

多功能木材表面太阳能海水淡化装置性能的研究

韩传龙, 李益飞, 张卫康, 尹军, 孙浩轩, 孙壮志

(东北林业大学, 哈尔滨 150000)

摘要: **目的** 研究不同处理工艺下蒸发器的蒸发性能, 开发一种多功能木材表面的木质太阳能界面蒸发器。**方法** 采用化学处理和冷冻干燥技术, 使木块通道内形成互联的纤维素纤维网络, 室温下, 通过原位聚合法, 在木块表面制备海藻酸钠/聚丙烯酰胺 (SA/PAM) 作为有机骨架的光热吸水层, 再利用激光雕刻法构筑减反层。用扫描电子显微镜和能谱仪 (SEM-EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 对不同样品的微观形貌、物相及元素分布进行表征分析。通过傅立叶红外光谱仪 (FT-IR)、紫外可见分光光度计, 分别记录不同样品的表面官能团以及透射光谱和反射光谱。利用红外相机分析不同处理工艺在热定位方面的影响。**结果** 六组不同处理工艺下的蒸发器中, CSE-wood 蒸发器表现出更加优异的性能。在 1 个太阳强度下, 蒸发率最大值为 $2.456 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 蒸发效率为 92.3%。**结论** 均匀构筑在光热吸水层上的减反层的毛细作用与马兰戈尼效应协同, 实现了蒸发所需水分的快速输送, 木块内部形成的纤维网络起到隔热的作用。另外, 在基底表面制备光热涂层或吸水层, 并构筑减反层时, 可促进较宽波长范围的光吸收和光程延伸, 使蒸发器表面温度迅速上升, 实现热局域化, 提高了光热转换效率和蒸发速率。这种木质太阳能界面蒸发器可应用在海水淡化、水净化等方面。

关键词: 太阳能; 界面蒸发; 光热转化; 毛细作用; 海水淡化

中图分类号: TB17; P414.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0074-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.007

Performance of Solar Seawater Desalination Device of Multi-functional Wood Surface

HAN Chuan-long, LI Yi-fei, ZHANG Wei-kang, YIN Jun, SUN Hao-xuan, SUN Zhuang-zhi

(Northeast Forestry University, Harbin 150000, China)

ABSTRACT: The work aims to research the evaporation performance of evaporator under different treatment processes, and develop a multifunctional wood surface for wood solar interface evaporators. Chemical treatment and freeze drying were used to form interconnected cellulose fiber networks in the wood block channels, and a photothermal water absorption layer based on sodium alginate (SA)/polyacrylamide (PAM) as organic skeleton was prepared by in-situ polymerization at room temperature on the surface of wood block. The antireflective layer was constructed by laser engraving. The microscopic morphology, phase and

收稿日期: 2021-07-01; 修订日期: 2021-08-09

Received: 2021-07-01; Revised: 2021-08-09

基金项目: 国家博士后科学基金资助项目 (2018M630330, 2019T120245); 国家自然科学基金 (51905085); 中央高校基础研究基金 (2572019BF12)

Fund: Supported by the China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2018M630330 and 2019T120245), National Natural Science Foundation of China (51905085), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2572019BF12)

作者简介: 韩传龙 (1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为仿生表/界面功能化设计。

Biography: HAN Chuan-long (1994—), Male, Doctor, Research focus: bionic watch/interface functional design.

通讯作者: 孙壮志 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为仿生表/界面功能化设计。

Corresponding author: SUN Zhuang-zhi (1987—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: bionic watch/interface functional design.

引文格式: 韩传龙, 李益飞, 张卫康, 等. 多功能木材表面太阳能海水淡化装置性能的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 74-83.

HAN Chuan-long, LI Yi-fei, ZHANG Wei-kang, et al. Performance of Solar Seawater Desalination Device of Multi-functional Wood Surface[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 74-83.

element distribution of different samples were characterized and analyzed by scanning electron microscope and energy spectrometer (SEM-EDS) and X-ray diffractometer (XRD). The surface functional groups, transmission and reflection spectra of different samples were recorded by fourier infrared spectrometer (FT-IR) and UV-vis spectrophotometer, respectively. The effects of different treatment processes on thermal localization were analyzed using infrared camera. Among the six groups of evaporators under different treatment processes, CSE-wood evaporator shows more excellent performance. The maximum evaporation rate of $2.456 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and the evaporation efficiency of 92.3% at 1 solar intensity. Capillary action of the antireflection layer uniformly constructed on the photothermal water absorption layer and the Marangoni effect realize the rapid transportation of water needed for evaporation, and the fiber network formed inside the wood block plays a role of thermal insulation. In addition, the preparation of photothermal coating or water absorption layer on the substrate surface and the construction of antireflective layer can promote light absorption and optical path extension in a wider wavelength range, resulting in a rapid rise in the surface temperature of the evaporator to achieve thermal localization, which improves the efficiency of photothermal conversion and evaporation rate. It can be used in seawater desalination, water purification and so on.

KEY WORDS: solar energy; interfacial evaporation; photothermal conversion; capillary action; seawater desalination

水是生命之源, 太阳是生命的使者, 由于能源短缺和淡水资源匮乏, 合理利用能源与水的关系, 从中获取淡水, 已成为缓解水资源匮乏等方面问题的新途径^[1-2]。覆盖地球表面 $\frac{3}{4}$ 的水资源中, 97% 是海水, 另外, 太阳能是地球上最丰富的清洁能源^[3-5]。海水淡化, 特别是太阳能界面蒸发海水淡化技术, 由于其光热转换率高、操作简单等特性, 受到广泛的关注^[6]。目前为止, 各种材料已经被用于太阳能蒸发器的基底, 如聚合物泡沫^[7-9]、聚合物水凝胶^[10]、织物和海绵等^[11]。其中, 生物质材料以其低成本、可持续、可扩展和环境友好的优点, 成为研究的热点^[12]。

天然木材作为一种丰富的可再生生物质资源, 具有良好的亲水性、有效的水传输能力和低导热系数, 近年来被广泛应用于太阳能界面蒸发^[13]。然而, 作为界面蒸发器的天然木材, 其吸光能力较低, 蒸发性能较差, 因此需要对天然木材进行表面处理和表面修饰, 这促使研究人员探索改进解决方案。Tang 和 Zhang 等^[14-15]对木材采用高温表面碳化和水热处理, 制备了太阳能蒸发器。Yin 等^[16]研究了等离子体光热材料在各种场景的应用。Lin 等^[17]利用石墨烯超材料制备了金属基的太阳能选择吸收器。Chen 等^[18]通过刷洗方法, 利用磷酸铝对木块顶部表面进行修饰, 用于界面太阳能蒸发。Mohammad 等^[19]通过激光来回运动对木材表面进行处理。之前报道的木质蒸发器在界面蒸发方面取得了重大进展, 但随着技术不断的发展, 仍然存在挑战。在某些情况下, 表面光热涂层的制备工艺复杂(多步合成用时长, 需经高温干燥、淬火或等离子体处理等多种制备过程)^[20], 成本高昂(多采用贵金属纳米颗粒)^[21], 能耗高(高温造成表面碳化), 并且会影响木材蒸发表面的亲水性。因此, 仍然需要开发能够满足高效蒸汽产生的多功能特性的木质太阳能蒸发器。

使用木块作为太阳能海水淡化蒸发器的基底, 将其一端面设计为仿根系的网格结构, 可以稳固地漂浮

在水面上, 大大增加了与水的接触面积。在此基础上, 制备了六组不同处理工艺下的太阳能界面蒸发器, 并对其蒸发性能进行研究。

1 实验

1.1 材料

巴沙木购自江苏连云港。氢氧化钠 (NaOH , 2.8M)、亚氯酸钠 (NaClO_2 , 0.3M)、过氧化氢 (H_2O_2)、丙烯酰胺 (AM)、过硫酸铵 (APS)、四甲基乙二胺 (TEMED)、海藻酸钠 (SA)、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺 (MBA) 购于天津化学试剂公司。二氧化钛 (直径 20 nm, 亲水) 和氮化碳 (C_3N_4) 购于麦克林公司。多壁碳纳米管水分散液 (Mcnt, 碳管质量分数为 10.6%, 碳纳米管长度 10~20 mm, 直径 50 nm) 购自北京博宇高科新材料技术有限公司。

1.2 木块制备及化学处理

由于巴沙木密度低、孔隙率高、细胞壁薄, 因此选用其作为制作太阳能蒸发器的基材。首先, 沿木材生长方向径向切割, 得到 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的木块, 清除切割截面残留的碎木屑。然后利用特制的刀具对截面纵向切割, 形成深度为 10 mm 的仿根系网格化结构, 标记为 Wood。

将具有仿根系网格化结构的木块浸泡在氢氧化钠和亚氯酸钠的混合溶液中, 在 $\sim 100^\circ\text{C}$ 下放置 5~6 h, 去除部分木质素和半纤维素, 然后移入沸腾的去离子水中, 洗去附着的化学物质, 接着将样品在沸腾的 H_2O_2 溶液中处理 1 h, 以去除剩余木质素。在这个阶段, 木块的颜色由原有的黄色变成了白色。将经过处理的木块放入冰箱中冷冻, 最后移到冷冻干燥机中, 干燥 12 h, 得到内部纤维网络结构的木块, 标记为 C-wood。

1.3 表面处理技术

1.3.1 光热涂层制备

在 C-wood 的基底上制作光热涂层,将 0.3 g TiO_2 和 0.2 g C_3N_4 超声分散于 20 mL 去离子水中,加入 1 mL Mcnt 水分散液,连续搅拌至均匀,用滴涂法在 C-wood 的切割表面反复沉积混合溶液,室温环境下自然干燥,标记为 CD-wood。

1.3.2 光热吸水层制备

称取 SA 单体与去离子水混合,利用磁力搅拌器水浴加热,在 60 °C 下溶解搅拌 30 min,得到 1.6% (质量分数) 的 SA 溶液,在室温下冷却,加入 SA 溶液体积百分比为 10% 的光热涂层混合溶液和 0.26% 的催化剂 TEMED,储存,以备下一步使用。称取 AM 加入到去离子水中进行搅拌,得到 21% (质量分数) 的 AM 水溶液,接着加入质量占 AM 水溶液 0.08% 的交联剂 MBA 和 0.12% 的引发剂 APS,混合均匀。室温条件下,将储存的 SA 混合溶液均匀滴涂在 C-wood 表面,同时加入制备的 AM 混合溶液,通过原位聚合制备基于 SA/PAM 有机骨架的光热吸水层,与 C-wood 表面紧密包覆在一起,标记为 CS-wood。

1.3.3 激光处理

激光处理工艺分别在 CD-wood 和 CS-wood 切割表面进行,通过 JL1 龙门式雕刻机的激光来回运动,进行图案化处理。实验过程中发现,较高的激光加工功率会导致木块光热涂层表面或者吸水层表面产生更严重的灼伤,加重表面结构的破坏。激光加工功率为 3 W,构筑出规则的减反层,分别标记为 CDE-wood 和 CSE-wood。

1.4 材料表征

用扫描电子显微镜和能谱仪 (SEM-EDS, JSN-7500F) 对不同样品的微观形貌及元素分布进行了表征。XRD 检测结果是通过 X'Pert3 Powder 多功能粉末 X 射线衍射仪获得的,扫描速度为 5 (°)/min,扫描范围为 5°~55°。通过 Nicolet iS50 傅立叶红外光谱仪,在 4000~500 cm^{-1} 测量了 FT-IR 光谱。使用 Cary100 型紫外可见分光光度计记录不同样品表面的透射光谱和反射光谱,吸收效率由式 (1) 可得。使用 HT-18 红外相机,图形化地观察木材表面的温度,以了解不同处理技术在热定位方面的影响。用视频光学接触角测量仪 (OCA20) 测试样品表面的超亲水性。

$$A = 1 - R - T \quad (1)$$

式中: R 和 T 分别为反射率和透过率。

1.5 导热系数

将要测试的样品 (厚度为 5 mm) 夹在两个玻璃片之间,测量样品在潮湿状态下的导热系数。夹层结构中,上层玻璃放置有冰水混合物的槽,下层玻璃放

置在含有水的可控热源上,用红外相机观察中间样品横截面的温度梯度。根据傅立叶传导方程计算导热系数,如式 (2) 所示。

$$q'' = K \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

式中: q'' 是热流密度,可以通过玻璃片的导热系数和温度梯度来估算, dt 是温差, dx 是距离差。

1.6 太阳能海水淡化实验

太阳能海水淡化实验是使用太阳模拟器 (CEL-SA500/350),在室温 25 °C、湿度 35%、1 个日照强度下进行的。木块漂浮在装满海水的玻璃容器中,蒸发发生在木块表面,其余水面与空气隔绝,以减少对绝对蒸发量的影响。蒸发过程中,水分的质量损失由校准的电子天平实时记录。

2 结果及讨论

在本设计中,制备了 Wood、C-wood、CD-wood、CDE-wood、CS-wood、CSE-wood 蒸发器作为对照样品,实现了在 1 个日照下的太阳能海水淡化。

2.1 CSE-wood 蒸发器的特性

天然树木蒸腾作用过程中,纵横交错的树根提高了土壤中水分的吸收率,而且还具有固着支持的功能。为了模拟天然树木的吸水过程,在木块截面沿生长方向制备仿根系的网格化结构,如图 1a 所示。通过化学处理,使较小厚度的细胞壁脱离为分离的纤维素纤维。冷冻干燥过程中,在通道内形成互联的纤维网络,变得更加轻质化,具有环保和生物可降解特性^[22]。采用 SA/PAM 原位聚合对木块进行光热吸水层修饰,光热吸水层包覆在木材表面和微通道壁上,其具有均匀网络微孔,然后在吸水层表面构筑规则的减反层,二者耦合具有较大的比表面积,制得双层结构的 CSE-wood 蒸发器。CSE-wood 蒸发器不需要额外的辅助手段便可以漂浮在水面,光热吸水层和减反层装饰表面有利于太阳的光吸收和热定位。由于木块沿微通道方向具有低导热系数,可以使蒸发表面温度快速上升,实现热局部化。此外,减反层的微通道在毛细力的作用下,可有效地将水向上输送,促进蒸发,如图 1b 所示。随着蒸发的进行,在蒸发器上表面形成浓度梯度,这种盐浓度梯度在海水-空气界面产生了表面张力梯度,形成马兰戈尼效应^[23]。这种现象对蒸发器表面产生薄水膜起着重要作用。在海水和空气交界处,由于盐浓度梯度引起的表面张力梯度对海水溶液产生了额外驱动力,驱使其从低表面张力位置流向高表面张力位置。毛细作用与马兰戈尼效应协同,为蒸汽的产生保证持续的供水,使 CSE-wood 蒸发器在太阳照射下可以高效地实现太阳能界面蒸发。

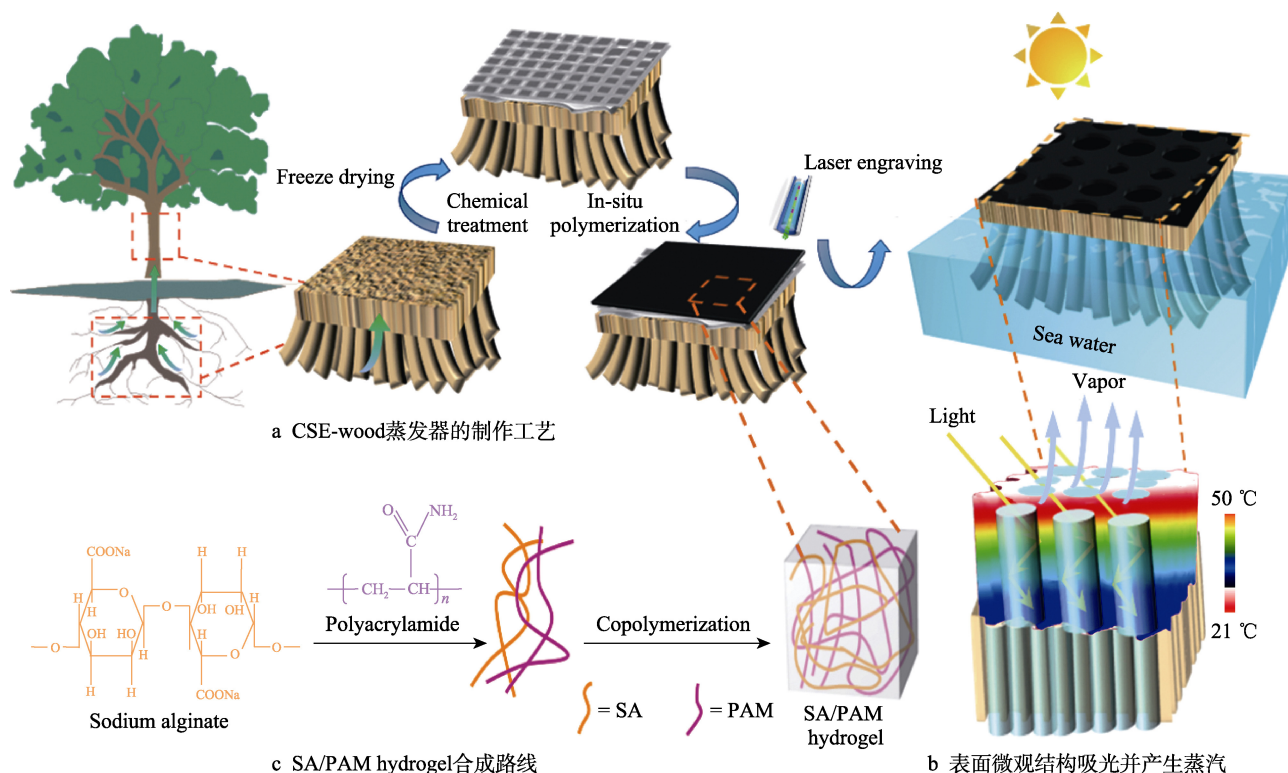


图 1 CSE-wood 蒸发器的设计与制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of design and preparation process of CSE-wood evaporator: a) manufacturing process of CSE-wood evaporator; b) surface microstructure absorbs light and generates steam; c) SA/PAM hydrogel synthesis route

在 CSE-wood 蒸发器制备之前,首先对光热吸水层中的 SA/PAM 凝胶进行研究,图 1c 为其合成路线。基于 SA 和 AM 单体进行原位聚合,在聚合过程中,PAM 凝胶中的聚合物链在交联剂和引发剂的作用下,通过自由基聚合而形成共价交联的 PAM 网络。并且 PAM 的胺链和 SA 的羧基之间相互结合,形成共价键,从而在室温环境中通过共聚合形成 SA/PAM 凝胶。

2.2 不同组蒸发器表面层的表征

为了更深入地了解不同工艺处理后获得的太阳能蒸发器和木块表面形貌特性,制备了六种不同的样件,图 2a 为宏观照片,经化学处理后,天然巴沙木由黄色变为白色。样件通过不同处理工艺获得不同黑色功能层表面,如图 2b—g 所示。从图 2b 发现,天然木材具有许多直径为 200~300 μm 的圆柱形管腔通道,与树干平行,具有高纵横比,与从树心向树木外表面径向延伸的射线细胞结合在一起,形成了一个连续储存和运输水分以及营养物质的内部结构。去除木质素和半纤维素后,上表面有许多 30~50 μm 的薄壁小孔组成的网孔结构,其孔隙体积和比表面积比天然木材高得多(图 2c)。黑色光热涂层沿垂直方向均匀修饰在浅色木材表面,如图 2d 中红色圆圈部分团聚的细小颗粒为光热物质,沉积在木材表面,没有破坏木材的多孔结构。在图 2e 中可以清楚地看到,经过激光雕刻形成了排列规则且开放的沟槽,在增强可见光吸收的同时,亲水官能团发生了破坏,影响水分输

送。图 2f 为光热吸水层的表面电镜图,观察到 SA/PAM 光热吸水层与基底紧密结合,在生长过程中,不仅向上生长,而且向下生长到木块的孔隙中,通过图 2f 右上角图片可以看到,形成了凹槽状的表面。另外,该光热吸水层具有大约 20~30 nm 的网状微孔,使水分快速输送到蒸发表面。从图 2g 发现,光热吸水层上均匀构筑了减反层,木块表面没有被破坏,微通道增强了光的吸收,产生的毛细作用有利于水分输送和蒸气的逸出,且表面存在大量的气泡结构,可提升隔热性能。从图 2h 中相应的元素映射图像发现,CSE-wood 蒸发器表面存在 C、Na、N 和 Ti 元素,表明 SA/PAM 聚合物经高温后形成了这些气泡结构。

2.3 蒸发器表面层的特性分析

木材细胞壁中的主要成分有具有芳香环结构的碳水化合物和木质素,其亲水性表面非常适合通过毛细作用将水输送到受热温度较高的区域。由傅立叶变换红外光谱发现(图 3a),C-wood 在 1736 cm^{-1} 和 1235 cm^{-1} 处的羰基伸缩峰和 C—O 拉伸峰强度明显降低,反映了半纤维素的成功去除。同时,在 1593 cm^{-1} 和 1506 cm^{-1} 处,芳香族骨架振动峰减小和消失,表明木质素被去除。傅立叶红外光谱中,在 3100~3500 cm^{-1} 处有一个宽峰,为 OH 基团的伸缩振动峰,表明木材表面具有亲水性。化学处理后的 C-wood 和 CSE-wood 峰强度升高,CDE-wood 峰强度降低。因为 CDE-wood 蒸发器的减反层直接构筑在木块表面,激光产生的高温使

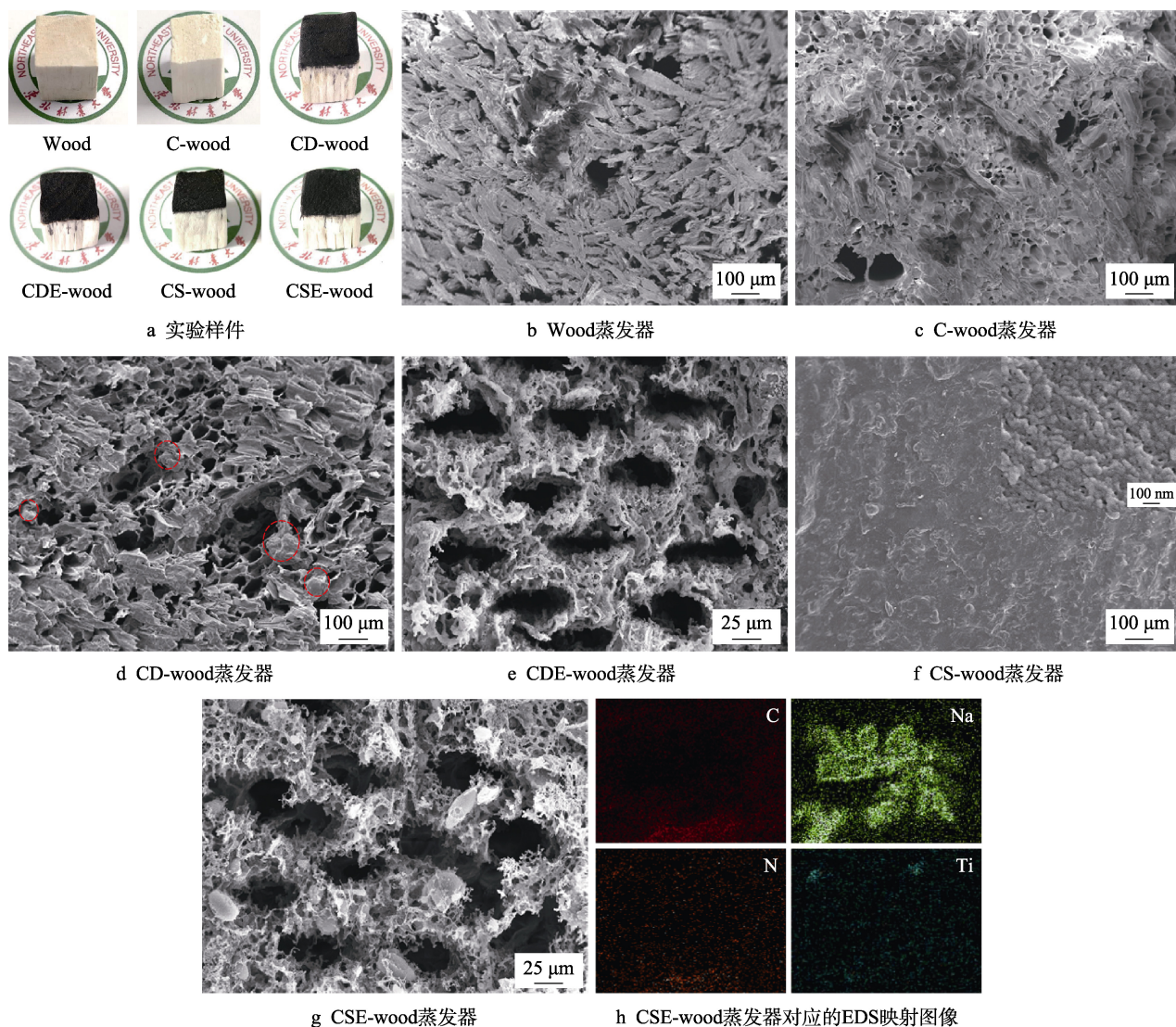


图2 不同工艺处理后木材表面层及其 SEM 图像

Fig.2 Wood surface layer and SEM image after different treatment: a) experimental sample, b) Wood evaporator, c) C-wood evaporator, d) CD-wood evaporator, e) CDE-wood evaporator, f) CS-wood evaporator, g) CSE-wood evaporator, h) EDS mapping image corresponding to CSE-wood evaporator

一部分 OH 基团受到破坏,而 CSE-wood 蒸发器的减反层构筑在光热吸水层表面,有效避免了木块表面受到破坏,并且高温产生的气泡结构使其更容易存储水分子。在此范围内,CS-wood 和 CSE-wood 谱线的另一个明显的峰为 SA/PAM 凝胶中游离的 —NH_2 特征吸收峰。同时 CS-wood 和 CSE-wood 谱线在 1610 cm^{-1} 处有一个宽峰,是 —COO— 基团的伸缩振动峰。相比较其他谱线,CS-wood 和 CSE-wood 的谱线既保留了 —NH_2 的特征峰,还具有 —COO— 吸收峰,说明在木材表面成功地制备了 SA/PAM 光热吸水层。在 2930 cm^{-1} 和 2853 cm^{-1} 处,分别对应 C—H 的对称和反对称伸缩振动吸收峰,其中, C-wood 蒸发器的 C—H 峰略有变化,可以看出,前期化学处理工艺对天然木材原有官能团影响不大。

为了进一步说明不同工艺方法对蒸发器基底的影响(加入的不同物质在蒸发器中的分布情况以及亲

水性),对六组蒸发器进行了 XRD 物相分析。在 X 射线衍射谱中, 16° 和 22° 附近出现衍射峰,属于 I 型纤维素的典型结晶峰。木块经化学处理后, XRD 谱图中纤维素的结晶峰尖锐程度明显变缓或减小,表明纤维素的结晶度部分被破坏,形成纤维素 II 或无定形碳。这一结果证实了化学处理改变了木块成分的状态,并与木块形态的变化相一致,而纤维素分子及其排列没有发生改变,说明将化学处理后的木块作为蒸发器的基底是一种可行的处理方法。在约 29° 处出现 MCNT 的衍射峰, Wood 和 C-wood 对应的衍射峰形似鼓点,说明木材内部含有部分非晶碳相或无定形碳; CD-wood 和 CDE-wood 中, MCNT 的衍射峰形尖锐,表明结晶度高,晶粒变大;而 CS-wood 与 CSE-wood 没有出现明显的 MCNT 衍射峰,表明在光热吸水层中, MCNT 的结晶度低,没有发生团聚,不影响蒸发器中水分子的运输。

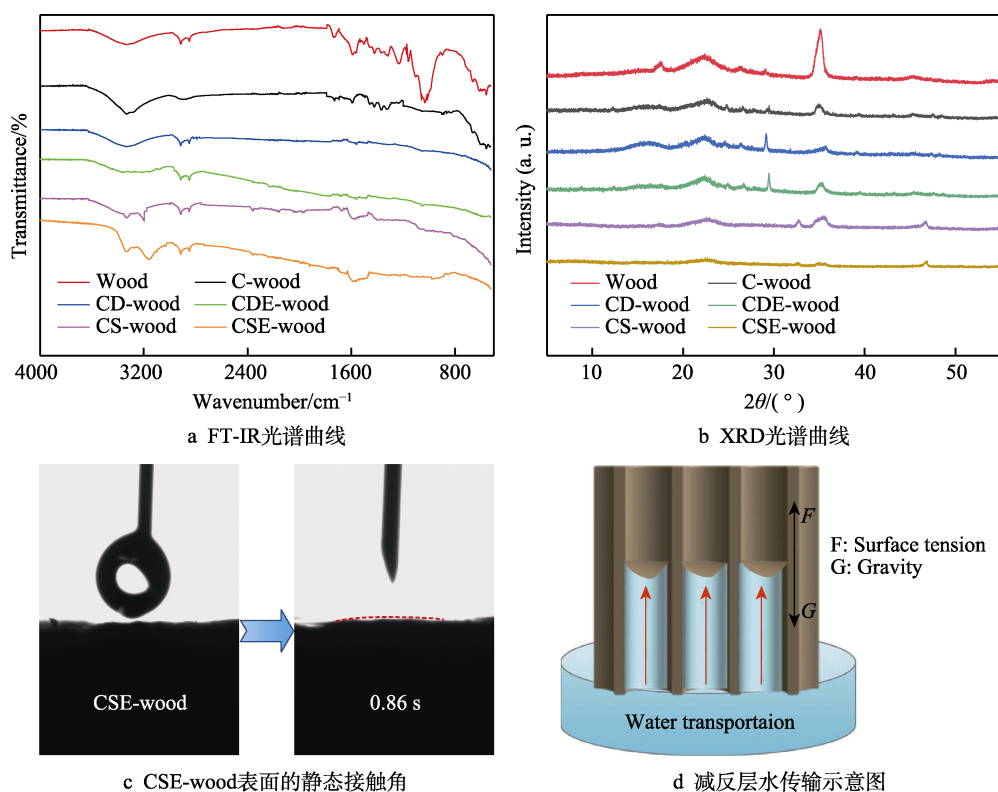


图 3 样品经不同工艺处理后的特性

Fig.3 Characteristics of samples treated by different processes: a) FT-IR spectral curve; b) XRD spectral curve; c) Static contact angle of CSE-wood surface; d) Diagram of water transfer in antireflection layer

图 3c 为液滴在 CSE-wood 表面的静态接触角, 发现在 0.86 s 的时间内, 液滴迅速消失, 表明构筑双层结构后, CSE-wood 具有很强的亲水性。这可以归因于分散的维管束和减反层 (平均孔径约为 $100\ \mu\text{m}$) 在置于海水中后, 水分子迅速通过维管束到达减反层, 在液面张力作用下, 继续沿减反层方向上升。可根据公式 (3) — (4) 进行解释。

$$F = 2\pi r \sigma \cos \theta \quad (3)$$

$$G = \pi r^2 h \rho g \quad (4)$$

式中: r 为减反层半径, θ 为海水与减反层壁的接触角, σ 为室温 $25\ ^\circ\text{C}$ 下的液体表面张力系数 ($7.2 \times 10^{-2}\ \text{N/m}$), h 为海水在减反层中上升的最终高度, ρ 为海水密度, g 为重力常数。当海水的表面张力 F 等于减反层中产生的重力 G 时, 水柱停止上升。在理想条件下, 毛细管力作用的海水上升约 $28\ \text{cm}$, 远大于本实验中减反层厚度。减反层的超亲水与毛细作用改善了蒸发器的输水性能。

2.4 蒸发器在可见光下的光热行为

海水淡化过程中, 水分子蒸发会带走部分热量, 使蒸发器表面温度降低, 因此良好的光吸收和光热转化是太阳能蒸汽产生的重要过程。为了研究蒸发器的光吸收能力, 使用紫外可见分光光度计, 测量了 $190\sim 900\ \text{nm}$ 的光吸收情况, 如图 4a 所示。不同处理工艺的蒸发器的消光光谱描绘了紫外光谱可见部分

的宽带光吸收, 最高吸光效率约为 94.6% 。CDE-wood 与 CSE-wood 的吸收率高于 CD-wood 与 CS-wood, 这归因于在前两种蒸发器构造的减反层中, 独特的微结构内的重复光反射或散射。其中, CSE-wood 太阳能蒸发器的双层结构在整个紫外光谱中表现出较好的光吸收特性, 高于天然木材。天然木材的光吸收因为有色木质素, 限制了可被吸收的光波长。C-wood 由于木质素和半纤维素的去除, 对光的吸收效率低于天然木材。相比之下, 同样具有减反层的 CDE-wood 蒸发器的光吸收效率较低, 这是因为直接在 CD-wood 的基底表面构筑了减反层, 使木块内部结构以及修饰在表面的光催化物质被破坏, 降低了光的吸收。

通过红外相机, 获得了不同组木质蒸发器在 $1\ \text{kW/m}^2$ 的太阳光照强度下表面温度变化和侧面温度梯度分布图像, 如图 4b 所示。C-wood 蒸发器表面温度上升缓慢, 最高温度在 $30.3\ ^\circ\text{C}$ 左右。经过修饰光热涂层、聚合光热吸水层和构筑减反层后, 蒸发器表面温度普遍上升较快, 最高温度在 $49.4\ ^\circ\text{C}$ 左右。当照射 $30\ \text{min}$ 时, 侧面温度梯度图显示, 具有减反层的 CDE-wood 和 CSE-wood 出现非常明显的温度梯度变化, 并且在相同的光照时间内, 表面温度高于 CD-wood 和 CS-wood, 结果证实, 构筑减反层在光吸收过程中起着重要的作用。在图 4c 中, 可以观察到, 光照射 $5\ \text{min}$ 后, 表面温度上升非常明显, 表明工艺处理后的太阳能蒸发器具有较快的响应时间; 在

照射 20 min 后, 其表面温度趋于稳定。CS-wood 蒸发器表面温度上升最快, 也最高。由于光热吸水层与木块紧密结合, 隔热性好, 且大部分水分子存储在内部, 没有在表面形成有效水膜, 因此太阳产生的热量较少被水吸收, 导致其表面温度升高。CSE-wood 蒸

发器虽然光吸收效率高, 但其表面温度低于 CS-wood 蒸发器。这是因为表面的减反层和气泡结构在吸收水分后, 在其表面形成了一层薄薄的水膜, 导致吸收的光转化产生的热被水膜吸收, 因此 CSE-wood 蒸发器的表面温度较低。

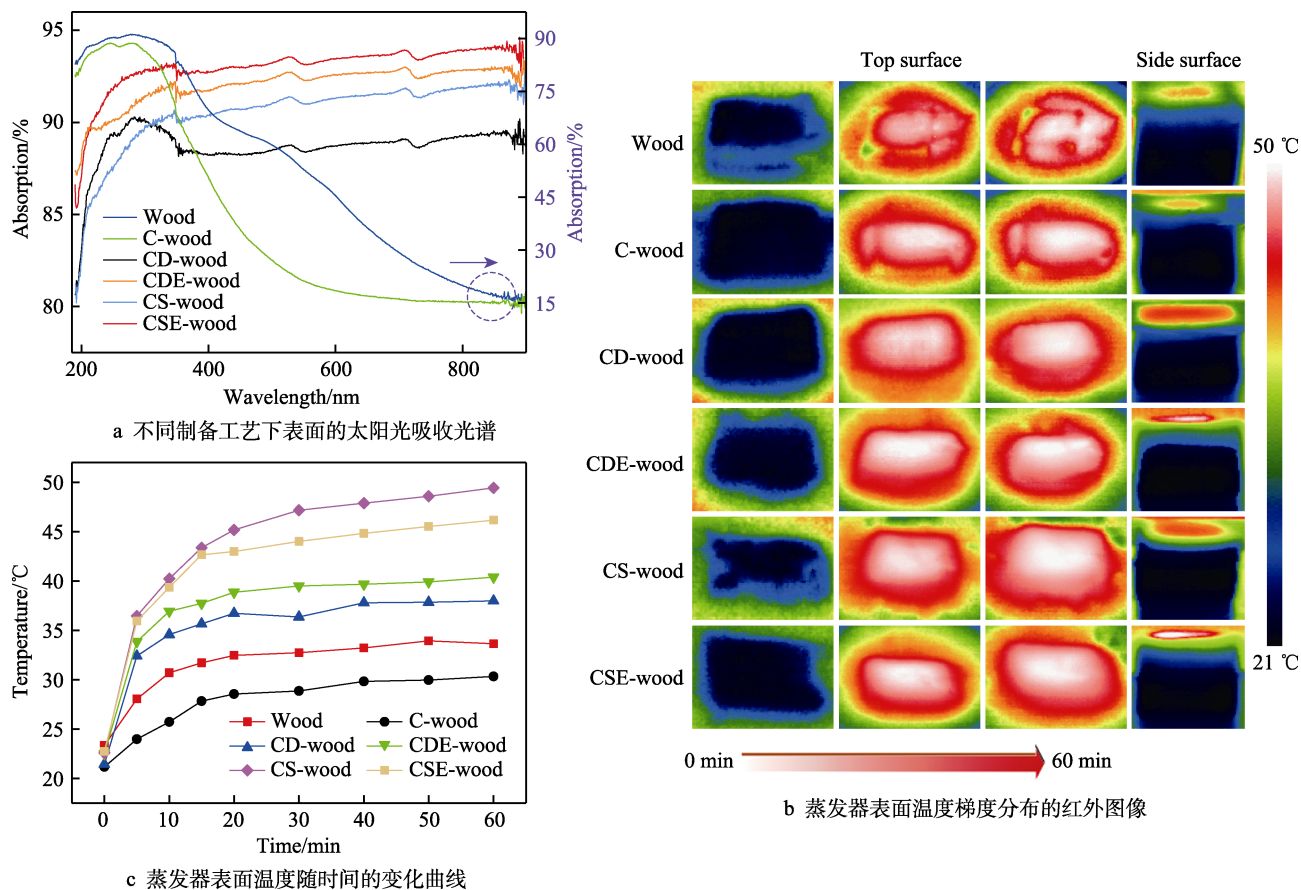


图 4 不同组木质蒸发器在 1 kW/m^2 太阳光照强度下的热行为

Fig.4 Thermal behavior of different groups of wood evaporators under 1 kW/m^2 solar illumination intensity: a) solar absorption spectra of different surface preparation processes; b) infrared image of temperature gradient distribution on evaporator surface; c) change curve of the surface temperature of the evaporator

2.5 导热系数分析

如前所述, 蒸发器基底的低热导率对确保将光照产生的热限制在蒸发表面非常重要, 阻止了太阳能加热多余的水。图 5 为潮湿状态下蒸发器的导热系数。由于 Wood 蒸发器在太阳能蒸汽产生过程中处于水合状态, 因此用热通量温差拟合的方法测量了木块在潮湿状态下的导热系数, 为 $0.381 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 如图 5a 所示, 低于纯水的导热系数 ($0.606 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)。经化学处理后, 木块具有的多孔结构将其分成不同空腔, 起到内部隔热特性, 导热系数降至 $0.271 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。在 C-wood 基础上, 不同工艺处理后, 导热系数变化不大, 其中, CSE-wood 蒸发器的导热系数最低, 为 $0.265 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。因为在蒸发过程中, 水分沿木材通道输送, 微通道内的对流换热大大减弱, 所以多功能木质太阳能界面蒸发器的导热系数远低于纯水的导

热系数, 从而有助于在蒸发器表面形成热局域化, 提高蒸发性能。

2.6 单日照条件下海水淡化性能研究

不同组蒸发器的仿根系网格化结构增大了其与蒸发海水的接触面积, 还可促进其漂浮在水面的稳定性。为了确定蒸发器的光热应用性能, 用电子天平记录了在 1 个太阳强度光照下蒸汽随时间变化产生的质量损失。图 6a 为每个蒸发器的质量变化, 与光照时间呈线性关系, 说明太阳能驱动水蒸发的稳定性。6 种蒸发系统的蒸发速率和蒸发效率如图 6b 所示, CSE-wood 蒸发器单位面积的水分蒸发量高于其他 5 种蒸发系统的蒸发量, 其中, C-wood 蒸发器的蒸发速率最小, 约为 $0.865 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h)}$, 与 Wood 蒸发器的蒸发速率 ($0.984 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h)}$) 相差不大。因为 Wood 蒸发器的基底原木吸水能力有限, 另外对于 C-wood

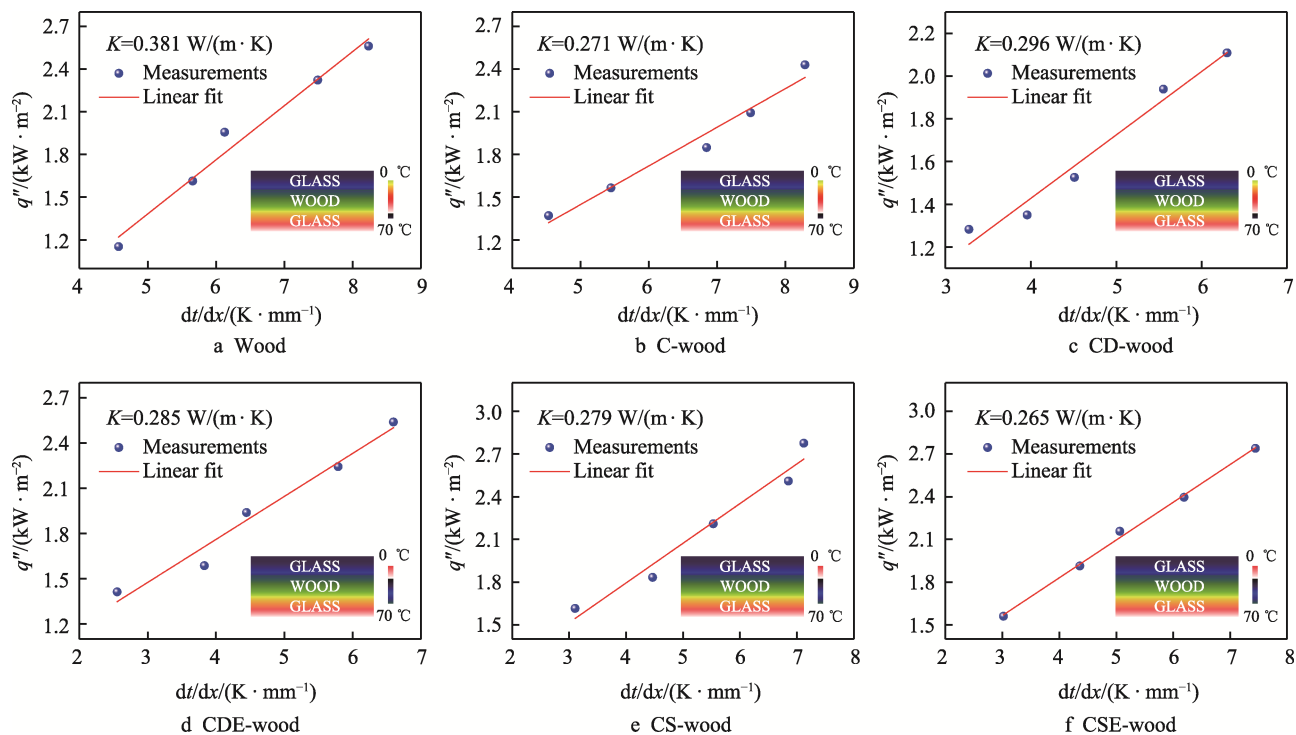


图 5 不同处理工艺蒸发器潮湿状态下的导热系数

Fig.5 Thermal conductivity of evaporators under wet condition with different treatment processes

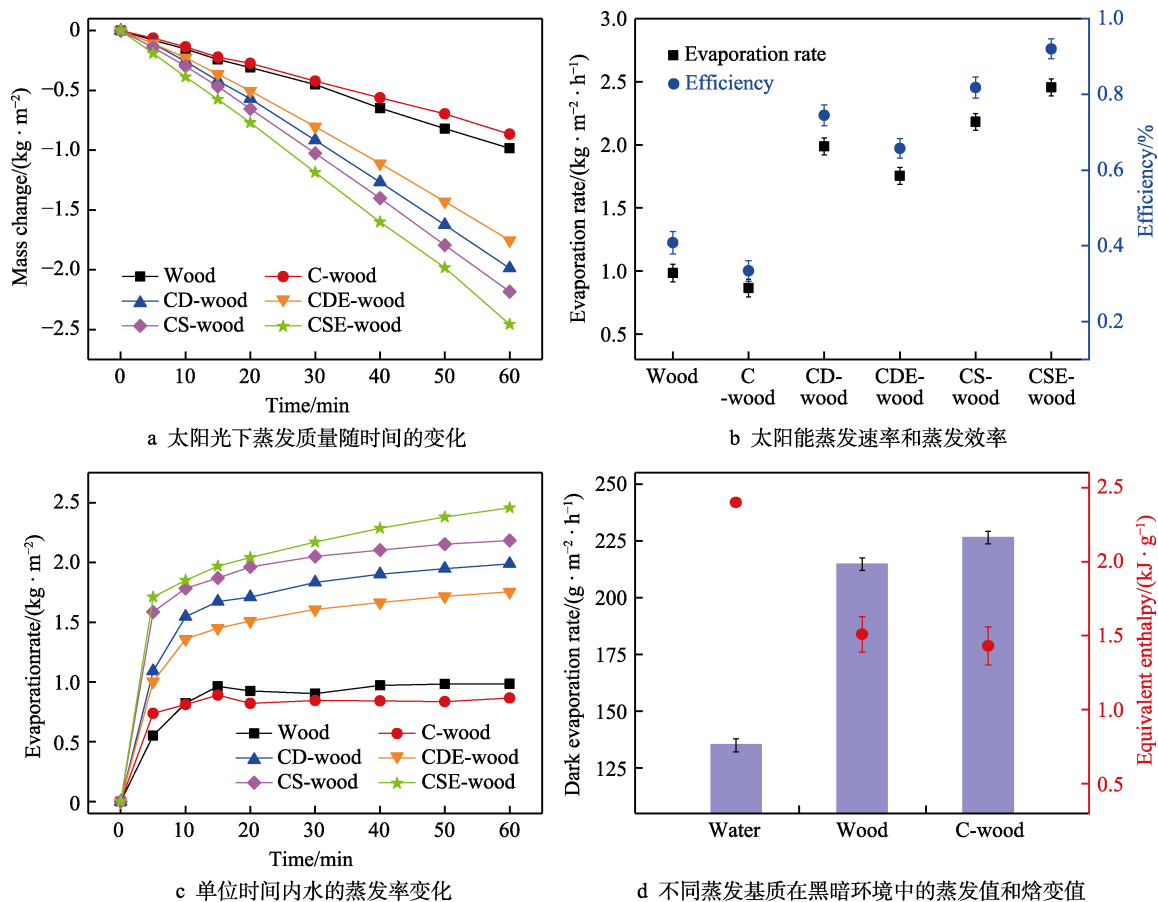


图 6 不同组蒸发器的太阳能海水淡化

Fig.6 Solar desalination of different sets of evaporators: a) variation of evaporation quality of evaporator with time in sunlight; b) solar evaporation rate of evaporator and evaporation efficiency; c) change of evaporation rate of water in unit time of evaporator; d) evaporation and enthalpy changes of different evaporation substrates in dark environment

蒸发器,虽然木质素和半纤维素的去除导致其吸光率和表面温度在一定程度上降低,但是暴露出更多的纤维素,含有的羟基可以提高木块的亲水性,并且孔隙率的增加也有利于蒸汽的产生。CDE-wood 蒸发器的蒸发速率为 $1.755 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因为在木块表面构筑了减反层,减少了表面亲水官能团,导致其蒸发速率小于 CS-wood 蒸发器(蒸发速率为 $1.988 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)。CSE-wood 蒸发器的蒸发速率最大,约为 $2.456 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。根据公式(5)得出太阳能水蒸气的产生效率^[24-26]。

$$\eta = \text{E.R.} \cdot \frac{h_{\text{lv}}}{C_{\text{opt}} P_i} \quad (5)$$

式中: E.R. 为蒸发速率, h_{lv} 为蒸发器内液气相变焓, C_{opt} 为光学浓度, P_i 为标称太阳辐射量($1 \text{ kW}/\text{m}^2$)。

通过计算得出, CD-wood 蒸发器在 1 个太阳强度下的蒸发效率约为 74.5%, 高于 Wood (40.8%) 和 C-wood (33.4%)。这是因为修饰光热涂层后, CD-wood 具有更好的热局部化能力,提高了水分蒸发效率。CSE-wood 蒸发器的蒸发效率约为 92.3%, 在不同组蒸发器中, 蒸发效率最高。这表明在光热吸水层上构筑减反层形成的双层结构, 具有显著的光热性能, CSE-wood 蒸发器的引入提高了水分蒸发速率和效率, 并且具有多孔结构和良好的亲水性, 适合用来作为高效海水淡化的蒸发器。

图 6c 为不同组蒸发器的水蒸发率。初始时, 蒸发率不稳定, 一直处于上升状态, 20 min 后, 随着温度的升高, 各蒸发器的蒸发率开始趋于稳定。在太阳能驱动的界面蒸发实验中, 由于蒸发器的基质不同, 蒸发器内部水分子间的范德华力也会存在差异。根据公式(6)计算蒸发器内水的焓变。

$$h_{\text{lv}} = s_{\text{m}} q_{\text{w}} \quad (6)$$

式中: s_{m} 为黑暗环境下每单位时间水的蒸发量与蒸发器内所含水的蒸发量之比, q_{w} 为水在黑暗中的焓变。

图 6d 为黑暗环境下水和木材中水分的蒸发量和蒸发焓, 化学处理后的木材蒸发所需焓值低于天然木材所需的焓值。

3 结论

综上所述, 采用不同工艺, 结合简便灵活的方法, 开发出一种稳定高效的多功能木材表面太阳能蒸发器, 并对其性能展开研究。它是由一个木材衍生的超亲水纤维网络互联的基底和在 SA/PAM 光热吸水层上构筑的可增强光吸收与水分输送的减反层组成, 为生产清洁水、解决水资源匮乏开辟了新途径。主要结论如下:

1) 蒸发器基底经过化学处理和冷冻干燥, 在通道内形成互联的纤维网络, 改善了热导率, 起到隔热的作用。轻质化结构可使其长期在水中漂浮, 具有的

亲水性和微通道多孔结构保证了水分快速供应, 促进水分蒸发。

2) 在室温条件下就可以制备蒸发器, 且具有网络微孔的光热吸水层能牢固地均匀修饰在多孔木块基底上, 与在其表面构筑的减反层共同作用, 可促进较宽波长范围内的光吸收和光程延伸, 导致蒸发表面温度迅速上升, 实现热局域化, 提高了光热转换效率。减反层具有的毛细作用和马兰戈尼效应协同作用, 促进水有效输送到光热活跃的区域, 具有高的蒸发效率。

3) 6 组不同处理工艺下的蒸发器中, CSE-wood 蒸发器表现出更加优异的性能, 在 1 个太阳强度下, 蒸发率最大值为 $2.456 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 蒸发效率为 92.3%。所得到的蒸发器具有工艺简单、经济高效和稳固可扩展性, 对太阳能水蒸发系统的研究具有指导意义。

参考文献:

- [1] PANG Yun-song, ZHANG Jia-jia, MA Rui-min, et al. Solar-thermal water evaporation: A review[J]. ACS energy letters, 2020, 5(2): 437-456.
- [2] ZHAO Fei, GUO You-hong, ZHOU Xing-yi, et al. Materials for solar-powered water evaporation[J]. Nature reviews materials, 2020, 5(5): 388-401.
- [3] ZHOU Lin, LI Xiu-qiang, NI G W, et al. The revival of thermal utilization from the Sun: Interfacial solar vapor generation[J]. National science review, 2019, 6(3): 562-578.
- [4] CHEN Chao-ji, KUANG Yu-di, HU Liang-bing. Challenges and opportunities for solar evaporation[J]. Joule, 2019, 3(3): 683-718.
- [5] ZHANG Chao, LIANG Hong-qing, XU Zhi-kang, et al. Water purification/harvesting: Harnessing solar-driven photothermal effect toward the water-energy nexus[J]. Advanced science, 2019, 6(18): 1970111.
- [6] MENON A K, HAECHLER I, KAUR S, et al. Enhanced solar evaporation using a photo-thermal umbrella for wastewater management[J]. Nature sustainability, 2020, 3(2): 144-151.
- [7] QIU Peng-xiang, LIU Feng-ling, XU Chen-min, et al. Porous three-dimensional carbon foams with interconnected microchannels for high-efficiency solar-to-vapor conversion and desalination[J]. Journal of materials chemistry A, 2019, 7(21): 13036-13042.
- [8] WU Dan-dan, QU Dan, JIANG Wen-shuai, et al. Self-floating nanostructured Ni-NiO_x/Ni foam for solar thermal water evaporation[J]. Journal of materials chemistry A, 2019, 7(14): 8485-8490.
- [9] LIU Peng-fei, MIAO Lei, DENG Zi-yang, et al. Flame-treated and fast-assembled foam system for direct solar steam generation and non-plugging high salinity desalination with self-cleaning effect[J]. Applied energy, 2019,

- 241: 652-659.
- [10] SUN Zhuang-zhi, LI Zhao-xin, LI Wen-zong, et al. Mesoporous cellulose/TiO₂/SiO₂/TiN-based nanocomposite hydrogels for efficient solar steam evaporation: Low thermal conductivity and high light-heat conversion[J]. *Cellulose*, 2020, 27(1): 481-491.
- [11] XIA Zi-jing, YANG Hao-cheng, CHEN Zhao-wei, et al. Porphyrin covalent organic framework (POF)-based interface engineering for solar steam generation[J]. *Advanced materials interfaces*, 2019, 6(11): 1900254.
- [12] SUN Zhuang-zhi, LI Wen-zong, SONG Wen-long, et al. A high-efficiency solar desalination evaporator composite of corn stalk, Ments and TiO₂: Ultra-fast capillary water moisture transportation and porous bio-tissue multi-layer filtration[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2020, 8(1): 349-357.
- [13] WANG Zhe, YAN Yu-tao, SHEN Xiao-ping, et al. A wood-polypyrrole composite as a photothermal conversion device for solar evaporation enhancement[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2019, 7(36): 20706-20712.
- [14] TANG Jie-bin, ZHENG Tao, SONG Zhao-ping, et al. Realization of low latent heat of a solar evaporator via regulating the water state in wood channels[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, 12(16): 18504-18511.
- [15] ZHANG Xian-quan, YANG Lin-tao, DANG Ben, et al. Nature-inspired design: p-toluenesulfonic acid-assisted hydrothermally engineered wood for solar steam generation[J]. *Nano energy*, 2020, 78: 105322.
- [16] CHEN Jin-xing, YE Zu-yang, YANG Fan, et al. Plasmonic nanostructures for photothermal conversion[J]. *Small science*, 2021, 1(2): 2000055.
- [17] LIN Keng-te, LIN Han, YANG Tie-shan, et al. Structured graphene metamaterial selective absorbers for high efficiency and omnidirectional solar thermal energy conversion[J]. *Nature communications*, 2020, 11: 1389.
- [18] CHEN Ting-jie, WU Zhen-zeng, LIU Zhi-yong, et al. Hierarchical porous aluminophosphate-treated wood for high-efficiency solar steam generation[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, 12(17): 19511-19518.
- [19] GHAFURIAN M M, NIAZMAND H, EBRAHIMNIA-BAJESTAN E, et al. Wood surface treatment techniques for enhanced solar steam generation[J]. *Renewable energy*, 2020, 146: 2308-2315.
- [20] CHEN Jin-xing, FENG Ji, LI Zhi-wei, et al. Space-confined seeded growth of black silver nanostructures for solar steam generation[J]. *Nano letters*, 2019, 19(1): 400-407.
- [21] WANG Min-min, WANG Ping, ZHANG Jie, et al. A ternary Pt/Au/TiO₂-decorated plasmonic wood carbon for high-efficiency interfacial solar steam generation and photodegradation of tetracycline[J]. *ChemSusChem*, 2019, 12(2): 467-472.
- [22] CHEN Chao-ji, SONG Jian-wei, CHENG Jian, et al. Highly elastic hydrated cellulosic materials with durable compressibility and tunable conductivity[J]. *ACS nano*, 2020, 14(12): 16723-16734.
- [23] MORCIANO M, FASANO M, BORISKINA S V, et al. Solar passive distiller with high productivity and Marangoni effect-driven salt rejection[J]. *Energy & environmental science*, 2020, 13(10): 3646-3655.
- [24] GUO You-hong, ZHOU Xing-yi, ZHAO Fei, et al. Synergistic energy nanoconfinement and water activation in hydrogels for efficient solar water desalination[J]. *ACS nano*, 2019, 13(7): 7913-7919.
- [25] HE Shuai-ming, CHEN Chao-ji, KUANG Yu-di, et al. Nature-inspired salt resistant bimodal porous solar evaporator for efficient and stable water desalination[J]. *Energy & environmental science*, 2019, 12(5): 1558-1567.
- [26] WANG Yi-lin, LIU He, CHEN Chao-ji, et al. All natural, high efficient groundwater extraction via solar steam/ vapor generation[J]. *Advanced sustainable systems*, 2019, 3(1): 1800055.

(上接第 73 页)

- [23] YANG Jin, XU Peng, XIA Yun-fei, et al. Multifunctional carbon aerogels from typha orientalis for oil/water separation and simultaneous removal of oil-soluble pollutants [J]. *Cellulose*, 2018, 25(10): 5863-5875.
- [24] HUANG Xu, SUN Ya-juan, SOH S. Stimuli-responsive surfaces for tunable and reversible control of wettability [J]. *Advanced materials*, 2015, 27(27): 4062-4068.
- [25] LI Qian, LI Li-jun, SHI Kui, et al. Reversible structure engineering of bioinspired anisotropic surface for droplet recognition and transportation[J]. *Advanced science*, 2020, 7(18): 2001650.
- [26] CHENG Zhong-jun, ZHANG Dong-jie, LV Tong, et al. Superhydrophobic shape memory polymer arrays with switchable isotropic/anisotropic wetting[J]. *Advanced functional materials*, 2018, 28(7): 1705002.
- [27] SHI Kui, LI Qian, ZHANG Jin-hong, et al. Quantitative characterization of surface wettability by friction force[J]. *Applied surface science*, 2021, 536: 147788.
- [28] 张晋红, 石奎, 徐鹏, 等. 利用液固界面摩擦力表征经典特殊润湿性生物表面[J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 187-193.
- ZHANG Jin-hong, SHI Kui, XU Peng, et al. Characterization of classical biological surfaces with special wettabilities by liquid-solid friction force[J]. *Surface technology*, 2021, 50(7): 187-193.
- [29] GAO Nan, GEYER F, PILAT D W, et al. How drops start sliding over solid surfaces[J]. *Nature physics*, 2018, 14(2): 191-196.