

Doi:10.20062/j.cnki.CN 37-1453/N.2023.04.011

# 太阳光驱动界面蒸发技术的多功能应用与发展

蔡馨燕

(山东省科学技术情报研究院,济南 250101)

**摘要:**太阳光驱动界面蒸发(SDIE)技术作为一种新型的太阳能利用技术,在过去十年中发展迅速,使得总结以往的研究以推动该技术的发展变得非常必要。太阳能界面光热蒸发器件的核心材料是光热转换材料,在SDIE中起着至关重要的作用。本文介绍了常见的材料体系,包括等离子体金属纳米颗粒、半导体、碳基材料和聚合物基材料;讨论了改善SDIE性能的策略,如增强光吸收、水传输通道设计和热管理,调节蒸发器性能并提高能源利用效率;详细介绍了SDIE在海水淡化、杀菌、污水处理以及水电联产等方面的应用;总结了当前SDIE所面临的瓶颈,展望了SDIE技术的未来发展。该技术的发展对从实验室到实际大规模太阳能驱动的清洁水生产的研究工作提供了启发,有望为未来解决能源和水资源短缺问题提供绿色经济的解决方案。

**关键词:**太阳能技术;光热转换材料;水蒸发;海水淡化

**中图分类号:**TB34 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2023)04-0366-11

水资源短缺是人类社会面临的一个重大挑战。目前,世界上可供人类利用的水资源只占2.5%。经过天然的水分蒸发生成的水分纯净度很高,所以利用水分蒸发来进行海水脱盐与提纯的研究成为近年来一个热点。

目前水处理技术需要根据水源情况选择相应的方法,主要包括吸附分离、膜分离和凝聚等方法,而水中复杂的化学环境(例如溶液的pH值、各种污染物的类型和数量以及它们的现有形式)使单一路径难以完成纯化应用。工业上普遍采用高能耗的水分蒸发工艺,这不仅造成了大量的化石能源消耗,而且还会带来严重的副产物污染,威胁人体健康。太阳能作为一种取之不尽的绿色能源得到了广泛的利用。光热效应以太阳光为驱动力,促进水和大气循环,为解决水资源匮乏问题提供了一种新的方法。

太阳能驱动的界面光热水蒸发(SDIE)技术以太阳光作为能源,通过光热转换材料(太阳能吸收器)将光能转换为热能,光热转换材料与水体界面处的水分子吸收足够的热能后从光热转换材料内部通道以气体形式逸出,而水中的杂质和溶质留在水体中,从而实现了水的净化。目前,该技术已经用于各种水质的处理,包括染料废水、重金属离子

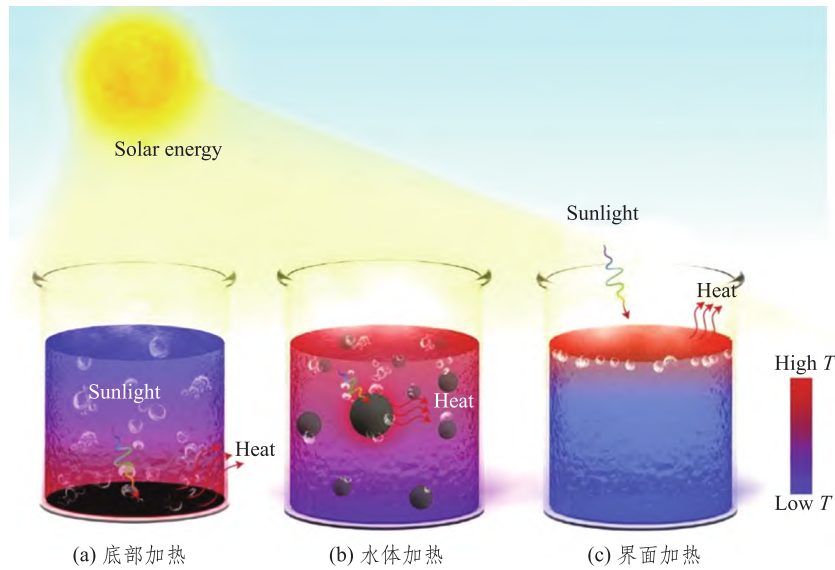
废水净化和海水淡化等,净化后收集的冷凝水的水质达到了饮用水标准。该技术利用绿色可持续太阳能作为驱动获取清洁水,既解决了水资源短缺问题,又缓解了净化水过程中产生的水-能源矛盾。

## 1 光热水蒸发技术

以太阳光为驱动力的水蒸发系统中,太阳能吸收器是其主要组成部分,它可以使界面上的水分子充分吸收足够的热能,并使水分子从其内部孔道中逸出,同时保留水中的杂质、溶质,从而达到对水的有效净化<sup>[1]</sup>。光热水蒸发技术发展的第一阶段是底部加热(图1(a)),将太阳能吸收器置于水体底部,由于水的散射导致大量光能损失,热量无法集中在太阳能吸收器表面,导致蒸发缓慢。第二阶段是体积加热(图1(b)),光热转换粒子均匀分散在水体中,由于光热转换粒子与水接触过程中产生的热量会传导到不参与蒸发的水体中,从而导致大量热能损失。第三阶段是界面加热(图1(c)),太阳能吸收器位于水-空气界面处,使热量集中在界面处,很大程度上避免了热量损失。因此,新兴的太阳光驱动界面蒸发技术显著提高了蒸发效率,推动了光热水蒸发技术的快速发展<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期:2023-06-20;修回日期:2023-09-10

通信作者简介:蔡馨燕(1977—),女,副研究员,研究方向为科技情报研究、科技战略。E-mail:191523972@qq.com

图1 光热水蒸发技术的发展<sup>[1]</sup>Fig.1 The evolution of photothermal water evaporation<sup>[1]</sup>

## 2 界面太阳能水蒸发器件

界面太阳能吸收器可吸收全光谱波段太阳光,具有保温作用并能够提供足够的水分输送通道。该类水蒸发器不仅可以使热能在界面上聚集,从而降低向水中的损失并提高热能利用率,还可以确保在水分蒸发过程中及时连续地向界面补充水分。为了提高太阳能蒸发性能,研究者们开发了各种光热材料,并对其进行了结构调控<sup>[4]</sup>。

### 2.1 光热转换材料

在太阳能光热转换中,光热转换材料有着至关重要的地位。光热材料吸收太阳光,然后以光激发的形式将部分或者全部太阳能转换为热能。常见的光热转换材料有:等离子体金属纳米材料、无机半导体材料、碳基纳米材料和有机高分子光热材料等,已被广泛研究。

#### 2.1.1 等离子体光热材料

局域表面等离子体共振效应(LSPR)使得等离子体金属具有良好的光热转换性能。特定照明下的贵金属纳米粒子利用LSPR的集体电子共振,从而获得增强的光吸收和散射。由于材料的本征损耗将吸收的光子能量转化为热量,纳米粒子经历了显著的温度升高。许多研究致力于利用等离子体纳米粒子探索太阳蒸发性能<sup>[5-7]</sup>。Yuan等<sup>[5]</sup>通过纳米约束效应将Ni纳米颗粒(<20 nm)

嵌入纤维素微纤维中,制备的Ni/纤维素杂化超材料的光吸收率高达97.1%。Song等<sup>[6]</sup>通过原位种子介导法将Ag-Ni均匀负载在纤维素表面,制备了Ag-Ni/纤维素纸。制备的Ag-Ni/纤维素纸通过Ag纳米粒子的LSPR效应和Ni的带间跃迁的协同作用,表现出宽波长的光吸收。当Ag和Ni的沉积时间稳定在120 s和480 s左右时,Ni/纤维素纸的光热性能最佳,能量利用效率高达93.8%,蒸发速率高达 $1.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

#### 2.1.2 半导体光热材料

与金属材料不同,无机半导体材料在价带和导带之间存在带隙,为光能利用开辟了新的途径。通过调整半导体的尺寸、结构和组成,可以调节价带和/或导带的位置,从而调节纳米结构的带隙和光吸收能力<sup>[8]</sup>。近年来,金属氧化物和硫族化合物半导体光热纳米材料由于其合成简单、成本低、吸收光谱可调、近红外区消光系数大等优点,显示出良好的应用前景<sup>[9-13]</sup>。此外,Yuan等<sup>[9]</sup>通过微结构工程,将二维MoS<sub>2</sub>纳米片沉积在一维TiO<sub>2</sub>纳米线阵列修饰的钛网上,作为太阳能驱动界面水蒸发和有机污染物去除的多功能太阳能吸收剂。该合成策略赋予组分之间较强的界面相互作用。值得注意的是,与其他报道的微结构不同,在没有使用任何贵金属的情况下实现了高光吸收率。此外,多级微结构的高效光收集提高了光热水蒸发和光催化性能。光热水蒸发和光催化相结合,解决了蒸发后水体中的染料浓缩问题。Yuan

等<sup>[10]</sup>成功将具有 S 空位的垂直排列  $\text{MoS}_{2-x}$  纳米片阵列原位生长在柔性 Mo 网格上,实现了污染物的去除和清洁的水-热-电联产。

### 2.1.3 碳基高分子光热材料

碳基材料具有全光谱吸光、高稳定性和低成本的优点,在太阳能驱动的界面光热转换水蒸发器件中广受欢迎。更重要的是,碳基材料可以很容易地制成各种结构以增强光吸收,并与各种衬底集成,用于各种太阳能热应用。所有这些特点使它们成为最有前途的光热转换材料。生物质碳材料因其来源广、成本低、可再生并且具有天然的孔道结构而被广泛应用。Lu 等<sup>[14]</sup>提出了一种由多孔载体(碱化丝瓜海绵)和光吸收体(碳化丝瓜海绵)组成的全生物质丝瓜衍生蒸发器,用于高效太阳能蒸汽的产生,该蒸发器采用太阳能蒸发和表面生物吸附的协同概念,同时产生淡水和回收重金属离子。该多功能光热蒸发器在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下的蒸发速率为  $1.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,能量转换效率为 83.7%,同时具有良好的自脱盐性能。Zhang 等<sup>[15]</sup>将碳化丝瓜(CL)作为太阳能蒸汽发生器,采用原位化学气相沉积的方法,实现了碳纳米纤维修饰 CL(CL-CNF)增强光捕获能力的复合材料,利用光热转换的协同功能和独特的二维水通道,很大程度上提高了该蒸汽发生器的性能,在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  的太阳辐照下,器件的水分蒸发速率和光热转换效率分别达到了  $1.72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和 92.5%。Yao 等<sup>[16]</sup>采用 LiCl 填充中空连接的丝瓜纤维,并用细菌纤维素/碳纳米管光热转换膜取代原有丝瓜皮制造了一种以太阳能为动力的吸附式大气集水装置。Zhang 等<sup>[17]</sup>提出了一种基于香椿的低成本、规模化生产的天然一体化三维太阳能蒸汽发生器,表现出优异的蒸汽生成性能。Yuan 等<sup>[18]</sup>采用具有特殊表面拓扑结构和内部连通多孔结构的三维球形碳化悬铃木球果作为优异的太阳能蒸发器和脱色吸附剂,在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下的高蒸发速率可达  $2.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 2.1.4 有机高分子光热材料

在有机高分子光热材料中,主要通过吸收太阳光后引起晶格振动而产生热量,从而实现光热转换。Ma 等<sup>[19]</sup>设计和合成了石墨烯包被的共轭微孔聚合物空心球,并与相变材料十八醇复合,用于高效的太阳能光热转换。Wang 等<sup>[20]</sup>将聚 3-己基

噻吩装入无纺布中,在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  的模拟太阳照射下,蒸发速率为  $1.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Wang 等<sup>[21]</sup>将聚吡咯包覆的整体多孔离子聚合物作为高效太阳能蒸汽产生的自脱盐光热材料,在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下的蒸发效率高达 89%,并且在高盐度(质量分数为 30%)盐水中的蒸发效率具有优异的耐久性。

## 2.2 热管理

在太阳能水蒸发过程中,光热材料吸收太阳光使其表面温度升高,不可避免地以传导、辐射和对流的方式产生热损失<sup>[22]</sup>。在过去的几年中,研究者们付出了巨大的努力来提高太阳能蒸汽产生装置的热管理能力。热管理结构设计一般有两个原则:1) 通过材料和热结构设计在微观和宏观尺度上最小化热损失;2) 将产生的热量定位在空气-水界面处,以实现高表面温度和快速蒸发速率。例如,Yu 等<sup>[23]</sup>制作了一种由双向冷冻技术构建的仿生碳化钼/碳基气凝胶并应用于太阳能蒸汽产生(图 2(a))。该仿生太阳能蒸发器具有相互连接的片层各向异性结构,可实现低导热系数( $0.18027 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ),以抑制热耗散和超高速水输送,在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下的蒸发速率高达  $2.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,光热转换效率达到 95.8%。更重要的是,高强度的热能被有效地用于加速油的吸附,吸附量为  $7.72 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。Chen 等<sup>[24]</sup>用一种具有维管束和“囊状糖”结构的农业废弃物玉米棒来制造太阳能蒸汽产生装置(图 2(b))。经过高温处理后,碳化玉米芯保持了高度各向异性的多孔骨架和良好的亲水性,具有良好的热管理和水输送性能。轻质碳化玉米芯具有高效的太阳能吸收、热局部化和快速的水分输送等特点,在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下,轻质碳化玉米芯可以漂浮在水面上产生水蒸气,蒸汽发生效率高达 86.7%。Liu 等<sup>[25]</sup>利用向日葵茎的精巧复合结构,设计了一种基于向日葵茎的太阳能驱动蒸发器,该蒸发器具有密闭二维给水通道和封闭隔热结构。向日葵茎的髓由排列整齐的蜂窝状薄壁细胞组成,使向日葵茎具有与合成塑料泡沫相当的低导热性(图 2(c))。低弯曲维管束可以作为一个天然的二维水通道,用于快速的水分输送。这些功能的好处是,基于碳纳米管向日葵茎的蒸发器在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下可实现  $1.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  的高蒸发速率。

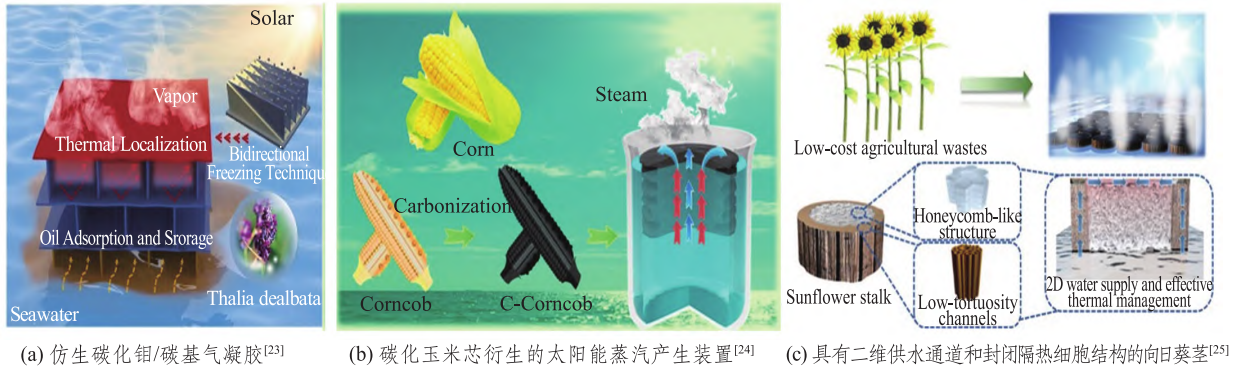


图2 几种太阳能蒸汽产生装置示意图

Fig.2 Schematic diagrams of several solar steam generation devices

### 2.3 水传输

在太阳能蒸汽产生过程中,水的传输是至关重要的。为了保证交界面的水分持续蒸发,这就需要水分从界面下不断地补充,所以水通道设计是实现连续高效水输送的关键因素。Feng 等<sup>[26]</sup>报道了一种高效的竹基蒸发器,水蒸发速率为  $1.522 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,转换效率为 94.4%,响应时间为 80 s。该蒸发器具有稳定的自漂浮状态,具有连续的微纳通道,与空气-水表面显著平行,产生比现有装置更多的光热能量和更清晰的水分子运动。Hao 等<sup>[27]</sup>报道了一种由聚乙烯醇和木质素磺酸钠(SLS)组成的新型水凝胶混合太阳能蒸发器,并添加了碳纳米管作为光吸收材料。SLS 中丰富的磺酸基和羟基通过静电相互作用和氢键增强了水凝胶与水分子的相互作用。因此,SLS 的存在不仅显著地促进了水凝胶的亲水性和水运输,而且精确地调节了水分子的状态和中间水的含量,从而降低了水的蒸发焓,在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下的蒸发速率可达  $2.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Li 等<sup>[28]</sup>提出了一种基于水葫芦叶柄(WHP)生物聚合物海绵的可持续 Janus 蒸发器,用于高性能的太阳能蒸汽产生。冻干 WHP 保持了原有的多孔结构和通道排列良好,由于毛细作用强,具有快速输水的能力。表面包覆碳纳米管/乙基纤维素浆料(WHP-C)的 WHP 具有良好的光热性能,从而在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下实现了  $1.50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  的高效太阳能蒸汽生成。Li 等<sup>[29]</sup>制作了一种垂直排列的还原氧化石墨烯/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 混合水凝胶,用于高效的太阳能蒸汽产生。垂直排列的通道由液氮辅助定向冻结过程产生,不仅快速将水向上输送到蒸发表面以实现高效的太阳能蒸汽产生,而且还促

进了通道内太阳光的多次反射,实现了太阳能光的有效吸收。刻意的还原使 RGO 具有大量的极性基团,有效地降低了水的蒸发焓,从而有效地加速了水的蒸发。

## 3 界面光热水蒸发技术的应用

得益于绿色无污染的特点,SDIE 在海水淡化和污水处理领域表现出了巨大的应用潜力。此外,耦合蒸汽灭菌、热电发电等的多功能界面光热水蒸发系统也被设计出来。因此,SDIE 技术在能源与环境领域有着至关重要的地位。

### 3.1 海水淡化

界面光热水淡化技术以太阳光作为能源驱动界面处的水分子蒸发而后冷凝下来,海水中的盐离子留在水体/太阳能吸收器中,从而实现了海水的淡化。根据盐离子和水分子在界面光热水淡化装置中的不同运动路径,将目前的脱盐策略分为四个基本类别(图3):盐离子扩散回流、零液体排放、直接阻断盐分和新液泵入。在此基础上,盐离子扩散回流也可分为夜间回流和白天回流,而零液体排放策略又可分为可剥盐和可洗盐<sup>[30]</sup>。

由于盐浓度的差异,结晶盐会在潜在的化学差异的驱动下自发地向海水本体移动的机制称为盐离子回流扩散。当蒸发器内部的孔隙充满海水时,材料中盐离子的迁移可视为离子在多孔介质中的扩散(图3(a))。当盐晶在 SDIE 器件表面形成并堆积时,早期去除盐晶的主要方法是物理清洗,即人工剥离和水洗,将此类工作归类为零液体排放机制(图3(b))。解决蒸发表面盐分积累的另一策略是直接阻挡盐分,通过设计亲水/疏

水双层复合光热海水淡化器件,其中上层疏水层用于吸光,下层亲水层用于抽水,可以直接阻挡双层界面处的盐离子(图 3(c)),在这种情况下,海水的蒸发会发生在两层的界面,而盐分不会上升

到表面。而新的液体泵送机制利用离子效应来排斥盐离子,这种机制要求材料具有高离子强度,以便通过离子筛选将大部分盐离子排斥到器件外部,从而实现盐缓解(图 3(d))。

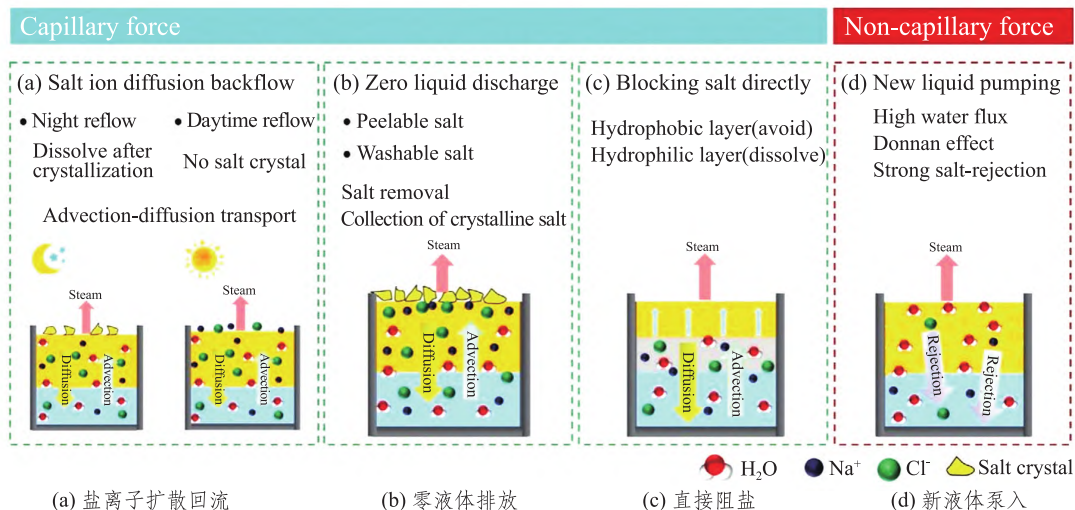


图 3 太阳能驱动界面脱盐方案及脱盐机理<sup>[30]</sup>

Fig.3 Scheme of solar-driven interfacial desalination and the salt mitigation mechanisms<sup>[30]</sup>

目前,有许多用于海水淡化的太阳能吸收器已被报道。例如:Kuang 等<sup>[31]</sup>首次提出了一种具有优异防污性能的自再生太阳能蒸发器,该蒸发器在天然木材上人为设计孔道阵列,在毫米大小的钻孔通道(低盐浓度)和微尺寸的天然木材通道(高盐浓度)之间形成盐浓度梯度,浓度梯度允许通过 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的坑进行自发的通道间盐交换,导致微尺度木通道中的盐被稀释,可以快速地将盐与本体溶液交换,实现蒸发器的实时自我再生。与其他防盐设计相比,太阳能蒸发器在 $1\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 下,在高浓度盐溶液( $\omega(\text{NaCl})=20\%$ )中表现出最高的效率(约75%),并且具有长期稳定性(连续运行超过100 h)。该蒸发器具有优异的脱盐能力、良好的循环稳定性和可靠的安全性,在污水处理和海水淡化领域具有良好的应用前景,解决了大多数蒸发器面临的结构复杂、制备复杂、耐盐性差等缺点,为进一步开展大规模海水淡化工作奠定了良好前景。Wang 等<sup>[32]</sup>研究了一种由光热超亲水/超疏水海绵和侧缠绕亲水螺线组成的金属-酚醛网络(MPN)工程三维蒸发器,用于定向盐结晶和零液体排放的高效脱盐。这种MPN涂层提供了光热超亲疏水/超疏水交替海绵的工程,具有高热效率和明确的蒸汽逃逸通道,而侧缠绕线诱导选择性盐结晶。在不需要盐结晶抑制剂的

情况下,3D蒸发器显示出高且稳定的室内海水淡化速率,约为 $2.3\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (质量分数为20%),连续工作时长超过21 d。这种直接脱盐也可以在室外现场作业中实现,从浓缩海水(质量分数为10%)中产生的净水率高达 $1.82\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;再加上MPN的高亲和力和多功能,该工作解决了太阳能蒸发器顶表面积盐积累问题,有望促进太阳能海水淡化装置的合理设计,推动MPN材料在更广泛应用中的研究转化。

### 3.2 过热蒸汽灭菌

除了用于海水淡化,SDIE在蒸汽灭菌领域也有广泛的应用。蒸汽灭菌消毒通过光热材料对阳光的快速响应和产生高温蒸汽来实现。太阳能蒸汽消毒具有低成本、独立于其他能源来源的优势,改善了当前消毒技术问题,并为欠发达地区提供了潜在的消毒解决方案。Zhang 等<sup>[33]</sup>引入具有宽带吸光度的还原氧化石墨烯(RGO)和具有高效太阳能吸收和低导热性的抗菌聚合物聚吡咯(PPy),以开发集成的RGO/PPy气凝胶作为太阳能吸收器。RGO/PPy气凝胶具有较强的吸收性和良好的光热性能,蒸发速率为 $1.44\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,在 $1\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 下的光热转化效率为90.5%,这归因于RGO/PPy在空气-水界面处的局部热量及其具有促进水蒸

发的官能团的多孔性。此外, RGO/PPy 气凝胶具有长期稳定的蒸发速率,能在连续运行 100 h 内能发性能不下降,且对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗菌效率分别为 98.51% 和 99.29%,表现出优异的耐久性和抗菌效率,这是长期应用的关键特性。Tu 等<sup>[34]</sup>提出了一种胶束介导的金属组装策略,通过金属修饰的中性十二烷基胺表面活性剂将等离子体银纳米颗粒整合到  $\text{MnO}_x$  修饰的介孔二氧化硅基体中,从而获得了多功能介孔  $\text{Ag@MnO}_x/\text{m-SiO}_2$  纳米复合材料。所得材料能有效灭活大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌,抑制效果持久,能快速减少有害的硝基酚,光热辅助水分蒸发(蒸发速率为  $1.51 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,接收效率为 87%)。这项工作能够去除染料和杀灭病原体,在控制饮用水净化和再生方面具有应用潜力,为高效抗菌和环境修复提供了多功能的环境治理功能纳米材料。Guan 等<sup>[35]</sup>将硼罗芬掺入纤维素纳米纤维(CNF)中,使其具有优异的环境稳定性,在模拟阳光照射下,20 min 内几乎可以完全地去除革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌。该研究解决了现有系统存在的稳定性差、易脱落溶解和生物污染等问题,为设计具有独特光热性能的硼苯基纸开辟了新的方向,可用于各种废水的有效处理,为高效和长期的太阳能光热应用提供了广阔的前景。

### 3.3 废水处理

SDIE 为清洁水的生产和废水排放处理提供了新的途径<sup>[36-37]</sup>。Mu 等<sup>[38]</sup>通过简单的浸渍和原位聚合制备了 MXene/聚吡咯涂层三聚氰胺泡沫(MF-MXene/PPy),将其作为光热转换材料处理模拟重金属离子废水( $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ )。MF-MXene/PPy 具有快速的水通道、优异的光吸收能力、低导热性和丰富的孔隙率,太阳能驱动的水蒸发达到了  $1.5174 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,太阳能转换效率高达 91.24%,纯化后的水中各离子质量浓度均低于  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,离子去除率达到了 99%。Hou 等<sup>[39]</sup>采用化学处理和碳化的轻木作为一体的太阳能吸收和金属离子吸收系统。该系统显示出对金属离子的高吸附能力以及优异的再利用能力。利用太阳辐射可以提高该系统对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附能力,在  $3.0 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  的太阳辐射下,吸附能力提高了 2.25 倍以上。太阳能蒸发过程中产生的金属离子浓度梯度和小通道内的局部温度场有助

于提高  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附能力。

近些年,随着人类需求的增长,印染行业不断发展,染料水污染也随之增加,进一步加剧了淡水短缺<sup>[40-41]</sup>。因此,对染料废水有效净化并从中提取淡水资源是解决染料水污染以及淡水短缺的有效方法之一。与海水淡化类似,太阳能吸收器吸收足够的热量,将界面处的水分子蒸发,染料分子被留在水中或太阳能吸收器的表面,从而实现染料废水的净化<sup>[42-43]</sup>。作为染料净化的方式之一,SDIE 对染料有着显著的净化效果<sup>[44-45]</sup>。例如,Wang 等<sup>[46]</sup>设计了 MXene/碳纳米管/棉织物太阳能吸收器并用于界面水蒸发净化染料废水(以亚甲基蓝和罗丹明 B 模拟染料废水),在  $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  的照射下,水的蒸发速率达到  $1.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,纺织废水的蒸发速率超过  $1.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,收集的净化水清澈透明且 UV-Vis 验证了染料的特征吸收峰消失,证明了该太阳能吸收器优异的净化染料废水的功能。然而,染料分子对太阳能吸收器的污染问题不容忽视。光催化降解染料废水与界面水蒸发相结合的技术可以轻松解决太阳能吸收器被污染的问题<sup>[47-48]</sup>。Lü 等<sup>[49]</sup>提出了基于柔性衬底的  $\text{MoS}_2/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$  异质结构,以罗丹明 B ( $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $20 \text{ mL}$ ) 为模拟染料废水,实现了高效的光热水蒸发(水蒸发速率为  $1.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ );同时得益于异质结构的构筑,电子空穴分离效率增加,催化降解 RhB 的能力大幅度提升(90 min 内降解 98.6%)。此外,收集的纯化水清澈透明,对其进行 UV-Vis 吸收光谱测定后,染料的特征吸收峰消失,该工作为避免太阳能吸收器被染料污染以及染料废水二次污染提供了可行的处理方式。光热水蒸发与光催化相结合不仅可以净化染料废水,而且可以应用于各种体系的废水处理,如挥发性有机污染物废水、含有毒重金属离子的废水等,对于这些废水体系都有优异的净化效果。Zakaria 等<sup>[50]</sup>设计了  $\text{TiO}_{2-x}/\text{TiN@ACB}$ ,将光热水蒸发与光催化  $\text{Cr}^{6+}$  还原相结合处理重金属离子废水, TiN 的等离子体效应和生物炭的高电子容量分别增强了带隙变窄、光吸收扩展和电荷载流子分离,提高了  $\text{TiO}_2$  的光催化性能。该太阳能吸收器在 IR 和 Vis 光照下对 Cr(VI) 的降解效率分别达到 92.8% 和 89.7%,并且  $\text{TiO}_{2-x}/\text{TiN@ACB}$  复合材料 150 min 内水分蒸发达到了  $2.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。以上所提到的研究结果验证了光催化与光热水蒸发相结合处理

废水的合理性,为废水处理提供了新的思路。

### 3.4 水-电联产

SDIE 通过产生蒸汽的方式将废水处理和清洁水的生产同时进行,为环境保护和水资源短缺提供了一种可持续的解决方案;同时该技术也为蒸发驱动的发电提供了可能性,为解决能源紧缺问题提供了思路。目前为止,不同的热电发电器件与界面水蒸发整合到一个器件中,包括热释电/压电器件、热电化学器件、热电器件、摩擦发电器件和盐差发电,用以实现水-电联产(图 4)。这种先进的整合方式不仅可以实现水-电同时生产,而且提高了能量的转换效率。Zhu 等<sup>[51]</sup>设计了全有机太阳能吸收(PCC)海绵,PCC 海绵具有宽带光学吸收和良好的内置结构层次,形成弹性大孔开放

细胞,具有高光热转换、高效流体毛细管作用和有效隔热的优点;同时热电模块作为隔热材料,改善太阳能的水分蒸发,并同步获取低级别的太阳能热量并将其相变为电能输出,在  $5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  下获得了  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  的温差,输出电压达到了  $240 \text{ mV}$ 。Jin 等<sup>[52]</sup>提供了一种太阳能利用器件,在自然炎热天气下实现了  $1.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  的最高集水速率和  $92.7\%$  的集水效率。构建具有亲水分级纳米结构的冷凝器,并将其浸入大量水中,降低了在高温环境中收集蒸汽的难度。值得注意的是,在光热层和蒸发层之间引入热电发生器可实现  $0.03\%$  的总能效提高和  $0.47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  的电输出。界面水蒸发进行的同时实现了低品位的余热联产电能输出,水-电联产已成为目前提高太阳能利用率的有效途径之一<sup>[53-58]</sup>。

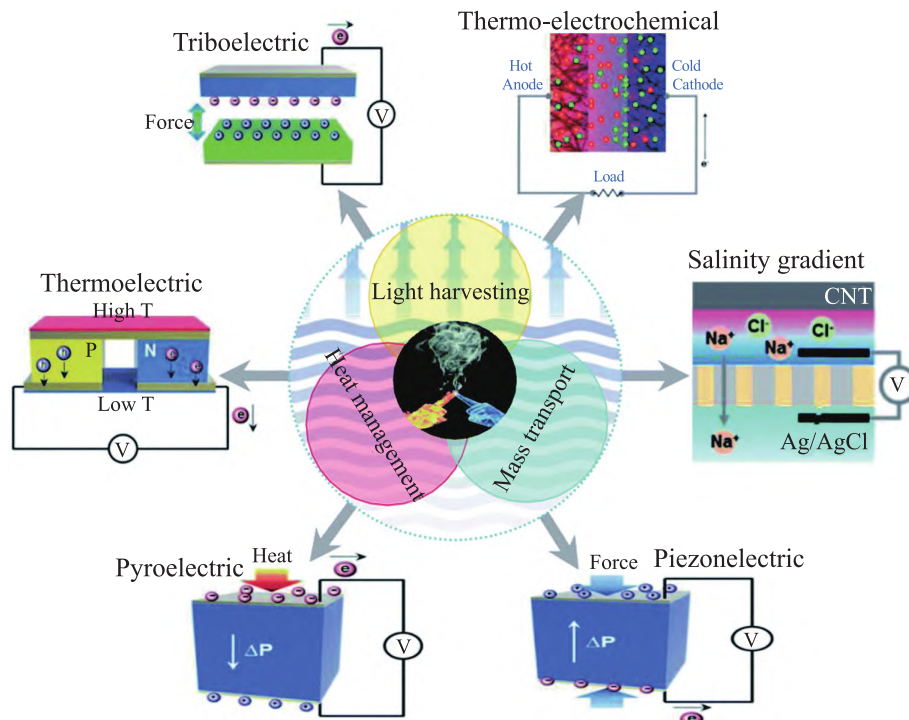


图 4 用于水-电联产系统的摩擦发电、热释电、热电、压电、热电化学发电和盐度梯度发电的电荷产生机制示意图<sup>[51]</sup>

Fig.4 Schematic illustration of triboelectric, pyroelectric, thermoelectric, piezoelectric, thermo-electrochemical, and salinity gradient charge generation for water-electricity cogeneration systems<sup>[51]</sup>

## 4 展望

迅速发展的 SDIE 技术是一种环保、高效和经济的新型蒸发技术,在海水淡化等领域具有巨大的应用潜力,并为清洁水生产提供了令人兴奋的解决方案。目前,该技术的发展重点是扩大应

用范围和提高性能,进一步开发基于该技术的综合太阳能利用技术。未来需要进行更多的研究,总结如下。

1) 随着材料科学和技术的发展,未来将会出现更多具有高光吸收性能的材料,这有助于 SDIE 的发展。此外,还可以通过材料结构设计,如多次截取和吸收反射光,以提高光吸收能力。

2) 出色的水传输和热管理性能是必不可少的。一方面,合理协同水传输特性和蒸发速率可以有效减少热损失、盐结晶等问题;另一方面,在蒸发器的光热转换层、热浓缩层中会产生大量热能,用于驱动水的快速蒸发。目前,在设计热隔离蒸发器、降低蒸发器温度等策略方面已取得了显著进展。此外,具有3D结构的蒸发器在水传输和热管理方面具有优势,因此预计未来会优先发展3D结构的蒸发器。

3) 理想的蒸发器还应具备原材料丰富、制备简便和经济实用等优点,以实现从实验室理论到工业生产的转化。目前,水收集系统通常由玻璃或聚合物制成的透明密闭设备组成。首先,这些设备的表面会反射一定量的光,从而减少光热转换材料吸收的光能量。其次,凝结在设备壁上形成的水滴会额外反射光线,导致入射光无谓损失。最后,由于蒸发器处于封闭空间内,温度、湿度和压力会影响水蒸气的产生。因此,对于水收集系统,需要进一步的研究和开发,这是SDIE系统实现应用的关键之一。

4) 对于复杂体系的水污染情况,单一的光热器件往往存在挑战。在构筑高效的太阳能利用体系的同时,在界面引入复合功能,探索光热-光催化和光热水蒸发-光催化-热电系统以及其他组合功能系统的可行性变得非常必要。

总而言之,SDIE是一种新颖且具有潜力的技术,这项技术有潜力成为一种低成本且可持续的产生清洁水的方法,特别是在没有电力或常规水处理设施的地区。通过进一步的研究和开发,该技术将变得更可靠和高效,为解决水和能源问题提供一种有效的途径,并为地球的保护做出贡献。

#### 参考文献:

- [1] PANG Y, ZHANG J J, MA R M, et al. Solar-thermal water evaporation: a review [J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(2): 437–456.
- [2] LIU C, YIN Z H, HOU Y, et al. Overview of solar steam devices from materials and structures [J]. *Polymers*, 2023, 15(12): 2724.
- [3] ZHAO X, MENG X T, ZOU H Z, et al. Nano-enabled solar driven-interfacial evaporation: advanced design and opportunities [J]. *Nano Research*, 2023, 16(5): 6015–6038.
- [4] YAN J, SU Q, XIAO W, et al. A review of nanofiber membranes for solar interface evaporation [J]. *Desalination*, 2022, 531: 115686.
- [5] YUAN Y, DONG C L, GU J J, et al. A scalable nickel-cellulose hybrid metamaterial with broadband light absorption for efficient solar distillation [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(17): 1907975.
- [6] SONG W J, WANG H H, ZHANG Z Q, et al. A scalable and anti-fouling silver-nickel/cellulose paper with synergy photothermal effect for efficient solar distillation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 650: 1044–1051.
- [7] LIN Y W, CHEN Z H, FANG L, et al. Copper nanoparticles with near-unity, omnidirectional, and broadband optical absorption for highly efficient solar steam generation [J]. *Nanotechnology*, 2019, 30: 015402.
- [8] YUAN B H, ZHANG C F, LIANG Y, et al. Defect-induced self-cleaning solar absorber with full-spectrum light absorption for efficient dye wastewater purification [J]. *Solar RRL*, 2021, 5(5): 2100105.
- [9] YUAN B H, MENG L S, ZHANG C F, et al. Enhancement of pollutant degradation and solar-driven water evaporation by architecting hierarchical 1D/2D TiO<sub>2</sub>@MoS<sub>2</sub> core-shell networks [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 570: 151143.
- [10] YUAN B H, YANG L X, YANG H W, et al. Flexible vacancy-mediated MoS<sub>2-x</sub> nanosheet arrays for solar-driven interfacial water evaporation, photothermal-enhanced photodegradation, and thermoelectric generation [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 252: 115070.
- [11] LI J W, YANG X Q, MA C H, et al. Selectively recombining the photoinduced charges in bandgap-broken Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/GdCrO<sub>3</sub> with a plasmonic Ag bridge for efficient photothermocatalytic VOCs degradation and CO<sub>2</sub> reduction [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 291: 120053.
- [12] LIAO J J, XU Y D, ZHAO Y Y, et al. Ag and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> co-modified WO<sub>3-x</sub> nanocomposites for catalytic photothermal degradation of pharmaceuticals and personal care products [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(2): 1898–1905.
- [13] LIU X J, CHEN T Q, XUE Y H, et al. Nanoarchitectonics of MXene/semiconductor heterojunctions toward artificial photosynthesis via photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2022, 459: 214440.



- [14] LU Y, WANG X, FAN D Q, et al. Biomass derived Janus solar evaporator for synergic water evaporation and purification [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, 25: e00180.
- [15] ZHANG C F, YUAN B H, LIANG Y, et al. Carbon nanofibers enhanced solar steam generation device based on loofah biomass for water purification [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 258: 123998.
- [16] YAO W, ZHU X D, XU Z L, et al. Loofah sponge-derived hygroscopic photothermal absorber for all-weather atmospheric water harvesting [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(3): 4680–4689.
- [17] ZHANG C F, YUAN B H, LIANG Y, et al. Solar vapor generator: a natural all-in-one 3D system derived from cattail [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 227: 111127.
- [18] YUAN B H, ZHANG C F, LIANG Y, et al. A low-cost 3D spherical evaporator with unique surface topology and inner structure for solar water evaporation-assisted dye wastewater treatment [J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2020, 5(3): 2000245.
- [19] MA Y J, HU Z T, LU N, et al. Highly efficient solar photothermal conversion of graphene-coated conjugated microporous polymers hollow spheres [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 623: 856–869.
- [20] WANG L Q, XI G L, CHEN Z F, et al. The efficient photothermal performance of organic polymeric material poly(3-hexylthiophene) for solar driven water evaporation and thermoelectric power generation [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2023, 324: 124081.
- [21] WANG F, WANG C, LI G, et al. Salt-resistant photothermal materials based on monolithic porous ionic polymers for efficient solar steam generation [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(9): 8746–8754.
- [22] ZHOU L, LI X Q, NI G W, et al. The revival of thermal utilization from the sun: interfacial solar vapor generation [J]. *National Science Review*, 2019, 6(3): 562–578.
- [23] YU F, WANG J X, YAN L, et al. Bio-inspired molybdenum carbide/carbon-based aerogel with advanced thermal management as a solar evaporator [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 243: 111738.
- [24] CHEN T J, XIE H, XIAO X, et al. Highly anisotropic corncob as an efficient solar steam-generation device with heat localization and rapid water transportation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(45): 50397–50405.
- [25] LIU F Q X, XIA L M, ZHANG L Y, et al. Sunflower-stalk-based solar-driven evaporator with a confined 2D water channel and an enclosed thermal-insulating cellular structure for stable and efficient steam generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(46): 55299–55306.
- [26] FENG Q, BU X T, WAN Z M, et al. An efficient torrefaction bamboo-based evaporator in interfacial solar steam generation [J]. *Solar Energy*, 2021, 230: 1095–1105.
- [27] HAO L, LIU N, BAI H Y, et al. High-performance solar-driven interfacial evaporation through molecular design of antibacterial, biomass-derived hydrogels [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 608: 840–852.
- [28] LI J Y, SHEN S, LI C H, et al. Janus biopolymer sponge with porous structure based on water hyacinth petiole for efficient solar steam generation [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(16): 9185.
- [29] LI W, LI X F, CHANG W, et al. Vertically aligned reduced graphene oxide/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene hybrid hydrogel for highly efficient solar steam generation [J]. *Nano Research*, 2020, 13(11): 3048–3056.
- [30] XU K Y, WANG C B, LI Z T, et al. Salt mitigation strategies of solar-driven interfacial desalination [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31(8): 2007855.
- [31] KUANG Y D, CHEN C J, HE S M, et al. A high-performance self-regenerating solar evaporator for continuous water desalination. *Advanced Materials* [J], 2019, 31(23): 1900498.
- [32] WANG Z X, GAO J, ZHOU J J, et al. Engineering metal-phenolic networks for solar desalination with directional salt crystallization [J]. *Advanced Materials*, 2022, 35(1): 2209015.
- [33] ZHANG M R, XU F, LIU W J, et al. Antibacterial evaporator based on reduced graphene oxide/polypyrrole aerogel for solar-driven desalination [J]. *Nano Research*, 2022, 16(4): 4219–4224.
- [34] TU W L, LI H D, LI B, et al. Micelle-mediated assembly of metals in Ag@MnO<sub>x</sub>/m-SiO<sub>2</sub> for reinforced antimicrobial activity and photothermal water evaporation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 924: 116489.

- [35] GUAN X W, KUMAR P, LI Z X, et al. Borophene embedded cellulose paper for enhanced photothermal water evaporation and prompt bacterial killing[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(7):2005809.
- [36] WANG F, WANG C, LI G, et al. Natural wood-derived all-carbon-conductive foam for sustainable all-weather monolithic photo-electrothermal interfacial water evaporation[J]. *Materials Today Nano*, 2023, 23:100352.
- [37] YU H M, WANG D Y, JIN H Y, et al. 2D MoN<sub>1,2</sub>-rGO stacked heterostructures enabled water state modification for highly efficient interfacial solar evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(24):2214828.
- [38] MU X T, CHEN L H, QU N N, et al. MXene/polypyrrole coated melamine-foam for efficient interfacial evaporation and photodegradation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 636:291-304.
- [39] HOU Q, ZHOU H Y, ZHANG W, et al. Boosting adsorption of heavy metal ions in wastewater through solar-driven interfacial evaporation of chemically-treated carbonized wood[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 759:144317.
- [40] AN D D, SUN Y, YANG Y L, et al. A strategy-purifying wastewater with waste materials: Zn<sup>2+</sup> modified waste red mud as recoverable adsorbents with an enhanced removal capacity of congo red[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 645:694-704.
- [41] BAI X, SHI J, ZHANG Z Y, et al. Efficient persulfate activation by photo-excited organic dyes; mechanism and application for actual dyeing wastewater self-purification [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 421:138375.
- [42] LIU M Y, ZHANG S D, YUAN T, et al. Low-cost, scalable, and durable coal-based composite aerogel beads solar evaporator for efficient seawater desalination and wastewater purification [J]. *Desalination*, 2023, 550:116401.
- [43] WANG Y M, ZHAO J J, ZHANG Z C, et al. Water strider inspired floating solar evaporator with high salt-resistant ability for desalination of contaminated seawater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3):109800.
- [44] MO H, WANG Y. A bionic solar-driven interfacial evaporation system with a photothermal-photocatalytic hydrogel for VOC removal during solar distillation[J]. *Water Research*, 2022, 226:119276.
- [45] ZHANG P, PIAO X X, GUO H X, et al. A multi-function bamboo-based solar interface evaporator for efficient solar evaporation and sewage treatment [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 200:116823.
- [46] WANG Y, QI Q B, WANG W, et al. Simple and robust MXene/carbon nanotubes/cotton fabrics for textile wastewater purification via solar-driven interfacial water evaporation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 254:117615.
- [47] 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.
- [48] YUAN B H, SUI Y, DONG J, et al. A high-efficiency solar water evaporation-photocatalysis system achieved by manipulating surface wettability and constructing heterojunction [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 611:115678.
- [49] LÜ X B, DONG J, YUAN B H, et al. 2D/2D MoS<sub>2</sub>/ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> heterojunction for simultaneous realization of solar water evaporation and photocatalytic dye degradation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 965:171382.
- [50] ZAKARIA H, LI Y, FATHY M M, et al. A novel TiO<sub>2-x</sub>/TiN@ACB composite for synchronous photocatalytic Cr(VI) reduction and water photothermal evaporation under visible/infrared light illumination [J]. *Chemosphere*, 2023, 311:137137.
- [51] ZHU L L, DING T P. Shape conformal and thermal insulative organic solar absorber sponge for photothermal water evaporation and thermoelectric power generation [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(22):1900250.
- [52] JIN B Q, LU Y K, ZHANG X, et al. Iceberg-inspired solar water generator for enhanced thermoelectricity-freshwater synergistic production [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469:143906.
- [53] CHEN L, REN J X, QU J P, 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.

- [54] CHENG P F, WANG D. Easily repairable and high-performance carbon nanostructure absorber for solar photothermoelectric conversion and photothermal water evaporation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(6): 8761–8769.
- [55] WU Y T, HUANG H Q, ZHOU W M, et al. High-porosity lamellar films prepared by a multistage assembly strategy for efficient photothermal water evaporation and power generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(25): 29099–29110.
- [56] 张奇.  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  和木质基光热器件的制备及其太阳能界面水蒸发和产电性能 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [57] 宴哲. 基于多孔聚乙烯醇水凝胶的界面光热水蒸发与温差发电特性研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.
- [58] 涂宏宇. 钨酸铋基复合材料的制备及光-热-电能源转换性能的研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2022.

## Multifunctional Applications and Prospects for the Development of Solar-driven Interfacial Evaporation Technology

CAI Xinyan

(Shandong Institute of Scientific and Technical Information, Jinan 250101, China)

**Abstract:** Solar-driven interfacial evaporation (SDIE) technology, as an innovative solar energy utilization technology, has experienced significant advancements in the past decade, prompting the need for a comprehensive review of previous research to propel its development further. The fundamental components of solar interface photothermal evaporation devices are the photothermal conversion materials, which play a pivotal role in SDIE. The prevalent material systems, including plasma metal nanoparticles, semiconductors, carbon-based materials, and polymer-based materials were introduced in this article. Additionally, strategies to enhance the performance of SDIE, such as optimizing light absorption, designing efficient water transport channels, and implementing effective thermal management have been discussed. These strategies have effectively regulated the evaporator performance and enhanced energy utilization efficiency. Furthermore, the diverse applications of SDIE in desalination, sterilization, wastewater treatment, and simultaneous water and electricity generation were comprehensively described. Finally, the current challenges and limitations of SDIE were summarized, along with insights into the ideal SDIE evaporator, and future prospects for the development of SDIE technology were explored. The current development status of this technology provides insights into research efforts from the laboratory to actual large-scale solar-powered clean water production. SDIE demonstrates immense potential across various applications and holds promise as a sustainable solution to address energy and water scarcity issues in the green economy of the future.

**Keywords:** solar technology; photothermal conversion materials; water evaporation; desalination

(责任编辑 李秀芳)