

# 棉基光热蒸发器在太阳能海水淡化中的应用进展

周洋<sup>1</sup> 张金萍<sup>1</sup> 彭婉丽<sup>1</sup> 王杰<sup>1</sup> 陈国华<sup>2</sup> 蔡再生<sup>1</sup>

1. 东华大学 化学与化工学院, 上海 201620;  
2. 三立人(深圳)科技有限公司, 广东 深圳 518000

**摘要:** 全球淡水资源短缺问题日益严峻, 太阳能驱动界面蒸发(SDIE)技术作为一项重要的海水淡化手段, 展现出巨大的应用潜力。棉因其优异的吸水性、轻质和低成本特性, 成为新型SDIE材料, 但其本体通过改性来提升光热性能的方法有限, 故需与金属、半导体、碳基材料或聚合物等光热材料复合以优化性能。总结了提升光热转换效率的几种方法, 即利用高吸光材料改性棉织物、调控材料复合关系、将光热蒸发器从二维升级至三维以提升海水蒸发速率与稳定性, 指出未来需开发高比表面积三维光热织物、深化光热机理研究、降低蒸发焓, 以推动高效稳定的实用化海水淡化系统的发展。

**关键词:** 棉织物; 太阳能; 界面蒸发; 光热材料; 海水淡化效率; 光热转换效率

中图分类号: TS 190.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)02-0010-12

## Advances in the application of cotton-based photothermal evaporators for solar driven seawater desalination

Zhou Yang<sup>1</sup>, Zhang Jinping<sup>1</sup>, Peng Wanli<sup>1</sup>, Wang Jie<sup>1</sup>, Chen Guohua<sup>2</sup>, Cai Zaisheng<sup>1</sup>

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Sanliren (Shenzhen) Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China

**Abstract:** The global freshwater shortage problem is becoming increasingly severe, solar driven interfacial evaporation (SDIE) technology, as an important seawater desalination method, shows great application potential. Cotton has become a novel SDIE material due to its excellent water absorption, light weight and low cost, but its bulk modification to improve photothermal performance is limited. Thus, it is necessary to compound cotton with photothermal materials such as metals, semiconductors, carbon-based materials, or polymers for optimization. Several methods to enhance the efficiency of photothermal conversion were summarized, which included modifying fabrics with high light-absorbing materials, adjusting material composite relationships, and upgrading photothermal evaporators from 2D to 3D to enhance seawater evaporation rate and stability. It was noted that in the future, it was required to develop 3D photothermal fabrics with high specific surface area, to deepen the study of photothermal mechanisms, reduce evaporation enthalpy, and promote the development of efficient and stable practical seawater desalination systems.

收稿日期: 2025-09-03

作者简介: 周洋, 男, 2002年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为海水淡化织物的开发及应用, 2846432994@qq.com

通信作者: 蔡再生, 教授, 主要研究方向为纺织品功能整理、纺织品印染工艺与控制, 以及新型助剂, zshcai@dhu.edu.cn

**Keywords:** cotton fabric; solar; interfacial evaporation; photothermal material; seawater desalination efficiency; photothermal conversion efficiency

随着工业的不断发展和全球人口数量的急剧增长,淡水需求量不断增加,全球淡水资源短缺问题日益严峻。海水在全球水资源中占比超过 96%,因此利用海水淡化技术获取淡水是解决上述问题的方法之一<sup>[1]</sup>。现阶段,海水淡化技术包含以多级闪蒸、多效蒸馏、反渗透及电渗析等为典型代表的传统海水淡化技术<sup>[2-4]</sup>,以及使用太阳能、风能等为能源的新型海水淡化技术。其中,太阳能蒸发技术因可以高效地将太阳能转化为热能而备受关注。传统的太阳能蒸发技术效率低,主要原因是光热材料 (PTMs) 对整个水体进行加热会造成大量热损失<sup>[5]</sup>。为了提高蒸发效率,研究人员提出了一种太阳能驱动界面蒸发 (SDIE) 技术。相较于传统的蒸发方式,该技术将光热转换集中在气-液界面,以此来降低热量损失,进而提高能量转换效率。凭借其卓越的能源利用效率和简易的结构,SDIE 技术近年来受到广泛关注,并成为科研前沿领域的研究热点。该技术突破了传统太阳能蒸发模式的能效瓶颈,通过最大化直接转化与利用太阳光能,实现了接近理论极限的能源转化效率。SDIE 技术不仅在海水淡化领域具有重要意义,还可广泛应用于废水净化、土壤水分收集与修复、发电系统以及医疗灭菌等关键场景。它为构建高效便携的多功能水处理系统开辟了新途径,在应对全球淡水资源、环境及能源挑战等方面潜力巨大。

近年来,棉因其柔软、轻质、低成本、易于大面积生产及可与其他材料复合等优点,成为新型的 SDIE

材料<sup>[6]</sup>。棉基光热蒸发器的制备主要有 2 种途径:一是对棉本体进行改性(如碳化),以提升其对太阳光的吸收能力<sup>[7]</sup>;二是将棉与各类光热材料复合,充分发挥棉自身优异的多孔结构和吸水性等优势,实现光热蒸发器高效输水、防积盐的特性并降低热损失,从而优化其光热性能。鉴于对棉改性的局限性和 PTMs 具有多样性的现象,复合策略具有更广阔的研究前景。因此,通过与其他光热材料复合构建多功能棉基光热蒸发器,已成为实现高效稳定 SDIE 技术的重要发展方向。

## 1 光热转换材料

优质高效的光热转换材料应具备优异的光吸收与转化性能,以及易制备、稳定性良好、成本低、易于回收且环保等特性<sup>[8]</sup>。选择材料时,应注重选用具有高吸收率、低透射率和低反射率的光热材料。依据电磁辐射与物质相互作用的不同原理,光热效应的作用机制可划分为等离子体局域加热、电子-空穴的产生与弛豫,以及分子热振动 3 种类型<sup>[9]</sup>(图 1)。近年来,纳米材料的开发提升了材料对光吸收和蒸发速率的调控能力,从而显著提高了光热转换与蒸发性能<sup>[10]</sup>。目前,金属<sup>[11]</sup>、半导体<sup>[12]</sup>、碳基材料<sup>[13]</sup>、聚合物<sup>[14-15]</sup>(图 2)及其复合物被广泛研究,并成为推动高性能太阳能驱动海水淡化的核心材料体系。

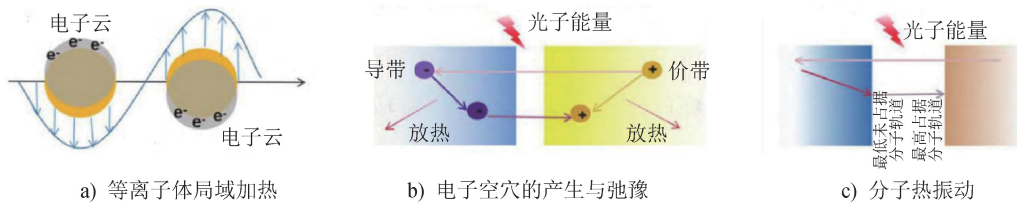


图 1 光热效应的作用机制

Fig. 1 Mechanism of photothermal effect

### 1.1 金属材料

纳米金 (Au)<sup>[16]</sup>与纳米银 (Ag)<sup>[17]</sup>等纳米金属材料具有局部表面等离子体共振 (LSPR) 效应,即当入射光的频率与该材料中电子云的固有振荡频率匹

配时,材料会发生强烈的共振吸收,从而在特定波段实现极高的光吸收效率,并将光能高效地转化为局部热能[图 1a]。该类材料因其光学性能可调、力学强度高,经复合处理后可广泛应用于海水淡化和光

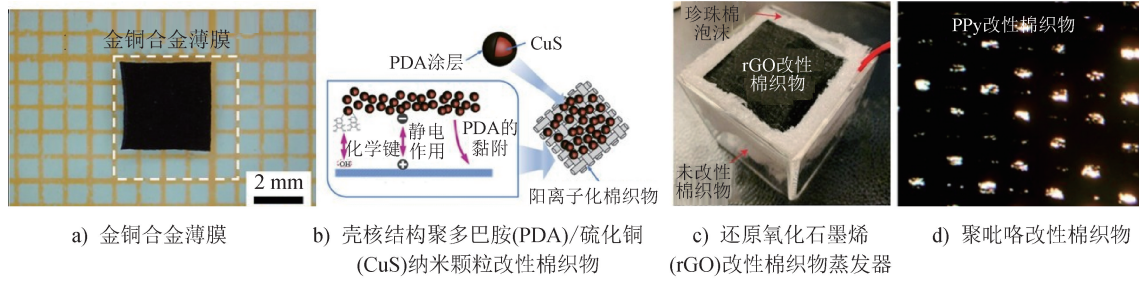


图2 不同材料制得的光热蒸发器  
Fig. 2 Photothermal evaporators made of different materials

热领域<sup>[11]</sup>。如 Sun 等<sup>[18]</sup>将金纳米颗粒(Au NPs)和聚吡咯(PPy)与棉织物(CF)复合,制备了纳米金@聚吡咯改性磨毛棉织物[图 3a)],其中,Au NPs 增强了光热性能,PPy 兼具光热和黏附作用,棉织物蓬松的结构可以保留更多的热量,三者复合大大提高了蒸发

速率。Liu 等<sup>[19]</sup>使用硝酸银(AgNO<sub>3</sub>)与左旋多巴胺合成的银/类黑色素纳米粒子对棉织物进行改性,得到的产品不仅具有良好的光热性能,还兼具优异的抗菌性。除纳米颗粒之外,还有纳米棒、纳米花等不同形态的金属纳米结构也被广泛应用于光热领域<sup>[5]</sup>。

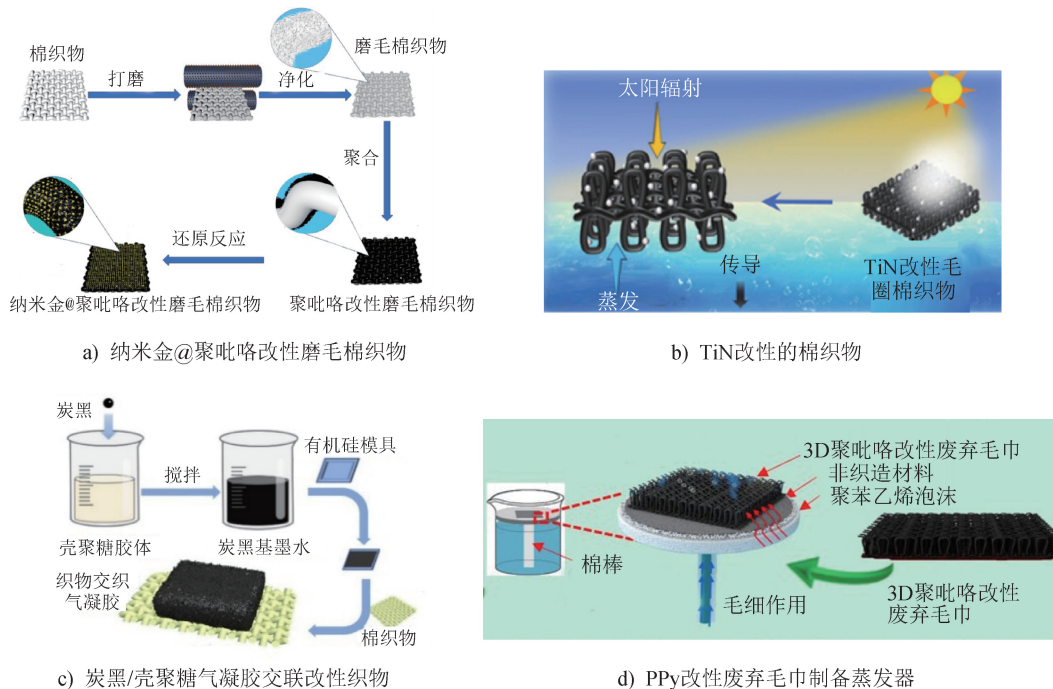


图3 各种光热材料改性的棉基光热蒸发器  
Fig. 3 Various photothermal material-modified cotton-based photothermal evaporators

### 1.2 半导体材料

除了金属,部分结构缺陷的半导体(如硫铜化合物和铜氧化物等)也可以凭借 LSPR 效应发热<sup>[12]</sup>,表现出类金属特性。例如,Cheng 等<sup>[20]</sup>制备的涂覆 PDA/CuS 的棉织物[图 2b)],其在光照下 20 s 便可达到 52.4 °C。另一部分半导体(如过渡金属及其碳化物、硼化物和硫化物)则依赖电子-空穴的产生与弛豫过程,即当吸收的光子能量大于带隙

时,价带电子跃迁至导带,形成处于激发态的电子-空穴对,激发态通过辐射发光或非辐射弛豫(如与晶格原子发生碰撞)释放能量,非辐射弛豫会导致原子振动加剧,宏观上表现为材料温度升高,即产生热能<sup>[5]</sup>[图 1b)]。例如,Wang 等<sup>[21]</sup>使用纳米氮化钛(TiN)对毛圈棉织物进行改性[图 3b)],发现在 1 kW/m<sup>2</sup>的光辐照度下,蒸发速率可从 1.42 kg/(m<sup>2</sup>·h)提升至 1.82 kg/(m<sup>2</sup>·h),太阳能吸收率达 93.4%。且

TiN 与棉织物的复合工艺简单、成本低,在海水淡化领域具有巨大应用潜力。

### 1.3 碳基材料与聚合物材料

贵金属与半导体类材料成本高昂,难以满足大规模海水淡化应用的需求,因此开发新型低成本、高性能的 PTMs 已成为当前研究的重点。碳基材料 [如炭黑<sup>[22]</sup>、碳纳米管 (CNTs)、石墨烯 (Gr)] 和具有共轭结构的聚合物材料 [如聚苯胺 (PANI)、PPy<sup>[11]</sup>],通过晶格振动或分子振动机制实现光热转换,即分子吸收与自身化学键振动频率匹配的光子后,跃迁至高振动能级,随后通过非辐射弛豫将振动能转化为热能 [图 1c]。这 2 类材料凭借优异的光吸收与光热转换性能,可显著提高海水蒸发速率<sup>[23]</sup>,为开发低成本、高效率的海水淡化技术提供了极具前景的解决方案。

PDA、PPy 作为典型的黑色聚合物,不仅具备优异的光热性能,还易于在纺织基材上进行功能化改性,具备显著的技术优势<sup>[24-25]</sup>,是替代传统 PTMs 的理想候选材料。Jhatal 等<sup>[26]</sup>使用 PPy 改性废弃的毛巾,并在毛巾与泡沫之间夹入非织造材料,构建出独特的结构 [图 3d],实现了高达 2.43 kg/(m<sup>2</sup>·h) 的蒸发速率。该 PPy 涂层织物制备工艺简单、性能稳定,为缓解水资源短缺问题提供了新途径。此外, PDA 在复合体系中可以充当“黏合剂”,增强整体结

构的稳定性。例如 Maity 等<sup>[25]</sup>制备的聚多巴胺/炭黑@聚丙烯 (PDA/CB@PP) 织物蒸发器蒸发速率达 1.68 kg/(m<sup>2</sup>·h),且对多种重金属离子的去除率高达 99%,在抗盐沉积和应对重金属污染方面表现优异。这些特性对处理成分复杂的真实海水、保障水质安全及确保蒸发器长期稳定运行具有重要意义。借助上述制备方法制备高性能涂层织物,可为规模化构建高效、抗污染、多功能的光热蒸发器提供切实可行的解决方案。

## 2 棉基光热蒸发器的制备

提升材料光热性能的关键是增强光吸收能力与光热转换效率。各类 PTMs 的作用机制、吸收范围、效率、成本及耐海水稳定性等差异显著。理想的 PTMs 应具备宽谱强吸收、低热导率、多孔亲水及抗盐等特性<sup>[27]</sup>。对棉织物进行改性,可有效赋予其上述性能,常用方法包括碳化<sup>[28]</sup>、涂层<sup>[29]</sup>、接枝和自组装<sup>[30]</sup>等 (图 4)。如中空碳化棉<sup>[28]</sup> [图 4a],其制备工艺简单,凭借其独特的中空结构可促进水分传输与蒸发,实现 3.0 kg/(m<sup>2</sup>·h) 的高蒸发速率和 86% 的光热转换效率,且环境友好、无毒,不仅能从污染海水中提取淡水,还可适配多种淡化系统,具有良好的应用前景。

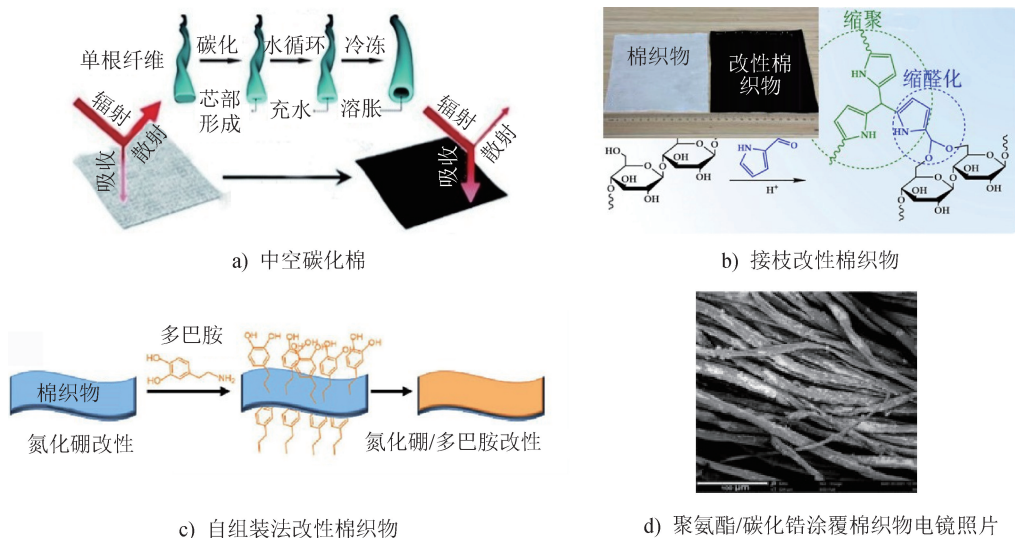


图 4 不同方法制得的棉基光热蒸发器

Fig. 4 Cotton-based photothermal evaporators produced by different methods

### 2.1 碳化、染色或沉积

碳化、染色或沉积是基础且高效的改性方法。

目前,已有诸多研究通过碳化天然植物纤维 (玉米秸秆)<sup>[31]</sup>制备高性能 PTMs。纤维素作为自然界中

储量丰富的可再生生物质,是制备生物质炭材料的理想前驱体。而棉花因其纤维素含量高<sup>[32]</sup>、杂质少,成为制备生物质炭材料的优质原料。

理想的 PTMs 应在太阳光谱范围(295~2 500 nm)内实现高效吸收,并尽量降低透射和反射,以提高海水淡化效率<sup>[5]</sup>。对棉织物进行碳化处理,能同步实现棉织物的黑化与多孔化,从而更有效地捕获并转化光能<sup>[33]</sup>。如 Chen 等<sup>[7]</sup>以不同的方式制备了 3 种碳化棉片[图 5a)],研究结果表明,其光热蒸发性能

比未处理棉片提高了 5 倍,这得益于碳化后孔隙率增加且表面不规则性增强,改善了光吸收与水分传输,进而提升了光热蒸发性能。其中,碳化棉粉末涂覆棉片凭借更高的表面粗糙度,实现了  $1.02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的海水蒸发速率。Kiriarachchi 等<sup>[34]</sup>制备了碳化棉加纯棉的双层结构材料[图 5b)],最大蒸发速率达  $0.9 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。总体而言,碳化法工艺简便、成本低廉,但其性能提升受限于碳化程度与结构均一性,且会损伤织物。

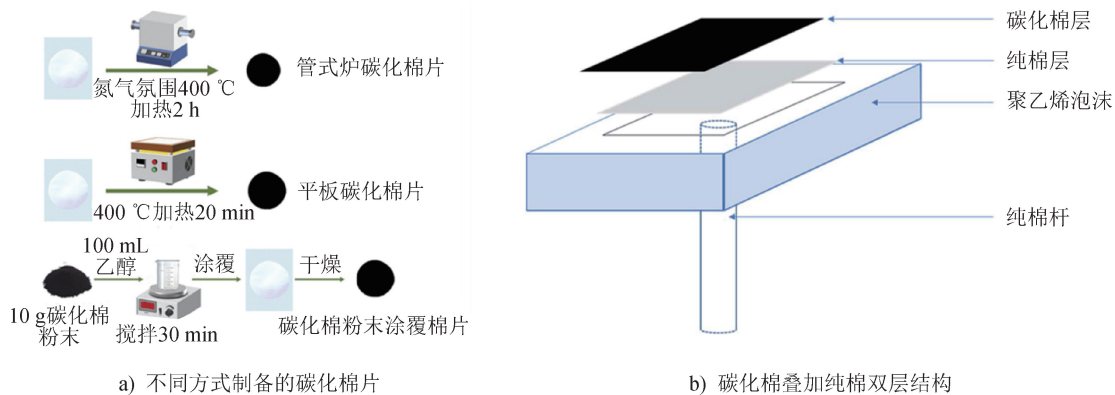


图 5 不同方式制备的碳化棉基光热蒸发器

Fig. 5 Carbonized cotton-based photothermal evaporators prepared by different methods

相较于整体碳化,表面沉积或染色是更为灵活的策略。例如, Kou 等<sup>[35]</sup>使用碳纳米管对棉织物进行简单染色,实现了高达  $1.59 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的海水蒸发速率[图 6a)]。Xiong 等<sup>[36]</sup>利用化学沉积在棉织物上负载二氧化锰 ( $\text{MnO}_2$ )

[图 6b)],蒸发速率达  $1.40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。这类织物多次使用后可以保持较高的稳定性,这在低成本、大规模的海水淡化方面有一定作用,但需要避免盐分的积累,及时清理是维持稳定蒸发性能的关键。

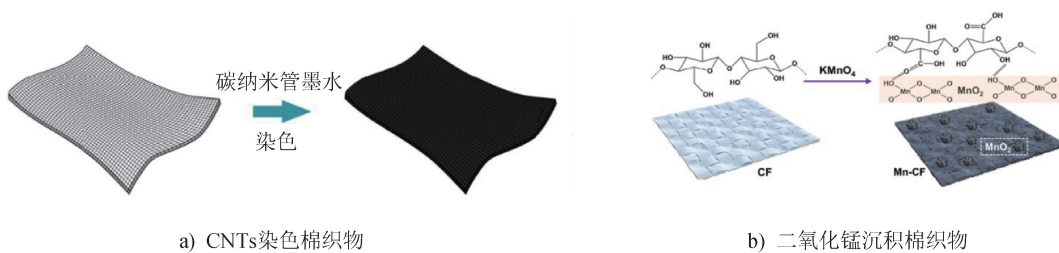


图 6 染色或表面沉积法制备棉基光热蒸发器

Fig. 6 Preparation of cotton-based photothermal evaporator by dyeing or surface deposition method

## 2.2 浸渍涂覆法

浸渍涂覆法作为一种经济简便的工艺,广泛应用于织物等基材的表面改性<sup>[37]</sup>。该方法通过将织物浸没于光热材料溶液或悬浮液中,经搅拌与烘干后即可实现功能化。与染色法相比,浸涂的材料选择范围更广。如 Huang 等<sup>[38]</sup>将不同织造结构的棉

织物浸入 MXene ( $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ) 悬浮液中得到光热织物(图 7)。得益于 MXene 的 LSPR 效应,棉织物与其复合后光捕获能力增强<sup>[39]</sup>,棉织物在  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$  的光辐照度下照射 180 s 后,表面温度呈现显著差异,最高温度可达  $49.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这为光热材料在海水淡化中的应用提供了基础。Wang 等<sup>[29]</sup>开发的聚氨酯/碳化

钴(PU/ZrC)复合棉织物在弱光条件下表面温度可达 75 °C,较未经处理的棉织物高出约 30 °C,展现出优异的弱光蒸发潜力[图 4d]。Bai 等<sup>[40]</sup>制备了表面含有漆酚铁聚合物的棉织物[图 8a)],其光热转换效率可达 91.72%,蒸发速率可达 1.49 kg/(m<sup>2</sup>·h)。

浸渍涂覆法还可用于构建更复杂的结构,进一步提升蒸发性能,如 Bai 等<sup>[41]</sup>制备的 Janus 型光热织物,其非对称润湿结构兼具集热、隔热与优秀的抗盐

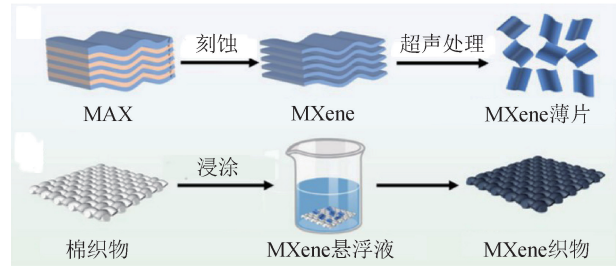
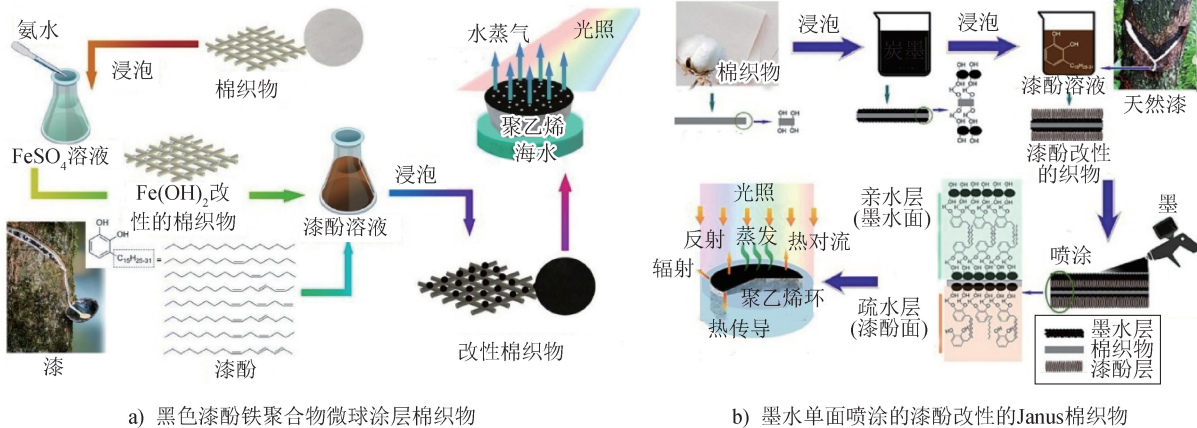


图 7 MXene 修饰的棉织物  
Fig. 7 MXene modified cotton fabric



a) 黑色漆酚铁聚合物微球涂层棉织物  
b) 墨水单面喷涂的漆酚改性的Janus棉织物

图 8 浸渍法制备的 2 种棉基光热蒸发器

Fig. 8 Two cotton-based photothermal evaporators prepared by dip coating method

性能[图 8b)],海水淡化速率提升至 1.64 kg/(m<sup>2</sup>·h)。与单一功能的亲水结构不同,这种底部疏水、表面亲水的独特非对称润湿结构不仅在气-液界面能起到集热隔热的作用,还可以防止海水与光热织物直接接触,增加了对盐的排斥力,表现出优异的抗盐性。与碳化法相比,浸渍涂覆法工艺灵活,易于引入新型纳米材料,但改性层与基材的结合力较弱,可能影响长期稳定性。

### 2.3 辐射接枝法

为提升耐久性,可以采用辐射接枝法在分子层面构建共价键实现稳定结合,显著提升材料在海水淡化应用中的耐久性。该方法利用高能射线(如  $\gamma$  射线)作用于聚合物基质,产生自由基或过氧化物等活性位点,随后引发单体在其表面发生接枝聚合反应。辐射接枝法可分为共辐射、预辐射和过氧化物接枝 3 种<sup>[42]</sup>。

相较于金属等无机材料,有机聚合物材料具有质轻、柔韧、易加工等特点,是理想的光热织物基材。通过共价接枝,可显著增强功能组分在织物表面的附着力,有效防止其在蒸发过程中溶出或迁移<sup>[43]</sup>。

例如, Lin 等<sup>[44]</sup>将吡咯-2-甲醛接枝到棉织物上,制备出具有优异耐久性的光热织物,其海水蒸发速率可达 1.62 kg/(m<sup>2</sup>·h)。Ding 等<sup>[14]</sup>使用  $\gamma$  射线共辐射法将氨基苯乙烯(4-AS)成功接枝到棉织物表面,不需要引发剂<sup>[45]</sup>,实现了棉织物的表面功能化,且不影响棉织物本体性能。在 1 kW/m<sup>2</sup> 的光辐照度下,其蒸发速率达 0.63 kg/(m<sup>2</sup>·h),是原棉织物蒸发速率的 2 倍以上,进一步用苯胺(An)原位接枝聚合(图 9),可得到蒸发速率达 1.39 kg/(m<sup>2</sup>·h)的 SDIE 棉织物,这充分展现了分子级改性策略在提升海水淡化效率方面的潜力。

### 2.4 自组装法

自组装技术基于氢键、范德华力、静电作用等分子间相互作用,以“自下而上”的方式引导分子自发排列,形成具有特定结构和功能的有序聚集体或更高层次的结构<sup>[46]</sup>。自组装技术具体包括超分子自组装、层层(LBL)自组装和水热自组装等。该技术通过选择性控制分子间相互作用,为从分子层面构建结构化系统提供了有效方法<sup>[47]</sup>。在海水淡化领域,自组装技术弥补了光热蒸发器缺少多尺度、有序

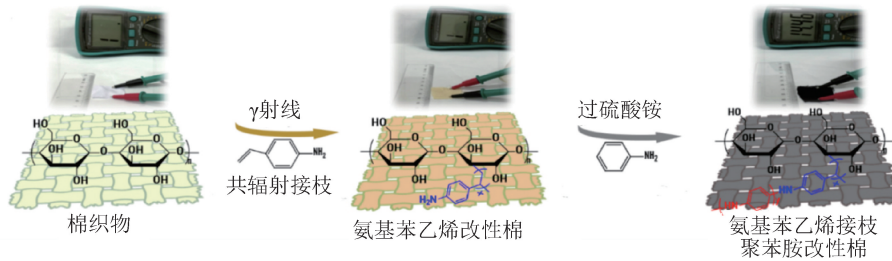


图9 共辐射接枝和原位接枝聚合制备柔性SDIE织物示意

Fig. 9 Schematic of preparation of flexible SDIE fabric by co-radiation grafting and *in-situ* grafting polymerization

化、系统引导水分子定性运输的能力。Tian 等<sup>[48]</sup>以水滴网络为模板,使用 CB 和聚苯乙烯-*b*-聚丁二烯-*b*-聚苯乙烯(SBS)在棉基底上组装了多级分孔结构

的 Janus 膜(图 10),孔径尺寸从几百纳米到几十微米可调,这种多孔结构的膜有利于延长光散射路径,增加光吸收和蒸发面积,并避免盐附着。

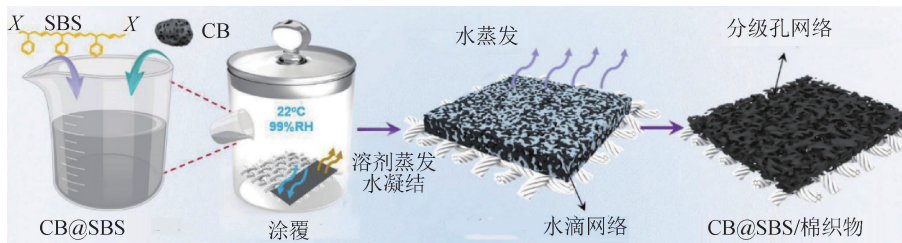


图 10 自组装技术制备的光热蒸发器 Janus 棉织物示意

Fig. 10 Schematic of Janus cotton fabric photothermal evaporator prepared by self-assembly technology

为突破 Janus 基材料的光热蒸发器在高蒸发速率与供水平衡方面的性能瓶颈,一种具有潜力的策略是在其疏水-亲水双层结构基础上,构建梯度润湿性界面,从而最大限度地避免过量盐水渗透至蒸发区。基于这个理念,Wu 等<sup>[49]</sup>通过 LBL 自组装技术和喷涂技术,制备了一种具有聚乙烯醇-碳纳米管染色棉-聚二甲基硅氧烷多层结构及超亲水-亲水-疏水-超疏水润湿梯度的新型棉织物蒸发器(图 11)。盐水逐渐

到达亲水-疏水界面,少量水分能够透过疏水层到达表面并发生蒸发,避免了对过量水进行加热所造成的热损失现象<sup>[31]</sup>,其蒸发速率可达  $1.54 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。中间亲水层的存在起到了水铺展的作用,在蒸发引起的浓度梯度作用下引导盐水向边缘而非顶部积聚,进而抑制盐结晶<sup>[50]</sup>,这为蒸发器在海水蒸发过程中可长期稳定使用提供了保障。与前述方法相比,自组装技术能实现更精密的结构设计,尤其在水

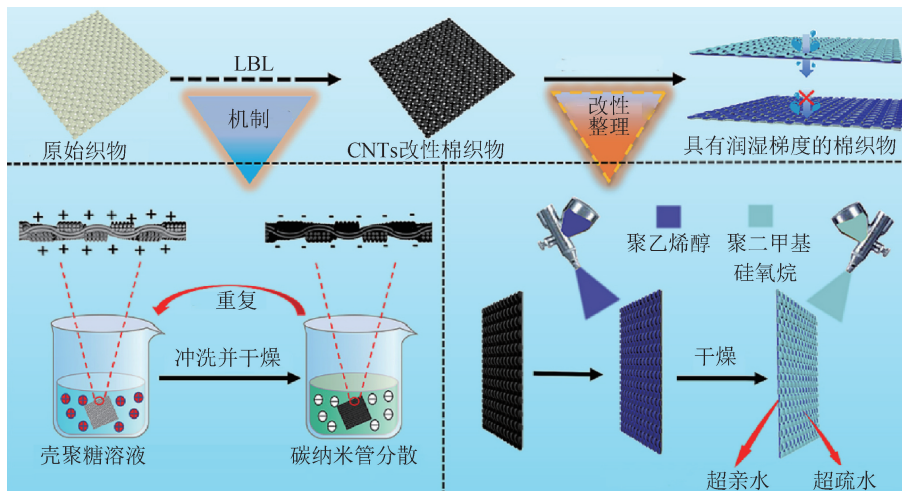


图 11 层层自组装技术制备具有润湿梯度的棉基光热蒸发器

Fig. 11 Preparation of cotton-based photothermal evaporator with wetting gradient using layer by layer self-assembly technology

管理和抗盐方面具有显著优势。

### 2.5 其他方法

除了以上制备方法,静电纺丝技术也是制备棉基光热蒸发器的重要技术。利用该技术制备的织物或膜具有堆叠的多孔结构,这一方面有利于光进行多次反射和吸收,另一方面可防止掺杂的光热颗粒脱落,提升耐久性<sup>[51]</sup>。此外,还包括原位生长、微胶囊、金属-有机框架(MOF)复合<sup>[52]</sup>等创新技术。

综上所述,棉织物的光热改性方法多样,从简便的碳化或涂层,到稳定的辐射接枝技术,再到精密的自组装技术,不同方法在性能、耐久性与工艺复杂程度上各有侧重。这些方法各具特色:碳化法工艺简单、成本低,能同步实现光吸收增强与多孔结构构建;浸渍涂覆法与沉积法易于规模化,却面临结合力不足的挑战;辐射接枝法在耐久性方面表现优异,但工艺相对复杂;自组装技术可实现精细的润湿结构与界面水输运调控。在实际应用中,需根据具体性能需求与制备条件,选择最适合的改性路径。

## 3 海水淡化效率的提升方法

从原理和 SDIE 系统结构来看,太阳能驱动界面蒸发装置通常由 3 部分组成:可高效地吸收并转化太阳能的光吸收器;向蒸发区提供水分的浮动蒸发结构;防止热能散失的隔热装置<sup>[53]</sup>。光热转换效率主要

取决于材料的光吸收能力、光热转换效率、热分布和管理。因此,可采取高效光热材料、优化光吸收与转换,合理调节热量的传递与分布等方法<sup>[18]</sup>提高效率。

### 3.1 PTMs 光吸收效率的增强

在太阳能海水淡化中,PTMs 是实现高效光热转换与水蒸发的关键材料<sup>[54]</sup>。单一 PTMs 存在光谱吸收的局限性,如某种金属材料只对特定波长范围内的光发生 LSPR 效应,对光的利用率不足。将多种对不同波段敏感的材料进行复合,能够拓宽材料的光吸收光谱范围,提升全光谱利用率,从而增强整体光热性能。

对于金属硫化物、钛基化合物等半导体类材料,光吸收受到带隙能量的制约,可以通过降低带隙或掺杂其他元素,增强光吸收能力。如 Kang 等<sup>[55]</sup>制备的 MXene/金纳米棒@缺铜型硫化亚铜(MXene/Au NR@Cu<sub>2-x</sub>S)三元杂化材料(图 12),其中 Cu<sub>2-x</sub>S 和 Au NR 的引入弥补了 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 在波长超过 1 000 nm 时的光吸收不足,同时,Cu<sub>2-x</sub>S 和 MXene 具有较强的紫外光吸收能力,使得复合材料的光吸收效率达到约 93%。进一步将金纳米棒@缺铜型硫化亚铜(Au NS@Cu<sub>2-x</sub>S)核壳杂化物(在 530~650 nm 波段具有强响应)与 Au NR@Cu<sub>2-x</sub>S 进行组合,能在保持近红外区等离子体共振能力的同时,有效弥补 Au NR 在 530~650 nm 波段的吸收缺陷,最终将光吸收效率提升至 96%。

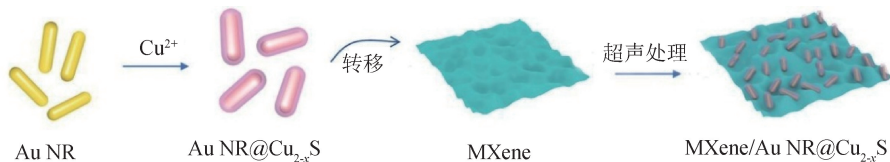


图 12 MXene/Au NR@Cu<sub>2-x</sub>S 三元杂化材料

Fig. 12 MXene/Au NR@Cu<sub>2-x</sub>S ternary hybrid material

### 3.2 蒸发器的结构设计

在太阳能光热材料的研究中发现,部分光热性能较优的 PTMs 所制备的蒸发器,其实际性能反而低于一些光热性能较弱的 PTMs 所制备的蒸发器。该现象主要归因于蒸发器在热管理、水传输、蒸汽逸散以及盐结晶调控方面的综合性能不佳,如热量未被水体有效吸收,水分供给与蒸发需求不匹配,蒸汽未能及时冷凝逸散,以及盐结晶阻碍光热部分对光的吸收等,均会导致蒸发器整体性能下降<sup>[56]</sup>。因此,高效蒸

发器的设计关键在于实现热、水、汽之间的协同管理。

在热管理方面,常见策略包括采用泡沫等隔热材料以降低蒸发过程中的热损失,或设计具有本征隔热特性的蒸发器结构。如 Wang 等<sup>[21]</sup>在研究中表明,毛圈结构的织物在 TiN 改性碳化棉织物(CCF)蒸发中表现最佳。其独特的垂直环阵列结构不仅降低了热损失,还促进了 TiN 高度聚集和光吸收,并通过“锁定”TiN 颗粒确保良好的循环稳定性。其蒸发速率达 1.82 kg/(m<sup>2</sup>·h),优于另外 2 种结构的

织物[图 13a)]。除了降低热损失,蒸发器还可以利用其温度低于环境温度的特性额外获取能量<sup>[56]</sup>。

因此,合理的结构设计是实现高效热管理的有效途径,其能够显著提升蒸发器的综合性能与稳定性。

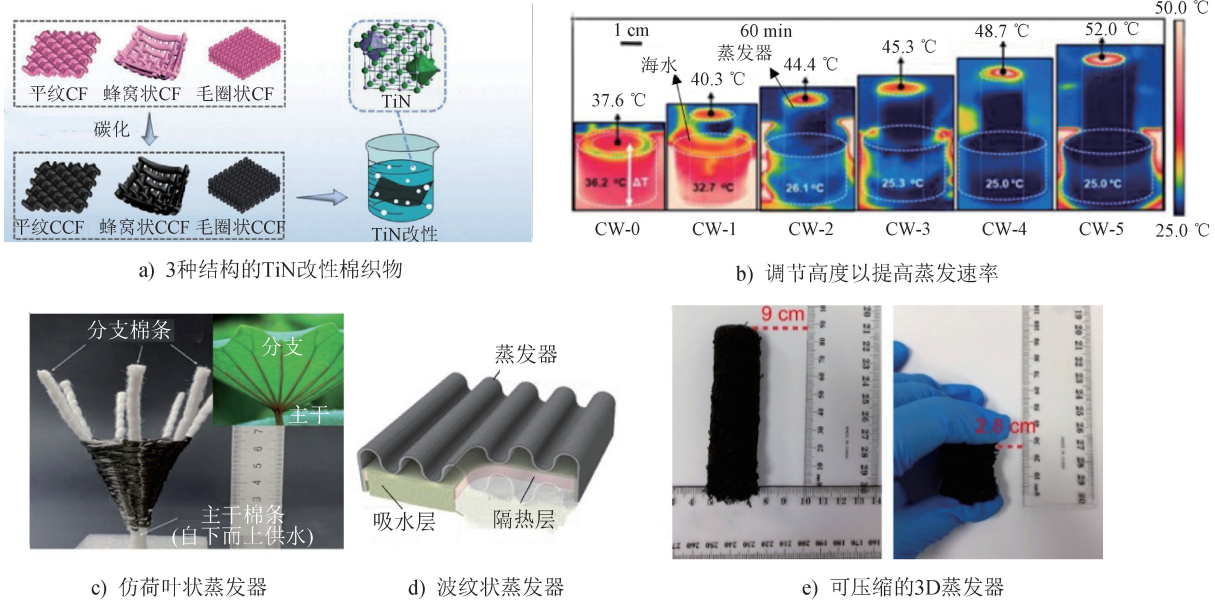


图 13 提高蒸发效率的蒸发器结构设计  
Fig. 13 Evaporator structure designs for enhanced evaporation efficiency

在水管理方面,控制供水量以匹配蒸发速率是关键。Chaule 等<sup>[57]</sup>通过控制棉包裹木棒(CW- $n$ ,其中 $n$ 为不同高度蒸发器的编号)上圆柱形蒸发器的高度,避免了水过多或不足导致的蒸发速率降低的问题[图 13b)]。此外,仿生结构也为水输运调控提供了灵感<sup>[58]</sup>。如 Bu 等<sup>[59]</sup>受荷叶结构启发,使用传统编织技术设计的 3D 碳纤维-棉织物蒸发器实现了高效稳定的供水[图 13c)]。由此可见,无论是宏观的结构尺寸控制,还是微观的仿生通道设计,精准的水管理是维持高效、稳定蒸发的关键。

海水淡化速率与蒸汽产生速率密切相关。3D 蒸发器更大的表面积在光吸收与蒸汽产出方面优势显著;同时,其表面形成的温度梯度有助于促进蒸汽的流动与溢出<sup>[58]</sup>。如 Le 等<sup>[60]</sup>制备的波形棉/石墨烯蒸发器[图 13d)],具有更大的蒸汽逸出表面积和更优的蒸汽溢出能力,其海水淡化速率比同组分的二维蒸发器提升了 16%。但 3D 蒸发器较大的体积也限制了其应用范围。Gao 等<sup>[61]</sup>为解决该难题,提出了一种可压缩的中空 3D 海水淡化系统[图 13e)],内部以弹簧支撑,兼具结构强度与便携性。其在储存状态的体积不足使用状态的 1/3,同时海水蒸发速率高达  $7.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,展现出作为

理想便携式海水淡化装置的潜力。此外,还有悬挂式、滑轨<sup>[13]</sup>式等蒸发器也为提高海水蒸发速率提供了更多可能。

综上所述,提升太阳能海水淡化效率的途径,已从单纯追求材料的光热性能,转向通过结构与多过程协同调控,实现光热转换与热管理的整体优化。

### 3.3 蒸发焓的降低与抗盐性

近年来研究表明,在不降低蒸发焓的条件下,2D 结构在海水淡化中存在蒸发速率的理论上限<sup>[56]</sup>。为突破这一限制,当前研究重点聚焦于通过引入亲水组分以增加中间水比例或对水分子进行活化等,降低水蒸发所需能量<sup>[58]</sup>。同时,也需兼顾蒸发器的长期稳定性,抑制或及时去除蒸发过程中产生的盐结晶。

Hu 等<sup>[13]</sup>将含有羧基化多壁碳纳米管的聚乙烯醇/戊二醛(PVA/GA)水凝胶涂到涤纶织物上,发现丰富的羧基能将水的蒸发焓从  $2453.7 \text{ kJ}/\text{kg}$  降到  $1664.6 \text{ kJ}/\text{kg}$ ,再结合 3D 结构的蒸发器,海水蒸发速率可达  $2.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,海水淡化效率显著提高。此外借助倾斜式水传输通道持续冲刷表面,可有效避免盐的结晶[图 14a)]。另一研究中,Shu 等<sup>[32]</sup>利用棉纤维

素制备了纤维素基水凝胶[图 14b)], 研究发现纤维素中丰富的羟基可增加中间水的比例, 同时聚苯胺对水起活化作用, 纤维素基水凝胶的海水淡化速率达  $3.02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。纤维素基水凝胶的亲水结构还能

在非工作阶段促进盐分再溶解, 保障了蒸发器的持续运行能力。这些研究表明, 通过协同调控水分子状态并设计抗盐结构, 可有效突破蒸发器的性能瓶颈, 为实现高效稳定的太阳能海水淡化提供可行路径。

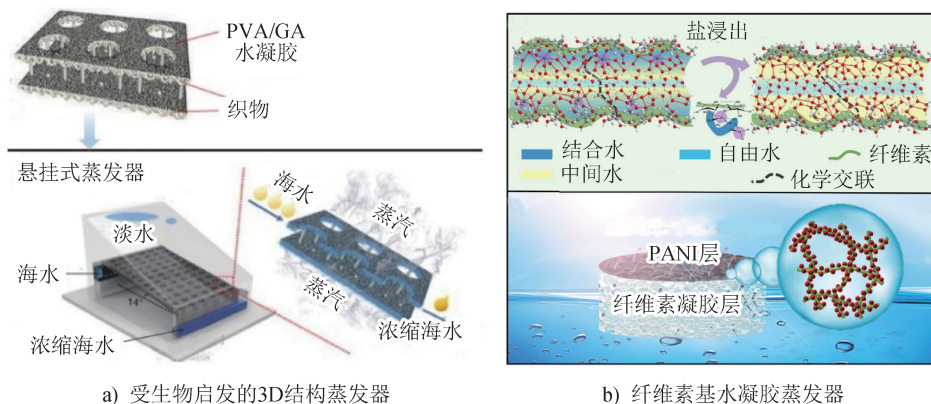


图 14 降低蒸发焓的 3D 蒸发器

Fig. 14 3D evaporator with reduced evaporation enthalpy

## 4 总结与展望

PTMs 在海水淡化应用中存在光吸收范围窄、热损失大、稳定性差以及制造工艺复杂、成本高等问题。棉织物吸水性强、结构多孔且成本低是辅助太阳能驱动界面蒸发的理想材料。PTMs 与棉织物结合优势明显。对棉基光热蒸发器而言, 优化结合方式、提高光热转换效率和增强在复杂海水环境中的稳定性是关键。

未来, 可以从多个维度展开探索。其一, 探究低成本、全太阳光谱吸收的材料, 提升材料的光热转换效率 ( $>90\%$ ), 提升复杂情况下材料的稳定性。其二, 深化光热-水传输耦合机制研究, 通过融合多学科知识, 构建具有大表面积、高孔隙率、低蒸发焓以及从微观到宏观多尺度特征的结构设计, 增强光吸收和蒸汽逸出效率, 降低蒸发所需能量。此外, 紧密结合实际应用场景 (如海上浮动平台), 设计高效、稳定、便携且易于规模化生产的光热海水淡化系统, 推动海水淡化技术向高效、低成本、可持续方向发展, 助力缓解全球淡水资源短缺问题。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

- [ 1 ] LIU H W, CHEN B C, CHEN Y L, et al. Bioinspired self-standing, self-floating 3D solar evaporators breaking the trade-off between salt cycle and heat localization for continuous seawater desalination [ J ]. *Advanced Materials*, 2023, 35(24): 2301596.
- [ 2 ] ALI E, ORFI J, ALANSARY H, et al. Advanced structures of reversal multi-stage flash desalination [ J ]. *Desalination*, 2024, 571: 117095.
- [ 3 ] YOUSEFI P, AVAMI A. Optimal configuration of low-grade waste heat driven seawater desalination using data envelopment analysis: a case study of industrial application [ J ]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2024, 43(5): e14438.
- [ 4 ] SONG L F. Optimization of seawater desalination processes with the ideal reverse osmosis equation [ J ]. *Desalination*, 2024, 576: 117376.
- [ 5 ] FANG Y M, GAO H M, CHENG K T, et al. An overview of photothermal materials for solar-driven interfacial evaporation [ J ]. *Chinese Chemical Letters*, 2025, 36(3): 109925.
- [ 6 ] KARAKAN GÜNAYDINA G, PALAMUTCU S, SOYDAN A S, et al. Evaluation of fiber, yarn, and woven fabric properties of naturally colored and white Turkish organic cotton [ J ]. *The Journal of the Textile Institute*, 2020, 111(10): 1436-1453.

- [ 7 ] CHEN H M, CHEN Y C, ZANG J Q, et al. Investigating the performance of solar steam generation using a carbonized cotton-based evaporator [ J ]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 817638.
- [ 8 ] GAO M M, PEH C K, MENG F L, et al. Photothermal membrane distillation toward solar water production [ J ]. *Small Methods*, 2021, 5(5): 2001200.
- [ 9 ] 曾玲玲, 高助威, 王迎迎, 等. 太阳能光热海水淡化技术研究进展 [ C ] // 2024 年海南机械科技学术论坛论文集, 2024: 147-162.
- [ 10 ] FUZIL N S, OTHMAN N H, ALIAS N H, et al. A review on photothermal material and its usage in the development of photothermal membrane for sustainable clean water production [ J ]. *Desalination*, 2021, 517: 115259.
- [ 11 ] YANG D, SHI X F, ZHANG J J, et al. Recent research progress and prospect of photothermal materials in seawater desalination [ J ]. *Acta Chimica Sinica*, 2023, 81(8): 1052.
- [ 12 ] DOIRON B, MOTA M, WELLS M P, et al. Quantifying figures of merit for localized surface plasmon resonance applications: a materials survey [ J ]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 240-259.
- [ 13 ] HU J J, PAZUKI M M, LI R X, et al. Biomimetic design of breathable 2D photothermal fabric with three-layered structure for efficient four-plane evaporation of seawater [ J ]. *Advanced Materials*, 2025, 37(14): 2420482.
- [ 14 ] DING R H, MENG Y S, QIAO Y Q, et al. Functionalizing cotton fabric via covalently grafting polyaniline for solar-driven interfacial evaporation of brine [ J ]. *Applied Surface Science*, 2022, 598: 153665.
- [ 15 ] SALEQUE A M, THAKUR A K, SAIDUR R, et al. rGO coated cotton fabric and thermoelectric module arrays for efficient solar desalination and electricity generation [ J ]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(1): 405-418.
- [ 16 ] ZHANG Y, WANG Y, YU B, et al. Hierarchically structured black gold film with ultrahigh porosity for solar steam generation [ J ]. *Advanced Materials*, 2022, 34(21): 2200108.
- [ 17 ] LI Z J, CHENG L, WANG Z Y, et al. Spider-cavity structured Ag/PDA @ NiCuO/CF evaporator with bilateral siphon-driven channels for enhanced solar desalination [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 522: 167869.
- [ 18 ] SUN Z H, HUANG F, CAI Y S, et al. A flexible sanded cotton fabric coated with Au@ polypyrrole for seawater desalination [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 492: 152309.
- [ 19 ] LIU W J, CHENG W, ZHOU M, et al. Construction of multifunctional UV-resistant, antibacterial and photothermal cotton fabric via silver/melanin-like nanoparticles [ J ]. *Cellulose*, 2022, 29(13): 7477-7494.
- [ 20 ] CHENG D S, LIU Y H, ZHANG Y L, et al. Polydopamine-assisted deposition of CuS nanoparticles on cotton fabrics for photocatalytic and photothermal conversion performance [ J ]. *Cellulose*, 2020, 27(14): 8443-8455.
- [ 21 ] WANG L, XIONG T T, ZOU H T, et al. Study on the photothermal conversion performance of TiN modified carbon fiber fabric [ J ]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9(5): 2301394.
- [ 22 ] REN H H, HU J J, PAZUKI M M, et al. 2D cotton fabric coated with 3D chitosan/carbon-black aerogel for continuous efficient solar desalination [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 514: 163276.
- [ 23 ] 朱蓉. 天然复合吸湿水凝胶可控构筑及其吸附式空气取水性能研究 [ D ]. 昆明: 云南师范大学, 2024.
- [ 24 ] XU Y S, TANG B, FANG X, et al. A facile approach to fabricate sustainable and large-scale photothermal polydopamine-coated cotton fabrics for efficient interfacial solar steam generation [ J ]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(49): 18109-18120.
- [ 25 ] MAITY S, YADAV M, PATRA A K. Polypyrrole coated textiles as photothermal material for interfacial solar evaporation [ J ]. *Fibers and Polymers*, 2023, 24(10): 3591-3600.
- [ 26 ] JHATIAL A K, ZHOU F K, LI Y M, et al. Upcycling of cotton towel fabric waste functionalized with PPy for solar evaporation [ J ]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 379: 134992.
- [ 27 ] 景欣欣, 王伟铎, 莫何苏, 等. 光热材料在太阳能海水脱盐中应用的研究进展 [ J ]. *无机化学学报*, 2024, 40(6): 1033-1064.
- [ 28 ] LEI S J, HUANG D L, LIU S H, et al. Templating synthesis of natural cotton-based hierarchically structured carbon hollow microfibers for high-performance solar vapor generation [ J ]. *Journal of*

- Materials Chemistry A, 2021, 9(27): 15346-15354.
- [29] WANG Y, KE G Z, CHEN S H, et al. Fabrication and characterization of polyurethane and zirconium carbide coated cotton yarn [J]. Cellulose, 2022, 29(1): 647-655.
- [30] QI Q B, WANG Y, WANG W, et al. Surface self-assembled multi-layer MWCNTs-COOH/BN-PDA/CF for flexible and efficient solar steam generator [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123626.
- [31] SHI H N, WANG H, HOU X T, et al. Janus structured photothermal conversion materials prepared from carbonized corn straw particles for portable air water extraction devices [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 494: 152813.
- [32] SHU L, ZHANG X F, WANG Z G, et al. Cellulose-based bi-layer hydrogel evaporator with a low evaporation enthalpy for efficient solar desalination [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 327: 121695.
- [33] HAO T T, WANG D, CHEN X T, et al. Photothermal strategies for ice accretion prevention and ice removal [J]. Applied Physics Reviews, 2023, 10(2): 021317.
- [34] KIRIARACHCHI H D, HASSAN A A, AWAD F S, et al. Metal-free functionalized carbonized cotton for efficient solar steam generation and wastewater treatment [J]. RSC Advances, 2022, 12(2): 1043-1050.
- [35] KOU H, LIU Z X, ZHU B, et al. Recyclable CNT-coupled cotton fabrics for low-cost and efficient desalination of seawater under sunlight [J]. Desalination, 2019, 462: 29-38.
- [36] XIONG J, ZHANG Z N, YI J, et al. Hierarchical MnO<sub>2</sub> nanosheets grown on cotton fabric as a flexible and washable solar evaporator for seawater desalination [J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(12): 13724-13733.
- [37] CHEN T, FAN W, XU P, et al. Construction of asymmetric ceramic membranes with identical source interlayer on fly ash support by dip-coating [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(15): 116765.
- [38] HUANG L Z, YUAN Q, JI X X, et al. Multifunctional MXene-decorated cotton fabric with different weaves, outstanding photothermal effect, and rapid response [J]. Cellulose, 2022, 29(12): 6997-7010.
- [39] XU T, ZHANG Z P, QU L T. Graphene-based fibers: recent advances in preparation and application [J]. Advanced Materials, 2020, 32(5): 1901979.
- [40] BAI W B, LIN H M, ZHENG S J, et al. Highly efficient water steam generation via natural black urushiol-Fe polymeric microspheres coated-cotton fabric [J]. Desalination, 2022, 538: 115906.
- [41] BAI W B, ZHANG X, CHEN Y, et al. Environmental-friendly biomass-based Janus ink/urushiol modified cotton fabric for efficient solar-driven interfacial evaporation [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 476: 146784.
- [42] 刘道辉, 吕兆萍, 姜磊, 等. 辐射聚合与辐射改性聚合物的研究进展 [J]. 化学工程师, 2011, 25(2): 37-40.
- [43] LUO Q L, YANG Y, WANG K K, et al. Hierarchical porous carbon nanofibers for highly efficient solar-driven water purification [J]. Science China Materials, 2023, 66(8): 3310-3318.
- [44] LIN D, YANG M, SUN Q H, et al. Potential scalable fabrication of high-performance photothermal fabric via chemical dyeing for solar-powered brine distillation [J]. Desalination, 2024, 574: 117272.
- [45] 张志强, 马琦, 张宝柱, 等. 有机-无机杂化材料的制备技术和应用前景 [J]. 应用化工, 2005, 34(7): 389-393.
- [46] DARLING S B. Mechanism for hierarchical self-assembly of nanoparticles on scaffolds derived from block copolymers [J]. Surface Science, 2007, 601(13): 2555-2561.
- [47] BOAL A K, ILHAN F, DEROUCHÉY J E, et al. Self-assembly of nanoparticles into structured spherical and network aggregates [J]. Nature, 2000, 404(6779): 746-748.
- [48] TIAN Y K, LI Y J, ZHANG X Y, et al. Breath-figure self-assembled low-cost Janus fabrics for highly efficient and stable solar desalination [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(33): 2113258.
- [49] WU Y G, XUE C H, GUO X J, et al. Highly efficient solar-driven water evaporation through a cotton fabric evaporator with wettability gradient [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 471: 144313.
- [50] XIA Y, HOU Q F, JUBAER H, et al. Spatially isolating salt crystallisation from water evaporation for continuous solar steam generation and salt harvesting [J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(6): 1840-1847.

(下转第 34 页)