

引用格式: 刘岐跃, 孟茹茹, 朱波, 等. NiO_x 纳米片修饰的棉织物用于太阳能海水蒸发[J]. 中国材料进展, 2025, 44(7): 605–613.
LIU Q Y, MENG R R, ZHU B, *et al.* NiO_x Nanosheets Decorated Cotton Fabric for Seawater Evaporation[J]. Materials China, 2025, 44(7): 605–613.

NiO_x 纳米片修饰的棉织物用于太阳能海水蒸发

刘岐跃, 孟茹茹, 朱波, 陈志钢, 蒋伟忠, 余诺

(东华大学材料科学与工程学院 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

摘要: 太阳能驱动的海水淡化有望缓解淡水资源短缺问题, 吸引了高度关注。但目前还存在光热材料光吸收效果不理想、表面易析盐以及制备工艺复杂等问题。为解决以上问题, 采用简单的化学浴沉积法在棉织物(cotton fabric, CF)表面生长具有氧缺陷的氧化镍(NiO_x)纳米片。 NiO_x 纳米片均匀覆盖在棉纤维表面, 与纤维共同形成了多级微/纳结构, 使得CF/ NiO_x 光热织物在350~2500 nm范围内的光吸收率高达96.6%。利用CF/ NiO_x 光热织物构筑倾斜式海水蒸发器, 在模拟太阳光(光强 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)照射下, CF/ NiO_x 的蒸发速率最高达 $1.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 浓缩的卤水会在重力作用下在织物底端滴落。连续蒸发20 h后, 光热织物表面没有盐颗粒析出, 并且蒸发器的蒸发性能没有明显衰减。因此, CF/ NiO_x 光热织物表现出优异的太阳能海水淡化性能和长期稳定性, 有望推动太阳能海水淡化技术走向实际应用。

关键词: 氧化镍纳米片; 界面蒸发; 抗析盐; 太阳能; 海水淡化

中图分类号: P747; TB383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)07-0605-09

NiO_x Nanosheets Decorated Cotton Fabric for Seawater Evaporation

LIU Qiyue, MENG Ruru, ZHU Bo, CHEN Zhigang, JIANG Weizhong, YU Nuo

(State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Solar-driven seawater desalination technology has attracted great attention considering its potential to alleviate the shortage of fresh water resources. However, there are still some issues such as inefficient light absorption of photothermal materials, salt accumulation and complex fabrication processes. To address these problems, a simple chemical bath deposition method was used to grow nickel oxide nanosheets with oxygen deficiency (NiO_x) on the cotton fabric (CF) surface. The NiO_x nanosheets are uniformly coated on the surface of cotton fibers, forming a hierarchical microstructure together with fibers, resulting in high light absorption efficiency of CF/ NiO_x fabric in a broad wavelength range of 350 to 2500 nm, as high as 96.6%. Based on the CF/ NiO_x fabric, a tilted solar evaporator was constructed. Under simulated sunlight (light intensity: $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$), the evaporation rate of CF/ NiO_x is $1.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and the concentrated seawater drips off at the bottom of the fabric due to gravity. After 20 h continuous evaporation, no salt particles appear on the surface of the photothermal fabric, and there is no significant degradation in the evaporator's performance. Therefore, CF/ NiO_x fabric demonstrates excellent evaporation performance and long-term stability, which is expected to promote solar desalination technology to practical application.

Key words: nickel oxide nanosheets; interfacial evaporation; salt-resistance; solar energy; seawater desalination

收稿日期: 2024-01-02 修回日期: 2024-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3804902); 国家自然科学基金资助项目(52161145406)

第一作者: 刘岐跃, 男, 1999年生, 硕士研究生

通讯作者: 余诺, 男, 1991年生, 讲师, 硕士生导师,

Email: yunuo@dhu.edu.cn

蒋伟忠, 男, 1960年生, 教授, 博士生导师,

Email: jwzh@dhu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202401001

1 前言

随着全球人口快速增长、水污染程度加剧以及气候变化, 淡水短缺已经成为一个日益严重的全球性挑战^[1, 2]。由于地球表面约75%被海水覆盖, 从海水中获取淡水成为一种有效缓解淡水危机的方法。目前已经开发出多种高效的海水淡化技术, 包括反渗透^[3-5]、电渗

析^[6, 7]、膜过滤^[8, 9]和太阳能驱动海水蒸发^[8, 10]技术。在这些技术中,太阳能驱动的蒸发器几乎不需要除太阳能以外的其他能源,因此被视为一种高效且环保的海水淡化方法^[11, 12]。然而,太阳能驱动的海水淡化技术的关键在于组装和设计高效的光热材料以及新型的蒸发装置。

在早期的研究中,研究人员将光热纳米颗粒直接分散在水体中,如 SiO_2 -Au 纳米颗粒^[13]、 Cu_7S_4 纳米颗粒^[14]和 $\text{rGO-Fe}_3\text{O}_4$ 纳米颗粒^[15]。这些纳米颗粒能够将光能转化为热能,用于海水蒸发以获取淡水。然而,由于热能会通过热辐射和热传导等途径耗散,导致蒸发速率较低。此外,分散在海水中的纳米颗粒难以回收,容易造成二次污染。为了提高热能利用效率,研究人员报道了一系列单层/双层的蒸发器,如金属纳米颗粒膜^[16-18]、聚合物基膜^[19, 20]、碳基膜^[21, 22]、Mxene 基膜^[23, 24]、石墨/木材^[25]、碳泡沫/石墨烯^[26]、碳化玉米芯^[27]和阳极氧化铝/金属纳米颗粒膜^[28]。当这些光热膜漂浮在海水表面时,可以局部加热海水产生蒸汽,减少热向水体传递的损失,从而大大提高蒸发速率。然而,在界面式海水淡化过程中,仍然会有一部分热能通过水通道从光热膜传导到水体中。同时,随着蒸发过程的推移,海水不断蒸发,溶解盐离子的浓度逐渐增加,当盐浓度达到饱和时,盐会在光热膜表面结晶。结晶的盐会堵塞水通道,阻碍光捕获能力,降低了光吸收效率。为了解决这些问题,作者团队基于光热织物开发了一系列悬挂式太阳能海水蒸发器,包括聚苯胺(PANI)/棉布^[29]、聚丙烯腈(PAN)@硫化铜^[30]和聚多巴胺(PDA)/碳纤维膜^[31]。这些亲水性光热织物悬挂在两个水箱之间,织物的一端浸润在海水中,在毛细和重力作用下,浓缩的海水沿着织物流动,并从织物底部滴落,避免了海盐在织物表面聚集。这些悬挂织物能够进行双面蒸发,表现出高蒸发速率($1.79\sim 2.27\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。这些研究在一定程度上推动了海水淡化技术的发展进程。

目前,光热转换膜的制备过程复杂且成本较高,这限制了悬挂式蒸发器的实际应用。因此,有必要开发具有高

效太阳能光吸收能力和低成本的亲水性光热织物。众所周知,商用棉布(cotton fabric, CF)具有优异的力学性能、高孔隙结构、良好的亲水性、丰富的表面基团和易于改性等特点,同时可进行低成本、大批量生产,因此是制备光热织物的理想衬底材料。镍基纳米材料是一种潜在的低成本吸光材料,Liu 团队^[32, 33]发现将等离子体镍纳米链嵌入到 Al_2O_3 或 SiO_x 中作为选择性太阳能吸收剂,可以增强太阳光的吸收率($>90\%$)。多级纳米结构能够对光进行多级散射和吸收,从而提高光热材料的光热转换能力。Liu 等^[30]通过原位硫化反应,在含铜的 PAN 纳米纤维表面得到多级结构的光热转换布,这种布的光吸收性能显著增强,光吸收率可达 92.2% (纯 PAN 为 3.7%)。

以上制备光热薄膜的过程仍然相对复杂,难以实现大规模制备。为解决这个问题,本研究采用一步化学浴沉积的方法,在棉布表面修饰了一层具有纳米级多孔结构的 NiO_x 纳米片。随后,通过 SEM、TEM 和 XRD 等测试手段对光热织物的形貌和结构进行了表征,同时还测试了光热织物的润湿性和光热转换性能。随后,将 CF/ NiO_x 织物固定在两个水槽上,构筑了倾斜式蒸发器。在 $1.0\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 模拟太阳光下,蒸发器表现出高蒸发速率($1.84\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。重要的是,浓缩的盐水沿着光热织物流动,最终收集在指定的水箱中,避免了固体盐的析出,实现了高效和连续的海水蒸发。

2 实验

2.1 实验原料

氯化钠(NaCl)、六水合硫酸镍($\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、过硫酸钾($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$)、氨水($\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$)、无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)、丙酮($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)和氢氧化钠(NaOH),以上试剂均购于国药集团化学试剂有限公司,商业棉布(CF)购于江阴市华锋纺织科技有限公司。

2.2 CF/ NiO_x 织物制备

CF/ NiO_x 光热织物的制备采用化学浴沉积法(图 1)^[34]。首先将 CF($20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$)用无水乙醇、丙酮和去离子水

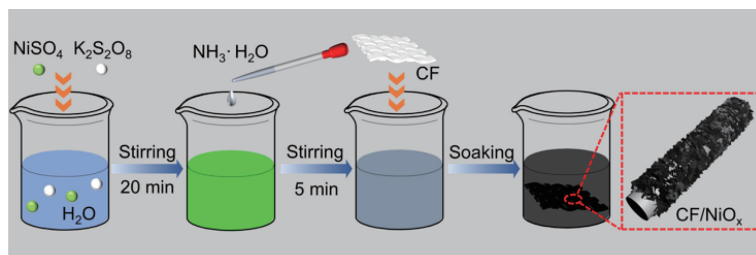


图 1 CF/ NiO_x 的制备流程示意图

Fig. 1 Schematic of the preparation process of CF/ NiO_x

依次超声处理 15 min, 去除表面油性物质和杂质, 并在 60 °C 下烘干。将烘干后的 CF 放入 NaOH (1 mol · L⁻¹, 200 mL) 溶液中并在 90 °C 下保持 2 h。之后, 取出处理后的 CF 并再次在 60 °C 下烘干, 以备后续实验使用。

将 NiSO₄ · 6H₂O (6.57 g, 50.68 mmol) 和 K₂S₂O₈ (1.22 g, 4.51 mmol) 溶解在 50 mL 去离子水中, 磁力搅拌 20 min 后, 得到浅绿色前驱体溶液。然后缓慢滴加 NH₃ · H₂O (3.75 mL), 磁力搅拌 5 min, 得到深蓝色粘稠溶液^[35]。随后将烘干后的 CF 置于上述深蓝色溶液中, 在室温下分别浸泡 2, 24 和 48 h, 待反应完成后, 用去离子水清洗样品 3 次, 并在 60 °C 下烘干, 制得 CF/NiO_x 光热织物。根据浸泡时间的不同, 样品分别被命名为 CF/NiO_x-2 h、CF/NiO_x-24 h 和 CF/NiO_x-48 h。

2.3 CF/NiO_x 织物表征

利用场发射扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi, S-4800, 加速电压 10 kV) 和高分辨率透射电子显微镜 (TEM, Talos F200S) 对样品的表面形貌进行表征。通过 X 射线粉末衍射仪 (XRD, 德国 Bruker 公司) 对样品的晶体结构和物相组成进行表征。利用紫外可见光谱仪 (Lambda 950, 以 BaSO₄ 作为参比) 对样品的反射率 (*R*%) 和透射率 (*T*%) 进行测定, 并通过计算式 $A\% = 100\% - R\% - T\%$ 得到样品的吸光度, 同时与 AM 1.5G 光谱进行比较以计算样品的太阳光吸收效率。使用接触角分析仪 (JY-82B) 评估样品的亲水性, 使用傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱测定织物表面的官能团, 使用等离子体光谱分析 (Prodigy-ICP) 对海水淡化前后的离子浓度进行测定。

2.4 CF/NiO_x 织物蒸发性能测试

首先, 将一定量的 NaCl 加入到装有一定量去离子水的容器中, 超声搅拌均匀, 得到浓度为 3.5% (质量分数) 的模拟盐水。然后, 将尺寸为 8 cm × 2 cm 的 CF/NiO_x 光热织物悬挂在一个高水槽 (尺寸 8 cm × 3 cm × 5 cm) 和一个低水槽 (尺寸 8 cm × 3 cm × 4 cm) 之间, 光热织物的两端分别用相同大小的吸铁石固定在水槽的内壁上, 使光热织物上下两面都暴露在空气中, 光照下的投影面积为 2 cm × 3 cm。接下来, 将制备好的模拟海水倒入高水槽中, 使其浸没光热织物的一端, 然后在毛细效应和水的重力作用下, 海水可以沿着光热织物从高水槽流向低水槽。为了消除蒸发过程中溶液自然挥发的影响, 用两片矩形硅胶片盖住两个水槽。整个蒸发系统放置在电子天平上, 记录整个装置在蒸发过程中的质量变化, 并通过质量变化率 (kg · h⁻¹) 除以光热织物的投影面积 (m²) 来计算样品的蒸发速率。模拟光源使用购买自北京中能亿源科技有限公司的氙灯 (PL-X300D)。使用光强计 (美国 Thorlabs GmbH 公司, PM100D) 检测光照强度 (1.0, 2.0 和 3.0 kW · m⁻²)。利用红外热成像仪 (美国 FLIR Systems

公司, Close-up Lens 2X, WD 33 mm) 记录光热织物表面的温度变化。水蒸发实验在室温为 ~25 °C 和相对湿度为 ~30% 的条件下进行。

3 结果与讨论

3.1 CF/NiO_x 织物的形貌

通过 SEM 对 CF 和 CF/NiO_x 进行形貌表征 (图 2)。原始 CF 由多根纤维束编织而成, 而纤维束由多根纤维组成, 纤维表面光滑, 直径约为 13.0 μm (图 2a~2c)。经过化学浴修饰 NiO_x 纳米片后, 棉布的表现颜色从白色变为黑色, 纤维表面有一层明显的涂层, 且该涂层均匀负载在每根纤维表面, 纤维的直径约为 14.8~19.6 μm (图 2e, 2h 和 2k), 大于棉布纤维的直径。高倍 SEM 照片显示, NiO_x 涂层由堆叠较为整齐的纳米片组成, 纳米片相互垂直排列形成大量纳米孔道 (图 2f, 2i 和 2l), 这些纳米孔的孔径随浸泡时间的增加而增大, 由 0.12 μm (2 h) 增加到 0.40 μm (24 h) 和 0.47 μm (48 h)。此外, 随着浸泡时间的延长, 纤维表面上的鼓包和突起增多, 这些突起处是 NiO_x 纳米片的集中分布区域。这种多孔结构能够增强光的散射吸收, 从而提高 CF/NiO_x 织物的光吸收能力; 多孔的结构还提供了大量的水接触点, 有利于水蒸汽的形成和逸出, 从而加快水蒸发的速率。

将 NiO_x 纳米片从 CF/NiO_x-48 h 上剥离, 采用 TEM 进一步对 NiO_x 的形貌进行分析。NiO_x 呈现纳米片状结构, 粒径为 300~400 nm (图 3a)。用 HR-TEM 进一步分析了 NiO_x 纳米片的晶面结构, 其晶面间距为 0.76 nm, 对应于 NiO_x 的 (001) 晶面 (JCPDS#22-0444) (图 3b)。此外, 对 NiO_x 纳米片进行了 EDS 分析 (图 3c 和 3d), 由元素映射图可知, NiO_x 纳米片中存在 Ni 和 O 两种元素的信号, 进一步证实了 NiO_x 纳米片的成功合成。

随后利用 XRD 对 CF/NiO_x 的晶体结构进行进一步分析。图 3e 显示 CF/NiO_x 在 11.6°, 23.8°, 33.7° 和 60.9° 处有明显的特征衍射峰, 分别对应于 Ni₂O₃H 的 (001)、(002)、(110) 和 (301) 晶面 (JCPDS#22-0444), 上述结果表明在织物表面成功制备的 NiO_x 纳米片属于立方晶系结构^[34]。

通过 FTIR 光谱测定 CF/NiO_x 中的官能团。为了比较, 也测量了纯 CF 的 FTIR 光谱。如图 3f 所示, 1029.91~1208.52 cm⁻¹ 范围内的峰对应于 C—O、C—O—C 和 C—C 的拉伸振动; 同时, 1632.71 和 3331.71 cm⁻¹ 处的峰对应于纤维素中 O—H 拉伸振动, 证实了 CF 的存在。在 425 cm⁻¹ 处观察到了 Ni—O 的拉伸振动, 证实了 NiO_x 的存在。此外, 在 1035.00 cm⁻¹ 处的尖峰代表了 C—O 的拉伸振动^[34, 36]。这些结果表明 CF/NiO_x 表面具有丰富的基团, 这使得该材料具有优异的亲水性。

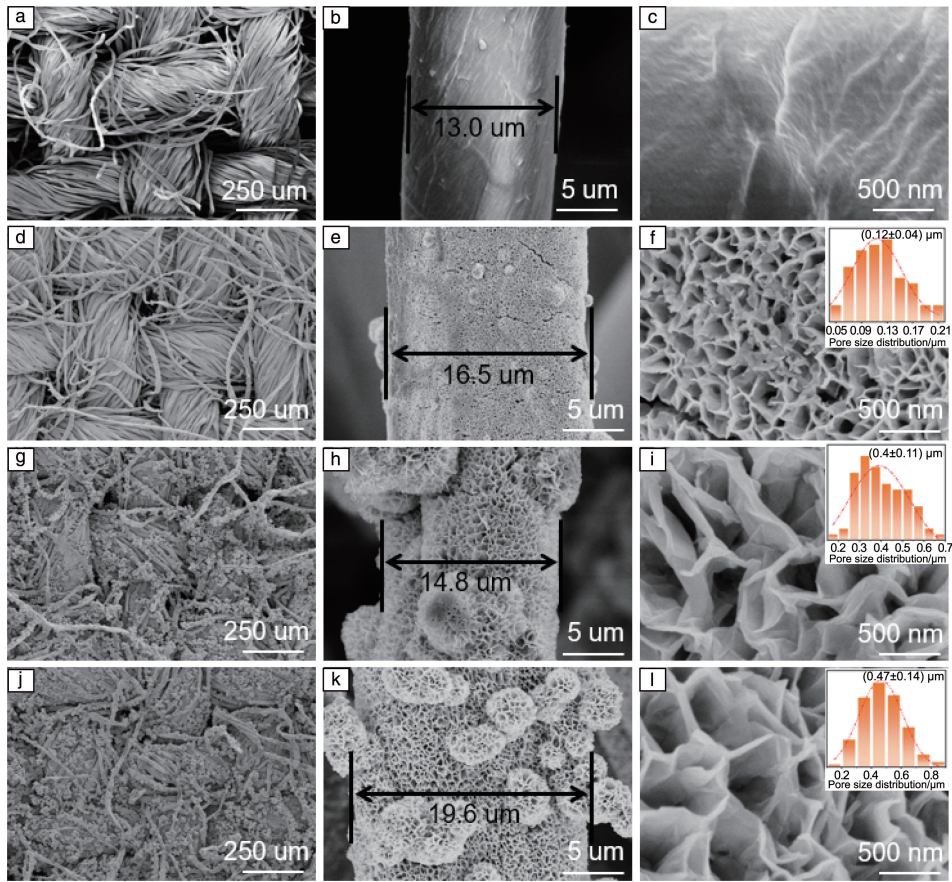


图 2 CF 和 CF/NiO_x 的 SEM 照片: (a~c) CF, (d~f) CF/NiO_x-2 h, (g~i) CF/NiO_x-24 h, (j~l) CF/NiO_x-48 h
 Fig. 2 SEM images of CF and CF/NiO_x: (a~c) CF, (d~f) CF/NiO_x-2 h, (g~i) CF/NiO_x-24 h, (j~l) CF/NiO_x-48 h

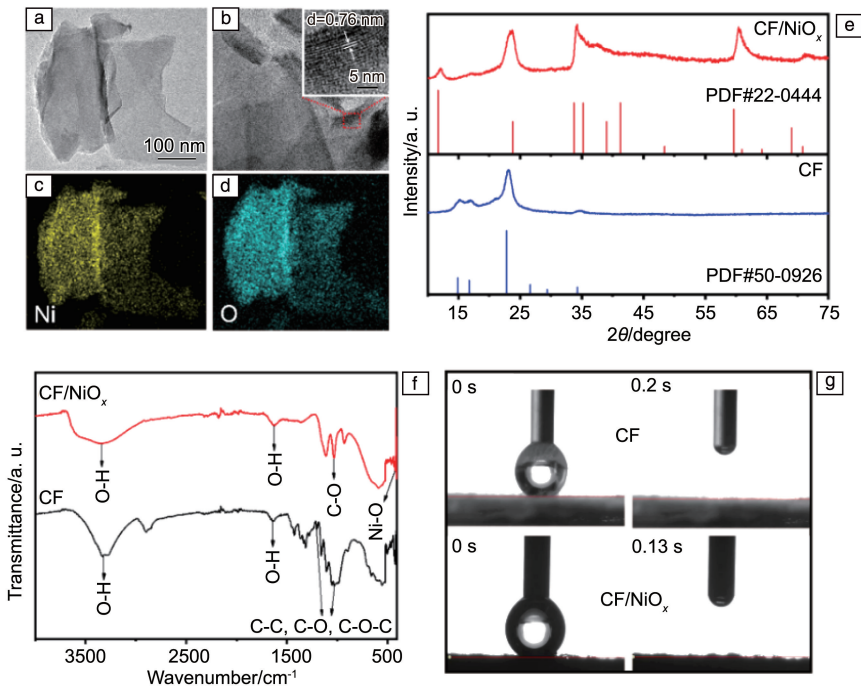


图 3 CF/NiO_x-48 h 的 TEM 照片 (a, b), EDS 元素面扫描结果 (c, d); CF 和 CF/NiO_x-48 h 的 XRD 图谱 (e), 红外光谱 (f) 和水接触角 (g)
 Fig. 3 TEM images (a, b), EDS element mappings (c, d) of CF/NiO_x-48 h; XRD patterns (e), FTIR spectra (f) and water contact angles (g) of CF and CF/NiO_x-48 h

利用接触角探究了 CF 和 CF/NiO_x 光热织物的润湿性能。当将一滴水分别滴在纯 CF 和 CF/NiO_x 光热织物表面时,水滴都迅速向内部渗透(图 3g),且在~0.2 s 的时间内完全消失,这意味着 NiO_x 涂层并没有改变织物表面的润湿性能,水滴仍然能够快速渗透并消失。

3.2 CF/NiO_x 织物的光学和光热性能

为了研究光热织物的光吸收性能,采用配备积分球的紫外可见光谱仪测定了 CF、CF/NiO_x-2 h、CF/NiO_x-24 h 和 CF/NiO_x-48 h 的透射率和反射率。纯 CF 表现出相对较高的透射率(11.6%)和反射率(24.0%~74.8%)(图 4a 和 4b)。计算可知,纯 CF 的光吸收率较低(36.1%)。有趣的是,当纯 CF 的表面被 NiO_x 纳米片修饰后,这些 CF/NiO_x 光热织物在 350~2500 nm 的宽光谱范围内都表现出强的光吸收(89.0%~98.2%)(图 4c),明显高于纯 CF,这主要是因为 NiO_x 具有强的光吸收能力。随着 NiO_x

纳米片层的孔径从 0.12 μm(2 h) 增加到 0.40 μm(24 h) 和 0.47 μm(48 h),CF/NiO_x 的光吸收率从 90.4% 提升到 94.9% 和 96.6%,这可能是由于孔径变大,光线折射的次数增加,从而增加了折射和吸收入射光的机会(图 4d)^[37]。

为了进一步研究 CF/NiO_x 的光热转换性能,使用氙灯作为模拟光源(1.0 kW·m⁻²)照射光热织物。如图 4e 所示,可以观察到在 1.0 kW·m⁻² 下,纯 CF 的表面温度变化不明显,在 5 min 内大约上升了 5 °C,最终稳定在~26 °C。然而,在相同照射条件下,CF/NiO_x 织物的表面温度快速上升,在 5 min 内从约 22 上升到 67 °C(CF/NiO_x-2 h)、68 °C(CF/NiO_x-24 h)和 70 °C(CF/NiO_x-48 h)(图 4f)。这些结果表明 CF/NiO_x 织物具有出色的光热转换能力。

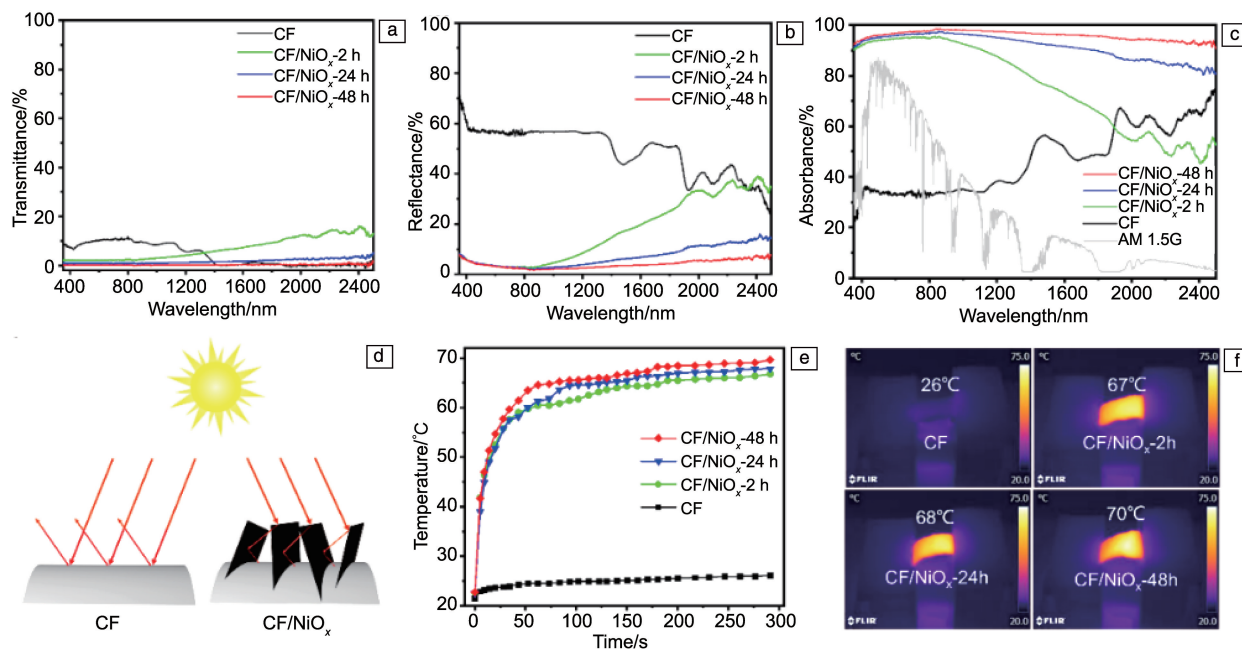


图 4 CF 和 CF/NiO_x 的光学和光热性能: (a) 透射率, (b) 反射率, (c) 光吸收率, (d) 光捕获示意图, (e) 升温曲线, (f) 光热升温平衡状态的热成像照片

Fig. 4 Photoabsorption and photothermal performance of CF and CF/NiO_x: (a) transmittance, (b) reflectance, (c) absorbance, (d) light capture schematic diagram, (e) temperature curves, (f) thermal images

3.3 CF/NiO_x 光热织物的蒸发性能

在以往的研究中,光热织物通常是漂浮在海水表面,经过长时间蒸发后,固体盐会在其表面积累,且会反射入射光、阻止蒸汽扩散,从而降低蒸发性能。

本文采用了一种倾斜式蒸发器,将光热织物固定在两个不同高度的水箱上。较高的水箱充满海水,而较低的水箱为空。在织物的毛细效应和水的重力的协同作用下,海水不断渗入织物内部,并沿着织物从高槽流向低槽(图 5a)。在 1 kW·m⁻² 的模拟太阳光下,研究了 CF/

NiO_x 的蒸发性能。为了进行对比,还测试了纯 CF 的蒸发性能,同时利用近红外热成像仪监测织物表面温度的变化。在光照 5 min 后,纯 CF 的表面温度约上升了 3 °C,最终稳定在~18 °C,这是由于纯 CF 具有较低的光吸收性能。在相同条件下,当 CF/NiO_x 样品被辐照时,织物表面的温度迅速升高,从约 16 快速上升到 33 °C(CF/NiO_x-2 h)、34 °C(CF/NiO_x-24 h)和 35 °C(CF/NiO_x-48 h)(图 5b 和 5c)。

同时,使用电子天平记录了蒸发装置的质量变化。如

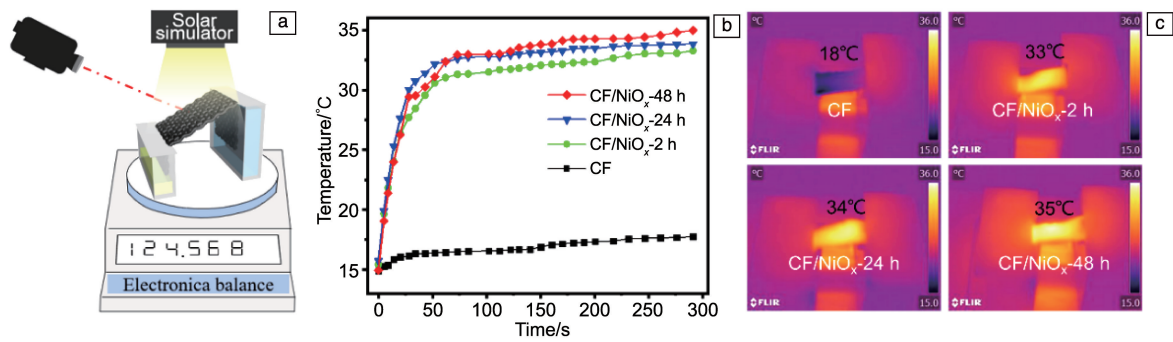


图 5 蒸发性能测试示意图(a), CF 和不同浸泡时间下 CF/NiO_x 织物表面温度随时间的变化(b) 和 300 s 时对应的热成像照片(c)

Fig. 5 Schematic diagram of evaporation performance testing (a), surface temperature change of CF and CF/NiO_x over time under different soaking time (b) and corresponding thermal images (c)

图 6a 所示, 在 70 min 内, 纯 CF 的蒸发量为 $0.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 对应的蒸发速率为 $0.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。CF/NiO_x 的蒸发量随着光照时间呈线性增加, 随着制备时浸泡时间从 2 延长至 24 和 48 h, 蒸发速率从 1.69 增加至 1.77 和 $1.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 6b)。这些蒸发速率分别是纯 CF 的 2.1, 2.2 和 2.3 倍。CF、CF/NiO_x-2 h、CF/NiO_x-24 h 和 CF/NiO_x-48 h 的蒸发效率(η)可用式(1)^[26, 38]计算:

$$\eta = \frac{\dot{m} \Delta H_{\text{ev}}}{I} \quad (1)$$

式中, \dot{m} 为蒸发速率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), ΔH_{ev} 为溶液转换为气相的蒸发焓变 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), I 为样品表面的光照强度 ($1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)。需要注意的是, 样品的蒸发速率是光照条件下引发的蒸发速率和无光条件下自然挥发速率(暗蒸发速率)的总和, 因此在计算时需要减去样品的自然挥发速率。经测试, 在无光条件下, 纯 CF 的暗蒸发速率为 $0.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同浸泡时间下 CF/NiO_x 的暗蒸发速

率分别为 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (CF/NiO_x-2 h), $0.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (CF/NiO_x-24 h) 和 $0.51 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (CF/NiO_x-48 h)。显然, CF/NiO_x 的暗蒸发速率高于 CF 的, 这是由于纯 CF 负载 NiO_x 纳米片后, 比表面积增大, 进而导致蒸发加快。此外, 水的蒸发焓可根据式(2)进行计算:

$$\Delta H_{\text{ev}} = \alpha + \beta T + \gamma T^{1.5} + \delta T^{2.5} + \varepsilon T^3 \quad (2)$$

式中, T 是水的温度 ($^{\circ}\text{C}$), 其余均为常数, $\alpha = 2500.304$, $\beta = -2.2521025$, $\gamma = -0.021465847$, $\delta = 3.1750136 \times 10^{-4}$, $\varepsilon = -2.8607959 \times 10^{-5}$ 。1 倍光强下, 纯 CF、CF/NiO_x-2 h、CF/NiO_x-24 h 和 CF/NiO_x-48 h 织物内部水的平衡温度分别是 18, 33, 34 和 35°C 。将这些数据代入式(1)和式(2), 计算得到纯 CF、CF/NiO_x-2 h、CF/NiO_x-24 h 和 CF/NiO_x-48 h 的 η 分别为 30.3%, 84.1%, 86.7% 和 89.3% (图 6c)。综上所述, 这些结果进一步证明了 CF/NiO_x 光热织物具有优异的光热转换性能, 而倾斜式装置具有高效的海水蒸发潜力。

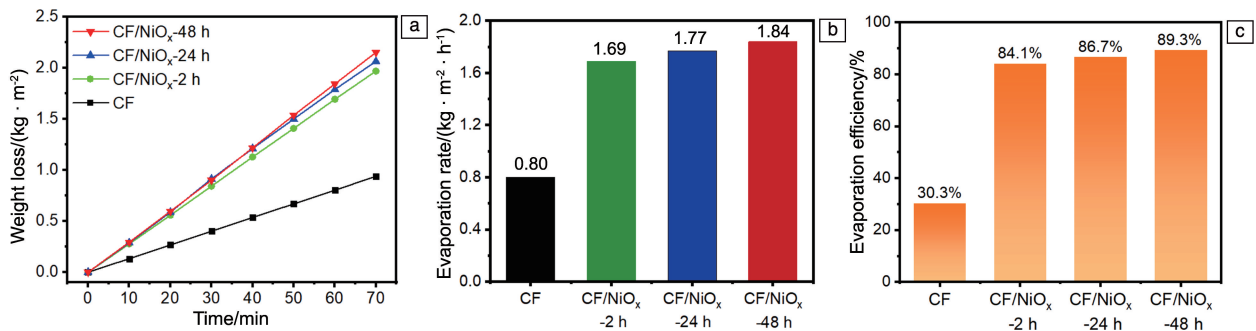


图 6 模拟阳光下不同浸泡时间 CF/NiO_x 的质量损失(a), 蒸发速率(b) 和蒸发效率(c)

Fig. 6 Weight loss (a), evaporation rate (b) and evaporation efficiency (c) of CF/NiO_x under simulated sunlight with different soaking time

为了研究蒸发装置的倾斜角度 α 对蒸发性能的影响, 探究了在不同倾斜角度下的水传输速度及相应的蒸发速率(图 7)。当 $\alpha = 0^{\circ}$ ($h = 0 \text{ cm}$) 时, 水传输速度最慢, 10 min 内能够传输 1.46 g 的水。当 α 逐渐增加至 18° ($h =$

1 cm) 和 34° ($h = 2 \text{ cm}$) 时, 10 min 内水的传输量分别增至 3.24 和 4.39 g, 这表明随着 α 的增大, 水的传输速度相应加快(图 7a)。对于 $\alpha = 0^{\circ}$ 的蒸发装置, 前 20 min 内蒸发速率较高, 随后在 20~70 min 内逐渐下降, 最终 70 min 内

的蒸发速率为 $1.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 蒸发速率先快后慢是由于供水能力太低所致, 在前 20 min 内光热织物完全被海水浸润, 供水充足。然而, 随着蒸发的进行, 光热织物表面的海水逐渐减少, 供水速度无法跟上蒸发速率, 导致蒸发速率逐渐降低。对于 $\alpha = 18^\circ$ 的蒸发装置来说, 其供水能力显著增强, 光热织物能够快速、稳定地蒸发海水, 蒸发速率提升至 $1.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当 $\alpha = 34^\circ$ 时, 由于供水能力过于充分, 海水沿光热织物表面流动时的热损失增大, 导致蒸发速率再次降低至 $1.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 7b 和 7c)。因此, 蒸发装置倾斜角度的大小会影响水传输速度, 从而影响蒸发性能。

为验证 CF/NiO_x 的蒸发稳定性和抗析盐性, 使用 CF/NiO_x-48 h 样品进行了循环耐盐性蒸发试验。每个循环持

续 1 h, 记录该时间段内蒸发器的质量损失, 并计算出蒸发速率(图 8a)。当入射光强为 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 前 5 个周期的蒸发速率约为 $1.82 \sim 1.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当光强增加到 2 和 $3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 蒸发速率保持在 $3.13 \sim 3.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (6~10 个循环) 和 $4.09 \sim 4.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (11~15 个循环)。当光照强度再次下降至 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 蒸发速率在 16~20 个循环恢复到 $1.81 \sim 1.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。经过 20 h 的循环蒸发后, CF/NiO_x-48 h 的蒸发速率几乎没有衰减。循环试验后, 观察到 CF/NiO_x-48 h 织物表面没有盐颗粒析出(图 8b)。通过 SEM 进一步分析循环后的 CF/NiO_x-48 h 样品, 结果显示使用过的样品微观形貌与使用之前相似, 没有明显变化(图 8c)。这证实了 CF/NiO_x-48 h 具有良好的循环稳定性和抗析盐能力。

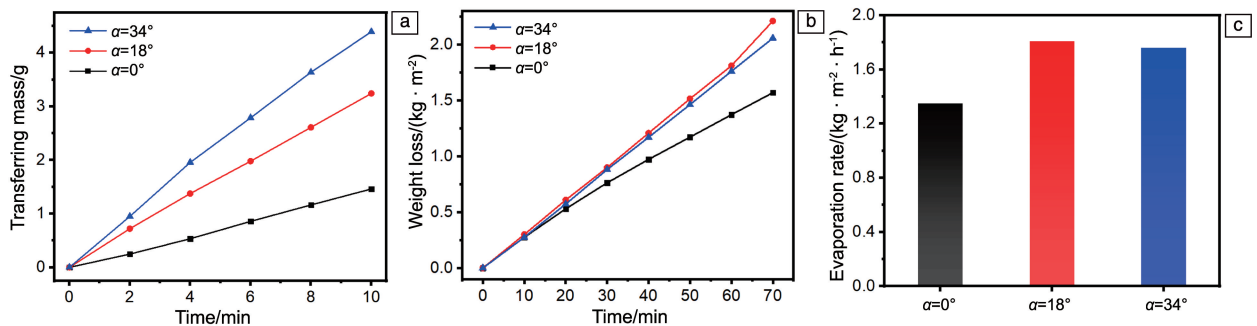


图 7 不同倾斜角度下 CF/NiO_x-48 h 织物的水传输质量(a), 质量损失(b)和蒸发速率(c)

Fig. 7 Water transferring mass (a), weight loss (b) and evaporation rate (c) of CF/NiO_x-48 h fabric at different tilt angles

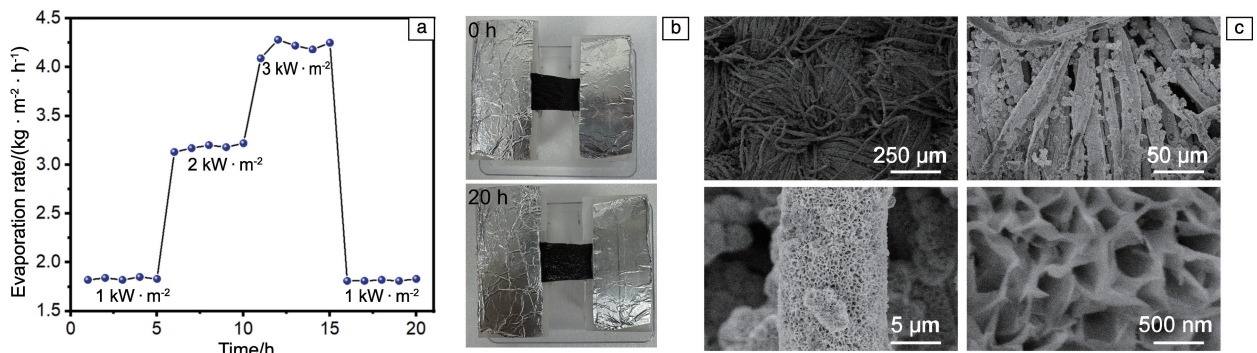


图 8 CF/NiO_x-48 h 蒸发器在不同光强下(1, 2, 3 kW · m⁻²)的循环蒸发速率曲线(a), 织物表面照片(b)及循环后的 SEM 照片(c)

Fig. 8 Cycling evaporation rate curves of CF/NiO_x-48 h evaporator under different irradiances (1, 2, 3 kW · m⁻²) (a), photos of fabric surface (b) and SEM images after cycling test (c)

为了评估 CF/NiO_x 织物的蒸发脱盐效果, 自制了一个蒸发和冷凝于一体的悬挂式太阳能海水淡化装置(图 9a)。在太阳照射下, 蒸发器产生蒸汽后在冷凝室中被冷凝成淡水。收集蒸发得到的淡水, 并采用电感耦合等离子体原子发射光谱测定了真实海水和淡水中的 4 种金属离子浓度(如 Na⁺, Mg²⁺, K⁺ 和 Ca²⁺)。在真实海水中, Na⁺、Mg²⁺、

K⁺ 和 Ca²⁺ 浓度分别为 $\sim 7.31 \times 10^3$, 5.23×10^3 , 2.41×10^3 和 $3.55 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 9b)。值得注意的是, 经过淡化后, Na⁺, Mg²⁺, K⁺ 和 Ca²⁺ 这 4 种离子的浓度分别为 0.20, 0.03, 0.13 和 0.20 mg · L⁻¹, 远低于世界卫生组织的健康饮用水标准^[39], 这证实了 CF/NiO_x 光热织物在太阳能海水淡化中的可行性。

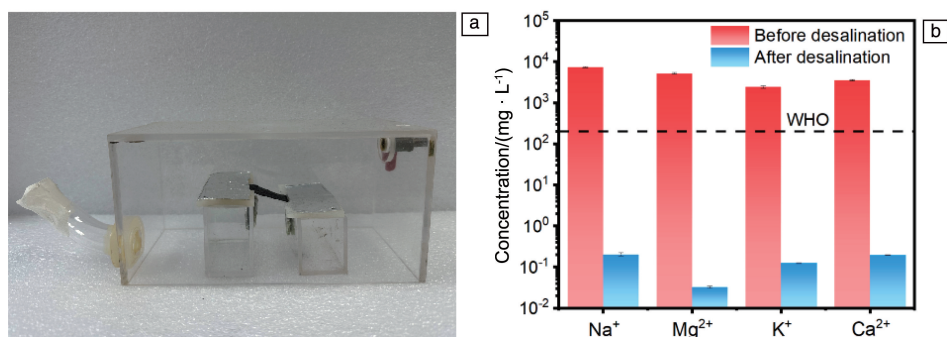


图 9 悬挂式太阳能海水淡化装置(a), 实际海水及本研究蒸馏水中的 4 种主要离子浓度(b)

Fig. 9 Suspended solar desalination device (a), four main ions concentrations in real seawater and distilled water of this report (b)

4 结 论

(1) 本研究以低成本柔性棉布 (CF) 为基底, 通过一步化学浴沉积法在其表面成功制备了具有片状结构的黑色 NiO_x。通过调控浸泡时间, 实现了 NiO_x 纳米片孔径从 0.12 到 0.47 μm 的可控调节。

(2) 由于 NiO_x 纳米片的“陷光效应”, CF/NiO_x 光热织物在 350~2500 nm 范围内表现出较强的光吸收性能, 其光吸收率高达 90.4%~96.6%。

(3) 基于 CF/NiO_x 织物的倾斜式蒸发器展现出出色的蒸发性能, 在 1 kW·m⁻² 的光强下, 蒸发速率达到了 1.69~1.84 kg·m⁻²·h⁻¹。

(4) CF/NiO_x 蒸发器经过长时间的 20 h 蒸发后, 实现了稳定抗析盐的效果。

参考文献 References

- [1] HOEKSTRA A Y. Nature Communications[J], 2014, 5: 4449.
- [2] MENACHEM E, PHILLIP W A. Science[J], 2011, 333: 712-717.
- [3] BOUSSOUGA Y A, RICHARDS B S, SCHÄFER A I. Journal of Membrane Science[J], 2021, 617: 118452.
- [4] JIANG Z, KARAN S, LIVINGSTON A G. Advanced Materials[J], 2018, 30(15): e1705973.
- [5] CHOWDHURY M R, STEFFES J, HUEY B D, et al. Science[J], 2018, 361: 682-686.
- [6] ABRAHAM J J, VASU K S, WILLIAMS C D, et al. Nature Nanotechnology[J], 2017, 12(6): 546-550.
- [7] ALKHADRA M A, GAO T, CONFORTI K M, et al. Desalination [J], 2020, 476: 114219.
- [8] KWUN L C, ANITA J H, FRANK C, et al. Advanced Materials[J], 2015, 27(17): 2791-2796.
- [9] KIM K, KIM H, LIM J H, et al. ACS Nano[J], 2016, 10(12): 11428-11433.
- [10] LI C X, CAO S J, LUTZKI J, et al. Journal of the American Chemical Society[J], 2022, 144(7): 3083-3090.
- [11] HAN J, XING W Q, YAN J, et al. Advanced Fiber Materials[J], 2022, 4(5): 1233-1245.
- [12] WU P, WU X A, WANG Y D, et al. Water Research[J], 2022, 212: 118099.
- [13] NEUMANN O, URBAN A S, DAY J, et al. ACS Nano[J], 2013, 7(1): 42-49.
- [14] ZHANG C B, YAN C, XUE Z J, et al. Small[J], 2016, 12(38): 5320-5328.
- [15] WANG X Q, OU G, WANG N, et al. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2016, 8(14): 9194-9199.
- [16] WANG Z H, LIU Y M, TAO P, et al. Small[J], 2014, 10(16): 3234-3239.
- [17] ZHAO L, YANG Q Z, GUO W, et al. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2019, 11(23): 20820-20827.
- [18] WANG J, LI Y Y, LIN D, et al. Advanced Materials[J], 2017, 29(3): 1603730.
- [19] ZHANG L B, TANG B, WU J B, et al. Advanced Materials [J], 2015, 27(33): 4889-4894.
- [20] ZHU L, SUN L, ZHANG H, et al. Nano Energy[J], 2019, 57: 842-850.
- [21] HU X Z, XU W C, ZHOU L, et al. Advanced Materials[J], 2017, 29(5): 1604031.
- [22] YANG Y, ZHAO R Q, ZHANG T F, et al. ACS Nano[J], 2018, 12(1): 829-835.
- [23] LEI Z W, SUN X T, ZHU S F, et al. Nano-Micro Letters[J], 2021, 14(1): 10.
- [24] FAN X Q, YANG Y, SHI X L, et al. Advanced Functional Materials [J], 2020, 30(52): 2007110.
- [25] LI T, LIU H, ZHAO X P, et al. Advanced Functional Materials[J], 2018, 28(16): 1707134.
- [26] GHASEMI H, NI G, MARCONNET A M, et al. Nature Communications[J], 2014, 5: 4449.
- [27] CHEN T J, XIE H, QIAO X, et al. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2020, 12(45): 50397-50405.
- [28] ZHOU L, TAN Y L, WANG J Y, et al. Nature Photonics[J], 2016, 10(6): 393-398.
- [29] LIU Z X, WU B H, ZHU B, et al. Advanced Functional Materials [J], 2019, 29(43): 1905485.

- [30] LIU Z X, ZHOU Z, WU N Y, *et al.* ACS Nano[J], 2021, 15(8): 13007–13018.
- [31] CHONG W M, MENG R R, LIU Z X, *et al.* Advanced Fiber Materials [J], 2023, 5(3): 1063–1075.
- [32] YU X B, WANG X B, ZHANG Q L, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2014, 116(7): 073508.
- [33] WANG X X, LI H F, YU X B, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2012, 101(20): 31.
- [34] SUBBIAH D K, BABU K J, DAS A, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2019, 11(22): 20045–20055.
- [35] ALHEBSHI N A, RAKHI R B, ALSHAREEF H N. Journal of Materials Chemistry A[J], 2013, 1(47): 14897–14903.
- [36] RAMANAN K K, ROHITH S, SRINIVAS S N, *et al.* Advanced Powder Technology[J], 2021, 32(11): 4343–4355.
- [37] LI Y D, RUAN Z H, HE Y Z, *et al.* International Journal of Hydrogen Energy[J], 2019, 44(2): 707–719.
- [38] LIU Y M, YU S T, FENG R, *et al.* Advanced Materials[J], 2015, 27(17): 2768–2774.
- [39] NEWMAN A. Environmental Science & Technology [J], 1993, 27(12): 2295–2297.