

多尺度 Ag/CuO 复合光热材料的制备及在海水淡化中的应用

李政通 王成兵*

(陕西科技大学材料科学与工程学院, 陕西省无机材料绿色制备与功能化重点实验室, 西安 710021)

摘要: 采用原位化学反应和热处理相结合的策略, 在泡沫铜表面形成丝线状与花瓣状的立体无机物阵列, 然后在其表面蒸镀 Ag 纳米颗粒(NPs), 成功制备了基于泡沫铜的 Ag/CuO 复合光热材料。该复合材料因表面三维立体阵列结构以及 Ag NPs 而具备较高的太阳光吸收率。故而, Ag/CuO 复合光热材料结合三聚氰胺泡沫组成的蒸发器器件实现了高效的海水淡化。本研究除了探索光陷阱深度和金属掺杂对吸收体光热转换效率增强之外, 还搭建了太阳能驱动界面蒸汽生成测试系统, 测试了样品的光热蒸发性能。在 1 倍太阳($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)辐照下, 该器件整体蒸发速率高达 $1.0976 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 即其蒸发效率可达 78.38%。

关键词: 海水淡化; 等离激元金属; 光热转换; Ag/CuO; 泡沫铜

中图分类号: O643.3; TB333

文献标识码: A

文章编号: 1001-4861(2020)08-1457-08

DOI: 10.11862/CJIC.2020.160

Multi-scale Ag/CuO Photothermal Materials: Preparation and Application in Seawater Desalination

LI Zheng-Tong WANG Cheng-Bing*

(Shaanxi Key Laboratory of Green Preparation and Functionalization of Inorganic Materials, School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: *In-situ* chemical reaction and heat treatment were used to form a wire-like and petal-shaped three-dimensional inorganic substance array on the surface of copper foam, and then Ag nanoparticles (NPs) were deposited on its surface to successfully prepare Ag/CuO composite photothermal material. The composite material has high solar light absorption capacity due to the surface three-dimensional array structure and plasmonic effect caused by Ag NPs. This material combined with melamine foam as evaporation device can achieve highly efficient seawater desalination. In addition, to study the optical trap depth and the metal doping for enhancement of the photothermal conversion efficiency, solar steam generation test system was built to investigate the photothermal evaporation performance of the sample. Under one solar ($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) irradiation, evaporation rate of this device was as high as $1.0976 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and its evaporation efficiency could reach 78.38%.

Keywords: seawater desalination; plasmonic metal; photothermal conversion; Ag/CuO; Cu foam

0 引言

21 世纪以来, 随着世界范围内经济的高速发展和工业化步伐的加快, 能源匮乏和环境恶化成为全球面临的重大挑战, 尤其是在一些经济落后地区,

淡水资源极为缺乏^[1]。近年来, 应用于界面蒸发的材料和器件凭借优异的光热转换效率以及热利用效率使其在海水淡化、电力产生、二氧化碳捕获、重金属的回收、蒸汽杀菌、油水分离等领域引起了研究者的极大兴趣^[2-3]。相比传统的海水淡化技术, 界

收稿日期: 2019-12-09。收修改稿日期: 2020-03-25。

国家自然科学基金(No.51562020, 51575253)资助项目。

*通信联系人。E-mail: wangcb@sust.edu.cn

面蒸发技术唯一的驱动力是储量丰富的太阳能。光热材料在太阳能驱动下,实现高效的海水淡化从而获得安全饮用水。其绿色、节能、环保、可持续等一系列优点激发了研究人员对于界面海水淡化技术的深入探索^[4-6]。

光热转换材料是界面蒸发技术的关键,也是太阳能驱动界面式海水淡化技术的核心。光热材料不仅需要拥有优异的光热转换能力,还需要具备有效的水运输通道,可以将水输送到材料内部进行蒸发。目前应用于界面式蒸发的光热转换材料包括等离子体材料、半导体材料、金属氧化物材料、碳基材料、聚合物材料等^[7],其中金属基材料(包括等离子体金属和金属氧化物)在微纳尺度的光学调控展示出巨大的优势。我们曾对这方面的工作做过详细的总结,充分说明了金属基材料应用于海水淡化方面的优势^[8]。例如,南京大学的朱嘉团队^[5,8-10]将不同的等离子体金属(包括 Au NPs, Ag NPs, Al NPs)沉积在阳极氧化铝模板上,制备出了高效率的光热转换器件。此外,胡良兵团队、陈刚团队、邓涛团队在金属基光热转换器件的制备及应用方面也做出了巨大的贡献^[1,11-18]。这一系列研究充分说明在光学和热学具有良好调节性的金属基光热转换材料具备较高的研究价值。然而金属基光热材料研究角度比较单一,如光热材料通过化学方法直接形成“凹”形的光捕获结构,或者掺杂等离子体金属纳米粒子从而提升光热转换能力等。目前,金属基光热材料研究缺少多维度(即纳米线,纳米片以及宏观泡沫复合)的材料设计以及光陷阱(即凹形结构)深度不同的结构设计探索。

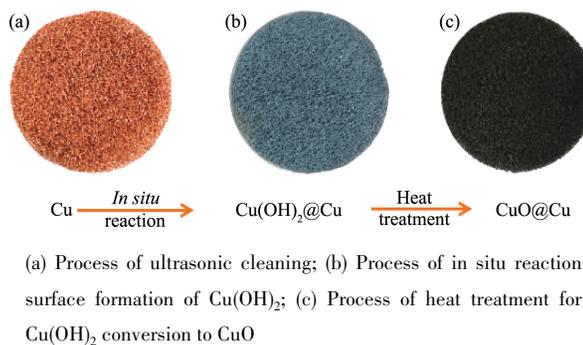
基于上述分析,本研究首先通过原位化学反应^[19-21]在泡沫铜(Cu foam,简称CF)表面原位生成丝线状的氢氧化铜,再经过热处理,表面的Cu(OH)₂脱水形成花瓣状的CuO。进一步,通过蒸镀将Ag NPs沉积在复合金属泡沫上^[9],利用Ag NPs等离子体共振效应(自由电子的集体振荡与太阳光电磁波之间的耦合),复合金属泡沫对太阳光的吸收进一步的增强,形成了多维度的光热材料。在界面蒸发实验中,银/氧化铜复合光热材料(Ag/CuO@CF)作光吸收材料,三聚氰胺泡沫作为支撑材料,兼具低的热传导率(有效降低热传导的损失)和高孔隙率特点(毛细作用运输水),实现了在模拟太阳光(1 kW·m⁻²)辐射下高效的海水淡化。

1 实验部分

1.1 氧化铜的制备

1.1.1 泡沫铜的前处理

选用厚度分别为1.5 mm(记为CF_{1.5})、1.0 mm(记为CF₁)的泡沫铜(直径 $d=22$ mm)作为前驱体,将泡沫铜置于3%(w/w) HCl溶液中超声(功率70 W)清洗2 min,然后将泡沫铜分别在无水乙醇和去离子水中超声清洗5 min。通过不同溶液超声清洗,能够有效除去泡沫铜表面的氧化物/氢氧化物、油脂等杂质,避免对后续实验和测试结果造成影响(图1(a))。



(a) Process of ultrasonic cleaning; (b) Process of in situ reaction surface formation of Cu(OH)₂; (c) Process of heat treatment for Cu(OH)₂ conversion to CuO

图1 泡沫铜的不同处理阶段的光学照片

Fig.1 Optical pictures of different treatment stages of Cu foam

1.1.2 制备Cu(OH)₂薄膜

分别配制1.0 mol·L⁻¹ NaOH溶液25 mL和0.05 mol·L⁻¹ (Na)₂S₂O₈溶液25 mL,然后将2种溶液均匀混合。随后将处理过的泡沫铜垂直浸泡在混合溶液中(确保泡沫铜正反面均匀反应),室温下静置反应5 h。然后将泡沫铜取出,其表面呈现蓝色(图1(b))。

1.1.3 氧化铜薄膜的制备

将上述步骤获得的样品在180 °C下煅烧2 h,后随炉缓慢冷却至室温,泡沫铜表面的Cu(OH)₂分解成CuO,表面颜色由蓝色变成黑色(图1(c))。

1.2 银纳米颗粒的沉积

沉积Ag NPs实验步骤,根据已有的研究^[9],适当修改。利用真空蒸镀设备在已制备得的CuO@CF样品表面沉积Ag NPs,设定参数如下:电压为0.107 V,电流为142 A,厚度为4.8 nm。

1.3 表征仪器及测试条件

Ag/CuO@CF晶体结构由X射线衍射仪(Rigaku D/max2400/PC)测试,工作电压40 kV,电流40 mA,辐射源Cu K α 射线($\lambda=0.154$ 18 nm),测试范围 $2\theta=30^\circ\sim 80^\circ$ 。Ag/CuO@CF等样品表面形貌由扫描电子显微镜(FEI Verios 460)来观察和分析,以钨灯丝作

为电子束发射装置,加速电压是 10、15 以及 20 kV。样品表面元素成分由 X 射线光电子能谱 (AXIS SUPER) 检测,射线源为 Al K α 射线源,运行最大功率 600 W,分辨率不大于 0.45 eV,离子源为 Ar。样品的反射率由紫外-可见-近红外分光光度计 (Cary 5000) 测试得到,波长范围 200~2 500 nm,低狭缝。

1.4 海水淡化实验

海水淡化实验使用自行搭建的蒸发测试平台。该平台包括环境条件调节系统、光学模拟系统和质量变化测试系统,如图 2 所示。

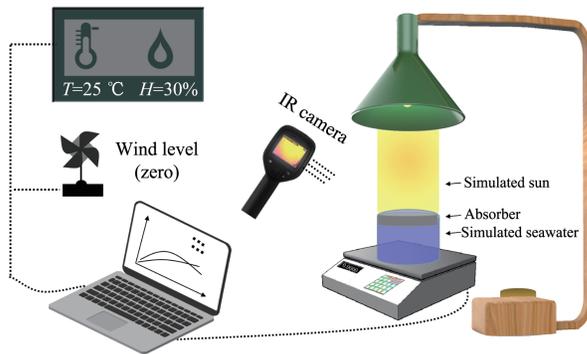


图2 包括环境监测系统、光学模拟测试系统、质量测试系统的水淡化实验室内实验装置模型

Fig.2 Model of experimental device in desalination laboratory including environmental monitoring system, optical simulation system and quality test system

光学模拟系统是利用氙灯 (CEL-HXF300) 作模拟太阳设备,模拟太阳光强度由光功率密度计 (CEL-NP2000) 测量 (多点取样均值法)^[2]。通过配置滤光片 (CEL-AM1.5)、(CEL-AB50) 协同调节实验所需的太阳光谱、强度,然后通过调整工作电流和吸收体到氙灯灯头直线距离来精准调节所需模拟太阳光的强度。环境条件调节系统是通过空调,除湿机,测风轮等设备,检测环境的温度,湿度和风速的变化。质量变化测试系统则测量模拟海水 (3.5% (w/w) NaCl) 和光热材料在模拟太阳光辐照下的质量变化。将承载样品的烧杯放在精度为 0.000 1 g 的电子天平 (AR224CN) 上,数据变化通过 R232 数据线传送并记录到笔记本电脑上 (图 2)。

同时,如图 3 所示,准备直径与样品直径相同的三聚氰胺泡沫,三聚氰胺泡沫直径略大于容器内径,因此可以支撑在容器顶部。从上到下依次是复合金属泡沫、三聚氰胺泡沫、模拟海水,其中金属泡沫和三聚氰胺泡沫构成双层界面蒸发器^[1]。三聚

氰胺泡沫主要有 2 个功能:(1) 蒸发器件依赖于其亲水性和多孔特性,从而通过毛细作用力将整体水运输到蒸发界面,形成界面蒸发。(2) 干燥的三聚氰胺泡沫具有低的热传导性,可以减少太阳光转换成热能通过热传导的散失,形成局域化加热,提高热能的利用。顶层的复合泡沫吸收体在蒸发界面除了有效吸收太阳光转换成热能以外,还为蒸汽溢出提供丰富通道,避免蒸汽原位冷却。在室温 25 °C,湿度 30% 条件下进行蒸发测试实验。不同的样品依靠三聚氰胺泡沫漂浮在气液界面,在光热蒸发过程中,海水的质量通过电子天平实时测量。计算蒸发速率和效率是取模拟海水质量减少量随时间变化稳定条件下数值^[2]。

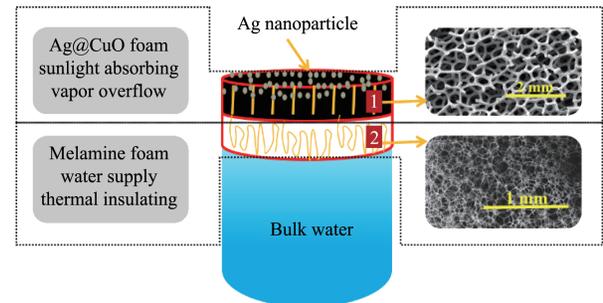


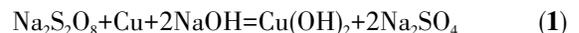
图3 界面式海水淡化系统中典型双层蒸发结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of typical two-layer evaporation structure in interface desalination system

2 结果与讨论

2.1 样品形貌分析

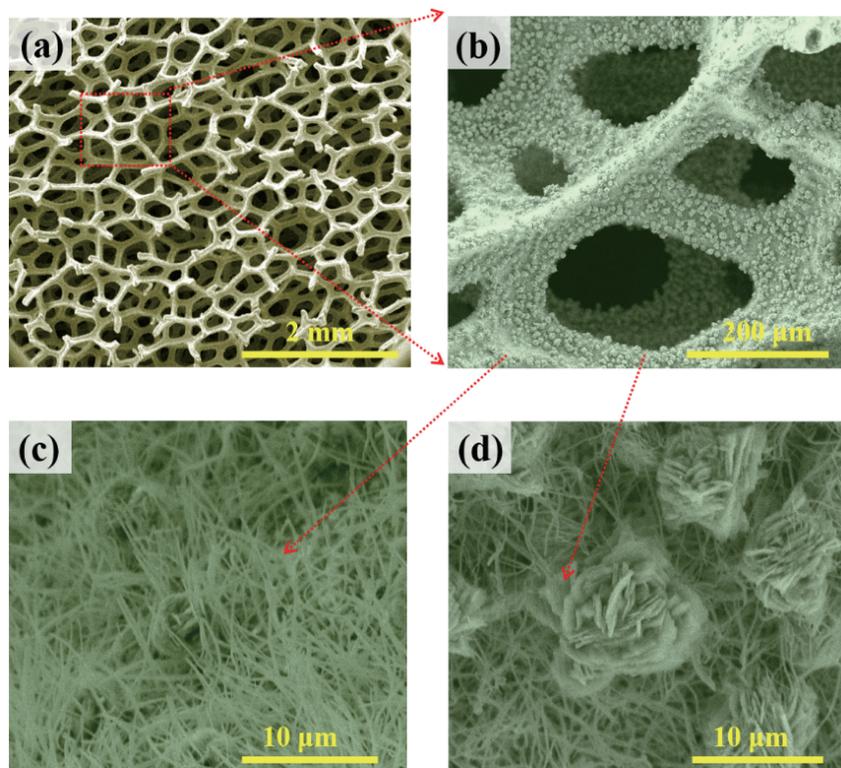
提高金属基光热转换材料光吸收能力可通过组装或者刻蚀材料表面形成光陷阱结构,即三维立体结构通过增加反射和折射的次数来提高光吸收率;或通过掺杂金属纳米颗粒形成等离激元共振从而提高吸收体的光学吸收能力等^[8]。泡沫铜经过式 (1) 的化学反应在原有孔洞表面上形成一层丝线状的氢氧化铜。



值得注意的是铜泡沫在反应时应该用最小的截面和烧杯接触,从而让泡沫铜各部分反应均匀。然后将所获得的 $\text{Cu}(\text{OH})_2@CF$ 过夜干燥,继而在 180 °C 的空气氛围下煅烧 2 h,形成花瓣状的氧化铜,这一过程发生反应 (2)。



图 4 展示了泡沫金属不同倍数的扫描电镜照片。泡沫铜表面多尺度的立体结构 (包括毫米级孔



(a) 58 times, (b) 500 times, (c, d) 10 000 times

图4 CuO@CF在不同尺度下的扫描电镜图片

Fig.4 Scanning electron microscopy images of CuO@CF at different scales

洞结构和微纳级别的纤维和层片)可以将入射的太阳光有效地捕获,显著增强泡沫铜对太阳光的吸收能力。从图中可以清楚地看到,在薄膜表面生长了致密的丝线状纳米纤维,同时表面还附着致密的氧化铜纳米片。许多分层花瓣状结构的纳米片紧密镶嵌组成了类似花状球体的形态,花形结构的直径约 $5 \mu\text{m}$ 。和平面结构相比,极大地增加了光捕获位点,进一步增大了有效的蒸发面积。此外,对于界面式海水淡化系统,孔洞结构还有2个重要作用,其一,可有效释放蒸发过程中产生的蒸汽,避免其原位冷却,提高蒸发速率。其二,在黑暗环境中,蒸发过程中表面产生的盐晶体通过表面尺寸较大孔隙回流到整体水溶液中,从而减少对器件的腐蚀。太阳光吸收体可以避免盐晶体长期沉积从而提高了其实际使用寿命。

界面蒸发过程中,获得较高蒸发效率除了凭借材料良好的光热转换能力,水运输能力也是至关重要。蒸发过程中,将吸收体置于多孔的三聚氰胺泡沫上形成双层结构蒸发器件(图3)。这种双层结构通过吸收层和支撑层直接接触形成理想的无障碍水运输通道,从而保持复合泡沫光热转换薄膜产生

水蒸汽的同时迅速将海水补充到蒸发界面。另一方面,干燥的三聚氰胺泡沫具备较低的热传导率,可以有效降低热传导损失,避免热量大幅度散失到水中,形成了有效的局部化加热(图7b)。

2.2 样品的成分分析

通过X射线光电子能谱(XPS)检测处理后金属泡沫的成分,如图5(a)所示。CuO@CF样品的XPS测试结果显示,在532、931 eV处检测到O1s、Cu2p峰。XPS谱图表明Cu和O两种元素存在。进一步对该样品进行红外特征峰的分析,得到了与XPS光谱分析相一致的结果。如图5(b)所示,CuO@CF复合光热材料在 473 cm^{-1} 处,有Cu-O的红外特征吸收峰存在,进一步说明了CuO薄膜的生成。沉积Ag NPs后,由于形成纳米金属颗粒层较薄,故通过X射线衍射(XRD)检测沉积Ag NPs前后样品晶体结构变化。测试结果如图5c和5d所示,结合jade软件的分析,得到如下结论:在 $2\theta=35.6^\circ$ 、 38.7° ,出现明显的CuO的衍射峰(PDF No.03-0084);在 $2\theta=43.6^\circ$ 、 50.5° ,出现明显的Cu的衍射峰(PDF No.03-1018)。这一分析进一步证实了泡沫铜衬底上的氢氧化铜在 180°C 煅烧后生成了CuO。同时,镀Ag NPs后的样品Ag/

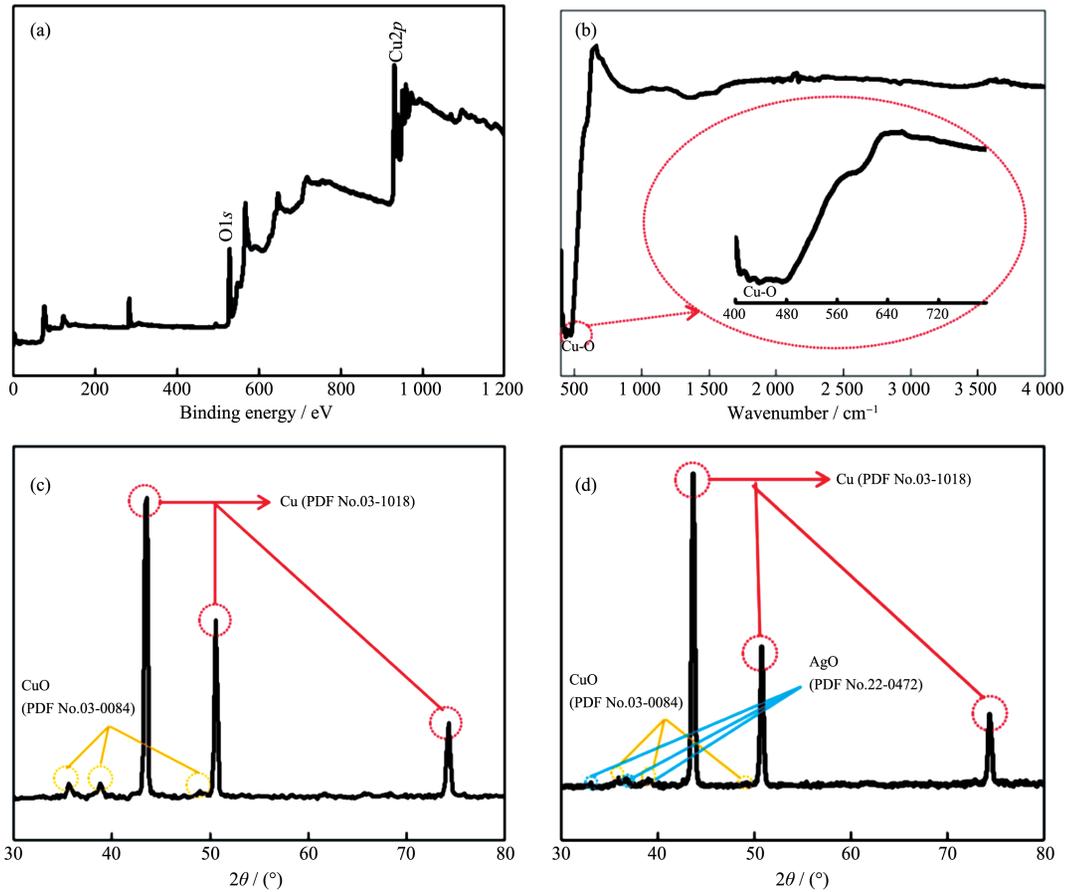


图5 CuO@CF的X射线光电子能谱(a)、傅里叶红外光谱(b)和XRD图(c); Ag/CuO@CF的XRD图(d)
 Fig.5 X-ray photoelectron spectroscopy (a), Fourier infrared spectroscopy (b) and XRD pattern (c) of CuO@CF;
 XRD pattern of Ag/CuO@CF (d)

CuO@CF的衍射图也进一步证实了Ag元素的存在,如图5(d)所示,在 $2\theta=38.3^\circ$ 出现明显的AgO的衍射峰(PDF No.22-0472)。

2.3 光热转换性能的分析

搭建了太阳能蒸发测试平台对Ag/CuO@CF等样品进行界面光热蒸发性能的测定,采集在光强为 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时模拟海水的质量变化量,通过计算30 min后蒸发稳定时质量变化数据,得出样品的净蒸发速率如表1所示。

主要进行了2组对照实验,第一组以基底泡沫铜厚度作为实验变量,不同厚度形成不同深度光陷阱,考察光陷阱深度对光吸收率增强的测试,其中包括1.5 mm泡沫铜(CF_{1.5})和1 mm泡沫铜(CF₁)。第二组以是否掺杂Ag NPs作为实验变量,考察金属掺杂对于光吸收率增强的测试,其中掺杂Ag NPs前后样品分别记为CuO@CF和Ag/CuO@CF。以下通过蒸发速率测试实验和光学反射率测试2个角度详细论述不同厚度的泡沫铜以及是否掺杂Ag NPs对于

表1 一倍太阳($1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)辐射下,不同样品的净蒸发速率

Table 1 Net evaporation rate of various samples under one sun radiation ($1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$)

Sample	Evaporation rate / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Net evaporation rate / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)*
CuO@CF1	0.893 8	0.792 8
CuO@CF1.5	0.929 6	0.828 6
Ag/CuO@CF1	1.023 8	0.922 8
Ag/CuO@CF1.5	1.198 6	1.097 6
In dark	0.101 0	—

*Net evaporation rate is equal to evaporation rate minus evaporation rate in dark environment

材料光学吸收性能的影响。

由表 1 可知 $\text{CuO}@CF_{1.5}$ 净蒸发速率高于 $\text{CuO}@CF_1$ (提高比率约 4.5%), $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_{1.5}$ 的净蒸发速率也高于 $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_1$ (提高比率约 19%)。在温度、湿度、风速等其它实验条件完全相同下, 1.5 mm 泡沫铜为基底所制备样品蒸发速率大于 1 mm 的泡沫铜制备的样品, 由此可知, 光线照射在多孔样品表面, 由于样品厚度增加, 光线在样品内反射和折射次数增加, 从而增加了该样品的光吸收能力。进一步, 沉积 Ag NPs 后的样品, 其蒸发效率和沉积 Ag NPs 前相比较, 1 mm 泡沫铜为基底制备的样品 ($\text{Ag}/\text{CuO}@CF_1$) 和 1.5 mm 泡沫铜为基底制备的样品 ($\text{Ag}/\text{CuO}@CF_{1.5}$) 的净蒸发速率分别提高 16% 和 32%。在其它条件不变情况下, 主要是材料光吸率增加, 意味着更多太阳能转换成热能, 从而给界面水的蒸发提供了更多能量。

通过紫外-可见-近红外分光光度计对不同样品进行光学反射率检测。在选定的太阳光谱范围内 (200~2 500 nm), 测量不同样品的反射曲线 (图 6 (a)), 然后通过公式 (3) 计算得出对应样品的吸收率。 $\text{CuO}@CF_1$ 的光吸收率为 83.42%, 低于 $\text{CuO}@CF_{1.5}$ 吸收率 (84.71%)。沉积 Ag NPs 后样品 $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_1$ 和 $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_{1.5}$ 在太阳光全谱范围内光吸收率分别达 85.91% 和 88.64%。而 $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_{1.5}$ 在可见光部分 (400~760 nm) 的吸收率高达 95.87%。由此可知, 复合泡沫的光吸收效率的增强除了黑色 CuO 薄膜阵列形貌影响外, Ag NPs 凭借等离激元效应对光吸收也起到了极大促进作用。

$$\alpha = \int_{200 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} \frac{I_s(\lambda)(1 - R(\lambda)) d\lambda}{I_s(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

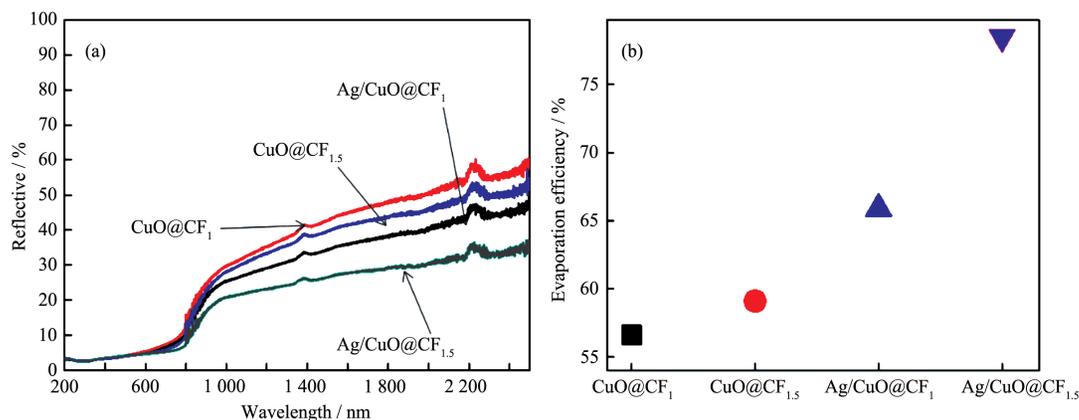


图 6 (a) 不同样品的 200~2 500 nm 范围的反射光谱; (b) 不同样品的蒸发效率示意图

Fig.6 (a) Reflectance spectra between 200 and 2 500 nm of different samples; (b) Schematic diagram of evaporation efficiency for different samples

其中 λ 是波长, $R(\lambda)$ 是样品的反射光谱, $I_s(\lambda)$ 是太阳光谱 AM 1.5 (ISO 标准 9845-1 (1992))。

为了更加直观地说明样品蒸发能力, 通过公式 (4) 将光热蒸发速率转换成光-汽转换效率 (光热蒸发效率) 进行比较, 结果如图 6(b) 所示。

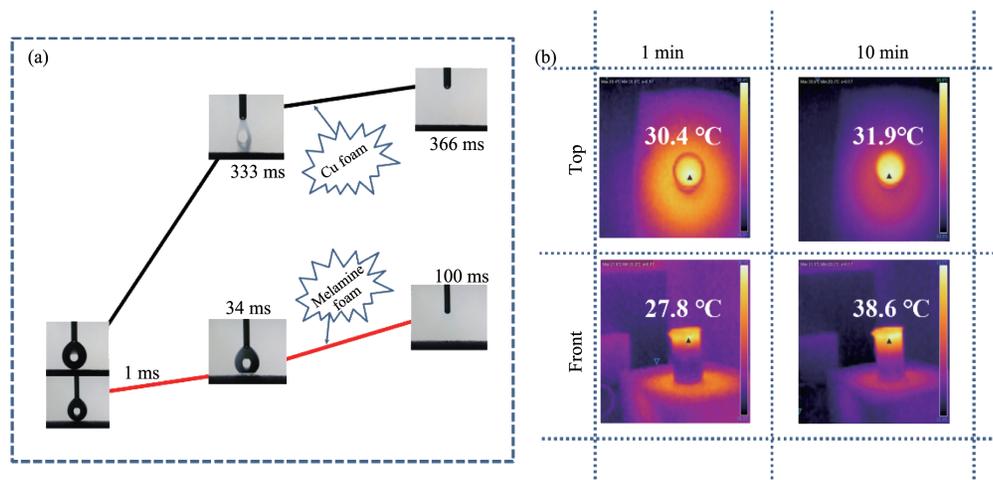
$$\eta = \frac{\dot{m} \Delta H}{c_{\text{opt}} q_i} \quad (4)$$

其中, \dot{m} 为净蒸发速率 (或蒸发质量变化率), 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 表示从模拟太阳光蒸发速率中减去在暗场环境下蒸发速率后, 得到的净太阳能驱动的蒸发速率, 暗场代表几乎没有光照的黑暗环境; ΔH 为水的汽液变化总焓变, 为 $2\,575 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{opt} 为光学聚焦倍数; q_i 为标准太阳光强度 ($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)。

在一倍模拟太阳光 ($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) 照射下, $\text{CuO}@CF_1$ 、 $\text{CuO}@CF_{1.5}$ 、 $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_1$ 和 $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_{1.5}$ 在蒸发稳定阶段的光热蒸发效率分别为 56.79%、59.36%、66.11% 和 78.38%。 $\text{Ag}/\text{CuO}@CF_{1.5}$ 的光-汽转换效率最高, 与传统太阳能海水淡化系统相比有了极大提高, 对太阳光的利用效率极大改善。

以上结果表明, 不同样品光吸收率和蒸发实验所测得对应样品蒸发速率之间都是呈线性正相关的 (图 6)。

当然蒸发效率提升不仅仅取决于复合泡沫吸收率的提高, 泡沫金属底部的三聚氰胺泡沫也发挥了重要的作用。如图 7 所示, 三聚氰胺与水的接触角为 0° , 显示超亲水性能, 且水运输速度优于泡沫铜, 仅 100 ms 后水滴迅速浸入泡沫中。此外, 铜作为基底材料, 其红外发射率远远低于碳材料, 由图 7 (b) Top 的红外相机照片可知, 蒸发实验 10 min 后, 吸收体表面温度由 30.4°C 升至 31.9°C , 表明复合吸收



Marked temperature is the temperature of test point indicated by the triangle of figure (b)

图7 (a) 泡沫铜和三聚氰胺泡沫接触角测试实验; (b) Ag/CuO@CF 复合三聚氰胺泡沫的红外相机照片(顶部和侧面)

Fig.7 (a) Contact angle test of Cu foam and melamine foam; (b) Infrared camera photographs (top and front) of Ag/CuO@CF with melamine foam sample under one sun radiation

体在蒸发过程中保持较低的热辐射损失。通过计算得出一倍太阳光辐照下蒸发器件的热损失为 10.26%(其中,表面辐射 3.0%,空气对流 3.4%,传导损失 2.0%,容器寄存热损失 1.86%)

综上所述,Ag/CuO@CF 光热转换材料是在蒸发器件的顶层作为吸收层,导热系数低的三聚氰胺泡沫在蒸发器件的底层作为支撑层和绝热层。蒸发器件在太阳光辐照下,光线照射到顶层样品表面,部分光被样品吸收转换成热能用来蒸发。与此同时,下层的三聚氰胺泡沫通过毛细作用力不断将水从整体水溶液中运输到光热转换的界面,然后界面水通过局域化的加热转化成水蒸气,水蒸气通过泡沫金属的表面孔洞溢出。为了进一步证实太阳能蒸发过程中形成了局域化加热,用红外热像仪记录器件侧面的温度变化(图 7(b)Front)。由其侧面视图可知,在一倍太阳辐照下,蒸发器件经过 10 min 的照射,仍有明显的温度分层。泡沫下面的整体水的温度升高缓慢,表明三聚氰胺泡沫的低热传导性产生了热局域现象,吸收层产生的热量有较少能量散失到水中,从而有利于太阳能驱动海水蒸发。

3 结论

基于原位化学反应、热处理和真空蒸镀 Ag NPs,制备了一种基于泡沫铜的多尺度 Ag/CuO 复合光热材料。结合新型的界面光热转换技术,实现了高效的海水淡化。此外,探究了不同厚度样品光陷阱效应和掺杂贵金属对于材料光吸收性能的增强

效果。其中,Ag/CuO@CF_{1.5}样品在整个太阳光波长范围内(200~2 500 nm)吸收率可达到 88% 以上,其表面密集的花状纳米片与丝线状的纳米纤维组成的三维立体阵列结构及 Ag NPs 的等离激元效应对于其光吸收性能显著增强。进一步结合三聚氰胺泡沫组成典型的双层界面蒸发器件,对其进行了模拟海水淡化实验的测试。三聚氰胺泡沫可利用毛细管作用不断将水运输到光热转换界面,并且其较低热传导性形成了局域化加热^[22]。Ag/CuO@CF_{1.5}样品结合双层结构设计在水输送、热损耗管理等方面具有巨大优势,在标准太阳光照照射下,可达到 78.38% 的光热蒸发效率。

综合而言,作为一种新型的能源利用方式,界面式太阳能蒸发不仅可用于海水淡化领域,还可以与电能产生、地下水抽滤、光催化等领域结合,进一步扩展其功能性^[3,23-27]。

参考文献:

- [1] Tao P, Ni G, Song C Y, et al. *Nat. Energy*, **2018**,**3**(12):1031-1041
- [2] Li Z T, Wang C B, Lei T, et al. *Adv. Sustainable Syst.*, **2019**,**3**(4):1800144
- [3] Li Z T, Wang C B, Su J B, et al. *Solar RRL*, **2019**,**3**(3):1800206
- [4] Wang W, Wen H X, Shi J, et al. *Solar RRL*, **2019**,**3**(10):1900180
- [5] Zhou L, Tan Y L, Wang J Y, et al. *Nat. Photonics*, **2016**,**10**

- (6):393-398
- [6] Yang J L, Pang Y S, Huang W X, et al. *ACS Nano*, **2017**,**11** (6):5510-5518
- [7] Deng Z Y, Zhou J H, Miao L, et al. *J. Mater. Chem. A*, **2017**,**5** (17):7691-7709
- [8] Li Z T, Wang C B. *Chin. Chem. Lett.*, **2019**, DOI: 10.1016/j.ccl.2019.09.030
- [9] Chen C L, Zhou L, Yu J Y, et al. *Nano Energy*, **2018**,**51**:451-456
- [10] Zhou L, Tan Y L, Ji D X, et al. *Sci. Adv.*, **2016**, **2**(4): e1501227
- [11] Chen C J, Kuang Y D, Hu L B. *Joule*, **2019**,**3**(3):683-718
- [12] Cooper T A, Zandavi S H, Ni G W, et al. *Nat. Commun.*, **2018**,**9**(1):5086
- [13] Li X Q, Li J L, Lu J Y, et al. *Joule*, **2018**,**2**(7):1331-1338
- [14] Liu H, Chen C J, Cheng G, et al. *Adv. Energy Mater.*, **2018**,**8** (8):1701616
- [15] Zhu M W, Li Y J, Chen F J, et al. *Adv. Energy Mater.*, **2018**, **8**(4):1701028
- [16] Ni G, Zandavi S H, Javid S M, et al. *Energy Environ. Sci.*, **2018**,**11**(6):1510-1519
- [17] Ni G, Li G, Boriskina S V, et al. *Nat. Energy*, **2016**, **1**(9): 16126
- [18] Wang Z Z, Ye Q X, Liang X B, et al. *J. Mater. Chem. A*, **2017**,**5**(31):16359-16368
- [19] XU Hui(徐惠), HUANG Jian(黄剑), CHEN Yong(陈泳). *Journal of Functional Materials(功能材料)*, **2011**,**3**(42):388-394
- [20] Hua Z T, Li B, Li L L, et al. *J. Phys. Chem. C*, **2016**,**121**(1): 60-69
- [21] TAN Ying-Ling(谭颖玲). *Thesis for the Master of Nanjing University(南京大学硕士论文)*. **2016**.
- [22] Liu G H, Xu J L, Wang K Y. *Nano Energy*, **2017**,**41**:269-284
- [23] WANG Min(王敏), TAN Guo-Qiang(谈国强), ZHANG Dan(张丹), et al. *Chinese J. Inorg. Chem.(无机化学学报)*, **2019**, **9**(35):1551-1560
- [24] Mu P, Bai W, Fan Y K, et al. *J. Mater. Chem. A*, **2019**,**7**: 9673-9679
- [25] Fan Y K, Bai W, Mu P, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2020**,**206**:110347
- [26] He J X, Zhao G H, Mu P, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2019**,**201**:110111
- [27] Li Z T, Zhang J, Zang S H, et al. *Nano Energy*, **2020**,**73**: 104834