

太阳能驱动水蒸发发电系统的研究进展

许自洁¹, 杨修春^{1,2}, 王语凡¹

(1. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要: 太阳能驱动水蒸气产生(SSG)可应用于海水淡化、污水处理等领域, 对获取纯净水和解决水资源短缺问题具有重要意义。通过提高光热材料的光热转换性能、水传输速率和系统的热量管理, 可实现超高的太阳能蒸气转换效率。太阳能驱动水蒸发发电系统拓展了 SSG 的功能性, 进一步提高了系统的能量利用率, 为小型电子器件、柔性穿戴设备和偏远地区供电提供了创新模式。太阳能驱动水蒸发发电系统主要分为在 SSG 基础上集成发电模块和自供电 2 类发电方式。本文总结了太阳能驱动水蒸发发电系统的研究进展, 分析了不同发电模式和材料类型的优缺点, 对太阳能驱动水蒸发发电系统面临的挑战和未来的发展进行了分析和展望。

关键词: 太阳能驱动水蒸气产生; 水蒸发诱导发电; 集成发电模块; 自供电发电模块; 光伏效应

中图分类号: TB321 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)01-0255-18

网络出版时间: 2023-12-01



水是生命之源, 也是病毒微生物传播和有毒有害物质进入人体的主要媒介。据统计, 地球上仅有 2.5% 的淡水资源可以满足人类的需要^[1]。即便如此, 部分淡水还遭受生活污水、工农业生产所产生的废弃物污染的威胁。净化水体、循环利用水资源和淡化海水逐渐成为对抗水资源短缺的重要手段。目前, 化石能源日益枯竭, 其燃烧易产生有毒有害气体, 造成温室效应, 影响全球气候, 迫切需要一种替代能源。太阳能是一种清洁、可再生的能源, 高效利用太阳能是解决能源危机和环境污染的重要手段之一。太阳能驱动水蒸气产生(SSG)装置通过光热转换过程将太阳能直接转换为热能, 导致海水或污水蒸发, 冷凝后收取获得纯净水, 可用于海水淡化^[2-4]、污水处理^[5]等领域。相比于其它太阳能利用形式, 太阳能光热转换驱动水蒸发是太阳能利用效率较高的几种主要形式之一, 如太阳能电池的光电转化效率最高仅 47.6%^[6], 而最高光热转换效率接近 100%^[7-8]。太阳能驱动水蒸气产生装置可高效地利用太阳能产生纯净水, 复合发电功能后成为具有潜力解决能源危机问题的一项前景研究。自二十一世

纪以来, 随着人们对水资源匮乏问题的关注, 越来越多的新材料、新结构被用于太阳能水蒸发, 取得了巨大进展, 如图 1a 所示。在此基础上, 研究人员探索了太阳能水蒸发诱导电输出, 也取得了一定进展, 如图 1b 所示。因此, 研制出一种集成高效太阳能水蒸气产生和电功率输出的新型太阳能光热材料, 具有重要的理论和实际意义。

1 太阳能驱动水蒸发

水蒸发的物理过程由热量传递和水量交换组成, 其中光热转换过程将太阳辐射能转化为水由液态变为气态的热能, 水分的充分供应则成为水持续蒸发关键。热能促使水分子运动加剧, 当水分子运动的动能足以断裂水分子之间的氢键时, 水分子发生气化, 并因压差或温差从体水逸出而发生蒸发。

在太阳能驱动水蒸发过程中涉及能量转换, 因此太阳能蒸汽转换效率则为评判 SSG 的关键性指标。太阳能水蒸发效率(η)的计算公式:

$$\eta = Q_e / Q_s \quad (1)$$

收稿日期: 2022-05-22. 修订日期: 2022-06-20.

基金项目: 上海市科委纳米专项(0452nm075, 11nm0500700); 上海市基础研究重点项目(05JC14058, 08JC1419000); 国家自然科学基金(50672069).

第一作者: 许自洁(2000—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 杨修春(1965—), 男, 博士, 研究员。

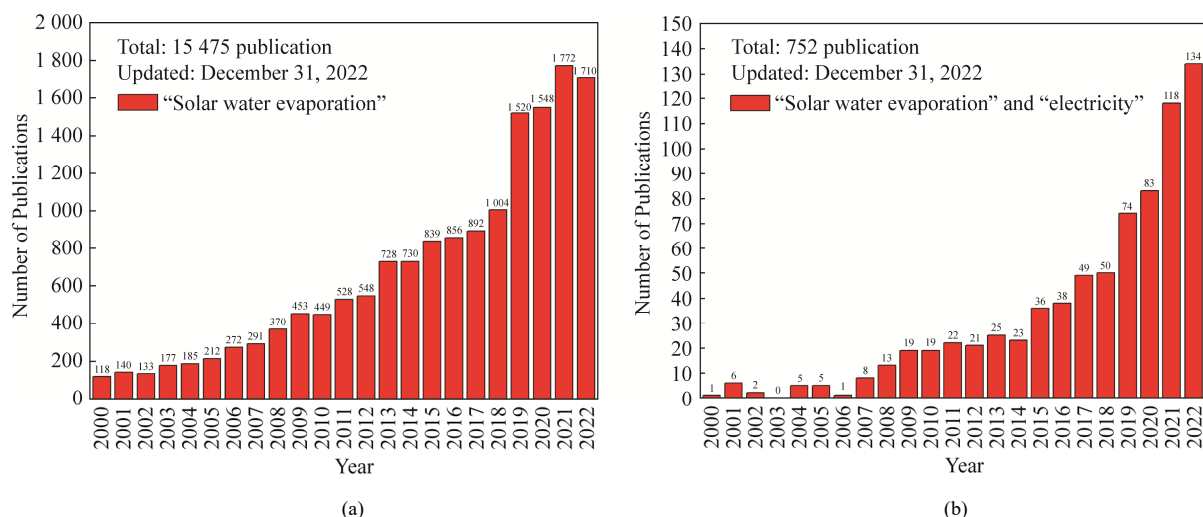
Received date: 2023-05-22. Revised date: 2023-06-20.

First author: XU Zijie (2000—), female, Master candidate.

E-mail: 599223204@qq.com

Corresponding author: YANG Xiuchun (1965—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yangxc@tongji.edu.cn



(a) Number of research articles published per year, obtained from a simple and limited literature search using the keywords “solar water evaporation”. (b) On the base of “solar water evaporation”, number of research articles published per year, obtained from limited literature search, using “Electricity” as the second keywords. (data source: Web of Science)

图1 2000年至2022年太阳能水蒸发相关研究数量

Fig. 1 Number of research articles published about “solar water evaporation” from 2000 to 2022

其中： Q_s 代表了输入的光强； Q_e 是太阳光驱动水蒸发所需要的能量，可由式(2)计算得到。

$$Q_e = H_v \times \left(\frac{dm}{dt} - \frac{\dot{m}}{dt} \right) = H_v \times (r - \dot{r}) \quad (2)$$

其中： H_v 表示水的标准汽化潜热($\sim 2260 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。 m 和 $\dot{m}$ 分别为光照下以及暗场下(无光照)的蒸发质量。 t 为蒸发时间。 r 和 $\dot{r}$ 分别为光照下水的蒸发速率和暗场下水的蒸发速率， $(r - \dot{r})$ 是水净蒸发速率。

为追求更高太阳能水蒸汽转换效率，太阳能水蒸发系统经历了一系列结构变化^[9]，在原始蒸发过程中，太阳辐射使水体加热，由于水对太阳能吸收率低，太阳能水蒸发速率也低。为此，研究人员在水中加入太阳能吸收材料，以提高太阳能水蒸发速率。由于吸热材料密度大于水，很容易沉入水底，吸收的太阳能基本用于水体加热，太阳能蒸汽转换效率低(图2a)。之后，研究人员将纳米粒子随机分散在基液中，可制成相应的纳米流体。相比于没有添加纳米粒子的基液，纳米流体的光吸收性能明显提高^[10]。将纳米流体作为体吸收式太阳能集热器的工作介质直接吸收太阳光，已引起不少学者的广泛研究^[11–12]。典型的材料包括碳纳米材料^[13–14]和贵金属纳米材料^[15–19]。由于贵金属纳米颗粒的等离子共振吸收谱较窄，为了拓宽其吸收光谱，研究人员研制出了空心结构、核壳结构纳米颗粒及纳米棒^[20–22]。美国莱斯大学Halas研究组^[23]报道了利用聚焦太阳光($\geq 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)照射分散于液体中的贵金属纳米颗粒，发现有蒸气产生。研究表明，被纳米颗粒吸收的太阳能中，80%

以上的能量用于蒸发其周围的水蒸气液体，剩下的能量用于加热液体介质，总的太阳能转换效率为24%。除了贵金属纳米材料外，研究人员也在研究价格低、制备工艺简单、化学和热性能稳定、光谱吸收宽的材料如过渡金属氮化物和碳化物等^[24–27]。纳米流体太阳能蒸汽发生器的光热转化效率较低，同时，纳米颗粒在悬浮液中的稳定性也成为其实际应用的障碍^[28–29]。虽然可以利用表面活性剂使得纳米颗粒在流体中保持稳定，但是多数的表面活性剂稍作加热就会分解失效^[30]。

因此，近年来，更多的研究集中于开发固体太阳能蒸汽发生器。Wang等^[31]报道了利用Au纳米颗粒自组装膜可以快速产生蒸气，实现了从水体加热到表面水加热的飞跃，降低了能量损失，提高了太阳能水蒸气生效产率(图2b)。为了进一步提高太阳能蒸气产率，研究人员开发出了双层结构太阳能蒸汽发生器(图2c)^[32]。上面一层是多孔结构的光吸收层，具有较高的全光谱吸收能力和亲水表面，不与水体直接接触；下面一层是多孔结构的隔热层，引导层下面的水通过毛细管力扩散到吸光层，同时阻止吸光层的热向下层的基质水扩散，以降低热损耗。Ito等^[33]研究了多孔石墨烯体材料的光热性能，解决了二维石墨烯的平面特征和疏水性等问题，显著提高了太阳能蒸气产率。Sajadi等^[34]制备出了三维多孔聚二甲硅氧烷，并用它取代双层结构中的碳泡沫和阳极氧化铝，在太阳光照射下，蒸气温度高达156℃，蒸气压高达525 kPa。

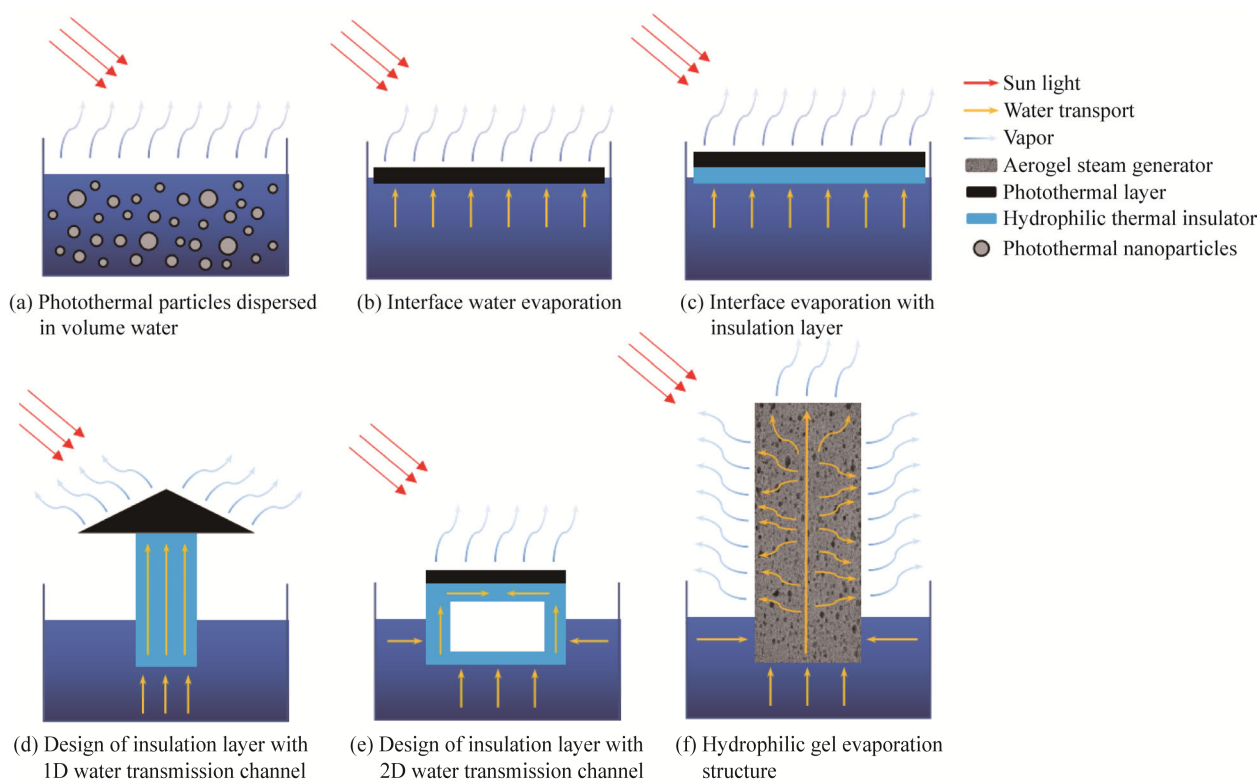


图 2 不同类型太阳能水蒸发装置结构和水传输通道示意图

Fig. 2 Different types of structure and water transmission channel of solar-driven steam generations

双层固体蒸发器构建了带有隔热层的多层光热蒸发结构, 隔热层需要承担水的传输功能, 隔热层的孔隙被水填充后热导率明显提高, 热损失增加。为了降低隔热层导致的热量损失和保证充足的供水, 研究人员设计出一维和二维结构水通道^[35], 如图 2d 和图 2e 所示。Xu 等^[36]将伞状的碳化蘑菇作为蒸发器, 顶端的黑色菌体作为光热层, 亲水菌柄通过毛细管力将水分泵入菌体, 碳化蘑菇水蒸发速率可达到 $1.475 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Li 等^[37]将光热蒸发层氧化石墨烯(GO)膜与热绝缘体聚苯乙烯泡沫(导热系数为 $0.04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)结合, 与体水物理隔开并抑制热量的向下传导。纤维素薄膜将氧化石墨烯膜和聚苯乙烯泡沫隔开并沿绝热体表面垂下, 与水接触的纤维素薄膜成为输送水的路径, 在一个太阳光照下蒸发速率为 $1.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 太阳能蒸气转化效率可达 80%。

太阳能水蒸发装置精心设计的多层结构赋予了其丰富的功能, 大幅提升了太阳能蒸汽转换效率, 但也存在多层结构之间的适配性不足和整体结构的弱稳定性与低寿命的问题。为此, 研究人员还开发了多合一结构。如 Hu 等^[38]制备出了含碳纳米管/藻酸钠的氧化石墨烯气凝胶, 1 个太阳光照下, 太阳能蒸气转化效率接近 83%, 水蒸发速率达

到 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; Ren 等^[39]采用化学气相沉积法制备出多级石墨烯泡沫, 1 个太阳能蒸气转化效率超过 90%; Yang 等^[40]制备出集吸光层与隔热层于一体的蜂窝状石墨烯泡沫, 1 个太阳能蒸气转化效率接近 87%; Zhao 等^[41]制备出基于聚乙烯醇-聚吡咯的多级纳米结构凝胶, 1 个太阳能蒸气转化效率接近 94%; 最近, Guo 等通过调控 PVA 水凝胶表面形貌, 1 个太阳能蒸气产生速率达 $2.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 效率为 91%^[42], 随后制备出具有疏水岛状斑块的亲水性水凝胶, 1 个太阳能蒸气产生速率达 $4.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 效率为 93%^[43]; Li 等^[44]制备出三维内联多孔碳泡沫块体, 1 个太阳能蒸气产生速率高达 $10.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

在太阳能驱动水蒸气产生装置的研究发展中, 主要通过提高光热材料的光热转换性能^[45-48]、对水的供给速率^[49-50]和系统的热量管理^[37]来提高太阳能水蒸发转化效率。我们课题组将氮化钛纳米颗粒、纳米管和纳米线沉积到玻璃纤维或经过碳化处理的木块上, 得到一种新型的双层太阳能蒸气发生材料。TiN 纳米材料具有比以往报道过的光热转换材料(如等离子体金属、碳基材料和半导体纳米材料)更好的稳定性、更经济的价格、更低的毒性、更宽和更强的光吸收能力等多重优点。在模拟太阳光强度为 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 下, TiN 纳米颗粒-C 泡沫具有 92.5% 的太

太阳能蒸气转换效率,是已知的木基光热转换材料中的最高效率^[51]。多级结构 TiN 纳米管网与玻璃纤维棉复合,在 $2.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 模拟太阳光照射下,其太阳能蒸气转化效率为 85.36% ^[52]。在碳泡沫上生长 TiO_2/TiN 树枝状纳米线,在模拟太阳光强度为 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 下,其太阳能蒸气转化效率达 94.01% ,太阳能水蒸发速率达 $1.5252 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[53]。

2 太阳能水蒸发发电系统

目前太阳能驱动水蒸气产生可稳定高效地应用于海水淡化。利用太阳能水蒸发诱导发电,是一种具有新颖的设计思路和多场景应用前景的研究领域,可实现电力输出,为远离电网人群提供必须的生活用水和电力。太阳能驱动水蒸发发电系统从单一功能的水蒸发装置向多功能的水蒸发发电系统发展时,太阳能水蒸气转换效率必然将为电力的可持续生产做出让步,将部分的太阳能利用率集中于发电效率中,同时增加生产成本与系统结构复杂性。

为解决电力高需求和传统能源枯竭危机问题,集成太阳能驱动的水蒸发发电系统成为研究热点。太阳能水蒸发发电系统主要可分为 2 类,一类是将光热蒸发装置和其它辅助发电装置连接,主要包括利用光能的光伏设备、回收水蒸汽热能的热电模块、利用盐浓度梯度的盐差膜结构、利用蒸汽凝结过程的纳米摩擦发电机等。发电装置与水蒸发装置分别已是成熟的研究领域,均可通过合理的集成和连接实现,具有稳定性和互补性,且可直接利用商用发电模块进行电力生产,但无法避免联合结构之间的能量损耗。

另外一类为无其它发电辅助装置连接的自供电模式—太阳能水蒸发发电系统,这类发电可直接通过水在光热材料孔道中的运动来发电,具有独特的发电机理。主要研究的材料类型包括碳材料、聚合物、金属—有机框架(MOF)、硅纳米阵列等。此类太阳能水蒸发发电系统为结构—功能一体化,制备简单,应用前景广阔,成为目前研究的热点。

2.1 集成式太阳能水蒸发发电系统

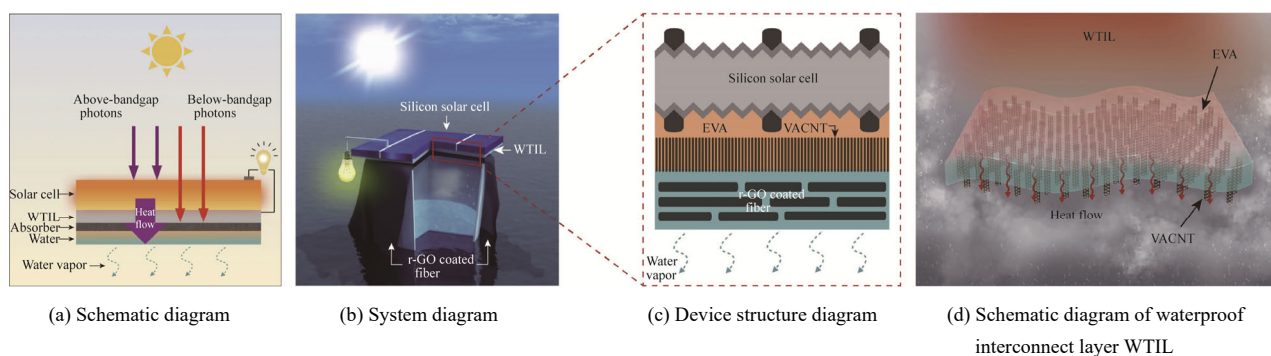
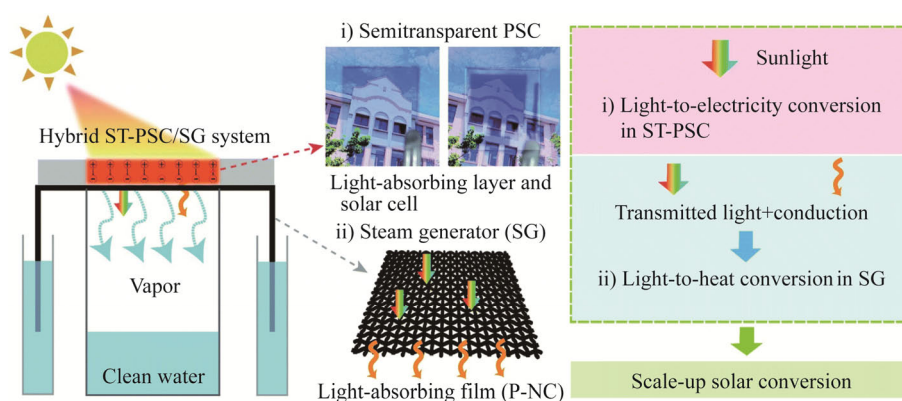
太阳能水蒸发发电系统作为一类综合性的发电系统,最典型的方式是利用电路将蒸发结构与发电装置或储能装置相连接起来。两种装置之间需要考虑适配相容性以及连接造成的能量损耗。除了将二者相连接起来,也有研究人员通过平面集成或共用电极的方式设计一体化的混合发电系统。

2.1.1 光伏装置协同水蒸发装置发电 从能量转

换路径方面考虑,利用太阳能发电最直接的方式是将光能直接转化为电能。迄今为止,单节光伏(PV)电池的太阳能光电转换效率仍然低于 30% , 70% 以上的太阳辐射能量被浪费^[6]。为了充分利用太阳辐射,将部分不能被电池利用的太阳能转换成热能,实现太阳能水蒸发,将光伏电池与水蒸发装置联合起来,可有效长期生产纯净水和输出电力。

Cui 等^[54]将太阳能电池与水蒸发装置进行联合,将太阳能电池产生的电力加热石墨烯,使太阳能水蒸发速率大幅提升。利用太阳能电池的非全光谱吸收和需要冷却的特点,Xu 等^[55]设计制造了红外透明晶体硅(Si)光伏电池和还原氧化石墨烯(r-GO)基太阳能水蒸发装置的串联系统。硅太阳能电池与栅电极两侧为红外透明,它允许低于带隙能量的光子通过,被下面的 r-GO 基质吸收转化成热能。r-GO 基质两端与水源(如海水、废水)直接接触,如图 3b 中的黑色纤维,可实现连续供水;而光伏电池和 r-GO 基质之间由一层防水的热量互连层紧密连接,如图 3c 橙色区域。防水热量互连层(WTIL)由低水蒸气穿透率的乙烯醋酸乙烯酯膜(EVA)、和优异导热性能的垂直排列的碳纳米管(VACNT)组成,2 种材料的组合可引起膜两面的不对称湿润特性,使光伏电池不受水蒸气影响而正常工作,同时,WTIL 可沿着图 3a 中装置内的紫色路径将光伏电池的热能传导至水蒸发装置。因此,防水热量互连层可使光伏电池与蒸发装置协同工作:底部 r-GO 基质水蒸发装置源源不断地吸收海水冷却顶部晶体硅太阳能电池,提高光伏电池效率,而顶部电池的热能被底部水蒸发装置再利用,向下发生蒸发冷凝,并在下方收集纯净水。这样的串联太阳能水蒸发发电装置在 1 个阳光照射下,输出功率高达 $204 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、净化水速率为 $0.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,整体太阳能利用率达到 74.6% 。

相比于硅基太阳能电池厚重、吸收带不可控,半透明聚合物太阳能电池具有轻质和可控厚度、成本低、高透光率等优点^[56],Ji 等^[57]提出利用将半透明聚合物太阳电池(ST-PSCs)与界面水蒸发装置(SG)结合(图 4a)。界面太阳能吸收材料 P-NC 膜,是在纤维无纺布上原位氧化聚合聚吡咯(PPy)形成的。封装好的高性能的 ST-PSCs 置于 SG 之上。相比于非透明聚合物太阳能电池(PSC)与蒸发集成系统(PSC/SG),半透明聚合物太阳电池(ST-PSCs)与 SG 直接接触集成的蒸发发电系统,具有更高的太阳能利用效率。这是由于和 PSC 相比,ST-PSC 更薄的

图 3 集成串联式太阳能水蒸发发电装置^[55]Fig. 3 Integrated or tandem mode of solar-driven steam-electricity systems^[55]图 4 单片倒置结构的 ST-PSC/SG 混合系统的原理图^[57]Fig. 4 Schematic illustration of the ST-PSC/SG hybrid system based on a monolithic and inverted structure^[57]

Ag 阴极可降低光反射率, 增强太阳光透过率。透过的太阳光被 P-NC 膜吸收并转化加热。该研究中最佳透明度的 ST-PSC/SG 在 1 个太阳下的光电转换效率高达 12.2%, 光热转换效率为 76.6%, 输出功率为 $122 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 水蒸发速率提高到 $1.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.1.2 水蒸发废热的回收发电 界面加热水蒸发的方式相比于传统底部加热、体水加热蒸发, 可有效提高太阳能水蒸发效率, 降低太阳能加热水引起的能量损失^[31], 但界面光热材料和体水之间的温差将导致热对流和传导, 造成能量损失。于是有研究者收集太阳能蒸发过程的废热发电, 主要包括利用塞贝克效应的热电纳米发电机(TNGs)、利用热释电效应的热释电纳米发电机(PNGs)和利用氧化还原反应的热电化学电池(TECs)。

Ho 等^[58]协同热电(TE)模块和 PCC 海绵, 应用于太阳能水蒸发产生纯净水和输出电力, 如图 5a 所示。PCC 海绵是将碳纳米管(CNT)和纤维素纳米晶体(CNC)复合到聚二甲基硅氧烷(PDMS)海绵上制成的。易于成型的 PCC 海绵可覆盖 TE 模块的上部, 两侧与底部水接触可以有效地输送水(图 5b)。

TE 模块的下侧浸入水中, 作为隔热体抑制了热量向上传导。PCC 海绵吸收太阳能加热 TE 模块上侧, TE 模块通过上下表面的温差触发 Seebeck 效应发电。一个太阳光照下, TE 模块将 PCC 海绵的太阳能蒸发速率由 $1.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 提升至 $1.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 覆盖 PCC 海绵将 TE 模块的最大开路电压由 26 mV 提升至 60 mV。Cao 等^[59] CNT 网络太阳能蒸发器和热电模块(TE)进行有效整合(如图 5c), 实现了界面太阳能水蒸发和良好的发电性能。上层为亲水碳纳米管泡沫, 中层为 TE 模块, 下层的石蜡提供与蒸发器之间温差。在一个太阳光照强度下, 输出功率密度可达到 $0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 水蒸发速率高达 $5.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

利用水的蒸汽焓进行发电也是一种热能转化成电能的方式(图 6)。利用太阳能蒸汽加热铝腔的同时被冷凝, 在腔室出口处产生干净的水, 而蒸汽中的能量则被保留在腔室中, 铝腔和室温环境之间形成的温度梯度, 并用热电模块进行收集发电^[60](图 6a)。Ho^[61]制备出超轻质量的富氮碳海绵(CS), 其三维弹性结构可吸收水分并进行高效的原位光热汽化。与 Seebeck 效应需要稳定温差的发电原理不同, 热释电

效应是通过温度随着时间震荡收集能量, 其中, 聚偏氟乙烯(PVDF)可以被制成具有良好热释电性能的柔性薄膜热释电发电机。当水蒸气凝结在 PVDF 表面时, 温度升高引起 PVDF 薄膜永久偶极矩缩短, 并引起外部电路诱导电流。当自然气流经过 PVDF 时, 微小水滴迅速蒸发引起 PVDF 温度降低, 聚合物偶极矩增大再次引起反向电流^[62]。PVDF 作为常见

的聚合物压电材料, 可在微小的机械应变下产生电能。因此基于 CS 的优异蒸气产生能力, 研究人员使用 PVDF 来收集太阳能汽化的热力学响应(示意图如图 6b), 通过 PVDF 薄膜在蒸发凝结过程中的受热–冷却和轻微振荡, 测量了热释电效应和压电效应的耦合发电效果(图 6c), 显示出电压随温度的波动响应为主导的发电模式。

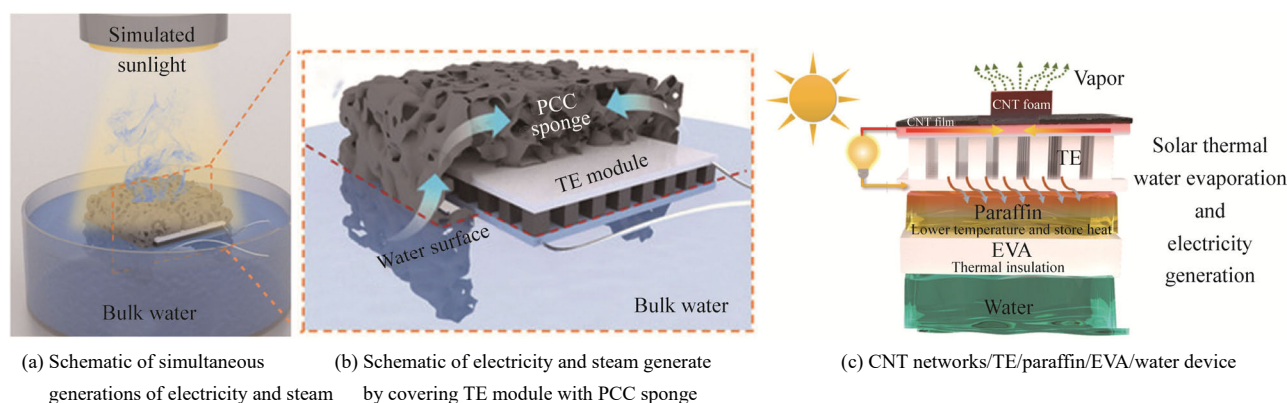


图 5 利用热电模块实现太阳能水蒸发发电^[58–59]

Fig. 5 Thermoelectric modules assist in achieving solar-driven water evaporation-electricity generation^[58–59]

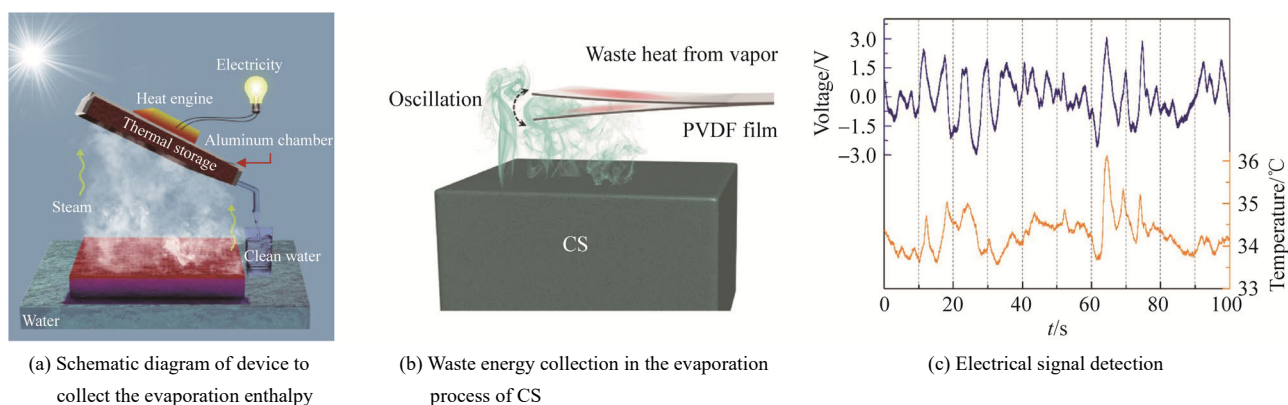


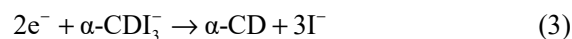
图 6 回收蒸发焓中的废弃能并持续产生结晶水和发电^[60–61]

Fig. 6 Storage and recycling of solar steam enthalpy for simultaneous generation of clean water and electricity^[60–61]

相比于热电材料, 热电化学电池可实现低成本, 和高出一个数量级的 Seebeck 系数(S_e), S_e 可以度量材料上的温度差引起的热电电压大小, 因此较大的 Seebeck 系数对于热电材料的功率转换效率至关重要^[63]。Deng 的工作^[64]展示了 1 个开放的 TEC 系统, 利用了界面蒸发与体水之间产生的固有温差, 在太阳能驱动的界面蒸发过程中产生电能, 如图 7 所示, 上部的电极为太阳能水蒸发装置, 置于气液界面处, 当系统受到太阳光照射时, 两个电极之间会产生温差, 依赖于温度发生反应的氧化还原对 I_3^-/I^- 在电极表面发生电子交换从而产生电流, 其中

环糊精(α -CD)可以潜在地促进 I_3^-/I^- 在低高温下发生氧化还原反应, 提高此 TEC 系统 S_e 。

上电极(高温侧):



下电极(低温侧):



在一个太阳光光照下, 制备的 TEC 在海水电解质的蒸发速率约为 $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, TEC 的太阳能蒸汽转换效率约为 60%, 输出功率峰值约为 $0.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 且海水淡化过程中, 凝结后收集的海水中的阳离子 (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+) 浓度大幅度降低。

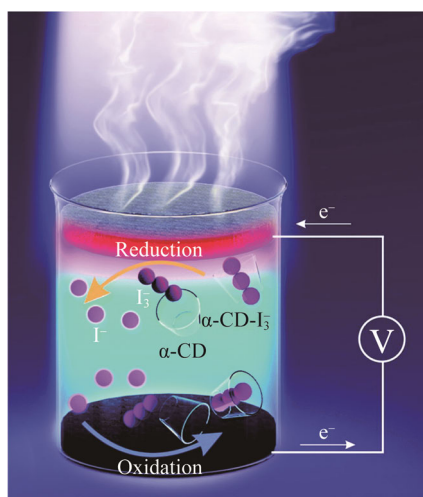


图 7 界面蒸发装置和开放式热化学电池系统结合示意图^[64]
Fig. 7 Schematic diagram of interface evaporation device and open thermochemical battery system^[64]

2.1.3 蒸发引起的盐浓度梯度发电 在太阳能驱动的海水淡化装置中, 水蒸发过程中会引起离子浓

差极化, 即蒸发表面附近离子浓度与海水中的盐浓度产生盐度梯度。因此有学者利用膜结构将蒸发引起的盐浓度梯度在海水淡化时输出可观电力。

Yang 等^[65]设计制造了基于 CNT 改性滤纸和 Nafion 膜组成的太阳能蒸发系统, 如图 8a 所示。光吸收器上太阳能水蒸发, 促使光热转换材料下方的水与海水之间产生盐浓度差。该系统不仅实现了 75% 的太阳能蒸汽转换效率, 并在一个太阳光强下获得了约 $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的可持续功率。随后将 TEC 和反电渗析 (RED) 膜技术协同集成, 可将温度梯度、盐度梯度转换成电能, 如图 9 所示^[66]。RED 的 2 个半电池之间夹着 TEC 电池, RED 和 TEC 的半电池之间被 2 个由碳布、Nafion 膜和 Ag/AgCl 3 层复合电极隔开, 只允许 K^+ 传输扩散。根据反应动力学, 2 类电池的极化主要由电解质的扩散和对流等过程控制, 因此两种电池单独发电时存在浓差极化: K^+ 过剩堆积在 TEC 的冷侧和 RED 的高盐度侧, 而 K^+ 空位堆积在 TEC 的热侧和 RED 的低盐度侧。

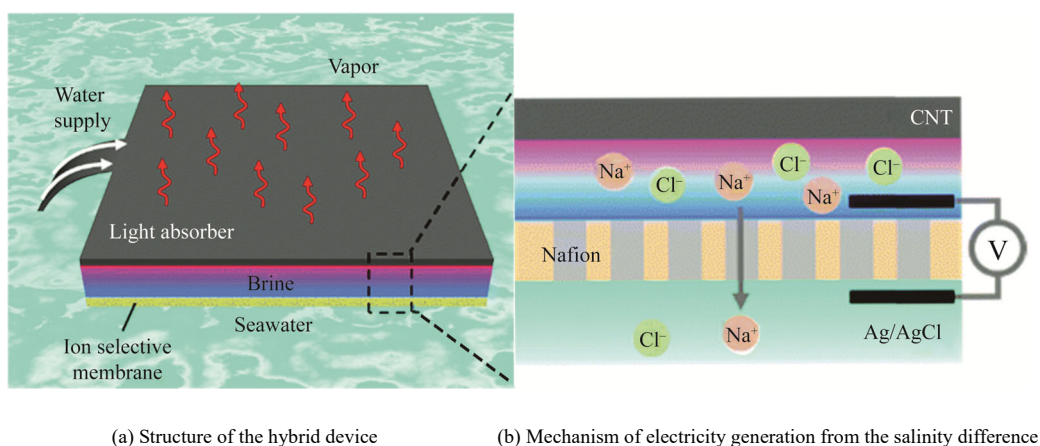
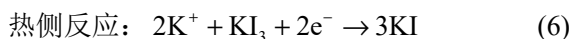
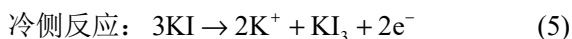


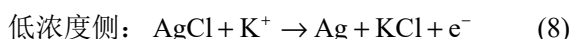
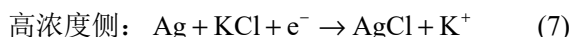
图 8 用于海水淡化和盐差电力提取装置示意图^[65]

Fig. 8 Schematic diagram of the hybrid system for solar desalination and salinity power extraction^[65]

其中, TEC 电池中发生:

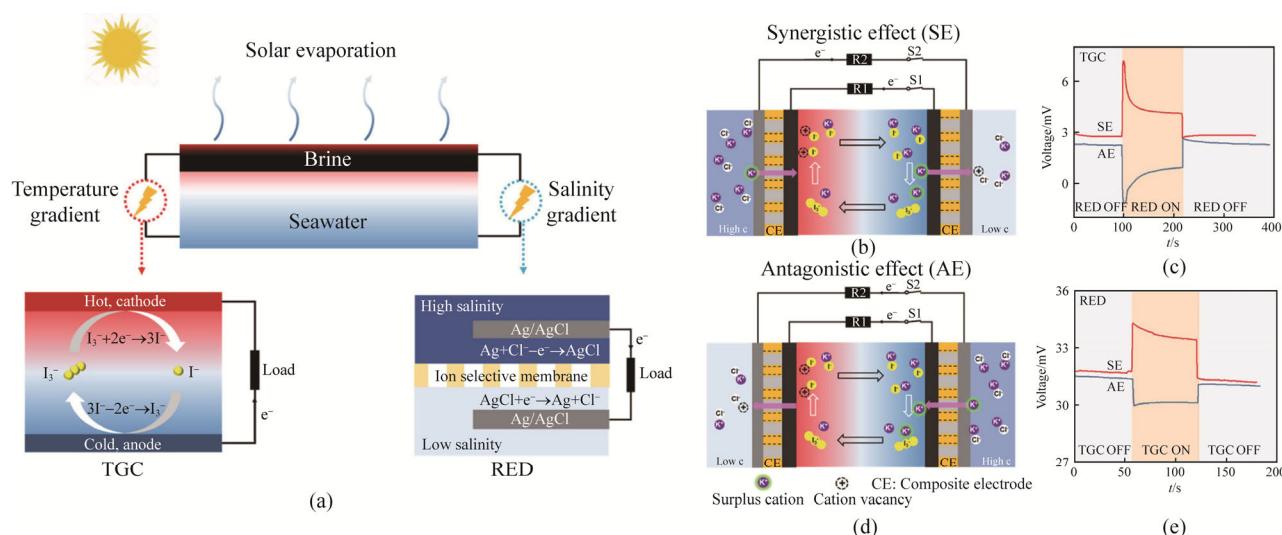


RED 电池中发生:



因此, 为解决两种电池在动力学方面存在的 K^+ 浓度极化问题, 通过合理布局 TEC 和 RED 电池的两侧, 制备双电池耦合的复合电极, 从而实现数量级的功率增强。Zhou 等^[66]将 TEC 的冷侧与 RED 的低盐度侧相邻分布, 设计出 TEC 和 RED 双电池耦

合, 由温差引起的 TEC 反应会在冷侧堆积 K^+ , 同时在 RED 的低浓度侧与冷侧间形成 K^+ 浓度差, K^+ 自发通过 Nafion 膜中和 K^+ 空位, 实现 TEC 和 RED 中的 K^+ 浓度极化同时被抑制。图 9b、图 9d 为在具有协同效应和反协同效应条件下的 TEC 和 RED 反应示意图, 图 9c、图 9e 的红线均代表协同效应下合理双电池耦合对单一电池电压输出的增强效果, 蓝线则代表反协同效应下相反的双电池耦合对单一电池电压输出的减弱效果。TEC 和 RED 耦合电池在太阳能水蒸发过程中同时提供了热差与盐差梯度, 1 个太阳光照射下达到 $1.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸汽速



(a) Schematic diagram of dual-cell (b, d) Schematic of the TEC/RED hybrid system presenting the synergistic effect (SE) and the antagonistic effect (AE) with reversed spatial arrangement. (c, e) Voltage-time curves of R1 in TEC and R2 in RED under SE (red curves) and AE (blue curves). "ON" and "OFF" means the switch in the circuit is at on and off state^[66]

图9 TEC和RED双电池耦合太阳能水蒸发发电系统示意图和工作原理图^[66]

Fig. 9 Schematic and working principle diagram of TEC and RED dual-cell coupled Solar-driven steam-electricity system for water generation

率和 $1.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的输出电功率, 在太阳能驱动水蒸气产生装置上协同不同电池, 开辟了一条具有超高太阳能利用率的道路。

2.1.4 其它联合集成发电方式 摩擦纳米发电机 (TENGs) 通过摩擦起电 (TE) 和接触起电 (CE) 的结合, 可将日常生活中的各种机械能转化为电能。摩擦电纳米发电机可通过两种材料之间的物理接触, 在材料表面产生静态极化电荷, 而后材料电势的变化由外电路电子平衡, 使机械能转化为电能^[67], 水等液体与绝缘体的接触也会产生电^[68], 因此可利用水滴撞击 TENGs 来收集机械能。Chen 等^[69]提出了一种将 TENG 与水伏装置 (HD) 相结合的集成装置 (图 10a), TENG 由氟化乙烯丙烯 (FEP) 薄膜和铝电极构成, 用于水滴下落过程收集能量; HD 由硅纳米线 (SiNWs) 和碳电极构成, 利用水伏效应从蒸发过程中获取能量。液滴落在 TENG 表面产生瞬时电信号; 液滴从 TENG 表面滴落, 被水伏装置的碳电极吸入硅纳米线阵列, 水分蒸发产生恒定的电输出。这种集成装置通过充分收集下落水滴和水滴蒸发的能量来发电, 为高效利用水蒸发过程的能量提供了一种新路径。

2.2 自供电模式-太阳能水蒸发系统

近年来, 无其它发电辅助装置连接的自供电太阳能水蒸发系统因其具有开路电压高、制作成本低等优点而备受关注^[70]。2017 年, Xue 等^[71]发现在多

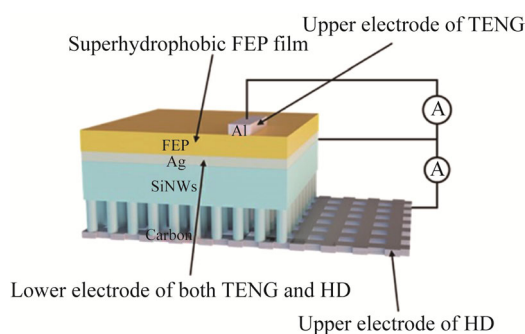


图 10 摩擦电纳米发电机 (TENG) 与水伏装置 (HD) 相结合的集成装置示意图^[69]

Fig. 10 Schematic diagram of the integrated device combining the triboelectric nanogenerator (TENG) and the water-volt device (HD)^[69]

孔炭黑膜上蒸发水溶液有可检测的电信号, 开辟了自供电式蒸发装置的发电系统研究。随后 Zhang 等^[72]提出水伏效应, 即当水在水蒸发过程的驱动下流过固体表面的时候, 水分子与碳材料、聚合物和 MOF 等纳米孔隙结构相互作用产生电势, 自供电式水蒸发发电系统的原理基础就此奠定。这类发电模式是利用蒸发器自身的特殊结构引起的电势, 不限材料种类, 此后研究人员设计的水蒸发器中又包含碳纳米材料、生物碳材料和非碳基材料, 通常制备成膜状结构。

水伏效应是基于水溶液与带表面电荷的固体接触时, 由于界面相互作用产生双电层 (EDL, 图 11a),

该 EDL 层由牢固吸附在固体上的表面离子层(Stern 层)和被表面电荷层吸引的反离子层(称为扩散层)组成^[72]。EDL 产生了一个强电场,在 Stern 层和扩散层之间的剪切面上产生了一个急剧的电位梯度,因此剪切面上电势称为 Zeta 电势^[73]。当液体流动引起扩散层相对于 Stern 层的相对运动时,能有效地将机械能转化为电能,提供基于固液相互作用的一种水能收集形式。因此将水限制在纳米尺度的通道或孔隙中,且通道尺寸与溶液的德拜长度

相当时(溶液中离子为了屏蔽固体表面电荷而聚集,当屏蔽至固体表面静电力的 $1/e$ 的距离的特征长度量度称作 Debye 长度),EDL 将显著重叠,从而使限制于孔隙中的溶液由反离子主导,而液体流动时导致反离子的定向运动,将会在通道两端产生稳定的电位差^[74]。而通过纳米结构与流动、波动、下降和蒸发水的直接相互作用发电,导致材料中出现一种新的能量转换效应,即为水伏效应^[72]。其工作原理如图 11b 所示。

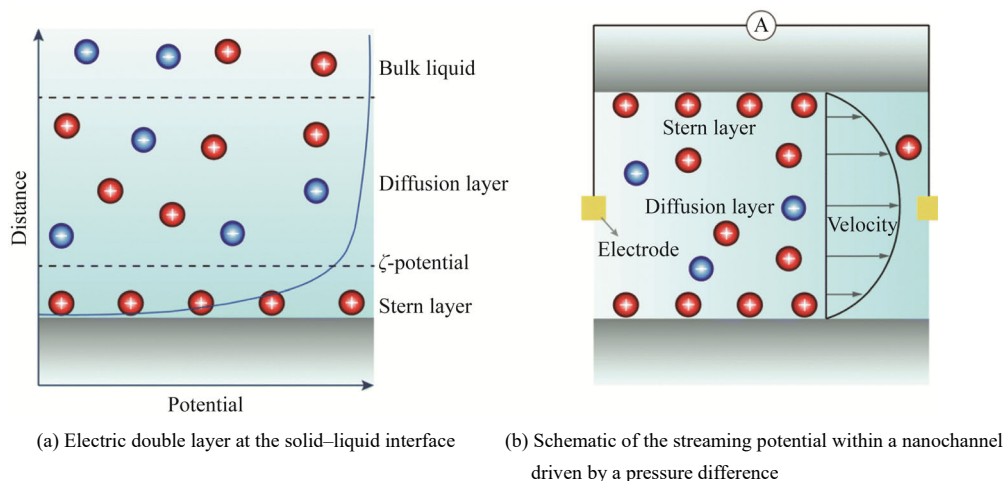


图 11 水伏效应基本原理示意图^[74]

Fig. 11 Schematic diagram of the basic mechanism of hydrovoltaic effect^[74]

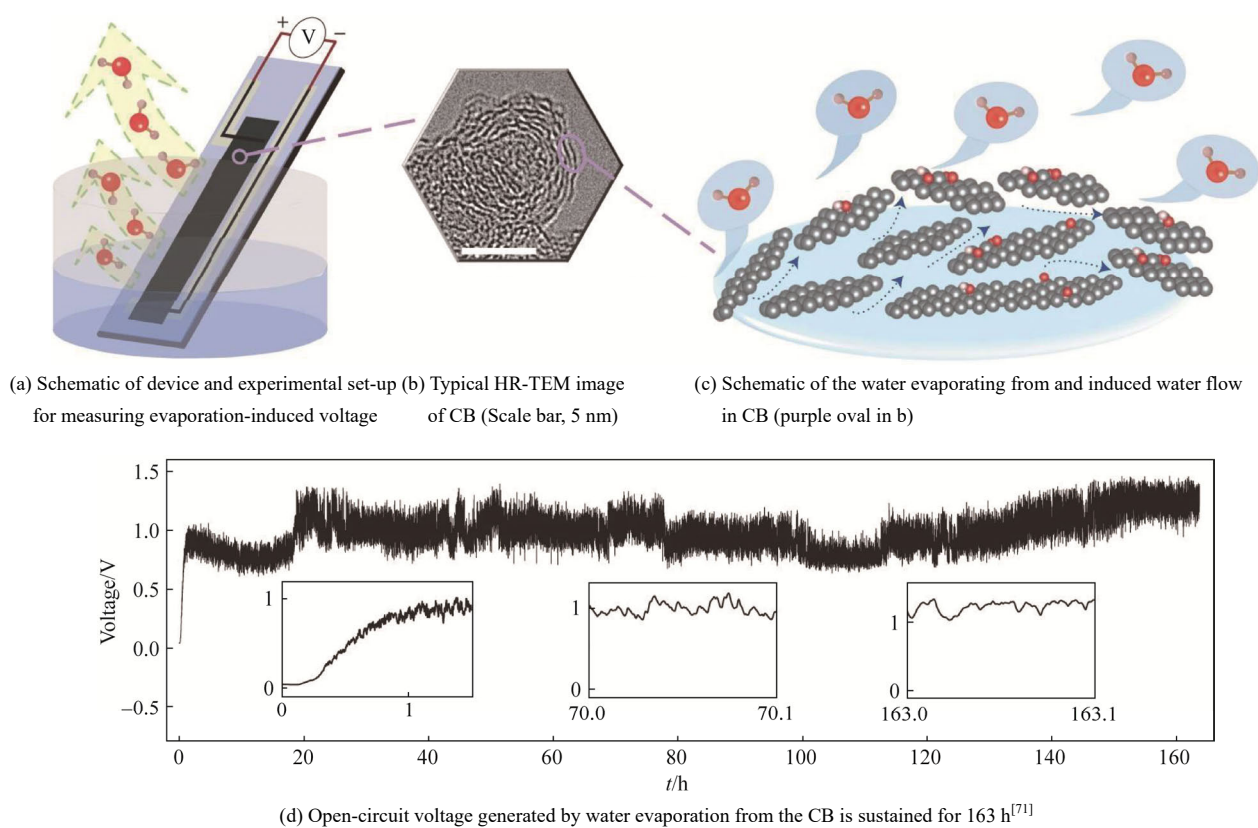
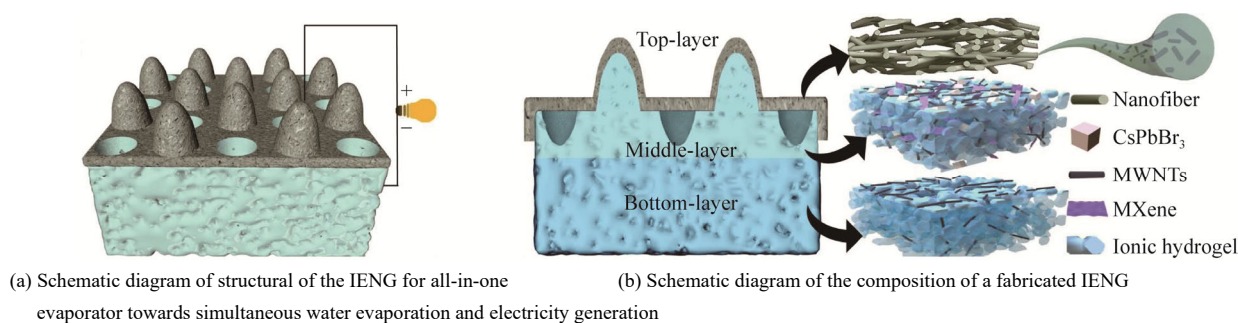
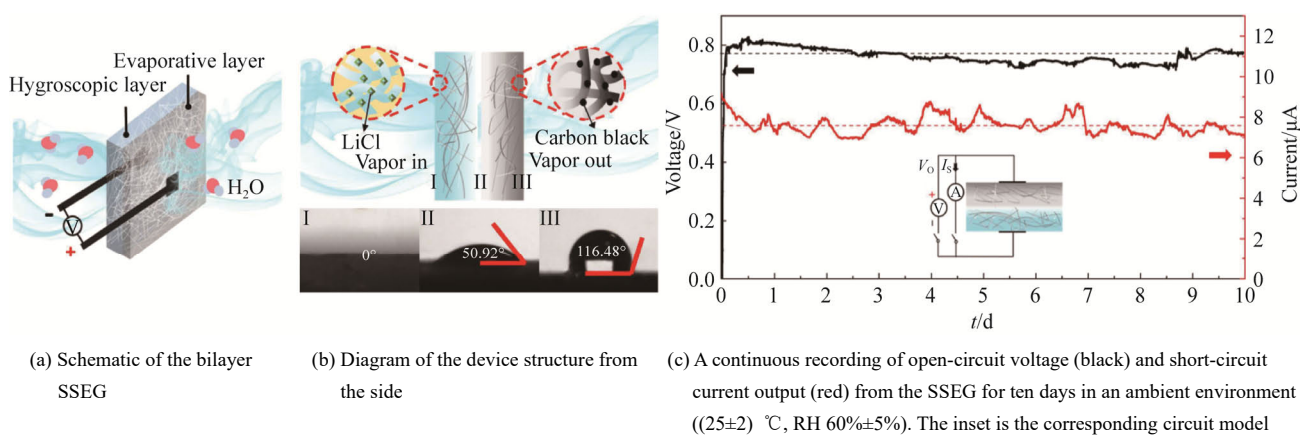
2.2.1 碳基/聚合物基自供电纳米发电机 碳纳米材料具有丰富的三维多级结构,被广泛用于蒸发诱导发电研究。基于水伏效应首次利用于太阳能水蒸发系统,Xue 等^[71]将多孔炭黑(CB)膜经过退火、空气等离子体处理改性后,部分插入水中(图 12a),在毛细力和水蒸发的驱动下,在膜的顶部和底部电极之间产生 1 V 的稳定电压,并在风速为 $2.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时可以将电压提高到 1.5 V(图 12d),验证了输出电压与水分蒸发速率之间的强相关性。随后研究人员发现炭黑膜的几何形状对于输出电压有明显影响^[75]。

Sun 等^[76]开发了一种多层界面蒸发驱动纳米发电机(IENG),多层结构的底部由多孔离子水凝胶供水,中间层为水凝胶混合多壁碳纳米管(MWNT),顶部的纳米纤维层由 MWNT 组成(如图 13b)。研究发现,水蒸发速率和开路电压、短路电流呈现指数关系,在光照强度为 $2 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、风速为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的海水环境下,该装置具有最佳的发电性能,在外部负载为 7460Ω 时,最大开路电压为 0.543 V,最大短路电流为 $121.4 \mu\text{A}$,最大输出功率为 $25.4 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

Guo 等^[77]提出了一种集吸湿和水分蒸发于一体

的自供电式纳米发电机,如图 14a 所示。该发电装置由纤维素纸基的吸湿层和蒸发层组成,并在吸湿层和蒸发层分别添加不同的添加剂实现材料的亲水性和疏水性。吸湿层亲水,可以吸收空气中的水分,蒸发层具有疏水性,吸收太阳能后可以将吸附水蒸发,从而产生持续的水循环,如图 14b 所示。定向蒸发驱动水不间断地流过带有负电荷的通道,能够产生约 0.78 V 的连续电压和约 $7.5 \mu\text{A}$ 的连续电流,且能在自然环境中持续 10 天以上(图 14c)。

2.2.2 碳基/聚合物基自供电纳米发电机 木材作为一种特殊的碳材料,简便易得。基于水伏效应,Zhou 等^[78]利用太阳能辐照浮在水上的天然木材,水蒸发过程中会产生电荷,如图 15 所示。天然木材具有特有的管状通道,水动阻力相对较低。管道表面具有丰富的羟基,可以产生水伏效应。用柠檬酸(CA)的羧基($-\text{COOH}$)官能团修饰木材孔道,可增加木材表面电荷密度的和亲水性,进一步提高输出功率。实验结果表明,单个太阳能水蒸发发电装置的开路电压为 300 mV,短路电流为 $10 \mu\text{A}$ 。Zhang 等^[79]以具有丰富羟基官能团的高导电性椴木为原料,采用

图 12 炭黑膜(CB)中的蒸发诱导发电^[71]Fig. 12 Evaporation-induced electricity in CB^[71]图 13 多层界面蒸发驱动纳米发电机(IENG)^[76]Fig. 13 Design of multilayer interfacial evaporation-driven nanogenerator (IENG)^[76]图 14 吸湿和水蒸发一体自供电式纳米发电机示意图和电性能^[77]Fig. 14 Schematic and electrical characteristics of moisture adsorption and water evaporation integrated self-powered nano generator^[77]

路易斯酸金属盐催化碳化法制备了木基太阳能水蒸发发电装置(WHEG, 图 15b)。碳化后木的低电阻和高 Zeta 电位可以显著提高水蒸发发电能的输出, 并在 45% RH, 20 °C 的环境条件下, WHEG 的最大开路电压为 96 mV, 短路电流为 10.5 μA , 稳定性超过 24 h。通过串联和并联, WHEG 的电学性能可以成倍提高, 可以为小型电子设备如商用计算器和发光二极管供电。

除此之外, 还有一些新颖的生物基膜结构可用于自供电式水蒸发发电系统。Zhou 等^[80]开发了一种基于硫还原地杆菌生物膜的水蒸发驱动发电装置模型(图 16a 和图 16b)。在生物膜的顶部和底部分别附着 2 个 Cu 电极, 当水在生物膜的微通道中

流动时, 含有丰富亲水基团的细胞膜表面容易带负电荷, 正电荷则随着蒸发过程流动。在 90% 的相对湿度下, 器件产生的开路电压约为 0.53 V, 短路电流约为 2.28 μA , 最大输出功率密度约为 685.12 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。生物膜水蒸发驱动发电器件的电输出性能也可以通过串联或并联进行放大, 当 5 个器件串联时, 集成电池的电压、电流分别达到 2.38 V 和 36.2 μA , 可以为电容器充电, 也可用于驱动商用 LED。Yao 等^[81]设计了柔性微生物膜太阳能水蒸发发电器件, 输出电功率密度可达到约 1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 可以贴在皮肤上, 从皮肤上的汗液和水分中收集电力, 700 h 内产生持续电流为可穿戴设备供电(图 16c 和图 16d)。

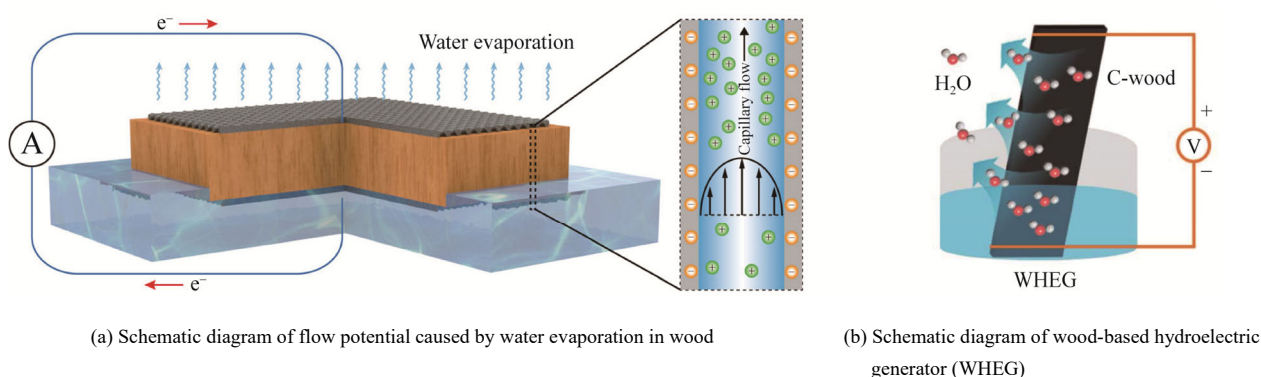


图 15 木材作为水蒸发装置中的水伏效应^[78-79]
Fig. 15 Hydrovoltaic effect in water evaporator with wooden substrate^[78-79]

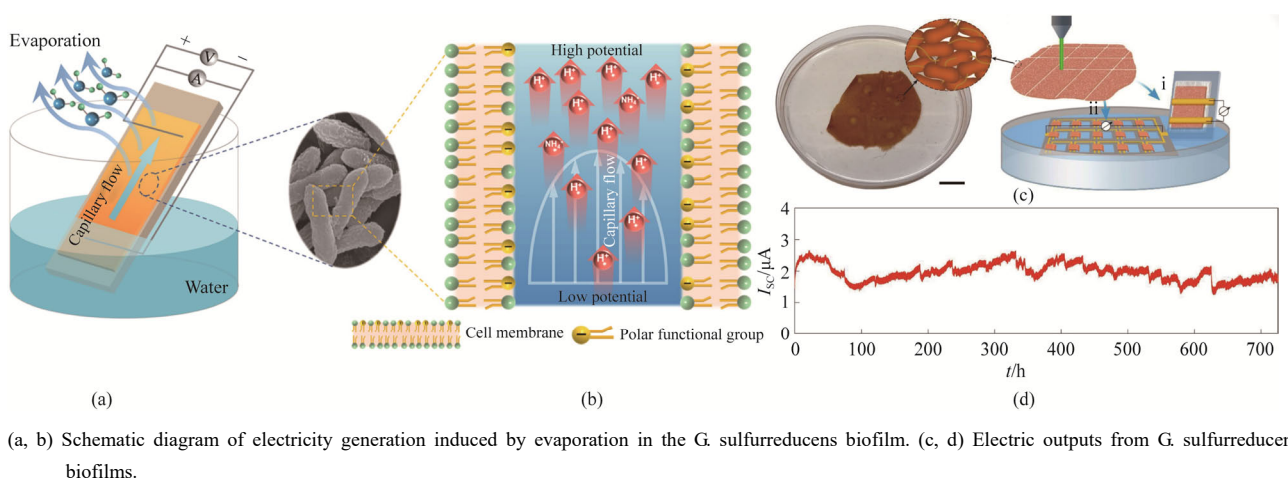


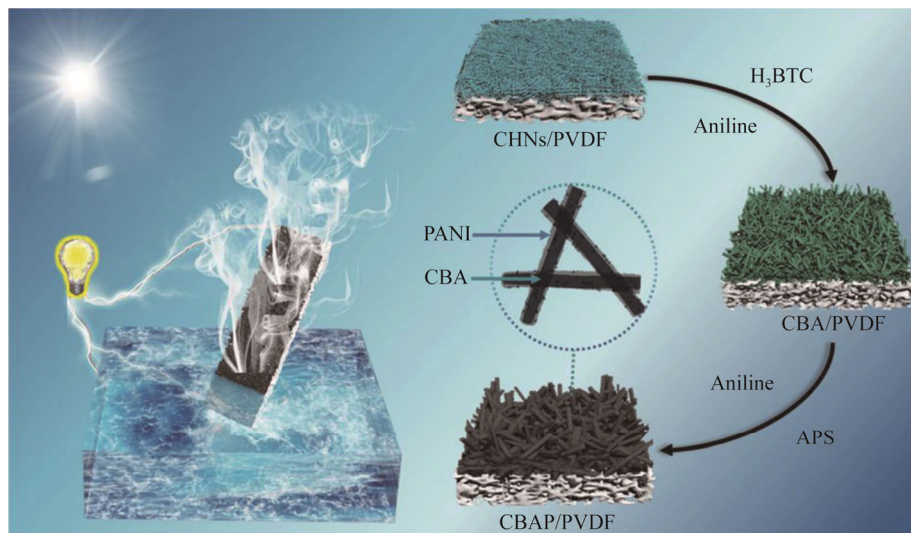
图 16 生物基膜用于自供电式水蒸发发电系统^[80-81]
Fig. 16 Bio-based membranes used in self-powered electricity generation system^[80-81]

2.2.3 非碳基自供电纳米发电机 金属有机骨架(MOFs)具有高孔隙率、大的比表面积和可调的理化性能。Li 等^[82]首次报道了非碳基自供电式水蒸发发电系统材料, 借助于 MOFs 材料的高孔隙率、带电表面和亲水性, 在聚偏氟乙烯(PVDF)衬底上制备了

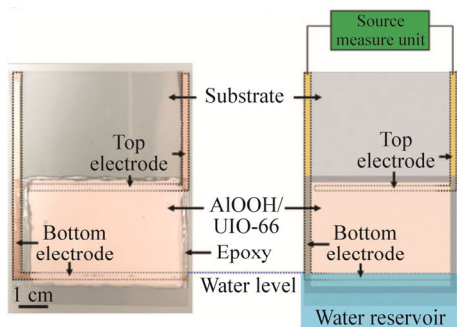
MOFs 材料 Cu-BTC ($[\text{Cu}_2(\text{OH})(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})]_n \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (CBA) 纳米棒阵列, 该纳米棒阵列被聚苯胺(PANI)包覆成 CBAP 膜, 制备流程图如图 17a。所制备的 CBAP 膜基器件在 0.1 mmol/L NaCl 溶液中持续产生高达 709.3 mV 的开路电压, 在类似海水盐浓

度的 0.6 mol/L NaCl 溶液中最大输出功率密度为 $15.377 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在 1 个太阳下持续 12 小时稳定水蒸发速率为 $1.866 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，按照串联结构构造的放大装置能够点亮 led 灯，并为计算器和计时器供电。其中，PVDF/CBAP 膜可以有效、高效地从无处不在的太阳能和自然蒸发过程中获取能量，同时产生淡水和电力。Ma 等^[83]通过在二维 AIOOH 纳米

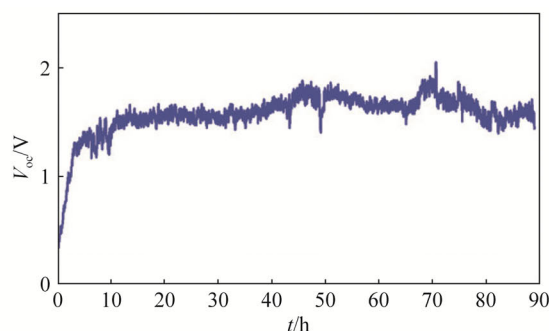
薄片上生长 UIO-66 纳米粒子，设计并合成了一种基于金属有机框架的新型杂化纳米材料(图 17b)。利用 AIOOH 纳米薄片的二维片层形貌之间的水光伏效应和来自 UIO-66 纳米颗粒的高表面电位的综合优点，由 AIOOH/UIO-66 混合纳米材料制成的器件可以从自然水蒸发中获取电能，开路电压可高达 $(1.63 \pm 0.10) \text{ V}$ (图 17c)。



(a) Synthetic process of CBAP membrane and the synergy of evaporation-driven electricity generation and solar steam desalination



(b) Photo and schematic of a typical AIOOH/UIO-66-based device



(c) Plot of time-dependent V_{oc} in a device made of AIOOH/UIO-66

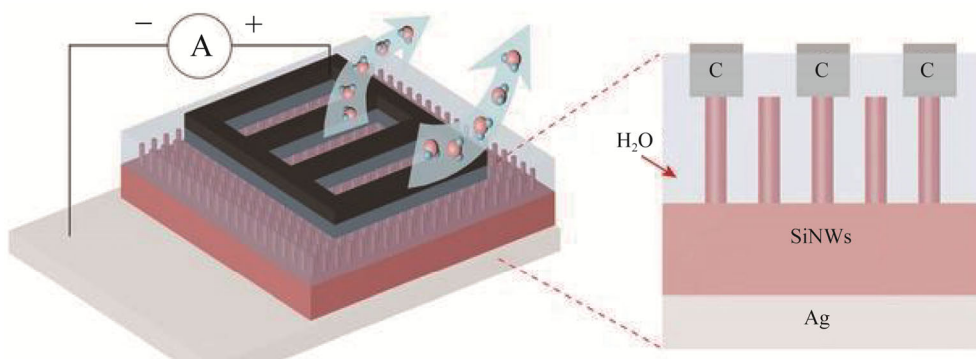
图 17 金属有机骨架自供电纳米发电机示意图和电性能^[82–83]

Fig. 17 Schematic diagram and electrical performance of metal–organic frame based self-powered nanogenerator^[82–83]

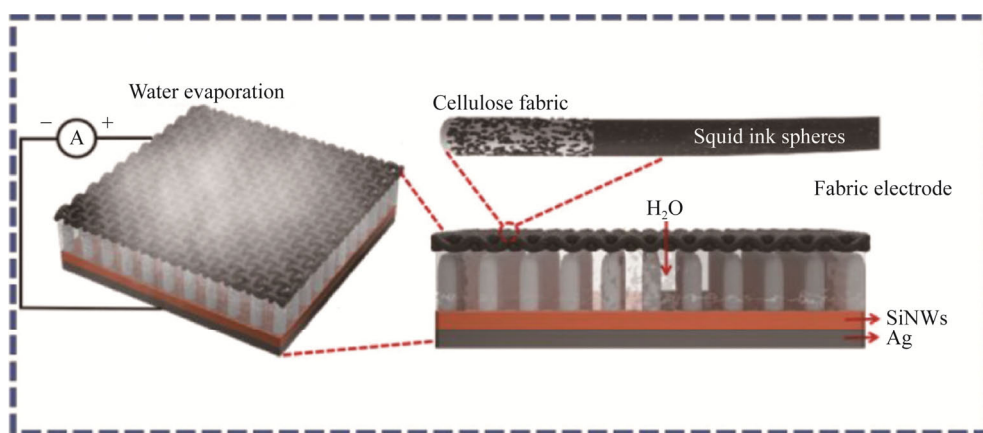
Qin 等^[84]研究了硅纳米线阵列(SiNWs)的水光伏发电装置，如图 18a 所示。SiNWs 具有较大的带电比表面积和优异的载流子输运性能，纳米通道内水蒸发引起的水光伏效应可以持续产生电力。该装置最大短路电流密度超过 $55 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，恒定的输出功率密度超过 $6 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，开路电压高达 400 mV 。为进一步提高硅纳米线阵列的光热转换效率，Yu 等^[85]以 SiNWs 阵列为基体，生物废料乌贼墨汁沉积在纤维素织物作为光热吸收层，构建蒸发驱动发电水光伏组件(工作示意图如图 18b)。装置通过捕获太阳能和风能实现清洁水的生产与电力输出，在一个太阳光照、风速

为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下，蒸发速率达到 $2.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，输出电压约为 1.48 V 。

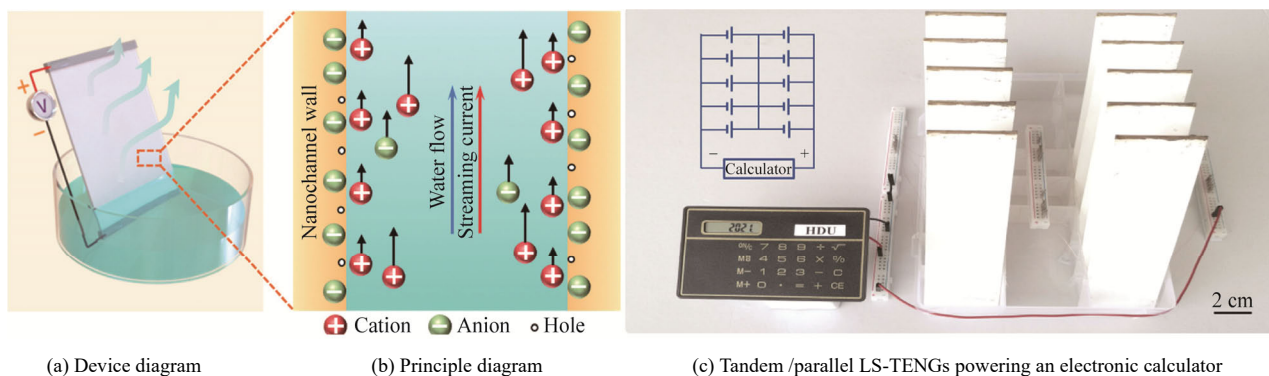
为简化多层结构设计制备的复杂性，进一步提高膜结构的稳定性，Chi 等^[86]开发了一种基于低成本商用多孔氧化铝陶瓷片的液–固摩擦发电系统，实现了连续稳定的输出电流(图 19)。液体在 Al_2O_3 孔道中流动时产生水光伏效应，开路电压可达 0.7 V ，短路电流可达 $0.3 \mu\text{A}$ 。将多个多孔氧化铝纳米发电机串接或并联，可实现输出功率倍增(图 19c)。相较于碳材料和其它纳米膜结构，该器件坚固耐用，有更长的寿命和稳定性。



(a) Schematic diagram of a hydrovoltaic electricity generation device with silicon nanowires



(b) The combination structure of carbon fiber (containing squid ink) and silicon nanowires (SiNWs) arrays realizing the hydrovoltaic effect to generate electricity

图 18 硅纳米阵列基自供电纳米发电机示意图^[84-85]Fig. 18 Schematic diagram of silicon nanoarray-based self-powered nanogenerator^[84-85]

(a) Device diagram

(b) Principle diagram

(c) Tandem /parallel LS-TENGs powering an electronic calculator

图 19 商用多孔氧化铝陶瓷片的液-固摩擦电纳米发电机^[86]Fig.19 Water-evaporation-driven electricity generation with porous Al_2O_3 sheet^[86]

3 结论与展望

近几年来,太阳能水蒸发装置在电力驱动方面已有了多种结合方式,使得太阳能水蒸发装置的用途不仅局限于产生纯净水,同时可应用于一些小型电子设备的电源,如商用 LED、电动风扇、小型穿戴设备以及可应用于电容器、电化学电池等储能设

备以及为偏远地区提供简易可行的发电模式。

太阳能水蒸发发电系统的研究获得了显著的进展的同时,仍然存在着各种缺陷与技术挑战:

1) 太阳能吸收剂的选择问题: 主要涉及碳材料(C 纳米管、C 点和石墨烯)和金属纳米颗粒(Al、Au、Ag、Cu)及窄带半导体。这些材料存在价格高昂、太阳能吸收率相对低,化学稳定性差等问题。

C 纳米管、C 纳米颗粒和石墨烯化学性能稳定，吸光性能好，但价格比黄金还贵。因此，规模化制备低值、稳定、光蒸汽转化效率高的太阳能吸收材料是目前研究的重点；

2) 太阳能光热材料结构设计问题：太阳能蒸汽转化效率与光热材料单位时间单位面积水的蒸发量和水汽化潜热成正比，而这里所指的面积为光热材料的表观面积，而其实际面积取决于光热材料的微观结构。相同表观面积的光热材料，其微观结构面积越大，单位时间蒸发的水量越多，太阳能蒸汽转化效率越大。目前主要通过人工设计制备泡沫、溶胶、凝胶来实现，制备流程长，耗时费力，因此需要发现一种微观结构面积大的天然植物来代替人工材料。

3) 光热材料微观结构对水蒸发潜热的影响：有研究表明，水在纳米结构中的汽化潜热低于体水的汽化潜热^[87–90]，但相关研究较少，需进一步深入研究其物理机制。因此，设计多级纳米结构并研究其对水汽化潜热和太阳能水蒸发速率的影响变得十分迫切。

4) 水中易挥发有机物光降解机理和降解效率的研究：在太阳光照射下，水通过界面光热转换作用产生水蒸气，从而与水中固体颗粒、有机物和金属离子分离，水蒸气凝结后变成可饮用水。然而，污水中的细菌和病毒在光热气化过程中会进入水蒸气，必须进行消毒处理。污水中含有易挥发有机物(VOCs)，其中部分芳香烃类 VOCs 沸点低，会随水蒸气一起蒸发凝聚，导致饮用水中 VOCs 含量超标，必须进行光催化降解。研究表明，VOCs 主要包括烷烃类、烯烃类、卤代烃类、芳香烃类、酯类、醛类、酮类和其他化合物等，对有机体具有致突变性、致癌性、致畸变性。世界卫生组织与我国的饮用水水质卫生标准都对这些指标提出了相应的限值要求。因此，如何在产生水蒸汽的同时去除水中 VOCs，是目前亟待解决的问题^[91]。

5) 集成式发电系统的发电性能往往取决于发电模块自身的电输出性能，具有性能稳定、可商业化生产等特点。集成装置之间实现废弃能量的回收，提高能量利用率。然而集成式发电系统结构复杂、成本高、模块之间不适配等问题会限制其实际应用。自供电式发电系统的蒸发–发电性能则更多地取决于蒸发器材料自身的微观结构，如微纳米孔道的尺寸以及表面 Zeta 电位。目前报导的输出电流在纳安至微安之间，提高到毫安电流输出是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] LI Z, WANG C, SU J, et al. Fast-growing field of interfacial solar steam generation: Evolutional materials, engineered architectures, and synergistic applications[J]. Sol RRL, 2019, 3(3): 1800206.
- [2] ASKARI I B, AMERI M. Solar Rankine Cycle (SRC) powered by Linear Fresnel solar field and integrated with Multi Effect Desalination (MED) system[J]. Renew Energy, 2018, 117: 52–70.
- [3] HAN J, XING W, YAN J, et al. Stretchable and superhydrophilic polyaniline/halloysite decorated nanofiber composite evaporator for high efficiency seawater desalination[J]. Adv Fiber Mater, 2022, 4(5): 1233–1245.
- [4] SHARON H, REDDY K. A review of solar energy driven desalination technologies[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2015, 41: 1080–1118.
- [5] MARINHO B A, CRISTÓVÃO R O, DJELLABI R, et al. Photocatalytic reduction of Cr(VI) over TiO₂-coated cellulose acetate monolithic structures using solar light[J]. Appl Catal B, 2017, 203: 18–30.
- [6] Best Research-Cell Efficiencies chart[EB/OL]. (2023-09-21) [2022-12-30]. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [7] LU J Y, RAZA A, NOORULLA S, et al. Near-perfect ultrathin nanocomposite absorber with self-formed topping plasmonic nanoparticles[J]. Adv Opt Mater, 2017, 5(8): 1700222.
- [8] ZHOU L, TAN Y, JI D, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation[J]. Sci Adv, 2016, 2(4): e1501227.
- [9] TAO P, NI G, SONG C, et al. Solar-driven interfacial evaporation[J]. Nat Energy, 2018, 3(12): 1031–1041.
- [10] CHOI S U S, EASTMAN J. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[C]//United States: Argonne National Lab, 1995: 6–7.
- [11] MAHIAN O, KIANIFAR A, KALOGIROU S A, et al. A review of the applications of nanofluids in solar energy[J]. Int J Heat Mass Transf, 2013, 57(2): 582–594.
- [12] SAIDUR R, LEONG K Y, MOHAMMED H A. A review on applications and challenges of nanofluids[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2011, 15(3): 1646–1668.
- [13] HAN D, MENG Z, WU D, et al. Thermal properties of carbon black aqueous nanofluids for solar absorption[J]. Nanoscale Res Lett, 2011, 6(1): 457.
- [14] HORDY N, RABILLOUD D, MEUNIER J L, et al. High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors[J]. Sol Energy, 2014, 105: 82–90.
- [15] MERCATELLI L, SANI E, ZACCANTI G, et al. Absorption and scattering properties of carbon nanohorn-based nanofluids for direct sunlight absorbers[J]. Nanoscale Res Lett, 2011, 6(1): 282.
- [16] LUKIANOVA–HLEB E Y, LAPOTKO D O. Influence of transient environmental photothermal effects on optical scattering by gold nanoparticles[J]. Nano Lett, 2009, 9(5): 2160–2166.
- [17] LAPOTKO D. Plasmonic nanoparticle-generated photothermal bubbles and their biomedical applications[J]. Nanomedicine, 2009, 4(7): 813–845.
- [18] NEUMANN O, URBAN A S, DAY J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles[J]. ACS Nano, 2013, 7(1): 42–49.
- [19] TAYLOR R A, PHELAN P E, OTANICAR T, et al. Vapor generation in a nanoparticle liquid suspension using a focused, continuous laser[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(16): 161907.
- [20] PAYNE E K, SHUFORD K L, PARK S, et al. Multipole plasmon

- resonances in gold nanorods[J]. *J Phys Chem B*, 2006, 110(5): 2150–2154.
- [21] LIU L, DAO T, KODIYATH R, et al. Plasmonic Janus-composite photocatalyst comprising Au and C-TiO₂ for enhanced aerobic oxidation over a broad visible-light range[J]. *Adv Funct Mater*, 2014, 24(48): 7754–7762.
- [22] NEUMANN O, FERONTI C, NEUMANN A D, et al. Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(29): 11677–11681.
- [23] NEUMANN O, NEUMANN A D, SILVA E, et al. Nanoparticle-mediated, light-induced phase separations[J]. *Nano Lett*, 2015, 15(12): 7880–7885.
- [24] NAIK G V, SHALAEV V M, BOLTASSEVA A. Alternative plasmonic materials: Beyond gold and silver[J]. *Adv Mater*, 2013, 25(24): 3264–3294.
- [25] MODINE F A, MAJOR R W, HAYWOOD T W, et al. Optical properties of tantalum carbide from the infrared to the near ultraviolet[J]. *Phys Rev B*, 1984, 29(2): 836.
- [26] GULER U, NAIK G V, BOLTASSEVA A, et al. Performance analysis of nitride alternative plasmonic materials for localized surface plasmon applications[J]. *Appl Phys B*, 2012, 107(2): 285–291.
- [27] GULER U, SUSLOV S, KILDISHEV A V, et al. Colloidal plasmonic titanium nitride nanoparticles: Properties and applications[J]. *Nanophotonics*, 2015, 4(3): 269–276.
- [28] TAYLOR R, COULOMBE S, OTANICAR T, et al. Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids[J]. *J Appl Phys*, 2013, 113(1): 011301.
- [29] YU W, XIE H. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications[J]. *J Nanomater*, 2012:435873.
- [30] WEN D S, DING Y L. Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotubes nanofluids)[J]. *J Thermophys Heat Transf*, 2004, 18(4): 481–485.
- [31] WANG Z, LIU Y, TAO P, et al. Bio-inspired evaporation through plasmonic film of nanoparticles at the air–water interface[J]. *Small*, 2014, 10(16): 3234–3239.
- [32] GHASEMI H, NI G, MARCONNET A M, et al. Solar steam generation by heat localization[J]. *Nat Commun*, 2014, 5: 4449.
- [33] ITO Y, TANABE Y, HAN J, et al. Multifunctional porous graphene for high-efficiency steam generation by heat localization[J]. *Adv Mater*, 2015, 27(29): 4302–4307.
- [34] SAJADI S M, FAROKHNIA N, IRAJIZAD P, et al. Flexible artificially-networked structure for ambient/high pressure solar steam generation[J]. *J Mater Chem A*, 2016, 4(13): 4700–4705.
- [35] HE W, ZHOU L, WANG M, et al. Structure development of carbon-based solar-driven water evaporation systems[J]. *Sci Bull*, 2021, 66(14): 1472–1483.
- [36] XU N, HU X, XU W, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(28): 1606762.
- [37] LI X, XU W, TANG M, et al. Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113(49): 13953–13958.
- [38] HU X, XU W, ZHOU L, et al. Tailoring graphene oxide-based aerogels for efficient solar steam generation under one sun[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(5): 1604031.
- [39] REN H, TANG M, GUAN B, et al. Hierarchical graphene foam for efficient omnidirectional solar-thermal energy conversion[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(38): 1702590.
- [40] YANG Y, ZHAO R, ZHANG T, et al. Graphene-based standalone solar energy converter for water desalination and purification[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(1): 829–835.
- [41] ZHAO F, ZHOU X, SHI Y, et al. Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, 13(6): 489–495.
- [42] GUO Y, ZHAO F, ZHOU X, et al. Tailoring nanoscale surface topography of hydrogel for efficient solar vapor generation[J]. *Nano Lett*, 2019, 19(4): 2530–2536.
- [43] GUO Y, ZHAO X, ZHAO F, et al. Tailoring surface wetting states for ultrafast solar-driven water evaporation[J]. *Energy Environ Sci*, 2020, 13(7): 2087–2095.
- [44] LI J, WANG X, LIN Z, et al. Over 10 kg·m⁻²·h⁻¹ evaporation rate enabled by a 3D interconnected porous carbon foam[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 928–937.
- [45] WANG Y, WANG C, SONG X, et al. A facile nanocomposite strategy to fabricate a rGO-MWCNT photothermal layer for efficient water evaporation[J]. *J Mater Chem A*, 2018, 6(3): 963–971.
- [46] ZENG Y, YAO J, HORRI B A, et al. Solar evaporation enhancement using floating light-absorbing magnetic particles[J]. *Energy Environ Sci*, 2011, 4(10): 4074–4078.
- [47] LI Y, GAO T, YANG Z, et al. 3D-Printed, all-in-one evaporator for high-efficiency solar steam generation under 1 sun illumination[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(26): 1700981.
- [48] ZHU M, LI Y, CHEN F, et al. Plasmonic wood for high-efficiency solar steam generation[J]. *Adv Energy Mater*, 2018, 8(4): 1701028.
- [49] JIANG F, LIU H, LI Y, et al. Lightweight, mesoporous, and highly absorptive all-nanofiber aerogel for efficient solar steam generation[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10(1): 1104–1112.
- [50] YANG Y, ZHAO H, YIN Z, et al. A general salt-resistant hydrophilic/hydrophobic nanoporous double layer design for efficient and stable solar water evaporation distillation[J]. *Mater Horiz*, 2018, 5(6): 1143–1150.
- [51] GUO D, YANG X. Highly efficient solar steam generation of low cost TiN/bio-carbon foam[J]. *Sci China Mater*, 2019, 62(5): 711–718.
- [52] REN P, YANG X. Synthesis and photo-thermal conversion properties of hierarchical titanium nitride nanotube mesh for solar water evaporation[J]. *Sol RRL*, 2018, 2(4): 1700233.
- [53] REN P, LI J, ZHANG X, et al. Highly efficient solar water evaporation of TiO₂@TiN hyperbranched nanowires-carbonized wood hierarchical photothermal conversion material[J]. *Mater Today Energy*, 2020, 18: 100546.
- [54] CUI L, ZHANG P, XIAO Y, et al. High rate production of clean water based on the combined photo-electro-thermal effect of graphene architecture[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(22): e1706805.
- [55] XU N, ZHU P C, SHENG Y, et al. Synergistic tandem solar electricity–water generators[J]. *Joule*, 2020, 4: 347–358.
- [56] CHENG P, WANG H C, ZHU Y, et al. Transparent hole-transporting frameworks: A unique strategy to design high-performance semitransparent organic photovoltaics[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(39): e2003891.
- [57] JI Q, LI N, WANG S, et al. Synergistic solar-powered water-electricity generation via rational integration of semitransparent photovoltaics and interfacial steam generators[J]. *J Mater Chem A*, 2021, 9(37): 21197–21208.
- [58] ZHU L, DING T, GAO M, et al. Photothermal conversion: Shape

- conformal and thermal insulative organic solar absorber sponge for photothermal water evaporation and thermoelectric power generation[J]. *Adv Energy Mater*, 2019, 9(22): 190025.
- [59] CAO P, ZHAO L, YANG Z, et al. Carbon nanotube network-based solar-thermal water evaporator and thermoelectric module for electricity generation[J]. *ACS Appl Nano Mater*, 2021, 4(9): 8906–8912.
- [60] LI X, MIN X, LI J, et al. Storage and recycling of interfacial solar steam enthalpy[J]. *Joule*, 2018, 2(11): 2477–2484.
- [61] ZHU L, GAO M, PEH C K N, et al. Self-contained monolithic carbon sponges for solar-driven interfacial water evaporation distillation and electricity generation[J]. *Adv Energy Mater*, 2018, 8(16): 1702149.
- [62] GAO F, LI W, WANG X, et al. A self-sustaining pyroelectric nanogenerator driven by water vapor[J]. *Nano Energy*, 2016, 22: 19–26.
- [63] ZHOU H, YAMADA T, KIMIZUKA N. Supramolecular thermo-electrochemical cells: Enhanced thermoelectric performance by host-guest complexation and salt-induced crystallization[J]. *J Am Chem Soc*, 2016, 138(33): 10502–10507.
- [64] SHEN Q, NING Z, FU B, et al. An open thermo-electrochemical cell enabled by interfacial evaporation[J]. *J Mater Chem A*, 2019, 7(11): 6514–6521.
- [65] YANG P, LIU K, CHEN Q, et al. Solar-driven simultaneous steam production and electricity generation from salinity[J]. *Energy Environ Sci*, 2017, 10(9): 1923–1927.
- [66] WANG H, XIE W, YU B, et al. Simultaneous solar steam and electricity generation from synergistic salinity-temperature gradient[J]. *Adv Energy Mater*, 2021, 11(18): 2100481.
- [67] ZHOU L, LIU D, WANG J, et al. Triboelectric nanogenerators: Fundamental physics and potential applications[J]. *Friction*, 2020, 8(3): 481–506.
- [68] LIN S, CHEN X, WANG Z L. The tribovoltaic effect and electron transfer at a liquid-semiconductor interface[J]. *Nano Energy*, 2020, 76: 105070.
- [69] CHEN X, JIANG C H, SONG Y H, et al. Integrating hydrovoltaic device with triboelectric nanogenerator to achieve simultaneous energy harvesting from water droplet and vapor[J]. *Nano Energy*, 2022, 100: 107495.
- [70] DAO V D, VU N H, THI DANG H L, et al. Recent advances and challenges for water evaporation-induced electricity toward applications[J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 105979.
- [71] XUE G, XU Y, DING T, et al. Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials[J]. *Nat Nanotechnol*, 2017, 12(4): 317–321.
- [72] ZHANG Z, LI X, YIN J, et al. Emerging hydrovoltaic technology[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, 13(12): 1109–1119.
- [73] BHATTACHARJEE S. DLS and zeta potential-What they are and what they are not?[J]. *J Control Release*, 2016, 235: 337–351.
- [74] WANG X, LIN F, WANG X, et al. Hydrovoltaic technology: From mechanism to applications[J]. *Chem Soc Rev*, 2022, 51(12): 4902–4927.
- [75] ZHANG S, FANG S, LI L, et al. Geometry effect on water-evaporation-induced voltage in porous carbon black film[J]. *Sci China Technol Sci*, 2021, 64(3): 629–634.
- [76] SUN Z Z, HAN C L, GAO S W, et al. Achieving efficient power generation by designing bioinspired and multi-layered interfacial evaporator[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5077.
- [77] TAN J, FANG S, ZHANG Z, et al. Self-sustained electricity generator driven by the compatible integration of ambient moisture adsorption and evaporation[J]. *Nat Commun*, 2022, 13: 3643.
- [78] ZHOU X, ZHANG W, ZHANG C, et al. Harvesting electricity from water evaporation through microchannels of natural wood[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(9): 11232–11239.
- [79] ZHANG Z, ZHENG Y, JIANG N, et al. Electricity generation from water evaporation through highly conductive carbonized wood with abundant hydroxyls[J]. *Sustainable Energy Fuels*, 2022, 6(9): 2249–2255.
- [80] HU Q, MA Y, REN G, et al. Water evaporation-induced electricity with *Geobacter sulfurreducens* biofilms[J]. *Sci Adv*, 2022, 8(15): eabm8047.
- [81] LIU X, UEKI T, GAO H, et al. Microbial biofilms for electricity generation from water evaporation and power to wearables[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 4369.
- [82] LI Z, MA X, CHEN D, et al. Polyaniline-coated MOFs nanorod arrays for efficient evaporation-driven electricity generation and solar steam desalination[J]. *Adv Sci*, 2021, 8(7): 2004552.
- [83] MA Q, HE Q, YIN P, et al. Rational design of MOF-based hybrid nanomaterials for directly harvesting electric energy from water evaporation[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(37): e2003720.
- [84] QIN Y, WANG Y, SUN X, et al. Constant electricity generation in nanostructured silicon by evaporation-driven water flow[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2020, 59(26): 10619–10625.
- [85] YU F, LIU G, CHEN Z, et al. All-weather freshwater and electricity simultaneous generation by coupled solar energy and convection[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(35): 40082–40092.
- [86] CHI J, LIU C, CHE L, et al. Harvesting water-evaporation-induced electricity based on liquid-solid triboelectric nanogenerator[J]. *Adv Sci*, 2022, 9(17): e2201586.
- [87] ZHOU X, ZHAO F, GUO Y, et al. Architecting highly hydratable polymer networks to tune the water state for solar water purification[J]. *Sci Adv*, 2019, 5(6): eaaw5484.
- [88] TANG J, ZHENG T, SONG Z, et al. Realization of low latent heat of a solar evaporator via regulating the water state in wood channels[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(16): 18504–18511.
- [89] GUAN Q F, HAN Z M, LING Z C, et al. Sustainable wood-based hierarchical solar steam generator: A biomimetic design with reduced vaporization enthalpy of water[J]. *Nano Lett*, 2020, 20(8): 5699–5704.
- [90] ZHANG X F, WU G, YANG X C. MoS₂ nanosheet-carbon foam composites for solar steam generation[J]. *ACS Appl Nano Mater*, 2020, 3(10): 9706–9714.
- [91] YANG X C, XU Z J, ZHANG X F. TiN nanoparticles/OMS-2 nanorods/carbonized wood composites for simultaneous solar water evaporation and abatement of volatile organic compound from undrinkable water[J]. *Mater Today Sustain*, 2023, 24: 100492.

Research Progress on Solar-Driven Steam-Electricity System

XU Zijie¹, YANG Xiuchun^{1,2}, WANG Yufan¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Education of Ministry, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Extended Abstract

With the rapid growth of population and the development of industry, the lack of clean water resources becomes increasingly prominent. For the shortage of clean water resources, China as a country rich in seawater resources vigorously promotes seawater desalination technology, which has gradually developed into a strategic industry. Compared with the existing desalination technologies such as multi-effect distillation, multi-stage flash evaporation, reverse osmosis membrane, electrodialysis and so on, the desalination technology based on the principle of solar photothermal conversion has unparalleled advantages, *i.e.*, environmental-friendly, high efficiency and low cost. Solar-driven steam generation (SSG) could be widely applied in seawater desalination, sewage treatment and other fields, which is of great significance in acquiring pure water and solving the problem of water resource shortage.

Ultra-high solar steam conversion efficiency could be achieved by increasing photothermal conversion efficiency, water transfer rate and heat management of the SSG system. In recent years, the evaporation models underwent a gradual transition from using photothermal particles dispersed in volume water to interface water evaporation with porous insulation layer or 1D or 2D water transport channels to the hydrophilic gel evaporation structure. It is reported that TiN hyperbranched nanowires have a better solar light absorption and a higher specific surface area to evaporate water rather than TiN nanoparticles and nanotubes. Its solar water evaporation rate and solar thermal conversion efficiency are $1.5252 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and 94.01%, respectively, under $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ simulated solar irradiation. Zhu *et al.* demonstrated that a carbon foam with a three-dimensional interconnected porous structure enables a sufficient diffusion of vapor with a convective flow and realizes an evaporation rate of $10.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Solar-driven steam-electricity system expands the functionary of SSG, providing an innovative pattern for the electricity supply for tiny electronic devices, flexible wearable devices and remote area. Solar-driven steam-electricity system is mainly divided into integrating electricity generation module and self-powered electricity generation module. In SSG and PV cell integration modules, Xu *et al.* experimentally demonstrated that a prototype hybrid tandem solar device with WTIL can generate electricity with a power output of $204 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and purify water at $0.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ under 1-sun illumination. Deng *et al.* realized that the evaporation rate of the prepared TEC in seawater electrolyte is $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and the solar vapor conversion efficiency of the TEC is 60% with a peak output power of $0.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. In self-powered electricity generation modules, Guo *et al.* presented a device prototype for enhanced power generation from ambient humidity, the device to ambient humidity can produce voltages of 0.78 V and a current of 7.5 μA , both of which can be sustained for more than 10 d. In this review, we summarized recent research work on the solar-driven steam-electricity system, and analyzed the advantages and disadvantages of different electricity generation modules.

Summary and prospects Selection of solar absorbers: Three categories of solar-absorbing materials including carbon materials (such as carbon nanotubes, carbon nanoparticles, and graphene), plasmonic metals (such as Al, Au, Ag, Cu) and ceramic nanomaterials (such as transition metal nitrides and carbides) and semiconducting nanomaterials (such as TiO_{2-x} , MoS_2) were developed. The present research focuses on the preparation of high-light-absorption photothermal absorbers with a low-cost and a superior chemical stability.

1) Structural design of solar steam generation system: The solar-vapor conversion efficiency (η) can be calculated by

$$\eta = \frac{Q_e}{Q_s} = H_v \times dm / dt \quad (1)$$

where Q_s is the incident light power ($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$); Q_e is the water evaporation power; H_v is the evaporation heat of water ($\sim 2260 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); m is the evaporated water mass; t is time.

Based on Eq. (1), the solar steam conversion efficiency is directly proportional to water evaporation enthalpy and water evaporation rate. It is proved that the latent heat of water vaporization in a porous nanostructure is lower than the standard value. However, it is still unclear how to obtain a low water evaporation enthalpy by regulating the porous structure of the solar photothermal materials. It is crucial to obtain hierarchical nanostructures and evaluate its water vaporization latent heat. In order to increase the specific surface area of solar photothermal materials, porous foams and gels are designed and prepared, but the preparation of these artificially hierarchical materials is a time-consuming and costly process. It is thus imperative to explore naturally hierarchical plants that are low-cost and easy to obtain.

2) Efficiency and mechanism of VOCs photodegradation in water: Solar-driven steam generation is utilized to produce fresh water by removing salts, heavy metals, micro-organisms, and most organic pollutants in raw water. However, it also accelerates the volatility of the volatile organic compounds (VOCs) and enrich them in the distilled water if the water source is contaminated by VOCs because of their similar boiling point with water, which poses a serious threat to the atmospheric environment and human-being health. VOCs such as alcohols, aldehydes, ketones, olefins, and aromatic compounds tend to migrate and accumulate in different

environmental media such as soil, water, and air. The World Health Organization and China's sanitary standards for drinking water quality both have established limit values for VOCs. Consequently, it is crucial to efficiently remove VOC during the solar-driven interfacial evaporation.

3) The relative merits of different electricity generation systems: Solar-driven steam-electricity system is mainly divided into integrating electricity generation system and self-powered electricity generation system. The integrating electricity generation module integrates a solar water evaporation module and an electricity generation module by rationally connecting the solar water evaporation module with photovoltaic device harvesting light energy, thermoelectric module recovering heat energy from water vapor, membrane structure utilizing salt concentration gradients and triboelectric nanogenerator based on steam condensation process. The electricity generation capacity of an integrated electricity generation system typically depends on the electrical output performance of the power generation module itself. Though the integrated electricity generation system can be commercially produced and has a stable performance, it has some problems such as complex structure, high cost and non-adaptability of different modules, which limit its practical application. The self-powered electricity generation system does not connect solar water evaporation module with other auxiliary equipment for electricity generation. It generates electricity directly by a hydrovoltaic effect, and its evaporation-electricity generation performance mainly depends on the microstructure of the photothermal material, such as the size of micro-/nano-pore channels and the zeta potential. The currently reported output currents range from nanoamps to microamps, and exploring current output in the milliamp range is a further research direction.

Keywords solar-driven steam generation; water evaporation-induced electricity; integrated electricity generation module; self-powered electricity generation module; hydrovoltaic effect