属有机框架材料的设计构筑和太阳能催化转化反应过程中的机理研究.



卜显和, 教授、博导、国家杰青、长江学者、天津市首批杰出人才、全国政协委员、英国皇家化学会会士、南开大学材料科学与工程学院院长、中国科学院院士. 在配位聚合物的功能导向构筑、结构调控及性能研究等方面取得了系统成果.

References

- [1] Traver, E.; Karaballi, R. A.; Monfared, Y. E.; Daurie, H.; Gagnon, G. A.; Dasog, M. J. *ACS Appl. Nano. Mater.* **2020**, 3, 2787.
- [2] Jiang, C.; Feng, X.; Wang, B. *Acta Chim. Sinica* **2020**, 78, 466 (in Chinese). (蒋成浩, 冯霄, 王博, 化学学报, **2020**, 78, 466.)
- [3] Drioli, E.; Ali, A.; Macedonio, F. *J. Desalination* **2015**, 356, 56.
- [4] Childress, A. E.; Elimelech, M. *J. Membrane Sci.* **1996**, 119, 253.
- [5] Ortiz, J. M.; Sotoca, J. A.; Expósito, E.; Gallud, F.; García-García, V.; Montiel, V.; Aldaz, A. *J. Membrane Sci.* **2005**, 252, 65.
- [6] Qu, K. Y.; Han, Q. X. *Construction & Design for Engineering* **2020**, 02, 140 (in Chinese). (曲科宇, 韩庆祥, 工程建设与设计, **2020**, 02, 140.)
- [7] Chaplin, B. P. *Environ. Sci.: Processes Impacts* **2014**, 16, 1182.
- [8] Xu, J.; Xu, F.; Qian, M.; Li, Z.; Sun, P.; Hong, Z.; Huang, F. *Nano Energy* **2018**, 53, 425.
- [9] Liu, X.; Tian, Y.; Chen, F.; Caratenuto, A.; DeGiorgis, J. A.; EL-Sonbaty, M.; Wan, Y.; Ahlgren, R.; Zheng, Y. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, 31, 2100911.
- [10] Neumann, O.; Feronti, C.; Neumann, A. D.; Dong, A.; Schell, K.; Lu, B.; Kim, E.; Quinn, M.; Thompson, S.; Grady, N. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2013**, 110, 11677.
- [11] Liu, S.; Li, S.; Lin, M. *ACS Energy Lett.* **2023**, 8, 1680.
- [12] (a) Ghasemi, H.; Ni, G.; Marconnet, A. M.; Loomis, J.; Yerci, S.; Miljkovic, N.; Chen, G. *Nat. Commun.* **2014**, 5, 4449. (b) Kashyap, V.; Ghasemi, H. *J. Mater. Chem. A* **2020**, 8, 7035.
- [13] Miao, E.-D.; Ye, M.-Q.; Guo, C.-L.; Liang, L.; Liu, Q.; Rao, Z.-H. *Appl. Therm. Eng.* **2019**, 149, 1255.
- [14] (a) Yao, J.; Yang, G. J. *J. Mater. Chem. A* **2018**, 6, 3869. (b) Zhu, G.; Wang, L.; Zhang, Y.; Yu, W.; Xie, H. *Appl. Phys. A-Mater.* **2019**, 125, 151.
- [15] (a) Liu, H.; Chen, C.; Chen, G.; Kuang, Y.; Zhao, X.; Song, J.; Jia, C.; Xu, X.; Hitz, E.; Xie, H. *Adv. Energy Mater.* **2018**, 8, 1701616. (b) Zhu, L.; Gao, M.; Peh, C. K. N.; Wang, X.; Ho, G. W. *Adv. Energy Mater.* **2018**, 8, 1702149.
- [16] Mu, P.; Zhang, Z.; Bai, W.; He, J.; Sun, H.; Zhu, Z.; Liang, W.; Li, A. *Adv. Energy Mater.* **2019**, 9, 1802158.
- [17] Wang, Y.; Wu, X.; Yang, X.; Owens, G.; Xu, H. *Nano Energy* **2020**, 78, 105269.
- [18] Zhao, W.; Gong, H.; Song, Y.; Li, B.; Xu, N.; Min, X.; Liu, G.; Zhu, B.; Zhou, L.; Zhang, X.; -X.; Zhu, J. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, 31, 2100025.
- [19] (a) Song, C.; Qi, D.; Han, Y.; Xu, Y.; Xu, H.; You, S.; Wang, W.; Wang, C.; Wei, Y.; Ma, J. *Environ. Sci. Technol.* **2020**, 54, 9025. (b) Ma, J.; An, L.; Liu, D.; Yao, J.; Qi, D.; Xu, H.; Song, C.; Cui, F.; Chen, X.; Ma, J.; Wang, W. *Environ. Sci. Technol.* **2022**, 56, 9797. (c) Qi, D.; Liu, Y.; Liu, Y.; Liu, Z.; Luo, Y.; Xu, H.; Zhou, X.; Zhang, J.; Yang, H.; Wang, W.; Chen, X. *Adv. Mater.* **2020**, 32, 2004401.
- [20] Yang, H.; Sun, Y.; Peng, M.; Cai, M.; Zhao, B.; Li, D.; Liang, Z.; Jiang, L. *ACS Nano* **2022**, 16, 2511.
- [21] Xie, M.; Zhang, P.; Cao, Y.; Yan, Y.; Wang, Z.; Jin, C. *npj Clean Water* **2023**, 6, 12.
- [22] Zhou, X.; Li, J.; Liu, C.; Wang, F.; Chen, H.; Zhao, C.; Sun, H.; Zhu, Z. *Int. J. Energy Res.* **2020**, 44, 9213.
- [23] Shi, L.; Shi, Y.; Li, R.; Chang, J.; Zaouri, N.; Ahmed, E.; Jin, Y.

- Zhang, C.; Zhuo, S.; Wang, P. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2018**, *6*, 8192.
- [24] (a) Zhu, L.; Gao, M.; Peh, C. K. N.; Ho, G. W. *Mater. Horiz.* **2018**, *5*, 323. (b) Xiao, L.; Chen, X.; Yang, X.; Sun, J.; Geng, J. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2020**, *2*, 4273.
- [25] (a) Jain, P. K.; Huang, X.; El-Sayed, I. H.; El-Sayed, M. A. *Acc. Chem. Res.* **2008**, *41*, 1578. (b) Liu, G.; Xu, J.; Wang, K. *Nano Energy* **2017**, *41*, 269.
- [26] Gao, M.; Connor, P. K. N.; Ho, G. W. *Energy Environ. Sci.* **2016**, *9*, 3151.
- [27] Yi, L.; Ci, S.; Luo, S.; Shao, P.; Hou, Y.; Wen, Z. *Nano Energy* **2017**, *41*, 600.
- [28] Wang, J.; Li, Y.; Deng, L.; Wei, N.; Weng, Y.; Dong, S.; Qi, D.; Qiu, J.; Chen, X.; Wu, T. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1603730.
- [29] Li, W.; Feng, W.; Wu, S.; Wang, W.; Yu, D. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *292*, 120989.
- [30] Vélez-Cordero, J. R.; Hernandez-Cordero, J. *Int. J. Therm. Sci.* **2015**, *96*, 12.
- [31] (a) Song, X.; Song, H.; Xu, N.; Yang, H.; Zhou, L.; Yu, L.; Zhu, J.; Xu, J.; Chen, K. *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6*, 22976. (b) Yang, T.; Lin, H.; Lin, K.-T.; Jia, B. *Sustainable Mater. Technol.* **2020**, *25*, e00182.
- [32] Kong, Y.; Dan, H.; Kong, W.; Gao, Y.; Shang, Y.; Ji, K.; Yue, Q.; Gao, B. *J. Mater. Chem. A* **2020**, *8*, 24734.
- [33] Gao, M.; Peh, C. K.; Phan, H. T.; Zhu, L.; Ho, G. W. *Adv. Energy Mater.* **2018**, *8*, 1800711.
- [34] (a) Fang, J.; Liu, J.; Gu, J.; Liu, Q.; Zhang, W.; Su, H.; Zhang, D. *Chem. Mater.* **2018**, *30*, 6217. (b) Zhang, W.; Zhu, W.; Shi, S.; Hu, N.; Suo, Y.; Wang, J. *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6*, 16220.
- [35] (a) Wang, X.; Liu, Q.; Wu, S.; Xu, B.; Xu, H. *Adv. Mater.* **2019**, *31*, 1807716. (b) Wang, Y.; Wang, C.; Song, X.; Huang, M.; Megarajan, S. K.; Shaikat, S. F.; Jiang, H. *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6*, 9874.
- [36] (a) Liu, Y.; Liu, Z.; Huang, Q.; Liang, X.; Zhou, X.; Fu, H.; Wu, Q.; Zhang, J.; Xie, W. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 2581. (b) Liu, Y.; Yu, S.; Feng, R.; Bernard, A.; Liu, Y.; Zhang, Y.; Duan, H.; Shang, W.; Tao, P.; Song, C. *Adv. Mater.* **2015**, *27*, 2768.
- [37] (a) Ren, H.; Tang, M.; Guan, B.; Wang, K.; Yang, J.; Wang, F.; Wang, M.; Shan, J.; Chen, Z.; Wei, D. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1702590. (b) Sajadi, S. M.; Farokhnia, N.; Irajizad, P.; Hasnain, M.; Ghasemi, H. *J. Mater. Chem. A* **2016**, *4*, 4700.
- [38] (a) Shi, L.; Shi, Y.; Zhuo, S.; Zhang, C.; Aldrees, Y.; Aleid, S.; Wang, P. *Nano Energy* **2019**, *60*, 222. (b) Yi, L.; Qi, D.; Shao, P.; Lei, C.; Hou, Y.; Cai, P.; Wang, G.; Chen, X.; Wen, Z. *Nanoscale* **2019**, *11*, 9958.
- [39] Li, Z.; Wang, C.; Su, J.; Ling, S.; Wang, W.; An, M. *Sol. RRL* **2019**, *3*, 1800206.
- [40] Wang, W.; Wen, H.; Shi, J.; Su, J.; Li, Z.; Wang, C.; Yan, X. *Sol. RRL* **2019**, *3*, 1900180.
- [41] Jeon, J.; Park, S.; Lee, B. *Sol. Energy* **2016**, *132*, 247.
- [42] Chen, M.; He, Y.; Zhu, J.; Kim, D. *Energy Convers. Manage.* **2016**, *112*, 21.
- [43] Zhou, J.; Gu, Y.; Deng, Z.; Miao, L.; Su, H.; Wang, P.; Shi, J. *Sustainable Mater. Technol.* **2019**, *19*, e00090.
- [44] Choi, W.; Park, J. Y.; Kim, Y. J. *Ind. Eng. Chem.* **2021**, *95*, 120.
- [45] Fu, Y.; Mei, T.; Wang, G.; Guo, A.; Dai, G.; Wang, S.; Wang, J.; Li, J.; Wang, X. *Appl. Therm. Eng.* **2017**, *114*, 961.
- [46] Zheng, Z.; Li, H.; Zhang, X.; Jiang, H.; Geng, X.; Li, S.; Tu, H.; Cheng, X.; Yang, P.; Wan, Y. *Nano Energy* **2020**, *68*, 104298.
- [47] Wang, Z.; Liu, Y.; Tao, P.; Shen, Q.; Yi, N.; Zhang, F.; Liu, Q.; Song, C.; Zhang, D.; Shang, W. *Small* **2014**, *10*, 3234.
- [48] Guo, A.; Fu, Y.; Wang, G.; Wang, X. *RSC Adv.* **2017**, *7*, 4815.
- [49] Wang, X.; He, Y.; Liu, X.; Cheng, G.; Zhu, J. Q. *Appl. Energy* **2017**, *195*, 414.
- [50] (a) Beyene, H. D.; Werkneh, A. A.; Bezabh, H. K.; Ambaye, T. G. *Sustainable Mater. Technol.* **2017**, *13*, 18. (b) Iyahrja, S.; Rajadurai, J. S. *AIP Adv.* **2015**, *5*, 057103.
- [51] Cao, H.; Cui, T.; Wang, W.; Li, S.; Tang, X.; Wang, H.; Zhu, G. *Mater. Res. Express* **2020**, *7*, 045005.
- [52] Gao, M.; Peh, C. K.; Phan, H. T.; Zhu, L.; Ho, G. W. *Adv. Energy Mater.* **2018**, *8*, 1800711.
- [53] Gao, Y.; Wu, J.; Wang, J.; Fan, Y.; Zhang, S.; Dai, W. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 11036.
- [54] Su, L.; Hu, Y.; Ma, Z.; Miao, L.; Zhou, J.; Ning, Y.; Chang, Z.; Wu, B.; Cao, M.; Xia, R. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2020**, *210*, 110484.
- [55] Sheikh, M.; Pazirofteh, M.; Dehghani, M.; Asghari, M.; Rezakazemi, M.; Valderrama, C.; Cortina, J.-L. *Chem. Eng. J.* **2020**, *391*, 123475.
- [56] Ye, M.; Wang, X.; Zhou, P.; Chen, R.; Gan, Q.; Zhang, T. *Water Supply* **2020**, *20*, 478.
- [57] (a) Nandi, D. K.; Sen, U. K.; Choudhury, D.; Mitra, S.; Sarkar, S. K. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2014**, *6*, 6606. (b) Zhu, Y.; Chen, G.; Xu, X.; Yang, G.; Liu, M.; Shao, Z. *ACS Catal.* **2017**, *7*, 3540.
- [58] Zhu, L.; Sun, L.; Zhang, H.; Yu, D.; Aslan, H.; Zhao, J.; Li, Z.; Yu, M.; Besenbacher, F.; Sun, Y. *Nano Energy* **2019**, *57*, 842.
- [59] Bai, H.; Hu, J.; Lam, S. H.; Guo, Y.; Zhu, X.-M.; Yang, Z.; Wang, J. *ACS Mater. Lett.* **2022**, *4*, 1584.
- [60] Jiang, H.; Ai, L.; Chen, M.; Jiang, J. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2020**, *8*, 10833.
- [61] Wang, P.; Gu, Y.; Miao, L.; Zhou, J.; Su, H.; Wei, A.; Mu, X.; Tian, Y.; Shi, J.; Cai, H. *Sustainable Mater. Technol.* **2019**, *20*, e00106.
- [62] Xue, C.; Huang, R.; Xue, R.; Chang, Q.; Li, N.; Zhang, J.; Hu, S.; Yang, J. *Alloys Compd.* **2022**, *909*, 164843.
- [63] Song, X.; Wang, P.; Huang, Y.; Zhu, X.; Chio, U.-F.; Wang, F.; Wang, G.; Wang, W.; Liu, B. *Nano Res.* **2023**, DOI: 10.1007/s12274-023-5546-9.
- [64] Wang, S.; Almenabawy, S. M.; Kherani, N. P.; Leung, S. N.; O'Brien, P. G. *ACS Appl. Energy Mater.* **2020**, *3*, 3378.
- [65] (a) Hu, X.; Xu, W.; Zhou, L.; Tan, Y.; Wang, Y.; Zhu, S.; Zhu, J. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1604031. (b) Jiang, Q.; Tian, L.; Liu, K. K.; Tadepalli, S.; Raliya, R.; Biswas, P.; Naik, R. R.; Singamaneni, S. *Adv. Mater.* **2016**, *28*, 9400.
- [66] (a) Kou, H.; Liu, Z.; Zhu, B.; Macharia, D. K.; Ahmed, S.; Wu, B.; Zhu, M.; Liu, X.; Chen, Z. *Desalination* **2019**, *462*, 29. (b) Wang, Y.; Zhang, L.; Wang, P. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2016**, *4*, 1223.
- [67] (a) Liu, C.; Cai, C.; Ma, F.; Zhao, X.; Ahmad, H. J. *Colloid Interface Sci.* **2020**, *560*, 103. (b) Zhang, Q.; Xiao, X.; Wang, G.; Ming, X.; Liu, X.; Wang, H.; Yang, H.; Xu, W.; Wang, X. *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6*, 17212.
- [68] Xue, G.; Liu, K.; Chen, Q.; Yang, P.; Li, J.; Ding, T.; Duan, J.; Qi, B.; Zhou, J. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 15052.
- [69] Xu, N.; Hu, X.; Xu, W.; Li, X.; Zhou, L.; Zhu, S.; Zhu, J. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1606762.
- [70] Shi, L.; Wang, Y.; Zhang, L.; Wang, P. *J. Mater. Chem. A* **2017**, *5*, 16212.
- [71] (a) Behabtu, N.; Young, C. C.; Tsentelovich, D. E.; Kleinerman, O.; Wang, X.; Ma, A. W.; Bengio, E. A.; Waarbeek, R. F.; de Jong, J. J.; Hoogerwerf, R. E. *Science* **2013**, *339*, 182. (b) Hone, J.; Llaguno, M.; Nemes, N.; Johnson, A.; Fischer, J.; Walters, D.; Casavant, M.; Schmidt, J.; Smalley, R. *Appl. Phys. Lett.* **2000**, *77*, 666.
- [72] Ghafurian, M. M.; Niazmand, H.; Dastjerd, F. T.; Mahian, O. *Chem. Eng. Sci.* **2019**, *207*, 79.
- [73] Guo, C.-L.; Miao, E.-D.; Zhao, J.-X.; Liang, L.; Liu, Q. *Sol. Energy* **2019**, *188*, 1283.
- [74] Chen, C.; Li, Y.; Song, J.; Yang, Z.; Kuang, Y.; Hitz, E.; Jia, C.; Gong, A.; Jiang, F.; Zhu, J. Y.; Yang, B.; Xie, J.; Hu, L. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1701756.
- [75] Song, J.; Li, J.; Bai, X.; Kang, L.; Ma, L.; Zhao, N.; Wu, S.; Xue, Y.; Li, J.; Ji, X. *J. Mater. Sci. Technol.* **2021**, *87*, 83.
- [76] Deng, Z.; Miao, L.; Liu, P.-F.; Zhou, J.; Wang, P.; Gu, Y.; Wang, X.; Cai, H.; Sun, L.; Tanemura, S. *Nano Energy* **2019**, *55*, 368.
- [77] Ito, Y.; Tanabe, Y.; Han, J.; Fujita, T.; Tanigaki, K.; Chen, M. *Adv. Mater.* **2015**, *27*, 4302.
- [78] Kim, K.; Yu, S.; An, C.; Kim, S.-W.; Jang, J.-H. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2018**, *10*, 15602.
- [79] Song, C.; Irshad, M. S.; Jin, Y.; Hu, J.; Liu, W. *Desalination* **2022**, *544*, 116125.
- [80] Luo, Q.; Yang, Y.; Wang, K.; Yu, J.; Wang, R.; Ji, D.; Qin, X. *Sci. China Mater.* **2023**, DOI: 10.1007/s40843-023-2431-3.
- [81] Li, L.; Liu, Y.; Hao, P.; Wang, Z.; Fu, L.; Ma, Z.; Zhou, J. *Biomaterials* **2015**, *41*, 132.
- [82] Xiao, L.; Sun, J.; Liu, L.; Hu, R.; Lu, H.; Cheng, C.; Huang, Y.; Wang, S.; Geng, J. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 5382.
- [83] (a) Huang, X.; Yu, Y.-H.; de Llergo, O. L.; Marquez, S. M.; Cheng, Z. *RSC Adv.* **2017**, *7*, 9495. (b) Yang, K.; Xu, H.; Cheng, L.; Sun, C.; Wang, J.; Liu, Z. *Adv. Mater.* **2012**, *24*, 5586.
- [84] Wang, Z.; Yan, Y.; Shen, X.; Jin, C.; Sun, Q.; Li, H. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 20706.
- [85] Mu, P.; Bai, W.; Fan, Y.; Zhang, Z.; Sun, H.; Zhu, Z.; Liang, W.; Li, A. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 9673.
- [86] Zhou, X.; Zhao, F.; Guo, Y.; Rosenberger, B.; Yu, G. *Sci. Adv.* **2019**,

- 5, eaaw5484.
- [87] He, J.; Foysal, T. R.; Yang, H.; Islam, M.; Li, L.; Li, W.; Cui, W. *Mater. Lett.* **2020**, *261*, 126962.
- [88] Zheng, Z.; Liu, H.; Wu, D.; Wang, X. *Chem. Eng. J.* **2022**, *440*, 135862.
- [89] Xu, Y.; Tang, C.; Ma, J.; Liu, D.; Qi, D.; You, S.; Cui, F.; Wei, Y.; Wang, W. *Environ. Sci. Technol.* **2020**, *54*, 5150.
- [90] Zhang, J.; Luo, X.; Zhang, X.; Xu, Y.; Xu, H.; Zuo, J.; Liu, D.; Cui, F.; Wang, W. *Chin. Chem. Lett.* **2021**, *32*, 1442.
- [91] Wu, Y.; Shen, L.; Zhang, C.; Gao, H.; Chen, J.; Jin, L.; Lin, P.; Zhang, H.; Xia, Y. *Desalination* **2021**, *505*, 114766.
- [92] Lu, X.; Yuan, P.; Zhang, W.; Wu, Q.; Wang, X.; Zhao, M.; Sun, P.; Huang, W.; Fan, Q. *Polym. Chem.* **2018**, *9*, 3118.
- [93] Shao, B.; Wang, Y.; Wu, X.; Lu, Y.; Yang, X.; Chen, G. Y.; Owens, G.; Xu, H. *J. Mater. Chem. A* **2020**, *8*, 11665.
- [94] Chen, P.; Ma, Y.; Zheng, Z.; Wu, C.; Wang, Y.; Liang, G. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 1192.
- [95] Li, H. C.; Li, H. N.; Zou, L. Y.; Li, Q.; Chen, P. F.; Quan, X. N.; Deng, K.; Sheng, C. Q.; Ji, J.; Fan, Q.; Xu, Z. K.; Wan, J. H. *J. Mater. Chem. A* **2023**, *11*, 2933.
- [96] Ma, S.; Qarony, W.; Hossain, M. I.; Yip, C. T.; Tsang, Y. H. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2019**, *196*, 36.
- [97] (a) Elimelech, M.; Phillip, W. A. *Science* **2011**, *333*, 712. (b) Gao, M.; Zhu, L.; Peh, C. K.; Ho, G. W. *Energy Environ. Sci.* **2019**, *12*, 841.
- [98] (a) Shi, Y.; Yang, J.; Gao, F.; Zhang, Q. *ACS Nano* **2023**, *17*, 1879. (b) Kong, L.; Liu, M.; Huang, H.; Xu, Y.; Bu, X. H. *Adv. Energy Mater.* **2022**, *12*, 2100172. (c) Li, L. L.; Liu, S.; Zhang, Q.; Hu, N. T.; Wei, L. M.; Yang, Z.; Wei, H. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2017**, *33*, 1960 (in Chinese). (李路路, 刘帅, 章琴, 胡南滔, 魏良明, 杨志, 魏浩, 物理化学学报, **2017**, *33*, 1960.) (d) Zhou, B.; Chen, L. *Acta Chim. Sinica* **2015**, *73*, 487 (in Chinese). (周宝龙, 陈龙, 化学学报, **2015**, *73*, 487.)
- [99] Cui, W.-R.; Zhang, C.-R.; Liang, R.-P.; Liu, J.; Qiu, J.-D. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2021**, *13*, 31561.
- [100] Xia, Z. J.; Yang, H. C.; Chen, Z.; Waldman, R. Z.; Zhao, Y.; Zhang, C.; Patel, S. N.; Darling, S. B. *Adv. Mater. Interfaces* **2019**, *6*, 1900254.
- [101] Jia, S.; Hao, L.; Liu, Y.; Lin, E.; Liu, W.; Yang, Y.; Tian, Y.; Peng, Y.; Cheng, P.; Chen, Y.; Zhang, Z. *ACS Mater. Lett.* **2023**, *5*, 458.
- [102] Fang, Z.; Bucken, B.; De Vos, D. E.; Fischer, R. A. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2015**, *54*, 7234.
- [103] Chen, Z.; Su, Y.; Tang, X.; Zhang, X.; Duan, C.; Huang, F.; Li, Y. *Sol. RRL* **2021**, *5*, 2100762.
- [104] (a) Wang, H.; Zhao, J.; Li, Y.; Cao, Y.; Zhu, Z.; Wang, M.; Zhang, R.; Pan, F.; Jiang, Z. *Nano-Micro Lett.* **2022**, *14*, 216. (b) Wang, M.; Wang, Y.; Zhao, J.; Zou, J.; Liang, X.; Zhu, Z.; Zhu, J.; Wang, H.; Wang, Y.; Pan, F.; Jiang, Z. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2023**, *62*, e202219084. (c) Zhou, W.; Wei, M.; Zhang, X.; Xu, F.; Wang, Y. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2019**, *11*, 16847.
- [105] (a) Sumida, K.; Rogow, D. L.; Mason, J. A.; McDonald, T. M.; Bloch, E. D.; Herm, Z. R.; Bae, T.-H.; Long, J. R. *Chem. Rev.* **2012**, *112*, 724. (b) Wang, C.; Kim, J.; Tang, J.; Kim, M.; Lim, H.; Malgras, V.; You, J.; Xu, Q.; Li, J.; Yamauchi, Y. *Chem* **2020**, *6*, 19. (c) Zhong, M.; Kong, L.; Zhao, K.; Zhang, Y. H.; Li, N.; Bu, X. H. *Adv. Sci.* **2021**, *8*, 2001980.
- [106] Chen, G.; Jiang, Z.; Li, A.; Chen, X.; Ma, Z.; Song, H. *J. Mater. Chem. A* **2021**, *9*, 16805.
- [107] Ma, Q.; Yin, P.; Zhao, M.; Luo, Z.; Huang, Y.; He, Q.; Yu, Y.; Liu, Z.; Hu, Z.; Chen, B. *Adv. Mater.* **2019**, *31*, 1808249.
- [108] Wang, J.; Wang, W.; Li, J.; Mu, X.; Yan, X.; Wang, Z.; Su, J.; Lei, T.; Wang, C. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2021**, *13*, 45944.
- [109] Zhou, S.; Kong, X.; Strømme, M.; Xu, C. *ACS Mater. Lett.* **2022**, *4*, 1058.
- [110] Yao, Z. Q.; Wang, K.; Liu, R.; Yuan, Y. J.; Pang, J. J.; Li, Q. W.; Shao, T. Y.; Li, Z. G.; Feng, R.; Zou, B.; Li, W.; Xu, J.; Bu, X. H. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2022**, *61*, e202202073.

(Cheng, F.)