



# 太阳能热脱盐的途径和应用研究

陈付爱<sup>1</sup>,牛纪娥<sup>2</sup>

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 山东省城建设计院, 山东济南 250001)

**[摘要]** 太阳能热脱盐(Solar thermal desalination, STD)是一种极具潜力的低能耗、可持续海水淡化新方法,可用于在能源基础设施不完备的干旱地区生产清洁淡水。目前,通过改进太阳能吸收材料和系统设计来提高STD效率受到越来越多的关注。系统地介绍了各类高效光热转换材料的特点及其在利用太阳辐射进行海水淡化方面的应用,然后从隔热结构和冷凝结构设计等不同的角度讨论了STD系统的热能管控措施,并进一步阐明了潜热回收的重要性,最后,总结了STD系统工艺现有的局限性和提高STD系统脱盐效率的有效途径,并对STD系统的实用性和经济性进行了展望,以期开发更高产水率、更低能耗的可再生能源脱盐新工艺提供参考。

**[关键词]** 太阳能热脱盐;海水淡化;高盐水;多效蒸馏;多级闪蒸;膜蒸馏

**[中图分类号]** P747 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)03-0048-07

## Research on pathways and applications for solar thermal desalination

CHEN Fuai<sup>1</sup>, NIU Ji'e<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;  
2. Shandong Urban Construction Design Institute, Ji'nan 250001, China)

**Abstract:** Solar thermal desalination(STD) is a promising novel method of low-energy sustainable seawater desalination, which can be utilized to produce clean fresh water in arid regions with inadequate energy infrastructure. Currently, increasing STD efficiency through improving solar absorbent materials and system designs attracts increasing attentions. The characteristics of various efficient photothermal conversion materials and their applications in seawater desalination using solar radiation were introduced systematically. Then thermal energy control measures of STD system were discussed from different perspectives such as the design of thermal insulation structures and condensing structures, and the importance of latent heat recovery was expounded further. Finally, the existing limitations of STD process and the effective ways to improve the efficiency of STD system desalination were summarized, and the practicability and economy of STD system were prospected. It hopes to provide reference for the development of a new desalination process of renewable energy with higher water yield and lower energy consumption.

**Key words:** solar thermal desalination; seawater desalination; high saline water; multi-effect distillation; multi-stage flash; membrane distillation

近年来,水资源短缺问题愈发严重,促使越来越多国家和地区通过海水淡化来满足日益增长的用水需求。传统海水淡化工需要消耗化石燃料以提供热能,化石燃料价格较高,致使该工艺资金投入大,且化石燃料的消耗易造成环境污染等诸多问题。在国家制定“碳达峰、碳中和”等相关环境政策的背景下,开发可再生能源替代传统化石燃料来进行海水淡化成为研究热点<sup>[1-2]</sup>。过去几年中,研究人员对开发太阳能热脱盐(Solar thermal desalination, STD)系

统,尤其是太阳能驱动的界面蒸发系统产生了极大的兴趣<sup>[3-5]</sup>。该系统可将海水、苦咸水等不可饮用水源通过绿色低碳、可持续的途径转化为可供饮用的淡水资源,在偏远和欠发达、对水量需求较低的地区极具吸引力。

太阳能热脱盐系统中,淡水的生产主要包括以下3个过程:(1)将太阳辐射转化为热能(热量);(2)将获得的热能用于蒸汽生产;(3)将蒸汽冷凝为液态水。现阶段,该领域在开发高效光热转换材料等方面的研究

取得了很大进展<sup>[6-8]</sup>,同时,研究人员也在热能管控、工艺设计等方面不断努力,以促进 STD 技术的进一步发展。基于此,笔者对基于蒸馏的 STD 高效光热转换材料、热能管控措施和高效的太阳能热脱盐工艺进行了综述,并对未来高效太阳能热脱盐技术的研究方向进行了展望,以期改进 STD 系统,缓解水资源短缺问题,促进清洁生产,创建绿色新型的脱盐工艺提供参考。

1 高效光热转换材料

要实现高效的太阳能热脱盐,必须具有高吸收效率的太阳能吸收器,这有赖于能够进行宽带太阳光谱吸收的材料开发<sup>[9-11]</sup>。从传统意义上讲,此类材料类似于黑体,其能够吸收几乎所有的太阳能辐射,并且没有反射和透射。目前,研究人员普遍认为有 2 大类材料可作为高效的太阳能吸收材料,即碳材料和等离子体纳米材料。

传统的块状碳材料主要包括炭黑(Carbon black, CB)<sup>[12-14]</sup>和石墨<sup>[15-16]</sup>。此外,碳纳米材料,如

石墨烯<sup>[17-18]</sup>、氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)<sup>[19-20]</sup>和碳纳米管(Carbon nano tube, CNT)<sup>[21-22]</sup>,以及经过碳化处理后的天然纤维材料,如碳化后的植物杆茎、蘑菇等,因具有高效的光吸收效率,也可用作高效的太阳能吸收材料<sup>[23-24]</sup>。

近年来,基于纳米级等离子体共振效应的等离子体纳米材料因具有近乎完美的光热转换效率<sup>[25-26]</sup>引起了极大的关注。然而,一定尺寸的等离子体纳米材料只能有效吸收窄谱光源,为实现其对宽谱光源的高效吸收,可将其填充到多孔结构的材料中,通过在微米级或纳米级的多孔结构中纳米材料引起的等离子体共振,使之具备超高的光谱吸收性能。

除了以上这 2 大类材料之外,还有部分半导体材料因具有高度可调的能带结构亦可以作为有效的太阳能吸收体,如聚多巴胺<sup>[27]</sup>,黑色 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒<sup>[28]</sup>和 CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 等磁性纳米颗粒材料<sup>[16-17]</sup>。聚多巴胺材料可生物降解,对环境影响较小,而黑色 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒材料稳定性较好<sup>[28]</sup>。

以上材料的光热转换机理如表 1 所示<sup>[13]</sup>。

表 1 材料光热转换机理  
Table 1 Photothermal conversion mechanisms of materials

| 材料类型        | 材料种类                                                                                   | 光热转换机理                                                                                                              |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 碳基太阳能吸收材料   | CB、GO、CNT、碳化木材等                                                                        | 分子的热运动:电子的激发及其随后的弛豫过程。在光照条件下,光子激发的电子通过电子-电子和电子-声子散射快速生热。                                                            |
| 等离子体太阳能吸收材料 | Au、Ge、Al、In 等                                                                          | 等离子共振加热:入射光的频率与电子的自然振动频率达到一致时,电子得到集中激发,从而产生热电子,通过 Landau 阻尼机制进行非辐射阻尼,并通过电子-电子和电子-声子散射过程重新分配其能量,就会产生等离子体共振现象并随之产生热量。 |
| 半导体太阳能吸收材料  | TiO <sub>2</sub> 、CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 、MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 等 | 电子空穴的产生和释放:在光照条件下,能量高于半导体带隙的光子会导致激子以及电子空穴对的形成,电子和空穴会在复合重组之前弛豫到导带和价带边缘,将辐射能量转化为热量。                                   |

一般来说,与自然表面相比,新型太阳能吸收材料具有更高的太阳能吸收率。自然表面(如木材和树叶)的太阳能吸收率低于 55%,而含碳的新型太阳能吸收材料,包括涂有炭黑的聚丙烯腈(Polyacrylonitrile, PAN)材料、GO 材料和碳化蘑菇等,太阳能吸收率则大于 90%。此外,值得关注的是,等离子体纳米颗粒制备的太阳能吸收材料,如金等离子体吸收材料,更是显示出了接近 100% 的太阳能吸收率。

未来,在应用于高效太阳能热脱盐的光热转换材料开发方面不仅要注重提高材料的太阳能吸收率,而且还必须注重经济成本和可持续性。等离子体材料以及半导体材料虽然能够达到较高的光热转换效率,然而其价格相对较高,且在后续的处理上可能会造成一定的环境污染问题,因此,低成本、可再

生的天然碳化材料仍将是未来的研究重点。

2 有效的热能管控措施

在 STD 工艺中,热辐射、热对流和热传导均会引起热损失,因而并非所有被吸收的太阳能都能用于产生水蒸气<sup>[29]</sup>。获得输出比(Gained output ratio, GOR)是太阳能热脱盐过程中最重要的性能参数,其被定义为每千克蒸汽产生的蒸馏水质量,用来量化利用热能进行蒸馏的效率。为提高 STD 系统 GOR,必须实施有效的热能管控措施,以最大限度地减少热损失。

通过减少太阳能吸收材料和盐水溶液之间的直接接触来减少热损失<sup>[30]</sup>是最常见的热能管控方法,如在太阳能吸收材料和盐水溶液之间构建具有毛细管通道的隔热材料(如泡沫和木材)<sup>[31-32]</sup>,利用绝

热层分离太阳能吸收材料和本体溶液,可以显著减少由于传导而造成的热损失。G. NI等<sup>[33]</sup>提出了一种用于STD的具有热局域化能力的蒸发结构,如图1所示,该结构顶层是亲水性纤维状黑吸收体,其下是一个隔热结构,由交替的聚苯乙烯泡沫和白色纤维棉制成。聚苯乙烯泡沫具有极低的导热系数[约 $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ],能够有效限制热量从蒸发表面向水体传导,该装置的产水率能够达到 $2.5 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。另一种有效的热能管控措施是冷凝潜热回收,其将水蒸气液化时所释放的热量进行回收,用于加热进水。R. MILADI等<sup>[34]</sup>设计了一种能够回收冷凝潜热的太阳能真空膜蒸馏装置,其能够将水蒸气冷凝时释放的热量进行回收,单位能耗和GOR在夏至日分别提高了约35%和26%,在冬至日分别提高了约22%和19%。这表明,通过合理的热回收,可以有效提高太阳能热脱盐效率。

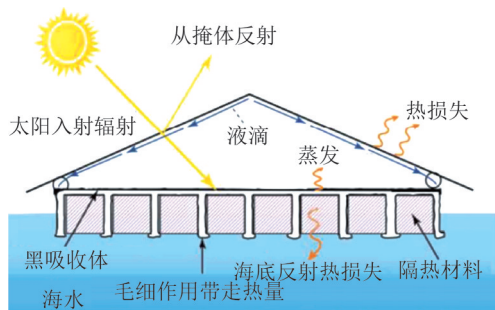


图1 具有热局域化能力的蒸发结构

Fig. 1 An evaporative structure with thermal localization

除了以上热能管控措施之外,对STD系统整体性能而言,其外壳设计也至关重要。对于STD工艺,其外壳设计主要包括3个方面:首先,STD外壳材料应该有较高的太阳光透射率;其次,STD外壳必须能够有效促进水蒸气冷凝成核,减少顶部空间饱和,否则水分蒸发所需的太阳能投射效率将大为降低;同时,还需要保证外壳形体设计,以防止冷凝水滴流回浓缩水。通过利用特殊润湿性的纳米材料作为STD系统外壳可以有效促进水蒸气冷凝<sup>[35-36]</sup>,如图2所示<sup>[35,37]</sup>,具有超疏水性和局部可湿润性层次结构的外壳表面可有效促进液滴成核、聚集、分离和再成核的连续过程。此外,不少研究还建议使用太阳能电风扇来强制对流,通过光能驱动扇叶转动来进行空气降温,以促进冷凝<sup>[38]</sup>。目前,在关于STD的研究中,大部分都侧重于通过计算水的质量损失来确定

蒸发量,而对水蒸气快速冷凝成核这方面的研究相对较少,因此,通过设计高性能的STD隔热、冷凝装置并将其与具有高效光热转换能力的太阳能吸收材料组合是提高STD产水量的关键。

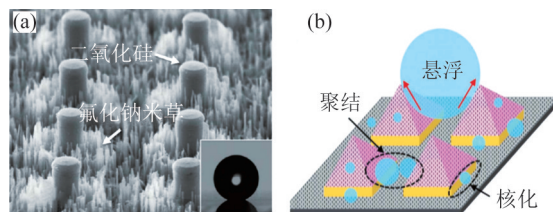


图2 强化水蒸气冷凝的纳米材料

Fig. 2 Nano-materials for enhancing water vapor condensation

### 3 高效的太阳能热脱盐工艺

一般的STD系统包含工程热脱盐系统与太阳能集热器2个子系统,将工程热脱盐系统与太阳能集热器有效结合是构建具有高比产水率(Specific water productivity, SWP)的STD系统的前提。对于大型STD系统而言,最常见的系统配置为多级闪蒸(Multi-stage flash, MSF)或多效蒸馏(Multi-effect distillation, MED)系统与太阳能加热器<sup>[39-40]</sup>的耦合。MSF和MED是已经成熟的热脱盐技术,其单机容量可达到 $1\times 10^2\sim 1\times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。图3<sup>[41]</sup>为太阳能驱动的MSF和MED工艺流程图,由图3可知,虽然二者系统配置不同,但其在系统设计时均采用在水蒸气冷凝过程中添加进料液的措施,都有利于冷凝潜热的回收。此外,MSF和MED系统均在负压下运行,因此即使在相对较低的温度下,也可以通过降低顶空压力来实现快速水分蒸发。为了保持蒸发室的部分真空,在实践中需消耗少量的电力来不断地从系统中去除产生的蒸汽,其电耗通常为 $4 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,相对较低。与直接利用电能的反渗透(Reverse osmosis, RO)和正渗透(Forward osmosis, FO)工艺相比,太阳能驱动的MSF和MED工艺因为能够直接利用可再生能源,因而能够降低并网电力的消耗,制水成本得到一定程度的降低。

虽然MSF和MED已较为成熟高效,但由于设备较大,安装运行过于复杂,它们在小规模的电脱盐工程应用中并不实用。膜蒸馏(Membrane distillation, MD)是一种有潜力用于小规模STD的技术<sup>[42-43]</sup>。在MD过程中,疏水多孔MD膜将热(盐水)进料流与冷(馏分)流分离,温差使得MD膜上产生部分蒸汽压差,为蒸汽输

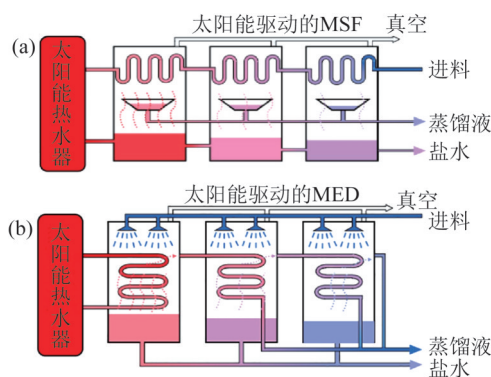


图3 太阳能驱动的MSF和MED

Fig. 3 Solar powered MSF and MED

送提供动力。MD主要有直接接触式膜蒸馏(Direct contact membrane distillation, DCMD)、气隙式膜蒸馏(Air gap membrane distillation, AGMD)、扫气式膜蒸馏(Sweeping gas membrane distillation, SGMD)和真空式膜蒸馏(Vacuum membrane distillation, VMD)<sup>[44]</sup>4种形式。虽然每种不同MD装置都有自己的优点,但AGMD对于开发小规模STD系统具有独特的优点。如图4<sup>[41]</sup>所示,在AGMD工艺系统中,盐水在逆流系统中循环通过给水室和冷却水室,穿过蒸馏膜的蒸汽进入蒸馏室,在热传导的冷凝面上凝结,与冷却水流接触,产生可作为产品水收集的蒸馏物。通过收集传导从热进料流转移的冷凝潜热来加热冷进料流,然后从太阳能集热器吸收额外的热量使冷进料流成为热进料流,可以有效提高对太阳能的利用率;并且,逆流结构更有助于回收潜热。使用盐水作为冷却流对于小型STD系统特别有优势,因为它无需大量淡水来启动工艺,此外,AGMD的系统设计上内置了热回收功能,能够更加有效地提高热能利用率<sup>[45]</sup>。

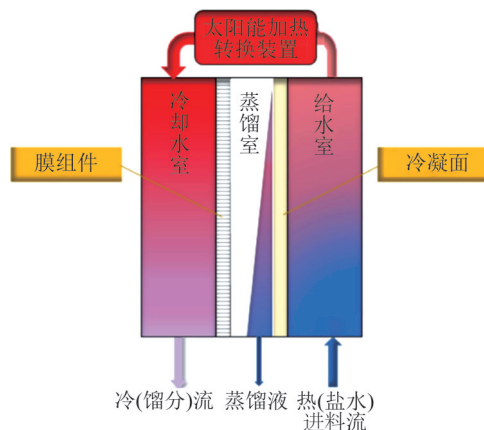


图4 AGMD工艺系统

Fig. 4 AGMD process system

近来,研究人员将光热转换材料集成到蒸馏膜表面,用以提高膜蒸馏系统的效率<sup>[46-47]</sup>。如图5<sup>[46]</sup>所示,通过静电纺丝工艺将炭黑-聚乙烯醇混合物均匀固定在聚偏氟乙烯膜的一侧,能够直接加热膜进料侧的水体,在不到700 W/m<sup>2</sup>的光照辐射条件下,每天将产生约4 L的淡水。光热MD无需太阳能集热装置和热交换器,还可以提高热效率并缓解传统MD过程中膜表面的温差极化问题。由于直接通过太阳能加热蒸馏膜会产生一个均匀的热膜表面,在多级AGMD系统中,上一级的冷凝潜热可以驱动下一级的液体蒸发。根据膜蒸馏原理,通过将原蒸馏膜替换为太阳吸热复合膜作为STD系统的主要构筑物,以吸热膜和疏水蒸馏膜合成新型太阳能热脱盐装置,可以有效提高光能的利用率和系统的脱盐效率。

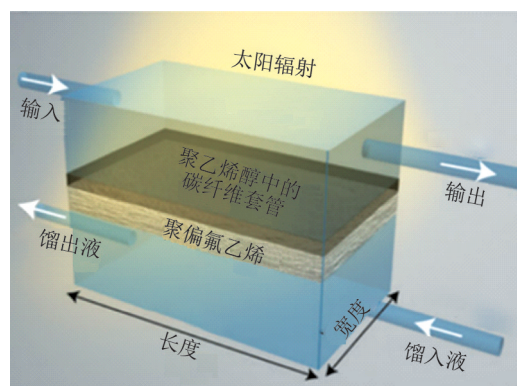


图5 光热转换材料集成到蒸馏膜表面

Fig. 5 The photothermal conversion material integrated into the distillation membrane surface

现有海水淡化工艺对比分析如表2<sup>[48-49]</sup>所示。

由表2可知,目前RO海水淡化技术凭借较高脱盐效率和技术优势赢得了最高的市场占有率(65%),但反渗透工艺往往需要消耗较高的电能,并且所产淡水水质较低。FO工艺无需操作压力,具有较高的水回收率,并且无浓盐水排放,然而,FO膜、膜组件的制备和汲取液的选择及分离等问题尚未完善,这极大地限制了FO工艺在市场上的推广。MED和MSF 2种工艺,产水水质较高,并且可以直接利用可再生能源提供热能,是一种环境友好的海水淡化技术,但目前其设备运行较为复杂,占地面积大。MD电能消耗最低,因膜材料成本偏高、技术尚处于发展阶段等因素制约,其市场占有率仅为2%,但MD工艺可以直接利用可再生能源,特别是带有太阳能加热层的多级膜蒸馏系统,可以通

表 2 现有海水淡化工艺对比分析

Table 2 Comparative analysis of the existing seawater desalination processes

| 技术名称 | 驱动力 | 热能消耗/<br>(kW·h·m <sup>-3</sup> ) | 电能消耗/<br>(kW·h·m <sup>-3</sup> ) | 盐/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 市场占有率/% | 特点                            |
|------|-----|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------|-------------------------------|
| RO   | 液压  | —                                | 2.5~7.0                          | 200~500                     | 65      | 组件易于构建,碳排放量较低                 |
| FO   | 渗透压 | —                                | <30                              | —                           | <2      | 液压较低,膜废料产生较少,可忽略进料液污染物的影响     |
| MED  | 热能  | 40.3~63.9                        | 2.0~2.5                          | <10                         | 7       | 比相同容量的 MSF 组件更易于操作,适用于中等规模操作  |
| MSF  | 热能  | 52.8~78.3                        | 2.5~5.0                          | <10                         | 21      | 适用于处理水质较差、杂质较多的工业废水           |
| MD   | 蒸汽压 | 120~1 700                        | 0.6~1.8                          | <10                         | <2      | 利用低品位能源,单位膜接触面积较大,对膜的力学性能要求不高 |

过在进水区填充多孔、亲水的吸水性材料,自发、连续地从储水区中吸收水分,省去动力装置。这一优势对于小规模、低成本的 STD 系统尤为重要,因为它既不需要水泵系统,也不需要额外的太阳能光伏板进行供能,同时,减少了各类电子元件的数量,也进一步降低了系统故障的风险。由于光热 MD 受天气影响较大,需要一定的光照收集面积,不适宜大规模工程应用。但在某些偏远地区、海岛、舰船等人口数量相对较少的区域,不需要大规模的脱盐设备,光热 MD 则具有一定的应用前景。

4 展望

STD 作为一种新兴的脱盐技术,在高含盐水浓缩减量、零排放、高效分离等特定领域或集成工艺中发挥着重要作用,可作为现有脱盐技术的有益补充。但由于 STD 技术主要是将光能转化为热能,目前来看,各类太阳能吸收材料以及蒸发结构的出现,使光能利用和水分蒸发的效率达到了极值,很难再进行提升;并且 STD 技术多见于中小规模的应用,很难与 RO 等脱盐技术进行竞争。因此总体而言,STD 技术目前尚处于技术瓶颈突破的关键时期,研究重点应放在高性能太阳能吸收材料的应用和简单、高效的潜热回收利用技术开发等方面,同时还需进一步扩大 STD 的应用领域。事实上,目前全球所建的大型海水淡化厂都基于 RO 技术,STD 则更多地作为 RO、MSF、MED 等工艺的补充进行使用,不过对于水需求量较低的偏远和欠发达地区,以及某些应急场合,STD 则较之于 RO 工艺更加适宜。总之,STD 作为一种新兴的技术,可以直接利用可再生能源,有效降低了化石能源的消耗,并直接减少了碳足迹,是一种绿色、可再生、可持续的新型工艺,极具发展前景。未来,该技术可在以下几方面进行进一步研究

与优化:

- (1)在现有光热转换材料的基础上进一步提高蒸发装置的使用寿命,如提高太阳能吸收材料的耐盐性和稳定性,研究材料污垢形成机理和除垢措施,提高其重复利用率等。此外,进一步研究蒸发过程副产物(如高盐废水)的后续处理等问题也具有重要意义。
- (2)在热能管控方面,建议结合仿生学,参照自然界中动植物以及其他具有疏水或自洁功能的生物结构来构建新型的太阳能蒸发界面,或是利用毛细蒸发等技术进一步提高系统的产水率及热能利用率。
- (3)通过将太阳能热脱盐工艺与纳米流体等高新技术领域进行有效结合,开发出具有更高产水率、更低能耗的新型脱盐工艺,使其具有更广阔的发展前景。

参考文献

[1] ELIMELECH M, PHILLIP W A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment[J]. Science, 2011, 333(6043):712-717.

[2] 王芳. 基于减压膜蒸馏法太阳能海水淡化系统研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.

WANG Fang. Vacuum membrane distillation-based solar desalination system research[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.

[3] ZHANG Lulu, XING Jun, WEN Xinglin, et al. Plasmonic heating from indium nanoparticles on a floating microporous membrane for enhanced solar seawater desalination[J]. Nanoscale, 2017, 9(35): 12843-12849.

[4] PENG Wang. Emerging investigator series: The rise of nano-enabled photothermal materials for water evaporation and clean water production by sunlight[J]. Environmental Science: Nano, 2018, 5(5):1078-1089.

[5] YE Miaomiao, JIA Jia, WU Zhejian, et al. Synthesis of black TiO<sub>x</sub> nanoparticles by Mg reduction of TiO<sub>2</sub> nanocrystals and their appli-

- cation for solar water evaporation[J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(4): 1601811.
- [6] 魏玉梅,张新妙,栾金义. 太阳能膜蒸馏技术研究进展[J]. *现代化工*, 2020, 40(5): 42-46.
- WEI Yumei, ZHANG Xinmiao, LUAN Jinyi. Research progress on solar energy-assisted membrane distillation technology[J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(5): 42-46.
- [7] GHAFFOR N, BUNDSCHUH J, MAHMOUDI H, et al. Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems[J]. *Desalination*, 2015, 356: 94-114.
- [8] ZIELINSKI M S, CHOI J W, LA GRANGE T, et al. Hollow mesoporous plasmonic nanoshells for enhanced solar vapor generation[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2159-2167.
- [9] SHI Y, LI Renyuan, JIN Yong, et al. A 3D photothermal structure toward improved energy efficiency in solar steam generation[J]. *Joule*, 2018, 2(6): 1171-1186.
- [10] LIN Tianquan, YANG Chongyin, WANG Zhou, et al. Effective nonmetal incorporation in black titania with enhanced solar energy utilization[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(3): 967.
- [11] SU Xin, HAO Dezhao, SUN Mingyue, et al. Nature sunflower stalk pith with zwitterionic hydrogel coating for highly efficient and sustainable solar evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(6): 2108135.
- [12] XU Weichao, HU Xiaozhen, ZHUANG Shendong, et al. Flexible and salt resistant Janus absorbers by electrospinning for stable and efficient solar desalination[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(14): 1702884.
- [13] 张敬敬. 基于太阳能界面光热效应的脱盐净水研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHANG Jingjing. Study on desalination and water purification based on interfacial photothermal effect of solar energy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [14] ZHUANG Shendong, ZHOU Lin, XU Weichao, et al. Tuning transpiration by interfacial solar absorber: Leaf engineering[J]. *Advanced Science*, 2018, 5(2): 1700497.
- [15] GHASEMI H, NI G, MARCONNET A M, et al. Solar steam generation by heat localization[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4449.
- [16] KASHYAP V, AL-BAYATI A, SAJADI S M, et al. A flexible anti-clogging graphite film for scalable solar desalination by heat localization[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(29): 15227-15234.
- [17] ITO Y, TANABE Y, HAN J, et al. Multifunctional porous graphene for high-efficiency steam generation by heat localization[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(29): 4302-4307.
- [18] ZHANG Panpan, LI Jing, LÜ Lingxiao, et al. Vertically aligned graphene sheets membrane for highly efficient solar thermal generation of clean water[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 5087-5093.
- [19] YOUSEFI N, LU Xinglin, ELIMELECH M, et al. Environmental performance of graphene-based 3D macrostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(2): 107-119.
- [20] LI Xiuqiang, XU Weichao, TANG Mingyao, et al. Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(49): 13953-13958.
- [21] CHEN Chaoji, LI Yiju, SONG Jianwei, et al. Highly flexible and efficient solar steam generation device[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29: 1701759.
- [22] 李清, 杨登峰, 王建花, 等. 直径大于 2 nm 的 (15, 15) 碳纳米管的仿生生物改性及其脱盐行为的分子模拟[J]. *物理化学学报*, 2016, 32(3): 691-700.
- LI Qing, YANG Dengfeng, WANG Jianhua, et al. Biomimetic modification and desalination behavior of (15, 15) carbon nanotubes with a diameter larger than 2 nm[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2016, 32(3): 691-700.
- [23] XU Ning, HU Xiaozhen, XU Weichao, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29: 1606762.
- [24] JIA Chao, LI Yiju, YANG Zhi, et al. Rich mesostructures derived from natural woods for solar steam generation[J]. *Joule*, 2017, 1(3): 588-599.
- [25] WANG Tao, LIU Xiqing, MEN Qiuyue, et al. Surface plasmon resonance effect of Ag nanoparticles for improving the photocatalytic performance of biochar quantum-dot/Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> nanosheets[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2019, 40(6): 886-895.
- [26] 徐森元, 郑标, 林林, 等. 单个 Ag@SiO<sub>2</sub> 立方体对 NaYF<sub>4</sub>: Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> 纳米颗粒上转换发光等离子体增强[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(7): 969-975.
- XU Senyuan, ZHENG Biao, LIN Lin, et al. Plasmon enhanced up-conversion fluorescence of NaYF<sub>4</sub>: Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> nanoparticles with single Ag@SiO<sub>2</sub> nanocube[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(7): 969-975.
- [27] JIANG Qisheng, GHOLAMI DERAMI H, GHIM D, et al. Polydopamine-filled bacterial nanocellulose as a biodegradable interfacial photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(35): 18397-18402.
- [28] SHI Y, LI Renyuan, SHI Le, et al. A robust CuCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> composite photothermal material with underwater black property and extremely high thermal stability for solar-driven water evaporation[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2018, 2(3): 1700145.
- [29] WANG Xinzh, HE Yurong, LIU Xing, et al. Solar steam generation through bio-inspired interface heating of broadband-absorbing plasmonic membranes[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 414-425.

- [30] 张大帅, 费学宁, 苏润西, 等. 太阳能雾化脱盐系统热能利用率的研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(6): 50-53.
- ZHANG Dashuai, FEI Xuening, SU Runxi, et al. Study on the heat energy utilization rate of the solar energy pulverization desalination system[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(6): 50-53.
- [31] YIN Xiangyu, ZHANG Yue, GUO Qiuquan, et al. Macroporous double-network hydrogel for high-efficiency solar steam generation under 1 Sun illumination[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(13): 10998-11007.
- [32] 朱皓, 蓝敏杰, 文庆珍, 等. 乙烯基MQ硅树脂对室温硫化硅橡胶泡沫隔热材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(10): 15-20.
- ZHU Hao, LAN Minjie, WEN Qingzhen, et al. Effect of room temperature vulcanized foam thermal insulation material modified with vinyl MQ silicone resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(10): 15-20.
- [33] NI G, ZANDAVI S H, JAVID S M, et al. A salt-rejecting floating solar still for low-cost desalination[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(6): 1510-1519.
- [34] MILADI R, FRIKHA N, KHEIRI A, et al. Energetic performance analysis of seawater desalination with a solar membrane distillation[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 185: 143-154.
- [35] HOU Youmin, YU Miao, CHEN Xuemei, et al. Recurrent filmwise and dropwise condensation on a beetle mimetic surface[J]. ACS Nano, 2015, 9(1): 71-81.
- [36] ENRIGHT R, MILJKOVIC N, ALVARADO J L, et al. Dropwise condensation on micro- and nanostructured surfaces[J]. Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2014, 18(3): 223-250.
- [37] CHEN Xuemei, WU Jun, MA Ruiyuan, et al. Nanograsped micro-pyramidal architectures for continuous dropwise condensation[J]. Advanced Functional Materials, 2011, 21(24): 4617-4623.
- [38] DURKAIESWARAN P, MURUGAVEL K K. Various special designs of single basin passive solar still: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 1048-1060.
- [39] 齐春华, 范明明, 谢峰, 等. 海水淡化闪蒸罐的闪蒸特性数值模拟及优化设计[J]. 中国给水排水, 2009, 25(12): 87-91.
- QI Chunhua, FAN Mingming, XIE Feng, et al. Numerical simulation of flash evaporation characteristics and optimization design of flash tank for seawater desalination[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(12): 87-91.
- [40] PALENZUELA P, ZARAGOZA G, ALARCÓN-PADILLA D C. Characterisation of the coupling of multi-effect distillation plants to concentrating solar power plants[J]. Energy, 2015, 82: 986-995.
- [41] WANG Zhangxin, HORSEMAN T, STRAUB A P, et al. Pathways and challenges for efficient solar-thermal desalination[J]. Science Advances, 2019, 5(7): eaax0763.
- [42] 李福勤, 吕晓龙, 文晓翠, 等. 膜蒸馏—电去离子组合工艺处理高盐废水[J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 99-102.
- LI Fuqin, LÜ Xiaolong, WEN Xiaocui, et al. Combined process of membrane distillation and electrodeionization for treatment of high salinity wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(23): 99-102.
- [43] GHAFFOUR N, MISSIMER T M, AMY G L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability[J]. Desalination, 2013, 309: 197-207.
- [44] 任春雷. 膜蒸馏海水淡化和油水分离用疏水多孔陶瓷膜研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- REN Chunlei. Hydrophobic porous ceramic membranes for water desalination and oil/water separation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [45] YAO Kun, QIN Yingjie, YUAN Yingjin, et al. A continuous-effect membrane distillation process based on hollow fiber AGMD module with internal latent-heat recovery[J]. AIChE Journal, 2013, 59(4): 1278-1297.
- [46] DONGARE P D, ALABASTRI A, PEDERSEN S, et al. Nanophotonics-enabled solar membrane distillation for off-grid water purification[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(27): 6936-6941.
- [47] WU Jinjian, ZODROW K R, SZEMRAJ P B, et al. Photothermal nanocomposite membranes for direct solar membrane distillation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(45): 23712-23719.
- [48] GONZÁLEZ D, AMIGO J, SUÁREZ F. Membrane distillation: Perspectives for sustainable and improved desalination[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 238-259.
- [49] 刘羊九, 王云山, 韩吉田, 等. 膜蒸馏技术研究及应用进展[J]. 化工进展, 2018, 37(10): 3726-3736.
- LIU Yangjiu, WANG Yunshan, HAN Jitian, et al. State-of-the-arts review of research and application progress for membrane distillation technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(10): 3726-3736.
- 
- [作者简介] 陈付爱(1998—), 硕士研究生. E-mail: 2893319007@qq.com. 通讯作者: 牛纪娥, 工程师. E-mail: 1028830865@qq.com.
- [收稿日期] 2022-12-08(修改稿)