

# 基于光热有机小分子的太阳能界面蒸发技术研究进展

高文学<sup>1\*</sup>, 赵曦<sup>1\*</sup>, 范振轩<sup>1\*</sup>, 魏睿<sup>1</sup>, 刘晓庆<sup>1</sup>, 薛采月<sup>2</sup>, 孙浩琛<sup>3</sup>, 曹煜<sup>3</sup>, 郭秉鹏<sup>4</sup>, 邵长香<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>山东第一医科大学(山东省医学科学院)化学与制药工程学院, 医学科技创新中心, 山东 济南

<sup>2</sup>山东第一医科大学(山东省医学科学院)药学院(药物研究所), 山东 济南

<sup>3</sup>山东第一医科大学(山东省医学科学院)临床与基础医学院, 山东 济南

<sup>4</sup>齐鲁工业大学(山东省科学院)化学与化工学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年9月17日; 录用日期: 2024年10月8日; 发布日期: 2024年10月17日

## 摘要

有机小分子光热材料具有结构可控、性质易调、功能多样等优势, 近年来被开发用于光热界面水蒸发领域。鉴于此, 本文综述了有机小分子材料在光热界面蒸发领域的研究进展。基于有机小分子光热转化增强策略, 介绍了适合于该体系的分子结构特征。基于有机小分子可构建膜基、泡沫基、水凝胶基蒸发系统, 对上述三类蒸发系统进行了分析和讨论。接着概述了蒸发系统在海水淡化、污水处理、水电联产等领域的应用。最后, 对当前发展进行总结并提出所面临的挑战, 以期有机小分子基界面蒸发系统的设计和开发提供参考和借鉴。

## 关键词

光热界面蒸发, 有机小分子, 光热转化, 净水, 水电联产

# Research Progress of Solar Interface Evaporation Technology Based on Photothermal Organic Small Molecules

Wenxue Gao<sup>1\*</sup>, Xi Zhao<sup>1\*</sup>, Zhenxuan Fan<sup>1\*</sup>, Rui Wei<sup>1</sup>, Xiaoqing Liu<sup>1</sup>, Caiyue Xue<sup>2</sup>, Haochen Sun<sup>3</sup>, Yu Cao<sup>3</sup>, Bingpeng Guo<sup>4</sup>, Changxiang Shao<sup>1#</sup>

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 高文学, 赵曦, 范振轩, 魏睿, 刘晓庆, 薛采月, 孙浩琛, 曹煜, 郭秉鹏, 邵长香. 基于光热有机小分子的太阳能界面蒸发技术研究进展[J]. 材料化学前沿, 2024, 12(4): 133-148. DOI: 10.12677/amc.2024.124018

<sup>1</sup>School of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Medical Science and Technology Innovation Center, Shandong First Medical University (Shandong Academy of Medical Sciences), Jinan Shandong

<sup>2</sup>School of Pharmaceutical Sciences (Institute of Materia Medica), Shandong First Medical University (Shandong Academy of Medical Sciences), Jinan Shandong

<sup>3</sup>School of Clinical and Basic Medicine, Shandong First Medical University (Shandong Academy of Medical Sciences), Jinan Shandong

<sup>4</sup>School of Chemistry and Chemical Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan Shandong

Received: Sep. 17<sup>th</sup>, 2024; accepted: Oct. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Oct. 17<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The photothermal organic small molecules have advantages such as controllable structure, easily tunable properties, and diverse functionalities. In recent years, they have been developed for applications in the field of solar-driven interface evaporation. Therefore, this paper reviews the research progress of organic small molecules based on photothermal interface evaporation systems. The molecular structure characteristics suitable for this system based on the enhanced photothermal conversion mechanism are introduced. Furthermore, three types of evaporation systems constructed using organic small molecules including membrane-based, foam-based, and hydrogel-based systems are analyzed. These systems are further discussed in terms of their potential applications in seawater desalination, wastewater treatment, and water-electricity cogeneration. Finally, the review concludes by summarizing the current developments and highlighting the challenges that must be addressed, which aims to provide references and insights for the design and development of organic small molecule-based interface evaporation systems.

## Keywords

Solar-Driven Interfacial Evaporation, Organic Small Molecules, Photothermal Conversion, Water Purification, Water-Electricity Cogeneration

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

淡水资源短缺问题是当今社会面临的世界性难题，并已成为影响人类生存和制约生活水平提高的关键因素[1][2]。考虑到地球上78%的面积被水覆盖，因此，从海水、湖水等直接获取直饮水的技术一直备受关注。研究人员已开发出如蒸馏、反渗透等多种技术来获取净水资源，但这些技术往往需要巨大的能量消耗和高昂的成本来支撑，因此，开发绿色环保、成本低廉的净水获取技术具有重要的意义。

近年来，随着纳米材料与技术的发展，太阳能驱动的光热界面蒸发技术具有高效促进水蒸发能力而引发大量关注。该技术的核心在于界面蒸发的热局域化将吸收光转化的热能限制在空气-水界面，获得高度重合的加热界面和蒸发界面，有效降低向非蒸发界面水体的热损失，从而提高蒸发速率和太阳能-蒸汽能量转化效率[3][4]。在光热界面蒸发技术中，光热材料是基础也是核心，其性能将直接影响蒸发速率等关键产水指标。当前，无机半导体、等离激元纳米金属、聚合物以及石墨烯等碳基材料已被广泛应用于光热界面蒸发研究[5]-[7]。在上述材料被充分探究的同时，有机小分子材料却鲜少被提及。有机小分

子是指相对分子质量为 100~1000、含碳数在 30 左右的有机化合物。有机小分子具有结构可设计、性质可调控、功能多样等优势,该类材料在太阳能电池、储能器件、荧光检测等领域均有广泛的应用[8]-[10]。尽管如此,受限于该类材料吸收光谱有限、光热转化效率低、光漂白严重等问题,基于有机小分子光热材料的光热界面蒸发技术极少被报道。直到 2020 年唐本忠院士团队报道了首例基于有机小分子材料的界面水蒸发系统[11],有机小分子光热材料才逐渐在界面蒸发领域发挥其应用潜力。

综上,有机小分子光热材料在太阳能驱动的界面蒸发技术的应用在近几年才开始陆续报道,目前对于该领域缺乏综合分析。鉴于此,本文将聚焦于有机小分子光热材料在太阳能界面蒸发领域的研究,总结光热转化增强策略以提供分子结构设计思路,并对当前基于膜、泡沫和水凝胶结构的蒸发器进行分别讨论和性能对比,概述上述蒸发系统在海水淡化、污水处理、水电联产等领域的应用。最后,分析该领域所面临的挑战,以期为后续基于有机小分子的光热界面蒸发系统提供参考。

## 2. 有机小分子光热材料

### 2.1. 有机小分子光热转化增强策略

前面提到,在光热界面蒸发系统中有机小分子材料的应用主要受限于吸收光谱范围窄、非辐射跃迁不足引发的光热转换效率低,因此,理解光热转化过程并明晰光热转化增强机制对于设计开发有机小分子非常必要。根据雅布隆斯基图(图 1(a)),分子捕获的光能往往会促使电子从基态到最低激发态的跃迁过程,然后激发态分子将通过辐射跃迁或非辐射跃迁的失活过程返回到基态。辐射跃迁(主要表现形式为荧光)与非辐射跃迁(主要表现为放热)是两大互相竞争的激发态弛豫过程[12]。因此,拓宽吸光范围及增强非辐射跃迁能力是提升光热转化的两个重要方面。目前增强光热性能的策略主要有以下几种:

1)  $\pi$  共轭结构:多环  $\pi$  共轭材料因其独特的分子结构、优异的热稳定性而备受关注。 $\pi$  共轭度大的芳香族化合物通常具有相对较小的带隙,导致吸收光谱红移。多环  $\pi$  共轭材料具有很强的分子间相互作用,可以引起荧光猝灭,从而提高了聚集态热量的非辐射转移概率[13]。如若提升  $\pi$  共轭度,则对分子提升的光热转换效率具有较大帮助。例如,酞菁及其衍生物(Pcs)是一种具有聚吡咯大环骨架( $18\pi$  电子)的多环共轭化合物,但多数 Pcs 吸收光谱较窄,通过在其分子骨架  $\beta$  位引入噻吩基团,成功合成了基于酞菁的有机小分子光热材料 4OCSPC [14]。结果显示,修饰的噻吩基团显著提高  $\pi$ -共轭度,使其吸收光谱有效红移到 1000 nm,太阳能光热转换效率为 17.3%。因此,拓展  $\pi$  共轭结构对于光热转化效率具有积极的影响。

2) 分子堆积:具有平面刚性骨架和共轭延伸系统的有机小分子在光热转化方面备受关注,通常这类分子具有聚集导致猝灭和在水性介质中溶解度差的问题,这对于用于光热界面蒸发具有天然的优势。当距离足够近时,大部分共轭分子很容易通过  $\pi$ - $\pi$  相互作用以特定的分子堆积形式进行自组装形成聚集体[15]。由于  $\pi$ - $\pi$  堆积增强电子离域,从而减小带隙,促进光热转化效率提升。因此,相比于溶液中分子状态,固态聚集体往往展现出更宽的吸光范围和更强的光热转化性能,为光热界面蒸发奠定良好的基础。

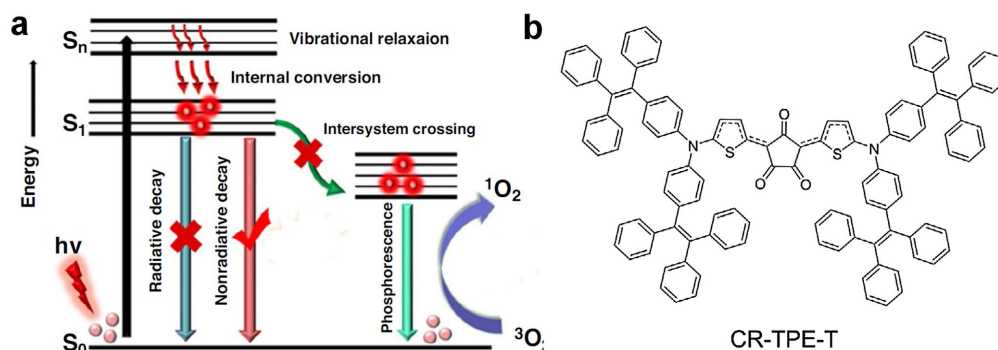
3) 分子内电荷转移:电荷转移态是一种特殊的激发态形式,即束缚的空穴和电子分别局域在同一分子的不同单元上,即分子内电荷转移态。分子内电荷转移可以改变分子的电子云分布或者电子能级结构,从而影响分子的吸收光谱。例如,许多具有强化电子供体(D)-电子受体(A)主链的分子可以通过促进分子内电荷转移过程,电子离域或者带隙减小导致吸收光谱的红移,增强分子对长波光长的吸收能力[16]。此外,分子内电荷转移效应随着供受体强度的变化而变化,从而进一步影响光热转化。例如,在吡咯并吡咯二酮骨架上引入不同的电子受体,电子受体的吸电子能力越强,分子内电荷转移特性显著增强,进而该分子表现出更明显的红移吸收和更弱的荧光发射,从而促进光热转化[17]。

4) 分子内运动:分子内运动包括旋转、振动和扭曲。活跃分子内运动有利于促进非辐射衰变,并将激发能释放为热能。有机小分子在光热界面蒸发中应用时多为固体状态,在聚集态下,分子运动往往

受到限制, 从而影响光热转化。为了提高光热转化, 在分子结构中可引入具有大空间位阻的结构单元为聚集态分子旋转和振动提供条件, 增强光热转化。例如, Liu 等人构造了一种“伞形”结构的分子: “伞头”为电子给体树枝状三苯胺衍生物 GDPA, “伞柄”为电子受体杂环 QCN, 苯环作为  $\pi$  连接桥形成 D- $\pi$ -A 型共轭分子 GDPA-QCN。GDPA 中较大的空间位阻可以显著增强聚集态下的分子内运动, 增大光热转换效率。该结构使得聚集态分子吸收光谱从 300 nm 拓展到 1100 nm, 光热转化效率为 19.33%。该工作为如何利用分子运动构建光热材料提供了思路[18]。

5) 稳定自由基: 按照电子基态的不同, 可将有机半导体分子划分为“闭壳”和“开壳”两种类型。其中, “开壳”的自由基半导体分子是一类特殊的有机化合物; 它们的分子结构中含有未成对的电子, 因而具有独特的物理化学性质, 在光热转换领域也有良好的应用潜力[19]。华南理工大学李远课题组利用稳定开壳型芳香族硝酸自由基实现了高效光热转化[20]。作为没有空间位阻基团保护的苯酚自由基, 它们具有丰富的共振结构, 包括封闭壳层的类硝基和开放壳层的、未成对电子在共轭骨架中离域的氮氧化物结构, 因而表现出较高的电化学和热稳定性。其中, TPA-TPA-O6 粉体表现出 300~2000 nm 的超宽吸收谱, 且光热转换效率高, 光漂白效应很小。

总之, 光热转化的核心在于对光子能量的吸收和热能的转化。在分子设计中, 通过拓展  $\pi$  共轭结构、增强  $\pi$ - $\pi$  堆积、强化分子内电荷转移、引入分子内运动和稳定自由基等能够显著减小带隙, 拓展分子的吸光范围, 增强非辐射跃迁能力。上述方式均为行之有效的提升光热转换效率的途径。



**Figure 1.** (a) Schematic illustration of Jablonski diagrams [12]. (b) Chemical structure of CR-TPE-T [11]  
**图 1.** (a) 雅布隆斯基图[12], (b) CR-TPE-T 分子结构图[11]

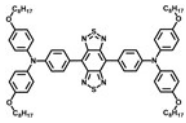
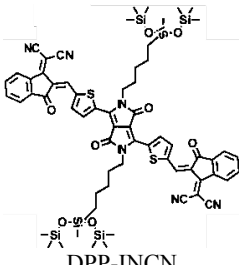
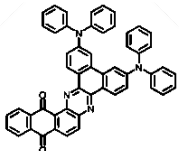
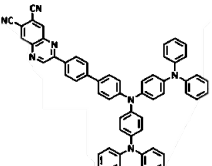
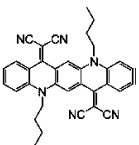

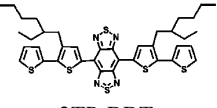
## 2.2. 代表性光热有机小分子设计

设计及开发具有优异光热性能分子对于后续光热界面蒸发应用具有重要意义, 因此, 当前的多数研究着重在基于一种或多种光热转化增强策略设计具有优异的光热有机小分子。例如, 唐本忠团队报道的首例用于光热界面蒸发的有机小分子材料结构如图 1(b)所示[11]。利用具有近红外吸收的克酮酸(CRs)单元的双自由基和介离子之间的电子共振式结构的特点, 通过合理的分子设计, 在 CRs 上面引入四苯乙炔噻吩给体单元(D), 获得了一种具有双自由基特性、稳定的 D-A-D 型有机小分子光热材料(CR-TPE-T)。在 CR-TPE-T 的分子结构中, 共轭 TPE-T 单元的引入克服了大多数 CRs 呈现的狭窄吸收, 将吸收光谱扩展到近红外区域。在聚集时, CR-TPE-T 通过  $\pi$ - $\pi$  堆积来拓展分子间共轭, 能带隙缩小到 0.75 eV, 吸收光谱拓宽到 1600 nm, 有效地促进了太阳光收集。理论计算也表明, 开壳的双自由基态(OS)的第一激发能为 1.58 eV, 低于闭壳的非自由基态(CS, 1.69 eV), 且 OS 态将经历比 CS 态更快的非辐射衰减过程。因此, 处于 OS 态的 CR-TPE-T 的激发态能量倾向于非辐射耗散, 产生热量。更为少见的是, 在聚集态下, CR-TPE-T 表现出双自由基特性, 有利于高效的光热转化。该研究展现了结构多样、性能易调的有机小分

子光热材料在太阳能高效利用方面的巨大潜力，促进更多有机小分子光热材料的开发。

总之，通过光热转化增强策略可构建性能优异的光热有机小分子，目前已经开发了大量有机光热分子用于太阳能界面蒸发。表 1 总结了已报道的有机小分子材料的结构特征、光热转化机制及性能，为后续研究提供更多参考。

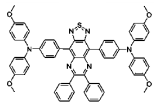
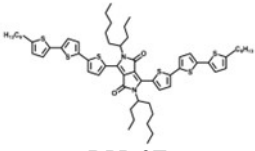
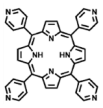
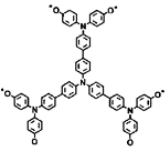
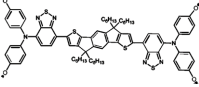
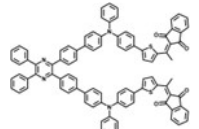
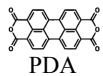


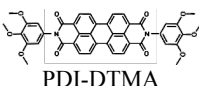
**Table 1.** The photothermal properties of small organic molecules for solar vapor generation  
**表 1.** 用于光热界面蒸发的有机小分子光热性能

光热分子结构及命名	光热转化机制	带隙[eV]	吸收波长[nm]	光热转化效率	参考文献
 BPBBT	分子转动	/	600~900	/	Angew. Chem. Int. Ed., 2020, 59, 20371-20375
 DPP-INCN	分子内电荷转移	1.45/1.22/1.64	/	/	ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13, 38365
 DDPA-PDN	分子内电荷转移、 $\pi$ - $\pi$ 堆积	1.76/1.8	300~850	56.23% (655 nm 激光)	Adv. Funct. Mater., 2021, 31, 2106247
 GDPA-QCN	分子内电荷转移、分子运动	1.51/1.78	300~1100	19.33% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	Angew. Chem. Int. Ed., 2022, 61, e202117087
 DCN-4CQA	$\pi$ - $\pi$ 堆积	2.46	300~800	78.5% (730 nm 激光) 18.2% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	Chem. Eur. J., 2022, 28, e202104137
 DDHT	分子内电荷转移、 $\pi$ - $\pi$ 堆积	2.24	300~950	58.58% (655 nm 激光)	ACS Appl. Energy Mater., 2022, 5, 15758
 2TP-BBT	分子内电荷转移、 $\pi$ - $\pi$ 堆积	0.92	300~1400	22.38% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	J. Mater. Chem. A, 2023, 11, 15380

续表

<p>GTPA-BTO-Py<sup>+</sup></p>	扭曲分子内电荷转移	0.84	200~1300	20.5% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	Chem. Eng. J., 2023, 471, 144745
<p>PM6:Y6</p>	$\pi$ - $\pi$ 堆积	/	350~1000	/	EcoMat, 2023, 5, e12323
<p>4</p>	开壳单线态双自由基、 $\pi$ 共轭结构	1.34/1.75	300~1050	15.06% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	Angew. Chem. Int. Ed., 2023, 62, e202314982 (无纺布)
<p>5</p>		1.22/1.38	300~1200	21.2% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	J. Mater. Chem. A, 2024, 12, 6663-6670 (棉织物)
<p>CR-TPE-T</p>	分子内电荷转移、 $\pi$ -排堆积、稳定自由基	0.75	300~1600	72.7% (808 nm 激光)	Adv. Mater., 2020, 32, 1908537
<p>MTTT-BT</p>	分子内运动	/	300~750 (液体状态下)	/	ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, 12, 26033
<p>4OCSPC</p>	$\pi$ 共轭结构	/	300~1000	17.3% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	J. Mater. Chem. A, 2021, 9, 24452
<p>P(DPP)4</p>	分子内电荷转移、稳定自由基	1.45/0.83	300~1500	72.7% (808 nm 激光)	Dyes Pigments, 2021, 192, 109460

续表

 TPA-BTDH	分子内电荷转移、分子内运动	1.702	/	/	Adv. Mater., 2021, 33, 2102258
 DPP-2T	$\pi$ - $\pi$ 堆积	2.03	300~900	/	J. Mater. Chem. A, 2021,9, 2104-2110
 TPyP	$\pi$ 共轭结构	/	300~800	73.6% (655 nm 激光)	RSC adv., 2022, 12, 28997
 TPA-TPA-O <sub>6</sub>	稳定自由基	1.30	300~2000	/	Angew. Chem. Int. Ed., 2022, 61, e202113653
 IDT-O <sub>4</sub>	稳定自由基、分子内电荷转移	1.13	300~2500	/	Aggregate., 2023, e426.
 TPP-2IND	$\pi$ - $\pi$ 堆积、分子内电荷转移	2.459	300~750	/	Aggregate., 2024, e535.
 PDA	$\pi$ - $\pi$ 堆积	2.00	300~636	/	
 PDI-DMP	$\pi$ - $\pi$ 堆积、分子内电荷转移	1.95	300~668	/	Small, 2023, 19, 2305856
 PDI-DMA	$\pi$ - $\pi$ 堆积、分子内电荷转移	1.92	300~675	/	
 PDI-DTMA	$\pi$ - $\pi$ 堆积、分子内电荷转移	1.17	300~1100	20.6% (1 kW·m <sup>-2</sup> 模拟太阳光)	

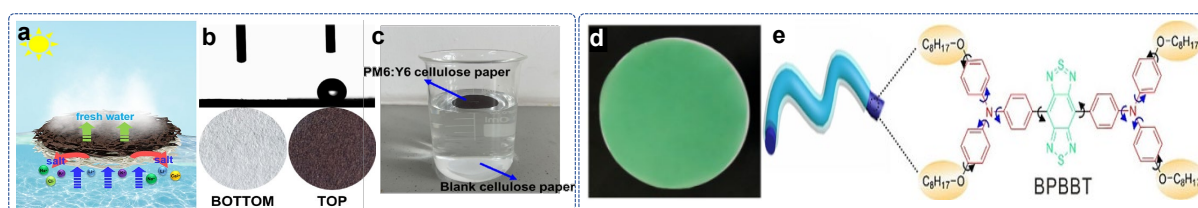
### 3. 基于有机小分子的蒸发器系统及性能

#### 3.1. 膜基蒸发系统

膜基蒸发系统多呈现二维平面状，由有机光热材料和负载支撑膜构成。支撑膜内部往往由纤维结构所组成，孔隙结构诱导的毛细作用力促进水传输。另外，多孔结构也可以促进光吸收，一定程度上提升光热转化效率。在制备过程中，膜基蒸发器可直接以滤纸、无尘纸为代表的亲水平面膜材料作为光热粉末材料的隔热载体。除了将光热材料均匀负载在承载膜上外，还可以借助于有机材料的疏水特性构建疏

水-亲水的 Janus 结构膜。例如, Zhu 等人在纤维素纸的一面喷洒上 PM6 和 Y6 两种有机共轭光热材料的混合物, 制备了一种具有荷叶状界面结构的自浮式 Janus 光热水蒸发器(图 2(a)) [21]。与荷叶上的非对称润湿行为相似, 该蒸发器的底面表现出良好的亲水性, 能够快速传输水分, 便于离子扩散; 顶面由于有机分子的存在则表现出疏水性, 从而具有理想的自浮能力和抗盐性(图 2(b), 图 2(c))。在 1 个太阳下, 蒸发器(PM6:Y6 混合物负载量仅为  $1.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ )的水蒸发速率为  $1.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 太阳能-蒸汽转换效率达到 88.9%。

膜基蒸发器还可以将光热分子和高分子材料复合后直接电纺的方式制备, 该方式适用于大部分有机小分子, 但对于具有分子运动特性的分子并非最优选择。因为分子被固定在固体高分子中, 其分子运动受限, 进而影响非辐射衰变的能量耗散途径。例如, BPBBT 分子具有分子运动特性, 当在固体纤维中加入光热分子后, BPBBT 分子运动不可避免地在一定程度上受到大分子间空间位阻的限制, 从而降低了光热效应。为避免该问题, 唐本忠团队采用同轴静电纺丝技术构建了以 BPBBT 分子/油溶液为芯, 聚(偏二氟乙烯-共-六氟丙烯)为壳的核-壳纤维[22]。这种核-壳结构使 BPBBT 在纤维中可进行充分的旋转和振动, 从而促进了非辐射能量的耗散。光热研究表明, 核壳型光纤的光热转换效率可达 22.36%, 是非核壳型光纤的 26 倍。将该纤维织物用于光热界面蒸发, 在一个太阳光辐射下, 蒸发速率达到  $1.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。



**Figure 2.** (a) Structure diagram of Janus evaporator, (b) Contact angle images of water on bottom and top of PM6:Y6 cellulose paper, (c) The photo of self-floating evaporator [21], (d) The photograph of the core-shell fibrous mats, (e) Schematic diagram of fiber with core-shell structure and molecular structure [22]

**图 2.** (a) Janus 蒸发器结构示意图, (b) PM6:Y6 纤维素纸底部和顶部的水接触角图像, (c) 自浮式蒸发器照片[21]。 (d) 纤维毡照片, (e) 纤维的核壳结构及分子结构示意图[22]

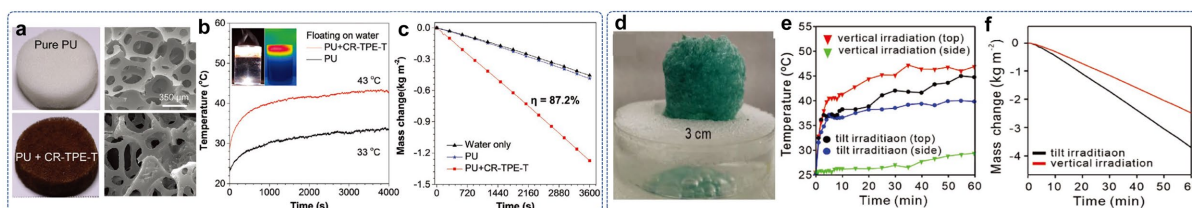
### 3.2. 泡沫基蒸发系统

泡沫基蒸发器因其内部三维多孔网络结构而具有低导热性、快速水传输、优异光热转化性能等突出特点。三维泡沫基蒸发器因减少了光反射和从环境中获得的能量通常表现出更优异的蒸发性能。泡沫基蒸发器其制备过程简单, 也是目前有机小分子材料构建界面蒸发系统的主要形式之一。与膜基蒸发器类似, 泡沫基蒸发系统也主要分为两类, 分别是以泡沫作为骨架和形成复合泡沫两种形式。

以商业泡沫作为支撑骨架, 将有机小分子负载在骨架上的泡沫蒸发系统的制备方式主要分为两种: 第一种是将光热分子分散在乙醇等溶剂中形成悬浮液, 将悬浮液均匀滴涂到泡沫上, 待溶剂挥发完全可得到分子负载的泡沫蒸发器; 第二种是将光热分子溶解在有机溶剂中, 将泡沫浸泡于溶液中并挥发干燥, 最终形成分子负载的泡沫蒸发系统。常用的泡沫骨架有聚氨酯(PU)泡沫、三聚氰胺海绵等。在一定范围内光热分子的负载量越大, 蒸发性能越高, 并在达到一定负载量后性能趋于稳定。例如, Chen 等通过将纯 PU 泡沫浸渍在 CR-TPE-T 二氯甲烷溶液中并干燥, 得到棕黑色 PU 泡沫(PU+CR-TPE-T)(图 3(a))。当 CR-TPE-T 的负载量在 0~30 mg 时, PU + CR-TPE-T 泡沫的吸光率逐渐增加, 但当负载量进一步增加吸光率几乎保持不变。PU + CR-TPE-T 泡沫可以在 60 s 内均匀润湿, 这表明通过毛细凝聚作用进行了有效的输送水。PU + CR-TPE-T 泡沫蒸发器在 1 个太阳照射下温度达到  $43^\circ\text{C}$ (图 3(b)), 并获得 87.2% 的太阳能-蒸汽转化效率和  $1.272 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  的水蒸发速率(图 3(c)) [11]。类似的制备方法被广泛采用, 但该种方式



下有机小分子和泡沫骨架之间并不存在较强的相互作用力，因此其在压缩、弯折等机械形变和负载量较高时均容易脱落，易造成性能不稳定和循环使用性较差等问题。



**Figure 3.** (a) Digital photos and SEM images of pure PU and PU + CR-TPE-T foams, (b) The temperature changes of PU and PU-CR-TPE-T foams floating on water against sunlight irradiation time, (c) Water evaporation curves without (water only) and with PU foam or PU-CR-TPE-T foam under simulated sunlight [11], (d) Photograph of all-fiber porous cylinder-like foam, (e) A comparison between the temperature rise recorded from the surface and side of foam upon the vertical and tilted irradiation of the 1 sun for 60 min, (f) The mass loss of water of foam under vertical and tilted irradiation [24]

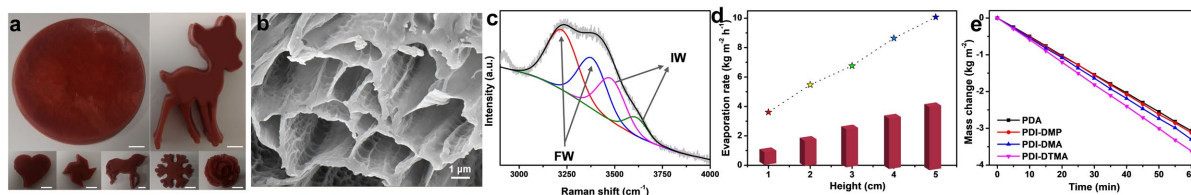
**图 3.** (a) 纯 PU 和 PU + CR-TPE-T 泡沫的照片和 SEM 图像, (b) 漂浮在水面的 PU 和 PU + CR-TPE-T 泡沫在光照下的温度变化, (c) 模拟阳光下纯水和泡沫的蒸发速率曲线[11], (d) 全纤维多孔圆柱形泡沫的照片, (e) 1 个太阳垂直和倾斜照射 60 分钟时, 泡沫表面和侧面温度变化, (f) 垂直和倾斜照射下水质量损失变化[24]

基于复合泡沫的蒸发器往往通过将小分子溶液或者粉末提前和高分子溶液混合后形成复合泡沫结构,在一定程度上能够较好地解决光热材料脱落问题[23]。例如, Li 等人利用气体形成膨胀技术制造了以 TPA-BTDH 作为太阳能吸收体的三维结构纳米纤维泡沫[24]。首先, 在静电纺丝过程中将 TPA-BTDH 掺杂到聚甲基丙烯酸甲酯中制备得到纳米纤维毡, 将其浸泡在 NaHB<sub>4</sub> 溶液中膨胀不同时间得到纤维泡沫。基于该泡沫(图 3(d)), 研究人员还研究了在蒸发试验中模拟阳光照射方向对蒸发能力的影响。如图 3(e), 当辐照方向设置为垂直于蒸发器, 蒸发器表面的温度在 1 h 内升至 46.5°C, 高于蒸发器侧面温度(仅 28.9°C); 而当照射方向倾斜时, 蒸发器表面和侧面的温度在 1 h 内分别增加到 44.5°C 和 39.5°C。因此, 在太阳倾斜照射期间蒸发器的表面和侧面都作为受热蒸发区产生蒸汽, 可在不增加蒸发器表面积的情况下, 大大增加有效蒸发面积。如图 3(f), 在 1 个太阳光的垂直照射下, 蒸发器的蒸发效率为 2.4 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 当倾斜照射时, 蒸发效率增加到 3.6 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。因此, 侧面积辅助蒸发可以提供一种可行且简单的方案来设计先进的蒸发器以实现超高蒸发率。

### 3.3. 水凝胶基蒸发系统

在光热界面蒸发系统中, 由交联聚合物链形成的水凝胶已成为具有巨大应用前景的太阳能水净化材料[25]。在水凝胶网络中, 水以自由水、中间水和结合水三种状态存在。水凝胶中特殊的水状态对水的相变行为具有显著影响: 水分子与聚合物链上的官能团通过氢键等相互作用可以使得大量水以中间水的形式存在, 而中间水比自由水需要更少的能量从液体表面逸出。因此基于水凝胶的蒸发器往往通过调控水分子和聚合物链之间的相互作用增加中间水含量来降低蒸发所需能量, 从而显著提升蒸发速率[26]。基于上述考虑, 我们利用花酰亚胺光热分子和聚乙烯醇(PVA)设计了光热复合水凝胶[27]。水凝胶可实现定制化制备, 满足不同的几何形状的需求(图 4(a))。该水凝胶内部具有多级网络结构(图 4(b)), 能够实现快速的水传输和蒸汽逃逸。在多孔网络结构及亲水官能团的协同作用下, 复合水凝胶表现出优异的吸水能力。对水凝胶进行拉曼光谱表征, 除了自由水存在外, 还观测到中间水的存在(图 4(c))。经测试, 复合水凝胶的等效蒸发焓小于 1400 J·g<sup>-1</sup>, 显著低于纯水的蒸发焓。因此, 鉴于优异的光热转化、热局域化、水传输及水活化的协同调节, 不同高度的水凝胶在 1 个太阳照射下表现出 3.61~10.07 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 的优异蒸发速率(图 4(d))。并且, 为了证明该方法的普适性, 将原料及其他花酰亚胺衍生物制备复合水凝胶, 上述材料均表现出优异的蒸发速率(图 4(e))。总之, 这项工作不仅证明了花酰亚胺基光热材料在界面太阳能蒸汽

生产领域的可行性,更重要的是,证明有机小分子构建水凝胶体系提升蒸发性能的可行性。



**Figure 4.** (a) Photographs of the hydrogels with different 3D configurations. Scale bar: 1 cm, (b) SEM images of the hydrogel, (c) Raman spectrum with fitting curves showing free water and intermediate water in the hydrogel, (d) The water evaporation rates of hydrogels with different heights, (e) Time-dependent mass changes of hydrogels based on PDA, PDI-DMP, PDI-DMA and PDI-DTMA [27]

**图 4.** (a) 不同三维构型的水凝胶照片, 比例尺: 1 cm, (b) 水凝胶的 SEM 图, (c) 水凝胶中游离水和中间水的拉曼光谱拟合曲线, (d) 不同高度水凝胶的水蒸发速率, (e) 基于 PDA、PDI-DMP、PDI-DMA 和 PDI-DTMA 水凝胶蒸发器的水质量损失随时间变化图[27]

总之,有机小分子材料通常呈粉末状态,无法自支撑,在设计蒸发器时往往需要支撑或负载材料。基于纤维素膜的平面蒸发系统制备简单,有机分子的负载量相对较低,对光的利用不够,蒸发性能相对较差;而泡沫基蒸发系统能够负载更多有机小分子,三维泡沫结构具有更强的光捕获能力,有助于光热性能的提升,通过三维结构能够利用更大的蒸发面积实现蒸发速率提升。上述两种系统在微观结构调控、水活化方面并没有太多研究,而水凝胶体系的蒸发系统因为能够降低蒸发焓而显著提升蒸发速率。表 2 总结了基于有机小分子光热材料蒸发系统的性能,便于进行对比和分析。

**Table 2.** Comparison of evaporation performance of organic small molecule based evaporators

**表 2.** 有机小分子基蒸发器的蒸发性能对比

蒸发器类型	光热分子名称	隔热材料/水传输材料	1 个太阳光下的蒸发速率[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	太阳能 - 蒸汽转化效率	参考文献
	BPBBT	聚(偏二氟乙烯 - 共 - 六氟丙烯)基核壳纤维	1.52	/	Angew. Chem. Int. Ed., 2020, 59, 20371–20375
	DPP-INCEN	滤纸	1.28	80.1%	ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13, 38365
	DDPA-PDN	纤维素纸	1.07	73.98%	Adv. Funct. Mater., 2021, 31, 2106247
二维膜蒸发器	GDPA-QCN	纤维素纸	1.3	90.4%	Angew. Chem. Int. Ed., 2022, 61, e202117087
	DCN-4CQA	纤维素纸	0.9713 (平面状) 1.5 (圆锥状)	66.84% /	Chem. Eur. J., 2022, 28, e202104137
	DDHT	木头	1.13	78.40%	ACS Appl. Energy Mater., 2022, 5, 15758
	2TP-BBT	无纺布	1.35	94.3%	J. Mater. Chem. A, 2023, 11, 15380
	GTPA-BTO-Py <sup>+</sup>	无纺布	1.25	91.45	Chem. Eng. J., 2023, 471, 144745
	PM6:Y6	纤维素纸	1.52	88.9%	EcoMat, 2023, 5, e12323

续表

	4	无纺布/棉 织物	1.25 (无纺布)	87.1% (无纺布)	Angew. Chem. Int. Ed., 2023, 62, e202314982(无纺布)
			1.26 (棉织物)	85.8% (棉织物)	
	5		1.35 (无纺布)	93.5% (无纺布)	J. Mater. Chem. A, 2024, 12, 6663-6670(棉织物)
			1.36 (棉织物)	93% (棉织物)	
三维泡 沫蒸发 器	CR-TPE-T	聚氨酯泡沫	1.272	87.2%	Adv. Mater., 2020, 32, 1908537
	MTTT-BT	聚(偏二氟 乙烯-共- 六氟丙烯)	1.43	86.5%	ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, 12, 26033
	4OCSPC	聚氨酯泡沫	1.262	86.6%	J. Mater. Chem. A, 2021, 9, 24452
	P(DPP)4	聚氨酯泡沫	1.304	90.6%	Dyes Pigments, 2021, 192, 109460
	TPA-BTDH	聚甲基丙烯 酸甲酯	1.6/2.4/2.8 (1/3/5 cm)	/	Adv. Mater., 2021, 33, 2102258
	DPP-2T	聚乙烯醇气 凝胶	2.6	89%	J. Mater. Chem. A, 2021,9, 2104-2110
	TPyP	聚氨酯泡沫	0.81	56%	RSC adv., 2022, 12, 28997
	TPA-TPA-O <sub>6</sub>	聚氨酯泡沫	1.293	89.41%	Angew. Chem. Int. Ed., 2022, 61, e202113653
	IDT-O <sub>4</sub>	聚氨酯泡沫	1.365	94.38%	Aggregate., 2023, e426.
	TPP-2IND	聚氨酯泡沫	1.04	65.8%	Aggregate., 2024, e535.
三维水 凝胶蒸 发器	PDA		3.07 (1 cm)	72.62%	
	PDI-DMP		3.12 (1 cm)	72.69%	
	PDI-DMA	聚乙烯醇水 凝胶	3.30 (1 cm)	79.53%.	Small, 2023, 19, 2305856
	PDI-DTMA		3.61/5.48/6.76/8.64/ 10.07 (1/2/3/4/5 cm)	85.73%/141.61%/ 173.01%/212.05%/ 239.66% (1/2/3/4/5 cm)	

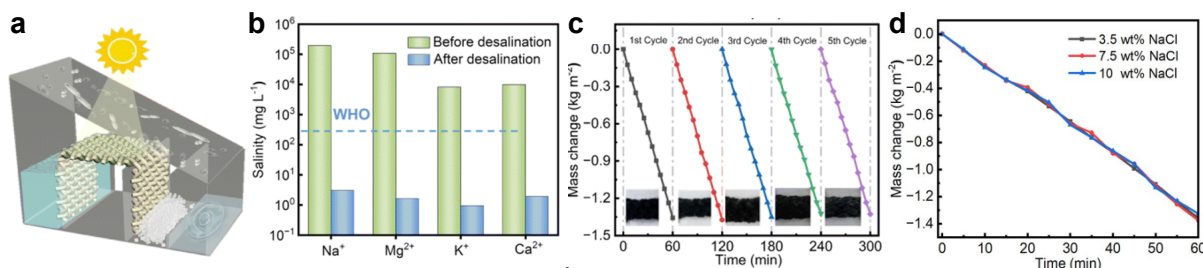
#### 4. 有机小分子基光热界面蒸发技术的应用

光热界面蒸发技术的首要目的是获取净水，在净水获取过程中，该技术能够将溶质和溶剂分开的特点能够实现海水淡化和污水处理。此外，基于光热转化所引发的剩余能量利用也开拓了水电联产的新方向。基于有机小分子的光热界面蒸发系统也不例外，在能源转化及环境治理等领域均有应用。下面对有机小分子光热材料在海水淡化、污水处理、水电联产等应用中的进展进行介绍。

##### 4.1. 海水淡化

海水淡化是光热界面蒸发最为重要的应用场景，有望通过淡化海水提供淡水资源，缓解当前的淡水资源短缺问题。为了评估实际的海水淡化效果，Qi 等人将光热分子负载在棉织物上搭建了图 5(a)所示装置进行海水淡化[28]。利用电感耦合等离子体质谱法测定了海水淡化前和海水淡化后 4 种初级离子 Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 K<sup>+</sup>的浓度。未经处理的海水中 Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 K<sup>+</sup>浓度分别为 1.94 × 10<sup>5</sup>、1.09 × 10<sup>5</sup>、8.18 × 10<sup>3</sup>、9.88 × 10<sup>3</sup> mg·L<sup>-1</sup>。脱盐后，Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 K<sup>+</sup>浓度分别降低至 3.01 mg·L<sup>-1</sup>、1.62 mg·L<sup>-1</sup>、

0.94 mg·L<sup>-1</sup> 和 1.84 mg·L<sup>-1</sup>, 符合世界卫生组织的饮用水标准(图 5(b))。优良的脱盐能力与器件结构的设计密切相关。棉纤维保证了盐水的快速供给传输, 随着蒸发器中盐溶液的不断蒸发和盐溶液的供应, 蒸发导致靠近水-空气界面的盐浓度升高, 并且从中心到边缘产生径向盐度梯度。最终, 在织物末端会出现盐积累现象, 可进一步收集和利用。该设计避免了在蒸发界面的盐析问题, 保证了在高浓盐水和长脱盐期下的蒸发性能。如图 5(c), 在 3.5% NaCl 溶液连续 5 次循环测试均呈现高效水蒸发, 光热层表面没有盐分积聚。并且, 蒸发器在 3.5%、7.5% 和 10% NaCl 溶液的蒸发速率仍保持在不低于 1.30 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>(图 5(d))。



**Figure 5.** (a) Schematic diagram of outdoor water evaporation, (b) Ion concentrations in seawater from the Yellow Sea of China before and after desalination, (c) Water mass change curves in 3.5% NaCl solution in five cycles and the digital photos of the evaporator surface after desalination, (d) Evaporation rate for different salt concentrations under 1 kW·m<sup>-2</sup> simulated sunlight irradiation [28]

**图 5.** (a) 可用于室外水蒸发的装置示意图, (b) 海水(中国黄海)淡化前后的离子浓度, (c) 3.5% NaCl 溶液在 5 次蒸发过程的水质量变化曲线及脱盐后蒸发器表面的照片, (d) 在 1 kW·m<sup>-2</sup> 模拟阳光照射下不同浓度盐溶液的蒸发速率[28]

## 4.2. 污水处理

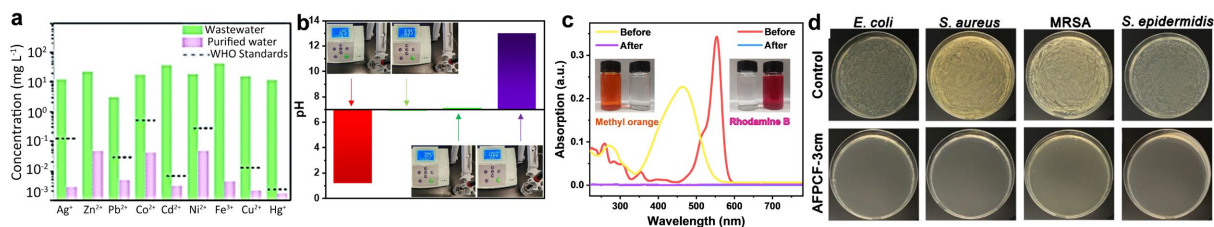
光热界面蒸发技术通过蒸发过程将水与溶质分开的特点可用于污水处理。相比传统的物理吸附、化学沉淀、离子交换、生物处理等污水处理技术, 该技术节能环保、成本低廉、不会引入新的污染物, 能够处理含重金属离子、酸碱、有机染料和细菌的废水。下面分别进行介绍:

重金属污染是严峻的环境问题。其中, 汞、锰、铅、铬和镉等重金属离子可通过水、食物等引起人类中毒。因此, 对含有重金属离子的污水进行处理非常必要。Zhao 等人将 DPP-2T 的光热材料嵌入 PVA 框架中以得到多孔光热气凝胶海绵[23]。还利用该海绵对含重金属离子的模拟废水进行处理。结果表明, 经过蒸发冷凝后的水中重金属离子(Ag<sup>+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Cu<sup>2+</sup>和 Hg<sup>+</sup>)含量显著降低, 离子去除率可达到 99%以上(图 6(a)), 远低于世界卫生组织规定的饮用水标准限值。因此, 光热界面蒸发技术能够实现有效的重金属离子分离。

酸碱废水具有较强的腐蚀性, 若不加治理直接排出, 会腐蚀管渠和构筑物; 排入水体, 会改变水体的 pH 值并影响水生动植物的生长。因此, 酸碱废水的治理也值得关注。若利用界面蒸发技术处理酸碱废水, 首先得保证蒸发器具有耐酸耐碱的特性, 能够在强酸、强碱等极端溶液中保持稳定。我们团队前期报道的花酰亚胺分子在多数有机、无机溶液中均不溶, 具有优秀的物理化学稳定性。因此, 将其与 PVA 复合的水凝胶蒸发器用于酸碱废水的处理[27]。结果发现, 对酸性和碱性水溶液处理后, 冷凝水中 H<sup>+</sup>和 OH<sup>-</sup>浓度急剧下降, 其 pH 值接近 7(图 6(b)), 由此可见该技术对酸碱废水处理同样具有可行性。

染料废水具有色度大、有机污染物含量高、生物毒性大以及难生化降解等特点, 其处理难度较大。界面蒸发技术同样可以实现对有机染料废水进行处理。经过处理后, 有色染料废水变为无色, 对有机染料废水和冷凝水进行吸收光谱测试, 可以发现冷凝水样中几乎观测不到有机染料的特征峰。例如, 我们利用复合水凝胶蒸发器对含有甲基橙、罗丹明 B 的废水进行, 结果发现处理后水溶液的吸收光谱中并没

有发现甲基橙( $\approx 465$  nm)和罗丹明 B ( $\sim 554$  nm)的特征吸收峰,证明了二者的含量非常低(图 6(c)) [27]。然而,当前的研究主要聚焦于冷凝水中的污染物的分离,实际上原水样中污染物依然存在,因此,未来更应发展光热转化和催化降解于一体的有机小分子,实现净水生产和污染物同步降解。



**Figure 6.** (a) Heavy metal ion removal before and after purification [23], (b) The pH changes of acidic and alkaline aqueous solutions before and after purification, (c) The UV-vis absorption spectra of wastewater containing organic dyes before and after purification [27], (d) Photographs of *E. coli*, *S. aureus*, MRSA, and *S. epidermidis* cultured on agar plate supplemented with or without TPA-BTDH based evaporator under simulated sunlight for 10 min [24]

**图 6.** (a) 净化前后重金属离子浓度变化[23], (b) 酸碱水净化前后 pH 值的变化, (c) 含有机染料废水净化前后的紫外-可见吸收光谱[27], (d) 在模拟阳光下照射有、无 TPA-BTDH 分子的蒸发器 10 min 后, 大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌和表皮葡萄球菌的照片[24]

在处理含菌废水时, 光热界面蒸发技术可以通过将水与细菌分离而实现净水的获取。大量实验结果已经证明, 从含菌废水中收集的冷凝水中几乎不含细菌[17][29]。尽管冷凝水中基本可保证不含细菌, 但细菌会附着在蒸发器上而大量增殖, 这将会阻塞传输通道、影响光吸收, 严重影响蒸发器的蒸发速率和使用寿命。因此, 在实现高效蒸发的同时也需考虑抗菌蒸发器设计。目前, 常规设计会在蒸发器中加入额外抑菌剂。显然, 探索具有光热转换和抗生物污损能力的双功能的材料来构筑蒸发器更具吸引力。有机小分子通过合理设计可同时提供高性能的光热转换和活性氧生产。例如, Li 等人设计的 TPA-BTDH 分子集光热转化和光动力杀菌功能于一体, 其分子具有丰富的分子旋转器、大扭曲角和非平面结构, 可能使其分子内运动受到部分限制, 潜在地允许光热转换和活性氧生成同时发生。基于此制备了三维蒸发器并进行了抗菌研究[24]。将大肠杆菌、表皮葡萄球菌、金黄色葡萄球菌和耐甲氧西林金黄色葡萄球菌 4 种典型细菌分别附着在蒸发器表面, 通过光照测试评估了蒸发器的抗生物污染效果。实验结果显示, 在光照 10 分钟后, 超过 99% 的细菌被杀死(图 6(d))。总之, 该分子在光激发下能够产生活性氧, 通过破坏细胞膜将细菌杀死, 抑制细菌在蒸发器上附着和增殖, 从而使蒸发器产生良好的抗微生物污染能力。

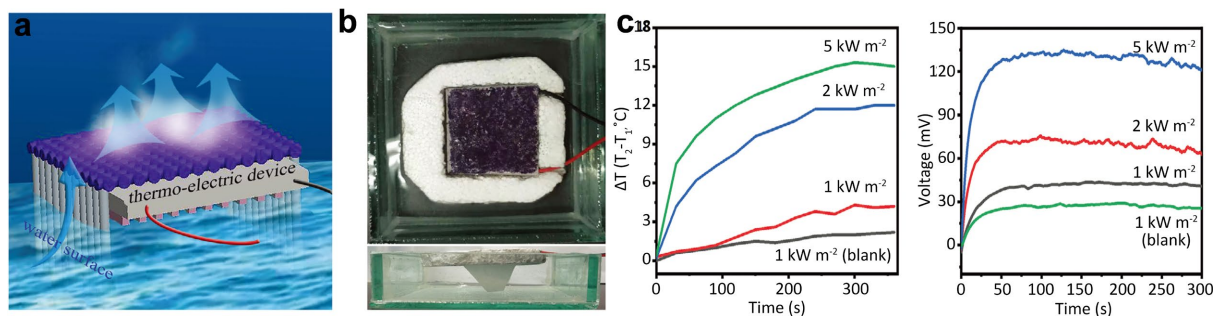
综上, 基于有机小分子的光热界面蒸发系统在各种复杂水样的实际处理中具有巨大应用潜力。但当前研究所测试的污水多为实验室配置模拟污水, 成分相对简单, 这也意味着基于有机小分子光热蒸发系统对真实污水的处理效果有待进一步考究。此外, 未来还需要加大对有机小分子多功能化探索, 实现光热蒸发、光催化降解、光动力杀菌等同步进行, 为水处理提供更强大的工具。

### 4.3. 水电联产

蒸发过程会诱导材料内部及周围环境产生温度、离子浓度、机械波动等变化, 为多种产电技术与光热界面蒸发结合提供了机会。目前研究最多的水电联产模式是界面蒸发协同温差发电。由于热量的局域化, 光热层和水体之间不可避免地形成温度梯度, 借助于塞贝克效应可实现温差产电。多数研究直接利用商业热电模块置于光热层和水体之间, 通过上下层的温差来诱导产生电能。

有机小分子光热基蒸发器也可以在水蒸发过程中收集余热发电。例如, Cui 等人利用具有 D-A 结构和共轭刚性平面骨架的 DDPA-PDN 分子进行了水电联产可行性验证[16]。如图 7(a)、图 7(b)所示, 负载有 DDPA-PDN 的纤维素纸覆盖在热电模块上, 未负载部分接触水体用于水分传输。从图 7(c)可以看出,

由于光热材料的存在,随着光强的增加,膜表面和水的温差越大,越有利于电能的产生。集成装置在  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  光照下开路电压为  $43 \text{ mV}$ ,在此过程中,蒸发速率为  $0.89 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。类似地,将 GTPA-BTO-Py<sup>+</sup> 光热材料负载在无织物上构建水电联产系统,在  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  光下开路电压为  $61 \text{ mV}$  [30]。上述结果表明,一体化光热蒸发与热电发电装置具有可行性,通过优化光热材料性能可同时提升产水和产电性能。



**Figure 7.** (a) Diagram of water-electricity cogeneration device, (b) The top view and side view of water-electricity cogeneration device. (c) Temperature difference between the surface of the DDPA-PDN cellulose paper as well as the water and the thermoelectric conversion capability under different light intensity [16]

**图 7.** (a) 水电联产装置示意图, (b) 水电联产装置俯视图和侧面图, (c) 在不同光强下, DDPA-PDN 纤维素膜和水的温差及装置产电性能[16]

总之,界面蒸发协同温差发电的水电联产系统易搭建,可行性高,具有户外应用的潜力。但该系统也面临一些问题,比如在确定材料体系下,蒸发性能和产电性能难以同步提升此外,基于有机小分子的水电联产系统在  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  光照下开路电压输出范围在  $40\sim 70 \text{ mV}$  之间[14][18][21][30]-[32],该能量输出还远不足以驱动用电器工作。因此未来还需要进一步对装置结构进行优化和多器件集成研究,以实现能够在实际生活中发挥作用。

#### 4.4. 总结与展望

综上所述,有机小分子材料具有可设计、易调控、结构明确等优势,在近几年逐渐被开发用于光热界面蒸发技术。在该技术中,有机小分子主要起到光热转化的作用,因此,研究人员提出通过拓展  $\pi$  共轭结构、增强分子内电荷转移、 $\pi$ - $\pi$  相互作用、引入分子内转动、稳定自由基等策略来拓展吸收光谱、增强非辐射跃迁能力,实现高效光热转化。基于有机小分子可构建膜基蒸发系统、泡沫基蒸发系统和水凝胶基蒸发系统,通过该系统可实现高效水蒸发,并在海水淡化、污水处理、水电联产等领域发挥作用。总之,有机小分子功能材料为光热界面蒸发技术提供了更多材料选择,光热界面蒸发技术也为有机小分子材料提供了可拓展的应用空间。

尽管如此,基于有机小分子光热材料的太阳能界面蒸发技术依然面临一些困难和挑战。首先,分子的吸收光谱有待进一步拓宽、非辐射跃迁能力有待进一步提高,这将继续优化分子结构设计,实现高效光热转化。其次,在当前蒸发系统中有机小分子主要发挥光热功能,多功能应用甚少展现。未来应加强具有光热、光催化、光动力等功能分子的设计,助力实现同步净水获取、污染物降解、杀菌效果。此外,蒸发器普遍缺乏精巧设计,当前设计极少将先进的水活化等理念引入,致使基于有机小分子光热材料的蒸发器性能普遍不高。最后,该领域存在的普遍性难题同样困扰有机小分子基蒸发器。例如海水淡化过程中存在盐沉积问题、实际运行过程中间歇性日照、外界环境变化引发的性能不稳定问题等。总之,未来还需进行多角度考量和优化,才能最终实现有机小分子基光热界面蒸发技术在实际应用中大放异彩。

## 基金项目

项目资助信息: 国家自然科学基金(22309105)、山东省自然科学基金(ZR2022QB227, ZR2022QB215)、山东省级大学生创新创业训练计划项目(S202310439154)、齐鲁工业大学(山东省科学院)人才科研项目(2023PX043, 2023RCKY102)。

## 参考文献

- [1] Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2016) Four Billion People Facing Severe Water Scarcity. *Science Advances*, **2**, e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- [2] Schiermeier, Q. (2013) Water Risk as World Warms. *Nature*, **505**, 10-11. <https://doi.org/10.1038/505010a>
- [3] Tao, P., Ni, G., Song, C., Shang, W., Wu, J., Zhu, J., *et al.* (2018) Solar-Driven Interfacial Evaporation. *Nature Energy*, **3**, 1031-1041. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0260-7>
- [4] Zhang, P., Wang, H., Wang, J., Ji, Z. and Qu, L. (2023) Boosting the Viable Water Harvesting in Solar Vapor Generation: From Interfacial Engineering to Devices Design. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2303976. <https://doi.org/10.1002/adma.202303976>
- [5] Zhou, L., Tan, Y., Ji, D., Zhu, B., Zhang, P., Xu, J., *et al.* (2016) Self-Assembly of Highly Efficient, Broadband Plasmonic Absorbers for Solar Steam Generation. *Science Advances*, **2**, e1501227. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501227>
- [6] Gao, C., Li, Y., Lan, L., Wang, Q., Zhou, B., Chen, Y., *et al.* (2023) Bioinspired Asymmetric Polypyrrole Membranes with Enhanced Photothermal Conversion for Highly Efficient Solar Evaporation. *Advanced Science*, **11**, Article ID: 2306833. <https://doi.org/10.1002/advs.202306833>
- [7] Shao, C., Zhao, Y. and Qu, L. (2020) Tunable Graphene Systems for Water Desalination. *ChemNanoMat*, **6**, 1028-1048. <https://doi.org/10.1002/cnma.202000041>
- [8] Zhao, Z., Chen, C., Wu, W., Wang, F., Du, L., Zhang, X., *et al.* (2019) Highly Efficient Photothermal Nanoagent Achieved by Harvesting Energy via Excited-State Intramolecular Motion within Nanoparticles. *Nature Communications*, **10**, Article No. 768. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08722-z>
- [9] Ge, J., Hong, L., Ma, H., Ye, Q., Chen, Y., Xie, L., *et al.* (2022) Asymmetric Substitution of End-Groups Triggers 16.34% Efficiency for All-Small-Molecule Organic Solar Cells. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2202752. <https://doi.org/10.1002/adma.202202752>
- [10] Guo, B., Li, M., Hao, G., Wei, L., Sa, H., Chen, J., *et al.* (2024) A Ratiometric Fluorescent Probe for Imaging the Fluctuation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> during Endoplasmic Reticulum Stress. *Journal of Materials Chemistry B*, **12**, 1001-1006. <https://doi.org/10.1039/d3tb02679e>
- [11] Chen, G., Sun, J., Peng, Q., Sun, Q., Wang, G., Cai, Y., *et al.* (2020) Biradical-Featured Stable Organic-Small-Molecule Photothermal Materials for Highly Efficient Solar-Driven Water Evaporation. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 1908537. <https://doi.org/10.1002/adma.201908537>
- [12] Weng, X. and Liu, J. (2021) Strategies for Maximizing Photothermal Conversion Efficiency Based on Organic Dyes. *Drug Discovery Today*, **26**, 2045-2052. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.03.009>
- [13] Zhang, Y., Yan, H., Wang, X., Zhang, Z., Liu, F., Tu, S., *et al.* (2022) Highly Efficient Solar-Absorber Composite Material Based on Tetrapyrrolylporphyrin for Water Evaporation and Thermoelectric Power Generation. *RSC Advances*, **12**, 28997-29002. <https://doi.org/10.1039/d2ra03512j>
- [14] Han, X., Wang, Z., Shen, M., Liu, J., Lei, Y., Li, Z., *et al.* (2021) A Highly Efficient Organic Solar Energy-Absorbing Material Based on Phthalocyanine Derivative for Integrated Water Evaporation and Thermoelectric Power Generation Application. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 24452-24459. <https://doi.org/10.1039/d1ta07519e>
- [15] Li, J., Wang, L., Zhang, C., Wang, H., Pan, Y., Li, S., *et al.* (2024) Manipulation of the Self-Assembly Morphology by Side-Chain Engineering of Quinoxaline-Substituted Organic Photothermal Molecules for Highly Efficient Solar-Thermal Conversion and Applications. *Angewandte Chemie International Edition*, **63**, e202402726. <https://doi.org/10.1002/anie.202402726>
- [16] Cui, Y., Liu, J., Li, Z., Ji, M., Zhao, M., Shen, M., *et al.* (2021) Donor-Acceptor-Type Organic-Small-Molecule-Based Solar-Energy-Absorbing Material for Highly Efficient Water Evaporation and Thermoelectric Power Generation. *Advanced Functional Materials*, **31**, Article ID: 2106247. <https://doi.org/10.1002/adfm.202106247>
- [17] Prakoso, S.P., Sun, S., Saleh, R., Tao, Y. and Wang, C. (2021) Tailoring Photophysical Properties of Diketopyrrolopyrrole Small Molecules with Electron-Withdrawing Moieties for Efficient Solar Steam Generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 38365-38374. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c10665>
- [18] Liu, J., Cui, Y., Pan, Y., Chen, Z., Jia, T., Li, C., *et al.* (2022) Donor-Acceptor Molecule Based High-Performance

- Photothermal Organic Material for Efficient Water Purification and Electricity Generation. *Angewandte Chemie International Edition*, **61**, e202117087. <https://doi.org/10.1002/anie.202117087>
- [19] Huang, J., Wang, Z., Zhu, W. and Li, Y. (2023) Solution-Processed D-A- $\pi$ -A-D Radicals for Highly Efficient Photothermal Conversion. *Aggregate*, **5**, e426. <https://doi.org/10.1002/agt2.426>
- [20] Wang, Z., Zhou, J., Zhang, Y., Zhu, W. and Li, Y. (2022) Accessing Highly Efficient Photothermal Conversion with Stable Open-Shell Aromatic Nitric Acid Radicals. *Angewandte Chemie International Edition*, **61**, e202113653. <https://doi.org/10.1002/anie.202113653>
- [21] Zhu, J., Wang, X., Liang, J., Qiu, X., Chen, S., Wang, Y., *et al.* (2023) Broadband Solar-Driven Water Evaporator Based on Organic Hybrid Bandgap and Bio-Mimetic Interfaces. *EcoMat*, **5**, e12323. <https://doi.org/10.1002/eom2.12323>
- [22] Li, H., Wen, H., Zhang, Z., Song, N., Kwok, R.T.K., Lam, J.W.Y., *et al.* (2020) Reverse Thinking of the Aggregation-Induced Emission Principle: Amplifying Molecular Motions to Boost Photothermal Efficiency of Nanofibers. *Angewandte Chemie International Edition*, **59**, 20371-20375. <https://doi.org/10.1002/anie.202008292>
- [23] Zhao, Q., Huang, Z., Wan, Y., Tan, J., Cao, C., Li, S., *et al.* (2021) Multifunctional Oligomer Sponge for Efficient Solar Water Purification and Oil Cleanup. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 2104-2110. <https://doi.org/10.1039/d0ta10798k>
- [24] Li, H., Zhu, W., Li, M., Li, Y., Kwok, R.T.K., Lam, J.W.Y., *et al.* (2021) Side Area-Assisted 3D Evaporator with Antibiofouling Function for Ultra-Efficient Solar Steam Generation. *Advanced Materials*, **33**, Article ID: 2102258. <https://doi.org/10.1002/adma.202102258>
- [25] Zhao, F., Zhou, X., Shi, Y., Qian, X., Alexander, M., Zhao, X., *et al.* (2018) Highly Efficient Solar Vapour Generation via Hierarchically Nanostructured Gels. *Nature Nanotechnology*, **13**, 489-495. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0097-z>
- [26] Zhou, X., Guo, Y., Zhao, F. and Yu, G. (2019) Hydrogels as an Emerging Material Platform for Solar Water Purification. *Accounts of Chemical Research*, **52**, 3244-3253. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00455>
- [27] Shao, C., Guo, B., Lu, B., Yu, J., Kong, H., Wang, B., *et al.* (2023) PDI-Based Organic Small Molecule Regulated by Inter/Intramolecular Interactions for Efficient Solar Vapor Generation. *Small*, **19**, Article ID: 202305856. <https://doi.org/10.1002/sml.202305856>
- [28] Qi, S., Yuan, L., Ao, S., Wang, L., Jia, T. and Dou, C. (2024) A Salt-Resistant Solar Evaporator with Organic Diradicals as Photothermal Materials for Efficient and Persistent Desalination. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 6663-6670. <https://doi.org/10.1039/d3ta08075g>
- [29] Li, H., Li, H., Zou, L., Li, Q., Chen, P., Quan, X., *et al.* (2023) Vertically  $\Pi$ -Extended Strong Acceptor Unit Boosting Near-Infrared Photothermal Conversion of Conjugated Polymers toward Highly Efficient Solar-Driven Water Evaporation. *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, 2933-2946. <https://doi.org/10.1039/d2ta07628d>
- [30] Dai, J., Qi, S., Zhao, M., Liu, J., Jia, T., Liu, G., *et al.* (2023) Donor-acceptor Molecule with TICT Character: A New Design Strategy for Organic Photothermal Material in Solar Energy. *Chemical Engineering Journal*, **471**, Article ID: 144745. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144745>
- [31] Shen, M., Zhao, X., Han, L., Jin, N., Liu, S., Jia, T., *et al.* (2022) Developing Flexible Quinacridone-Derivatives-Based Photothermal Evaporators for Solar Steam and Thermoelectric Power Generation. *Chemistry—A European Journal*, **28**, e202104137. <https://doi.org/10.1002/chem.202104137>
- [32] Zhao, M., Zhu, Y., Pan, Y., Wang, Y., Xu, T., Zhao, X., *et al.* (2022) High-Performance Organic Photothermal Material Based on Fusion of the Donor-Acceptor Structure for Water Evaporation and Thermoelectric Power Generation. *ACS Applied Energy Materials*, **5**, 15758-15767. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c03332>