

精细化工[®]

FINE CHEMICALS

- ✔ 入选中国科技期刊卓越行动计划
- ✔ EI、CSCD、中文核心、北大核心等权威数据库收录
- ✔ 国内精细化工行业创刊最早的权威期刊
- ✔ 中国化工学会精细化工专业委员会会刊

知网首发

稿件一经录用，中国知网可查询，并由编辑部与知网共同出具网络首发证书。

报道范围

涵盖当代中国精细化工科学与工业的众多新兴领域。如：功能材料、能源化工、生物工程、中药现代化技术、环境保护、食品化学品、油田化学品、表面活性剂、医药与日化原料等。



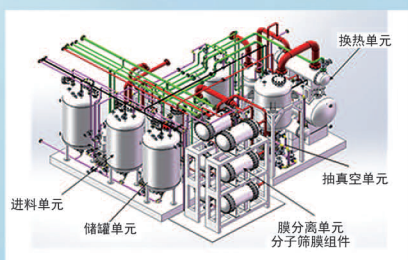
扫描二维码关注我们

《精细化工[®]》编辑部



浙江汇甬新材料有限公司

微波合成第二代脱水膜

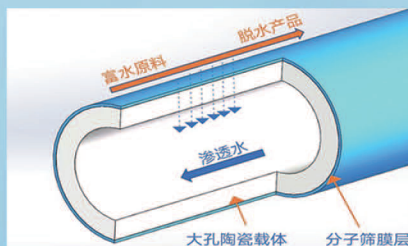


国家自然科学基金二等奖 成果转化

I ChemE全球 创新产品冠军

微波分子筛膜 脱水性能遥遥领先

共沸体系、热敏体系、含水有机物脱水精制换代技术



收率高、能耗低、连续脱水、无需再生

在如下领域的有机物脱水精制已有工业化应用

锂电池电解液溶剂及NMP生产、回收

BDO产业链、煤化工、石油化工精细化学品

制药行业、溶媒回收、燃料乙醇、超纯溶剂

广泛适用于醇类、醚类、酯类、酮类、苯系物、卤代烃的脱水精制



固定电话：0574-87648996

电话：13396592011

网址：www.hymater.com

地址：浙江省宁波市江北高新园区庆丰路联东U谷国际港56号楼

仿生太阳能驱动界面蒸发器的进展与挑战

李吉焱, 刘美辰, 罗雯雯, 邢郭宇, 孙寒雪

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 太阳能驱动界面蒸发 (SDIE) 作为一种高效、可持续的水资源获取方法, 近年来受到了广泛的关注。基于仿生原理设计的太阳能驱动界面蒸发器在提高能源转换效率、降低盐结晶和抗污染等方面展现了巨大的潜力, 在解决淡水资源紧缺和能源短缺等问题上发挥重要作用。该文梳理了近年来的仿生学在 SDIE 领域的应用, 对比了仿生太阳能驱动界面蒸发器的结构、性能和仿生机理, 探讨了不同类型仿生太阳能驱动界面蒸发器的优缺点, 分析了仿生太阳能驱动界面蒸发器所面临的共性问题, 并提出了未来的研究挑战。

关键词: 仿生设计; 光热材料; 太阳能驱动界面蒸发; 蒸发器; 水处理

中图分类号: TK519 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2024) 04-0740-10

Progress and challenges of biomimetic solar-driven interfacial evaporation

LI Jiyan, LIU Meichen, LUO Wenwen, XING Guoyu, SUN Hanxue

(School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Solar-driven interfacial evaporation (SDIE), as an efficient and sustainable method for water resource acquisition, has attracted widespread attention in recent years. Biomimetic solar-driven interfacial evaporator has shown great potential in energy conversion efficiency improvement, salt crystallization reduction, and pollution resistance, which plays an important role in solving problems such as fresh water resources and energy shortages. Herein, the application of bionics in the field of SDIE in recent years was firstly reviewed. The structure, performance, and biomimetic mechanism of biomimetic solar-driven interfacial evaporator were then compared, and the advantages and disadvantages of different type evaporators were discussed. Finally, the common problems faced by biomimetic solar-driven interfacial evaporators were analyzed, and the future research challenges were proposed.

Key words: bio-inspired design; photothermal materials; solar-driven interfacial evaporation; evaporator; water treatment

近几十年来, 清洁水资源的逐渐减少对全球 80 亿多人的生活构成了严重威胁。在化石燃料资源枯竭的背景下, 寻求绿色、环保、可持续的淡水生产方式已成为一个热门话题。未经妥善处置的工业废水向湖泊、河流以及海洋等水体释放越来越多的有毒污染物, 加剧了清洁水短缺的问题。传统的水处理方法, 如反渗透和多级闪蒸等, 既复杂又存在耗能高的缺点, 最关键的是, 在这些水处理过程中释放的副产物可能会造成二次污染。太阳能驱动界面

蒸发 (SDIE) 是将太阳能集中在“空气-水”界面进行高效产气和脱盐的过程, 具有光热转换效率高、产水能力稳定、耐盐等优点。一些 SDIE 设备在水处理、蒸汽灭菌、稀缺资源富集和联产发电等领域取得了技术突破, 已成为解决世界缺水问题的最有效方法之一^[1-2]。

光热材料 (PMs) 是 SDIE 中最关键的部件之一。PMs 的选择和结构设计对仿生蒸发器的整体性能有较大影响。目前, PMs 可分为碳基材料^[3]、生物质

收稿日期: 2023-05-30; 定用日期: 2023-07-11; DOI: 10.13550/j.jxhg.20230432

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52066012、21975113); 甘肃省科技计划项目 (22CX8GA121); 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划项目

作者简介: 李吉焱 (1986—), 女, 副教授, E-mail: lijian@lut.edu.cn.

材料^[4]、聚合物材料^[5]、金属半导体材料^[6]等。碳基材料在宽波长范围内表现出良好的光吸收, 但碳基材料的制备需要高能耗; 生物质材料来源广泛, 价格低廉, 但易降解和腐败的特性对其在长期使用中是一大考验; 聚合物材料的制备方法和孔径可以根据需求进行调整, 但这类材料的制备过程较为繁琐; 金属半导体材料具有良好的导热性和优异的光热转换性能, 但同时其成本高、易氧化等缺点也不容忽视。在自然界中, 经过数十亿年的发展, 许多生物具有复杂而微妙的结构, 这些结构逐渐进化, 以适应不同的环境。一些生物体的外在结构发生了部分进化, 可以帮助它们收集和储存清洁的水或食物, 维持身体平衡, 以满足自身的生存需求。部分生物体的内在功能有所改善, 旨在保持良好的代谢活性。通过研究并模仿生物体的特殊结构来优化 PMs 的设计, 是仿生类蒸发器的首要目标。基于前人的研究基础, 课题组在不同种类的光热材料上进行了不同程度的探索。以多种废弃生物质为原料, 对其表面进行碳化、接枝改性以及深加工, 制备出具有高吸光度, 定向垂直孔道的气凝胶等不同种类的蒸发器, 用于高效的太阳能驱动界面蒸发^[7-9]。

受自然界部分生物体的启发, 研究人员将这些灵感与 SDIE 进行合理结合, 以改变材料的设计思路, 在光热转换层、水传输通道和蒸发器结构方面进行改进, 大大地提高了蒸发器的性能^[10-11]。目前, 从仿生学角度设计的大多数蒸发器都使用碳基材料(如石墨烯、碳纳米管等)和聚合物材料^[12-13]。所设计的蒸发器具有高宽带光谱吸收和高孔隙率的特点。应用于 SDIE 的仿生学蒸发器主要通过 2 种仿生原理使其性能得到优化: (1) 模仿生物体的结构; (2) 模仿生物体某些特殊功能。为了满足实际水处理的不同需求, 研究人员将仿生蒸发器设计成气凝胶、3D Janus 等结构^[14-15]。这些类型的仿生蒸发器在处理含有特殊物质(如含油废水)的污水时具有更好的净化效果。

本文基于不同的仿生学机理, 讨论仿生太阳能驱动界面蒸发的性能及其在实际水处理中的应用效果, 为 SDIE 实现高效水处理提供了理论指导和技术支持。

1 基于结构的仿生太阳能驱动界面蒸发器的设计

1.1 仿生花朵结构

自然界中盛开的花朵也是一种理想的仿生太阳能驱动界面蒸发器结构, 利用其大的比表面积来吸收自然光, 花径来提供水分, 且花瓣状结构中的强耦合效应有助于拓宽吸收光谱。MOHANTY 等^[16]研究表明, 与其他 3D 结构, 如三角锥, 圆锥结构等相比, 三维花朵结构的花瓣层层堆叠, 能够增加有效蒸发面积, 且内部光反射的增加可以提高光吸收, 加速蒸发过程。

LI 等^[12]用纸折叠和聚吡咯 (PPy) 化学聚合方法制备了一种 PPy 黑玫瑰, 与二维平面结构相比, 三维折纸玫瑰的比表面积提高了 10 倍, 比表面积的增加改善了蒸汽耗散的途径, 导致室温下的暗蒸发率更高, 且被蒸发的水量有所增加, 从而导致较低的表面温度, 这种降低的表面温度有利于节省辐射能量损失, 进一步提高了 PPy 黑玫瑰的能量转换效率, 该仿生太阳能驱动界面蒸发器可达到的最大蒸发速率为 $2.12 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (图 1a)。LIU 等^[17]成功制备了一种花状仿生蒸发器 (BFHEC-5), 将黑色空心海藻酸钠水凝胶管束垂直固定, 形成顶部有支链水凝胶管的花状结构。其中, 水凝胶管的长度与装置的蒸发速率呈正相关, 这是由于管径的增加会扩大光接收和三维水蒸发面积, 蒸发速率达到了 $3.2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 当 BFHEC-5 在海水中蒸发时, 中空水凝胶结构具有双倍的给水能力, 同时, 该蒸发器可以有效抑制太阳能海水脱盐过程中产生的盐结晶问题 (图 1b)。KIM 等^[18]根据生活在热带雨林中的泰坦魔芋花在花期会释放一种腐肉气味, 用来吸引苍蝇授粉的现象, 即诱导对流现象, 设计了含碳涂层聚乙烯醇 (PVA) 泡沫的 3D 对流花蒸发器 (图 1c), 其具有一个中心热点, 当太阳光照亮三维蒸发器系统时, 蒸发器中央太阳吸收区的温度超过了周围蒸发区的温度, 在太阳光谱 (300~2500 nm) 范围内具有 97.2% 高光吸收率, 同时, 温差产生了上升气流, 可以有效地去除三维蒸发器系统中的高密度蒸汽, 增加蒸发速率。

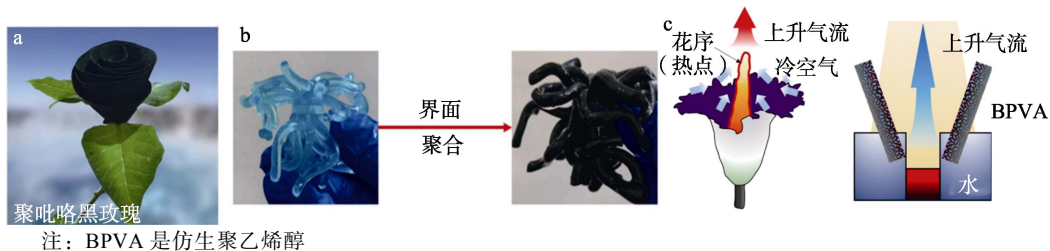


图 1 聚吡咯黑玫瑰宏观形态 (a)^[12]、花状海藻酸钠水凝胶的制备 (b)^[17]和 3D 对流花蒸发器 (c)^[18]示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of macroscopic morphology of polypyrrole black rose (a)^[12], flower-like sodium alginate hydrogel preparation (b)^[17] and 3D convective flower evaporator (c)^[18]

1.2 仿生维管束垂直孔道结构

分层有序结构是 SDIE 中的关键因素之一,其有助于水快速地泵送到 PMs 表面,如植物底部的维管组织和植物上表面的叶气孔。受植物内部孔道结构及输水机理的启发,一些具有天然垂直通道和孔隙的碳化植物(如蘑菇和甘蔗)被用于 SDIE^[19-20]。水分通过毛细力被定向传输,随后蒸汽可以在低阻力下向上移动,释放在周围空气中并有效促进蒸发速率。

WANG 等^[21]受自然蒸腾现象和人工折纸结构的启发,使用 3D 打印及冷冻干燥技术开发了一种基于氧化石墨烯的三维仿生太阳能驱动界面蒸发器(3D GOSG),吸光表面采用几何波纹结构,以扩大对阳光的有效吸收和水分蒸发(图 2a),在蒸发器底部成功构建了孔径为 200~300 μm 的垂直管状结构用于向光热表面输送水分,3D GOSG 具有结构坚固,循环稳定好,蒸汽产生能力优越[10.91 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]等特点。YU 等^[22]通过学习树木内部水传输机理,

采用定向冷冻技术制备了一种受树木启发的水凝胶(TIH),其垂直排列的通道结合 MXene(二维材料)作为光吸收器,可以实现水的快速转移和蒸汽的高效释放,聚合物与水相互作用可以改变分子网格中的水态,并可以激活部分水来促进蒸发过程(图 2b),TIH 在 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ 强度的光照下的蒸发速率为 $2.71 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,能量效率高达 90.7%。ZHAO 等^[23]受植物垂直孔道结构的启发,将碳纤维固定在穿孔木材中,形成间距均匀的阵列型碳纤维束,入射光可以进行多次散射和反射,延长光路,最大限度地吸收光,从而增强覆盖宽波谱的光吸收。底部的水体将通过碳纤维之间的微通道引起的毛细力泵入,确保了蒸发过程中水分子的连续输送,木材的浮力使整个蒸发器保持漂浮(图 2c)。调整循环流化床的细度和高度可以控制蒸汽的产生速率,优化后的植物启发装置的蒸发速率能够稳定在 $1.70 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,并能有效避免长期模拟海水蒸发的盐结晶聚集问题。

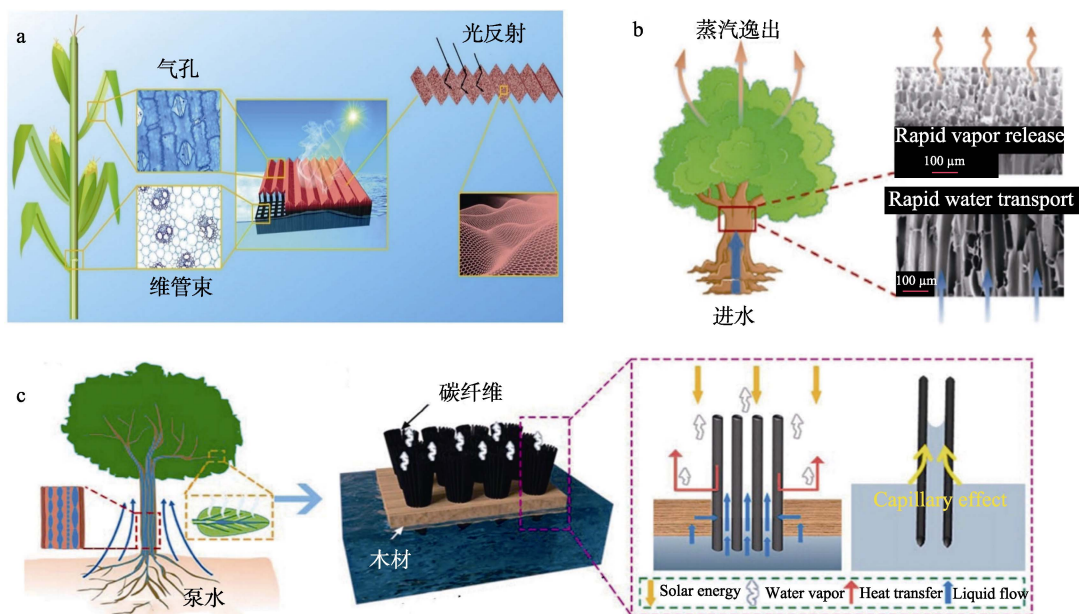


图 2 3D GOSG 制备 (a)^[21]、树木垂直孔道启发水凝胶 (b)^[22] 和碳纤维阵列蒸发器原理 (c)^[23] 示意图
 Fig. 2 Schematic diagrams of 3D GOSG preparation (a)^[21], hydrogel inspired by vertical channels of tree (b)^[22] and fiber array evaporator principle (c)^[23]

1.3 仿生叶片式结构

根据之前的研究,不同的器件结构对蒸发性能有很大的影响。近年来,研究人员研究了不同的维度(0D、1D、2D 或 3D),以更好地调节水分蒸发、太阳能转换和热量调节之间的关系,自然界中的水生植物,如睡莲、浮萍、荷叶、莲花等具有迷人的结构,通常是 Janus 结构,大孔的亲水底层有助于促进水的传输,而疏水的中孔上层则加速了太阳能/污染物的吸收并抑制了热损失,且这些水生植物可

以自漂浮在水面,这种分级孔隙的组合有利于提高太阳能驱动的水传输速率和蒸发性能^[20]。

LIN 等^[24]受到亚马逊睡莲的启发,制备了一种界面疏水三维结构太阳能蒸发器(IWIS),以实现疏水层的连续供水和三维热分布管理。与之前的大多数研究不同,水会被困在顶部疏水性太阳能吸收器和底部隔热层之间,类似一个三明治模型(图 3a)。纳米尺度的太阳吸收主要发生在捕水层上,这最大限度地减少了热传导和光吸收的损失。经过对酸、

碱、盐水和洗涤剂溶液的蒸发性能测试, 该装置显示出稳定的蒸发性能, 也可以在腐蚀等极端条件下使用, 显示出良好的重复性和耐用性。当红树林叶片经历蒸腾作用时, 红树林利用毛细管力产生的高压来输送盐水。在木质部超快液体泵送特性的驱动下, 来自红树林根的盐离子迁移到叶片的细胞基质中, 并通过盐腺的胞吐作用优先在叶片表面结晶, 以控制内部离子浓度平衡。受天然红树林叶片盐分泌机制的启发, CHEN 等^[25]设计了一种由木壳和光热水凝胶组成的仿生盐分泌蒸发器 (BSSE), 在盐水蒸发过程中利用马兰戈尼对流效应诱导蒸汽生成界面外的盐结晶, BSSE 可以有效地从盐化土壤中提取盐, 并持续降低其内部盐度 (图 3b)。苏铁的小孢子叶能够形成圆锥形的种球, 受这种圆锥形光吸收结构的启发, ZHAO 等^[26]通过将 PPy 纳米带加载在 PVA 水凝胶上, 构建了一种新型的 Janus 太阳能蒸发器 (图 3c)。PPy 纳米带具有 98.3% 的高太阳

光吸收率, 当 PVA 水凝胶与水隔绝时, 局部太阳能光热转换效率为 82.5%。多孔 PVA 水凝胶和亲水 PPy 纳米片协同作用驱动高效的水传输。Janus 结构的 PPy 纳米带@PVA 水凝胶蒸发器在模拟海水和模拟污水中表现出优异的抗盐脱盐和污染物净化的性能。WANG 等^[27]受户外阳光下干燥衣服和松针状结构的启发, 制备了一种仿生铜基金属-有机框架 [Cu-Cu(OH)₂-MOF] 泡沫, 这种泡沫具有相互连接的孔隙和由 Cu(OH)₂ 纳米线和 MOF 纳米须组成的松针状层次结构 (图 3d)。Cu-Cu(OH)₂-MOF 泡沫的松木针状层次结构分别通过捕获入射光和增强毛细管力, 从而吸收太阳能和提供足够的水分, 该双面蒸发器达到了 3.27 kg/(m²·h) 的高蒸发速率, 在 1 kW/m² 强度的光照下, 分别是纯水和单面蒸发器的 9.62 倍和 2.80 倍。此外, 当双面蒸发器与 5.8 m/s 的气流结合时, 双面蒸发器实现超高蒸发率达 11.58 kg/(m²·h), 效率为 160.07%。

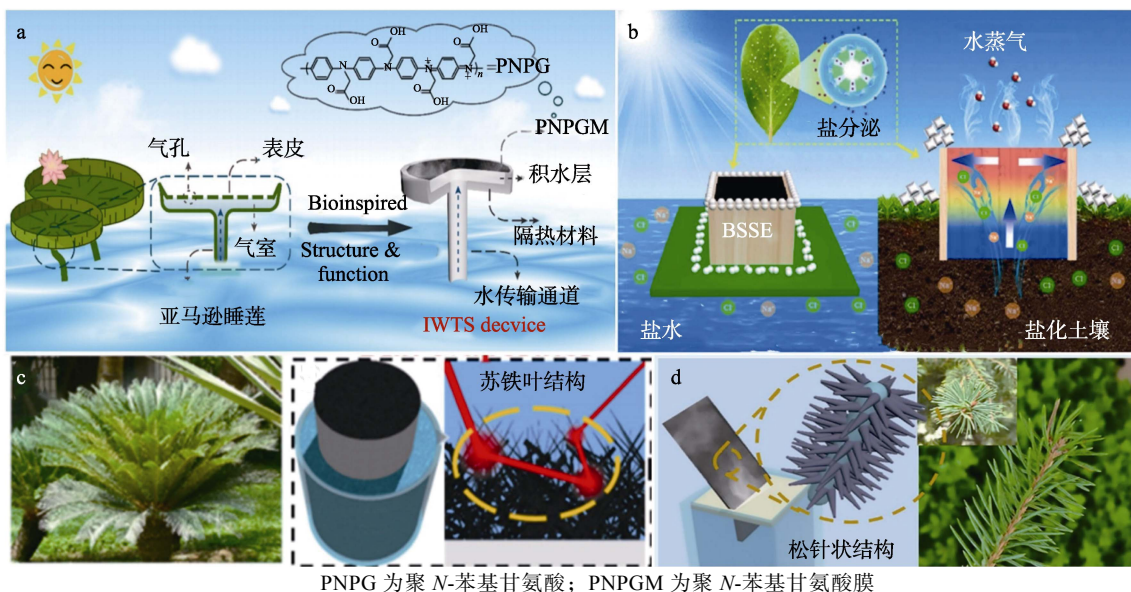


图 3 亚马逊睡莲启发蒸发器的结构 (a)^[24]、仿生盐分泌蒸发器 (b)^[25]、Janus PPy 纳米带@PVA 水凝胶蒸发器 (c)^[26] 和仿松针状结构蒸发器 (d)^[27] 示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of Amazon water lily inspired evaporator (a)^[24], biomimetic salt secretion evaporator (b)^[25], Janus PPy nanobelts@PVA hydrogel evaporator (c)^[26] and pine needle-like evaporator (d)^[27]

1.4 仿生动物结构

与植物相比, 动物的进化更为复杂, 这是由于动物的生理活动更多, 他们需要躲避天敌的捕食, 也要主动寻找食物来维系生命, 尤其是对于生活在极端环境条件的动物们, 如何去更好适应环境是首要问题, 在选择性进化的过程中, 研究人员敏锐察觉到动物的某些特征并与 SDIE 相结合, 制备出性能更加优良的 PMs^[28]。

XIAO 等^[28]受超黑深海鱼皮可以显著降低光反射的启发, 通过反聚合方法设计了由聚吡咯和全氟

二烷基三乙氧基硅烷 (PFTS) 组成的黑色纳米球层纺织品 (图 4a), 所制备的纺织品的反射率明显低于 4%, 吸收率高达 96%, 具有良好的超疏水性和高效的热电转化率。该超疏水光热纺织品不仅可以作为一种非接触式太阳能蒸发器, 用于高效的海水蒸发, 还可以进一步将该技术应用到可穿戴太阳能热救援背心等领域, 以实现水下救援和可持续的太阳能热供应。

蝴蝶前翅在紫外线、可见光和近红外 (NIR) 范围内表现出较高的光捕获和较低的光反射特性。巴黎凤蝶前翅的黑色来源于它们的光子结构, 除了

黑色素效应外,还包括周期性的倒 V 形脊和纳米孔阵列。具有倾斜侧壁的倒 V 形脊将光传输到纳米孔阵列区域,纳米孔阵列充当屏障和吸收器。SONG 等^[29]选择了具有倒 V 形周期性脊和无序纳米孔阵列的光子结构的黑色 *P.Paris* (巴黎凤蝶) 前翅作为模板,并使用金纳米球和纳米星作为构建块,组装了两种独特的超结构 [纳米星组件 (NSAs) 和纳米球组件 (NSPAs)]。由于纳米颗粒在 3D 纳米孔结构中的多次散射,制备的 NSPA 和 NSAs 在 200~2500 nm 波长下均表现出较强的吸收能力。此外,纳米孔还有助于水分子的快速传输,在太阳能驱动界面蒸发中,NSAs 的水蒸发效率达到 83.3%。SUN 等^[30]发现,重叠、细长的亮绿色鳞片覆盖在蝴蝶翅膀上,并以屋瓦状排列在鳞片的上表面,有许多矩形的“窗口”,以保持框架的稳定(图 4b)。受此启发,他们首次将 Au-CuS 旋体结构材料均匀地装饰在蝴蝶翅膀上的旋体光子晶体的螺旋网络上,这种以 3D 互联螺旋作为支撑骨架和具有金属-半导体协同效应的蒸发器能够防止光反射,在 1 kW/m² 强度的光照下蒸发效率达 88.8%。

西非加蓬蝰蛇是一种变温动物,其背侧鳞片上

有黑斑,具有几何图案的表面纹理。SPINNER 等^[31]的相关研究表明,与黑色颜色分布相吻合的独特的层次微观结构可以阻碍光的反射,提高对阳光的吸收。LI 等^[32]模拟了西非加蓬蝰蛇黑色鳞片的层次纹理,并通过顺序热驱动构建了仿生纳米涂层,将平面 MXene 纳米涂层变形为各向同性的皱褶结构,模仿蝰蛇黑色鳞片的微峰结构(图 4c)。与平面 MXene 样品相比,入射光在仿生的 MXene 纳米涂层中被强烈散射和多次反射,导致宽带光吸收(84.9%~86.9%);此外,机械变形的 MXene 结构可以制造可穿戴和可伸缩的加热器,这些加热器由阳光和电力混合,仅在 4 V 和 1 kW/m² 强度的光照下就可以加热到 100 °C 以上。同样地,受西非加蓬蝰蛇鳞片的启发,LIU 等^[33]用氧化锌催化聚碳酸酯(PC)碳化得到的仿生蛇片状多孔碳(BSPC)开发了一种高效的阳光吸收和水蒸发系统。氧化锌催化 PC 的脱羧化形成大量的微孔,并作为多孔源引入了大量的介孔和大孔(图 4d)。由于三维相互连接的分层纳米孔和富含氧官能团,所制备的 BSPC 具有较高的太阳光吸收能力(95%)、低导热率[0.086 W/(m·K)]、超亲水性和超润湿性。

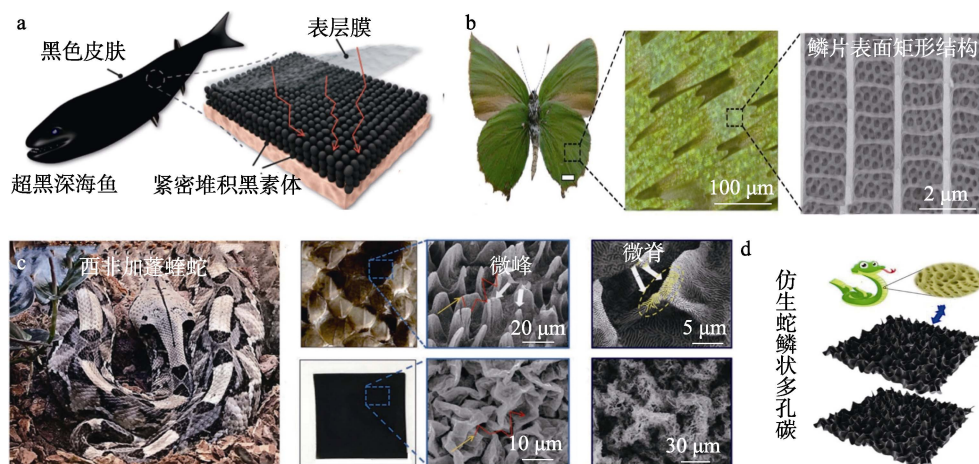


图 4 仿超黑深海鱼皮的纺织膜(a)^[28]、蝴蝶翅膀微观结构(b)^[30]、仿蛇微脊蒸发器(c)^[32]和仿生蛇鳞状多孔碳(d)^[33]示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of textile film imitating super black fish skin (a)^[28], microscopic structure of butterfly wings (b)^[30], snake-like micro ridge evaporator (c)^[32], and biomimetic snake-scale-like porous carbon (d)^[33]

2 基于功能的仿生太阳能驱动界面蒸发器的设计

2.1 仿植物蒸腾作用

在自然界中,蒸腾作用是树木承担的主要生命过程之一,这一过程已被广泛研究。在阳光照射下,叶子吸收阳光并将其转化为热量,热量积聚在叶面,帮助液态水蒸发并从叶面的气孔逸散到周围环境。同时,树木的根部从周围土壤中吸收水分,并在顶部和底部之间的负压下通过木材垂直孔道的毛细力将其输送到叶片中。蒸腾作用的实现取决于两个部

分: 太阳能转换部分和水传输过程^[34]。

CAO 等^[15]受树木蒸腾作用的启发,制备了锥形 3D Janus 蒸发器,该蒸发器通过 3D 打印制造,使用疏水聚合物作为具有波形和多孔表面纹理的光吸收表面,提供了显著的太阳能收集和快速的热响应。由于材料亲水性引起的毛细管作用和水重力的协同作用,整个蒸发表面具有自下而上的厚度不均匀性和温度梯度,可以通过马兰戈尼效应充分利用太阳能,并导致盐仅在亲水/疏水界面处的边缘优先结晶(图 5a)。在模拟海水中,表现出 1.713 kg/(m²·h) 的稳定蒸发率。LI 等^[35]将进一步化学合成和传统编织

工艺相结合, 设计了聚多巴胺-聚吡咯改性纳米纤维材料。其中, 编织层模仿树干来收集水, 浮动层纱线之间具有宏观交错的孔隙结构, 模拟叶片蒸发水分。在 1 kW/m^2 强度的光照下, 该材料的能量转换效率高达 87.4% (图 5b)。

2.2 仿人体皮肤汗液蒸发作用

出汗是在炎热的环境中和在运动中的一个自然过程。汗液的主要成分是水, 当其从皮肤表面蒸发时, 会降低皮肤温度, 以帮助缓解身体的热应激。光热材料内部的水被加热并转化为蒸汽, 然后将蒸汽从孔隙中释放出来。这些孔隙的作用很像人体皮肤的毛孔, 在出汗过程中, 蒸发表面液体的局部加热和毛细管流动是有效蒸发的关键。

在以往的大多数工作中, 由纳米材料组成的宽带吸光器都是通过复杂的化学过程制备的, 碳纳米管因其 π - π 跃迁效应, 在 $0.2\sim 200 \text{ nm}$ 范围内具有良好的光吸收率, 有利于太阳能收集。WANG 等^[36]采用简便的真空过滤工艺制备了仿生多孔结构的碳纳米管薄膜 (图 5c), 随着薄膜上碳纳米管含量的增加, 蒸发效率逐渐增加, 由于漂浮的碳纳米管薄膜的局部加热, 水的温度迅速升高, 产生的水蒸汽迅速从多孔的碳纳米管薄膜中逸出, 由于水-空气界面的局部太阳加热和快速的毛细管流动, 碳纳米管薄膜可将直接蒸汽生成效率提高 400%, 可达到 $3.615 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的高蒸发速率。

2.3 仿自漂浮作用

水生植物如荷叶、睡莲、浮萍等叶片上表面有

致密的小孔, 能够吸收自然阳光, 释放蒸汽, 叶底表面的气室和维管束不仅使其漂浮在水面上, 而且还提供了充足的水运输通道, 内在的层次结构可以通过“自净化”转移和利用污染物来促进水的净化。这种分层孔隙的创新组合有利于提高太阳能驱动界面蒸发系统的水传递速率和蒸发性能。

ZHAO 等^[37]设计了一种莲花型仿生蒸发器和 Janus 双峰蒸发器 (MBE), 用于高速率和持久的界面蒸发 (图 5d)。MBE 就像荷叶一样, 疏水表面切断了水的毛细管作用, 从而实现了高效的耐盐性, 亲水物质加快水传输速度, 将莲花根状介孔融入三维桁架状大孔中形成的双峰结构有效地降低了密度和导热率, 从而实现自漂浮和热调节, 用各种溶液 (酸、碱、氧化剂、油和盐水) 处理 48 h, 均显示出其在实际应用中的稳定性。SHANG 等^[38]利用聚乙烯醇 (PVA) 作为交联剂, 设计了一种浮萍叶启发的具有亲水性大孔底层聚氨酯 (PU) 和疏水性介孔上层 (MXene/O-CNTs) 的 Janus 膜, 其中, O-CNTs 为氧化碳纳米管。获得的仿生结构 Janus 光热复合膜 (b-HPM), 在 1 kW/m^2 强度的光照下首次将光热转换效率提高到 99.73%, 同时, 亲水大孔底层可以将污染物转移和富集到介孔层 (MXene/O-CNTs) 中, 将原废水中污染物 (PPCP) 的去除率提高到 99.18%, 导致凝结水中未检测到 PPCP。在多次循环处理中, 仍然具有良好的蒸发效率和 PPCP 去除率, 解决了高效蒸发和长期稳定性之间的矛盾 (图 5e)。

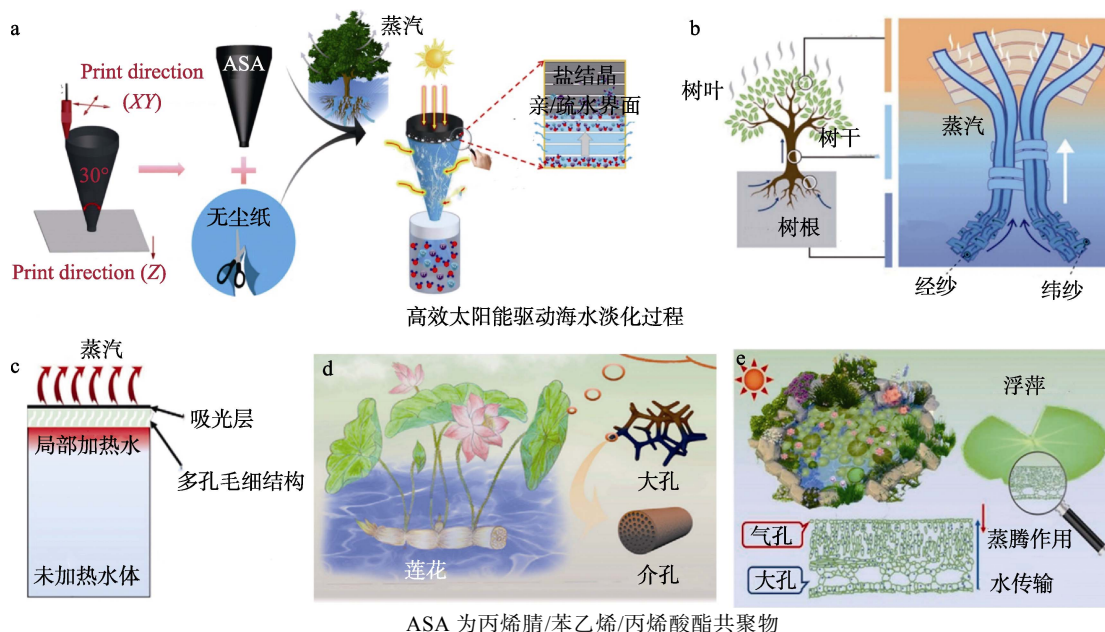


图 5 锥形 3D Janus 蒸发器 (a)^[15]、聚多巴胺-聚吡咯改性纳米纤维材料 (b)^[35]、仿生多孔碳纳米管薄膜 (c)^[36]、莲花型仿生蒸发器微观 (d)^[37]和 Janus 光热复合膜 (e)^[38]示意图
 Fig. 5 Schematic diagrams of conical 3D Janus evaporator (a)^[15], polydopamine-polypyrrole modified nanofiber material (b)^[35], biomimetic porous carbon nanotube film (c)^[36], lotus shaped biomimetic evaporator (d)^[37], and Janus photothermal composite film (e)^[38]

3 多重仿生的仿生太阳能驱动界面蒸发器的设计

对具有仿生结构或仿生功能的蒸发器的研究虽然已经有了很大的进展, 但为了与实际应用更加契合, 将蒸发器的设计进行集成是很有必要的。多重仿生蒸发器结合了动物和植物在结构和功能上的双重优势, 与单仿生蒸发器相比, 多仿生蒸发器需要将物理, 化学性质和结构以及微观机理进行多尺度结合, 不仅弥补单一结构的缺陷, 其制备工艺也更加复杂。

WU 等^[39]根据鸟喙的不对称毛细管棘轮和猪笼草周围气孔表面的超液体运输特性, 利用 3D 打印技术设计了一种三维太阳能蒸发器 (图 6a)。由于非对称凹槽的三维结构的设计形态和梯度微腔阵列, 水膜在蒸发器表面扩散, 沿侧壁显示出与位置相关的水膜厚度和温度梯度, 进一步导致水膜内的热毛细力, 能够驱动从周围环境中捕获能量, 从而提高蒸发速率。通过马兰戈尼效应充分利用输入的能量导致局部盐晶体积聚, 更有利于盐结晶的去除。

广盐物种是能忍受盐度大幅度变化的物种, 以鱼类为主。这类鱼的鳃丝上具有特殊的结构能够使鱼类过滤高浓度的盐水, 从而维持其体内的渗透压稳定。ZHANG 等^[40]受广盐物种大黄鱼鳃丝的串珠形空心柱和串珠形空心孔结构以及猪笼草气孔表面的超快液体运输特性的启发, 制备了一个 3D 水凝胶蒸发器 (图 6b)。鳃丝状确保纵向离子回流, 微腔的模拟阵列槽则确保横向离子平流, 以实现良好的多向交叉盐离子迁移, 该水凝胶蒸发器在 140 h 后没有明显盐沉积现象, 蒸发速率达到 $2.11 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。YING 等^[41]受黑蝴蝶翅膀结构的启发, 设计了一个基于 MXene 纳米结构的顶层, 以减少光反射, 从而提高光热效率, 结合植物根细胞选择性运输能力的特性, 制备了一个具有类似特性的还原氧化石墨烯纳米片的底层 (MXene@rGO) 来防止盐的积累。相邻的还原氧化石墨烯纳米片之间缩小的层间间距可以在排斥盐离子的同时有效地转运水分子, 通过两种仿生策略的结合, MXene@rGO 膜达到了 85.2% 的光热转换效率 (图 6c)。

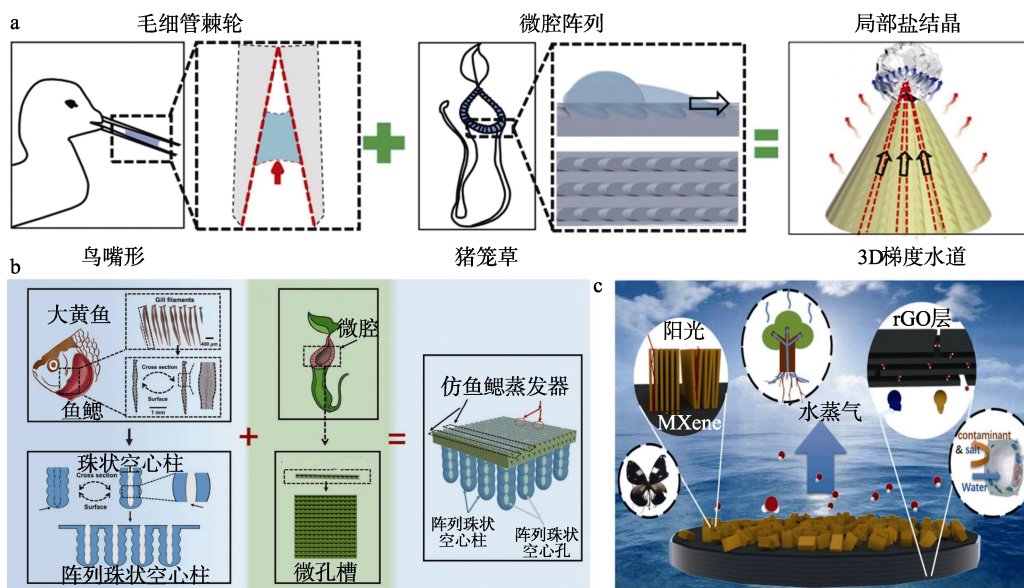


图 6 仿鸟喙/猪笼草 3D 结构蒸发器 (a)^[39]、仿鱼鳃 3D 水凝胶蒸发器 (b)^[40]和 MXene@rGO 膜基蒸发器 (c)^[41]示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of 3D structure evaporator of imitation beak/pitcher plant (a)^[39], 3D hydrogel evaporator of imitation gill (b)^[40], and MXene@rGO film based evaporator (c)^[41]

4 仿生太阳能驱动界面蒸发的应用

SDIE 因其低成本, 耐久性好等优势在水处理领域已经有了不同程度的突破, 研究人员利用 SDIE 在海水淡化, 生活及工业污水净化, 染料去除以及重金属吸附, 蒸发发电等均有研究进展, 这为水资源匮乏或净水系统不完善的地区提供了新的解决方案。

4.1 海水淡化及含油废水处理

XU 等^[42]提出了一种受睡莲启发的分层结构

(WHS), 该装置具有如同睡莲一样的输水表面, 可以自清洁, 其表面多孔结构有助于蒸汽快速逸散, 且整个装置可以自漂浮在水面上。与以往的大多数研究不同, 水不能直接进入吸收器, 而是在顶部疏水层和底部支架之间形成一层薄薄的水层 (图 7a)。这种薄水层设计是蒸发器在高浓度盐水中稳定和高效的太阳能驱动界面蒸发的关键, 在质量分数为 10% 的盐水中连续蒸发 >18 d 仍保持稳定, 平均蒸发速率为 $1.27 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。测定该装置海水淡化后收集

透明水的离子浓度, 几种主要离子浓度均显著下降, 符合世界卫生组织 (WHO) 的饮用水标准或排放标准。水竹芋茎是一种质量轻、坚固的天然多孔材料, 具有桥梁连接的层状结构, 而且其强度具有抗风的特殊强度。根据植物茎的结构特点, YU 等^[43]采用双向冷冻技术构建了一个仿生碳化钼/碳基气凝胶 (MoCCA1), 排列的多孔结构为液体输送提供了丰富的微通道, 有利于油的吸附。此外, 层状结构还为其提供了充足的储油空间, MoCCA1 对海水或沙子上的石油泄漏表现出优异的处理能力, 由于其优异的热稳定性和 3D 结构, MoCCA1 在 11 次吸收-解吸循环后仍表现出高度稳定的吸收能力, 其对油的吸附能力可达 7.72 g/g。这种设计对含油废水的处理提供了新的方向 (图 7b)。

4.2 挥发性有机废水的处理及抑菌性能

污水中含有的细菌以及挥发性有机物 (VOC) 对人体健康存在威胁, 以植物为灵感的仿生太阳能

驱动界面蒸发器在处理这类污水上也有卓越的效果。MO 等^[44]设计了一种仿生太阳能驱动界面蒸发系统, 该系统采用复合水凝胶 (TTCP) 作为蒸发器, 水凝胶的多孔网络结构模仿了植物中的容器, 为污染物的快速传质提供了微米孔隙, 不仅实现了“水输送”的功能, 而且增加了污染物与催化剂之间的暴露, 从而减少了传质限制, 还提供了丰富的降解活性位点, 同时实现了太阳能驱动蒸汽生成与光催化降解的耦合。以苯酚作为模拟污染物, 对苯酚的去除效率为 69.4%~100.0%, 测得最大 TOC (总有机碳) 去除效率达到 80%。同样地, 受植物蒸腾作用的启发, NIU 等^[45]通过定向冷冻干燥制备了一种仿生的具有垂直通道的水凝胶 (PCH)。PCH 蒸发器可以达到 92.5% 的太阳能蒸发效率, 同时, 在处理四环素污染的水时, PCH-1 在 1 h 内降解效率达到 90.6%, 此外, 所形成的活性氧能有效地杀死水源中的革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌, 实现了全面的水净化。

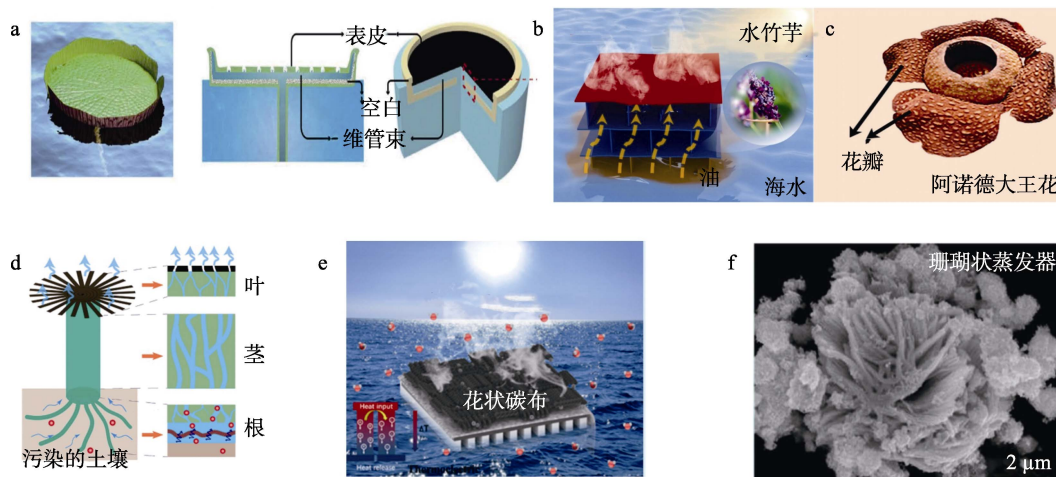


图 7 睡莲仿生蒸发器 (a)^[42]、碳化钼/碳基气凝胶 (b)^[43]、阿诺德大王花 (c)^[46]、仿生叶片结构蒸发器 (d)^[47]、花状碳布蒸发器 (e)^[13]和珊瑚状蒸发器 (f)^[49]示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of water-lily bionic evaporator (a)^[42], molybdenum carbide/carbon based aerogel (b)^[43], Arnold flower (c)^[46], bionic blade structure evaporator (d)^[47], flowerlike carbon cloth evaporator (e)^[13], and coral-like evaporator (f)^[49]

4.3 染料废水的净化及重金属离子的吸附去除

阿诺德大王花的花瓣具有独特的凹凸结构, 具有较大的比表面积, 可以增强表面的光吸收, SUN 等^[46]受阿诺德大王花凹凸结构的启发 (图 7c), 通过嵌入 UiO-66-NH₂ 负载的生物炭, 构建了具有二级结构的光热蒸发器 (CS/BF/C@MOF), 能够同时产生淡水和吸附染料。CS/BF/C@MOF 海绵在 1 kW/m² 强度的光照下表现出 86.84% 的能量转换效率。此外, CS/BF/C@MOF 海绵对亚甲基蓝 (MB) 和甲基橙 (MO) 的最大吸附量分别为 105.48 和 60.57 mg/g。CS/BF/C@MOF 海绵对重金属离子也表现出良好的阻断性, 对于模拟废水中典型的 Cr⁶⁺、Co²⁺

和 Mn²⁺ 的离子阻断效率超过 99.995%。受植物自然蒸腾修复过程的启发, WU 等^[47]用还原氧化石墨烯 (rGO) 覆盖简单的仿生叶片结构 (图 7d), 可以在 1 kW/m² 强度的光照下实现高蒸发速率 [3.1 kg/(m²·h)], 纳米羟基磷灰石 (nHAP) 由于其多孔结构、无毒、生物相容性和生物降解性等特点, 对重金属的吸附能力较好。经过太阳驱动蒸发修复 (SDER) 后, 处理后的土壤中 As、Cd、Cr、Pb 和 Zn 的重金属含量分别降低了 37.2%、56.4%、25.9%、46.3% 和 26.9%。将西兰花种子与处理后的土壤混合, 发芽率明显高于在未处理的土壤环境中, 再次证实了该材料对重金属具有良好吸附能力。LEI 等^[48]

受针叶树植物结构几何形状启发,用低温组装模板聚合法制备了一种具有孔结构可调节,力学性能优异的多孔水凝胶基蒸发器(B-SPH)。B-SPH在 1 kW/m^2 强度的光照下的蒸发速率达到 $3.45\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,其能量效率约为95%。此外,制备的材料即使在滚动、折叠和扭曲超过数百次后,仍具有稳定的机械性能和界面蒸发性能。此外,B-SPH可用于净化含有大量重金属离子(Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Ag^+ 、 Se^{2+})的废水。经过纯化后,重金属离子的浓度显著降低。

4.4 蒸发-发电联产

随着SDIE的发展,研究人员对水流动和蒸发过程进行深度探索,利用蒸发过程的潜热驱动光热材料及蒸发体系内发生局部的激烈运动,使SDIE进行光热转化的同时进行水处理和发电。这种新模式有望为水和能源危机提供有价值的解决方案。为了提高太阳能蒸发-发电的效率,SDIE已结合了热电转换、机械能转化和盐度梯度等发电策略。

XU等^[13]报道了一种柔性碳布纳米复合材料,具有仿生的花瓣状表面,花状分级结构可以通过诱导光散射和多次反射,有效地捕获入射光(图7e)。在材料下方放置一个商用热电模块(TE)来监测该系统的蒸发-发电效果,在 0.60 、 4.66 、 7.90 和 $10.40\text{ }^\circ\text{C}$ 的温差条件下,获得的器件开路电压分别为 5 、 141 、 280 和 389 mV ;除此之外,该蒸发-发电协同系统在处理酸碱废水,染料废水,海水淡化和重金属离子去除方面也有出色的表现。ZHENG等^[49]将等离子体Au纳米双锥体(NBPs)包裹在 $3\text{D Bi}_2\text{MoO}_6$ 球内,形成大量的 2D 纳米片,合成了珊瑚样 $\text{Au}@(\text{Bi}_2\text{MoO}_6\text{-CDs})$ 异质结构(图7f)。Au、 Bi_2MoO_6 和C之间形成的异质结有效地促进了激子的分离和电子的转移,致使光热转换能力有所提升。该珊瑚状仿生蒸发器的蒸发速率为 $1.69\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。此外,将该材料放在一个商用热电发电机上,制作了一个太阳能热发电机,其电力输出功率为 $97.4\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

5 结束语与展望

通过对典型仿生太阳能驱动界面蒸发器进行梳理,讨论不同仿生蒸发器的设计策略。凝练仿生太阳能驱动界面蒸发器的优势及面临的挑战,为SDIE的发展提供了更高效、稳定和可持续的新思路。仿生太阳能驱动界面蒸发器在解决盐的结晶积累、优化水传输、提高能量转换效率等方面具有明显的优势。

(1) 盐的结晶积累:在蒸发过程中,盐分会随着水的蒸发而积累在材料表面,降低蒸发效率并影响材料的持久性能。仿生学设计可以从自然界的生物系统中获得灵感,设计表面结构或涂层来减少或

阻止盐结晶的积累,从而提高蒸发效率并延长材料的使用寿命;

(2) 优异的水传输:光热材料存在水分子扩散困难或传输路径不畅的问题,导致蒸发效率低下。基于仿生学设计的蒸发器可以模仿生物界面的微观结构,如毛细管、通道或多孔结构,以增加水分子的传输速率和通道;

(3) 高效的光热转换效率:提高光热转换效率对提高蒸发效率至关重要。仿生设计蒸发器基于生物光合作用和光捕获等性能,优化材料的光吸收结构和能量转换机制,以实现高效的光热转换。

上述问题的有效解决可明显提高光热材料的蒸发效率,使SDIE在海水淡化、蒸汽消毒、污水净化等领域具有更广泛的应用前景。尽管仿生太阳能驱动界面蒸发器已取得了一些进展,但仍存在一些技术挑战和研究限制。例如:如何进一步降低材料成本、增强抗污染能力;如何将蒸发器与其他技术和设备集成,实现能源收集、盐分回收等功能;如何实现蒸发器的多功能性和集成化,以实现其在实际市场中的可行性和竞争力等问题仍需要更深入的研究和创新。

参考文献:

- [1] LI J Y (李吉焱), LIU M C (刘美辰), JING Y J (景艳菊), *et al.* Solar interface evaporation collaborative power generation: Progress and prospect[J]. *Fine Chemicals* (精细化工), 2022, 39(10): 1946-1952.
- [2] LI J Y, JING Y J, XING G Y, *et al.* Solar-driven interfacial evaporation for water treatment: Advanced research progress and challenges[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(36): 18470-18489.
- [3] LUO W W, LIU M C, MA Y J, *et al.* Carbonized CMPs hollow microspheres-based hydrogel composite membranes with a hierarchical architecture for efficient solar-driven interfacial evaporation[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2023, 15(28): 34044-34054.
- [4] LI J Y, JING Y J, XING G Y, *et al.* Magnetic photothermal material based on hollow tubular biomass fiber for solar steam generation[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2023, 38: 102748.
- [5] WANG C J, WANG Y, YAN M Y, *et al.* Highly efficient self-floating jellyfish-like solar steam generators based on the partially carbonized enteromorpha aerogel[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 630: 297-305.
- [6] WEI Z C, CAI C Y, HUANG Y Z, *et al.* Biomimetic surface strategy of spectrum-tailored liquid metal *via* blackbody inspiration for highly efficient solar steam generation, desalination, and electricity generation [J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106138.
- [7] LI J Y, ZHOU X, CHEN G B, *et al.* Evaporation efficiency monitoring device based on biomass photothermal material for salt-resistant solar-driven interfacial evaporation[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 222: 110941.
- [8] LI J Y, ZHOU X, JING Y J, *et al.* Ionic liquid-assisted alignment of corn straw microcrystalline cellulose aerogels with low tortuosity channels for salt-assistance solar steam evaporators[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(10): 12181-12190.
- [9] LI J Y, ZHOU X, ZHANG J Y, *et al.* Migration crystallization device based on biomass photothermal materials for efficient salt-rejection solar steam generation[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(3): 3024-3032.

- [10] LUO Y Q, SONG F, WU J M, *et al.* A nature-inspired suspended solar evaporator for water desalination of high-salinity brines[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 421: 129824.
- [11] ZOU M M, ZHANG Y, CAI Z R, *et al.* 3D printing a biomimetic bridge-arch solar evaporator for eliminating salt accumulation with desalination and agricultural applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(34): e2102443.
- [12] LI W G, LI Z, BERTELSMANN K, *et al.* Portable low-pressure solar steaming-collection unisystem with polypyrrole origamis[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(29): e1900720.
- [13] XU Y, GUO Z Z, WANG J, *et al.* Harvesting solar energy by flowerlike carbon cloth nanocomposites for simultaneous generation of clean water and electricity[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2021, 13: 27129-27139.
- [14] ZHAO H Y, HUANG J, ZHOU J, *et al.* Biomimetic design of macroporous 3D truss materials for efficient interfacial solar steam generation[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(3): 3554-3562.
- [15] CAO N N, LU S T, YAO R, *et al.* A self-regenerating air-laid paper wrapped ASA 3D cone-shaped Janus evaporator for efficient and stable solar desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 397: 125522.
- [16] MOHANTY A, ACHARYA O P, APPASANI B, *et al.* A broadband polarization insensitive metamaterial absorber using petal-shaped structure[J]. *Plasmonics*, 2020, 15: 2147-2152.
- [17] LIU C K, PENG Y, ZHAO X Z. Flower-inspired bionic sodium alginate hydrogel evaporator enhancing solar desalination performance [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 273: 118536.
- [18] KIM C, SHIN D, BAI THA M N, *et al.* High-efficiency solar vapor generation boosted by a solar-induced updraft with biomimetic 3D structures[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2021, 13: 29602-29611.
- [19] XU N, HU X Z, XU W C, *et al.* Mushrooms as efficient solar steam-generation devices[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29: 1606762.
- [20] ZHANG Q Y, YANG X H, DENG H L, *et al.* Carbonized sugarcane as interfacial photothermal evaporator for vapor generation[J]. *Desalination*, 2022, 526: 115544.
- [21] WANG Z Y, LIU H W, CHEN F J, *et al.* A three-dimensional printed biomimetic hierarchical graphene architecture for high-efficiency solar steam-generation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8: 19387-19395.
- [22] YU Z C, WU P Y. Biomimetic Mxene-polyvinyl alcohol composite hydrogel with vertically aligned channels for highly efficient solar steam generation[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5: 200065.
- [23] ZHAO G M, CHEN Y L, PAN L Q, *et al.* Plant-inspired design from carbon fiber toward high-performance salt-resistant solar interfacial evaporation[J]. *Solar Energy*, 2022, 233: 134-141.
- [24] LIN Z X, WU T T, SHI J, *et al.* Poly(*N*-phenylglycine)-based bioinspired system for stably and efficiently enhancing solar evaporation[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 9: 448-457.
- [25] CHEN Y, YANG J, ZHU L, *et al.* Marangoni-driven biomimetic salt secretion evaporator[J]. *Desalination*, 2023, 548: 116287.
- [26] ZHAO X, CHEN Y Y, YIN Y, *et al.* Janus polypyrrole nanobelt@polyvinyl alcohol hydrogel evaporator for robust solar-thermal seawater desalination and sewage purification[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2021, 13: 46717-46726.
- [27] WANG H Q, ZHANG C, JI X J, *et al.* Over 11 kg/(m²·h) evaporation rate achieved by cooling metal-organic framework foam with pine needle-like hierarchical structures to subambient temperature[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2022, 14: 10257-10266.
- [28] XIAO P, YANG W Q, QIU N X, *et al.* Engineering biomimetic nanostructured "melanosome" textiles for advanced solar-to-thermal devices[J]. *Nano Letters*, 2022, 22: 9343-9350.
- [29] SONG G F, YUAN Y, LIU J, *et al.* Biomimetic superstructures assembled from Au nanostars and nanospheres for efficient solar evaporation[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2019, 3: 1900003.
- [30] SUN P, WANG W L, ZHANG W, *et al.* 3D interconnected gyroid Au-CuS materials for efficient solar steam generation[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2020, 12: 34837-34847.
- [31] SPINNER M, GORB S N, WESTHOFF G. Diversity of functional microornamentation in slithering geckos *Lialis (Pygopodidae)*[J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2013, 280: 20132160.
- [32] LI K R, CHANG T H, LI Z P, *et al.* Biomimetic MXene textures with enhanced light-to-heat conversion for solar steam generation and wearable thermal management[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9: 1901687.
- [33] LIU N, HAO L, ZHANG B Y, *et al.* High-performance solar vapor generation by sustainable biomimetic snake-scale-like porous carbon [J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2020, 4: 5522-5532.
- [34] WANG Z B, LIU K, HENG L P, *et al.* Solar-driven high-efficiency remediation of wastewater containing small dye molecules[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64: 2237-2245.
- [35] LI Y P, FAN J, WANG R, *et al.* 3D tree-shaped hierarchical flax fabric for highly efficient solar steam generation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9: 2248-2258.
- [36] WANG X Z, HE Y R, LIU X, *et al.* Enhanced direct steam generation via a bio-inspired solar heating method using carbon nanotube films [J]. *Powder Technology*, 2017, 321: 276-285.
- [37] ZHAO H Y, ZHOU J, YU Z L, *et al.* Lotus-inspired evaporator with Janus wettability and bimodal pores for solar steam generation[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2020, 1: 100074.
- [38] SHANG Y X, LI B B, XU C L, *et al.* Biomimetic Janus photothermal membrane for efficient interfacial solar evaporation and simultaneous water decontamination[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 298: 121597.
- [39] WU L, DONG Z C, CAI Z R, *et al.* Highly efficient three-dimensional solar evaporator for high salinity desalination by localized crystallization[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 521.
- [40] ZHANG L D, ZHANG Y, ZOU M M, *et al.* A bionic-gill 3D hydrogel evaporator with multidirectional crossflow salt mitigation and aquaculture applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33: 2300318.
- [41] YING P J, AI B, HU W, *et al.* A bio-inspired nanocomposite membrane with improved light-trapping and salt-rejecting performance for solar-driven interfacial evaporation applications[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106443.
- [42] XU N, LI J L, WANG Y, *et al.* A water lily-inspired hierarchical design for stable and efficient solar evaporation of high-salinity brine[J]. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaaw7013.
- [43] YU F, WANG J X, YAN L, *et al.* Bio-inspired molybdenum carbide/carbon-based aerogel with advanced thermal management as a solar evaporator[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 243: 111738.
- [44] MO H T, WANG Y. A bionic solar-driven interfacial evaporation system with a photothermal-photocatalytic hydrogel for VOC removal during solar distillation[J]. *Water Research*, 2022, 226: 119276.
- [45] NIU R, DING Y, HAO L, *et al.* Plant-mimetic vertical-channel hydrogels for synergistic water purification and interfacial water evaporation[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2022, 14: 45533-45544.
- [46] SUN X S, JIA X H, WENG H K, *et al.* Bioinspired photothermal sponge for simultaneous solar-driven evaporation and solar-assisted wastewater purification[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 301: 122010.
- [47] WU P, WU X, WANG Y D, *et al.* A biomimetic interfacial solar evaporator for heavy metal soil remediation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 435: 134793.
- [48] LEI C X, PARK J J, GUAN W X, *et al.* Biomimetically assembled sponge-like hydrogels for efficient solar water purification[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33: 2303883.
- [49] ZHENG Z M, LI H Y, ZHANG X D, *et al.* High-absorption solar steam device comprising Au@Bi₂MoO₆-CDs: Extraordinary desalination and electricity generation[J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104298.