

太阳能界面蒸发协同发电：进展与展望

李吉焱, 刘美辰, 景艳菊, 朱照琪, 孙寒雪

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 太阳能界面蒸发 (SIE) 是将太阳能集中于“空气-水”的界面处加热, 进行高效产气, 实现海水淡化的过程, 其可有效解决淡水资源短缺和能源转换效率低等问题。随着光热材料及集成系统的快速发展, 界面蒸发器的功能不断优化, 促进了该技术在水处理、蒸汽杀菌、稀缺资源富集和联产发电等领域的应用。该文结合 SIE 协同发电的最新研究进展, 梳理 SIE 协同发电的机理, 分析 SIE 协同发电装置的设计要点, 总结 SIE 协同发电的实际应用现状, 并展望其未来的发展及挑战。

关键词: 太阳能界面蒸发; 光热材料; 热电化学; 蒸发发电; 连续式发电装置

中图分类号: TK519 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2022) 10-1945-09

Solar interface evaporation collaborative power generation: Progress and prospect

LI Jiyan, LIU Meichen, JING Yanju, ZHU Zhaoqi, SUN Hanxue

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

Abstract: Solar interface evaporation (SIE) is a process of concentrating solar energy at the "air-water" interface for heating, efficient gas production and seawater desalination, and can effectively solve the problems of fresh water resource shortage and low energy conversion efficiency. With the rapid development of photothermal materials and integrated systems, the function of interface evaporator is constantly optimized, which promotes the application of this technology in water treatment, steam sterilization, rare resource enrichment and cogeneration power generation. Based on the latest research progress of SIE cooperative power generation, this paper combines the mechanism of SIE cooperative power generation, the mechanism of SIE collaborative power generation was discussed, the key design points of generation device were analyzed, the application status quo was summarized, and the future development and challenges of SIE were proposed.

Key words: solar interface evaporation; photothermal materials; thermoelectric chemistry; evaporative power generation; continuous power plant

太阳能界面蒸发 (SIE) 系统克服了传统的太阳能蒸发过程中对整个水体进行加热而导致热损失的缺点, 加热区域聚焦于光热材料表面的薄层空气-水界面处, 提高了太阳能的利用率, 已成为海水淡化领域的关键技术。光热材料 (PMs) 作为 SIE 系统的核心部件, 其设计重点在于宽频带的高光吸收、热管理、水-气传输 3 个方面。近年来, 基于上述 3 个 PMs 设计原则, 研究者们做了大量的工作来制备

和改善 PMs 的性能。目前, PMs 按种类分为碳基材料^[1]、生物质材料^[2]、天然矿物材料^[3]、聚合物材料^[4]、金属-半导体材料^[5]等。不同类型的 PMs 优缺点不同。如: 碳基材料虽然能够在较宽的波长范围内表现出良好的光吸收能力, 尤其是石墨烯、碳纳米管、碳化物等是普遍的光吸收材料, 但制备碳基材料需要消耗较高的能耗^[6-7]。生物质材料在自然界中来源广泛, 成本低, 但均质性不强、易腐败、易降解的缺

收稿日期: 2022-06-15; 定用日期: 2022-08-04; DOI: 10.13550/j.jxhg.20220551

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52066012, 21975113); 甘肃省自然科学基金项目 (20JR5RA446); 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划

作者简介: 李吉焱 (1986—), 女, 副教授, E-mail: lijian3@163.com; lijian@lut.edu.cn.

点同样不能忽视^[8]。天然矿物材料的热稳定性较好、热导低，但耐盐性较差^[9]。聚合物材料具有制备方法可控，物理化学性质稳定，孔隙结构可调的优势，但制备工艺较复杂^[4]。金属-半导体材料的光吸收带隙较宽，材料表面温升速度快且高，具有优异的光热转换效果，但成本高、易氧化、循环稳定性相对较差^[10]。基于各类 PMs 的优缺点，研究者们针对 PMs 的宏观形貌结构进行了优化，具体可将 PMs 分为 2D 与 3D 结构^[11]、Janus 结构^[12]、分层结构^[13-14]、一体化结构^[15]、阵列结构^[16]、凹陷结构^[17]等。其中，3D 结构通过增加光热材料的比表面积可以吸收材料表面的多余能量，有利于降低蒸发界面与环境之间的温度差，避免了热损失^[18]。Janus 结构的疏水层具有良好的抗污能力，而下面亲水层具有确保快速和连续的供水毛细管的作用，这种结构有效避免了疏水层的盐沉积，同时允许在对流的驱动下，盐在亲水层上快速溶解^[19]。分层结构蒸发器增加了光的吸收、捕获和水的输送，可以显著提高光收集效率，降低反射率和透射率^[20]。一体化结构则无需借助其他附件而仅用一个整体就满足了界面水蒸发对光热吸收、水输送和热量调控的要求^[21]。阵列结构中入射光能够在蒸发器内进行多次反射和折射，提高光吸收，通过同时增强蒸汽的生成和扩散来实现高速率蒸发，在蒸汽逸出到空气中的同时极大地防止了热量损失^[22]。凹陷结构提高了材料的吸光度，可以在结构内部存储更多的空气，具有超低导热率，蒸发过程中形成了一个自下到上的温度梯度，引起马兰戈尼效应，导致盐优先结晶在亲疏水界面上，可以减少因盐沉积而蒸发速率不稳定的问题^[23]。随着 PMs 的不断优化，更多的多功能型 PMs 不断涌现，包括耐盐型^[24]、抑菌-抑藻型^[25]、防油污型^[26]、盐类收割型^[27]等，它们结合了制备方法简单化、拓展性强、成本低、可回收等特点，使 SIE 的应用领域越来越广。尤其在 SIE 协同发电方面的应用拓展，已成为解决淡水资源短缺和能源危机的一项远景技术。SIE 协同发电是由于 PMs 受太阳能的驱动，在进行海水淡化的同时，引起界面与水体间产生浓度差和温度差等，以实现水电联产。目前，研究者们将机械、温度-盐度梯度等发电技术与 SIE 融合^[28-29]，提升了太阳能海水淡化系统的能量利用效率和功能性。然而，SIE 协同发电在实际应用中的性能仍然不能令人满意。针对 SIE 协同发电技术客观存在的问题，本文在前人研究的基础上，梳理 SIE 协同发电的发展现状，探讨 SIE 协同发电的工作原理与装置设计形式，总结 SIE 协同发电技术的设计壁垒并展望其发展前景，为实现 SIE 协同发电的应用推广提供理论指导和技术支持。

1 太阳能驱动界面蒸汽-发电的原理

“空气-水”界面处的蒸发过程是发电的潜在动力。PMs 中的光吸收层通过捕获太阳能获取的热量，水体受太阳能界面蒸发的驱动力影响，会在 PMs 及蒸发体系内发生局部的激烈运动，使 SIE 进行光热转化的同时进行发电。研究者对水流动和蒸发过程的探索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，SIE 技术已结合了热电转换、机械能转化和盐度梯度等发电策略（图 1）。

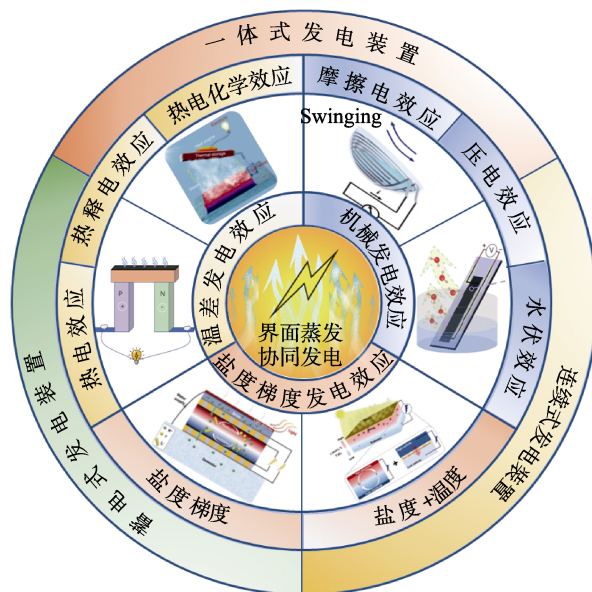


图 1 太阳能驱动蒸汽界面蒸发的原理及应用
Fig. 1 Principle and application of solar driven steam interface evaporation

1.1 温差发电效应

1.1.1 热电效应

热电效应是指因温度梯度的影响，金属或半导体材料中的电子由高温区向低温区移动，而空穴由低温区向高温区移动，此过程所产生的电流或电荷堆积的一种现象。PMs 在蒸发过程中，会在“空气-水”界面处产生局部高温，并在蒸发体系内产生明显的温度梯度，根据热电效应，蒸发体系的冷-热两端之间能够产生电压。但由于蒸发体系内所产生的温差有限、发电量十分微弱。基于塞贝克效应，学者们在商用的热电装置上负载超薄的光热材料组成热电模块，用来实现 SIE 协同发电。XU 等^[29]基于碳布设计了一个柔性纳米复合材料的宽带太阳能吸收器，用于高效的太阳能界面蒸发协同发电，该装置由一个热电（TE）模块和一个太阳能界面蒸发器组成。热电模块以下的温度接近整体水温，在太阳照射下，与模块以上的温度形成明显的温差，产生

电势, 在 10.40 °C 温差下获得了 389 mV 的开路电压 (图 2a)。为了产生更大的温差用以协同发电, 半导体光热材料成为了温差发电的首选。JIANG 等^[30]设计了一种由 Ni_3S_2 纳米片阵列垂直排列生长的宽带半导体泡沫 ($\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{NF}$)。用热电模块替换绝缘体泡沫层构建具有协同发电功能的 SIE。在太阳照射下, 将 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{NF}$ 放置在热电模块表面上, 使热电模块上下两侧产生了明显温差, 实现了稳定的电力传输。LI 等^[31]利用具有高光吸收性的纺织物覆盖在 TE 模块上方, 制备了一个二维太阳能吸收器, 该吸收器的剩余热量被直接传导到一个热电装置上进行发电, 混合器件在外部电阻为 4 Ω 时的功率密度为 1.2 W/m^2 , 如果整体水温从 25 °C 降低到 10 °C, 短路电流密度将从 9.51 A/m^2 增加到 16.69 A/m^2 。HAN 等^[32]合成了一种具有多环共轭结构的有机小分子酞菁衍生物, 在 5 kW/m^2 太阳光照射下, 温差为 10.2 °C 时, 最大开路电压为 221 mV。结合热电模块的太阳能蒸汽发生器, 由于热电模块与水体直接接触, 温差较大, 虽有利于发电但会导致水的蒸发率降低, 很难平衡水的蒸发和发电。因此, 迫切需要设计新的集成结构和太阳能光热材料, 以平衡输出功率密度和水蒸发率。

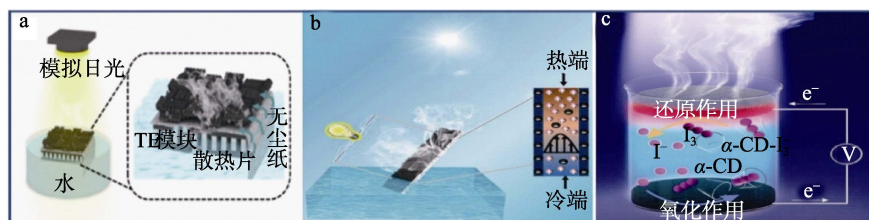
1.1.2 热释电效应

热释电效应是由于温度的变化, 使绝缘体内出现结构上的电荷中心相对位移, 使它们的自发极化强度发生变化产生电荷。在对光热材料进行的太阳能界面蒸发过程中, 尤其是具有微纳米光热材料的内部, 盐溶液在太阳能蒸发驱动力的作用下, 会在盐溶液与材料内部孔道之间的界面上产生双电层, 促进了盐溶液中电解质的定向输送, 形成电势。根据传统的势流理论, 光热材料在蒸发过程中产生驱动势能需要满足以下几点: (1) 良好的亲水性通道; (2) 微通道的尺寸必须满足离子的渗透性, 并接近或小于德拜长度; (3) 带电表面。基于上述三点, 石墨烯、炭黑和碳纳米管^[33]被广泛应用于 SIE 协同

发电。虽然低成本的碳基材料表现出良好的发电性能, 但其碳化过程的能耗较大。金属有机框架 (MOFs) 材料由于其具有超亲水性、高孔隙率和带电表面等特点在 SIE 协同发电领域应用效果优异, 但在水环境中的稳定性有待提高。基于此, LI 等^[34]在聚偏氟乙烯 (PVDF) 衬底上制备了一种由聚苯胺 (PANI) 涂覆 $[\text{Cu}_2(\text{OH})(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})]_n \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (BTC 为 1,3,5-苯三甲酸) 的金属有机骨架化合物纳米棒阵列复合膜 (CBAP)。该复合膜具有良好的水蒸发驱动发电和高效的太阳能界面蒸发特性, 持续产生高达 709.3 mV 的电压, 最大输出功率密度为 15.377 mW/m^2 (图 2b)。JIANG 等^[35]受人类皮肤热调节的启发, 设计了一种掺杂钨的二氧化钒纳米颗粒和 PVDF 的聚合物薄膜, 由于 PVDF 层的热释电效应, 开路电压的最大输出值为 30 V。

1.1.3 热电化学效应

热电化学电池是一种由热电化学过程驱动的高效热电池, 可通过依赖于温度的氧化还原反应或离子扩散将低级热量转化为电能^[36]。SHEN 等^[37]利用热电化学氧化还原反应与蒸发系统相结合, 设计了一种开放式的热电化学电池, 在太阳光照射下, 位于气-液界面的电极和装置底部的电极会产生温差, 从而产生氧化还原反应电位差, 石墨毡作为电极和太阳能吸收器, 由于自然蒸发过程, 顶部电极温度低于底部电极, 产生的开路电压为负值, 当有光源照射时, 顶部电极温度升高, 最终高于底部电极温度, 开路电压值变为正值。在 1 kW/m^2 太阳光照下, 该装置材料在水溶液中的蒸发速率为 1.1 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 输出功率峰值为 1.3 mW/m^2 , 而在无日照条件下输出功率峰值为 5.3 mW/m^2 (图 2c)。太阳能界面蒸发协同发电所利用的热量属于低级热量, 目前的发电方式难以同时满足装置对效率、速率和灵活性的要求。热电化学方法产电效率较高, 但是具有高电流密度的电极是能量转换过程中的主要限制因素。因此, 还需要更深入的探索 SIE 协同发电过程中热能有效利用的潜力。



其中, $\alpha\text{-CD}$ 为 α -环糊精

图 2 热电效应发电装置^[29] (a)、热释电效应发电装置^[34] (b) 和热电化学效应发电装置^[37] (c)

Fig. 2 Thermoelectric effect power generation device^[29] (a), pyroelectric effect power generation device^[34] (b) and thermoelectric chemical effect power generation device^[37] (c)

1.2 机械发电效应

1.2.1 摩擦电效应

摩擦电效应是指材料外部受到物理作用力使材

料发生形变, 内部的电子由于摩擦带电和静电耦合产生了电位差, 进而输出电流。LI 等^[38]开发了一种全纤维素基界面蒸汽发生器, 引入了自驱动的摩擦

电纳米发电机 (TENG), 将太阳能驱动的界面蒸发与水波检测相结合, 蒸汽发生器可以同时检测到水面上的各种振荡运动, 并将这些刺激转化为实时和可视化的信号。在由聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 制成的柔性基板上, 将前后电极重叠, 成功地将 TENG 的活性面积降低了约 50%, 用一层氟化乙烯丙烯 (FEP) 作为与水相互作用的摩擦膜, 集成器件的输出电流依赖于水波的振幅, 电流的可逆代表了水波释放和按压运动时的转移电荷。当水的高度从 0.5 cm 上升到 2.0 cm 时, 输出电流从 1 μ A 逐渐增加到 3 μ A (图 3a)。

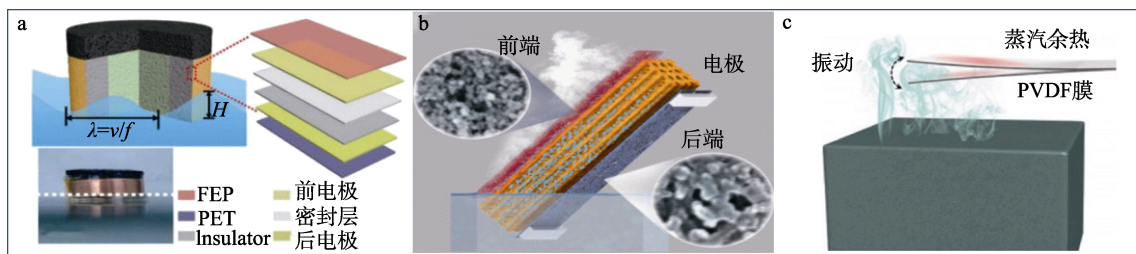
1.2.2 水伏效应

水伏效应是指光热材料与雨滴、水波、自然水蒸发和大气湿度等相互作用能直接输出电能。该效应可以通过材料的纳米结构与流动水的直接相互作用实现发电。LIU 等^[39]提出了一种三明治模型策略, 以构建一个三维 (3D) 非对称蒸发器, 用于高效太阳能界面蒸发和协同发电, 该设计将山毛榉木片作为水修正剂和传质通道, 夹在两种通道结构和吸水性能不同的炭黑 (前端) / 聚乙烯醇 (PVA, 后端) 功能膜之间。将该蒸发器以 45° 角插入水界面, 实现了 1.93 kg/(m² · h) 的高蒸发率。值得注意的是, 尺寸为 1 cm × 4 cm 的蒸发器在模拟海水中可以产生

高达 5 μ A 的电流, 输出功率为 0.60 μ W。此外, 将几个蒸发单元经过简单的串联或并联连接可轻松为商业计算器供电, 电解亚甲基蓝溶液, 并点亮发光二极管, 论证了太阳能蒸发-发电一体化集成装置的概念 (图 3b)。目前, 太阳能驱动界面蒸发过程中收集固有的水伏能源的报道仍然很少。由于对水运输管理的差异, 如何构建既能满足高效蒸发又能稳定输出的光热系统是一个很大的挑战。

1.2.3 压电效应

压电效应是一种能够将受力影响转换为电信号的物理现象, 当电介质在一定方向上受力并产生了形变后, 在其内部因极化现象致其表面产生正负相反的电荷而形成电势, 去掉力的影响后, 电介质恢复原态, 表面电荷消失, 其内部分布的电势也消失。ZHU 等^[7]报道了一种廉价的细胞碳海绵, 可以在太阳能汽化过程中收集由太阳能蒸汽产生诱导的电力, 通过在蒸发转变过程中对 PVDF 薄膜的加热-冷却和轻微振荡, 测量了热释电效应和压电效应的耦合, 计算出的输出功率随着加载电阻的增加呈先升后降趋势, 得到的最高输出功率密度为 240.7 μ W/m², 获得最大水蒸发速率为 1.15 kg/(m² · h), 测量的电信号与 PVDF 薄膜所经历的温度变化相匹配 (图 3c)。



其中, λ 为波长; v 为波速; f 为频率; H 为厚度或高度

图 3 摩擦电效应发电装置^[38] (a)、水伏效应发电装置^[39] (b) 和压电效应发电装置^[7] (c)

Fig. 3 Triboelectric effect power generation device^[38] (a), hydro voltaic effect power generation device^[39] (b) and piezoelectric effect power generation device^[7] (c)

1.3 盐度梯度发电效应

盐度梯度效应即在浓度梯度的影响下, 物质会从高浓度向低浓度转移, 直到分子均匀分布, 浓度

差反过来会产生离子交换, 从而产生电势。溶液浓度差的大小可以通过电极反应来实现, 它将盐度差能转化为电能^[40] (图 4a)。

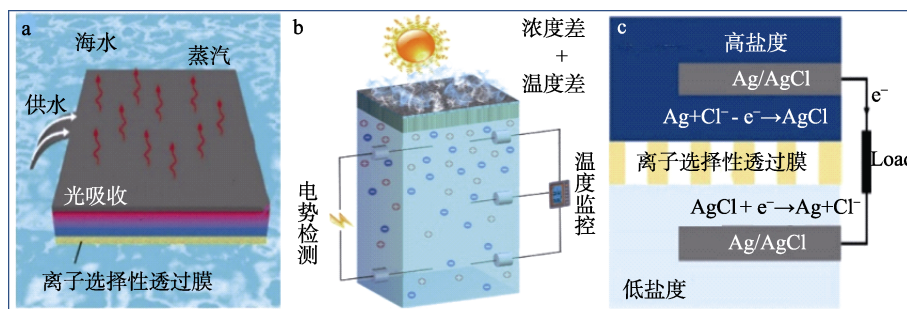


图 4 盐度梯度效应发电装置^[40] (a)、蒸发效率检测装置^[41] (b) 和盐度梯度效应发电原理示意图^[43] (c)

Fig. 4 Salinity gradient effect power generation device^[40] (a), an evaporation efficiency detecting device^[41] (b) and schematic diagram of salinity gradient effect power generation^[43] (c)

LI 等^[41]设计了一套蒸发效率监测装置, 该装置利用界面蒸发法产生局部相对较高的浓度区域, 蒸发器中溶液的浓度差通过电极以电势差的形式反映出来, 通过监测电势来体现浓度的差异, 从而确定光热材料的蒸发效率(图 4b)。在反向电渗析(RED)中, 电荷沿电位梯度的定向传输通过离子交换膜来产生能量^[42]。WANG 等^[43]提出了在太阳驱动界面蒸发过程中将热电偶联电池和 RED 相结合, 同时从温度和盐度梯度中获得能量, 在 1 kW/m^2 太阳光照下实现了 $1.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 高蒸发速率(图 4c)。

2 太阳能驱动界面蒸发协同发电的装置设计

由于太阳能间歇式供应的特点, 使得 SIE 协同发电技术无法满足日常生活中对电力和淡水的全天候需求, 极大地限制了 SIE 技术的发展。解决这一问题的方法是开发将太阳能转换系统和能量储存系统结合在一起的混合系统。但目前还缺乏有效的混合集成系统来解决上述限制。因此, 太阳能的有效利用依赖于太阳能收获、转换和储存技术的协同发

展。基于此, SIE 协同发电应优化装置对太阳光的高效捕获、转化和存储能力, 提高能量的整体利用效率。本文将在总结 SIE 协同发电的工作原理基础上, 明晰不同类型的 SIE 协同发电装置的设计及性能特点。

2.1 一体式发电装置

一体式发电装置是指用一个整体装置满足界面水蒸发对光热吸收、水输送和热量调控的要求, 且无需借助任何其他附件就可以完成太阳能界面蒸发。主要以气凝胶和水凝胶材料为主, 气凝胶独特的多孔和粗糙结构不仅减少了光反射, 而且增强了气凝胶内部的光散射, 从而提高了光吸收, 降低了热导率, 抑制热损失。同时气凝胶内部相互连接的孔隙可以为水的运输提供丰富的途径, 为蒸汽逸出提供通道, 使水能够连续地从底层输送到上层蒸发层。LIU 等^[21]设计了一种碳化亲水气凝胶, 在 1 kW/m^2 光照且无对流的条件下, 蒸发效率达到 $2.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 在 4 kW/m^2 太阳光照下可产生功率密度约 66 W/m^2 (图 5a)。一体化发电装置成本较低, 但蒸发速率略低于其他装置。

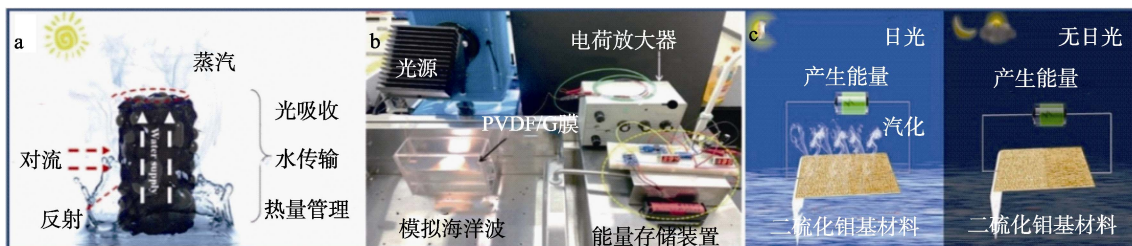


图 5 一体式发电装置^[21] (a)、连续式发电装置^[44] (b) 和蓄电式发电装置^[45] (c)

Fig. 5 Integrated power generation device^[21] (a), continuous power generation device^[44] (b) and storage power generation device^[45] (c)

2.2 连续式发电装置

传统太阳能界面蒸发式发电装置为白天发电夜间停止工作, 对太阳光依赖性比较强, 而连续式发电装置可以实现全天候连续工作, 实现较高的工作效率。HUANG 等^[44]研制出 PVDF/石墨烯太阳能蒸发器膜(PVDF/G膜), 用于同时进行淡水生产和发电, 石墨烯的加入将 PVDF 晶体从 α 相转变为压电自组装 β 相。此膜将模拟海洋波的机械能转化为电能, 该膜作为一种海浪发电装置, 可以提供全天候发电, 在夜间和阴天将储存的电能转化为热能, 并持续提供安全的饮用水(图 5b)。毋庸置疑, 未来对全天候高效利用太阳能驱动产生清洁淡水和电能是 SIE 发展的趋势, 只有连续式的装置才能适合于产业化的生产要求。

2.3 蓄电式发电装置

蓄电式发电装置可以回收存储系统中多余的电能, 以最大限度利用资源。GUO 等^[45]设计了一

种基于 MoS_2 的复合材料, 在日光下同时产生蒸汽和能量, 通过串联连接多个器件, 所产生的能量还可以使用电容器^[46]对基于 MoS_2 的复合材料的输出电压进行放大和存储, 以满足应用要求并实现了在阴天或夜间作为能量发电机的价值(图 5c)。蓄电式发电装置对器件性能要求比较高, 需要多个器件协同使用, 但从发展的角度看, 此类装置最具发展潜力。

3 太阳能驱动界面蒸发协同发电的应用现状

太阳能驱动界面蒸发发电在许多淡水、电力资源匮乏的偏远地区具有潜在的应用价值, 当前研究主要集中在小规模发电领域。

HAN 等^[32]合成了一种具有多环共轭结构的有机小分子酞菁衍生物 4OCSPC, 该材料具有高效的太阳能利用效率和较高的光热稳定性, 设计并制备

了一种新型的协同耦合太阳能蒸汽和太阳能发电装置,在 1 kW/m^2 光照条件下,涂有 40CSPC 的热电器件最大输出电压为 204 mV ,产生的电能以 104 r/min 驱动一个小风扇。ZHU 等^[47]合成了一种 3D 有机泡沫海绵 (PCC),利用 PCC 的高弹性和良好的形状适应性使其覆盖在热电模块上,在 1 kW/m^2 太阳光照射下,流动水温为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,输出电压最高可达 106 mV ,在 5 kW/m^2 太阳光照射下,所产生的电能可为电子计算器供电,根据实际要求,可以将两个或多个单元串联连接,这表明大规模集成应用是可行的,提高了太阳能的整体综合利用率。更令人振奋的是,LIU 等^[39]构建一个 3D 不对称蒸发器用于高效的太阳能水电联产,一个尺寸为 $1 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 的小芯片可以在模拟海水中产生高达 $5 \text{ } \mu\text{A}$ 的短路电流,输出功率为 $0.60 \text{ } \mu\text{W}$ 。此外,几个蒸发单元串联或并联的简单连接可以达到同时为一个商业计算器供电,电解亚甲基蓝溶液以及点亮发光二极管的效果,这很好地验证了太阳能水蒸发协同发电在集成设备中的概念。

LI 等^[38]首次将界面蒸发与水波检测相结合,将单片蒸汽发生器与自驱动 TENG 进行合理集成,实现了对几种地表水振荡运动的快速响应,这项工作为开发基于生物聚合物的多功能蒸汽发生器以及太阳能驱动

的水净化过程和海水淡化提供了借鉴思路。

值得注意的是,传统的太阳能驱动界面蒸发发电大部分是以去离子水和海水作为媒介来测定装置的发电性能。JI 等^[48]利用碳纳米球/ TiO_2 纳米线设计出一种自供电式蒸发发电装置,该装置在甲醇、丙酮和乙醇等媒介中也表现出较好的发电潜力。在以水为媒介时可产生 1.6 V 的流量感应电压 (FIV),而以甲醇为媒介时,FIV 则高达 2.0 V 。将该装置进行串联或并联连接,可获得更高的 FIV 值;此外,由装置产生的电能可以同时为两个商用电容器充电和向计算器和发光二极管供电。

目前,太阳能界面蒸发技术的产业化应用还在探索阶段,已有研究人员将 SIE 与页岩油气开采进行了融合设计,拟利用 SIE 技术处理页岩油气开采过程中的废水,以实现生产过程零液体排放^[49]。根据现有的 SIE 协同发电的测试数据 (表 1),蒸发器的发电功率密度主要集中在 $0.015 \sim 66 \text{ W/m}^2$ 范围内,输出电压在 $83 \sim 580 \text{ mV}$ 内波动,输出电流则在 $0.02 \sim 16.4 \text{ mA}$ 内变化。SIE 协同发电的最大电压通常在纯水或低盐浓度的水中实现,但输出电流大多在微安范围内,由于系统内阻大,导致输出功率密度很低。对于 SIE 协同发电技术,现有成果的发电量有限,其产业化的道路仍然漫长。

表 1 不同蒸发器及发电量统计
Table 1 Statistics of different evaporators and power generation

发电原理与方式	蒸发器名称	蒸发速率/ [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	蒸发 效率/%	光热转换 效率/%	发电量	参考 文献
热释电效应	CBAP	1.866	90.8	—	15.377 mW/m^2	[34]
热电效应	$\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{Nickel foam}$	1.29	—	87.2	0.175 W/m^2	[30]
热电效应	Carbonized towel-gourd sponges/paper	1.53	95.9	—	1.7291 mW	[50]
热电效应	Polydimethylsiloxane/Carbon nanotubes/Cellulose nanocrystals sponge	1.35	—	87.4	$6.73 \text{ W/m}^2 (5 \text{ sun})$	[47]
热电效应	PLA pellets/MXene@ MoS_2 composite membrane	1.39	91	—	$16.4 \text{ mA} (1.5 \text{ sun})$	[51]
热电效应	STA-EGaIn/Lignin-CNC aerogel	1.29	94	—	$161.13 \text{ mV} (2 \text{ sun})$	[52]
热电效应	3D porous carbon foam	1.39	—	—	0.5 W/m^2	[53]
热电效应	Porous polymeric monoliths	2.1	—	—	$66 \text{ W/m}^2 (4 \text{ sun})$	[21]
热电效应	Polyurethane/Phthalocyanine derivative	1.262	86.6	17.3	$221 \text{ mV} (5 \text{ sun})$	[32]
热电效应	CN/PVA/Cotton fabric	$4.51 (4 \text{ sun})$	—	—	$1.2 \text{ W/m}^2 (4 \text{ sun})$	[31]
热电效应	Carbon nanotube paper	1.28	83.3	—	100 mV	[54]
热电效应	$600 \text{ }^\circ\text{C}$ Red mud	2.185	—	—	$335 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$	[55]
热电效应	2,17-Bis(diphenylamino)dibenzo[<i>a,c</i>]naphtho[2,3- <i>h</i>]phenazine-8,13-dione	1.07	73.98	56.23	83 mV	[56]
热电效应	Carbon nanotube foam/Polyvinyl alcohol (PVA)	5.0	—	—	0.4 W/m^2	[57]
热电化学效应	Graphene/Carbon cloth	—	—	83	0.37 V	[58]
热电化学效应	Cu-CAT-1 MOF nanorod arrays/Gelatin membrane	2.07	—	—	18.2 mW/m^2	[59]
热电化学效应	Carbonized B. mori silk/Cotton	1.25	—	82	0.35 V	[60]
热电化学效应	Thermo-electrochemical cell system	1.1	60	—	$2.3 \times 10^{-2} \text{ mW/m}^2$	[37]
热释电效应	Bioinspired composite interfacial film	$1.39 (1.1 \text{ sun})$	71.43	—	$104 \text{ } \mu\text{W/m}^2 (1.1 \text{ sun})$	[35]
盐度梯度效应	CNT modified filter paper	1.1	—	75	1 W/m^2	[40]
水伏效应	Carbon black (CB)/(PVA) functional films	1.93	—	—	0.58 V	[39]
水伏效应	CNTs-based paper	1.15	—	—	$22 \text{ } \mu\text{A}$	[61]

续表 1

发电原理与方式	蒸发器名称	蒸发速率/ [kg/(m ² · h)]	蒸发 效率/%	光热转换 效率/%	发电量	参考 文献
摩擦电效应	3D monolithic steam generator	4.32	—	—	3 μA	[38]
热释电效应 + 压电效应	Carbon sponge	1.39	—	90	240.7 μW/m ²	[7]
热电效应 + 盐度梯度效应	K ₃ Fe(CN) ₆ /K ₄ Fe(CN) ₆	1.4	—	88.9	1.11 W/m ²	[43]

注: 1 sun 表示 1 kW/m² 光照条件; “—” 表示未给出数据。

4 结束语与展望

太阳能驱动界面蒸发协同发电技术由于其具有能源利用率高、成本低等优势引起了人们的广泛关注。此技术适用于不同类型的水体, 如: 雨水、海水、生活污水、工业废水等, 在中国“碳达峰、碳中和”的目标背景下, 利用太阳能界面蒸发协同发电技术可以大大降低化石燃料的使用, 有望实现零碳排放的目标。目前, 应用于太阳能界面蒸发的光热材料种类丰富, 优良的光热材料是实现高效水蒸发的先决条件。尽管太阳能界面蒸发已经取得了巨大进展, 但仍有一些问题和挑战需要从基本认识与实际应用的角度加以解决。基于此, 作者建议未来的太阳能驱动界面蒸发协同发电研究方向应主要集中于以下几个方面:

(1) 盐的积累仍然是大规模太阳能蒸汽发电应用的一个重大障碍。近年来, 研究人员提出了空间隔离盐策略, 以有效控制盐积累的干扰, 保持水分稳定蒸发, 但不适合大规模应用, 且生产出的盐晶体仍然需要定期清洗。未来太阳能驱动界面蒸发器的设计可从结构改进入手, 降低导热率, 提高蒸汽产生速率的同时解决盐沉积问题。

(2) 目前, 太阳能驱动界面蒸发协同发电技术还处于实验室研究阶段。关于大规模协同发电和储能的研究较少, 但已有产业化设计实例, 正在不断的扩大研究规模, 有望实现偏远和水电资源短缺地区的实际应用, 提高能源利用效率。

(3) 太阳能驱动界面蒸发协同发电系统的间歇性制约了其实际应用。开发具有可持续性可回收性的 SIE 协同发电装置是未来发展的趋势。另外, SIE 系统中, “水输送-光吸收-热管理”之间存在动态平衡, 如何调控三者之间的关系, 以保证连续稳定的高效率蒸发与发电是需要解决的一大难题。

(4) 目前, 蒸发-发电体系多为非集成组装系统, 需要附加功能器件, 如热电模块、膜等组件。存在成本过高、能源利用率低, 对商用器件的封装提出了更高的挑战。未来太阳能驱动界面蒸发协同发电体系应尽量减少对附加功能器件的依赖, 降低整体

成本, 重点关注材料本身性能以获得突破。

参考文献:

- [1] LI W Z, LI F, ZHANG D, *et al.* Porous wood-carbonized solar steam evaporator[J]. *Wood Science and Technology*, 2021, 55: 625-637.
- [2] ZHANG Q, ZHANG Y S, SHEN Y, *et al.* Improving seawater desalination efficiency by solar driven interfacial evaporation based on biochar evaporator of nanochloropsis oculata residue[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105787.
- [3] ZHANG Z B, JI R, KROLL M, *et al.* Efficient thermally evaporated γ -CsPbI₃ perovskite solar cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11: 2100299.
- [4] WU Y Z, SHEN L, ZHANG C X, *et al.* Polyacid doping-enabled efficient solar evaporation of polypyrrole hydrogel[J]. *Desalination*, 2021, 505: 114766.
- [5] GU Y R, LI X, LI X J, *et al.* Facile preparation of Cu₂S/Cu mesh for high performance solar water evaporation[J]. *ChemistrySelect*, 2021, 6: 7901-7905.
- [6] GUAN W X, GUO Y H, YU G H. Carbon materials for solar water evaporation and desalination[J]. *Small*, 2021, 17(48): 2007176.
- [7] ZHU L L, GAO M M, PEH C K N, *et al.* Self-contained monolithic carbon sponges for solar-driven interfacial water evaporation distillation and electricity generation[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8: 1702149.
- [8] GENG Y, SUN W, YING P J, *et al.* Bioinspired fractal design of waste biomass-derived solar-thermal materials for highly efficient solar evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31: 2007648.
- [9] CHEN L H, XIA M M, DU J B, *et al.* Superhydrophilic and oleophobic porous architectures based on basalt fibers as oil-repellent photothermal materials for solar steam generation[J]. *ChemSusChem*, 2020, 13: 493-500.
- [10] KIM J U, LEE S, KANG S J, *et al.* Materials and design of nanostructured broadband light absorbers for advanced light-to-heat conversion[J]. *Nanoscale*, 2018, 10: 21555-21574.
- [11] GAN W T, WANG Y X, XIAO S L, *et al.* Magnetically driven 3D cellulose film for improved energy efficiency in solar evaporation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 7756-7765.
- [12] SUN B J, HAN Y, LI S W, *et al.* Cotton cloth supported tungsten carbide/carbon nanocomposites as a janus film for solar driven interfacial water evaporation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9: 23140-23148.
- [13] LIM H, LEE S. Double-insulated porous PDMS sponge for heat-localized solar evaporative seawater desalination[J]. *Desalination*, 2022, 526: 115540.
- [14] WANG M, XU G R, AN Z H, *et al.* Hierarchically structured bilayer aerogel-based salt-resistant solar interfacial evaporator for highly efficient seawater desalination[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 287: 120534.
- [15] SONG C Y, JIANG Z H, GU X Y, *et al.* A bilayer solar evaporator with all-in-one design for efficient seawater desalination[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 616: 709-719.

- [16] YANG Y, FAN W, YUAN S J, *et al.* A 3D-printed integrated mxene-based evaporator with a vertical array structure for salt-resistant solar desalination[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9: 23968-23976.
- [17] 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.
- [18] KONG Y, GAO Y, SUN Y K, *et al.* Manipulating a vertical temperature- gradient of Fe@Enteromorpha/graphene aerogel to enhanced solar evaporation and sterilization[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10: 3750-3759.
- [19] CHEN J X, YIN J, LI B, *et al.* Janus evaporators with self-recovering hydrophobicity for salt-rejecting interfacial solar desalination[J]. *ACS Nano*, 2020, 14: 17419-17427.
- [20] LEI W W, KHAN S, CHEN L, *et al.* Hierarchical structures hydrogel evaporator and superhydrophilic water collect device for efficient solar steam evaporation[J]. *Nano Research*, 2020, 14: 1135-1140.
- [21] LIU J F, CHEN X L, YANG H, *et al.* Gel-emulsion templated polymeric aerogels for solar-driven interfacial evaporation and electricity generation[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2021, 5: 1953-1961.
- [22] PENG L H, GU X B, YANG H B, *et al.* Ultra-high evaporation rate 3D evaporator with vertical sheets based on full use of convection flow[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 345: 131172.
- [23] GAO C, ZHU J J, LI J C, *et al.* Honeycomb-structured fabric with enhanced photothermal management and site-specific salt crystallization enables sustainable solar steam generation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 619: 322-330.
- [24] 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.
- [25] FAN X F, MU H C, XU Y L, *et al.* Silver nanoparticles-polydopamine-wax gourd: An antimicrobial solar evaporator with enhanced steam generation[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46: 8949-8961.
- [26] WU S L, QUAN L N, HUANG Y T, *et al.* Suspended membrane evaporators integrating environmental and solar evaporation for oily wastewater purification[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13: 39513-39522.
- [27] DONG X Y, LI H, GAO L F, *et al.* Janus fibrous mats based suspended type evaporator for salt resistant solar desalination and salt recovery[J]. *Small*, 2022, 18: e2107156.
- [28] GAO M M, PEH C, PHAN H, *et al.* Solar absorber gel: Localized macro-nano heat channeling for efficient plasmonic Au nanoflowers photothermic vaporization and triboelectric generation[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8: 1800711.
- [29] 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.
- [30] JIANG H L, AI L H, CHEN M, *et al.* Broadband nickel sulfide/nickel foam-based solar evaporator for highly efficient water purification and electricity generation[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8: 10833-10841.
- [31] LI H R, WANG S M, YAN Z, *et al.* Harvesting conductive heat loss of interfacial solar evaporator for thermoelectric power generation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 208: 118279.
- [32] HAN X, WANG Z Y, SHEN M H, *et al.* A highly efficient organic solar energy-absorbing material based on phthalocyanine derivative for integrated water evaporation and thermoelectric power generation application[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9: 24452-24459.
- [33] XIAO C H, LIANG W D, HASI Q M, *et al.* Efficient solar steam generation of carbon black incorporated hyper-cross-linked polymer composites[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3: 11350-11358.
- [34] LI Z Y, MA X, CHEN D K, *et al.* Polyaniline-coated MOFs nanorod arrays for efficient evaporation-driven electricity generation and solar steam desalination[J]. *Advanced Science (Weinh)*, 2021, 8: 2004552.
- [35] JIANG M D, SHEN Q C, ZHANG J Y, *et al.* Bioinspired temperature regulation in interfacial evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30: 1910481.
- [36] LI M, HONG M, DARGUSCH M, *et al.* High-efficiency thermocells driven by thermo-electrochemical processes[J]. *Trends in Chemistry*, 2021, 3: 561-574.
- [37] SHEN Q C, NING Z Y, FU B W, *et al.* An open thermo-electrochemical cell enabled by interfacial evaporation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7: 6514-6521.
- [38] LI N, QIAO L F, HE J T, *et al.* Solar-driven interfacial evaporation and self-powered water wave detection based on an all-cellulose monolithic design[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31: 2008681.
- [39] LIU J, GUI J X, ZHOU W T, *et al.* Self-regulating and asymmetric evaporator for efficient solar water-electricity generation[J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106112.
- [40] YANG P H, LIU K, CHEN Q, *et al.* Solar-driven simultaneous steam production and electricity generation from salinity[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10: 1923-1927.
- [41] 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.
- [42] YIP N, BROGIOLI D, HAMELERS H, *et al.* Salinity gradients for sustainable energy: Primer, progress, and prospects[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 12072-12094.
- [43] WANG H, XIE W K, YU B Y, *et al.* Simultaneous solar steam and electricity generation from synergistic salinity-temperature gradient[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11: 2100481.
- [44] HUANG C H, HUANG J X, CHIAO Y, *et al.* Tailoring of a piezo-photo- thermal solar evaporator for simultaneous steam and power generation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31: 2010422.
- [45] GUO Z Z, WANG J, WANG Y F, *et al.* Achieving steam and electrical power from solar energy by MoS₂-based composites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131008.
- [46] SUN H X (孙寒雪), CHAN W J (禅文君), WANG Y J (王韵佳), *et al.* Construction and application of two-dimensional membrane materials based on CMPs[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2021, 38(12): 2433-2437.
- [47] ZHU L L, DING T P, GAO M M, *et al.* Shape conformal and thermal insulative organic solar absorber sponge for photothermal water evaporation and thermoelectric power generation[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9: 1900250.
- [48] JI B X, CHEN N, SHAO C X, *et al.* Intelligent multiple-liquid evaporation power generation platform using distinctive jaboticaba-like carbon nanosphere@TiO₂ nanowires[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7: 6766-6772.
- [49] XIE W C, TANG P, WU Q D, *et al.* Solar-driven desalination and resource recovery of shale gas wastewater by on-site interfacial evaporation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 132624.
- [50] SHAN X L, ZHAO A Q, LIN Y W, *et al.* Low-cost, scalable, and reusable photothermal layers for highly efficient solar steam generation and versatile energy conversion[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2020, 4: 1900153.
- [51] CAI C Y, WANG Y Q, WEI Z H, *et al.* Biomimetic 3D membranes with mxene heterostructures for superior solar steam generation, water treatment, and electricity generation[J]. *Solar RRL*, 2021, 5: 2100593.