科学通报 2021 年 第 66 卷 第 13 期: 1628 ~ 1641
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

基于传热传质分析的热局域化太阳能蒸汽发生系统优化研究进展

黄丛亮*, 皇强强, 杜长康, 罗笑

中国矿业大学电气与动力工程学院, 徐州 221116

* 联系人, E-mail: huangcl@cumt.edu.cn

2020-07-19 收稿, 2020-11-05 修回, 2020-11-10 接受, 2020-11-11 网络版发表

国家自然科学基金(51406224, 52076211)和中央高校基本科研业务费(2018XKQYMS17, 2015XKMS062)资助

摘要 太阳能蒸汽发生系统能够利用太阳能局域加热水体产生蒸汽, 在海水淡化和污水处理等领域具有较大的应用潜力. 太阳能蒸汽发生系统主要包括光吸收系统和热局域化系统两大部分. 由于能够实现低聚光下的高效太阳能光热蒸汽转化, 且具有结构简单、成本低、蒸发效率高、易于推广应用等特点, 太阳能蒸汽发生系统受到了广泛关注. 近几年, 越来越多的热局域化太阳能蒸汽发生系统被相继提出. 然而由于能量损失和制备限制等原因, 该类系统光-热-蒸汽转化效率还达不到100%. 对于效率接近甚至大于100%系统的理论探索还比较匮乏, 系统效率的提升仍有较大潜力. 本文主要聚焦热局域化太阳能蒸汽发生系统, 在总结前人工作的基础上, 首先阐述了热局域化太阳能蒸汽发生系统的传热传质机理, 然后从能量守恒的角度对转化效率的系统结构和外界环境依赖性进行了分析. 相关机理的总结及能量分析的结果可以为系统结构优化、材料选取以及环境控制等提供参考. 目前, 太阳能蒸汽发生系统的大规模应用还存在较多问题, 主要包括如何克服盐分在设备表面的沉积, 以及蒸汽如何有效收集等. 最后, 对热局域化太阳能蒸汽发生系统未来的改进方向进行了展望.

关键词 传热传质, 光热转化, 太阳能, 海水淡化

随着全球人口的增长以及社会经济的发展, 淡水资源短缺以及能源危机日益严重, 开发使用清洁能源来生产淡水已被广泛关注[1~4]. 太阳能作为一种可持续利用的清洁能源, 有着巨大的开发应用潜力. 将太阳能与海水淡化密切融合起来, 不仅能减缓能源压力、环境危机, 也能部分解决地域性缺水问题, 是一种高效且有前景的技术[5~9]. 传统的太阳能海水淡化技术采用太阳能直接加热海水, 由于海水的吸收光谱与太阳光谱的匹配度偏低, 同时由于蒸发只在气-水界面进行, 这些装置中的受热位置与水蒸发位置不同, 不可避免地导致大量的水被加热, 造成了较高的热量损失, 太阳能利用效率较低, 很大程度上限制了相关技术的发展和应用[10,11]. 近年来, 随着纳米材料制备技术的发展, 基于微结构材料的新型太阳能海水淡化系统开发引起了较大关注[12~14]. 目前新型技术的发展主要基于纳米材料的光热效应提高太阳能光热蒸汽转化效率, 具体实现系统包括利用纳米流体进行蒸汽发生(图1(a))[15]和利用双层结构为主的热局域化系统实现太阳能海水淡化(图1(b))[16].

如图1(a)所示, 利用金属纳米流体吸收光照的加热方式不同于传统的直接进行水体加热, 当合适的电磁波入射到金属纳米颗粒与水的分界面上时, 金属表面的自由电子将被驱动, 形成表面等离子体, 运动的电子又会辐射电磁波与入射电磁波有效耦合, 形成表面

引用格式: 黄丛亮, 皇强强, 杜长康, 等. 基于传热传质分析的热局域化太阳能蒸汽发生系统优化研究进展. 科学通报, 2021, 66: 1628–1641
Huang C L, Huang Q Q, Du C K, et al. Research advances on optimization of thermal localization solar steam generation system based on heat and mass transfer analysis (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1628–1641, doi: 10.1360/TB-2020-0901

© 2020《中国科学》杂志社

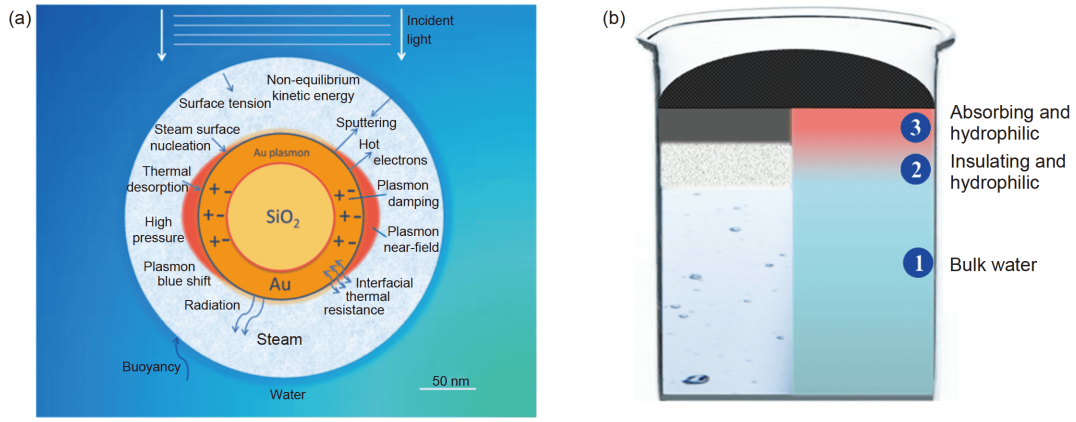


图 1 (网络版彩色)太阳能光热蒸汽转化示意图. (a) 纳米流体光热蒸汽转化[15]; (b) 热局域化结构[16]

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of solar photothermal steam conversion. (a) Photothermal steam conversion of nanofluid[15]; (b) thermal localization structure[16]

等离激元. 表面等离激元在共振处具有巨大的散射和吸收截面, 从而保证太阳辐射电磁波的高效吸收能力. 由于金属材料的欧姆损耗, 吸收的太阳辐射电磁波最终转化为热量. 2013年, Fang等人[15]对液体浸没下金属纳米颗粒的光诱导蒸汽发生现象进行了详尽的理论和实验研究, 定量分析了金纳米颗粒光蒸汽的产生过程, 并建立了利用纳米流体进行光蒸汽发生的模型[17]. 随后, 基于纳米流体的光驱动蒸汽发生实验模型被广泛研究. Wang等人[18]对金纳米颗粒光蒸汽发生现象进行了系统的实验研究, 结果表明, 在金属纳米颗粒表面产生高温使周围水汽化需要很高的入射光强度[15,18]. 因此, 利用太阳能加热纳米流体产生蒸汽需要利用聚光设备提高光照强度, 而复杂的聚光设备增加了系统的成本和复杂性. 更重要的是, 对纳米流体整体加热, 水温提升消耗了大量的能量, 导致海水淡化系统效率偏低.

为了在低聚光强度下实现较高的蒸发效率, 2014年, Ghasemi等人[16]通过材料及结构设计, 将蒸发过程中的热能维持在气-水表面, 减少了向水体的热损失, 在较低的光照倍数下获得了更高的光热蒸发效率, 提出了热局域化结构模型. 如图1(b)所示, 该模型具有4个主要特征: (1) 光热转化层表面具有高太阳光吸收率; (2) 支撑层保持较低的热导率以抑制热量散失; (3) 支撑层具备良好的亲水性和孔隙率以利用毛细作用力使液态水流向热量富集区进行蒸发; (4) 结构需要漂浮在水面以维持热局域化特征. 尽管在一些研究中第一层材料与第二层材料的界限并没有那么清晰, 然而系统的工作原理仍然是基于Ghasemi等人[16]提出的基本模型. 在本文的讨论中, 也把这些系统视为双层结构系统[19~25]. 基于该模型的思路, 通过优选光热转化层材料(第一层)和改进支撑层材料(第二层)的绝热性能等, 不同的改进系统被大量报道[16,26~32], 系统的光热转化效率和水蒸气蒸发效率得到了大幅提升. 自2014年以来, 双层结构系统由于其较高的水蒸发效率成为学术和工业界研究的热点. 最近, 余桂华教授团队与杨荣贵教授和曲良体教授[33]共同合作, 开发了一种基于聚乙烯醇和聚吡咯的分层纳米结构凝胶系统, 该系统水的蒸发效率可以高达92%. 尽管水的蒸发效率不断提高, 然而由于太阳能资源有限, 如何实现该类系统效率的进一步提高, 甚至实现超过100%的效率仍然值得探讨. 目前报道的提高蒸发效率的方法主要集中在降低整个系统的热损失, 如何把蒸发效率提高到100%以上的理论和方法仍然鲜有报道[34].

此外, 基于热局域化太阳能的发电系统越来越受到关注. 太阳能定域蒸发包含光-热-水-蒸汽-盐等方面的内容, 其中的能量转化和物质传递过程可以被用来发电和制氢等. 并且, 这些应用可以与海水淡化有效结合起来, 使得太阳能定域蒸发器在实现海水淡化的同时还具备其他功能, 比如目前已经提出的光催化污染物降解和制氢[35], 利用温差[36]、盐差[37]、水流动[38~40]以及蒸汽流动[41]进行发电等. 对太阳能热局域蒸发中的能量转化和物质传递过程进行系统的探索, 有助于太阳能热局域基新型应用的发掘和改进.

本文期望从传热传质和能量守恒的视角对双层结构系统近几年的研究成果进行梳理, 以期为进一步提高太阳能蒸汽发生系统的蒸发效率等提供参考.

1 传热传质及流动输运机理

在探讨热局域化太阳能蒸汽发生系统的性能之前, 需要首先明确蒸发过程中系统的传热传质等机理[42~44]. 在蒸发过程中, 第一层的光热转化材料吸收太阳光并将其转化为热能作为系统的初始传入热量, 同时第二层的多孔绝热材料通过毛细作用将水输送到光热转化层(第一层)进行蒸发. 整个系统具体的传热传质过程如图2所示[43]. 对于传热过程, 第一层(top layer)吸收的大部分热量将通过导热进入第二层; 在第二层(bottom layer)中, 热量的传递需要考虑两相流动和导热等的共同影响; 最后, 部分能量将主要通过导热散失到水体中, 这部分能量损失会降低系统的能量利用效率. 第二层中的流动过程较为复杂, 需要考虑多相流动(包含蒸汽的空气以及水)过程[42,43], 其中的液相流动由毛细效应和垂直方向的气相压力梯度引起, 气相流动由垂直方向的气相压力梯度引起. 由于第二层中的传热传质等过程较为复杂, 下文将详细介绍第二层中的情况.

首先, 考虑到第二层多孔材料中流动相(气相和液相水)将填满整个孔道, 气相和液相水的饱和度存在以下耦合关系:

$$S_{\mathrm{g}}+S_{\mathrm{w}}=1, \tag{1}$$

其中, S_{g}为气体饱和度, S_{w}为水的饱和度. 多孔材料中的气相流动(气相包括空气与蒸汽)由Brinkman方程控制(即多孔材料中气相流动的质量守恒方程和动量守恒方程). 液相流动由水输运方程控制:

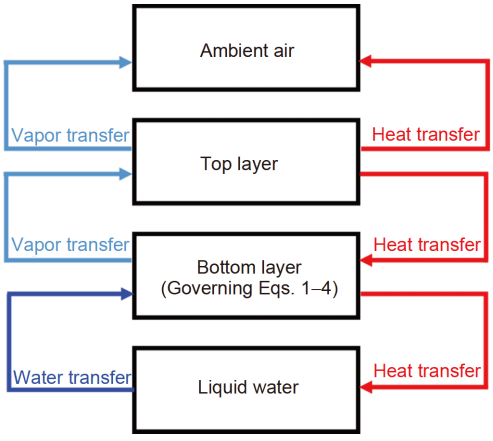


图 2 (网络版彩色)热局域化太阳能蒸汽发生系统中的传热传质过程[43]

Figure 2 (Color online) The heat and mass transfer in a thermal localization solar steam generation system[43]

$$\frac{\partial c_{\mathrm{w}}}{\partial t}+\nabla\cdot\left(-D_{\mathrm{cap}}\nabla c_{\mathrm{w}}\right)+\boldsymbol{u}_{\mathrm{w}}\cdot\nabla c_{\mathrm{w}}=R_{\mathrm{w}}, \tag{2}$$

该方程描述了压力梯度和毛细力共同驱动下的液相流动. 根据Datta[45]的研究, 在绝大多数多孔材料中, 可以将毛细现象处理为水输运方程中额外的扩散项, 即$\nabla\cdot\left(-D_{\mathrm{cap}}\nabla c_{\mathrm{w}}\right)$, 其中$D_{\mathrm{cap}}$为扩散度, c_{w}为液态水的比例. 此外, 与湿空气速度相比, 液相速度较小, 因此, 根据气相压力梯度定义的达西定律可用于计算液相流动速度$\boldsymbol{u}_{\mathrm{w}}$. R_{w}为源项, 表示由蒸发引起的流动变化, 其值与当前蒸汽浓度c_{wg}有关. 蒸汽浓度可以通过蒸汽输运方程进行计算:

$$\frac{\partial c_{\mathrm{wg}}}{\partial t}+\nabla\cdot\left(-D_{\mathrm{eff}}\nabla c_{\mathrm{wg}}\right)+\boldsymbol{u}_{\mathrm{wg}}\cdot\nabla c_{\mathrm{wg}}=R_{\mathrm{wg}}, \tag{3}$$

蒸汽输运方程与水输运方程类似. 其中, 有效扩散系数D_{eff}由Millington&Quirk方程描述; 水蒸气的流速$\boldsymbol{u}_{\mathrm{wg}}$取决于对流扩散和蒸汽扩散所产生的速度场; R_{wg}为源项, 表示多孔材料中水蒸气的流动变化, 与第二层中液态水的质量变化相等(R_{w}).

以上是对双层结构中质量传输过程的阐述. 在传热方面, 双层结构中的能量传递由能量守恒方程控制:

$$(\rho c_p)_{\mathrm{e}}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_{\mathrm{tot}}c_{p,\mathrm{tot}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{mean}}\cdot\nabla T-k_{\mathrm{e}}\nabla^2T=Q_{\mathrm{vap}}, \tag{4}$$

其中, 总速度$\boldsymbol{u}_{\mathrm{mean}}$由上述传质机理描述中水、空气、蒸汽三者的流动速度平均值得到, 源Q_{vap}表示由于相变产生的热量变化, c_p是定压比热容, $c_{p,\mathrm{tot}}$是蒸汽和水的平均定压比热容, 其他热物性均为第二层多孔材料中气相与液相的平均热物性.

通过建立第二层多孔材料的控制方程, 可以对双层结构传热传质等过程进行具体的模拟计算及量化. 同时, 为了实现在低聚光强度下高效的蒸汽产生, 还需要对结构进行能量分析, 以减少能量损失. 图3给出了热局域化双层结构在太阳能海水蒸发过程中的传热过程. 在整个传热过程中, 存在4部分热量损失: (1) 入射光照射到顶层材料产生的光反射损失; (2) 顶层材料上表面向环境的热辐射损失; (3) 顶层材料表面与周围空气的热对流及导热损失; (4) 底层材料向水体产生的热传导损失. 根据能量守恒, 用来蒸发水的有效利用能量可以通过吸收的太阳能减掉热量损失来计算:

$$A\dot{m}h_{\mathrm{LV}}=A\alpha I-A\varepsilon\sigma(T^4-T_{\infty}^4)-Ah(T-T_{\mathrm{amb}})-Aq_{\mathrm{water}}, \tag{5}$$

其中, $\dot{m}$是系统蒸发速率, h_{LV}是水的汽化潜热, A为顶部

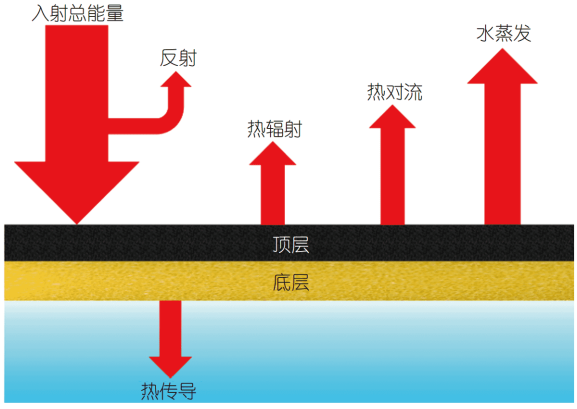


图 3 (网络版彩色)双层结构能量分析图

Figure 3 (Color online) Energy analysis diagram of the bilayer structure

光吸收层吸光面积, α是顶部光吸收层的光吸收率, I 是太阳光辐射强度, ε是顶部光吸收层表面发射率, σ是黑体辐射常数, T是顶部光吸收层表面温度, T_∞是天空温度, h是与空气的热对流系数, T_{amb}是环境温度, q_{water}是吸收体对水体热传导和热辐射的等效热流密度. 进一步, 蒸发效率η可以表达为

$$\eta = \frac{\dot{m}h_{LV}}{I}. \tag{6}$$

通过上述公式可知, 要想得到更高的蒸发速率, 可以通过提高太阳光辐射强度实现; 而若要在低聚光强度的太阳光照射下提高系统的蒸发效率, 则需要减少蒸发过程中的各项热损失以使能量利用最大化. 因此, 需要对各部分热损失进行详细分析与讨论. 需要特别指出的是, 如果要实现蒸发效率大于100%, 就需要把能量损失模式(式(3))改变为: 在太阳光的驱动下, 通过热对流及导热等从空气中吸收热量用来蒸发水. 特别是在低太阳光辐照强度下, 部分蒸发表面的温度会低于周围环境温度, 因此这部分温度较低的表面会从周围环境中获取额外热量用于提高系统的蒸发速率, 也相当于这部分蒸发面的热损失为负值. 根据式(6), 热局域化太阳能蒸汽发生系统的热效率可能会超过100%. 尽管有关此方面的工作已经有文献报道[34], 但尚缺乏系统的研究.

以下将分别对式(5)中各部分能量损失的计算进行介绍. 根据斯特藩-玻耳兹曼定律, 双层结构表面向周围环境的辐射换热损失为

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_\infty^4), \tag{7}$$

其中, ε是第一层光热转化材料的表面发射率. 根据普朗克定律, 黑体辐射能随波长而不断变化, 因此在进行辐射计算时, 实际物体的表面发射率需要根据实际物体光谱辐射力与黑体光谱辐射力的比值进行计算:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda)E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda}{\sigma T^4}. \tag{8}$$

其中, E_b为黑体的辐射力, $\varepsilon(\lambda)$是第一层光热转化材料的表面光谱发射率, $E_{b\lambda}$为黑体的光谱辐射力. 在研究太阳能吸收时, 因为太阳辐射中可见光(λ=280~700 nm)占了近一半, 而大多数物体对可见光波的吸收表现出强烈的选择性, 所以一般不能把物体作为灰体进行研究计算. 然而在实际工程应用中, 为了达到较高的吸收率, 通常选择黑色材料作为第一层光热转化材料. 由于黑色材料对可见光波的选择性较低, 因此可以将其视为漫灰体. 根据基尔霍夫定律, 漫灰体材料的发射率等于同温度下的吸收比, 所以将实验测定的材料吸收率作为其自身发射率进行辐射换热计算.

同时, 根据牛顿冷却定律, 对双层结构表面进行与周围空气的对流换热计算:

$$Q_{conv} = hA(T - T_{amb}), \tag{9}$$

其中, h为第一层光热转化层与周围空气的对流换热系数. 在工程应用中, 对于空气流速较低的工作环境, 双层结构表面的对流换热视为与空气进行的自然对流换热, 其对流换热系数根据经验范围1~10 W m^{-2} K^{-1}选取计算.

双层结构中通过第二层材料向水体产生的热传导损失根据傅里叶定律进行定量研究. 通过数值计算, 分析如何有效地减少热传导损失:

$$Q_{cond} = \lambda A\frac{\Delta T}{l}, \tag{10}$$

其中, λ为水的热导率, $\Delta T/l$为双层结构底面温度到水体温度的温度梯度.

2 光热转化层

在明确了相关传热传质等机理的基础上, 需要根据不同的性能要求对系统双层结构的每一层进行具体分析. 双层结构中, 第一层光热转化材料的主要作用是吸收太阳光后转化为热能作为系统的初始传入能量. 为了提高系统的蒸发效率, 首先要保证最大效率的初始传入能量, 因此光热转化材料的高光吸收率及光热

转化能力是实现高效光热蒸汽转化的先决条件. 由于太阳辐射能量分布在波长280~4000 nm范围内, 且辐射能量密度较低, 因此合适的光热转化材料需要满足在整个太阳光波长范围内具有较高的吸收能力. 目前, 光热转化领域较为常用的光热转化材料主要为金属纳米颗粒和碳元素材料. 金属纳米颗粒因其表面等离激元效应而具有极高的光热转化能力, 碳材料因天然黑色能够高效吸收全频太阳光而被广泛研究并使用.

在保证对太阳光高效吸收的同时, 理想的光热转化层还要保持较低的发射率, 从而降低表面的辐射换热损失. 因此, 如何提高光热材料的太阳光吸收率和降低其在长波波段的低热发射率也是重要的研究内容, 需要对光谱选择吸收材料进行研究, 选取具有高太阳光吸收率和低热发射率的材料作为光热转化层. Ni等人[20]将一种铜涂层的金属陶瓷作为双层结构的光热转化层材料, 这种光谱选择吸收材料的太阳光吸收率高达93%, 而其发射率在100°C条件下仅为0.07, 有效降低了表面热辐射损耗, 同时保证了高效的光热转化能力.

在使用纳米颗粒等作为光热转化层(第一层)材料时, 纳米颗粒等材料的尺寸及在空间的分布等都将对第一层的光谱吸收性能产生重要影响. 目前研究多集中在调控单个纳米颗粒的等离激元共振峰以获得更宽范围的可调光吸收体, 极少考虑纳米颗粒等的群体效应, 关于纳米粒子群在太阳能全光谱下能量吸收特性方面的研究较少. Zhong和Huang[46]通过有限元方法研究了粒子分布在太阳能全光谱下的多粒子系对能量吸收的影响, 并初步提出了一个能量吸收的杂化模型, 用来描述平面涂层中二维铺展的多粒子系的光谱吸收特性, 并给出了太阳能光热转化的最优二维铺展粒子排布规律. 由于目前使用的性能较好的光热转换材料价格普遍较为昂贵, 进一步优化第一层结构中纳米颗粒等微尺度材料的空间分布以获得最佳的吸收效果仍然需要进一步研究.

2.1 金属纳米材料

金属纳米材料由于存在表面等离激元效应而被证明具有高效的光吸收和光热转化能力. 将金属纳米材料作为第一层光热转化材料涂覆在保温支撑层表面可以实现高效的光吸收和光热转化, 这一方式被广泛应用在热局域化太阳能蒸发领域. 但对于单一金属纳米颗粒而言, 其只能吸收共振峰周围的窄带光, 为了满足宽波长范围的高效光吸收要求, 需要对金属纳米颗粒进行调整和改进. Zhou等人[47]将金纳米颗粒以自组装方法与多孔模板有机结合, 调整纳米颗粒的尺寸分布, 制备了高效的太阳光吸收材料. 通过金纳米颗粒间的等离激元杂化效应, 扩展了光谱吸收的波长范围, 该光吸收材料在200 nm~10 μm波段可以实现对太阳辐射能量高达99%的吸收率. 同时, 利用各种金属纳米颗粒对光热蒸汽发生系统结构的设计应用进行了大量研究, 如表1所示. Liu等人[48]将金纳米颗粒沉积在无尘纸上, 制备了一个蒸发效率为77.8%的蒸发装置. Wang等人[49]通过改变沉积在电浆膜上金纳米颗粒的质量, 研究其对系统蒸发效率的影响, 最终在10 kW m^{-2}太阳辐照强度下, 将3.6 mg的金纳米颗粒沉积在直径40 mm的电浆膜上, 得到了一个蒸发效率为85%的蒸发装置.

2.2 碳元素材料

近年来, 随着石墨烯、碳纳米管等材料研究的不

表 1 基于热局域化的太阳能蒸汽发生系统汇总表[44,47~54]

Table 1 Summary of thermal localization solar steam generation systems[44,47–54]

光热转换层	多孔支撑层	光照强度(kW m^{-2})	蒸发效率(%)	参考文献
碳黑颗粒	烧结木屑片	1	77.64	[44]
金纳米颗粒	氧化铝纳米多孔板	4	>90	[47]
金纳米颗粒	无尘纸	1	77.8	[48]
金纳米颗粒	电浆膜	10	85	[49]
氧化石墨烯	木块	12	82.8	[50]
碳颗粒	木块	1	62	[51]
碳颗粒	无尘纸	1	70	[52]
碳颗粒	纤维素海绵	1	90	[53]
碳黑颗粒	纤维素海绵	1	91.5	[54]

断发展，碳基材料由于其在太阳光谱范围内具有高光吸收率的光学特性被广泛应用在光热转化领域. Liu等人[50]采用氧化石墨烯作为双层结构的顶层材料，将氧化石墨烯均匀涂抹在常见的木块上，制成wood-GO结构用于双层太阳能蒸汽发生装置. 在其研究中，氧化石墨烯具有良好的光热转化能力，可以有效提高整个系统的蒸发效率，系统效率在12 kW m^{-2}的太阳辐照强度下可达82.8%. 然而，由于石墨烯材料的制备过于繁复，购置价格较高，Luo等人[51]制备了一种以碳颗粒作为双层结构的顶层材料. 该团队将木材在1000°C下进行高温碳化，用球磨机研磨得到碳颗粒作为顶部吸收层材料. 通过对碳颗粒进行粒径分布表征以及米氏散射理论计算，初步得到碳颗粒在不同粒径下的光谱能量吸收密度，在波长范围200~2000 nm内可实现平均98%以上的吸收率. 通过将其涂覆在木材上与氧化石墨烯、碳纳米管等材料进行对比实验研究，发现碳颗粒可以有效提高系统性能，使双层结构中水的蒸发效率在1 kW m^{-2}的太阳辐照强度下达到62%. 碳颗粒材料使该结构在满足蒸发性能的同时，大幅降低了其制备难度和材料成本. 除不同的碳材料外，碳材料的堆放浓度也会影响热局域化太阳能蒸发系统的光吸收性能，从而影响其蒸发效率. Liu等人[52]基于碳颗粒材料研究了光热材料浓度对太阳能蒸发系统第一层光吸收性能的影响，发现存在一个使系统光热转换效率最大的最佳浓度.

3 保温支撑层结构

对于双层结构而言，充足的水供给且有效的热局域化是保证高效光热蒸汽转化的关键因素. 这里，有效的热局域化是指，在太阳能海水淡化系统中，入射的太阳能被系统的光热转换层吸收并转化为热能，该部分热能由于绝热层(第二层)较低的有效热导率，使得热量向水体中的散失被大大降低，更多的热量被限制在蒸发器中用于加热蒸发区域，使得蒸发区域的局域温度较高，蒸发效率也相应提高. 在热局域化太阳能蒸发系统中，第二层材料会吸收下层水体的水并运送到第一层蒸发区域，材料的孔隙率、亲疏水性能、材料的厚度以及材料本身的热导率等都会对蒸发效率产生影响. 底层支撑材料的热导率一直被认为是影响双层结构绝热能力和蒸发效率的关键因素. 对双层结构进行模拟计算后发现，由于在实际过程中底层材料一直漂浮在水中，对双层结构蒸发效率产生影响的是底层材料和水的有效热导率[55]:

$$k_e = \varphi k_l + (1-\varphi)k_p, \tag{11}$$

其中，k_e为有效热导率，φ为多孔材料孔隙率，k_l为水的热导率，k_p为材料热导率. 因此，只有在底层材料的热导率与水的热导率处于同一数量级时，材料热导率的变化才会影响有效热导率进而影响结构的蒸发效率. 如图4所示，当材料热导率小于1时，随着热导率的升高，双层结构中从底部散失的热量增多，双层结构的蒸发效率下降. 随着热导率进一步升高，材料热导率远大于水的热导率，热量通过材料散失. 整个趋势是随着材料热导率的增加，双层结构的蒸发效率先下降后趋于稳定. 因此，在进行材料选择时，底层材料的热导率应尽可能小以减少向水体的导热损失.

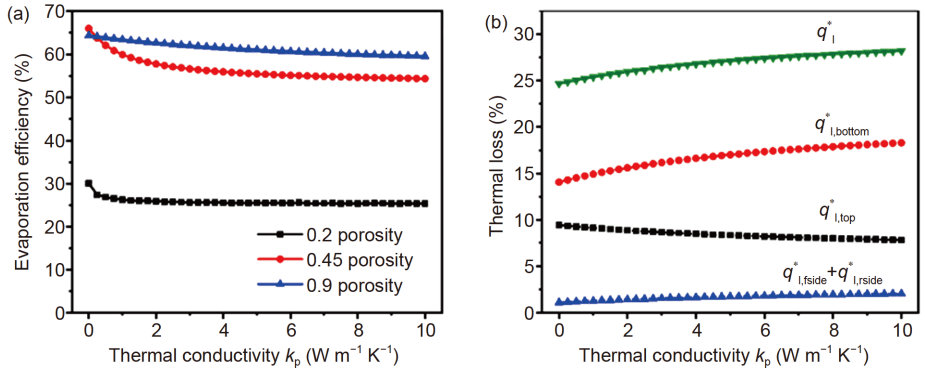


图 4 (网络版彩色)材料热导率对双层结构蒸发效率的影响[43]. (a) 不同孔隙率下，材料热导率对蒸发效率的影响; (b) 孔隙率为0.9时，材料热导率对双层结构各项热损失的影响

Figure 4 (Color online) Influence of the second-layer thermal conductivity on evaporation efficiency of bilayer-structure system[43]. (a) The effect of thermal conductivity of porous materials with different porosity on evaporation efficiency; (b) thermal losses with thermal conductivity of porous material at the porosity of 0.9

第二层材料的孔隙率由于在某种程度上决定了水的供给速率以及热导率, 因此一直是考虑的重点. 提高孔隙率一方面会提高吸水效率, 另一方面会因提高第二层复合热导率而增加热传导损失, 因此寻找底层材料孔隙率的最优值对提高蒸发效率等有很大帮助. Zhong等人[43]通过有限元分析, 研究了双层结构中底部支撑材料的孔隙率对结构蒸发效率的影响, 如图5(a)和(b)所示. 由图可知, 双层结构的蒸发速率随孔隙率的增大而不断增加, 在0.55左右达到峰值后开始下降. 其主要原因在于, 低孔隙率时, 第二层材料的含水量较少, 因此其复合热导率较低, 具有更好的绝热性能; 然而, 低孔隙率使得材料中水含量较低且蒸汽很难扩散到空气中, 因此蒸发效率偏低. 在高孔隙率时, 第二层复合热导率较高, 会产生更多的热量损失, 也会导致蒸发效率偏低, 所以选取合适的孔隙率可以平衡热损失和供水能力的关系以达到最佳的蒸发效率. 对于最佳孔隙率的选取, Liu等人[44]在实验中以木屑压制的薄片作为底层材料, 通过控制压力来控制木屑片的孔隙率, 然后在上表面涂覆碳颗粒进行蒸发实验, 如图5(c)所示. 实验结果表明, 随着孔隙率的变化, 蒸发速率在木片孔隙率约0.52时达到峰值. 对不同孔隙率下的能量损失进行分析, 如图5(b)所示, 结果表明, 随着孔隙率的增大, 双层结构的总能量损失q^*_l不断减少, 并在0.55左右达到最低值, 随后缓慢增大[43]. 最优孔隙率处最低的能量损失是产生最大蒸发效率的原因.

由于第二层的厚度也会同时影响双层结构向水体的散热损失和水的供给速度, 因此合适的第二层厚度也是实现最优蒸发效率的关键因素. Liu等人[52]在表面涂覆碳颗粒的无尘纸双层结构中, 对第二层材料无尘纸的厚度进行了研究, 如图6(a)和(b)所示. 实验结果表明, 无尘纸的厚度存在一个最佳值. 实验开始阶段, 随着无尘纸厚度的不断增加, 蒸发效率和蒸发速率不断增加, 这是因为不同厚度无尘纸的导热系数相同, 而热阻随纸层厚度的增加而线性增加, 因此增大第二层的厚度可以减缓热量散失到水体中. 继续增大无尘纸的厚度, 蒸发效率和蒸发速率趋于稳定并出现缓慢下降的趋势, 这是由于增加无尘纸厚度会降低水的供给速度, 因此会限制蒸发效率和蒸发速率的进一步增加. 另外, Luo等人[53]从降低热传导损失的角度改进双层结构, 将底层材料掏空制成骨架双层结构, 如图6(c)所示. 在骨架结构太阳能蒸发器中, 由于充满空心骨架内部的低导热系数的空气能够起到隔热作用, 从顶部光热高温蒸发区域向底部低温水体的热损失能够被有效抑制. 同时, 考虑到增加骨架结构高度L对减少热损失有积极作用, 而对供水有负面影响, 因此探索了该结构实现最高效率的最佳高度, 如图6(d)所示. 实验结果表明, 随着高度L的增大, 骨架双层结构的蒸发速率和蒸发效率都不断增加, 主要是因为在这一高度范围内, 高度变化对热传导损失的影响较大而对水的供给速率影响较小. 当高度继续增加时(该实验中L>5 cm时), 热传导损失不再发生变化, 而供水速率降低, 使得蒸发速率和蒸发效率开始下降. 因此, 在该骨架双层结构中, 存在合适的L值使得蒸发效率达到最高.

4 外界环境的影响

在太阳辐射强度相同的情况下, 蒸发效率等不仅取决于系统本身的结构设计, 而且对外界环境的变化非常敏感. 在水蒸气蒸发过程中, 周围环境因素的变化

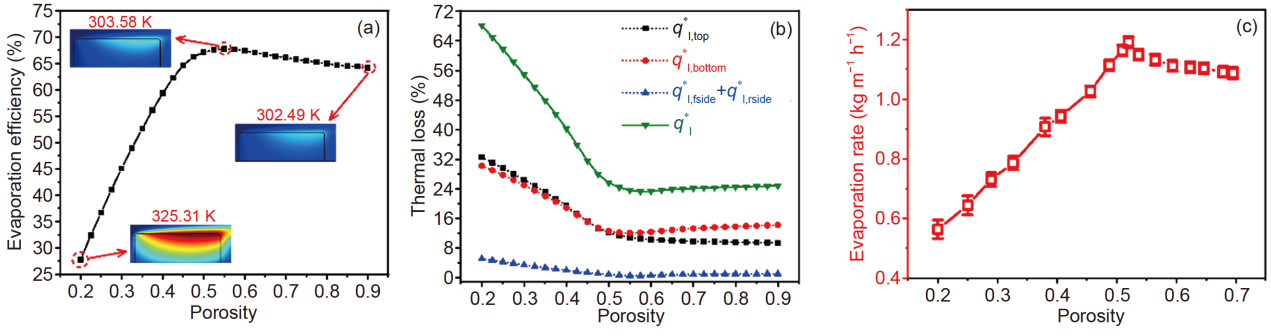


图 5 (网络版彩色)孔隙率对双层结构蒸发效率的影响. (a) 双层结构蒸发效率随孔隙率变化的数值模拟研究[43]; (b) 材料孔隙率对双层结构各项热损失的影响[43]; (c) 双层结构蒸发效率随孔隙率变化的实验研究[44]

Figure 5 (Color online) Influence of the second-layer porosity on evaporation efficiency of bilayer-structure system. (a) Numerical simulation of evaporation efficiency with porosity[43]; (b) thermal losses with porosity[43]; (c) experimental research of evaporation efficiency with porosity[44]

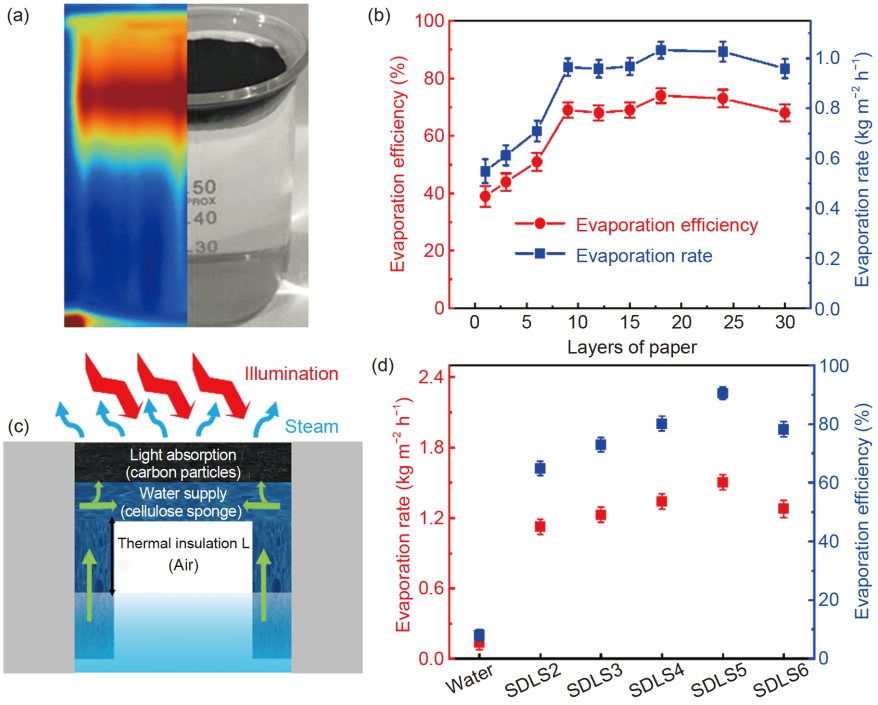


图 6 (网络版彩色)第二层厚度对双层结构蒸发效率的影响. (a) 纸基双层结构; (b) 纸基双层结构的蒸发速率和蒸发效率[52]; (c) 骨架双层结构工作原理示意图; (d) 骨架双层结构的蒸发速率和蒸发效率[53]

Figure 6 (Color online) Influence of the second-layer thickness on evaporation efficiency of bilayer-structure system. (a) Paper based bilayer structure; (b) the evaporation rate and the evaporation efficiency of the paper based bilayer structure[52]; (c) the working principle of the skeleton double layer structure (SDLS); (d) the evaporation rate and the evaporation efficiency of the SDLS system[53]

会对蒸发速率和效率的大小产生直接影响. 本文重点介绍空气的流速、相对湿度、温度, 以及水体温度对水蒸气蒸发效率的影响.

基于传热传质等机理, Zhong等人[42,43]通过有限元模拟对外界环境的影响进行了详细研究. 由图7(a)可知, 随着周围空气流速的增加, 开始阶段蒸发效率不断增大, 这是由于空气流速增加会降低系统蒸发面上方的饱和蒸气压, 促进蒸发的进行. 然而, 当空气流速大到一定数值后, 蒸发速率将变缓并趋于恒定值, 这时蒸发速率将主要受系统温度的影响. 同样, 周围空气的相对湿度也会影响蒸发速率, 如图7(b)所示, 随着相对湿度的增加, 蒸发速率近似呈线性下降, 这是因为较高的相对湿度代表系统蒸发面周围具有较大的饱和蒸气压, 会抑制蒸发.

外界空气的温度以及水体的温度也对双层结构的蒸发速率有着重要影响. Zhong等人[43]建立了蒸发效率与空气温度和水体温度之间的关系式. 在蒸发过程中, 第一层吸收的总能量$Q_{\rm tot}$一部分用于蒸发水, 为有效能量$Q_{\rm eff}$, 另一部分分别散失到空气中$Q_{\rm air}$和水体中$Q_{\rm water}$向环境(空气和水体)的散热主要通过对流实现, 因此总能量可以表达为

$$\begin{aligned} Q_{\rm tot} &= Q_{\rm eff}+Q_{\rm air}+Q_{\rm water} \\ &\approx A_{\rm top}q_{\rm eff}+A_{\rm top}h_0(T_1-T_0) \\ &\quad +A_{\rm bottom}h_{\rm w}(T_2-T_{\rm w}), \end{aligned} \tag{12}$$

其中, $A_{\rm top}$和$A_{\rm bottom}$分别为双层结构上表面和下表面的面积, T_1和T_2分别为双层结构上表面和下表面的温度, T_0和$T_{\rm w}$分别为环境空气和水体与系统间的界面温度. 进而, 蒸发效率可近似表达为

$$\eta=\frac{q_{\rm eff}}{q_{\rm tot}}\approx a+bT_0+cT_{\rm w}, \tag{13}$$

其中, $\eta=\frac{q_{\rm tot}-h_0T_1-h_{\rm w}T_2}{q_{\rm tot}}$, $b=\frac{h_0}{q_{\rm tot}}$, $c=\frac{h_{\rm w}}{q_{\rm tot}}$, h_0和$h_{\rm w}$分别是环境空气和水体与系统间的对流换热系数. 由式(13)可知, 系统蒸发效率与环境空气温度和水体温度近似线性相关. 通过对更准确模拟数据的拟合, 可以得到[42]

$$\eta\approx -615+0.4796T_0+1.839T_{\rm w}, \tag{14}$$

拟合系数大于0.99.

图7(c)和(e)展示了蒸发效率随环境温度和水体温度升高的变化, 表明更高的环境和水体温度能够大幅

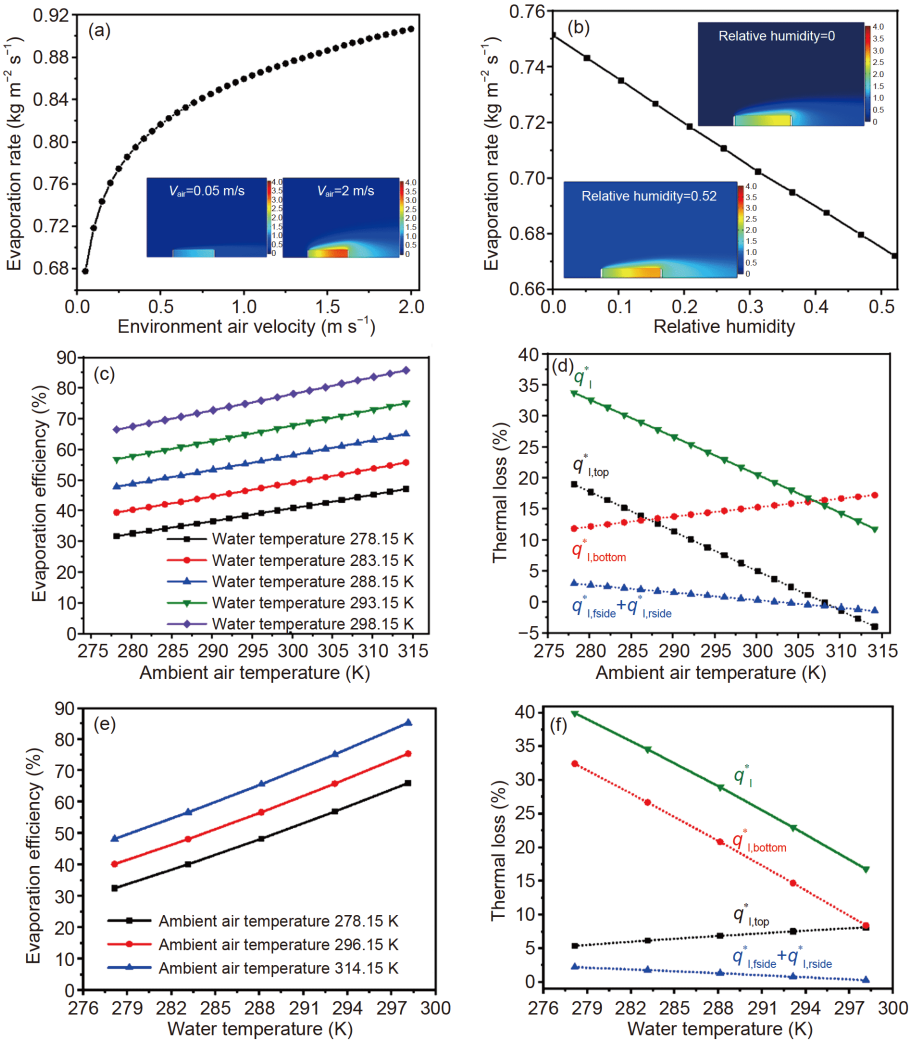


图 7 (网络版彩色)环境因素对双层结构蒸发效率的影响. (a) 环境空气流速[42]; (b) 环境相对湿度[42]; (c) 环境空气温度[43]; (d) 环境空气温度对双层结构各项热损失的影响[43]; (e) 水体温度[43]; (f) 水体温度对双层结构各项热损失的影响[43]

Figure 7 (Color online) Influence of environmental factors on evaporation efficiency of bilayer structures. (a) Ambient air velocity[42]; (b) ambient relative humidity[42]; (c) ambient air temperature[43]; (d) the thermal loss with ambient air temperature[43]; (e) water temperature[43]; (f) the thermal loss with water temperature[43]

度提高蒸发效率. Zhong等人[43]从能量损失的角度进行了分析, 结果如图7(d)和(f)所示. 对于环境温度而言, 随着环境温度的升高, 双层结构上表面与周围空气的温差减小, 辐射热损失和对流热损失显著降低, 向水体的导热损失小幅提升, 总热损失降低, 因此蒸发效率得到提升. 对于水体温度而言, 水温升高导致热传导损失大幅降低, 却几乎不影响对上表面的热损失, 也可以有效提高蒸发效率, 因此较高的环境温度和水体温度更有助于双层结构蒸发性能的提升.

另外, 在一个固定的太阳光强下, 系统的含水量较少会导致蒸发面温度较高从而产生较多的热损失, 而系统的含水量较多又会使蒸发面的温度较低从而使蒸发速率变慢, 因此, 存在一个最佳的系统含水量以实现水和能量之间的匹配, 从而使蒸发效率最大化. 并且, 实际环境中太阳光强在一天内是随着时间变化的. 为了达到在光强变化下的持续高蒸发效率, 系统的含水量也要随着光强的变化而变化. 为了解决这个问题, Liu等人[54]提出了一种新型的碳黑-纤维素泡沫太阳能蒸发系统, 其中水的供给依靠注射来定量控制, 如图8所示. 在一个固定的太阳光强下, 不断调节注水速率直到系统最大的蒸发速率出现, 此时的注水速率使得水的供给量与能量相匹配, 即为此光强下的最佳注水速

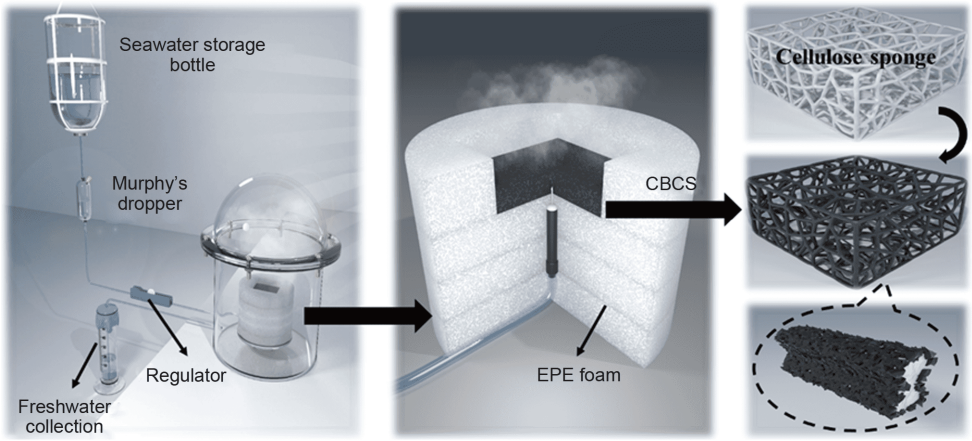


图 8 (网络版彩色)注射供水的碳黑-纤维素泡沫太阳能蒸发发生系统[54]
Figure 8 (Color online) A new carbon-black/cellulose-sponge solar steam generation system with water supplied by injection[54]

率. 通过光强的变化来调节注水速率, 该系统在一个太阳光强下可以获得约91.5%的高蒸发率.

5 应用中的瓶颈问题

(ⅰ) 除盐问题. 由于水分蒸发, 太阳能定域蒸发器中的海水盐度升高, 这会导致盐分结晶在蒸发器表面或内部. 在长时间工作的情况下, 沉积的盐分会严重影响蒸发器的光吸收性能及其结构稳定性. 面对盐分沉积的问题, 常采用机械清洁的方法, 但这会增加清洁成本且蒸发器不能连续工作, 因此通过优化蒸发器结构来避免盐分沉积成为亟待解决的问题. 目前已对除盐问题进行了初步探索, 主要集中在使用疏水光热材料防止盐水进入蒸发器上层[32,56]; 在蒸发器中设置大孔径通道, 促进盐离子纵向扩散到蒸发器下的水体[57,58]; 减少盐离子在蒸发器中的扩散距离, 防止其在蒸发面结晶. 但是, 对比目前不强调除盐的传统结构蒸发器的高蒸发效率(90%左右), 这些采用除盐结构蒸发器的蒸发效率普遍较低(<80%), 提高带有除盐结构蒸发器的蒸发效率还有待进一步研究. 通过优化蒸发器的孔隙率和孔径等微观结构, 实现在蒸发器表面抗盐[59~61], 并同时保证热损失最小, 进而对系统进行整体优化是未来的可行方向之一.

(ⅱ) 大规模应用问题. 目前, 太阳能定域蒸发器的研究设计主要还局限在实验室规模. 将太阳能定域蒸发系统大规模应用到海面上进行海水淡化时, 有两个实际问题将会变得十分突出. 第一个是水蒸气的收集. 因为传统的水蒸气收集方式需要大面积的蒸汽冷凝板, 这会使得应用在海面上的定域蒸发系统极其复杂且价格高昂. 目前, 如何实现大规模收集太阳能热局域蒸发器蒸发出的水蒸气并将其冷凝成水仍然是一个挑战. 第二个是当大规模太阳能定域蒸发器应用在海面上时, 由于海面波浪的涌动, 太阳能蒸发器与下面海水之间的对流传热将不能忽略. 另外, 太阳能蒸发器与上层空气间的对流传热也将有所增加[59]. 实际应用中, 为了获取大规模蒸发器的高蒸发效率(90%左右), 必须有效抑制太阳能蒸发器上下层的对流传热损失. 为此, 在接下来的工作中, 可以探索采用模块化蒸发器、蒸汽向下蒸发、柔性材料和系统, 以及合适的支撑和绝热结构来提高系统的大规模应用可行性.

(ⅲ) 质能匹配问题. 在太阳能定域蒸发中, 上层光热材料将太阳能转换成热能, 并用来加热其下层吸水材料中的水. 在光强稳定的情况下, 上层光热材料转化的热能是一定的. 这时, 如果蒸发区的水过多, 将导致水温过低, 蒸发速度下降, 蒸发效率不高; 如果蒸发区的水过少, 将导致水温过高, 蒸发系统与外界的换热量增大, 过多的热损失使得系统的蒸发效率变低. 因此, 蒸发区的水量必须控制在一定范围, 使其与系统转化的能量相匹配, 才能使蒸发速率和效率达到最大, 即蒸发系统的供水速率存在一个最佳值. 2019年, Liu等人[54]提出了一种带有控水装置的太阳能定域蒸发系统, 对这个问题进行了初步探索. 该方法通过采用最佳供水速率, 实现在日光照射下不断调节注水速率, 使得蒸发系统的蒸发效率始终最大. 在最佳供水速率下, 室外运行的蒸发效率可以高达91.5%. 对于大规模太阳能定域蒸发系统, 如果实现了质能匹配, 将会大大增加系统蒸发量和产水量, 但是这方面的研究还十分匮乏. 为

此, 随太阳能密度变化, 供水速率也相应变化的智能化太阳能热局域化蒸汽发生系统亟待研究.

6 总结与展望

基于双层结构的蒸汽发生系统实现了低聚光下的高效太阳能光-热-蒸汽转化, 因其结构简单、投入成本低、蒸发效率高、易于推广应用等特点而受到广泛关注. 在前人的研究基础上, 我们对双层结构内的传热传质等机理进行了总结, 并从能量守恒的角度对系统结构设计和材料选取进行了梳理. 目前相关研究的主要进展包括: (1) 理清了双层结构太阳能蒸汽发生系统的传热传质过程以及流动过程等, 并建立了模型进行描述, 为后续改进系统结构并选取合适的材料提供了一定的理论依据; (2) 对于光热转化层(第一层), 主要从宽频段的高光吸收率和长波波段的低热发射率两方面对光吸收材料进行挑选, 以达到高光吸收性能和低热辐射损失, 同时需要对纳米颗粒等光热材料的尺寸及空间分布进行优化, 以达到更好的光热转化效果; (3) 保温支撑层(第二层)材料的孔隙率和厚度等都会对热损失、毛细效应和供水速度产生影响, 因此存在最优的孔隙率和厚度, 以实现在保证供水速度合适的情况下热损失最小; (4) 除结构因素外, 环境因素也会对蒸发效率产生重要影响, 包括空气的流速、相对湿度、温度, 以及水体的温度等. 随着空气流速的增加, 受空气扰动, 蒸发速率不断增大后趋于稳定. 随着空气相对湿度的增加, 蒸发速率近似呈线性下降. 对于空气温度和水体温度, 系统蒸发效率与二者近似线性相关, 较高的空气温度和水体温度更有助于双层结构蒸发性能的提升.

尽管随着研究的不断深入, 光-热-蒸汽转化效率不断提高, 但仍然存在很大的优化空间值得探索. 例如, (1) 尽管在实验室条件下, 系统的蒸发效率最高可达92%, 在实际工程应用中能否持续、高效、稳定、低成本的输出蒸汽或冷凝水, 仍需要不断完善技术手段以及进行材料革新, 满足可规模化生产、工作寿命长、环境适应性好的工程要求. (2) 对第一层结构的优化不足. 由于使用的材料通常尺度较小, 需要进一步从近场辐射等视角审视第一层微观结构的优化和材料的选取, 以实现最小的材料消耗、最大的光-热-蒸汽转化效率. (3) 由于太阳能资源有限, 如何实现该类系统效率的进一步提高, 甚至实现超过100%的效率仍然值得探讨.

参考文献

1 Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades. Nature, 2008, 452: 301–310
2 Elimelech M, Phillip W A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. Science, 2011, 333: 712–717
3 Haddeland I, Heinke J, Biemans H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change. Proc Natl Acad Sci USA, 2014, 111: 3251–3256
4 Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity. Sci Adv, 2016, 2: e1500323
5 Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wie J M. Advances in seawater desalination technologies. Desalination, 2008, 221: 47–69
6 Semiat R. Energy issues in desalination processes. Environ Sci Technol, 2008, 42: 8193–8201
7 Henthorne L, Boysen B. State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. Desalination, 2015, 356: 129–139
8 Jiang Q, Tian L, Liu K K, et al. Bilayered biofoam for highly efficient solar steam generation. Adv Mater, 2016, 28: 9400–9407
9 Kashyap V, Al-Bayati A, Sajadi S M, et al. A flexible anti-clogging graphite film for scalable solar desalination by heat localization. J Mater Chem A, 2017, 5: 15227–15234
10 Neumann O, Feronti C, Neumann A D, et al. Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110: 11677–11681
11 Zhou L, Tan Y, Wang J, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. Nat Photonics, 2016, 10: 393–398
12 Tripathi R, Tiwari G N. Thermal modeling of passive and active solar stills for different depths of water by using the concept of solar fraction. Sol Energy, 2006, 80: 956–967
13 Xiao G, Wang X, Ni M, et al. A review on solar stills for brine desalination. Appl Energy, 2013, 103: 642–652
14 Sharon H, Reddy K S. A review of solar energy driven desalination technologies. Renew Sustain Energy Rev, 2015, 41: 1080–1118
15 Fang Z, Zhen Y R, Neumann O, et al. Evolution of light-induced vapor generation at a liquid-immersed metallic nanoparticle. Nano Lett, 2013, 13: 1736–1742
16 Ghasemi H, Ni G, Marconnet A M, et al. Solar steam generation by heat localization. Nat Commun, 2014, 5: 4449
17 Neumann O, Urban A S, Day J, et al. Solar vapor generation enabled by nanoparticles. ACS Nano, 2012, 7: 42–49

18 Wang X, He Y, Liu X, et al. Investigation of photothermal heating enabled by plasmonic nanofluids for direct solar steam generation. Sol Energy, 2017, 157: 35–46

19 Liu Y, Chen J, Guo D, et al. Floatable, self-cleaning, and carbon-black-based superhydrophobic gauze for the solar evaporation enhancement at the air–water interface. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7: 13645–13652

20 Ni G, Li G, Boriskina S V, et al. Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration. Nat Energy, 2016, 1: 16126

21 Jiang F, Liu H, Li Y, et al. Lightweight, mesoporous, and highly absorptive all-nanofiber aerogel for efficient solar steam generation. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10: 1104–1112

22 Kim K, Yu S, An C, et al. Mesoporous three-dimensional graphene networks for highly efficient solar desalination under 1 sun Illumination. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10: 15602–15608

23 Li H, He Y, Hu Y, et al. Commercially available activated carbon fiber felt enables efficient solar steam generation. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10: 9362–9368

24 Li X, Lin R, Ni G, et al. Three-dimensional artificial transpiration for efficient solar waste-water treatment. Natl Sci Rev, 2018, 5: 70–77

25 Wei T Q, Li X Q, Li J L, et al. Interfacial solar vapor generation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1404–1416 [魏天骐, 李秀强, 李金磊, 等. 界面光蒸汽转化研究进展. 科学通报, 2018, 63: 1404–1416]

26 Huang Q, Huang C, Liu S, et al. Solar vapor generation optimization of a carbon-black/wood-flour system with strength enhanced by polystyrene. Int J Energy Res, 2020, 44: 3687–3696

27 Wang Z, Liu Y, Tao P, et al. Bio-inspired evaporation through plasmonic film of nanoparticles at the air-water interface. Small, 2014, 10: 3234–3239

28 Zhang L, Tang B, Wu J, et al. Hydrophobic light-to-heat conversion membranes with self-healing ability for interfacial solar heating. Adv Mater, 2015, 27: 4889–4894

29 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. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, 113: 13953–13958

30 Xu N, Hu X, Xu W, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices. Adv Mater, 2017, 29: 1606762

31 Xue G, Liu K, Chen Q, et al. Robust and low-cost flame-treated wood for high-performance solar steam generation. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9: 15052–15057

32 Xu W, Hu X, Zhuang S, et al. Flexible and salt resistant janus absorbers by electrospinning for stable and efficient solar desalination. Adv Energy Mater, 2018, 8: 1702884

33 Zhao F, Zhou X, Shi Y, et al. Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels. Nat Nanotechnol, 2018, 13: 489–495

34 Li X, Li J, Lu J, et al. Enhancement of interfacial solar vapor generation by environmental energy. Joule, 2018, 2: 1331–1338

35 Gao M, Peh C K, Zhu L, et al. Photothermal catalytic gel featuring spectral and thermal management for parallel freshwater and hydrogen production. Adv Energy Mater, 2020, 10: 2000925

36 Liu Y, Lou J, Ni M, et al. Bioinspired bifunctional membrane for efficient clean water generation. ACS Appl Mater Interfaces, 2016, 8: 772–779

37 Yang P, Liu K, Chen Q, et al. Solar-driven simultaneous steam production and electricity generation from salinity. Energy Environ Sci, 2017, 10: 1923–1927

38 Ding T, Liu K, Li J, et al. All-printed porous carbon film for electricity generation from evaporation-driven water flow. Adv Funct Mater, 2017, 27: 1700551

39 Xiao P, He J, Ni F, et al. Exploring interface confined water flow and evaporation enables solar-thermal-electro integration towards clean water and electricity harvest via asymmetric functionalization strategy. Nano Energy, 2020, 68: 104385

40 Zhong J, Huang C. Thermal-driven ion transport in porous materials for thermoelectricity applications. Langmuir, 2020, 36: 1418–1422

41 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. Adv Energy Mater, 2018, 8: 1702149

42 Zhong J, Huang C, Wu D, et al. Influence factors of the evaporation rate of a solar steam generation system: A numerical study. Int J Heat Mass Transf, 2019, 128: 860–864

43 Zhong J, Huang C, Wu D. Surrounding effects on the evaporation efficiency of a bi-layered structure for solar steam generation. Appl Therm Eng, 2018, 144: 331–341

44 Liu S, Huang C, Luo X, et al. Performance optimization of bi-layer solar steam generation system through tuning porosity of bottom layer. Appl Energy, 2019, 239: 504–513

45 Datta A K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. J Food Eng, 2007, 80: 80–95

46 Zhong J, Huang C. Crowding effects of nanoparticles on energy absorption in solar absorption coatings. J Appl Phys, 2019, 125: 033103

47 Zhou L, Tan Y L, Ji D X, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation. Sci Adv, 2016, 2: e1501227
48 Liu Y, Yu S, Feng R, et al. A bioinspired, reusable, paper-based system for high-performance large-scale evaporation. Adv Mater, 2015, 27: 2768–2774
49 Wang X, He Y, Liu X, et al. Solar steam generation through bio-inspired interface heating of broadband-absorbing plasmonic membranes. Appl Energy, 2017, 195: 414–425
50 Liu K K, Jiang Q, Tadepalli S, et al. Wood–graphene oxide composite for highly efficient solar steam generation and desalination. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9: 7675–7681
51 Luo X, Huang C, Liu S, et al. High performance of carbon-particle/bulk-wood bi-layer system for solar steam generation. Int J Energy Res, 2018, 42: 4830–4839
52 Liu S, Huang C, Luo X, et al. High-performance solar steam generation of a paper-based carbon particle system. Appl Therm Eng, 2018, 142: 566–572
53 Luo X, Wu D, Huang C, et al. Skeleton double layer structure for high solar steam generation. Energy, 2019, 183: 1032–1039
54 Liu S, Huang C, Huang Q, et al. A new carbon-black/cellulose-sponge system with water supplied by injection for enhancing solar vapor generation. J Mater Chem A, 2019, 7: 17954–17965
55 Lin Z Z, He Y L, Li Y S. Thermal conductivity and specific heat of hollow nanowires: Theoretical modeling and size effect analysis (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 611–620 [蔺子甄, 何雅玲, 李印实. 空心纳米线热导率和比热: 理论模型构建与尺度效应分析. 科学通报, 2019, 64: 611–620]
56 Cooper T A, Zandavi S H, Ni G W, et al. Contactless steam generation and superheating under one sun illumination. Nat Commun, 2018, 9: 5086
57 He S, Chen C, Kuang Y, et al. Nature-inspired salt resistant bimodal porous solar evaporator for efficient and stable water desalination. Energy Environ Sci, 2019, 12: 1558–1567
58 Kuang Y, Chen C, He S, et al. A high-performance self-regenerating solar evaporator for continuous water desalination. Adv Mater, 2019, 31: 1900498
59 Ni G, Zandavi S H, Javid S M, et al. A salt-rejecting floating solar still for low-cost desalination. Energy Environ Sci, 2018, 11: 1510–1519
60 Xia Y, Hou Q, Jubaer H, et al. Spatially isolating salt crystallisation from water evaporation for continuous solar steam generation and salt harvesting. Energy Environ Sci, 2019, 12: 1840–1847
61 Wu L, Dong Z, Cai Z, et al. Highly efficient three-dimensional solar evaporator for high salinity desalination by localized crystallization. Nat Commun, 2020, 11: 521

Summary for “基于传热传质分析的热局域化太阳能蒸汽发生系统优化研究进展”

Research advances on optimization of thermal localization solar steam generation system based on heat and mass transfer analysis

Congliang Huang*, Qiangqiang Huang, Changkang Du & Xiao Luo

School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
* Corresponding author, E-mail: huangcl@cumt.edu.cn

The solar steam generation system has attracted tremendous research attention owing to its high conversion efficiency of solar energy. Currently, solar steam generation systems have been widely studied. Initially, the nano-fluid has been used to achieve solar steam generation, and then the thermal localization solar steam generation system is emerging as a new way because of its potential high evaporation efficiency. In this review, we firstly introduce the basic heat and mass transports in the thermal localization solar steam generation system, then sort out the underlying physics in the existing technology like system structure design and material selection from the perspective of energy conservation, finally point out what else could be further carried out to further improve the performance of the system.

The main progresses of related researches at present include: (1) The heat and mass transfer mechanism in the thermal localization solar steam generation system was clarified and modeled for mathematical description, which could provide a theoretical basis for the further improvement of the system structure design and also selection of suitable materials. (2) For the light-to-heat conversion layer (the first layer), light-absorbing materials are selected mainly from two aspects such as high light absorption in a wide spectral band and low heat emissivity in long wavelength band, thus to achieve high light absorption performance and low heat radiation losses. At the same time, the size and spatial distribution of materials like nanoparticles on the surface of the first layer should be optimized to achieve a high light-to-heat conversion efficiency. (3) The porosity and thickness of the thermal insulation supporting layer (the second layer) will affect the heat loss, capillary and water supply rate. Therefore, there is an optimal porosity and thickness to minimize heat loss while ensuring the proper water supply rate. (4) In addition to the structure, environment can also have an important impact on the evaporation efficiency, including air flow rate, air relative humidity, air and water temperature, and the relative temperature difference between environment and bulk water. As the air velocity increases, the evaporation rate first increases because of disturbance from the air then becomes stable. As the relative humidity increases, the evaporation rate decreases almost linearly. The evaporation efficiency of the system is approximately linearly related to the ambient air temperature and also bulk-water temperature, besides higher ambient temperature and water temperature could improve the evaporation performance of the system.

Some bottlenecks that limit the practical application of the thermal localization solar steam generation system were also summarized to highlight the potential focus of future work. Although the light-heat-steam conversion efficiency has been continuously increased, there is still much room for further enhancement. For example: (1) The material involved in the system should be further improved for meeting the requirement of large-scale application, long working life and good environmental adaptability; (2) it is still necessary to further examine the optimization of the first layer of microstructure and the selection of materials from the perspective of near-field radiation to achieve high light-heat-steam conversion efficiency; (3) the evaporation efficiency is expected to be further improved by methods like absorbing heat from environment and also by recycling utilization of vapor latent heat. These methods are expected to give a much high evaporation efficiency, even much larger than 100%. Besides evaporation efficiency, there are still some technical limitations that should be overcome, including precipitation of salt on surface, large-scale application related problems, and water-supply, solar-energy matching issues, etc.

heat and mass transfer, photo-thermal conversion, solar energy, desalination

doi: 10.1360/TB-2020-0901