DOI:10.20176/j.cnki.nxdz.20251212

太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发和收集性能优化

邢永雷[1], 杨合聿[1], 强梦媛[2], 付琳婧[2], 莫雅璐[2],
蒋卓航[2], 季银枝[1], 赵 奇[2], 倪 刚[1], 杨亚威[2*]
(1.宁夏大学 化学化工学院,宁夏 银川 750021; 2.西安交通大学 电子科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要:太阳能光热驱动界面蒸发是一种新兴的海水淡化技术,受到广泛关注,但由于存在难以大范围设计、组装问题,其实用化装置的开发受到限制。制备单个太阳能蒸发系统,优化其排布结构,设计、对比高透光聚乙烯醇(PVA)防雾膜、商品聚偏乙烯(PO)膜、玻璃等3种材质的蒸汽冷凝器,结合净水收集器,搭建3种太阳能光热驱动界面蒸发系统;优化多单元蒸发系统组件,包括设置蒸发系统的角度为60°、引入光热层入水机制及采用两侧非对称供水层(比例为1:2)结构,同时辅以顶盖冷却降温策略。结果表明,在光照强度为400 mW/cm^{2}时,太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发速率达4.88 kg/(m^2·h);将具有较好防雾性能的玻璃用于蒸发系统收集冷凝水时,蒸发系统展现出较低的水收集效率(3.05 kg/(m^2·h));对顶盖冷却降温,没有提升冷凝水的收集效率。该太阳能光热驱动界面蒸发系统的创新结构,为海水淡化与污水净化的大规模应用研究,提供了有益参考。

关键词:太阳能光热驱动;界面蒸发;蒸发器结构;收集器
分类号:(中图)TK519;TK513 **文献标志码:**A

水资源短缺是当今世界面临的严重挑战之一,特别是在一些干旱和人口稠密地区,人口的持续增长导致水资源供需失衡[1]。当前的水处理技术可分为传统和高级两类[2],其中,传统水处理技术包括沉淀法、过滤法及活性炭吸附法等;高级水处理技术包括反渗透、离子交换及紫外线消毒法等。使用上述方法进行水处理,不仅消耗大量能源,处理成本较高,而且处理过程中大量废水的排放也是一个重要问题。与传统的海水淡化技术相比,太阳能光热驱动界面蒸发技术,利用太阳能将海水中的水分蒸发并收集,以生产淡水。该技术具有诸多优势,包括低成本、无需外部能源及环境友好等,是一种具有巨大潜力的海水淡化解决方案[3-4]。近年来,太阳能光热驱动界面蒸发技术,在界面蒸发材料和结构设计方面取得令人瞩目的进展[5]。目前,被用于太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发材料主要有碳材料[6]、无机半导体[7]、等离子体纳米颗粒[8]及聚合物-凝胶材料[9],研究者对以这些材料为界面蒸发系统的蒸发性能和净化效果进行了深入研究;同时,使用低成本材料,设计了多种蒸发结构,并将其用于界面水蒸发体系。Yang等[10]将低成本的椰壳布炭化,并将其作为水输送及光热转换的材料,然后,根据类二极管的结构设计,实现了在光照强度(E)为400 mW/cm^{2}下,基于椰壳布炭化材料的光热驱动蒸发器的蒸发速率(v_e)达7.28 kg/(m^2· h)。最后,通过离子迁移、可视化显色和数值模拟实验,证实非对称结构蒸发器可增强盐离子的定向选择性迁移,并表现出优异的耐盐性。目前,太阳能光热驱动界面蒸发技术研究,主要集中在材料和结构的研发方面,有关太阳能蒸发系统装置的研究较少。同时,

收稿日期:2024-05-06
基金项目:宁东能源化工基地重点支持领域科技项目(2022NDKJXMLX013);陕西省"科学家+工程师"队伍建设项目(2022KXJ-162);国家自然科学基金资助项目(21567021)
作者简介:邢永雷(1988—),男,副教授,博士,主要从事废水处理、高级氧化方面的研究,(电子邮箱)ylxing@nxu.edu.cn。
*通信联系人:杨亚威(1991—),男,副教授,博士,主要从事太阳能光热驱动界面蒸发水盐分离技术研究,(电子邮箱)ywyang@xjtu.edu.cn。
引用格式:邢永雷,杨合聿,强梦媛,等.太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发和收集性能优化[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(1):56-66,96.

研究者也意识到太阳能光热驱动界面蒸发系统装置的实际应用价值。例如，Wu 等[11]采用商用脱脂棉、核壳结构 CuS 纳米笼和琼脂糖，制备稳定性优异的柔性气凝胶，并在 $E=100\ \mathrm{mW/cm^2}$ 下，使用该气凝胶作为太阳能光热驱动界面蒸发器的光热层。研究结果显示，该气凝胶的光热转换效率为 94.95%，相对应水的 v_e 为 1.63 kg/(m²· h)，但该蒸发系统仍然面临蒸发性能不足及水收集效率较低的问题[12]。

基于实际太阳能光热驱动界面蒸发技术面临的关键问题[13]，文中设计一种较大面积的太阳能光热驱动界面蒸发系统，并对光热转换材料及水输送层的结构、蒸发器组件的排列方式和冷凝器等进行系列优化。该系统是以莫代尔黑布为光热材料，将其覆盖在椰壳布上作为两侧非对称输水层，且倾角为 60°的三棱锥式蒸发器。首先，将该蒸发器组装并通过 PC 板固定于 $w=15\%$ 的 NaCl 溶液中。然后，将整个蒸发器置于箱子中，采用玻璃材质冷凝器收集水。最后，将整个蒸发系统倾斜 30°，以达到最好的水蒸发、收集效果。为防止出现蒸发系统中蒸汽压过高导致冷凝效率低的问题，对收集器顶盖实施鼓风降温，以加速冷凝水收集。该做法未提升冷凝器的效率，主要原因在于蒸发器温度不高。因此，通过调整所设计的太阳能光热驱动界面蒸发系统的结构及外部条件，可为该系统的蒸发及收集性能提升，提供新的思路和方法，也为太阳能水净化领域的发展提供技术支持。

1　实验部分

1.1　原理

太阳能光热驱动界面蒸发技术，以太阳光为能源，通过光热转换材料（太阳能吸收器）将光能转换为热能。光热转换材料与水体界面处的水分子吸收足够的热量后，通过光热转换材料内部通道，以气体形式逸出，而水中的杂质和溶质保留在水体中，从而实现水的净化。在以太阳能为驱动力的蒸发系统中，太阳能吸收器是其主要组成部分[14-17]。为分析蒸发器的蒸发性能，文中自主搭建整个太阳能蒸发系统的 v_e 测试系统，包括氙灯（模拟太阳光）、全自动光功率计（检测 E）、滤光片、电子天平及红外热成像仪。蒸发器的蒸发性能测试过程：将一定量的去离子水注入蒸发器的储水容器中。再将光热层通过提前设计并打印好的 3D 板材固定在水体之上。接着，将蒸发器放置在电子天平上，通过电脑终端以 15 s 为 1 次的间隔，记录质量数据。在测试前，将光热层及输水层完全浸湿，以达到疏通材料微观通道的效果。再打开氙灯，将蒸发器的光热层中心对准氙灯光源中央。

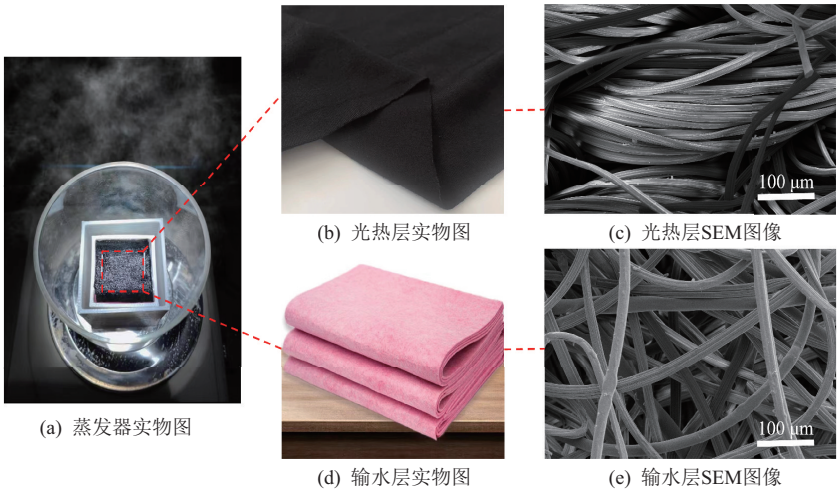
根据测试数据，计算 v_e(kg/(m²· h))，即：

$$v_e=\frac{m}{s\times t}。\tag{1}$$

式中：m 为蒸发水体的质量(kg)；s 为蒸发器光热层的有效面积(m²)；t 为蒸发时间(h)。

1.2　方案

将光热层莫代尔黑布与输水层椰壳布连接，然后将其固定在事先设计并打印好的储水容器内。这样，浸入水体的部分椰壳布可作为供水通道，并组成太阳能界面蒸发器。将整体蒸发器置于收集容器内部，并在容器顶部盖上一层玻璃顶盖。然后，对蒸发系统进行密封处理，以保证封闭的蒸发环境（图 1(a)）。在 v_e 测试中，采用氙灯光源模拟太



(a) 蒸发器实物图　(b) 光热层实物图　(c) 光热层SEM图像　(d) 输水层实物图　(e) 输水层SEM图像

图 1　太阳能光热驱动蒸发器的光热层与输水层

Fig. 1 Photothermal layer and water transport layer of the solar photothermal-driven evaporator

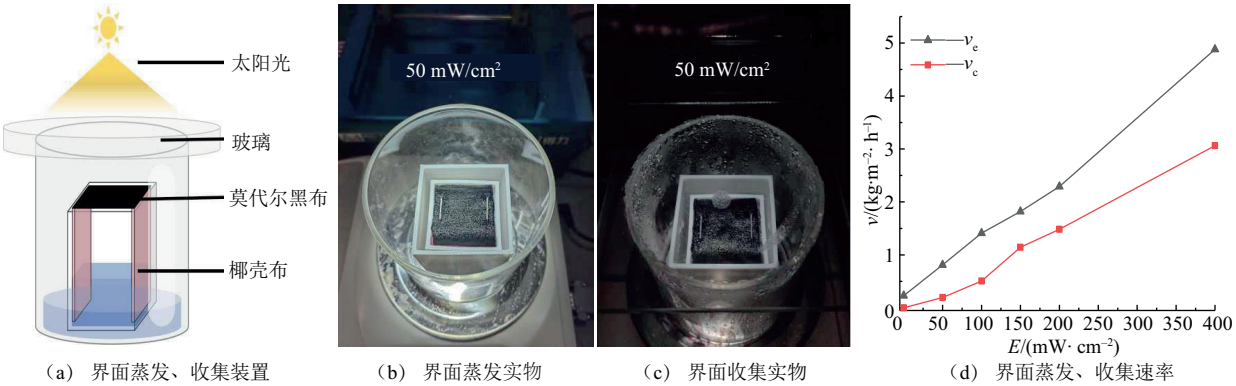
阳光,并将其作用在蒸发器的光热层表面。使用光功率计将 E 校准为不同的数值,即 50、100、150、200、400 mW/cm^2。同时,使用电子天平,实时检测一定时间段内水的质量损失,通过在线红外热成像仪,检测蒸发器光热层的表面温度。

使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对椰壳布、莫代尔黑布进行观察(图 1(c)、图 1(e)),可看到多孔纤维结构。椰壳布作为输水层,具有多孔纤维结构,可以提供较大的表面积和更多的孔隙空间。因此,输水层能够高效地吸收和储存水分。这种具有高吸水性能的输水层,既保证了蒸发器从底部输送水分到蒸发表面,实现了水的有效蒸发;又能实现水分的均匀润湿和分布,将水分均匀分布至整个输水层,从而提高蒸发器蒸发效率和水分利用效率。当由蒸发形成的过饱和盐水进入多孔纤维结构时,水分子被吸附至纤维表面和孔隙中,进而在体系内形成一定压力差。随着时间的推移,这种水分子的吸附和排放过程不断重复,促进了盐离子的析出和收集。多孔纤维结构还增加了材料的稳定性和耐用性,这对于长期运行的析盐设备非常重要。莫代尔黑布中布满很多孔隙和毛细通道,其中,微小的多孔纤维结构增加了太阳光反射,使更多的太阳能被吸收并转化为热能。因此,莫代尔黑布作为光热层,大大促进了水的传输和蒸汽的释放。

2 实验过程及结果分析

2.1 太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发与收集速率

文中搭建的蒸发系统仅有蒸发器和收集器(图 2(b)),未加玻璃顶盖。在 E=50、100、150、200、400 mW/cm^{2}下测试 v_e。实验结果显示,随着 E 不断增大,蒸发器的光热层表面未发生明显变化。然后,加一层玻璃顶盖再测试 v_e(图 2(c)),测试时对玻璃顶盖与收集器之间进行密封处理,以保证蒸发器处于封闭环境,v_e 的测试结果更准确。实验结果显示,当 E =50 mW/cm^{2}时,玻璃顶盖边缘出现凝结水滴以及些许水雾,但顶盖中心未出现凝结水滴,原因在于,50 mW/cm^{2}不能给蒸发器光热层提供充足的能量,进而使水滴蒸发,导致玻璃顶盖对水蒸气的凝结效果不好。当 E =100~200 mW/cm^{2}时,玻璃顶盖内壁布满了不同尺寸的液滴,说明此时的 E 可为光热层提供充足的能量,使水滴蒸发。同样,当 E =400 mW/cm^{2}时,玻璃顶盖中心没有出现凝结水滴,这可能是由于 E 过高使玻璃顶盖中心的温度太高。



(a) 界面蒸发、收集装置 (b) 界面蒸发实物 (c) 界面收集实物 (d) 界面蒸发、收集速率

图 2 太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发、收集装置及其蒸发、收集速率

Fig. 2 Evaporation and collection device of the solar photothermal-driven interfacial evaporation system and their evaporation and collection rates

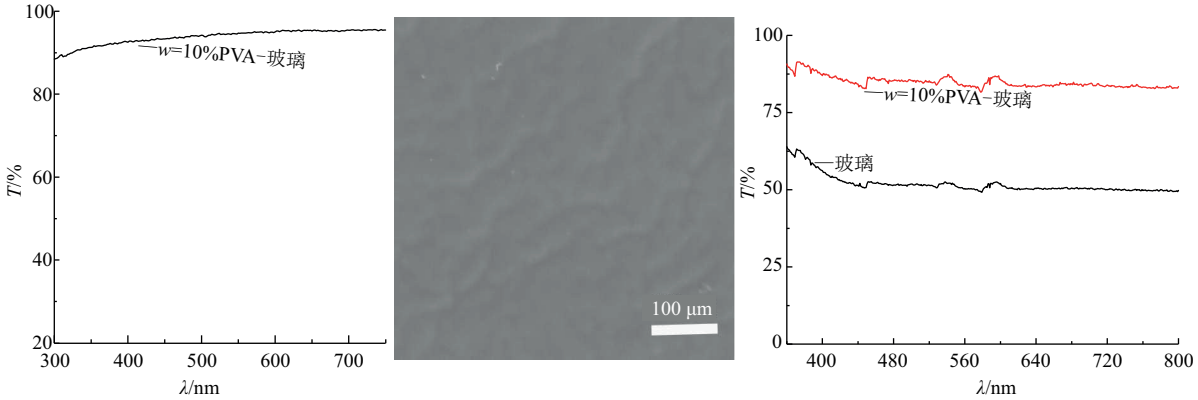
图 2(d)记录了蒸发系统的蒸发和收集速率。当 E=400 mW/cm^{2}时,v_e=4.88 kg/(m^2·h),而收集速率(v_c)只有 3.05 kg/(m^2·h)。在能量传递过程中,一部分能量在热辐射、传导和对流过程中损失,降低了收集器的热效率,导致 v_c 低于 v_e。太阳能光热驱动蒸发系统的设计和运行参数直接影响 v_c,例如,蒸发器的蒸发单元面积、材质、倾斜角度、密封性以及蒸发过程中的气流等因素都会影响 v_c。同时,不合理的设计或操作也可导致 v_c 低于 v_e。此外,蒸发系统可能无法满足所需的收集需求,例如,v_e 可能过快或集水需求过大,导致 v_c 跟不上 v_e。

2.2 聚乙烯醇(PVA)防雾涂层的蒸汽收集性能优化

在太阳能光热驱动界面蒸发系统中,冷凝器是水收集的重要组成部分,其冷凝效果直接影响该系统的实际应用。众所周知,蒸发过程中产生的蒸汽容易在冷凝器上凝结并生成小水珠,导致冷凝器表面起雾,进而散射大量入射太阳光。因此,文中使用具有优异亲水性、高透光性的PVA水凝胶作为防

雾涂层，以避免蒸汽在凝结过程中产生雾气。

通过研究光透过透明冷凝顶盖的能力（图 3(a)），发现PVA防雾涂层具有出色的全太阳光谱透过性能，且在 300～800 nm，显示出较高的透过率（>90.38%）。使用SEM观察PVA防雾涂层表面的微观形貌（图 3(b)），发现PVA防雾涂层由许多微观小柱构成，这些小柱在膜表面形成的立体纹理，使水滴在接触膜表面时不易形成连续的液膜，而是呈现许多微小的凸起。当水滴与防雾涂层表面接触时，这种凸起阻碍它们接触，使水滴无法展开，只能分散成小水滴均匀覆盖在涂层表面，从而实现防雾性能。同时，测试PVA防雾涂层的防雾性能（图 3(c)），发现PVA-玻璃的透过率达84.86%，而玻璃的透过率只有51.82%。



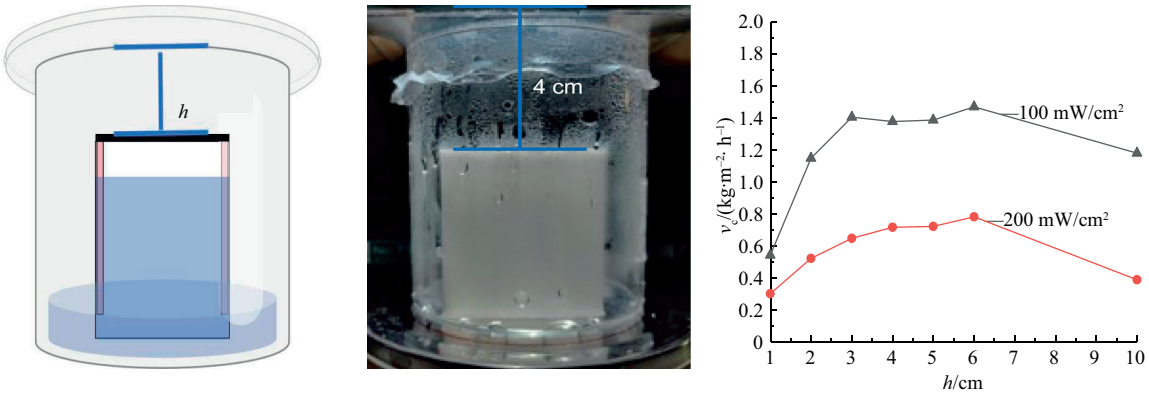
(a) 300~800 nm的UV-Vis-NIR透过率光谱　　(b) SEM图像　　(c) 防雾膜与玻璃的透过率对比

图 3　PVA 防雾涂层的性能测试

Fig. 3 Performance testing of the PVA anti-fog coating

2.3　蒸发面与收集面间距对蒸发系统收集性能的影响

蒸发过程中，蒸汽在热量驱使下始终向上迁移，但在迁移过程中蒸汽的凝结效率会大大降低，因此蒸发面与冷凝面间距是重要的影响因素。在冷凝器产生一定的冷凝效果后，收集器表面会出现较多液体。为了更好地收集这些液体，需对收集器设置一定的倾斜角度（α）。首先改变蒸发面与收集器顶盖的间隙（h），找到最优的h（图 4(a)～图 4(b)）。将PVA防雾涂层固定在收集器端口，再盖上玻璃，目的是防止收集到的水蒸气透过PVA防雾涂层表面流失到外界环境。当$E=100\ \mathrm{mW/cm^2}$时，在$h=1\sim10$ cm下，测试v_c。随着光照的进行，收集器内壁出现水雾以及水滴，说明了加入PVA防雾涂层的收集器，能有效收集蒸发界面产生的水蒸气。为了排除实验的偶然性，将E改为$200\ \mathrm{mW/cm^2}$，再在$h=1\sim10$ cm下测试v_c。记录两次实验的收集数据，得到不同E下收集器的v_c对比图（图 4(c)）。实验结果显示，当$h=1$ cm时，v_c最低。说明h太小，易导致收集器顶盖中央的局部区域温度较高，使顶盖也参与蒸发过程。但由于顶盖通常为不透水材料，v_c相对较低，因此，阻碍了蒸发界面水分的正常蒸发。



(a) 蒸发面和收集面的间距　　(b) 蒸发面和收集面的最佳间距　　(c) 蒸发、收集面间距对收集速率的影响

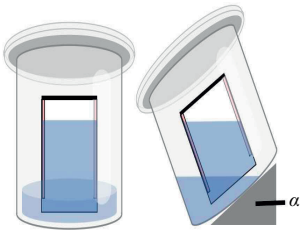
图 4　蒸发面和收集面的间距及其收集速率对比

Fig. 4 Comparison of distance between evaporation and collection surfaces and their collection rates

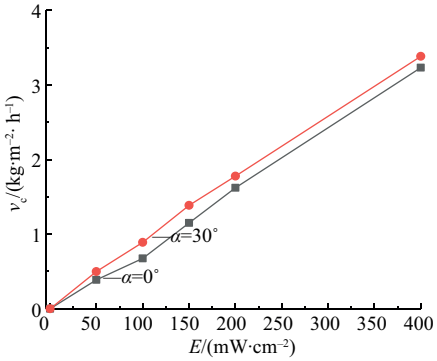
另外,当h太小时,蒸发界面的热量向收集器顶盖传导,导致蒸发界面温度降低,减缓了v_e,严重影响收集器的收集性能;当h=1~3 cm时,v_e逐渐上升,并在h=3~6 cm时达到最高;当h=7~10 cm时,v_e逐渐下降,说明h过大时,太阳光在传输过程中会发生一定的能量损失。太阳能是水蒸发的驱动力,如果损失过大,导致蒸发界面的温度不能使液体蒸发,进而使v_e降低。另外,h增大,使蒸发界面的热量散失增多,且热量需要经过更长的路径才能传递到收集器顶盖,导致热量散失增多,v_e降低。考虑实用化及能源利用率,后续收集器的收集性能研究取h=3 cm,该间隙既能保障蒸发系统有较高的v_e,又能使蒸发界面下方储水容器的储水量最大。

2.4 放置倾斜角对收集器收集性能的影响

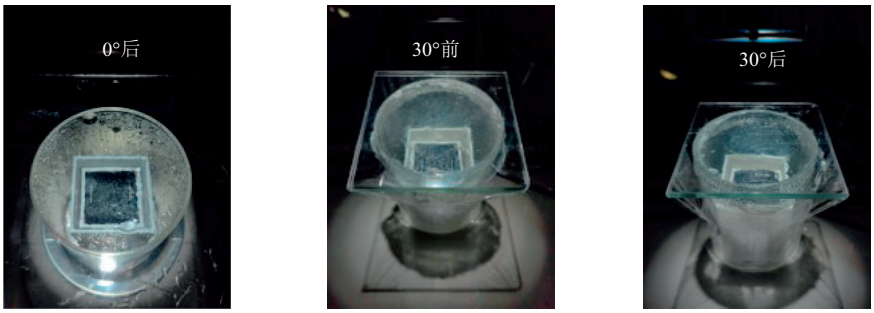
倾斜角(α)是影响收集器收集性能的另一个重要参数(图5(a))。将平放的蒸发器固定在α=30°的倾斜角上,然后在E=50、100、150、200、400 mW/cm^{2}下测试v_e,并对比α=0°,30°下收集器的v_e(图5(b)~图5(c))。结果显示,当α=30°时,收集器在不同E下的v_e,均高于平放状态下的v_e,说明放置一定的倾斜角,可更好地利用太阳直射辐射。相比于平行地面的蒸发器,倾斜太阳能蒸发器的太阳能入射角更大,蒸发界面可更充分吸收太阳能,进而提高能量的利用效率。此外,放置倾斜角可减小对流的影响。倾斜设置,使空气在蒸发界面上的流动路径变长,避免了对流现象,这在减少水分流失的情况下提高了v_e。因此,在太阳能蒸发器下方放置一定角度的倾斜角,可提高蒸汽的v_e,进而提高收集器的收集性能。后续收集器收集性能研究,在放置α=30°倾斜角下进行。



(a) 无、放置30°倾斜角时收集器



(b) 无、放置30°倾斜角时收集器的收集速率



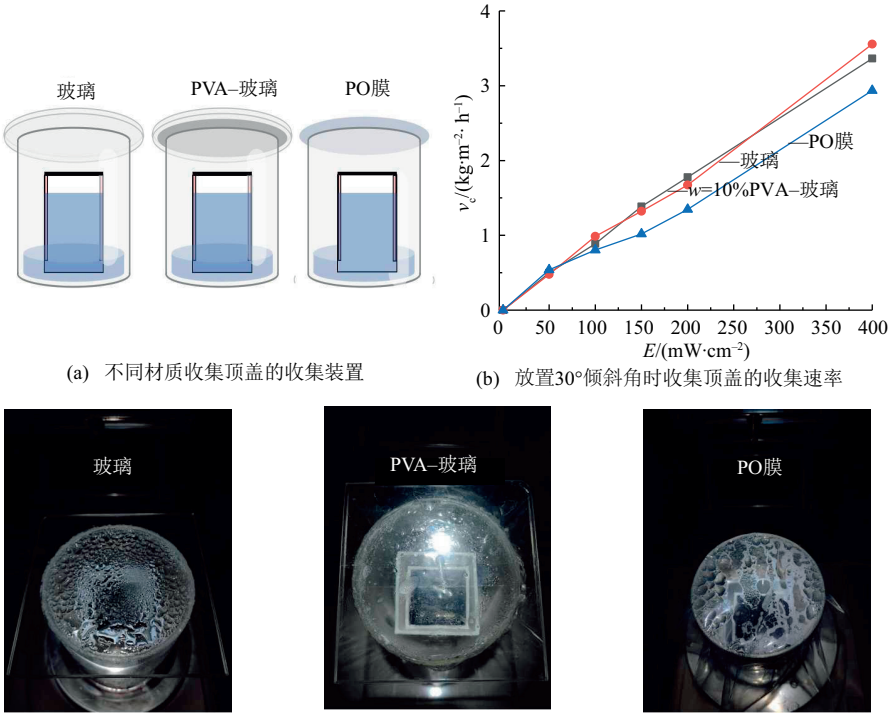
(c) 无、放置30°倾斜角前后收集器实物

图5 无、放置30°倾斜角时收集装置及其收集速率对比

Fig. 5 Comparison of Collection devices and their collection rates at 0° and 30° tilt angles

2.5 不同材质顶盖对收集器收集性能的影响

冷凝器的导热系数、接触角等影响蒸汽的液化,对太阳能光热驱动界面蒸发系统的水收集效率有较大影响。文中选择玻璃顶盖、PVA防雾涂层以及市售聚烯烃(PO膜)这3种不同材料搭建收集器(图6(a))。将3种材料顶盖分别固定在收集器的端口,并记录收集器的数据,得到α=30°下,不同材质顶盖的v_e(图6(b))。相较于玻璃和PVA防雾涂层顶盖,当E>50 mW/cm^{2}时,PO膜顶盖的v_e最低,说明由于防雾性能下降,大部分太阳光线照射不进收集器,导致能量无法有效传递到光热层表面,v_e降低,能量损失量增大,进而大大影响水蒸气的收集。而PVA防雾涂层顶盖,虽然能有效提高防雾性能,具有良好的透明度,使太阳光线高效率



(a)　不同材质收集顶盖的收集装置

(b)　放置30°倾斜角时收集顶盖的收集速率

(c)　不同材质收集顶盖的收集装置实物

图 6　不同材质收集顶盖及其收集速率对比

Fig. 6　Comparison of different materials of collection top covers and their collection rates

透过并作用在光热层表面，但其 v_c 与玻璃顶盖的数值接近，这可能是由于自制的 PVA 防雾涂层质量不佳；防雾涂层表面的污染物或灰尘影响防雾效果，导致水滴凝结，从而使 v_c 降低；防雾涂层内部结构中存在的细小孔道，导致水蒸气通过这些孔道挥发，进而使 v_c 降低。

因此，对太阳能光热驱动界面蒸发系统的 h、α，以及收集顶盖的材质进行优化，得到了最优参数，即 $h=3$ cm、$\alpha=30°$，以及以玻璃为收集器顶盖的材料。

3　立体蒸发系统提高蒸发和耐盐性能

上述研究采用的太阳能蒸发系统皆为二维的，其蒸发界面通常为平面结构。二维蒸发系统的制造和安装相对简单，适用范围广，被广泛用于各种规模的水处理系统。但二维蒸发系统也存在不足：(1)具有较低的平均收集效率。受限于平面结构，二维蒸发系统的能量利用效率相对较低，无法充分利用太阳能；(2)需要较大面积才能获得较高的蒸发量。这使待蒸发系统在空间有限的场景下，存在适用性不匹配的问题。为了突破理论效率的瓶颈，将太阳能蒸发系统从原来的二维结构扩展到三维结构。三维蒸发系统(立体蒸发系统)与二维蒸发系统不同，采用立体的设计结构，能在有限空间内获到更高蒸发量、减少漫反射，且大大减小占地面积。同时，通过增加结构的复杂性和表面积，可有效提高三维蒸发器的 v_c，将更多的太阳能转化为热能。另外，可根据具体需求，对三维蒸发器的设计进行调整，以适用于不同规模和形状的水处理系统。

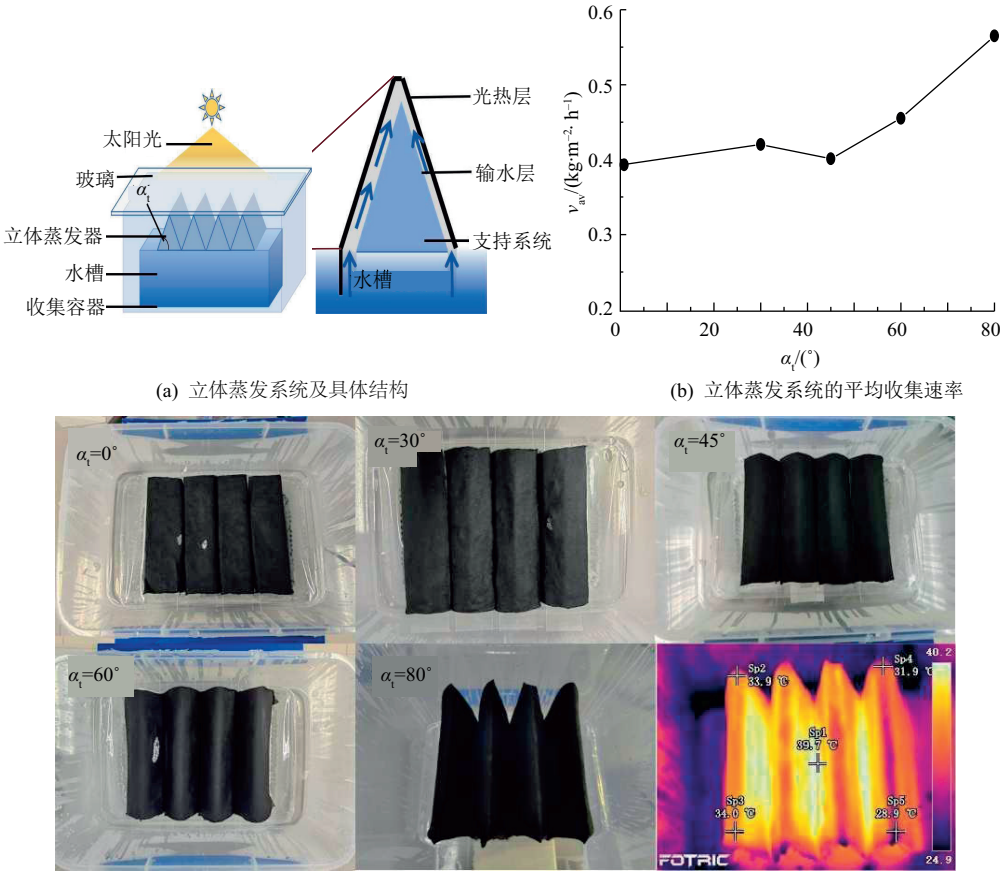
文中设计三棱锥式立体结构太阳能三维蒸发系统(图 7(a))，并通过优化立体蒸发器的角度、蒸发界面位置、两侧非对称供水层的层数比例及对收集器顶盖进行冷却操作，以达到最佳的蒸发性能与收集性能。

3.1　立体蒸发器的角度

蒸发器的角度直接改变了立体蒸发器光热层的大小，是研究能否提高蒸发器蒸发性能的关键要素。将 4 个具有一定角度且大小形状相同的立体蒸发器并排放置在储水池上方(图 7(a))，其中，蒸发器的垂直有效面积达 256 cm^2(16 cm×16 cm)。将带有蒸发器的储水池放入收集容器，对玻璃顶盖进行密封处理，然后测试蒸发系统的收集性能。在立体太阳能蒸发器制作过程中，将竹纤维布切至合适尺寸，并作为供水层，覆盖在经 3D 打印技术制成的支撑元件表面。然后，将支撑元件两端同时插入储水池，以接触大量水体，进而将水顺利运输至光热层。最后，再将作为光热层的莫代尔黑布覆盖在输

水层上方,并与输水层紧紧贴合,其中一端与供水层共同伸入水体,另一端与支撑元件底面平齐,且宽度与输水层一致。因此,在光照下,光热层能稳定进行光热转换,并加热从储水池吸附的水体,进而产生蒸汽。

设置立体蒸发器的角度(α_t)分别为 0°、30°、45°、60°、80°,E=100 mW/cm^2,以玻璃为收集顶盖材质,进行 24 h 收集性能测试。测试中,采用密封胶密封收集器顶盖与收集容器,水体为 w=15% 的 NaCl 溶液。此外,由于普通盐水(如海水)的浓度远低于 15 %,因此,要考虑到蒸发器的耐盐性能(图 7(c))。结果显示,在 α_t =0°、30°、60°下,蒸发器光热层表面析出少量盐颗粒,出现盐分堆积,但盐颗粒所覆盖的面积相较于整个光热层表面非常小。当 α_t=80°时,光热层未出现盐分堆积现象。对于立体蒸发器,其三维立体结构使供水层将水快速高效运输至光热蒸发层;同时,通过不对称供水结构,实现了流体趋向于单向流。此时,供水层未伸入水体的一段,随着水的蒸发,其盐离子浓度梯度增大。基于菲克定律,由于从光热层表面中心区域到水体的扩散距离较短,盐离子可随着未完全蒸发的水转移到供水层的末端,重新流回储水池,从而使光热层表现出优异的耐盐性。



(a) 立体蒸发系统及具体结构

(b) 立体蒸发系统的平均收集速率

(c) 立体蒸发器的耐盐效果及倾斜角为80°蒸发界面的温度

图 7 倾斜角度对立体蒸发系统性能的影响

Fig. 7 Effect of inclined angle on the performance of the three-dimensional evaporation system

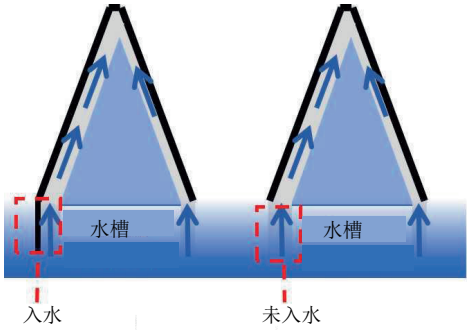
对立体蒸发系统收集器的平均收集速率(v_{av})进行分析(图 7(b)),当 E=100 mW/cm^{2}时,α_t=0°、30°、45°、60°所对应的 v_{av} 分别为 0.39、0.42、0.41、0.45 kg /(m^2·h),整体呈现逐渐上升趋势。而当 α_t =80°时,v_{av} 增大至 0.57 kg /(m^2·h)。说明 α_t 变大,蒸发器的整体高度随之增加,有效蒸发面积也增加,这样使更多的待蒸发液体暴露于蒸发界面,进而增加了 v_e。另外,当蒸发器的高度增加时,蒸发器内形成一个较大的蒸发空间,待蒸发液体的浓度差、温度差随之增大,进而引起自然对流效应,且自然对流效应加速了待蒸发液体的运动和混合,有效提高 v_e,因此,v_{av} 也越大。

使用在线红外热成像仪记录立体蒸发器及其周围环境的温度,设置 E=100 mW/cm^2。当 α_t=80°时,经过 12 h 的光照,立体蒸发器光热层的表面中心温度达到 39.7 ℃并趋于稳定(图 7(c))。

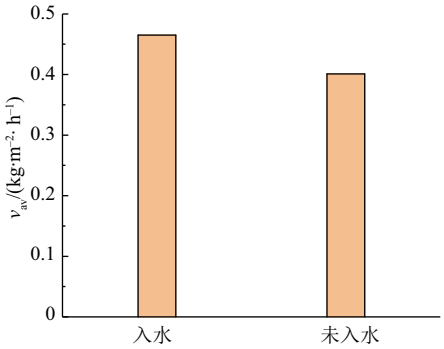
而对于光热层边缘区域，由于氙灯照射范围有限，不能给边缘区域提供充足的热量，因此光热层边缘区域温度平均达 30 ℃。兼顾实际应用和可行性，当 α_t= 80°时，立体蒸发器的制作成本大大提高。因此，后续立体蒸发器的蒸发性能研究取 α_t=60°。

3.2　光热层入水

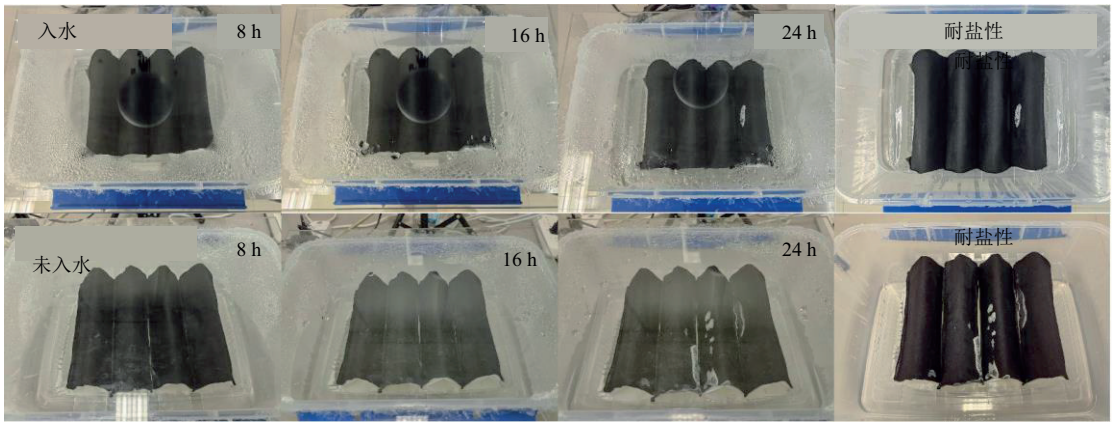
蒸发器光热层位置对立体蒸发系统的收集性能有重要影响（图 8(a)）。将光热层裁剪至与输水层大小相同，并覆盖在输水层的表面。当输水层两端进入水体并将水顺利运输至蒸发界面时，光热层一端随之进入水体。再将光热层裁剪至合适尺寸覆盖在光热层受到光照的区域，且两端皆未伸入水体。随后，对上述两组蒸发系统进行 24 h 收集性能测试，设置 E=100 mW/cm^2、水体为 w=15% NaCl 溶液。结果显示，在 24 h 的运行过程中，入水组蒸发系统的光热层基本无盐沉积，直到第 24 h 时才出现盐颗粒，而未入水组蒸发系统的光热层，在第 24 h 时出现较严重的盐沉积现象（图 8(c)）。



(a) 光热层入水、未入水的蒸发器



(b) 光热层入水、未入水时的平均收集速率



(c) 光热层入水与未入水、倾斜角为60°时的收集装置实物

图 8　光热层入水对立体蒸发系统性能的影响

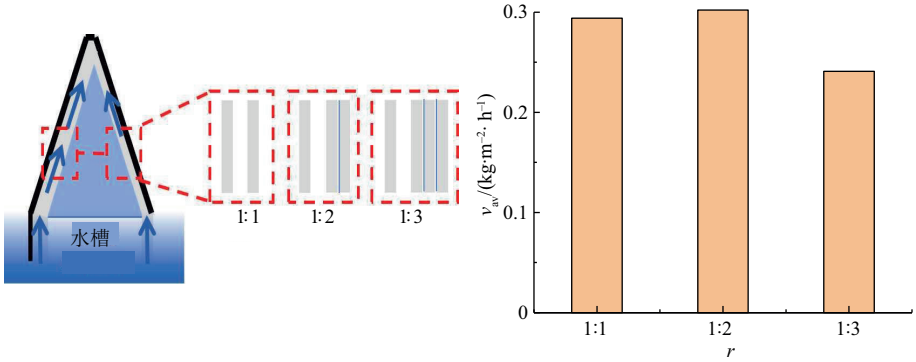
Fig. 8 Effect of water-entry into the photothermal layer on the performance of the three-dimensional evaporation system

记录收集器数据并进行 v_{av} 对比（图 8(b)），发现当蒸发器的光热层伸入水体，v_{av} 达 0.47 kg /(m^2·h)，而对于未入水光热层蒸发系统，其 v_{av} 为 0.40 kg/(m^2·h)。说明当以莫代尔黑布为光热层并将其伸入水体时，材料因具有一定的供水性能，和输水层一样，能够将一部分水顺利运输至蒸发区域。此时，蒸发区域的盐离子浓度梯度随着供水量下降，减缓了盐结晶过程，使蒸发器表现出较好的耐盐效果。此外，当蒸发器的光热层伸入水体，可直接加热水体，而水具有较高的热容量，使整个水体的温度分布更加均匀，避免了因水体底部温度过低而抑制蒸发的现象。综合考虑，后续立体蒸发系统的蒸发性能研究在光热层入水的情况下进行。

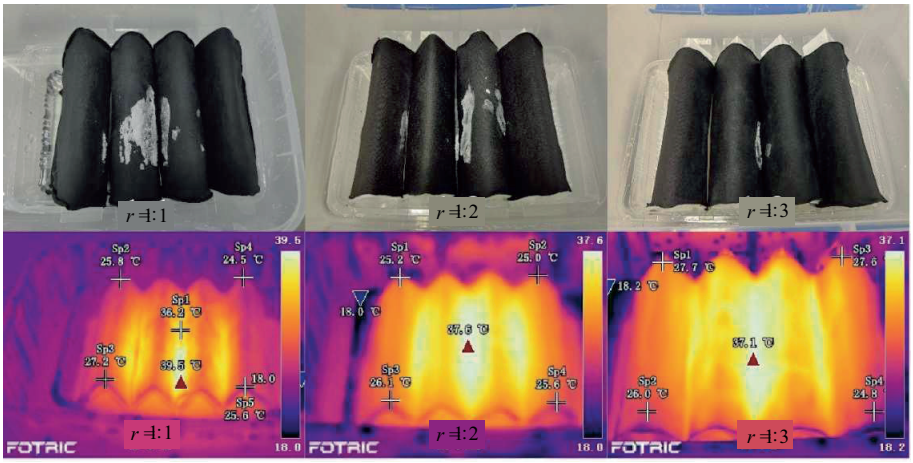
3.3　两侧非对称供水层数比例

蒸发器两侧非对称供水层数的比例（r），对太阳能立体蒸发系统的收集性能、耐盐性有较大影响。实验中通过合理调整 r，使蒸发器具有最佳的蒸发效率和稳定的性能，进而为提高太阳能光热驱动界面蒸发系统的性能和效率提供了科学依据和技术支持。将立体蒸发器的 r 分别设置为 1∶1、1∶2、1∶3，然后测试收集器的性能（图 9(a)～9(b)），在 E=100 mW/cm^2、w=15% NaCl 溶液条件下工作 24 h，记录蒸发器的表面状态（图 9(c)）。当 r=1∶1 时，蒸发器表面的盐沉积现象较严重，蒸发界面中

心已被盐颗粒完全覆盖;当 $r=1:2$ 时,蒸发界面的盐沉积现象不明显,蒸发界面被较少盐颗粒覆盖,可看到大部分蒸发区域;当 $r=1:3$ 时,蒸发界面中心被少许薄盐颗粒覆盖,可看到蒸发界面大部分蒸发区域。说明当 $r=1:3$ 时,蒸发系统的耐盐性最好。同时,3 组立体蒸发器的界面中心温度分别为 36.2、37.6、37.1 ℃,平均温度为 37 ℃,并保持稳定(图 9(c))。



(a) 立体蒸发器两侧非对称供水层数比例 (b) 两侧非对称供水层数比例不同时的平均收集速率



(c) 24 h下两侧非对称供水层数比例不同收集装置的耐盐效果与温度分布

图 9 两侧非对称供水层数比例对立体蒸发系统性能的影响

Fig. 9 Effect of the asymmetric water supply layer ratio on both sides on the performance of the three-dimensional evaporation system

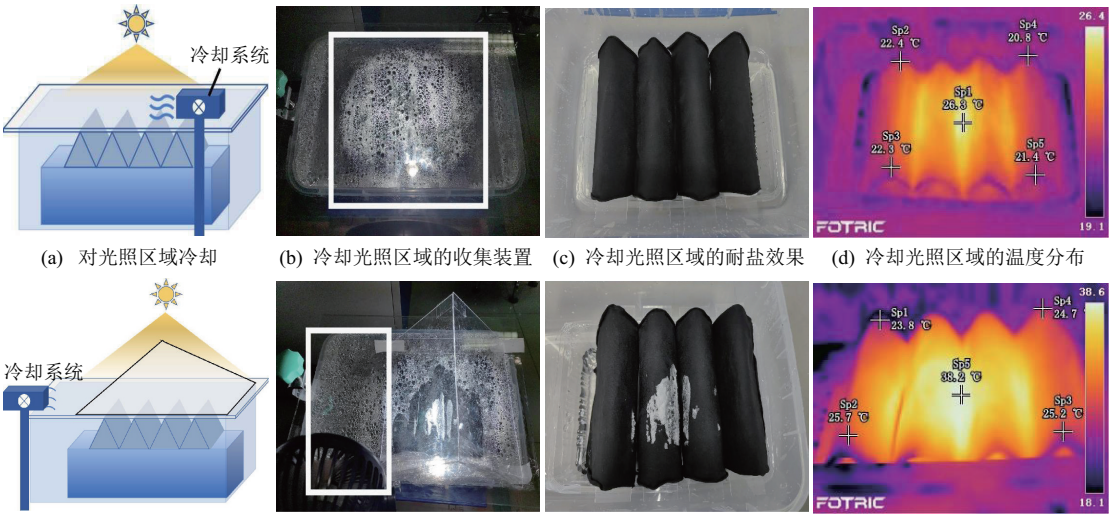
收集实验数据显示,当 $r=1:2$ 时,v_{av} 最大,达 0.31 kg/(m^2·h),而抗盐性最好($r=1:3$)时的 v_{av} 最低,仅为 0.24 kg/(m^2·h)(图 9(b)),说明在太阳能立体蒸发系统中,r 越大并不一定意味着 v_{av} 更大。适当的 r 促进水蒸发,提高 v_{av},但较高的 r,可能会增加水的流动阻力、影响水的流动性,导致水在太阳能立体蒸发器供水层的流动速度减慢,进而对 v_e 产生一定影响,降低水的 v_{av}。因此,后续立体蒸发器的蒸发性能研究,取 $r=1:2$。

3.4 主动冷却顶盖

由上述实验可知,玻璃顶盖的中心部分,由于受到的 E 最大,吸收的热量也最多,导致中心区域未出现凝结水滴。该现象对于立体蒸发系统收集性能的影响还是一个未知数。文中在太阳能立体蒸发系统的玻璃顶盖外侧连接一个冷却系统,对玻璃顶盖中心以及沿中心向周围延展的区域进行长时间的降温冷却处理(图 10(a)、图 10(e))。通过冷却系统对光照区域持续冷却降温,发现收集器玻璃顶盖中心区域出现了凝结小液滴以及白雾,而蒸发界面未出现盐沉积(图 10(b)~图 10(c))。通过冷却系统对未光照区域持续冷却降温,发现收集器玻璃顶盖中心区域依然未出现凝结液滴,虽然未受到光照的区域也出现了凝结液滴,但蒸发界面出现较严重的盐沉积现象(图 10(f)~图 10(g))。

表 1 记录了上述两组实验数据。由表 1 可知,加入冷却系统,不管是冷却受光照区域还是未受光照区域,收集器的 v_{av} 都比未加入冷却系统的低,说明对收集器玻璃顶盖冷却降温达不到增加 v_{av} 的目的。

当对光照受热区域冷却降温时,蒸发系统蒸发



(a) 对光照区域冷却　(b) 冷却光照区域的收集装置　(c) 冷却光照区域的耐盐效果　(d) 冷却光照区域的温度分布

(e) 对未光照区域冷却　(f) 冷却未光照区域的收集装置　(g) 冷却未光照区域的耐盐效果　(h) 冷却未光照区域的温度分布

图 10　加入冷却系统对蒸发系统性能的影响

Fig. 10 Effect of cooling system integration on the performance of the evaporation system

表 1　加入冷却系统前后收集器的平均收集速率

Tab. 1 Average collection rates of the collector before and after applying the cooling system

实验	条件	v_{av}/(kg·m^{-2}·h^{-1})
1	未加入冷却系统	0.31
2	对光照区域冷却	0.24
3	对未光照区域冷却	0.23

界面的中心温度只有 26.3 ℃，说明蒸发界面温度较低时，蒸发界面吸收的光照辐射能量也相应减少，导致通过供水层运输至光热层的水体温度升高缓慢，从而影响水的 v_e（图 10(d)）。此外，蒸发界面温度低，使太阳能蒸发系统的效率降低，导致收集器的 v_{av} 下降。当对未光照受热区域冷却降温时，蒸发器界面的中心温度为 38.2 ℃，但 v_{av} 较低（图 10(h)）。这是因为加入冷却系统后，顶盖与收集器内部之间存在的较大温度差，导致水蒸发时产生的水蒸气，在接触冷却玻璃时迅速降温并释放出溶解的盐分，蒸发界面出现盐沉积现象，从而影响蒸发器的 v_e，进而使 v_{av} 降低。因此，加入顶盖冷却系统，冷却光照受热区域，蒸发界面温度下降，导致 v_e 下降，从而使收集器的 v_{av} 下降。而冷却未光照受热区域，由于顶盖与收集器内部之间存在较大温度差，蒸发界面出现盐沉积现象，影响 v_e，最终使收集器的 v_{av} 下降。

4　结论

太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发与收集性能优化是一个系统工程，需要从多个角度对其进行深入研究。文中研究二维蒸发系统中蒸发器与收集器的间距，收集器及其角度，三维蒸发系统中蒸发器的倾斜角度、光热层和供水层的输水状态及主动冷却顶盖，对太阳能光热驱动界面蒸发系统的蒸发、收集速率的影响。综合考虑材料、结构和光照条件，实现了对太阳能光热驱动界面蒸发系统性能的综合优化。

1）建立了太阳能光热驱动界面蒸发系统中蒸发过程与冷凝收集过程的定量关联框架，明确了蒸发速率（v_e）与收集速率（v_c）在测试范围内呈显著正相关。

2）优化二维太阳能光热驱动界面蒸发系统的收集器，调整蒸发面、收集面间隙，确定最佳的放置倾斜角，测试不同材质收集顶盖，得出各条件下的最优参数，即蒸发面、收集面间隙为 3 cm，蒸发系统下应放置 30°倾斜角，以玻璃为收集器顶盖材料，最终实现了蒸汽的高效收集。

3）优化立体蒸发系统的各项参数，包括蒸发器的角度、光热层位置、两侧非对称供水层数比例，并对收集器顶盖降温冷却。结果显示，当蒸发器角度为 60°、光热层入水、两侧非对称供水层数比例为 1∶2 时，蒸发系统的蒸发和收集性能显著提高。但对收集器顶盖降温冷却，反而降低了蒸发系统的蒸发和收集性能。

参考文献：

[1] GU Ruonan, YU Zhen, SUN Yi, et al. Janus 3D solar crystallizer enabling an eco-friendly zero liquid discharge

of high-salinity concentrated seawater with antiscalant [J]. Desalination, 2022, 537: 115862. DOI:10.1016/j.desal.2022.115862.

[2] BO Zhuoyu, LI Xiaoyu, XUE Yan, et al. Hydroxylamine enhanced treatment of highly salty wastewater in FeO/H_2O_2 system: Efficiency and mechanism study [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 271: 118847. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118847.

[3] LI Xiuqiang, XU Weichao, TANG Mingyao, et al. Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(49): 13953-13958.

[4] LEI Zhiwei, HU Bihua, ZHU Peide, et al. A multilayer mesh porous 3D-felt fabric evaporator with concave array structures for high-performance solar desalination and electricity generation [J]. Nano Energy, 2023, 122: 109307. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.109307.

[5] SI Junhui, LAN Kaijin, CUI Zhixiang, et al. Constructing salt-resistant 3D foams with hierarchical interconnected channels by vacuum casting method for efficient solar evaporation of hypersaline water[J]. Desalination, 2024, 576: 117339. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117339.

[6] ZHAO Qi, WU Zhixin, XU Xinye, et al. Design of poly(3, 4-ethylenedioxythiophene): Polystyrene sulfonate-polyacrylamide dual network hydrogel for long-term stable, highly efficient solar steam generation[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 300: 121889. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121889.

[7] XU Xinye, ZHAO Qi, LIU Qi, et al. Full-spectrum-responsive Ti_4O_7-PVA nanocomposite hydrogel with ultrahigh evaporation rate for efficient solar steam generation [J]. Desalination, 2024, 577: 117400. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117400.

[8] YANG Yawei, ZHAO Hongyang, YIN Zongyou, et al. A general salt-resistant hydrophilic/hydrophobic nanoporous double layer design for efficient and stable solar water evaporation distillation[J]. Materials Horizons, 2018, 5: 1143-1150.

[9] ZHAO Qi, LIU Juyang, WU Zhixin, et al. Robust PEDOT:PSS-based hydrogel for highly efficient interfacial solar water purification[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 442: 136284. DOI: 10.1016/j.cej.2022.136284.

[10] YANG Yawei, FENG Haixiang, QUE Wenxiu, et al. A diode-like scalable asymmetric solar evaporator with ultra-high salt resistance [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33: 2210972. DOI: 10.1002/adfm.202210972.

[11] WU Zhigen, YAN Zihan, ZHANG Qinghong, et al. Review on descaling and anti-scaling technology of heat exchanger in high-salt wastewater thermal desalination[J]. Water Science and Technology, 2023, 88(8): 2081-2107.

[12] XUE Yiwen, HAN Xinhong, XU Dan, et al. All-in-one chitosan-based aerogel with a semi-clad structure for solar-driven interfacial evaporation [J]. Desalination, 2024, 575: 117333. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117333.

[13] PAN Dongyu, DENG Xingfa, GE Yuanyuan, et al. Preparation of a low-cost electric compensation photothermal evaporator for all-weather-available and efficient evaporation [J]. Solar Energy, 2023, 259: 151-164.

[14] PENG Hongyun, WANG Dong, FU Shaohai. Programmable asymmetric nanofluidic photothermal textile umbrella for concurrent salt management and *in situ* power generation during long-time solar steam generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(40): 47549-47559.

[15] GAO Ting, WANG Yida, WU Xuan, et al. More from less: Improving solar steam generation by selectively removing a portion of evaporation surface [J]. Science Bulletin, 2022, 67(15): 1572-1580.

[16] YAN Jianzhang, YIN Liangjun, LÜ Houlin, et al. Novel efficient solar spherical evaporators with adjustable pores to control water supply and evaporation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 960: 170674. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170674.

[17] WANG Bingsen, ZHANG Haotian, HE Nan, et al. Mangrove root-inspired evaporator enables high-rate salt-resistant solar desalination [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 314: 123490. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123490.

(下转第 96 页)