

共轭聚合物基光热材料在太阳能界面蒸发 水处理中的研究进展

郭季璞¹, 魏小龙¹, 王开², 王美艳³, 闫斌¹, 李栩¹, 张喆¹, 吴瑶⁴, 杨鸿辉⁴

(1. 国网(西安)环保技术中心有限公司, 710100, 西安; 2. 国网西安供电公司临潼区供电分公司,
710600, 西安; 3. 国网陕西省电力有限公司咸阳供电公司, 712000, 陕西咸阳;

4. 西安交通大学化学学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决传统光热材料在太阳能驱动界面蒸发(SDIE)中光吸收范围窄、稳定性不足、功能单一的问题,综述了共轭聚合物基光热材料(PMTs)的应用研究,利用 PMTs 的共轭 π 键所赋予的宽光谱吸收能力与优异的分子可设计性,通过分子设计与复合改性弥补无机材料的短板。系统阐述该类材料的光热转换机理、材料特性及主要优化路径,重点归纳对比聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)、聚多巴胺(PDA)、聚(3,4-乙烯二氧噻吩)(PEDOT)4 类材料的光吸收率、蒸发速率、光热转换效率及抗盐、净化性能。研究结果表明:PANI 基材料经酸掺杂和纳米复合后,其近红外吸收与功能化得到显著增强,蒸发速率最高可达 $2.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;PPy 基 PMTs 凭借全光谱吸收与多孔结构,蒸发速率可达 $3.32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;PDA 基 PMTs 与余热耦合后,蒸发速率提升至 $8.73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;PEDOT 基 PMTs 通过双网络设计,光吸收率达 99.8%且稳定性优异。共轭聚合物基 PMTs 在 SDIE 中具备宽带吸收、可设计性强、环境友好等显著优势,未来需通过分子调控开发新型材料,优化输水/隔热层设计以减少热损失,推动多功能系统规模化应用,可为应对淡水危机与可持续发展提供技术支撑。

关键词: 共轭聚合物;界面蒸发;太阳能;光热转换;水处理

中图分类号: TK519; TB324 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603005 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0042-13

Research Progress on Conjugated Polymer-Based Photothermal Materials in Solar Interface Evaporation Wastewater Treatment

GUO Jipu¹, WEI Xiaolong¹, WANG Kai², WANG Meiyang³, YAN Bin¹, LI Xu¹,
ZHANG Zhe¹, WU Yao⁴, YANG Honghui⁴

(1. State Grid (Xi'an) Environmental Protection Technology Center Co., Ltd., Xi'an 710100, China;

2. Lintong District Power Supply Branch of State Grid Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710600, China;

3. Xianyang District Power Supply Branch of State Grid Xi'an Power Supply Company, Xianyang, Shaanxi 712000, China;

4. School of Chemistry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the limitations of traditional photothermal materials in solar-driven interfacial evaporation (SDIE), including narrow light absorption range, insufficient stability, and single functionality, this paper reviews the application research of conjugated polymer-based photothermal

收稿日期: 2025-05-22。 作者简介: 郭季璞(1984—),男,高级工程师;杨鸿辉(通信作者),男,教授,博士生导师。
基金项目: 国网陕西省电力有限公司科技资助项目(5226KY240013);国家自然科学基金资助项目(52230001);陕西省研发计划资助项目(2024GX-YBXM-459)。

网络出版时间: 2025-09-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250930.0905.004>

materials (PTMs). Leveraging their wide-spectrum light absorption capabilities from conjugated π -bonds and strong molecular designability, these materials overcome the shortcomings of inorganic materials through molecular design and composite modifications. The photothermal conversion mechanisms, material characteristics, and key optimization strategies of these PTMs are systematically elaborated. Special focus is placed on comparing the light absorption efficiency, evaporation rate, photothermal conversion efficiency, salt resistance, and purification performance of four representative materials: polyaniline (PANI), polypyrrole (PPy), polydopamine (PDA), and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT). The results indicate that PANI-based materials achieve enhanced near-infrared absorption efficiency and functionalization via acid doping and nanocomposite modification, with a maximum evaporation rate of $2.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. PPy-based PTMs exhibit an evaporation rate of $3.32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ due to full-spectrum absorption and porous structures. PDA-based PTMs, when coupled with waste heat, achieve an evaporation rate of $8.73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. PEDOT-based PTMs demonstrate 99.8% light absorption efficiency and excellent stability through dual-network design. Conjugated polymer-based PTMs offer distinct advantages in SDIE, including broadband absorption, strong designability, and environmental friendliness. Future research should focus on developing novel materials through molecular regulation, optimizing water-transport/thermal-insulation layer designs to minimize heat loss, and promoting large-scale applications of multifunctional systems. These advancements will provide technical support for addressing freshwater crises and promoting sustainable development.

Keywords: conjugated polymers; interface evaporation; solar energy; photothermal conversion; water treatment

随着经济的快速发展和人口激增,水资源短缺问题日益严重,预计2050年将极度紧缺并影响全球近四成的人口^[1]。尽管地球表面约2/3被水覆盖,但淡水资源仅占全球水储量的3%,淡水资源的匮乏促使人们开发高效、大型的淡水获取技术。鉴于地球上丰富的海水资源,海水淡化技术受到了越来越多的关注^[2-4]。1960年以来,膜过滤^[5-6]和多级闪蒸^[7-9]等海水淡化技术相继问世,但生产效率较低、污染问题严重以及维护成本高昂等问题严重制约了其广泛应用^[10-11],因此开发高效、经济且环保的海水淡化技术变得尤为关键。

太阳能作为一种取之不尽的新兴可再生能源,拥有巨大的潜力和应用前景。太阳能驱动的界面蒸发技术(SDIE)利用太阳能直接驱动水蒸发过程,无需额外输入能源即可实现水的清洁回收^[12-14]。与传统太阳能水蒸发技术相比,SDIE系统通过将光热转换材料吸收的热能限制在水/空气界面^[15],显著降低了热量损失,从而大幅提高了蒸发效率与水蒸发率,使SDIE技术成为解决水资源问题的有力技术之一^[16]。

SDIE系统的蒸发体系主要由光吸收层、输水层和隔热层3部分组成^[17-18]。光吸收层负责吸收太阳能并实现光热转换,控制SDIE的关键环节。目前研

究结果表明,金属纳米材料^[19-20]、窄带隙半导体^[21-23]、碳基材料^[24-25]和共轭聚合物^[26-27]等光热材料(PTMs)具有高效的光热转换效率。具有共轭结构的共轭聚合物可通过增加其共轭 π 键的数量来降低电子跃迁所需的能量,不仅容易实现高效的光热转换,且其通常具备深色表面而在近红外区域展现出优异的光吸收能力^[16,23]。近年来开发的多种共轭聚合物基PTMs均表现出良好的光热转换效率、高机械强度和优异的化学稳定性,使其在恶劣环境中能够长期稳定工作^[28-30]。通过改性共轭聚合物基PTMs的结构和功能,可以进一步提高其在海水淡化中的效率和可靠性。

从SDIE的基本原理出发,详细介绍了聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)、聚多巴胺(PDA)和聚(3,4-乙烯二氧噻吩)(PEDOT)这4类共轭聚合物基PTMs的研究进展。选择它们作为代表性材料基于以下原因:①PANI是研究最广泛、导电/光吸收特性可通过掺杂灵活调控的经典材料,成本相对较低且易于复合,在SDIE中应用案例极为丰富;②PPy具有极高的太阳光全波段吸收率(光吸收率大于90%),合成简便、环境友好,其纳米结构可设计性强,蒸发性能突出;③PDA具有优异的生物相容性、黏附性和仿生功能化能力,在构建微纳结构、抗生物

污染及开发环境友好型蒸发器方面独具特色;④ PEDOT(常以掺杂聚苯乙烯磺酸(PSS)的形式应用,即 PEDOT:PSS 复合物,其中:表示组合之间的掺杂与复合关系)代表高性能可溶液加工导电聚合物,具有优异的电导率和环境稳定性,在水凝胶基高效 SDIE 系统中表现卓越,是共轭聚合物成功改性的范例。这 4 类材料涵盖了 SDIE 领域共轭聚合物基 PTMs 研究的主流方向、关键性能优势以及近期的突破性进展,因此具有高度的代表性。此外还探讨了这些材料在提升海水淡化效率、降低成本和实现环境可持续性方面的潜力,旨在为该领域研究者提供一个全面的参考框架,促进共轭聚合物基 PTMs 在 SDIE 系统中的进一步研究和应用。

1 太阳能驱动的界面蒸发技术概况

1.1 太阳能光热蒸发技术的发展历程

太阳能驱动的水蒸发技术经历了底部加热、整

体加热和界面加热的 3 步优化过程^[31-32],不同蒸发体系的示意图如图 1 所示。在早期阶段,水蒸发技术主要依赖底部加热,即通过水体底部的吸光材料加热水,从而将太阳能转换为热能^[13]。由于热量需要通过整个水体传递,导致该方法的能量转换效率不高。整体加热方法开始受到关注,即通过分散在水中的具有宽波段光吸收的光热材料来加热整个水体^[19]。整体加热促进了热能在水中的均匀分布,从而提高了蒸发效率,但依旧存在较大的能量损耗^[33]。研究者进一步对其进行改进,通过在水面上放置 PTMs 直接加热水/空气界面^[34-35],即为当前备受关注的 SDIE 技术。所述 PTMs 通常具有特殊微结构,能够最大限度地吸收太阳光并将其转换为热能,同时减少热量向水下传递。与其他技术相比,SDIE 不仅提高了蒸发效率,还降低了热损失,使得蒸发过程更加高效和节能,大大促进了水蒸发技术的发展。

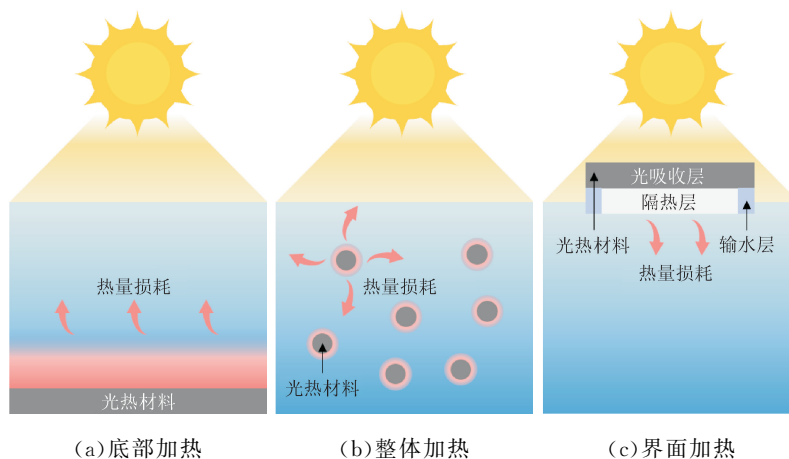


图 1 不同蒸发体系的示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of different evaporation systems

1.2 太阳能界面蒸发系统的工作原理

SDIE 的工作原理如图 2 所示。SDIE 系统通常由以下 4 个关键组件构成:①光吸收层。作为 SDIE 系统的核心,负责捕获太阳光并将其转换为热能,由 PTMs 构成;②隔热层。位于光吸收层的下方或周围,通常由气凝胶、泡沫材料或其他低热导率材料制成,可以有效阻止热量散失,提高系统热效率;③输水层。将水从水源输送到光吸收层,需具备良好的水分导向能力和补给速度,确保光吸收层有充足水分进行蒸发;④冷凝收集装置。位于系统顶部,负责收集蒸发后的水蒸气,并将其冷凝成液态水,通常使用透明塑料或玻璃覆盖以便冷凝和收集^[36-38]。

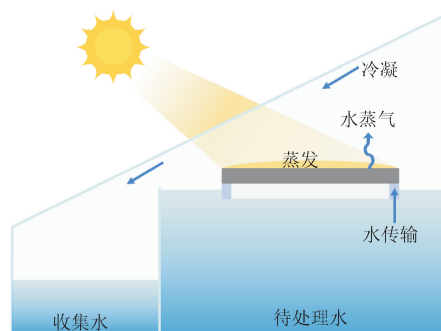


图 2 SDIE 的工作原理

Fig. 2 Functionality of the SDIE

SDIE 系统的工作效率受多种因素影响,包括材料的选择、系统的设计、环境条件等。为了提高蒸发

效率,人们致力于探索创新材料和优化系统设计,以实现更高的水蒸气产量和更低的能量消耗^[14]。在SDIE系统中,由PTMs构成的光吸收层是最为核心的组件,其光捕获与热转换能力是实现高效界面蒸发的前提与基础,因此选择合适的PTMs至关重要。

2 共轭聚合物基光热材料的光热转换特性

2.1 光热材料的主要类别和特点

PTMs是一类能够将吸收的光能转换为热能的材料。随着光学技术的发展,PTMs在化工、能源、传感和生命健康等领域的应用变得越来越广泛。光热材料的研究可以追溯到早期对金属纳米材料的研究,这些材料基于等离子体局部加热机理,能有效地将光能转换为热能^[39]。

PTMs的发展经历了从无机材料到有机材料的转变。随着21世纪纳米技术的蓬勃发展,无机PTMs的研究进入了全新阶段。研究者致力于设计、合成特定纳米结构的无机PTMs材料,以实现在纳米尺度上控制光的传播和吸收,获得更高的光热转换效率。窄带隙改性半导体材料(例如 Ti_2O_3 ^[22]、黑色 TiO_2 ^[40]、改性 MoO_3 量子点^[41])以及碳基材料(例如石墨烯^[42]、氧化石墨烯^[43]、碳纳米管^[44])成为研究的焦点,其强大的光吸收能力和高效的光热转换能力引起了人们的广泛关注。然而,无机PTMs存在难以设计、生物相容性差以及性能调控困难等问题,使得有机PTMs的研究逐渐兴起。目前已开发的有机小分子材料^[45]、超分子复合物^[46]、有机聚合物材料^[47]等表现出优异的光热性能,能够有效弥补无机材料的缺陷。

2.2 光热材料的光热转换特性需求

太阳能驱动的水蒸发效率在很大程度上取决于PTMs的性能表现,而PTMs的光热转换能力则是决定其水蒸发效率的核心因素之一。光热转换是指PTMs吸收光能并将其转化为热能的过程,这在SDIE领域具有重要意义^[48-49]。

地球表面受到的太阳辐射照射波长为290~2500 nm,包括3%紫外线(290~400 nm)、45%可见光(400~760 nm)以及52%红外线(760~2500 nm)^[50]。理想的PTMs应当在整个辐射范围内减少太阳光的反射和透射,从而提高太阳能的吸收和光热转换效率。

除了提高PTMs的光吸收能力之外,还需要优化其热导率和热稳定性,以便在实际应用中能够有效管理和利用产生的热能^[17]。因此,PTMs的研究

重点从强化光吸收逐渐延伸到热管理。此外,针对特定应用场景(如光热-光电协同系统),PTMs的光谱选择性吸收(即对特定波段光的高效吸收)也受到越来越多的重视,即材料能够选择性地吸收特定波长的光,这对提高系统的整体效率非常关键^[51]。因此为了实现高效率的光热转换,PTMs的设计应具备以下3个基本特性:①良好的光吸收性能,能够吸收全光谱范围内的太阳辐射并将其有效转化为热量;②低的热导率,有效减少热量向水中的扩散,从而降低能量损失;③合适的孔隙以及亲水性,确保快速的水分传输。基于此,共轭聚合物基PTMs由于其独特的 π -共轭结构和易于功能化的特性,在光热转换领域显示出巨大的潜力^[26]。共轭聚合物的可定制分子结构允许方便地调节其电子性质从而实现功能化。例如,Chen等^[45]通过在克酮酸(CRs)结构单元上引入四苯乙烯噻吩给体单元合成了一种新型的D-A-D型有机小分子光热材料,不仅具备双自由基特性,而且表现出了优异的稳定性,并有效地克服了传统CRs在800 nm区域吸收带宽较窄的局限性。通过结构改性,其吸收谱实现了向紫外、可见及近红外区域的显著扩展。虽然共轭聚合物基PTMs在直接太阳能热转换方面已取得显著进步,但其光热转换效率通常较无机材料低。为了实现高效率的光热转换,共轭聚合物基PTMs在光学和热学性能方面的设计至关重要。因此,本综述主要从共轭聚合物基PTMs的光热转换特性这一角度出发,对不同的共轭聚合物基PTMs的水蒸发能力进行阐述。

2.3 共轭聚合物基光热材料在太阳能界面蒸发系统中的作用

基于共轭聚合物优异的光热转换特性,其常被用于构建SDIE系统的光吸收层,吸收太阳光并产生热能来驱动水分的蒸发。共轭聚合物的选择和应用对于提高系统的能量转换效率和稳定性具有重要影响。共轭聚合物基PTMs光热转换示意图如图3所示。在光照下,共轭聚合物会发生光的反射、散射和吸收,其中,光吸收是光热转换的基本条件。对于共轭聚合物而言,光子的吸收能够使电子从基态迅速跃迁至激发态。当电子由激发态返回基态时,可以发射能量较低的光子(光致发光)或经由非辐射跃迁(如振动弛豫)释放热量,从而产生光热效应^[52-53]。此外,共轭聚合物中共轭 π 键数量的增加会缩小最高占据分子轨道(HOMO)和最低未占据分子轨道(LUMO)之间的能隙,进而使其吸收光谱红移,且共轭 π 键越长,红移效应越显著。受激电子从HOMO跃迁至LUMO,随后通过电子-声子耦合机制

弛豫产生晶格振动,振动将光能转化为热能,从而实现了光热转换。因此,通过调控共轲聚合物的共轲程度,可以优化其光热转换效率。考虑到大部分共轲聚合物固有的低热导率($0.1 \sim 0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),理想的共轲聚合物基 PTMs 应具备较低的表面反射率和散射率、高光吸收效率以及低光致发光发射率,以确保材料实现宽带光吸收,并在吸收光子后能有效地转换光能为热能。

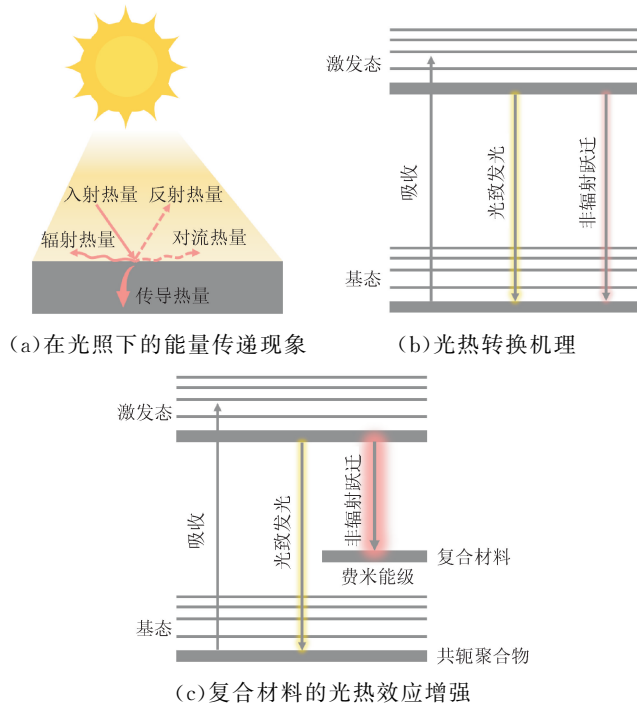


图 3 共轲聚合物基 PTMs 光热转换示意图

Fig. 3 Schematic diagram of conjugated polymer-based PTMs photothermal conversion

除了共轲聚合物本身结构的优化,还可通过引入额外的组分制备复合材料,进一步优化共轲聚合物基 PTMs 的光热转换性能^[54]。在复合材料中,共轲聚合物通常承担光吸收和供电子的角色,而额外的组分则作为电子受体,其费米能级通常低于共轲聚合物激发态的能级。当聚合物吸收光能时,电子从基态跃迁到激发态。这些激发态的电子可以通过辐射跃迁返回基态,或者转移到费米能级较低的受体组分的导带。在非辐射跃迁过程中,电子释放的热量可以用于水蒸发。因此,通过在共轲聚合物中引入额外的组分,不仅可以拓宽光吸收范围,还可以有效抑制光致发光,从而提高材料的光热转换效率^[26,55]。通过调整聚合物链的交联密度,可以精细控制材料的孔隙率和水蒸气透过性,这对于调节蒸发速率和提高整体水蒸发性能至关重要^[56]。

共轲聚合物除了作为光吸收层外,还能应用在水传输层中,通过从水源持续不断地将水输送到蒸发层^[57]。这些材料通常具有良好的毛细作用,能够通过毛细管效应将水从下方的水源抽吸到上方的蒸发层。这一过程对于维持光吸收层的水分平衡和确保系统连续运行非常关键。

3 共轲聚合物基光热材料在太阳能界面蒸发水处理中的应用

目前,应用于 SDIE 领域的代表性共轲聚合物有 PPy、PANI、PDA 和 PEDOT 等。表 1 列举了 4 类共轲聚合物基 PTMs 在 SDIE 研究进展中的代表性研究成果。

表 1 基于共轲聚合物基光热材料的太阳能蒸发器的特性、参数和性能

Table 1 Characterization, parameters and performance of solar evaporators based on conjugated polymer-based photothermal materials

类别	光热转换材料	太阳辐射强度/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	太阳光吸收率/ %	蒸发速率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	蒸发效率/ %
PANI	PANI/HNTs@PU 纤维 ^[30]	1	97.0	1.61	94.7
	PANI/GO 涂层 ^[43]	1	93.0	1.42	96.6
	PANI-PTSA 膜 ^[58]	1	86.8	1.38	80.7
	PANI-PA 膜 ^[59]	1	93.5	1.02	
	Mn@g-C ₃ N ₄ /PANI 木材 ^[60]	1	97.1	2.99	99.0
	PU/CNTs@PANI 泡沫 ^[61]	1	大于 90.0	2.71	85.5
PPy	Ag/PPy 膜 ^[39]	1	96.5	1.55	92.6
	多层 PPy 纳米片涂层 ^[47]	1	99.0	1.38	95.3
	PPy/PVA 水凝胶 ^[57]	1		3.32	94.0
	PPy 木材 ^[62]	1	大于 90.0	1.01	72.5
	CPPy-O 气凝胶 ^[63]	1	96.0	2.62	92.7
	PPy-A 膜 ^[64]	1	96.3	2.03	93.3

续表

类别	光热转换材料	太阳辐射强度/ (kW · m ⁻²)	太阳光吸收率/ %	蒸发速率/ (kg · m ⁻² · h ⁻¹)	蒸发效率/ %
PDA	PDA/PPy/PDMS 海绵 ^[28]	1	94.0	2.18	85.6
	CDs/PPy-CPP 泡沫 ^[65]	1		2.46	
	PDA-t@PU 海绵 ^[66]	1		2.50	96.0
	CFM@PDA 膜 ^[67]	1	96.7	1.79	92.6
	Fe ₃ O ₄ /PDA 木材 ^[68]	1		1.70	98.0
PEDOT	PEDOT:PSS-PVA 水凝胶 ^[69]	1	99.7	2.84	98.0
	PEDOT:PSS-PAAm 水凝胶 ^[70]	1	99.8	2.15	97.2
	PEDOT:PSS 水凝胶 ^[71]	1	97.8	2.43	96.4

注:CDs 为碳点;CFM 为碳纤维膜;CPP 为碳化柚子皮;CPPy-O 为十八烷复合碳化超长 PPy 纳米管;CNTs 为碳纳米管;GO 为氧化石墨烯;HNTs@PU 为埃洛石纳米管复合聚氨酯,其中"@"代表组分之间的复合关系;Mn@g-C₃N₄ 为锰掺杂石墨相氮化碳;PA 为聚酰胺;PAAm 为聚丙烯酰胺;PDMS 为聚二甲基硅氧烷;PDA-t 为聚多巴胺纳米管;PTSA 为对甲苯磺酸;PVA 为聚乙烯醇。

3.1 聚苯胺基光热材料研究进展

3.1.1 光热转换特性

PANI 作为最典型的共轭聚合物之一,因其分子结构中的线性共轭 π -电子体系而备受瞩目,其结构特性赋予 PANI 优异的光热转换性能。PANI 有 3 种能稳定存在的结构形式,即全氧化态 PANI (PNB)、中间氧化态 PANI(EB)和全还原态 PANI (LEB)。不同氧化态的 PANI 均可通过掺杂获得改性后的 PANI,其中 EB 态 PANI 可通过质子酸掺杂得到具有高电导率的掺杂态 PANI(ES)。研究发现,PANI 可以通过掺杂改变吸收峰的位置来引起电子转移,当 PANI 上的亚胺基团转化为亚胺盐时,其在近红外区域(波长大于 800 nm)的光吸收能力显著增强^[58]。此外,PANI 固有的低热导率(0.1~0.5 W · m⁻¹ · K⁻¹)有利于热量局域化于蒸发界面,减少能量损失。

3.1.2 设计优化进展

PANI 微观结构多样,可以通过控制 PANI 的合成条件来实现 PANI 的有序形态结构,进而可以调控 PTMs 的表面形貌,这对于提高光吸收和太阳能转化效率至关重要。例如,通过静电组装结合 PANI 原位聚合的方法,可成功调控氧化石墨烯的表面形貌,进而形成具有周期性锥形 PANI 阵列结构^[43]。由此构成的结构分级复合材料(PG)的表面形貌可以通过 GO 和 ANI 的质量比来控制。GO 表面上锥形 PANI 阵列结构通过多次反射加强了光吸收,并促进了热局局部化。高度分散的 PANI 纳米锥扩大了蒸发表面,从而加速了蒸发,使得 PG 实现了 1.42 kg · m⁻² · h⁻¹ 的蒸发速率和 96.6% 的蒸发效率。

PANI 具有酸掺杂特性,能够显著影响其导电

性、表面电荷及光热转换效率。例如,通过质子酸掺杂法制备的具有微孔结构和高亲水性的 PANI-对甲苯磺酸(PANI-PTSA)膜,在 1 kW · m⁻² 光照下的水分蒸发速率和蒸发效率分别达到 1.38 kg · m⁻² · h⁻¹ 和 80.7%^[58]。ES 态 PANI 膜的太阳吸收光谱比 EB 态 PANI 显著提高,红外吸收率提高了 18.5%,太阳全光谱吸收的平均吸收率提高了 14.4%。

PANI 与其他材料的复合能力,使得 PANI 基复合 PTMs 成为光热蒸发领域的研究热点。金属纳米材料因其独特的表面等离子体共振效应而显示出优异的光热转换能力,与共轭聚合物复合后,其光热转换能力得到进一步提升。Li 等^[20] 通过将 PANI 与银纳米粒子复合制备了一种新型的多功能海绵光热材料,该材料形成了肖特基异质结构,从而提高了光热转化能力,在 1 kW/m² 的光照下实现了 1.37 kg · m⁻² · h⁻¹ 的蒸发速率和 84.7% 的蒸发效率。同时,该材料还能通过可见光催化降解和吸附去除水源中的各种有机污染物,效率分别达到 99.3% 和 97%。除了金属纳米材料,碳纳米材料也是制备 PANI 基复合 PTMs 的优选。碳纳米材料因其从紫外可见光到近红外区域的高吸收系数而被广泛研究。然而,其水分散性差、缺乏溶液加工性和聚集倾向限制了其进一步应用,而用共轭聚合物对碳纳米材料进行表面改性是克服这些限制的一种有效的方法。例如,将 PANI 与碳纳米管复合制备的悬挂式太阳能蒸发器,通过减少散热面积,在两个界面提供高效的蒸发,在 1 kW · m⁻² 太阳照射下,实现了 2.81 kg · m⁻² · h⁻¹ 的蒸发速率和 91.74% 的蒸发效率,为可持续海水淡化提供了一种新颖的策略^[44]。

3.1.3 最新应用进展

近期研究进一步拓展了 PANI 基光热材料的应用边界,通过多元复合策略与功能化设计,在蒸发效率、耐盐性及多功能集成方面取得显著突破^[59]。例如, Mn@g-C₃N₄/PANI/木材碳复合体系(MCPWC)通过金属 Mn 对 g-C₃N₄ 的改性不仅促进了光诱导电子-空穴对的分离-迁移,蒸发速率可达 $2.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,从而增强了目标污染物的降解^[60]。而且 PANI 还与 Mn@g-C₃N₄ 形成协同催化体系,实现了对 95.69% 的 VOCs 的高效降解,展现出界面蒸发与水污染治理一体化潜力。负载有 PANI 和相变微胶囊的 PU 海绵(PU-MePCM),可以在太阳辐照度不足时及时释放储存的潜热,从而延长蒸发时间,在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照下可实现 $2.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率^[61]。PU-MePCM 对染料废水和油水混合物均具有净化作用,这也进一步扩大了其在水净化中的应用范围。

金属纳米颗粒与 PANI 的复合策略亦成效显著, Lao 等^[72]通过机械发泡、化学交联和浸渍还原法制备了银纳米粒@聚苯胺/聚乙烯醇(AgNPs@PANI/PVA)光热海绵。AgNPs@PANI 的掺入增加了表面疏水性,显著降低了蒸发焓,实现了 $2.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 97.9% 的蒸发效率。这些进展表明, PANI 基 PTMs 正从单一光热转换向多功能集成方向发展,为规模化海水淡化与复杂废水处理提供了创新路径。

3.2 聚吡咯基光热材料研究进展

3.2.1 光热转换特性

PPy 作为一种典型的有机共轭聚合物,具有宽光谱吸收特性(光吸收率大于 90%),可将太阳辐射高效转化为热能。其合成工艺简单、原料环境友好,且易于通过调控聚合条件形成多样化纳米结构(颗粒、管、片),为设计高性能光热蒸发器提供基础。

3.2.2 设计优化进展

利用 PPy 的高光吸收率,将 PPy 作为吸光层从而修饰木材(PPy-Wood)可以被认为是一种极佳的策略,黑色 PPy 的修饰使木材在 300~2 500 nm 的广泛波长范围内展现了超过 90% 的高吸光率^[62]。木材的微通道多孔结构、高亲水性和良好的隔热性,与 PPy 的宽带吸收和高太阳能吸收能力相结合,促进了快速蒸汽生成,使 PPy-Wood 成为理想的太阳能蒸汽发生器。在模拟太阳照射条件下,PPy-Wood 实现了 $1.014 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率和 72.5% 的蒸发效率。

PPy 与相变材料的复合能够进一步提高吸光率。例如,负载十八烷的碳化超长 PPy 纳米管气凝胶被放置在球形容器中作为相变储能的一部分,球形容器的表面被 PPy 浸渍尼龙线包裹作为光热转换层的一部分,以形成一种用于全天蒸汽发生的球形蒸发器^[63]。在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的照明条件下,该蒸发器实现了 96% 的高太阳光吸收率、 $2.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率和 92.7% 的蒸发效率,这种光热气凝胶以其卓越的性能为太阳能光热水处理材料的设计与制备开辟了新的道路。

PPy 具有可调控的微观结构,如纳米颗粒、纳米管和纳米片,对提升光热转换效率至关重要。一种具有褶皱与脊状表面结构的多层聚吡咯纳米片,通过纸基底上的连续聚合技术成功制备,该结构可显著增强对太阳光谱的宽带广角吸收性能,进而实现高达 95.33% 的蒸发效率^[47]。多层 PPy 纳米片的独特光热性能和结构特点,使其在太阳能加热和光触发器领域具有巨大的应用潜力。这种多层结构具有机械灵活性和坚固性,在太阳能的实际利用方面具有巨大潜力。受无籽莲蓬启发,一种具有大/微气泡和纳米管不对称结构的柔性原始 PPy 膜被成功研制^[64]。这种膜在单一太阳光照射下,不仅实现了 96.3% 的全光谱光吸收率,还达到了 $2.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率。PPy 膜的单向水通道设计,确保了其在海水淡化中的长期稳定性,证明了其在 SDIE 应用中的实用性。

PPy 合成简单、成本低廉,且不涉及有毒原料,是一种环境友好的材料。Sun 等^[65]提出的可持续高机械强度生物质泡沫(CDs/PPy-CPP)蒸发器,具备零维/一维分层结构,将亲水性碳点和管状 PPy 无缝集成到三维碳化柚子皮生物质泡沫的外表面。在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中,该蒸发器实现了高达 $2.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高效蒸发率,并在质量分数为 25% 的 NaCl 溶液中展现了出色的蒸发效率和抗盐沉积能力,以及压滤净化能力。这项研究为获取多功能光热生物质泡沫提供了一种低成本、高效和环保的方法,并展示了其在海水淡化和污水净化方面的潜在应用。

3.2.3 最新应用进展

近期 PPy 基光热材料在 SDIE 领域的研究通过复合改性与仿生设计实现了多维度突破。Zhang 等^[73]通过在 PPy 涂层上沉积 CuO 纳米粒子,并随后用 PDMS 疏水改性,制备了一种多功能协同太阳能蒸发器。在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光照下实现 $1.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的

蒸发速率,并且可同步降解 95.9% 亚甲基蓝。PPy 促进了光生电子-空穴对的分离,从而提高了氧化铜的光催化性能,超疏水表面可有效抑制盐结晶,在质量分数为 20% 的 NaCl 溶液中持续运行 300 min 后蒸发速率仅下降 24.3%。

受黑鱼鳞光陷阱与黏液层启发而构建的 PPy/纤维素纳米晶体(CNCs)光热织物,通过多级脊状结构可实现 98% 宽光谱光吸收,蒸发焓可降至 $1\,939.87\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[74]。CNCs 涂层类似于鱼鳞的黏液,所形成的水合层赋予材料超亲水性与水下超疏油性,在含油海水中可保持 $1.90\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率,连续运行 48 h 无污染物沉积且盐离子截留率大于 99.9%。

基于负载有 PPy 的脱木素木球(PPy/DWS)的自旋转蒸发器,利用盐积累诱导的重力失衡可实现表面动态翻转,在质量分数为 20% 的高盐溶液中也保持 $1.52\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率,8 h 运行效率衰减小于 10%^[75]。木球垂直通道与 PPy 涂层协同形成“输水-吸光”网络,无需外部驱动即可清除盐结晶,为离岸淡化提供动态抗盐方案。

3.3 聚多巴胺基光热材料研究进展

3.3.1 光热转换特性

PDA 具有优异的光热转换效率、生物相容性、仿生黏附性及环境可降解性,可在温和条件下自聚合,易于功能化修饰,为构建微纳结构与抗生物污染蒸发器提供独特优势。PDA 材料因其卓越的光热转换性能、稳定的化学特性、良好的生物降解性以及易于功能化和改性的优势,已在海水淡化领域获得广泛关注。

3.3.2 设计优化进展

通过创新 PDA 的微观结构,例如制备中空的 PDA 纳米管或开发 PDA 微纳米水膜,可显著提升蒸发效率。为了克服传统太阳能蒸发器在蒸发过程中因充满水而导致的热量损失,一种基于微纳米水膜的新型界面太阳能蒸发器被成功制备,该蒸发器由多孔 PPy 和 PDA 包覆的聚二甲基硅氧烷海绵构成^[28]。这种新型的 SDIE 系统可通过调控微纳米水膜厚度,从而实现在 $1\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照下约 $2.18\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率,显著减少了热损失,从而提升了蒸发效率。蒸发实验结果表明,微纳米界面蒸发结构比传统的蒸发结构具有更好的蒸发性能。Huang 等^[66]利用 PDA 纳米管(PDA-t)构建了三维太阳能界面水蒸发器,集成了光热转换、水传输促进、蒸发焓降低及热量管理等多功能,大幅提高了蒸发性能,

在 $1\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照下的不同水面暴露高度实现了 $2.5 \sim 3.6\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率。

作为共轭聚合物,PDA 通过对碳基材料及金属纳米材料的表面改性,可进一步提升光热转换性能。最近一种具有卓越光吸收特性的超亲水 CFM@PDA 碳纤维膜被成功制备,在模拟太阳光条件下,该材料展现了 $1.79\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高效海水蒸发速率和 92.6% 的蒸发效率,且在长期使用过程中表面未观察到盐分结晶与积聚,证明了其优异的稳定性^[67]。此外将 Fe_3O_4 与 PDA 复合所制备的木质蒸发器,凭借 PDA 涂层和 Fe_3O_4 颗粒的协同光热效应,在较宽波长范围内实现了高光热转换效率^[68]。结合木材垂直排列的微孔结构的快速水输送能力,该蒸发器在 $1\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照下的蒸发速率为 $1.70\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,蒸发效率高达 98.0%。

3.3.3 最新应用进展

近期 PDA 基光热蒸发材料在多功能集成与抗盐机制研究中取得了显著进展。受花卉结构启发设计的 3D 打印花形 PDA-BTO/CPSS-FH 蒸发器,通过 DLP 技术构建了含径向输水通道的双交联水凝胶骨架,负载 PDA-钛酸钡/硫铈铜铅矿复合光热层后,在 $1\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照下实现 $2.71\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率,同步可产生 $240.96\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的氢气^[76]。该蒸发器利用马兰戈尼效应引导盐离子向边缘聚集,在质量分数为 7% 的 NaCl 溶液中连续运行 100 h 后蒸发速率仍维持 $2.51\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

基于 $\beta\text{-FeOOH/PDA-RGO}$ 构建的虹吸式芬顿蒸发器,通过毛细管驱动实现连续水传输,在 $1\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照下对吡啶等挥发性粪便异味的去除率达 100%,蒸发速率达 $1.21\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[77]。Liu 等^[78]设计了一种 PDA/PVA 海绵和低品位余热(LGWH)耦合驱动的 SDIE 系统。通过原位覆盖 PDA 来调节 PVA 海绵的表面亲水性,形成的“光陷阱”结构使光吸收率达 94.6%,水蒸发焓从 $2\,130\text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 $1\,697\text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。将铜管嵌入 PDA/PVA 海绵中,引入废热约 90°C ,蒸发速率提升至 $8.73\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,较纯光热模式提升 222%。

3.4 聚(3,4-乙烯二氧噻吩)基光热材料研究进展

3.4.1 光热转换特性

除了前述 3 种典型的共轭聚合物外,人们还通过引入侧链或采用掺杂技术,可以将共轭聚合物的固有特性与其他类型聚合物的优势相结合,从而满足特定应用的需求^[23]。共轭聚合物结构的多功能可设计性将聚合物基 PTMs 从基本共轭聚合物扩

展到无数复杂结构, PEDOT 以 3,4-乙烯二氧噻吩(EDOT)为单体, 是一种富含共轭 π 键的深色共轭聚合物。PEDOT 的窄带隙(1.6 eV)赋予其宽带光吸收的特性, 不仅展现出了巨大的光热转换潜力, 而且具有良好的环境稳定性, 因此被广泛应用于 SDIE 领域^[69]。

3.4.2 设计优化进展

基于 PEDOT 的疏水特性, 可以引入阴离子亲水聚苯乙烯磺酸制备成水凝胶作为新型 PTMs。Zhao 等^[70] 通过一步自由基聚合和丙烯酰胺(AAM)在黏性 PEDOT:PSS 纳米纤维分散体中的化学交联, 制备了一种用于 SDIE 的 PEDOT:PSS-PAAm 双网络水凝胶。所制备的水凝胶具备优异的蒸发性能, 包括出色的 99.8% 的太阳光吸收率和 $2.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率。虽然获得了较好的结果, 但这类水凝胶系统需要额外的聚合物骨架作为预交联网络, 可能会导致光学特性的不均匀性。一种互联多孔 PEDOT:PSS 水凝胶(PPH)被成功制备, 其不需要任何额外的骨架, 通过简单的原位聚合方法就能实现太阳能驱动的水蒸发^[71]。该 PPH 相互连接的微孔结构可在宽入射角范围内显著地吸收光线, 降低了 PPH 的蒸发焓, 实现了 97.8% 的太阳光吸收率, $96.4\% \pm 1.3\%$ 的蒸发效率以及 $2.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速率。基于 PSS 中带负电荷的 SO_3^- 的静电排斥有助于阻止表面的 NaCl 结晶, 该互联微孔 PPH 在含盐水净化方面表现出出色的稳定性能。

4 结论与展望

随着全球淡水资源需求的增长和环境保护的迫切性, 太阳能作为一种清洁、可再生的能源, 其高效利用已成为科学研究的焦点。SDIE 技术因其高效、环保的特性, 被视为未来海水淡化的重要途径。本文从 SDIE 的基本原理出发, 概述了 4 种共轭聚合物基光热材料(PANI、PPy、PDA 和 PEDOT)在 SDIE 中的应用研究进展, 这些共轭聚合物基 PTMs 在 SDIE 领域取得了显著的研究成果。尽管有机共轭聚合物基 PTMs 在 SDIE 领域取得了一定的研究进展, 但仍存在以下挑战。

(1) 材料蒸发性能不足。目前, 共轭聚合物基 PTMs 的太阳能界面蒸发性能与实际应用需求相比仍有较大差距。虽然共轭聚合物基 PTMs 的光热转换效率和界面蒸发性能已经取得了一定的成果, 但与无机材料相比, 仍存在一定的差距。因此, 提高

共轭聚合物基 PTMs 的光热转换效率以进一步提高界面蒸发性能是未来研究的重点。

(2) 太阳能蒸发器的设计存在缺陷。目前, 大部分基于共轭聚合物基 PTMs 的 SDIE 系统的设计都集中在光热转换材料上, 而对于一个完整的 SDIE 系统, 不仅包括光吸收层, 还包括输水层、隔热层以及冷凝收集装置。在光吸收层之外的其他部件, 尤其是输水层的设计亟待研究。

(3) 材料成本需要得到控制。大部分共轭聚合物基 PTMs 的制备成本较高, 限制了其在 SDIE 领域的广泛应用。降低材料成本, 实现大规模应用是未来研究的重要方向。

(4) 实际应用水平不足。SDIE 技术已经展示了它们的灵活性和与其他技术的兼容性, 例如废水处理、光催化和光伏发电, 但目前大部分共轭聚合物基 PTMs 都应用于实验室层面, 其实际应用仍需进一步优化和扩展。

针对上述挑战, 未来有机共轭聚合物基 PTMs 在 SDIE 领域的研究方向主要包括以下几个方面。

(1) 通过分子结构的精确调控, 结合理论计算与实验研究, 设计合成具有更高光热转换效率和优异界面蒸发性能的有机共轭聚合物。深入研究共轭聚合物基 PTMs 与水接触界面的相互作用, 通过界面工程和表面改性技术, 如引入亲水或疏水基团, 改善材料与界面的相互作用, 降低蒸发焓, 进一步提高材料的蒸发性能和循环稳定性。

(2) 设计更合理的隔热材料与输水材料, 以最大限度地减少蒸发过程中的热损失以及水蒸发的限制。例如, 可以外接输水装置使水分不通过底部材料输送, 从而优化能量利用率加速蒸发。此外, 可通过优化太阳能蒸发器的结构来优化水蒸气的收集, 例如可以通过化学改性对冷凝收集装置进行表面工程修饰, 从而增强系统热传递以提高水蒸气收集效率。

(3) 开发高效、经济的合成方法和材料制备工艺, 降低有机共轭聚合物基 PTMs 的成本, 促进其在太阳能界面蒸发领域的大规模应用。

(4) 将有机共轭聚合物基 PTMs 的应用扩展至更多领域, 包括工业废水处理和能源转换与储存。通过与现有技术的集成, 这些材料有望提升能源利用的效率, 特别是在太阳能光伏热(PVT)技术方面, 能同时提供电力和热能的能力, 为界面蒸发提供了独特的光热源, 从而在产业化过程中展现出显著优势。

总之,有机共轭聚合物基 PTMs 在 SDIE 领域展现出巨大的应用潜力。通过不断优化材料性能、降低成本、扩大应用范围,有望为我国 SDIE 技术的发展提供有力支持,并为缓解淡水资源短缺与促进环境可持续发展提供重要的技术参考。

参考文献:

- [1] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity [J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1500323.
- [2] ELIMELECH M, PHILLIP W A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment [J]. *Science*, 2011, 333(6043): 712-717.
- [3] DAO V D, VU N H, YUN Sining. Recent advances and challenges for solar-driven water evaporation system toward applications [J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104324.
- [4] 周士鹤, 郭亚丽, 沈胜强, 等. 低温多效蒸发海水淡化装置中流动阻力对传热温差的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(5): 30-35.
ZHOU Shihe, GUO Yali, SHEN Shengqiang, et al. Analysis of flow resistance on the heat transfer temperature difference in low-temperature multiple effect distillation desalination plant [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(5): 30-35.
- [5] ULIANA A A, BUI N T, KAMCEV J, et al. Ion-capture electrodialysis using multifunctional adsorptive membranes [J]. *Science*, 2021, 372(6539): 296-299.
- [6] VAN DER BRUGGEN B, VANDECASTEELE C. Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3): 435-445.
- [7] NIGIM T H. Novel classification of multistage flash desalination via finite and infinite flashing: Investigating thermofluid dynamics under varying inlet flow rates employing validated multiphase CFD simulations [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2023, 179: 108437.
- [8] NIGIM T H, EATON J A. CFD prediction of the flashing processes in a MSF desalination chamber [J]. *Desalination*, 2017, 420: 258-272.
- [9] 严俊杰, 王金华, 邵树峰, 等. 多级闪蒸海水淡化系统的改进研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(11): 1165-1168.
YAN Junjie, WANG Jinhua, SHAO Shufeng, et al. Improvement of multi-stage flash seawater desalination system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(11): 1165-1168.
- [10] RAZA A, LU Jinyou, ALZAIM S, et al. Novel receiver-enhanced solar vapor generation: review and perspectives [J]. *Energies*, 2018, 11(1): 253.
- [11] CHERP A, JEWELL J. The concept of energy security: beyond the four as [J]. *Energy Policy*, 2014, 75: 415-421.
- [12] GAO Minmin, ZHU Liang, PEH C K, et al. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production [J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(3): 841-864.
- [13] TAO Peng, NI G, SONG Chengyi, et al. Solar-driven interfacial evaporation [J]. *Nature Energy*, 2018, 3(12): 1031-1041.
- [14] ZHAO Fei, GUO Youhong, ZHOU Xingyi, et al. Materials for solar-powered water evaporation [J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(5): 388-401.
- [15] HE Fang, WU Xiaochun, GAO Jie, et al. Solar-driven interfacial evaporation toward clean water production: burgeoning materials, concepts and technologies [J]. *Journal of Materials Chemistry: A*, 2021, 9(48): 27121-27139.
- [16] 李雪, 周明宇, 韩朋, 等. 高效太阳能驱动海水淡化的最新研究进展 [J]. *材料导报*, 2024, 38(13): 27-42.
LI Xue, ZHOU Mingyu, HAN Peng, et al. Recent research advances in efficient solar-driven desalination [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(13): 27-42.
- [17] LU Xiaoyan, MU Chunxia, LIU Yuxuan, et al. Recent advances in solar-driven interfacial evaporation coupling systems: energy conversion, water purification, and seawater resource extraction [J]. *Nano Energy*, 2024, 120: 109180.
- [18] 凌童, 段慧玲, 闫煜杰, 等. 太阳能界面蒸发的应用综述 [J]. *分布式能源*, 2021, 6(3): 1-9.
LING Tong, DUAN Huiling, YAN Yujie, et al. Review on application of solar interfacial evaporation [J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(3): 1-9.
- [19] NEUMANN O, URBAN A S, DAY J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(1): 42-49.
- [20] LI Ruiqi, ZHOU Changqing, YANG Lixue, et al. Multifunctional cotton with PANI-Ag NPs heterojunction for solar-driven water evaporation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Part C): 127367.
- [21] YANG Bo, ZHANG Zhiming, LIU Peitao, et al. Flatband λ -Ti₃O₅ towards extraordinary solar steam generation [J]. *Nature*, 2023, 622(7983): 499-506.

- [22] WANG Juan, LI Yangyang, DENG Lin, et al. High-Performance photothermal conversion of narrow-bandgap Ti_2O_3 nanoparticles [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(3): 1603730.
- [23] WU Jiali, HAN Shengjie, XU Lei, et al. Recent progress of solar-driven interfacial evaporation based on organic semiconductor materials [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 326: 124759.
- [24] HE Yujian, ZHAO Demin, WANG Heng, et al. 3D graphene composite foams for efficient and stable solar desalination of high-salinity brine [J]. *Solar RRL*, 2023, 7(14): 2300313.
- [25] CHENG Shangru, XU Tianyi, LU Penglin, et al. Construction of a reduced graphene oxide/polyvinyl alcohol (PVA)-natural rubber (NR) porous rubber sponge toward solar-driven sustainable water purification [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: 104234.
- [26] XIAO Linhong, CHEN Xin, YANG Xinyue, et al. Recent advances in polymer-based photothermal materials for biological applications [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, 2(10): 4273-4288.
- [27] FU Ruijuan, CAO Xiaoyin, ZHANG Hongyu, et al. High-efficient solar steam generation assisted removal of radioactive iodine ions from water by carbonized conjugated microporous polymer-based photothermal conversion materials [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330(Part A): 125283.
- [28] YU Zhen, SU Yuqing, GU Ruonan, et al. Micro-nano water film enabled high-performance interfacial solar evaporation [J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1): 214.
- [29] CHEN Hao, PANGuangze, YAN Mei, et al. Janus membrane with enhanced interfacial activation for solar evaporation [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 87: 1-11.
- [30] HAN Jiang, XING Wenqian, YAN Jun, et al. Stretchable and superhydrophilic polyaniline/halloysite decorated nanofiber composite evaporator for high efficiency seawater desalination [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 4(5): 1233-1245.
- [31] 葛灿, 张传雄, 方剑. 界面光热转换水蒸发系统用纤维材料的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2021, 42(12): 166-173.
- GE Can, ZHANG Chuanxiong, FANG Jian. Research progress in fibrous materials for interfacial solar steam generation system [J]. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(12): 166-173.
- [32] WU Xuan, LU Yi, REN Xiaohu, et al. Interfacial solar evaporation: from fundamental research to applications [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(23): 2313090.
- [33] TAN Xinyan, ZHANG He, LI Lele, et al. A promising technology: solar-driven interfacial evaporation with facilitation strategies, multifunctional applications and perspectives [J]. *Chemical Communications*, 2023, 59(63): 9556-9574.
- [34] GHASEMI H, NI G, MARCONNET A M, et al. Solar steam generation by heat localization [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4449.
- [35] NI G, LI G, BORISKINA S V, et al. Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration [J]. *Nature Energy*, 2016, 1(9): 16126.
- [36] ZHAO Zexiang, WANG Chengbing, WEI Dan, et al. Condensation device design represents a critical step for solar-driven water evaporation toward practical applications [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2024, 5(2): 101794.
- [37] ZHAO Qi, YANG Yawei, PAN Cheng, et al. Integrated strategy of solar evaporator and steam collector configurations for interfacial evaporation water purification [J]. *Solar Energy*, 2023, 266: 112187.
- [38] 江代君, 郑臻, 吴炎琳, 等. 界面光热蒸发器的研究进展 [J]. *太阳能*, 2021(11): 19-28.
- JIANG Daijun, ZHENG Zhen, WU Yanlin, et al. Research progress of interfacial photothermal evaporation devices [J]. *Solar Energy*, 2021(11): 19-28.
- [39] XU Ying, MA Jiaxiang, HAN Yu, et al. A simple and universal strategy to deposit Ag/polypyrrole on various substrates for enhanced interfacial solar evaporation and antibacterial activity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 384: 123379.
- [40] SU Lifan, LIU Xiaoyu, XIA Wei, et al. Simultaneous photothermal and photocatalytic MOF-derived C/ TiO_2 composites for high-efficiency solar driven purification of sewage [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 650(Part A): 613-621.
- [41] DING Dandan, GUO Wei, GUO Chongshen, et al. MoO_3-x quantum dots for photoacoustic imaging guided photothermal/photodynamic cancer treatment [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(5): 2020-2029.
- [42] HAN Xuemei, BESTEIRO L V, KOH C S L, et al. Intensifying heat using MOF-isolated graphene for solar-driven seawater desalination at 98% solar-to-thermal efficiency [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(13): 2008904.

- [43] ZHAO Xin, MENG Xiangtong, ZOU Hongqi, et al. Topographic manipulation of graphene oxide by polyaniline nanocone arrays enables high-performance solar-driven water evaporation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(7): 2209207.
- [44] WANG Daiyi, LIN Xiaofeng, WU Yujian, et al. Hanging photothermal fabric based on polyaniline/carbon nanotubes for efficient solar water evaporation [J]. *ACS Omega*, 2023, 8(47): 44659-44666.
- [45] CHEN Guanyu, SUN Jiangman, PENG Qian, et al. Biradical-featured stable organic-small-molecule photothermal materials for highly efficient solar-driven water evaporation [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(29): 1908537.
- [46] YANG Yuchong, HE Ping, WANG Yunxia, et al. Supramolecular radical anions triggered by bacteria in situ for selective photothermal therapy [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(51): 16239-16242.
- [47] WANG Xu, LIU Qingchang, WU Siyao, et al. Multilayer polypyrrole nanosheets with self-organized surface structures for flexible and efficient solar-thermal energy conversion [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(19): 1807716.
- [48] CUI Ximin, RUAN Qifeng, ZHUO Xiaolu, et al. Photothermal nanomaterials: a powerful light-to-heat converter [J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(11): 6891-6952.
- [49] LI Jing, WANG Luoqing, ZHANG Chenyang, et al. Manipulation of the self-assembly morphology by side-chain engineering of quinoxaline-substituted organic photothermal molecules for highly efficient solar-thermal conversion and applications [J]. *Angewandte Chemie*, 2024, 136(20): e202402726.
- [50] 沈钟平, 张华. 影响地面太阳辐射及其谱分布的因子分析 [J]. *太阳能学报*, 2009, 30(10): 1389-1395.
- SHEN Zhongping, ZHANG Hua. Analysis on the factors affecting surface solar radiation and its spectral distribution [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(10): 1389-1395.
- [51] LIAO Qihua, ZHANG Panpan, YAO Houze, et al. Reduced graphene oxide-based spectrally selective absorber with an extremely low thermal emittance and high solar absorptance [J]. *Advanced Science*, 2020, 7(8): 1903125.
- [52] JUNG H S, VERWILST P, SHARMA A, et al. Organic molecule-based photothermal agents: an expanding photothermal therapy universe [J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(7): 2280-2297.
- [53] HU Wenbo, MIAO Xiaofei, TAO Haojie, et al. Manipulating nonradiative decay channel by intermolecular charge transfer for exceptionally improved photothermal conversion [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(10): 12006-12014.
- [54] SHI Yu, WANG Yuzhu, MENG Nan, et al. Photothermal conversion porous organic polymers: design, synthesis, and applications [J]. *Small Methods*, 2024, 8(10): 2301554.
- [55] MENG Dongli, YANG Shaojun, GUO Liang, et al. The enhanced photothermal effect of graphene/conjugated polymer composites: photoinduced energy transfer and applications in photocontrolled switches [J]. *Chemical Communications*, 2014, 50(92): 14345-14348.
- [56] SHEN Jianxiang, LIN Xiangsong, LIU Jun, et al. Effects of cross-link density and distribution on static and dynamic properties of chemically cross-linked polymers [J]. *Macromolecules*, 2019, 52(1): 121-134.
- [57] ZHAO Fei, ZHOU Xingyi, SHI Ye, et al. Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(6): 489-495.
- [58] LI Xia, YUE Dongmin, LIU Fei, et al. Acid-doped polyaniline membranes for solar-driven interfacial evaporation [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2023, 40(1): 223-234.
- [59] WEI Xian, PENG Yubing, FANG Wangxi, et al. A polyaniline nanofiber array supported ultrathin polyamide membrane for solar-driven volatile organic compound removal [J]. *Journal of Materials Chemistry: A*, 2022, 10(38): 20424-20430.
- [60] AN Ning, ZHANG Xin, CHEN Yi, et al. A self-floating photothermal/photocatalytic evaporator for simultaneous high-efficiency evaporation and purification of volatile organic wastewater [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(44): 2500777.
- [61] WU Mei, LIN Jing, DU Juan, et al. Self-supporting polyurethane solar evaporator with efficiently implemented thermal management strategy [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 375: 133803.
- [62] WANG Zhe, YAN Yutao, SHEN Xiaoping, et al. A wood-polypyrrole composite as a photothermal conversion device for solar evaporation enhancement [J]. *Journal of Materials Chemistry: A*, 2019, 7(36): 20706-20712.
- [63] GENG Le, LI Lele, ZHANG He, et al. Interfacial so-

- lar evaporator synergistic phase change energy storage for all-day steam generation [J]. *Journal of Materials Chemistry: A*, 2022, 10(29): 15485-15496.
- [64] GAO Can, LI Yimeng, LAN Lizhen, et al. Bioinspired asymmetric polypyrrole membranes with enhanced photothermal conversion for highly efficient solar evaporation [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(6): 2306833.
- [65] SUN Lei, ZHANG Xiang, YUAN Hao, et al. Engineering of 0D/1D architectures in 3D networks over CDs/PPy-CPP biomass foam with high efficiency on seawater evaporation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 477: 147279.
- [66] HUANG Dan, ZHANG Jie, WU Gang, et al. A solar evaporator based on hollow polydopamine nanotubes with all-in-one synergic design for highly-efficient water purification [J]. *Journal of Materials Chemistry: A*, 2021, 9(28): 15776-15786.
- [67] CHONG Wenmei, MENG Ruru, LIU Zixiao, et al. Superhydrophilic polydopamine-modified carbon-fiber membrane with rapid seawater-transferring ability for constructing efficient hanging-model evaporator [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(3): 1063-1075.
- [68] JIANG Dexing, DAI Yaohui, JIANG Yuwei, et al. Polydopamine/Fe₃O₄ modified wood-based evaporator for efficient and continuous water purification [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 652 (Part B): 1271-1281.
- [69] ZHAO Qi, LIU Juyang, WU Zhixin, et al. Robust PEDOT: PSS-based hydrogel for highly efficient interfacial solar water purification [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 442(Part 1): 136284.
- [70] ZHAO Qi, WU Zhixin, XU Xinye, et al. Design of poly(3, 4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate-polyacrylamide dual network hydrogel for long-term stable, highly efficient solar steam generation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 300: 121889.
- [71] CAI Wenfang, ZHAO Shifeng, ZHANG Kai, et al. Synergy of light trapping and water management in interconnected porous PEDOT:PSS hydrogels for efficient solar-driven water purification [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(26): 10175-10183.
- [72] LAO Yongjie, WANG Yusheng, ZHANG Qiao, et al. Silver nanoparticles@polyaniline/polyvinyl alcohol sponges with enhanced photothermal interfacial evaporation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 374: 133728.
- [73] ZHANG Bin, WU Wanze, YIN Guanchao, et al. A multifunctional synergistic solar-driven interfacial evaporator for desalination and photocatalytic degradation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(4): 6948-6956.
- [74] WANG Mengyao, HU Jingjing, LI Mengqi, et al. Bioinspired design of photothermal anti-fouling fabrics for solar-driven sustainable seawater desalination [J]. *Nano Energy*, 2025, 136: 110726.
- [75] WANG Xuan, SUN Lei, SHEN Yu, et al. Self-rotating wood-based floating solar-driven interfacial evaporator for continuous and high-efficiency desalination [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 509: 161363.
- [76] LI Jiakai, CHEN Zhen, DU Huiying, et al. 3D-printed flower-inspired evaporator for simultaneous solar seawater desalination and hydrogen production [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 515: 163629.
- [77] CHENG Zhaohe, XU Yuanlu, CHEN Tiantian, et al. A Fenton-integrated siphon evaporator for efficient removal of volatile fecal odors during interfacial steam generation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(3): 117104.
- [78] LIU Xiahui, ZHANG Yuliang, LIU Tao, et al. Photothermal coupling of low-grade waste heat to achieve high efficiency fresh water production via sponge-based evaporator [J]. *Desalination*, 2025, 612: 118988.

(编辑 武红江)