

分类号: TK519

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2220410111

安徽工程大学

题 目 碳纤维基光热-电热转化材料的构建及其界面水蒸发性能研究

英文并列

题 目 Construction Of Carbon Fiber Based Photothermal Electrothermal Conversion Materials And Study On Their Interface Water Evaporation Properties

学生姓名: 吴浩

校内导师: 阮芳涛(教授)

校外导师: 章劲草

专业学位类别: 材料与化工

研究方向(领域): 先进纤维及纺织印染加工技术

论文答辩日期: 2025 年 5 月 16 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期： 2025 年 5 月 16 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

吴浩

日期：2025 年 5 月 16 日

指导教师签名：

陈芳洪

日期：2025 年 5 月 16 日

碳纤维基光热-电热转化材料的构建及其界面水蒸发性能研究

摘 要

水资源短缺已成为全球面临的重大问题之一，特别是在干旱和半干旱地区，水资源的匮乏影响了人们的生活质量和社会经济发展。为了应对这一挑战，海水淡化和废水处理技术的开发备受关注，其中太阳能驱动的界面蒸发技术(SDIWE)因其低能耗和高效性成为研究的热点。然而，现有的界面蒸发器大多使用传统材料，仍存在效率较低和材料耐用性差等问题。因此，开发新型高效、环保的光热-电热材料，以提升界面蒸发器的性能，是当前亟待解决的关键问题。

本论文基于碳纤维(CF)具有出色的宽带光吸收和良好的导热、导电性，以及天然苧麻纤维的良好导水性。以 CF 为水蒸发层，采用湿法铺网以及层压结合的方式来制备，并通过对苧麻非织造布进行 Janus 改性制备导水层，构建碳纤维基界面蒸发器，研究其水蒸发性能，并通过施加电压以及对 CF 改性的方式来提高其界面蒸发能力，达到一种光电耦合的效果，对蒸发器的蒸发性能以及海水、染料废水等的处理效果进行研究，主要研究内容如下：

(1) 本文通过选取回收废弃碳纤维，将其制备成粉体和纤维毡的形式用作光热层，通过两种不同的非织造布作为导水层，并对其做出 Janus 改性。研究结果表明回收碳纤维用作光热层能够有效的提高水的蒸发速率，由于

碳纤维粉的堆叠结构通过增加蒸发面积提高了蒸发效率，显示出显著的性能优势，蒸发速率可以达到 $1.56 \text{ kg m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，在 8 h 的循环测试中，蒸发效率维持在 $1.5 \text{ kg m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，证明其长期稳定工作性能。最后通过对两种样品两端施加电压，发现碳纤毡表现出更好的电热性能。

(2) 基于上述研究，为了进一步提升样品的蒸发效率，采用光电耦合的界面蒸发形式以及对碳纤维毡样品进行聚合物改性的方式，提升其光热以及电热性能。研究发现聚合物改性方法显著改善了碳纤维的导电性、机械强度及光热性能，聚多巴胺改性碳纤维(CF-PDA)的蒸发速率比 CF 提升了约 20%，而聚吡咯改性碳纤维(CF-PPy)的蒸发速率比 CF 提升了 52%。在电热以及光电耦合条件下，CF-PPy 的蒸发效率也达到最高，分别为 $3.20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 以及 $5.36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。改性以及施加电压的方法给界面蒸发器带来了在实际场景应用的更大的可能性。

(3) 基于上述研究中的 CF-PPy 组，针对其具体实际中的应用进行研究，探究了其在海水淡化、染料废水净化和水质改善等领域的应用潜力，特别是在太阳能驱动的光电耦合界面蒸发中表现出的高效性和稳定性。实验结果表明，CF-PPy 蒸发器在不同水质环境中均表现出优异的蒸发性能，以及水处理效果。并且在搭建的户外蒸发器件也能够平稳的进行水蒸发实验，为全球水资源的可持续利用提供更为高效和经济的解决方案。

关键词：回收碳纤维；界面水蒸发；光电耦合；蒸发效率；水处理

CONSTRUCTION OF CARBON FIBER BASED PHOTOTHERMAL ELECTROTHERMAL CONVERSION MATERIALS AND STUDY ON THEIR INTERFACE WATER EVAPORATION PROPERTIES

ABSTRACT

Water scarcity has become one of the major issues facing the world, especially in arid and semi-arid regions, where it affects people's quality of life and socio-economic development. To address this challenge, the development of seawater desalination and wastewater treatment technologies has attracted much attention, among which solar driven interface evaporation technology (SDIWE) has become a research hotspot due to its low energy consumption and high efficiency. However, most existing interface evaporators use traditional materials, which still have problems such as low efficiency and poor material durability. Therefore, developing new efficient and environmentally friendly photothermal electric heating materials to improve the performance of interface evaporators is a key issue that urgently needs to be addressed.

This paper is based on the excellent broadband light absorption and good thermal and electrical conductivity of carbon fiber (CF), as well as the good water conductivity of natural ramie fiber. Using CF as the water evaporation layer, a wet laid mesh and laminated combination method were used to prepare it, and a water

conducting layer was prepared by Janus modification of ramie non-woven fabric to construct a carbon fiber based interface evaporator. The water evaporation performance was studied, and the interface evaporation ability was improved by applying voltage and modifying CF to achieve a photoelectric coupling effect. The evaporation performance of the evaporator and the treatment effect of seawater, dye wastewater, etc. were studied. The main research contents are as follows:

(1) This article selects recycled carbon fiber and prepares it into powder and fiber felt forms for use as a photothermal layer. Two different non-woven fabrics are used as the water conducting layer, and Janus modification is made on them. The research results indicate that recycling carbon fiber as a photothermal layer can effectively improve the evaporation rate of water. Due to the stacked structure of carbon fiber powder, the evaporation efficiency is improved by increasing the evaporation area, showing significant performance advantages. The evaporation rate can reach $1.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. In the 8-hour cycle test, the evaporation efficiency was maintained at $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, proving its long-term stable working performance. Finally, by applying voltage to both ends of the two samples, it was found that carbon fiber felt exhibited better electrical heating performance.

(2) Based on the above research, in order to further improve the evaporation efficiency of the sample, a photoelectric coupling interface evaporation form and polymer modification of the carbon fiber felt sample were adopted to enhance its photothermal and electrothermal properties. Research has found that polymer modification methods significantly improve the conductivity, mechanical strength,

and photothermal properties of carbon fibers. The evaporation rate of polydopamine modified carbon fibers (CF-PDA) increased by about 20% compared to CF, while the evaporation rate of polypyrrole modified carbon fibers (CF-PPy) increased by 52% compared to CF. Under the conditions of electric heating and photoelectric coupling, the evaporation efficiency of CF-PPy also reached the highest, which were $3.20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ and $5.36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. The methods of modification and voltage application have brought greater possibilities for the practical application of interface evaporators.

(3) Based on the CF-PPy group in the above research, the specific practical applications were studied to explore its potential in fields such as seawater desalination, dye wastewater purification, and water quality improvement, especially its high efficiency and stability in solar driven optoelectronic coupling interface evaporation. The experimental results show that CF-PPy evaporator exhibits excellent evaporation performance and water treatment effect in different water quality environments. And the outdoor evaporation devices built can also smoothly conduct water evaporation experiments, providing a more efficient and economical solution for the sustainable utilization of global water resources.

WU Hao(Material and Chemical)

Supervised by RUAN Fangtao

KEY WORDS: Recycling carbon fiber; Interface water evaporation; Photoelectric coupling; Evaporation efficiency; water treatment

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 界面光热蒸发转化的发展	1
1.3 碳纤维在界面蒸发上的应用	4
1.3.1 碳纤维在光热转化界面蒸发上的应用	4
1.3.2 碳纤维在光电耦合界面蒸发上的应用	9
1.4 本文主要研究目的、研究内容及创新之处.....	13
1.4.1 研究目的	13
1.4.2 研究内容	14
第 2 章 实验部分.....	16
2.1 实验原料与实验仪器	16
2.2 式样制备	17
2.2.1 Janus 织物的制备	17
2.2.2 回收碳纤维界面蒸发器的制备	17
2.2.3 碳纤维毡的制备	19
2.2.4 聚吡咯改性	19
2.2.5 聚多巴胺改性	19
2.2.6 界面蒸发器件的组装	20
2.3 结构测试及性能表征	20
第 3 章 回收碳纤维和 Janus 织物在界面蒸发中的研究	22
3.1 引言	22
3.2 结果与讨论	23
3.2.1 Janus 织物导水层改性分析	23
3.2.2 导水层种类对蒸发速率的影响	23

3.2.3 不同光热层的表征及其光热性能	24
3.2.4 不同光热层对蒸发速率的影响	25
3.2.5 基于回收碳纤维的蒸发器的耐久性测试	26
3.2.6 电热在碳纤维样品中的研究	26
3.3 本章小结.....	27
第 4 章 改性碳纤维毡的光电耦合在界面蒸发的研究	29
4.1 引言	29
4.2 结果与讨论	29
4.2.1 不同电压对碳纤维毡的电热性能探究	29
4.2.2 PPy 改性及其力学性能的研究	30
4.2.3 PDA 改性及其力学性能研究	33
4.2.4 改性对碳纤维毡的光热性能研究	36
4.2.5 改性碳纤维毡的电热性能探究	38
4.2.6 光电耦合界面蒸发器的光电性能研究	39
4.3 本章小节	41
第 5 章 改性碳纤维毡的光电耦合在界面蒸发应用中的研究	42
5.1 引言	42
5.2 结果与讨论	43
5.2.1 界面蒸发器的抗盐性	43
5.2.2 界面蒸发器的稳定性	44
5.2.3 染料废水净化	45
5.2.4 模拟海水处理及水质检测	46
5.2.5 界面蒸发器的户外蒸发测试	47
5.3 本章小节	48
第 6 章 总结与展望.....	50
6.1 结论	50
6.2 创新点	51
6.3 展望	51
参考文献.....	53

攻读学位期间发表论文和获奖情况.....	60
致谢.....	61

第 1 章 绪论

1.1 引言

水资源匮乏已经成为 21 世纪备受关注的环境问题。据估计,到 2025 年,全球 75% 的人口将面临缺水问题,超过 50% 的国家将陷入的淡水短缺的困境。此外,水资源分布极不平衡,淡水资源占全球水资源的 2.7%,而海水占总资源的 97.3%^[1,2]。目前,海水淡化有多种传统方法,如反渗透(RO)^[3]、多级闪蒸(MSF)^[4]、多效蒸馏(MED)^[5]、电渗析(ED)^[6]和膜蒸馏(MD)^[7]等,这些方法存在能耗高、成本高的问题,并且在使用过程中会产生 CO₂,加剧温室效应^[8,9]。相比之下,太阳能作为一种可再生清洁能源,具有更高的可持续性,其到达地球表面的总能量只有 0.1%,但却能够在一年内满足全球能源需求^[10]。近年来,低能耗、环保、低资本投入的太阳能驱动界面蒸发技术受到多方关注^[11,12]。

随着绿色发展理念的提出与普及,太阳能作为一种清洁、安全的绿色能源,为海水淡化技术带来了新的发展契机。太阳能被认为是所有可再生能源中最丰富的能源,被地球拦截的太阳发射的能量约为 1.8×10^{14} 千瓦。60% 的总能量到达地球表面,其余的被反射回太空。到目前为止,太阳能的应用已经涵盖了太阳能发电、光催化、光伏电池等各个领域。开发丰富的太阳能是实现全球资源可持续发展的有效战略。然而,太阳能光热转化是利用太阳能的重要途径。太阳能光热转化技术已被应用于医疗消毒或灭菌^[13-17]、污水处理^[18-22]、光热治疗^[23-27]以及淡水生产^[28-32]等领域。而太阳能海水淡化技术,即利用光能淡化海水,作为新兴的海水淡化技术由于节约能源、环境友好型以及得到的淡水纯度高等优点而受到广泛的关注。

1.2 界面光热蒸发转化的发展

太阳能转化为热能是界面太阳能产蒸汽的关键步骤之一。当太阳光辐射到界面蒸发器件表面时,其中一部分太阳光由于在器件中发生透射和反射而损失,而另一部分太阳光被蒸发器件的光热转换材料所吸收将其转换为热能。因此光热转换材料作为光热转换的重要衔接点对于界面蒸发器件的使用具有重要意义。通过选择合适的光热转换材料来减少太阳光的透射和反射,太阳能驱动界面产蒸汽器件的光吸收率和光热转换性能可以有效改善,进而提升器件的蒸发性能。理想的光热转换材料应具有较宽的太阳光吸收光谱(250-2500 nm)、出色的光吸收能力(>90%)、低成本和低热辐射^[33]。最新研究表明以下几类材料被定义为光热转化材料的有前途的候选者,包括半导体材料、高分子聚合物、碳基材料和金属等离子体材料。

(一) 半导体材料

本征吸收是半导体材料实现光热转换的内部机制^[34]。如图 1-1 所示,当半导体原子

外层的价电子吸收足够的光子能量时，产生光生载流子，并将能量传递给晶格。因此，当光生成的载流子与晶格相互作用时，就会产生热量^[35]。光产生的载流子是电子-空穴对，原子外层的价电子通过带隙跃迁成为自由电子。然后在电子的原始位置形成一个空穴。多余的能量以声子的形式释放，当光产生的载流子放松到能带边缘时，声子转化为热量。因此，窄带隙的半导体可以产生更多的光子，具有更好的光热转换性能^[36]。Ren 等人^[37]以碳化木材为基材，在其上装饰 TiO_2 和 TiN 纳米颗粒，扩大了对太阳辐射的吸收面。蒸发器可吸收 97.42% 的太阳辐射，1 个太阳下蒸发速率可达 $1.525 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Zhu 等人^[38]在铜上氧化大量类似万金菊的氧化铜纳米花，并通过聚多巴胺(PDA)的自聚合将普鲁士蓝(PB)纳米粒子附着在氧化铜表面，制成超亲水性太阳能蒸发器($\text{CuO}@\text{PDA}/\text{PB}$)。 CuO 在紫外和可见光光谱区具有较高的吸收率，PDA 在红外光谱区具有较高的光吸收能力。因此，复合材料在全光谱中的吸收率可达 95%。此外，PB 具有极好的生物相容性，对印染废水中的有机染料具有很好的吸附和光催化降解能力。

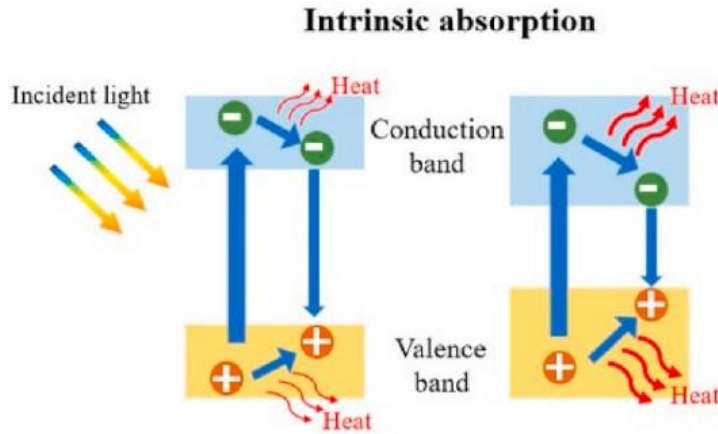


图 1-1 半导体材料实现光热转化的机理

Fig.1-1 The mechanism of photothermal conversion in semiconductor materials

(二) 高分子聚合物

高分子聚合物材料的光热转化机理如图 1-2 所示，被激发的电子从最低的未占据分子轨道(LUMO)返回到最高的已占据分子轨道(HOMO)时会释放热量。高分子材料通过晶格热振动实现光热转换^[39]。Zou 等人^[40]用精氨酸修饰聚多巴胺制备的 APDA 涂层具有更好的光吸收和热转化效果。在原木上使用 APDA 涂层制作双层结构的高效太阳能蒸发器。该 PDA 涂层具有可生物降解的优点。他们的 APDA 涂层比 PDA 涂层具有更好的光吸收和光热转换性能。实验中 APDA-log 复合材料在 1 个太阳强度下的产汽效率达到 77%，系统循环 100 次后仍保持稳定。Guo 等人^[41]制备了一种用于太阳能驱动界面蒸发的可调谐超高分子量聚乙烯双峰多孔膜。通过优化设计多孔结构、CNTs 和 PDA 的分布来调控双峰多孔膜，同时实现高光吸收、优异的光热转化率和长期蒸发过程中优异的蒸汽生成效率。通过结构观测和太阳蒸汽生成实验，证明了双峰多孔结构在 SISG 系统中的优势，实现了高效的能量转换和蒸汽生成。

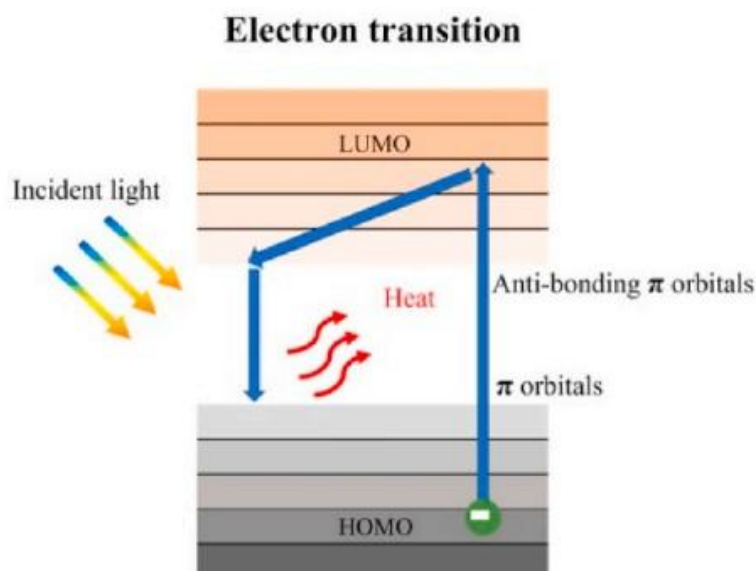


图 1-2 碳基材料和高分子聚合物的光热转化机理

Fig.1-2 The photothermal conversion mechanism of carbon based materials and polymer materials

(三) 碳基材料

碳基材料的光热转化机理与高分子聚合物材料相似，碳基材料对近红外光具有很强的吸收能力。在太阳照射下，碳基材料会产生共轭效应^[42]。由于共轭体系中原子间的相互作用，共轭体系中的取代基使每个键的电子云密度发生变化。如图 1-2 所示，C-H、C-C、 σ -键的电子与非成键 p 轨道、反成键 π 轨道或满 π 轨道相互作用，产生超共轭效应^[39]。在碳基材料中共轭效应最大的 π - π 体系中，当波长满足分子中电子跃迁的条件时，成键分子轨道上的 π 电子跃迁到 π 反键分子轨道上。受激电子从高激发态返回基态时，会释放热量，引起原子晶格振动，导致碳基材料温度升高，实现光热转换^[43]。石墨烯泡沫结构能够吸收任何角度的太阳辐射，减少光反射。石墨烯泡沫轻而稳定，光热蒸汽转化率达 91.4%，是理想的便携式蒸发器材料。Zhou^[44]等人通过过滤将氧化石墨烯和纤维素结合制成 Janus 膜。蒸发器不仅没有明显的盐分积累，而且能有效去除水中的金属离子。在一个太阳下，系统的蒸发速率达到 $1.525 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Kim^[45]等人使用激光诱导光热方法获得 HPGC(分层多孔石墨烯)和聚合物泡沫的柔性 MBS(单片双层片)。疏水多孔石墨烯表现出与亲水性多孔聚酰亚胺相反的表面性质。蒸发器通过毛细管效应将水分输送到光热层，防止了盐在 HPGC 中的积累。MBS 具有隔热作用，并将热量锁定在 HPGC 上。HPGC 的吸收光谱很宽，在吸收过程中产生共轭效应，太阳辐射在石墨烯的微孔中被多次反射并被多次吸收。

(四) 金属等离子体材料

局域表面等离子体共振(LSPR)的光热效应是金属纳米颗粒光热转化的内部机制^[46]。如图 1-3 所示，当太阳辐射照射在金属纳米颗粒表面时，入射光的频率与具有强消光效应的金属纳米颗粒中自由电子的共振频率相匹配，产生等离子体共振。消光效应是指金属纳米粒子对光的吸收和散射。小金属纳米颗粒的消光作用主要是吸附，大金属纳米颗粒的消光作用主要是散射。光吸收越多，局部表面等离子体共振越强。光子能量被金属

纳米粒子吸收或散射,其中吸收的能量主要以热的形式释放,产生光热效应^[47]。简而言之,入射光的电磁场驱动金属纳米粒子中的自由电子集体振荡产生热量。金、银、铜、铂等金属纳米粒子具有极好的光吸收能力。Sun 等人^[48]发现在 1300~2400 nm 波长范围内,Ag NPs 的光吸收率达到 90%。Ag NPs 溶解在琼脂糖凝胶(Ag)中,采用聚对苯乙烯磺酸钠(PSS)对银纳米粒子表面进行处理,防止盐的积累。利用 LSPR 效应实现光热转换。Ag NPs/PSS/Ag 在全波长光谱上也有较好的吸收效果。金属纳米颗粒辅助的其他光热材料也有效地促进了光热转化。

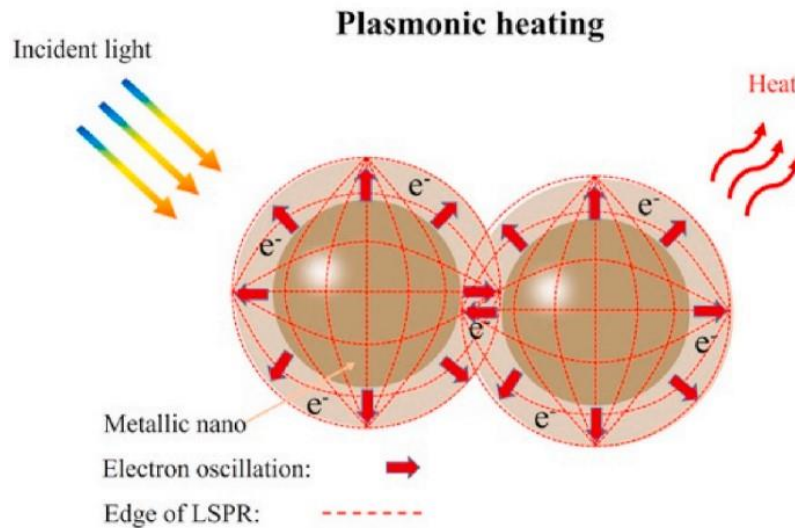


图 1-3 描述金属纳米粒子光热转化机理的示意图

Fig.1-3 Schematic diagram describing the photothermal conversion mechanism of metal nanoparticles

1.3 碳纤维在界面蒸发上的应用

1.3.1 碳纤维在光热转化界面蒸发上的应用

碳纤维具有宽带光吸收和良好的导热性,但其光滑而致密的表面结构以及低表面能会抑制光吸收和水传输^[49],单独使用碳纤维织物作为界面光热材料时,其水蒸发效率并不高。为提高其水蒸发效率,可以采用与吸水性强的纱线进行织造或经过后处理等方式来增加碳纤维织物的亲水性^[50]。

针对碳纤维表面结果及低表面能的问题, Li 等^[51]利用表面改性的方法用葡萄糖溶液中的水热碳化制备了 CF 表面的多尺度热液碳层,该方法成功的将羧基、羰基和羟基等极性官能团引入 CF 表面如图 1-4 所示,制备了基于碳纤维、水热碳化改性的超坚固太阳能蒸汽发生器,用于高效净化多介质系统,很好的改进了碳纤维的润湿性。由于引入了分级碳涂层,改性的碳纤维还表现出优异的机械强度(4.77 GPa)、改善的表面积和优异的光吸收率(93%)。编织物可以依靠极性碳纤维之间的毛细作用力自行泵送水分。经二甲基乙酰胺(DMAc)和浓盐水腐蚀 10 天后,碳纤维长丝的抗拉强度超稳定。编织碳纤维织物可从模拟死海水中以每天 5.4 kg/m² 的速度生产淡水。

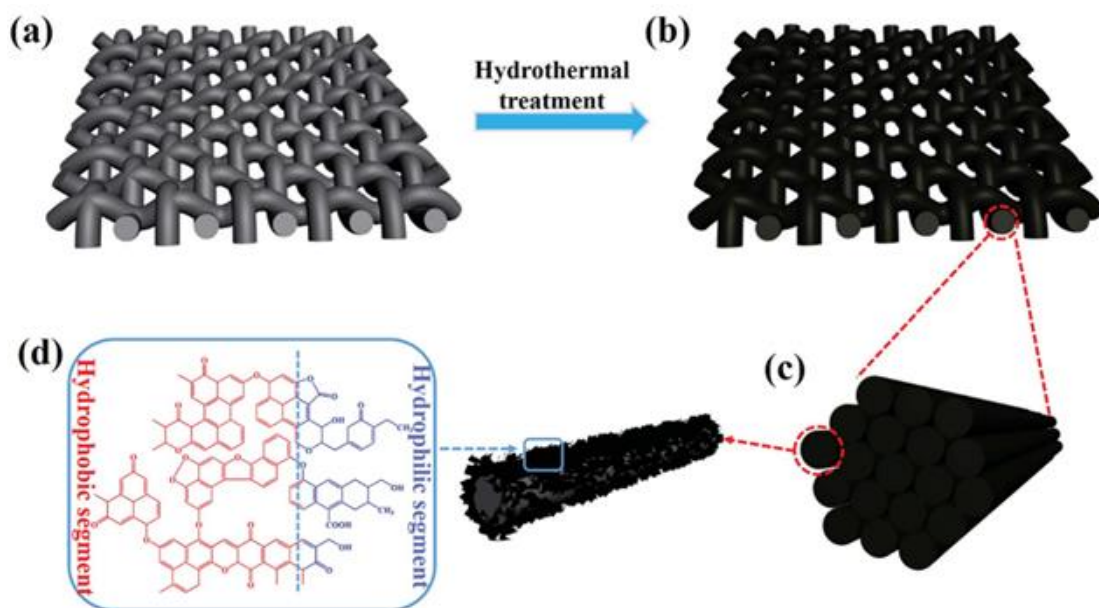


图 1-4 碳纤维表面改性示意图(a)原始碳纤维(b)和(c)水热处理改性的碳纤维(d)来源于葡萄糖的不溶性互键芳香族两亲性大分子^[51]

Fig.1-4 Schematic diagram of surface modification of carbon fiber (a) Original carbon fiber (b) and (c) Carbon fiber modified by hydrothermal treatment (d) Insoluble intermolecular aromatic amphiphilic macromolecules derived from glucose^[51]

自然界的生物对于人类的启发是巨大的，很多时候人们所困惑的问题都能在在自然界寻求到答案。自然界植物对于减少水份损失或增加吸水，水份收集有其独特的结构设计。为了解决光热材料表面水的供需平衡这一问题，Bu 等^[10]运用仿生结构以荷叶为灵感，来控制水传输通道，合理设计了三维锥形蒸发器，如图 1-5(a)所示，在不使用外部装置控制供水的情况下，通过巧妙地改变支路(棉棒)的数量来调节供水量和蒸发速率，使用简单的传统篮编织术，无需任何化学处理或复杂的设备，具有时间，成本效益和环境友好的优点。三维锥形结构的设计使所制备的蒸发器通过多次反射具有优异的集光性能。在一次太阳光照下，优化后的蒸发器的蒸发速率高达 $3.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，光热转换效率为 194.4%。并且蒸发器具有耐用和稳定的太阳能蒸汽产生，出色的废水(含酸，碱或有机染料)纯度、阳离子和盐水淡化性能。Zhao 等^[52]也使用简单的仿生结构，利用一种由几种碳纤维束(CFB)和穿孔木材组成的植物启发装置，垂直 CFB 可以实现宽带高效的光吸收，碳纤维之间微通道的毛细管力可以有效地供水。穿孔的木材将 CFB 固定在适当的位置，木材的浮力使整个蒸发器漂浮，如图 1-5(b)所示。调整细度 CFB 的高度可以控制蒸汽产生速率。在模拟一个太阳光照的实验中，优化的植物启发装置的蒸发率能够稳定在 $1.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，并且可以有效地避免了模拟海水蒸发(3.5%NaCl 溶液)长时间的盐结晶。由于碳纤维和木材的天然特性，该装置表现出了极高的化学稳定性。

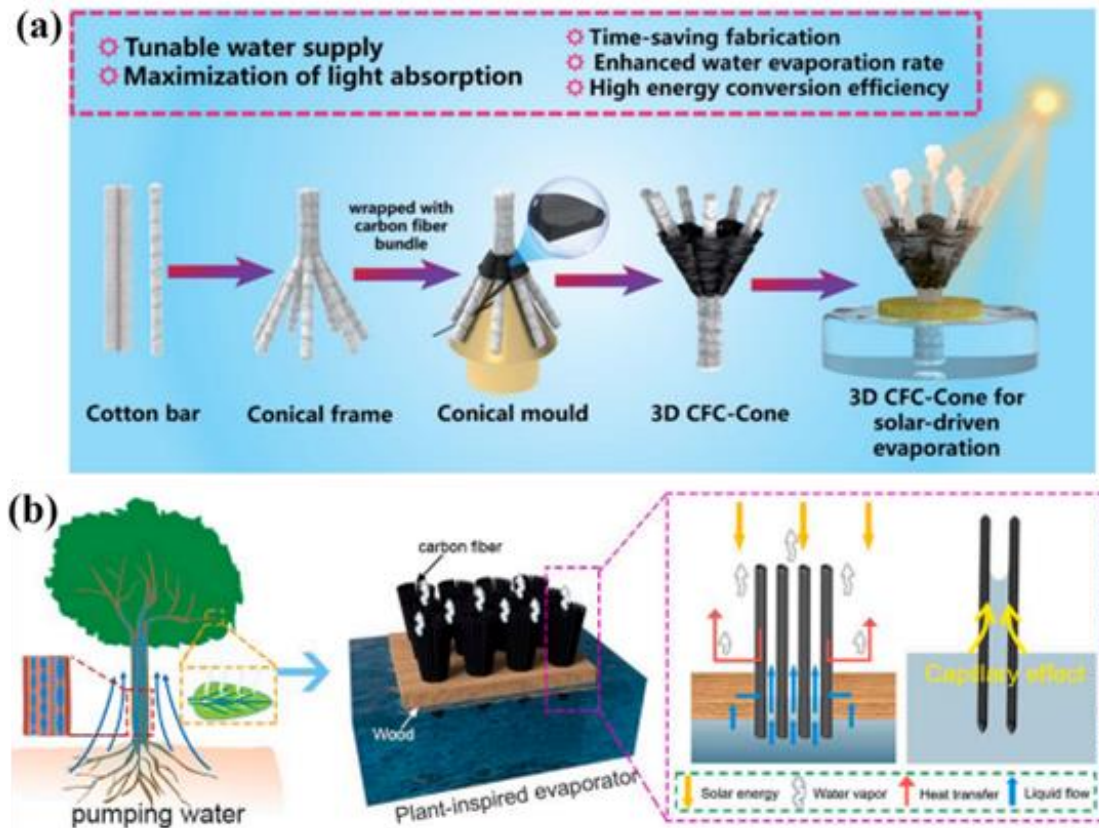


图 1-5 仿生结构在蒸发器中的应用(a)利用棉棒仿生荷叶结构^[10] (b)碳纤维束仿生植物蒸发系统^[52]

Fig.1-5 Application of biomimetic structures in evaporators (a) using cotton swabs to mimic lotus leaf structures ^[10] (b) carbon fiber bundles to mimic plant evaporation systems ^[52]

和单独使用碳纤维用作光热材料对比,在碳纤维表面生长出其他增强光热材料可以起到协同增强光热转化的效果。Ji 等^[53]设计了一种在 CF 表面生长金属(Au、Ag 和 Cu)纳米粒子(NPs)的简单方法,利用金属(NP)和 CF 结合起来增强光热转化的简单方法及其在析水中的应用,并研究了其光热转换如图 1-6(a)所示。金属 NPs/CFs 的吸光度和 CFs 非常接近,但光热驱动的水蒸发速率截然不同。AuNPs/CFs 的蒸发率高达 $9.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 高于 Ag-NP/CFs($8.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), Cu-NPs/CFs($7.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), 和 CF($7.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)。在证实了水的演化取决于辐射密度和热局部化之后,局部表面等离子体共振效应被认为在为光热转换提供新的途径并加速光热转换方面发挥了关键作用。因此,该简单的方法为加强太阳能蒸汽发电探索提供了一条简单的途径。Liu 等^[54]通过原位生长的方法将碳纳米管(CNT)在 CF 上生长,以形成用于光热转换应用的器件如图 1-6(b)所示。相比较 CF, CFs/CNTs 对于可见光到近红外光的吸收范围有增强。光热转化特性表明,生长的 CNT 促进了更高的表面温度,在 10 次太阳照射下,最高温度达到约 325°C 。在 1 次太阳照射下,CFs/CNTs 上的水分蒸发量为 $1.40 \pm 0.03 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。水蒸发实验证明,所制备的碳纳米管/碳纳米管具有优异的光热转换应用能力。并且具备吸附染料或重阳离子溶液的潜力。

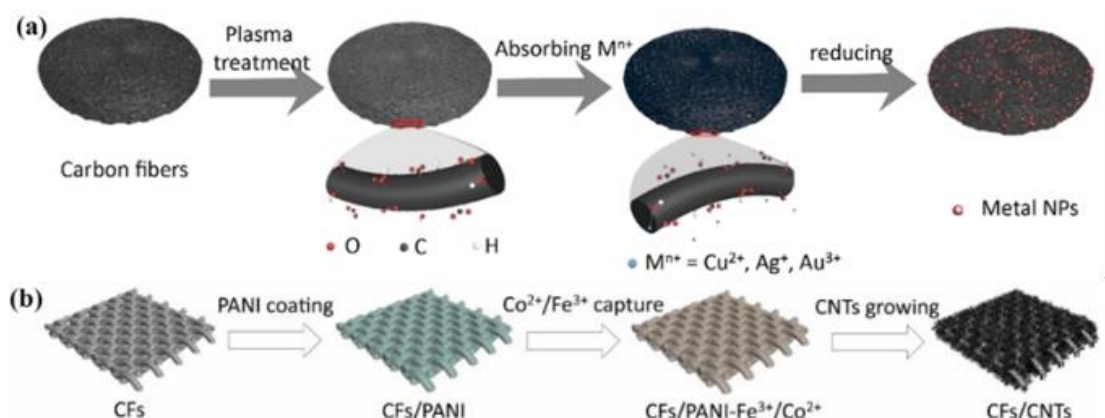


图 1-6 碳纤维上生长其他光热材料(a) Cu NPs/CFs 的制备示意图^[53] (b) CFs/CNTs 的制备示意图^[54]

Fig.1-6 Growth of other photothermal materials on carbon fibers (a) Schematic diagram of Cu NPs/CFs preparation ^[53] (b) Schematic diagram of CFs/CNTs preparation ^[54]

当单层织物被深度研究之后，研究人员考虑到多级结构对于太阳能驱动界面蒸发系统可能有着更加积极的影响，其每一层都起着其特殊的作用，环环相扣，相辅相成从而达到共同促进水蒸发的效果。

于是 Tong 等^[49]通过一种基于改性 CF 织物多层太阳能驱动的界面水蒸发装置并演示其阳光吸收能力、光热转换效率，以及太阳能驱动的水蒸发率如图 1-7 所示。受益于多层具有高孔隙率和全碳成分的结构，宽带基于多层 CF 织物的蒸发器的光吸收可以在 300~2500 nm 的波长范围内达到 97%。分层的蜂窝结构还确保了充足的供水和卓越的热管理。在 1 次太阳照射下，蒸发率可达到 $3.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，具有光热转换效率为 93.41%~96.69%。此外，在 20 wt% 高浓度盐水中也有着良好的耐盐性能和稳定性。这些都表明多层 CF 织物的蒸发器会在解决海水淡化、污水处理、淡水生产和太阳能利用方面发挥更关键的作用。

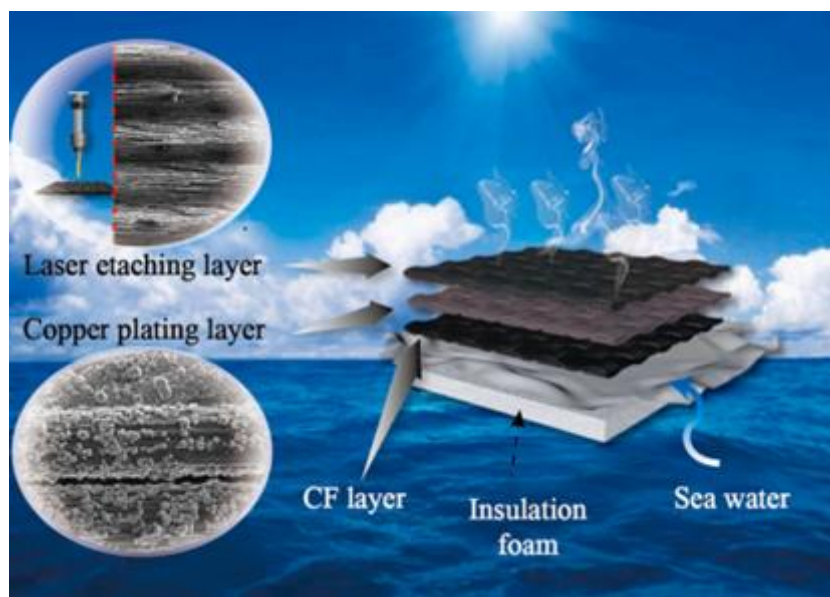


图 1-7 多层 CF 驱动蒸发器件^[49]

Fig.1-7 Multi layer CF driven evaporation device^[49]

相比较织物,薄膜有着轻质高强的优点,并且有着良好的耐腐蚀性,可以在水面上长时间存在,还有着良好的尺寸稳定性,不容易受到拉伸、压缩或变形的影响。Wu 等^[55]采用喷雾、速剪和下沉的方法,设计了一种独特的三维自浮梯度复合膜。在这项研究中,一种自浮聚偏二氟乙烯/多壁碳纳米管@聚多巴胺碳纤维/聚苯硫化物(PVDF/MWCNTs@PDA-CF/PPS)太阳能蒸发膜,其由疏水性 PVDF/MWCNTs 组成层和具有亲水性三维梯度结构的 PDA 改性的 CF/PPS 纤维基材组成如图 1-8(a)所示。最上方涂有疏水性太阳能吸收涂层,以确保热量集中在光热层中。下部是独特的三维梯度供水结构,它不仅有一个隔热的水道,而且可以连续供水,这也将限制光热层接触大量水,减少了热损失。PVDF/MWCNTs@PDA-CF/PPS 具有较高的蒸发效率($1.24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。这种结构设计将为全球海水淡化淡水短缺提供了一个有前景的解决方案。而普通的蒸发器有着沉积盐分的缺点,对此 Chong 等^[56]使用疏水工业级碳纤维膜(CFM)用聚多巴胺(PDA)对具有良好光吸收性能的 CFM 进行表面改性,制备超亲水性 CFM@PDA,用于建造有效的悬挂式无盐蒸发器。通过多巴胺的简单自聚合实现 PDA 在 CFM 上的涂层,并且 CFM@PDA 表现出 96.7%的高太阳吸收效率、良好的光热效应和超亲水性,尤其是当 CFM@PDA 介于两个水箱(一个装有海水,另一个是空的)的悬挂式蒸发器中如图 1-8(b)所示,它的吸水率是 26.35 g/h ,是商品棉(7.28 g/h)的 3.6 倍。在模拟阳光下(1.0 kW m^{-2})CFM@PDA 显示出 $1.79 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高蒸发率,太阳能蒸发效率为 92.6%。即使使用高浓度(21.0 wt%)的 NaCl 溶液进行蒸发 CFM@PDA 可以保留在长时间试验(8 h)期间,蒸发率高(约 $1.80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$),没有盐分积累。因此,本研究不仅证明了超亲水性的简单制备方法 CFM@PDA,也促进了悬挂式蒸发器在连续蒸发中的进一步实际应用无盐脱盐。

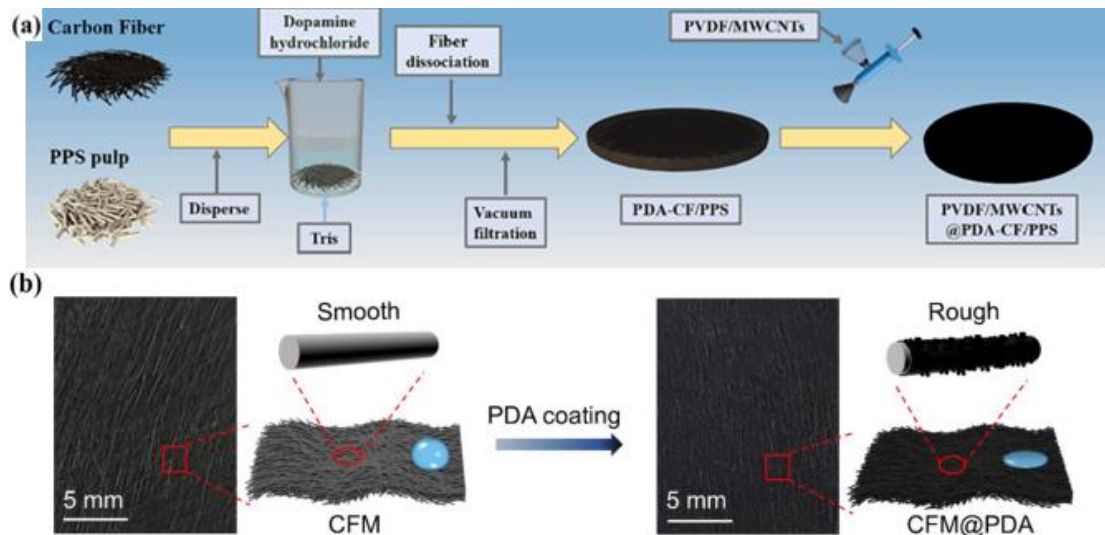


图 1-8 碳纤维膜蒸发器(a) PVDF/MWCNTs@PDA-CF/PPS 复合膜的制备^[55](b) CFM 上 PDA 镀膜工艺示意图^[56]

Fig.1-8 Carbon fiber membrane evaporator (a) PVDF/MWCNTs@PDA-CF/PPS composite film^[55] (b) Schematic diagram of PDA coating process on CFM^[56]

随着碳纤维在生活中越来越多的应用,大量的碳纤维被废弃,所以回收碳纤维也

就显得十分重要,而机器回收的碳纤维一般为短纤维,不适合用于结构部件的生产,但是完全可以应用与制备太阳能蒸发器件。Wu 等^[57]通过对短纤维碳织物进行熔敷,使其具有疏水性和涂层,制备了 Janus 膜,底层用亲水性聚氨酯形成不对称润湿性。还用了相位反转法,用于制备多孔 Janus 膜。在这种设计中,Janus 膜的亲水侧是用于朝向水边,通过毛细管作用将水从主体泵送到蒸发区域,同时用于热管理,而疏水层被用于空气侧以蒸发水。随后研究了所开发的 Janus 膜的光热转化和水蒸发特性。结果表明,开发的短纤维碳织物涂覆在亲水性聚氨酯 Janus 膜(SCF @wPU)上,在 1 个太阳光照下表现出约 67%的水分蒸发效率。聚氨酯的亲水性和孔隙率在促进水的运输方面发挥了重要作用,进一步促进了水的有效蒸发。Janus 膜表现出卓越的循环稳定性,并且表现出比现有的水蒸发器在 1 个太阳光照下更好的水蒸发性能。总体而言,预计它将在环境修复中发挥作用,以及特别是在水蒸发方面。Wan 等^[58]使用碳纤维粉末和聚二甲基硅氧烷等原料,采用简便的喷雾法制备了纸基超疏水材料,如图 1-9 所示。所得材料具有优异的耐液性和自清洁性能,其接触角达到 155°。此外,它还表现出良好的光热转换特性,在太阳能光强度下,表面温度稳定在 73.4 °C,蒸发速率高达 $1.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,具有良好的水蒸发性能。研究还表明,该功能涂层策略具有出色的自除冰性能,在太阳光照下,除冰时间比未处理表面缩短了 120 秒。适应性测试显示,这种功能涂层策略也适用于其他纤维基材料(涂布纸、牛皮纸、无纺布、泡桐单板等)。此类超疏水材料在防水包装老化、除冰材料、水蒸发材料等领域具有广阔的应用前景。

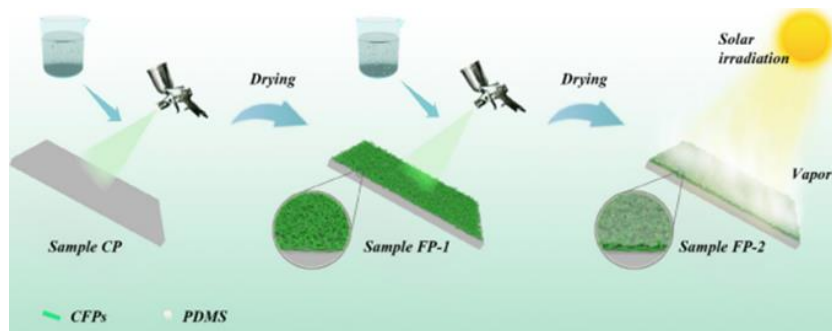


图 1-9 使用碳纤维粉制备具有光热转换特性的柔性仿生材料示意图^[58]

Fig.1-9 Schematic diagram of preparing flexible biomimetic materials with photothermal conversion properties using carbon fiber powder ^[58]

1.3.2 碳纤维在光电耦合界面蒸发上的应用

电热是目前应用最为广泛的加热形式之一,电热元件是加热设备的供热部件。碳纤维作为一种高性能纤维,其电热性能非常优异^[59]。但是碳纤维复合材料的电导特性在纵向、横向和厚度方向均不同,呈明显的电各向异性^[60],这主要是由于碳纤维在其中的排列方式所导致。

国内关于碳纤维电热纸的研究始于 2000 年,Yang 等^[61]以聚丙烯腈基碳纤维制成电热纸,研究碳纤维电热纸分别与热固性树脂、柔性橡胶层压制成面状发热板的电热性能包括电阻-温度特性、功率密度-表面温度关系。Li 等^[62]在交联的海藻酸钠(SA)网络的辅

助下, 将商业碳纤维(CF)束嵌入富马酸铝金属有机框架工程(MOF)整料中, 得到具有同轴结构的圆柱 CF/Al-富马酸盐/SA(CAS)整料。在施加电力时, 嵌入的 CF 可以在 CAS 基体内以异常高的电热转换效率快速产生巨大的局部电加热(LEH), 证明了碳纤维在电热上有很大的应用潜力如图 1-10 所示。

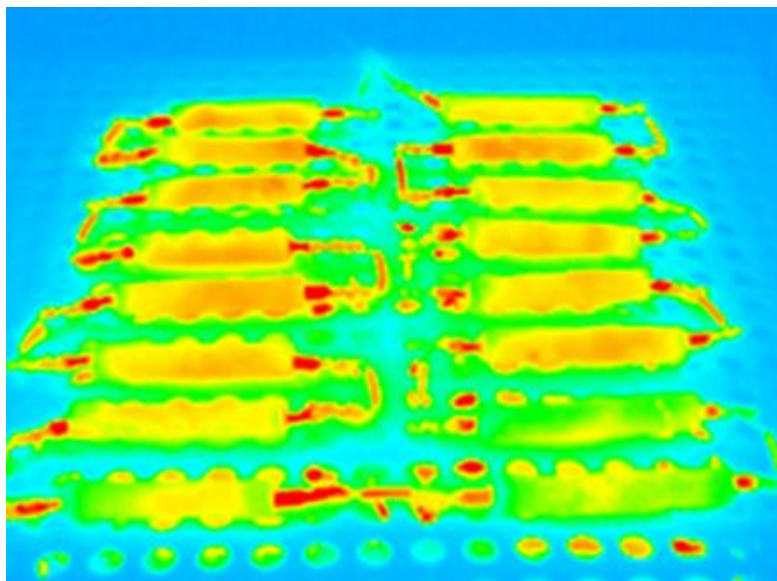


图 1-10 碳纤维电加热红外图^[62]

Fig.1-10 Infrared image of carbon fiber electric heating ^[62]

在单独的碳纤维电加热的前提下, 通过添加其他电热物质可以达到提高电热性能的效果。Lee 等^[63]提出了一种新型的多功能热塑性复合材料, 具有优异的加热性能和超疏水表面, 使用镀镍(Ni)碳织物(NPCF)、聚醚醚酮(PEEK)分散的具有多壁碳纳米管(MWCNTs)和二氧化硅/银(SiO_2/Ag)微球。通过实验发现其优异的加热性能(138.9°C 为最高表面温度, $0.097\text{ W}/^\circ\text{C}$ 为电热转换效率)。

在碳纤维电热研究的前提下, 研究者们发现大多数报道的蒸发器只能在晴天有效工作, 提高蒸发器的蒸发效率是极具挑战性的, 而传统蒸发器在雨天、阴天、雾天及夜间的效率明显下降, 严重制约了太阳能蒸发器的应用。所以设计一种能在各种情况下持续蒸发的蒸发器或通过额外的电源来提高效率具有重要意义(图 1-11)。而碳纤维由于其优异的性能可以满足光热协同的要求, 但是目前利用碳纤维的光电协同用作太阳能界面蒸发器件的研究还较少。

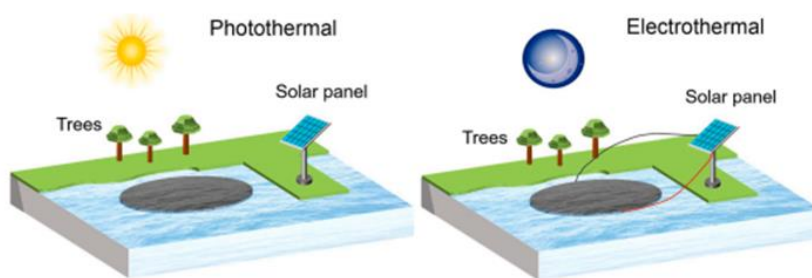


图 1-11 全天候光热转化器件的应用^[64]

Fig.1-11 Carbon fiber electric heating ^[64]

Huang等^[65]提出了一种使用低成本商业碳纤维(CF)材料进行界面蒸发的耦合可调谐光热和焦耳加热工艺,如图 1-12 是其光热协同蒸发器件的设计。通过与蒸发介质相同的CF 材料耦合光热和焦耳加热过程,可以实现稳定高效的界面蒸发性能,其中可以调整电能的输入功率以匹配太阳能的损失。通过耦合蒸发实验,发现蒸发速率达到 $1.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 太阳照射功率为 1 kW m^{-2} 对于光热转换或焦耳热转换,效率先降低后增加。“冷蒸汽”在输入功率较低的情况下产生了较高的效率,而热局部化导致热损失的相对比率显著降低,并在输入功率较高的情况下提高了效率。这项工作进一步改进了多过程耦合和多能互补过程,并将促进其实际应用。

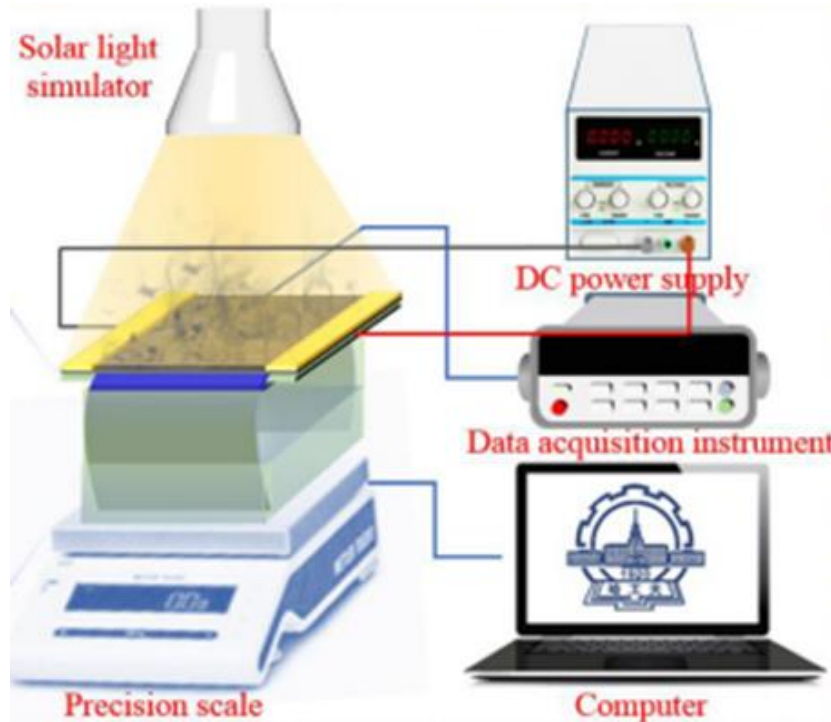
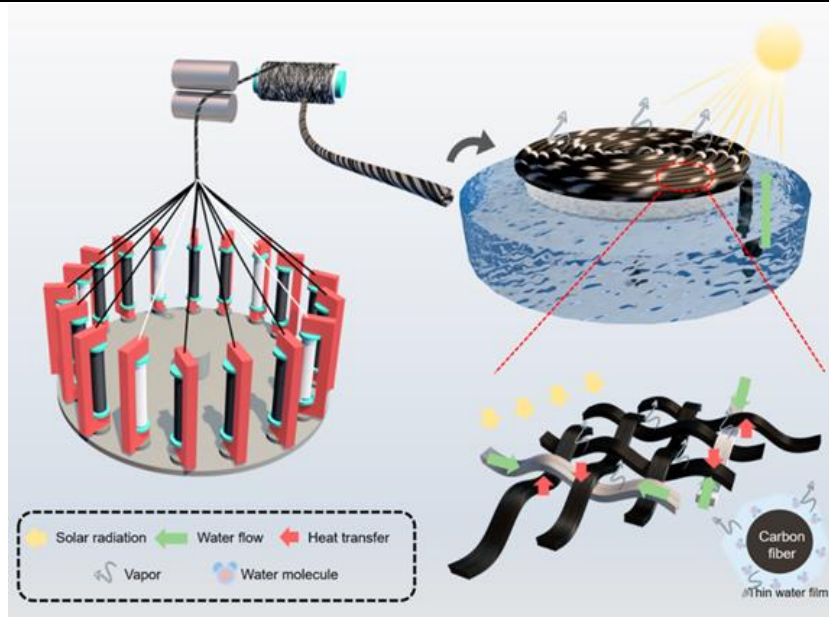


图 1-12 光电协同蒸发器件的设计^[65]

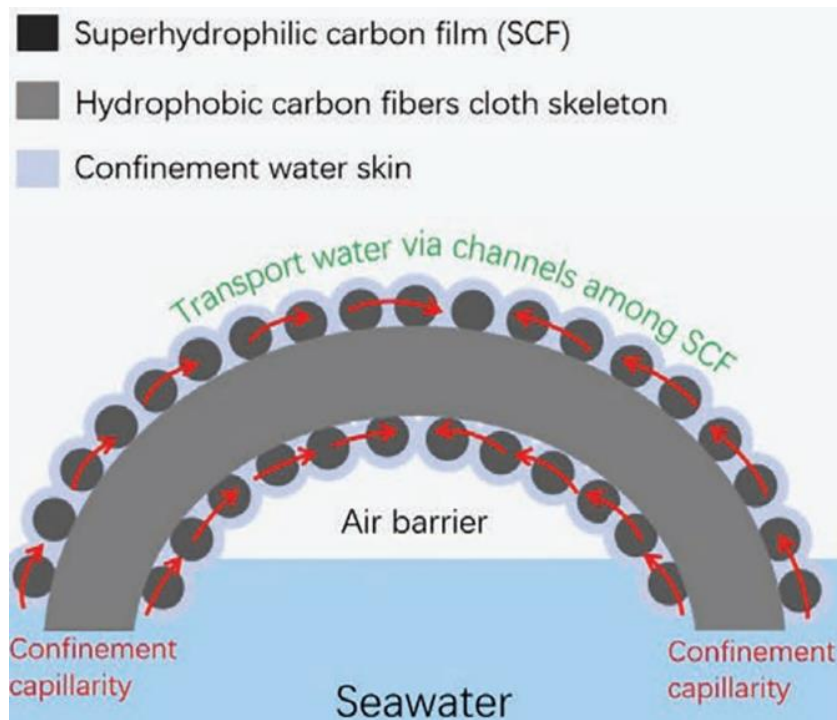
Fig.1-12 Design of Optoelectronic Collaborative Evaporation Device ^[65]

在实现了光热协同蒸发的条件下,对于水传输通道又有了新的理解。天丝纤维是一种亲水性的纤维, Xu 等^[66]利用碳纤维/天丝复合编织物用于稳定连续的全天脱盐技术,具有优异的光热和电热转换能力,通过调整编织参数来调节脱盐性能,编织技术如图 1-13 所示。由于碳纤维中的水保持在毛细管状态,因此更容易以团簇形式蒸发,因此将水从复合织物上蒸发所需的能量更少。在 1 个太阳光照下,平均蒸发速率和蒸发效率分别为 $1.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 88.8%。当施加少量电压(3 V)时,编织物的蒸发率保持在 $1.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,并且在白天实现了优异的脱盐性能。在全天候连续运行的情况下,水中大部分有机物、金属离子和污染物得到有效去除,这项研究结果有助于为高效稳定的废水处理、海水淡化和饮用水收集。

图 1-13 亲水性天丝纤维和碳纤维的编织^[66]Fig.1-13 Weaving of hydrophilic Tencel fiber and carbon fiber^[66]

Zhao 等^[64]设计并建造了一个三维全天候太阳能蒸发器通过沸石-壳聚糖-TiO₂@PPy 气凝胶(ZCTP),通过沸石和壳聚糖的辅助,具有内部定向的孔排列结构,可以有效地增强太阳能驱动的水净化。最重要的是,使用碳纤维加热丝的 ZCTP 气凝胶的长期运行可以充分利用太阳能白天收集的能量,以提高太阳能利用和水净化的效率。结果表明,ZCTP 气凝胶的水分蒸发速率为 $1.66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,在 1 次阳光照射下。光热能和电热能的集成系统转换机制在 1 个阳光照射 5 V 电压的条件下蒸发速率可以达到 $11.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,达到全天候持续净化水的目的。此外,非常好耐盐性也使 ZCTP 气凝胶具有完美的稳定性和可重复使用性,即使在含 20%NaCl 的水中也是如此对蒸发过程和能源效率的影响最小。

在研究完平面蒸发器件后,发现虽然可以使用隔热效果好的隔热层降低热量的流失,但是还是会有一部分热量损失到水中,所以考虑立体蒸发器件,将蒸发层与水面不接触。Wang 等^[67]使用涂覆疏水性碳纤维布(CC)利用金属有机骨架(MOF)衍生的超亲水碳膜,并且弯曲成拱形构造,蒸发器件的构造如图 1-14 所示。由于独特的疏水核心/亲水外壳结构,超薄水膜(30–150 μm)被限制在外层像皮肤。由于水趋肤效应和外表面和内表面共同蒸发,拱形蒸发器显示出 $3.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的超高蒸发率(3.5 wt%NaCl)和 $2.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (20 wt%NaCl)在 1 个阳光照射下。同时,自由流动的水快速对流排盐,确保稳定的蒸发性能一整天。此外,在黑暗环境中仅用 2.5 V 输入电压蒸发速率高达 $3.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,可归因于 CC 优越的电热效果一体化功能为商业化、便携式光热转换提供了一种实现海水净化的有效途径。

图 1-14 立体蒸发器的构建^[67]Fig.1-14 Construction of a three-dimensional evaporator^[67]

1.4 本文主要研究目的、研究内容及创新之处

1.4.1 研究目的

在碳达峰和碳中和时代，开发低成本、环保、大规模的新能源技术来取代传统化石燃料尤为重要，传统化石燃料被广泛认为会导致温室效应和频繁的极端气候^[68]。太阳能光热转换已引起广泛关注，太阳能光热转化是一种重要的清洁能源利用技术，将太阳能转化为热能，然后利用热能达到预期目的，如海水淡化^[69]、污水净化^[70]、光热催化^[71]和杀菌^[72]。其中，太阳能驱动界面光热转换水蒸发因其能够利用太阳能处理不同水源，并能够高效、经济地获得纯水而受到广泛关注^[73]，被认为是一种极具前景的高效太阳能光热转化途径。太阳能驱动界面蒸发系统主要构件为：(1)、太阳能吸收器：可以有效地吸收太阳辐射并将其转化为热量，同时允许蒸汽渗透通过正面；(2)、水通道结构：能够同时使蒸发速率最大化并将液体供应到加热区域；(3)、热绝缘体：有效减少转换后的太阳热能损失。

目前，大多数太阳能驱动界面蒸发的研究都是在实验室条件下进行的，没有考虑实际应用。实际上太阳光的强度随着时间和气候条件的变化而不断变化，很难保持稳定的蒸汽生成。并且室外阳光强度通常小于实验室条件，如果没有聚光系统，蒸发过程会受到外部环境的影响。而电力是一种稳定可靠的能源驱动方式，能够在低光强下实现稳定

有效的界面蒸发。当太阳光的强度改变时，可以调整施加的电能来补偿太阳能的损失，从而可以在不需要其他能量存储系统或聚光系统的情况下保持稳定的蒸汽产生和水生产。这种设计可以与其他风能和光伏系统相结合，以实现各种新能源的互补应用。本课题基于电热组件和废弃碳纤维的电热转化特性，采用可调谐光热和电驱动焦耳加热耦合实现稳定有效的界面蒸发。同时，通过原位聚合在纤维素纤维表面构建功能层，制备纤维素纤维 Janus 非织造布复合材料，研究基体对于水的传输机理及对印染废水中的染料和重金属离子的吸附机理。构建的模块化光热和电驱动焦耳加热耦合太阳光界面蒸发器有望实现规模化高效处理工业印染废水。

1.4.2 研究内容

(1)不同形态碳纤维光热以及焦耳热性能的探究

通过选取回收废弃碳纤维，将其制备成粉体和纤维毡的形式用作光热层，通过 SEM 分析光热层的微观表面形貌，并测试其全光谱吸收率，分析对于光的吸收率。使用 Janus 改性的非织造布作为导水层，利用其单向导湿性对水分进行传输，有着良好的防止热量散失的作用，通过 SEM 和 EDS 对非织造布的表面形貌进行表征，分析疏水性改性对于非织造布表面的影响。隔热层通过采用 EPE(聚乙烯泡沫板)，有着良好的隔热性能，防止热量直接向水中散失。将这些构件组装成为界面蒸发器，通过模拟日光氙气灯在一个太阳光的条件分析蒸发器的蒸发速率，分析不同形态的碳纤维结构的光热层对于蒸发器的蒸发速率的影响。最后通过直流电源对两种形态的碳纤维的电热性能进行表征，选取电热性能优秀的，为后面的光-电耦合界面蒸发系统提供研究基础。

(2)聚合物改性碳纤维毡的光电耦合蒸发性能

施加电压大小达到光电耦合的协同效果对于本研究是一项重点研究内容，通过直流电源在碳纤维毡两端施加不同大小的电压，观察其在干态以及湿态的电热效果，并结合能量的消耗选取最合适的电压。确定好合适的参数后，使用优秀的导电聚合物对碳纤维毡进行改性以增强其电热性能，通过 SEM 和 EDS 对改性之后的碳纤维表面进行表征分析其微观形貌，并通过 FTIR 光谱以及 XPS 探究其改性结果。为了针对改性之后的电热效果，使用直流电源在设定的电压下进行电热表征。再对改性前后的样品进行力学性能表征，测试其是否可以在水中进行稳定的工作不会脱散。使用界面蒸发器在一个太阳的光照强度以及设定的电压下进行光热、电热以及光电耦合的实验，探究蒸发速率。

(3)光电耦合界面蒸发器协同水蒸发的实际应用研究

利用制造出来的光电协同太阳能蒸发器，在印染废水和模拟海水等实验条件下进行处理，并对蒸发器的使用寿命做出研究。在一个太阳光的条件，对模拟海水以及不同的印染废水进行蒸发净化处理。在实验过程中通过观察收集的冷凝水进行水质参数对比，分析其对废水的处理情况，探讨蒸发器对污水回收利用的可行性，并在长时间工作下研究其蒸发速率的变化以及整个蒸发器的完好性。在蒸发器稳定工作的条件下，在室外自然光照条件下将直流电源更换成太阳能板，在白天的时候通过光照对太阳能板供电，达

到光电协同的效果，分析构建的光热协同太阳能蒸发系统的实际使用性能。

技术路线如下所示：

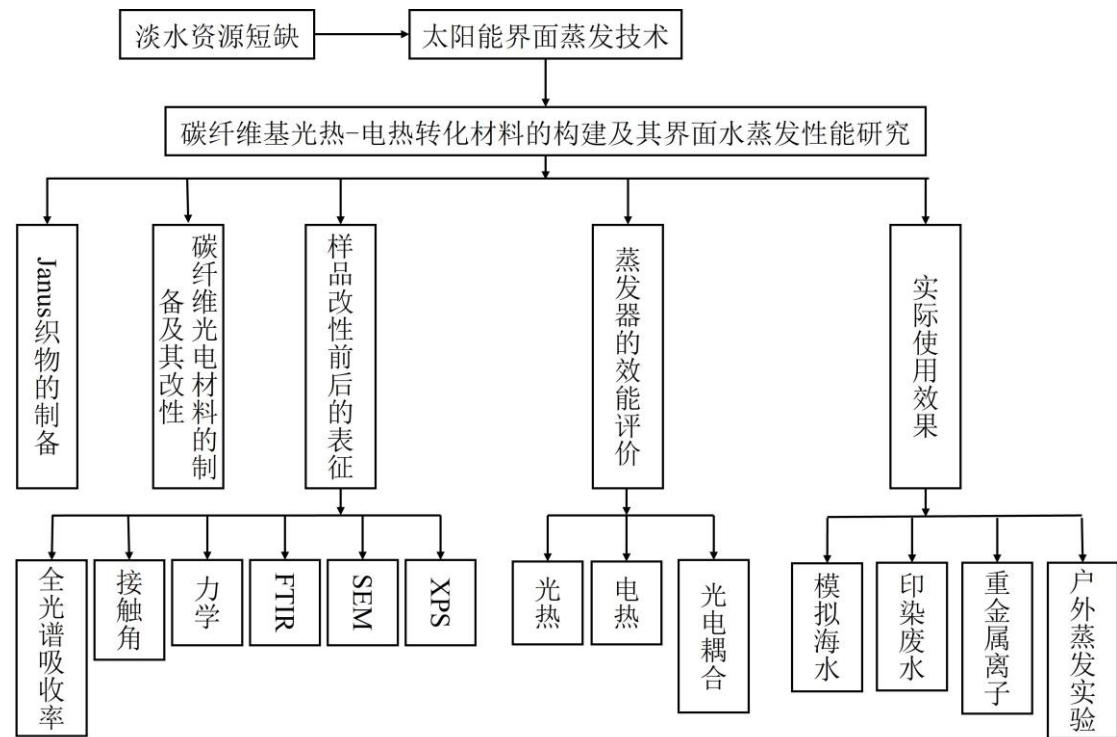


图 1-15 技术路线图
Fig.1-15 Technology Roadmap

第 2 章 实验部分

2.1 实验原料与实验仪器

本论文实验所用主要的原料和试剂见表 2-1

表 2-1 实验原料和试剂

Tab 2-1 Experimental raw materials and reagents

原料/试剂名称	牌号或规格	生产厂家
回收碳纤维	5-20 mm	南通复源新材料有限公司
乙醇	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
纳米二氧化硅	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
海藻酸钠	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
聚乙二醇	分子量 400	上海阿拉丁试剂有限公司
聚乙烯泡沫板	厚度 5 mm	昆山苏粤包装材料有限公司
棉非织造布	厚度 5 mm	潍坊广富非织造材料有限公司
苧麻非织造布	厚度 5 mm	潍坊广富非织造材料有限公司
热熔胶网膜	黑色 PA 热熔胶	上海星霞高分子制品有限公司
蒽醌-2-磺酸钠盐	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
吡咯	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
三氯化铁	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
盐酸	分析纯	上海阿拉丁试剂有限公司
三羟甲基氨基甲烷	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
盐酸多巴胺	分析纯	上海阿拉丁试剂有限公司
双氧水	分析纯	上海阿拉丁试剂有限公司
硫酸铜	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
氯化钙	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
氯化镁	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
氯化钠	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
氯化钾	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
亚甲基蓝	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
甲基橙	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
Y-3RB	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司

本论文实验所用仪器设备见表 2-2

表 2-2 仪器设备

Tab 2-2 Instruments and equipment

设备和仪器	型号	生产厂家
电热恒温鼓风干燥箱	PH-010A	上海一恒科学仪器有限公司
接触角测量仪	SDC-200S	东莞市盛鼎精密仪器有限公司
场发射扫描电子显微镜	CIQTEK SEM3200A	CIQTEK Co, Ltd
电子天平	JM-A20001	诸暨市超泽衡器设备有限公司
傅立叶红外光谱仪	NicoletiS5	ThermoScientifiNicoletiS5, USA
行星式球磨机	Xm-1	湘潭市三星仪器有限公司
真空冷冻干燥机	LGJ-10	北京松源华兴生物技术有限公司
打浆机	AT-WL	山东安妮麦特仪器有限公司
水循环抄片机	AT-CP	济南卓邦试验仪器有限公司
太阳能模拟氙气灯	PX-LQ 500W	北京普林赛斯科技有限公司
手持热成像仪	TC01A	Fluke, USA
热压机	YLJ-HP300	合肥科晶智达科技有限公司
X 射线光电子能谱仪	Thermo fisher Nexsa	Thermo Fisher Scientific
超声波清洗机	KS-7200DE	昆山洁力美超声仪器有限公司
电感耦合等离子体质谱仪	AGILENT 725-ES	Agilent Technologies Inc., USA
直流电源	WPS305H	深圳固测电子科技有限公司

2.2 试样制备

2.2.1 Janus 织物的制备

将 10 mL 聚乙二醇(PEG)溶液和 30 mL 乙醇混合后,再将适量纳米 SiO_2 加入混合液体中,在室温下搅拌均匀,得到疏水性改性溶液。将配置好的溶液通过喷枪均匀喷涂在准备好的苎麻和棉非织造布表面,然后放入烘箱干燥 6 h,得到表面疏水底部亲水的 Janus 织物。

2.2.2 回收碳纤维界面蒸发器的制备

本实验采用两种方案制备碳纤维吸光层,使用的碳纤维光热层分为碳纤维粉光热层和碳纤维毡光热层。(1)、碳纤维粉光热层的制作方法是:配置浓度为 1%的海藻酸钠溶液,然后利用球磨机将回收的碳纤维磨成碳纤维粉,再取 1 g 碳纤维粉加入 100 mL 海藻酸钠溶液中,搅拌均匀得到黑色的混合碳纤维液体,然后取 5 ml 液体,将液体置于半径为 1.5 cm 的圆形模具中,最后冷冻干燥 12 h 得到碳纤维粉光热层,制备流程如图 2-1 所示。



图 2-1 回收碳纤维粉吸光层的制备流程

Fig.2-1 Preparation process of recycled carbon fiber powder absorbing layer

(2)、碳纤维光热层的制作方法：取 10 g 回收碳纤维，放入打浆机打散之后，在利用超片机得到碳纤维毡，再将碳纤维毡放入烘箱干燥 6 h 后利用模具剪成半径为 1.5 cm 的圆得到碳纤维毡光热层，制备流程如图 2-2 所示。

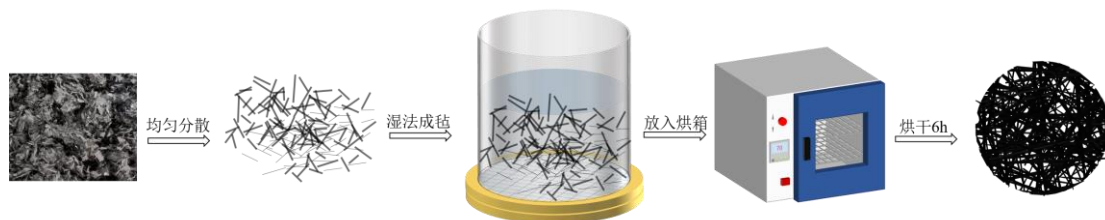


图 2-2 回收碳纤维毡吸光层的制备流程

Fig.2-2 Preparation process of recycled carbon fiber felt absorbing layer

最后由 Janus 织物和光热层组装成太阳能界面蒸发器，如图 2-3 所示。将不同的组合方法形成的不同组分分别命名，苧麻对照组、棉对照组、苧麻+碳纤维毡、苧麻+碳纤维粉、棉+碳纤维毡和棉+碳纤维粉分别命名为 RCG、CCG、R+CFF、R+CFP、C+CFF 和 C+CFP 组。对比不同导水层和不同光热层的形貌，对于整个蒸发器件的蒸发效率的影响。

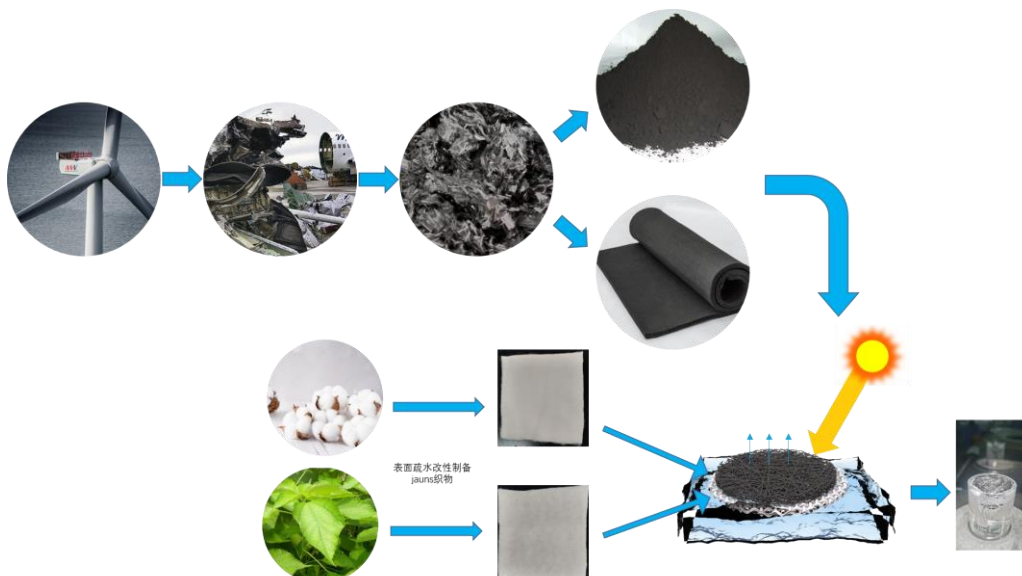


图 2-3 界面蒸发器的制备流程

Fig.2-3 Preparation process of interface evaporator

2.2.3 碳纤维毡的制备

取回收碳纤维 5 g, 放入打浆机中打散之后, 在利用超声机得到碳纤维毡, 再将碳纤维毡放入烘箱干燥 6 h, 后裁剪成 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 大小, 制备出两片碳纤维毡之后使用热熔胶网膜在热压机中以 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa 的条件下预热 1 min 加压 5 min 将碳纤维毡粘合, 制备出来的样品为碳纤维毡厚度 5 mm, 标记为 CF, 制备示意图如图 2-4 所示。

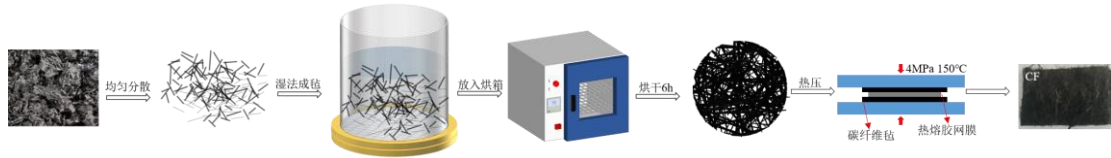


图 2-4 碳纤维毡的制备流程图

Fig.2-4 Preparation process diagram of carbon fiber felt

2.2.4 聚吡咯改性

取 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 的碳纤维毡, 配置 0.1 mol/L 的吡咯(Py)溶液 100 mL, 按照 0.01 mol/L 的配比加入掺杂剂蒽醌-2-磺酸钠盐(AQSA), 超声 0.5 h 后形成淡黄色均匀溶液, 将处理好的碳纤维毡完全浸入该溶液中, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下放置 2 h 浸渍, 使碳纤维毡在 Py 溶液中完全浸润。配置 0.15 mol/L 的 FeCl_3 溶液 100 mL。用滴定管逐滴加入到 Py 溶液里, 保持反应温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 静置 2 h。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的反应温度是为了降低反应速率, 使 Py 能够均匀的生长到碳纤维上。反应结束后取出碳纤维毡, 用去离子水清洗碳纤维毡, 去除结合牢度较低的 PPy, 清洗至去离子水中无黑色颗粒物质, 烘干之后即可获得化学聚合聚吡咯试样^[88], 标记为 CF-PPy, 改性示意图如图 2-5 所示。

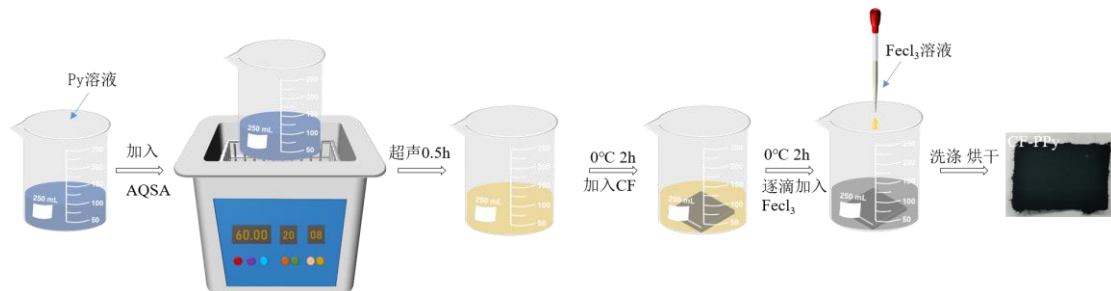


图 2-5 聚吡咯改性示意图

Fig.2-5 Schematic diagram of polypyrrole modification

2.2.5 聚多巴胺改性

在 pH 为 8.5 的条件下, 配置 500 mL 1% 浓度的 Tris 缓冲液, 之后向缓冲液中加入 0.5 g 盐酸多巴胺(DA), 待溶解完全向其中加入 0.5 g 双氧水(H_2O_2)和 0.5 g 硫酸铜(CuSO_4), 搅拌完全溶解之后, 将准备好的碳纤维毡常温 30 min 浸渍, 待反应结束之后取出碳纤维毡, 用去离子水冲洗, 去除结合牢度低的, 冲洗至去离子水不变色时去除碳纤维毡, 放入烘箱烘干得到聚多巴胺改性碳纤维毡式样, 标记为 CF-PDA。改性示意图如图 2-6 所

示。

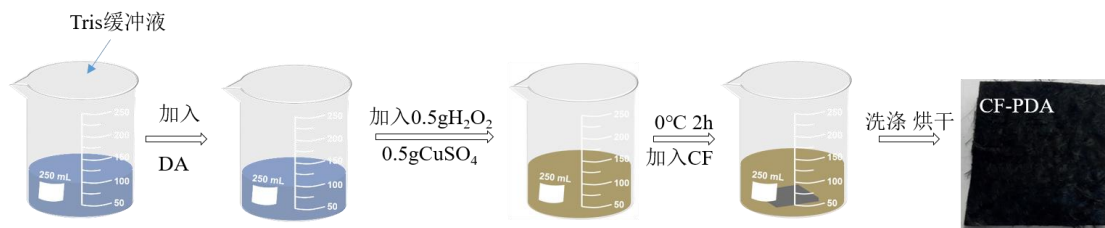


图 2-6 聚多巴胺改性示意图

Fig.2-6 Schematic diagram of polydopamine modification

2.2.6 界面蒸发器件的组装

将碳纤维毡裁剪成 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 用作光热层，并在两端施加电极用作电热实验。隔热层使用隔热聚乙烯泡沫板 (EPE) 防止热量向水中流失，导水层使用改性后的苧麻非织造布，三者共同组装成蒸发器件。

2.3 结构测试及性能表征

(1) 表面形貌表征

采用 CIQTEK SEM3200A 扫描电子显微镜表征回收碳纤维粉及碳纤维毡的表面微观形貌以及 EDS 表征。测试前需要用导电胶将样品粘在测试台上，并进行 1 min 的喷金处理，加速电压为 $10\text{--}20\text{ kV}$ 。

(2) 全光谱吸收率及光吸收度测试

本实验使用长波段紫外-可见-近红外分光光度计分析不同碳纤维光热层在 $200\text{--}2500\text{ nm}$ 波长范围内的漫反射率和折射率。制备的样品尺寸为 $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ ；测试过程中，样品的折射率和透过率在积分球模式下以 2 nm/s 的扫描速率测定。测试结束后，按公式(2-1)计算光吸收效率。

$$A = 1 - R - T \quad (2-1)$$

其中， A 为样品对入射光吸收率； R 为样品对入射光漫反射率； T 为样品对入射光透过率。

(3) 光-热性能研究

通过太阳能氙气灯提供一个太阳光强的光照，并采用红外热成像仪测试光热层的温度，分析不同的碳纤维光热层的温度变化规律。

(4) 水接触角测试

采用接触角仪(东莞市盛鼎精密仪器有限公司)对改性之后的 Janus 非织造布进行静态接触角测试。测试过程涉及使用内径为 0.03 mm 的针将微小水滴挤出到板表面。使用接触角计测量接触角，并使用软件拟合获得准确的水接触角。通过比较接触角，探究疏水改性是否成功。

(5) 表面形貌表征

采用 CIQTEK SEM3200A 扫描电子显微镜表征 CF-PPy 的表面微观形貌。测试前需

要用导电胶将样品粘在测试台上，并进行 1 min 的喷金处理，加速电压为 10-20 kv。

(6) 拉伸性能测试

采用电子万能试验机测试 CF 和改性前后的拉伸强度，拉伸速度为 2 mm/min，在拉伸载荷作用下记录试样的载荷应变，拉伸试样长度为 100 mm，宽度为 10 mm，记录的有效数据不少于 5 个。

(7) FTIR 光谱

样品的 FT-IR 光谱分析由 IRPrestige-21 FTIR 分光光度计使用 KBr 圆盘进行。扫描范围为 400 cm^{-1} 至 4000 cm^{-1} 。

(8) 电热性能研究

通过直流电源在碳纤维两端施加电压，并采用红外热成像仪测试电热层的温度，分析不同电压对碳纤维产生的温度变化规律。

(9) XPS 测试

使用 Thermo Scientific K-Alpha X 射线光电子能谱仪进行。样品尽可能薄而平地放置在 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的胶带上，用铝箔包裹，并压成模块。切掉样品周围多余的铝箔，将样品贴在样品台上进行测试。使用 Al K α 辐射(1486.6 eV)照射样品，扫描离子束光斑尺寸设置为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 。对于全光谱扫描，通过能量为 150 eV，步长为 1 eV；对于窄光谱扫描，通过能量为 50 eV，步长为 0.1 eV。来自表面污染的 C1s 峰(284.8 eV)用于校准。

(10) 离子去除率分析

电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES, Atomscan Advantage)测量模拟海水淡化前后的离子浓度。

第3章 回收碳纤维和 Janus 织物在界面蒸发中的研究

3.1 引言

太阳能驱动界面水蒸发(SDIWE, Solar Driven Interfacial Water Evaporation)能够利用太阳能处理不同的水源(如海水和污水),并能够高效经济地获得淡水和盐,因此受到了广泛关注。SDIWE 是一种在空气和水的界面利用太阳能进行局部加热蒸发技术^[74],具有较高的蒸发效率和加热速率、工业应用潜力大、环境可持续发展等优点,是清洁高效的淡水获取技术。

在 SDIWE 中,亲水性的光热材料起到吸收阳光和加热表面的水分的作用,光热材料下的隔热层抑制了热量向散装水的传递,从而显著提高了蒸发性能^[75-78]。碳基材料是一类理想的光热材料,常见的碳基材料有生物质衍生碳、炭黑^[79,80]、碳纳米管/纳米纤维^[81,82]、石墨烯^[83,84],以及它们的衍生物/复合物^[85]。碳纤维(CF)是由纤维经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料纤维,其作为高性能纤维有着比重轻、强度高、模量高、耐高低温以及耐磨性好等特点,此外作为碳材料,具有宽带光吸收、优异的力学性能和高化学热稳定性的特点^[86]。然而,传统的碳纤维生产过程高能耗、资源浪费且成本较高,如何回收利用废弃碳纤维并将其应用于 SDIWE 中,成为了新的研究课题。在 SDIWE 技术中,除了光热材料外,水的导向和界面蒸发效率同样受到材料结构的影响。非织造布作为一种常用的水导层材料,因其具有较好的吸水性和透水性,已被广泛用于光热蒸发器中。常见的非织造布材质包括棉和苧麻等天然纤维。然而,这些天然纤维本身通常具有亲水性,容易导致水在表面上形成水珠,影响蒸发效率。因此,通过表面改性提高材料的亲水性和疏水性差异,成为提升蒸发器性能的关键手段。Janus 结构,即一面亲水一面疏水的双面特性,已被证实在水的单向传输和减少界面热量损失方面具有显著优势。通过这种设计,水能够沿着导水层单向流动,并有效减少水分的回流和热量的损失,从而提高蒸发效率。

本章的主要目的是探索回收碳纤维及其复合材料在太阳能驱动界面水蒸发技术中的应用,特别是利用回收碳纤维作为光热材料的可行性。通过将回收碳纤维制备成粉体和纤维毡两种形式,并与不同的非织造布材料结合,设计了新型的太阳能蒸发器。研究中采用了 Janus 结构改性策略,提高了非织造布的疏水性能,进一步提升了蒸发效率。不仅如此还探讨了施加外部电压对蒸发速率调控的可能性。通过电热效应的引入,突破了传统太阳能界面蒸发器只能在白天工作的问题,提出了全天候光电耦合界面蒸发器的创新思路,为后续的实验提供一部分思路。

3.2 结果与讨论

3.2.1 Janus 织物导水层改性分析

为了分析非织造布的改性情况，如图 3-1 所示对改性前后的非织造布进行表征，为了分析其微观结构，如图 3-1(a)(b)所示分别显示了未经处理的棉和苧麻非织造布的表面形貌，可以看出其表面光滑；而图 3-1(c)(d)表明，经过疏水性改性之后非织造布表面长出了纳米 SiO_2 颗粒， SiO_2 的存在会增加织物表面的粗糙度，从而增强涂层织物的拒水性能^[87]。如图 3-1(e)(f)所示，分别是对棉和苧麻非织造布的 30s 内的接触角的测试；由图可知在 30s 内其水接触角都大于 150° 呈现一个超疏水的情况。棉和苧麻纤维本身属于亲水性纤维，而构建出这种一面亲水一面疏水的 Janus 结构能够实现水由下而上的单向传输，减少界面层的热量损失，提高光热蒸发效率。

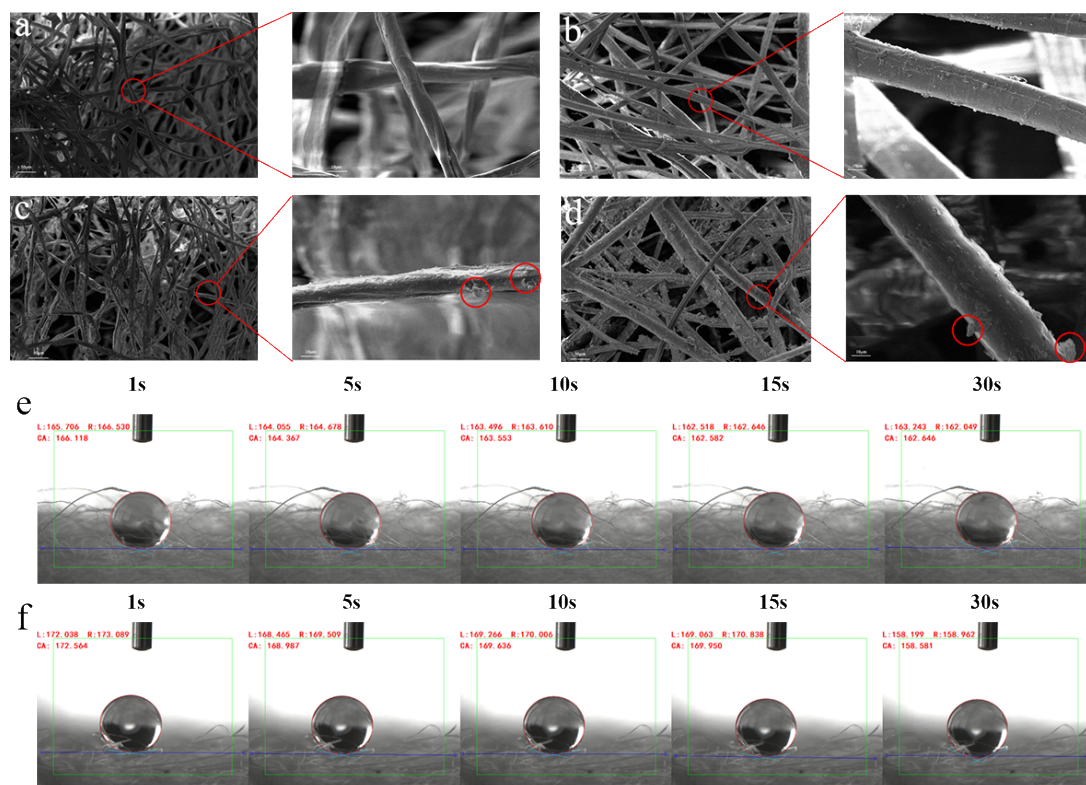


图 3-1 (a)(b) 棉和苧麻非织造布的 SEM 图 (c)(d)棉和苧麻疏水改性之后的 SEM 图 (e)(f)改性之后的棉和苧麻的接触角

Fig.3-1 (a) (b) SEM images of cotton and ramie nonwoven fabric (c) (d) SEM images of cotton and ramie after hydrophobic modification (e) (f) Contact angle of modified cotton and ramie

3.2.2 导水层种类对蒸发速率的影响

除了不同光热层对于蒸发效果的有影响之外，不同纤维种类的导水层对于蒸发器的蒸发效果也有影响。如图 3-2(a)所示可以很明显的看出相比较棉非织造布作为导水层苧

麻非织造布作为导水层的效果较好，分别在 1 h 内的水蒸发量为 CCG($0.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)、RCG($0.59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)、C+CFP($1.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)和 R+CFP($1.69 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。由此可以看出，在仅仅改变导水层种类的条件下来麻要比棉的水蒸发效果提高了 25%。通过计算得出蒸发效率，如图 3-2(b)所示 CCG($0.57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)、RCG($0.60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)、C+CFP($1.24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)和 R+CFP($1.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。并且由图 3-2(c)的热红外图可以看出相比较棉导水层的工作温度(38°C)，来麻导水层的工作温度(39.3°C)更高，说明来麻导水的导水速率和蒸发速率相比较棉导水层更加相对平衡，减少了热量向导水层中的散失，从而达到了提高蒸发效率的结果。因此，本实验后期选用来麻非织造布作为导水层。

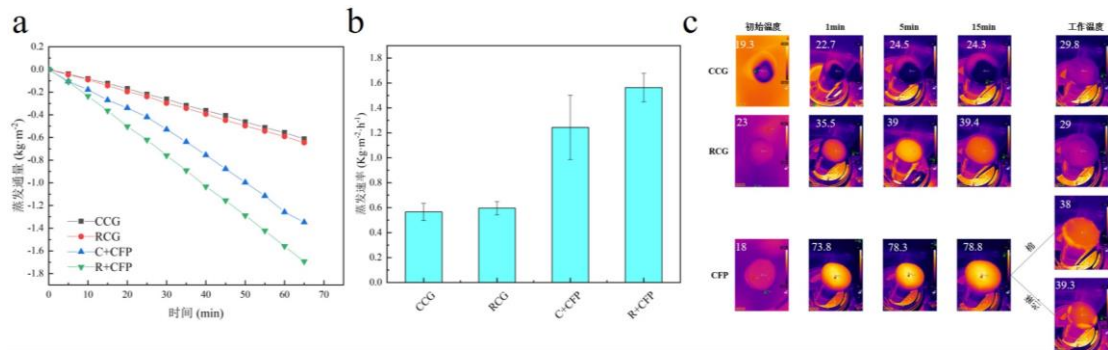


图 3-2 不同导水层的(a)蒸发通量(b)蒸发速率(c)无水光照和有水光照的热红外图像

Fig.3-2 (a) Evaporation flux (b) Evaporation rate (c) Thermal infrared images of different water conducting layers under both anhydrous and aqueous light conditions

3.2.3 不同光热层的表征及其光热性能

碳纤维光热层的不同形貌对于蒸发器的蒸发性能也有着不同程度的影响，图 3-3(a)(b)分别对碳纤维毡以及碳纤维粉光热层的表面形貌做出表征，如图 3-3(a)所示是碳纤维毡的微观表面结构，单根碳纤维之间有着很多空隙，可以促使水蒸发稳定的发生；图 3-3(b)是碳纤维粉的表面形貌，可以看出碳纤维粉在海藻酸钠溶液的粘合以及冷冻干燥的效果下，呈现一层一层的堆叠结构，这种结构可以使水分与碳纤维充分的接触，增大其蒸发面积，从而达到提高蒸发效率的效果。光吸收率是评估光热层性能的一个广泛的标准；如图 3-3(c)使用波长为 $300\text{-}2500 \text{ nm}$ 的紫外-可见-近红外光谱仪测量样品的光吸收率，可以看出碳纤维作为光热层的光吸收率可以达到 99%，这归功于碳纤维优异的光热性能。为了证明光热层是纯碳纤维没有添加其他任何光热物质，对样品使用 EDS 表征，如图 3-3(d)(e)所示，发现除了碳纤维粉光热层有海藻酸钠处理的 Na 元素以外，没有其他元素，说明碳纤维作为光热蒸发器件具有较好的蒸发效率。

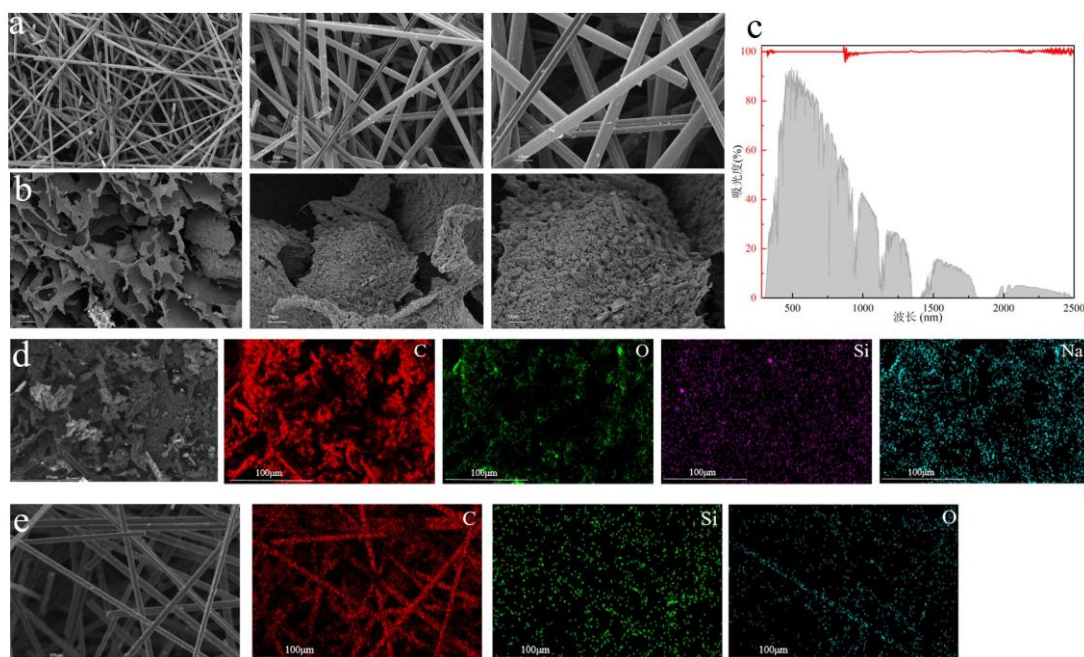


图 3-3 (a)(b)碳纤维毡和碳纤维粉光热层的 SEM 图 (c)光热层的紫外-可见-近红外光谱 (d)(e)碳纤维粉和碳纤维毡的 EDS 图片

Fig.3-3 (a) (b) SEM images of carbon fiber felt and carbon fiber powder photothermal layer (c) UV visible near-infrared spectra of photothermal layer (d) (e) EDS images of carbon fiber powder and carbon fiber felt

3.2.4 不同光热层对蒸发速率的影响

太阳能蒸发器的蒸发通量和蒸发速率是表征蒸发器的效果的最重要的两个因素，为了确认碳纤维光热层的光热性能，在一个太阳光的直射下，借助实验设备，对不同光热层的样品进行水蒸发测量，如图 3-4(a)所示，相比较 RCG 添加了光热层的 R+CFF 和 R+CFP 的 1 h 水蒸发量有着明显提升。而 R+CFP 的 1 h 的水蒸发量为 $1.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，要比 R+CFF 的 $0.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 有着显著提升，提高了 81%。根据这些数据可以算出蒸发器的蒸发速率如图 3-4(b)所示，在 R+CFP 的情况下达到最大的蒸发速率为 $1.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，R+CFF 的蒸发速率只有 $0.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，但是也比 RCG 的蒸发速率 $0.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 要高 45%。根据扫描电镜图可以看出 R+CFP 的蒸发效率归功于碳纤维粉的层层堆叠结构增大了水接触面积，也就是增大了蒸发面积。为了更好的表征碳纤维的光热性能，使用热成像仪对各个阶段的碳纤维在一个太阳光的照射下的温度；由图 3-4(c)所示，在无水的情况下，在一个太阳光的情况下 15 分钟之内碳纤维粉达到最高温度 78.8°C ，碳纤维毡可以达到 75.2°C ，显示出良好的光热转化能力；并且在在蒸发器稳定工作的情况下碳纤维粉可以稳定在 39.3°C ，碳纤维毡可以稳定在 33.7°C 。

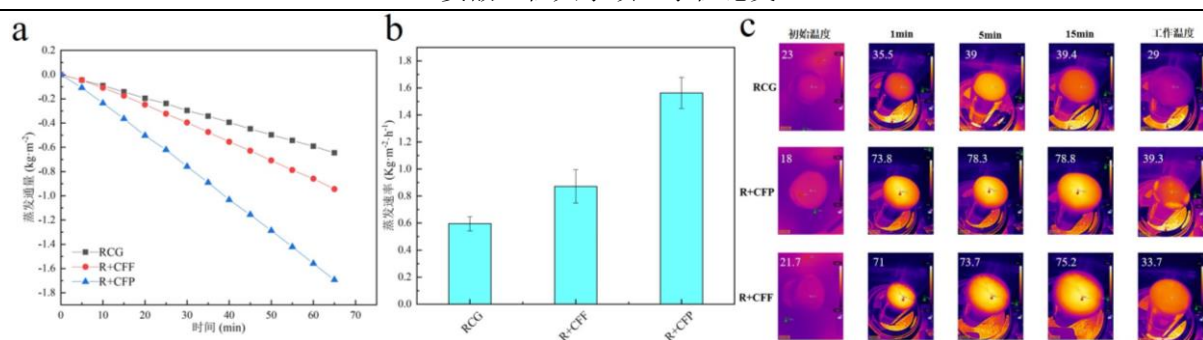


图 3-4 不同光热层的(a)蒸发通量(b)蒸发速率(c)无水光照和有水光照的热红外图像

Fig.3-4 (a) Evaporation flux (b) Evaporation rate (c) Thermal infrared images of different photothermal layers under anhydrous and aqueous illumination

3.2.5 基于回收碳纤维的蒸发器的耐久性测试

为了更好的确定蒸发器在使用过程中的稳定性能，本实验使用蒸发效率最好的 R+CFP 在 1 个太阳光强度下的 8 h 的循环测试，结果如图 3-5(a)所示，在 8 h 的测试内蒸发器的蒸发效率基本稳定在 $1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右，显示出良好的稳定性。图 3-5(b)是分别测试了在 1 kWm^{-2} 、 2 kWm^{-2} 、和 3 kWm^{-2} 的蒸发通量，可以很明显的看出来随着光照强度的增加，在 1 h 内的蒸发量也随着增加，通过这些数据计算得出蒸发速率结果如图 3-5(c)所示，在不同的太阳光强的条件下蒸发速率分别为 $1.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $4.24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $6.62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。结果表明随着光照强度的增加，相应的蒸发效率也有着显著的提升，并且能够进行稳定的蒸发，说明蒸发器的热稳定性很好，在较高的温度下也可以进行正常的工作。

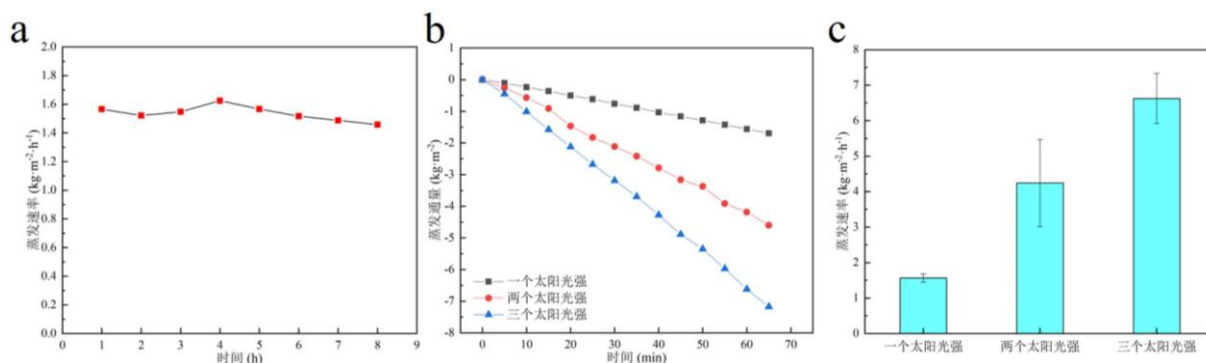


图 3-5 R+CFP(a)在一个太阳光强下的 8h 的蒸发速率 (b)在三种不同光照条件下的蒸发通量 (c)在三种不同光照条件下的蒸发速率

Fig.3-5 R+CFP (a) 8-hour evaporation rate under one solar intensity (b) evaporation flux under three different lighting conditions (c) evaporation rate under three different lighting conditions

3.2.6 电热在碳纤维样品中的研究

虽然目前工作中的碳纤维粉界面蒸发器能够达到 $1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右的蒸发速率，但是就目前的研究背景来看，确实不是属于一个良好的蒸发速率，所以我们考虑到碳纤维的良好导电性这一特性，来判断是否可以通过施加外接电压来达到调控蒸发速率的这

一效果,如图 3-6 所示,碳纤维粉蒸发器在施加电压的情况下,产生了局部发热的情况,这一情况的发生可能是由于碳纤维粉之间连接的过于松散,导致电流不能够顺畅的在碳纤维之间传递,在这之后我们对碳纤维毡样品进行电热表征,发现在两端通电的情况下,碳纤维毡很容易就达到了 90°C 的高温,并且各部分受热十分均匀,适合用做为电热元件,体现出了碳纤维良好的电热反应效应。并且通过电压的引入,让本来只能在白天运作的太阳能界面蒸发器突破了这一桎梏,从而可以达到全天候界面蒸发,成为全天候光电耦合界面蒸发器,给界面蒸发器的发展提供了一种思路。

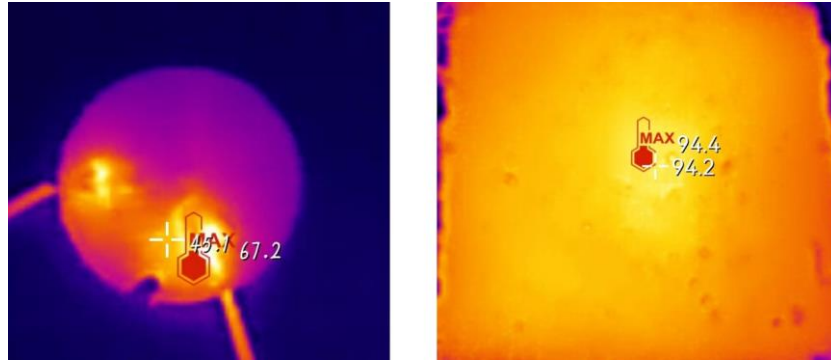


图 3-6 不同碳纤维形貌电热表征

Fig.3-6 Electrothermal characterization of different carbon fiber morphologies

3.3 本章小结

本研究通过回收碳纤维的高效再利用,构建了兼具光热转化与定向输水功能的太阳能界面蒸发系统。基于碳纤维粉(CFP)和纤维毡(CFM)两种形态设计光热层,结合 Janus 改性非织造布导水层,显著提升蒸发性能。其中,苎麻导水层因优化的孔隙结构与热管理能力,实现 $1.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的蒸发速率,较棉层提升 26%;碳纤维粉凭借层叠式结构扩大蒸发界面,其蒸发效率($1.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)远超纤维毡($0.87 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。通过纳米 SiO_2 超疏水改性及亲/疏水 Janus 结构协同作用,导水层接触角突破 150° ,有效抑制热量散失并强化水的单向传输,为系统高效运行奠定材料基础。

系统在连续 8 小时测试中保持 $1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的稳定蒸发通量,且蒸发速率与光照强度呈显著正相关,证明其环境适应性。实验发现,碳纤维毡在施加外部电压时表现出优异电热响应,瞬时升温至 90°C 以上,而碳纤维粉因松散结构仅产生局部发热。这一差异特性为光电耦合蒸发模式提供了关键突破口,通过光热-电热协同策略,既可维持日间 $1.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高效蒸发,又能利用碳纤维毡的导电网络实现夜间主动加热,突破传统光热系统受限于光照条件的效率瓶颈,为全天候淡水生产开辟新路径。

该研究不仅证实回收碳纤维在蒸发器领域的高值化应用潜力,更构建了蒸发速率达 $1.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的可持续水处理系统。其创新性体现在三方面:一是通过材料形态调控(粉体/纤维毡)与结构设计(Janus/层叠式)双重优化光-热-水传递过程;二是揭示苎麻导水层的性能优势机制,为生物基材料选择提供理论依据;三是首创碳纤维基光电协同蒸发范

式，通过电压调控实现蒸发速率的动态管理。研究成果为废弃碳纤维资源化利用提供了新技术方向，同时为干旱地区清洁水供应及工业余热回收等场景提供了可扩展解决方案，具有显著的环境效益与工程应用前景。

第4章 改性碳纤维毡的光电耦合在界面蒸发的研究

4.1 引言

界面蒸发技术近年来成为了水处理、能源回收和海水淡化领域的一个研究热点。水资源短缺和能源消耗的双重挑战使得开发高效的水处理技术成为全球性的需求。界面蒸发技术具有操作简单、能源消耗低、对环境友好的特点，是一种将水转化为蒸汽的高效手段。在这一过程中，界面蒸发不仅涉及热量的吸收和转化，还可能涉及电热效应和光热效应的协同作用，因而，研究界面蒸发的效率提升和机理已成为学术界和工程界的关注重点。

碳纤维作为一种新型的功能性材料，因其优异的导热性、良好的机械性能和热稳定性，逐渐成为研究人员开发界面蒸发技术的关键材料之一。在碳纤维的界面蒸发过程中，光电耦合技术则是一种新兴的研究方向。光电耦合技术通过同时利用光热效应和电热效应，在提高蒸发效率的同时，也能拓展其应用领域。然而，尽管碳纤维本身具有良好的导电导热性能，单纯依靠其固有的特性在界面蒸发过程中可能还无法充分发挥其潜力。因此，如何进一步提升其光热和电热性能，优化其在界面蒸发过程中的应用，成为了研究的一个重要课题。而表面聚合物改性是增强材料性能的常见方法之一。在碳纤维的改性过程中，聚合物的表面修饰可以通过化学反应、物理吸附等方式形成薄膜结构，这些改性层能够赋予碳纤维更好的光吸收能力、导热性以及更强的电热性能。

针对纯光热条件下难以大幅度提升的蒸发效率，以及碳纤维作为光热层仍然存在的一些缺陷，本章的研究内容是通过表面聚合物改性和光电耦合技术，提升碳纤维毡在界面蒸发过程中的性能，进而为其在水处理和能源回收等领域的应用提供理论基础。具体的研究内容是：选择聚吡咯(PPy)和聚多巴胺(PDA)两种改性材料，对碳纤维毡进行表面改性；探讨不同电压下改性碳纤维毡的电热性能；评估改性材料在光照条件下的光热性能；并结合电热与光热效应，研究光电耦合技术对界面蒸发效率的提升效果。不仅深入探讨了碳纤维毡的表面改性对其性能的影响，还为未来在实际应用中如何更好地利用光电耦合技术提供了新的思路和方法，具有重要的实际意义和应用前景。

4.2 结果与讨论

4.2.1 不同电压对碳纤维毡的电热性能探究

在碳纤维两端施加电压的大小很大一部分能够影响碳纤维的电热效果，为了探究碳纤维电热的最佳参数，通过对碳纤维两端施加 3 V、4 V、5 V、6 V 不同大小的电压，观察在不同电压下的电热效果以及水蒸发速率等，如图 4-1 所示可以看出随着电压的增大，水的蒸发速率也随之变大，这是因为随着电压的增大，碳纤维通过电热而产生的热量就

越大,从而温度也就越高,蒸发水的速率也就随之越来越快,可以看出随着电压的增大,蒸发速率的变化分别为 $2.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $2.94 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $3.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,可以看出在 6 V 的条件下蒸发速率最高,但是相比较增长的幅度 5 V 到 6 V 的增长速率相对比较小,考虑到蒸发的速率以及对节能的考虑,并且市面上大部分储能器件都是采用 5 V 参数,所以在本实验中选用 5 V 的电压参数作为最适合的电热参数。

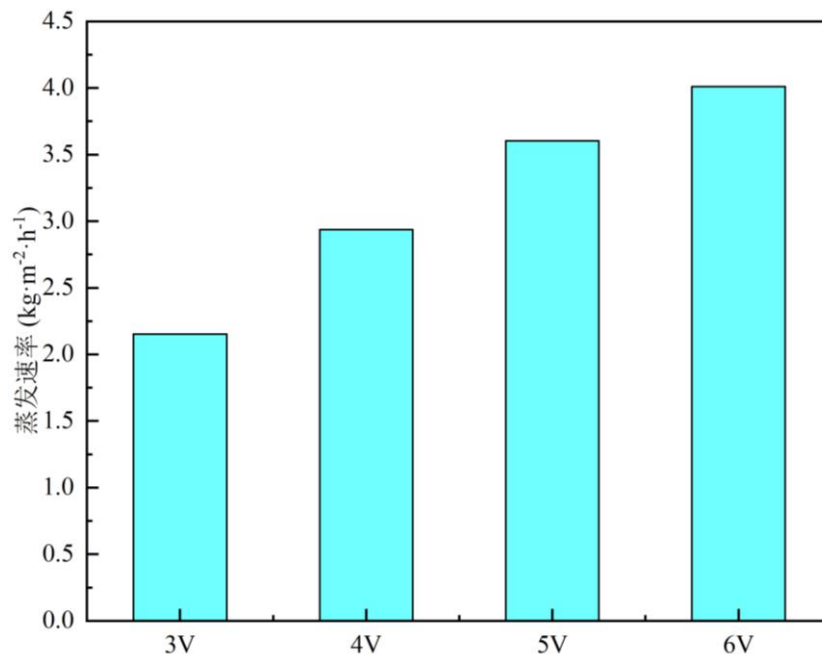


图 4-1 不同电压下碳纤维毡的蒸发速率

Fig.4-1 Evaporation rate of carbon fiber felt under different voltages

4.2.2 PPy 改性及其力学性能的研究

为了探究聚吡咯改性对 CF 的影响,我们通过 SEM 对 CF-PPy 的表面形貌进行表征,如图 4-2(a)所示,明显从光学图片中可以看出 CF-PPy 的要比 CF 黑的程度更加深一点,这是 CF 表面聚合了 PPy 的初步确认。从 4-2(b)SEM 图片中能够更加清楚的看到在原本十分光滑的碳纤维上,聚合了很多 PPy 小颗粒,这些 PPy 团聚在碳纤维上不仅可以提高整体样品的机械性能,还可以提高导电性能,从而提高蒸发性能。为了更加确定 PPy 在 CF 上的聚合,通过傅里叶变换红外(FTIR)光谱如图 4-2(c)所示在 CF 和 CF-PPy 的红外曲线中可以看出,CF-PPy 的特征峰值为 789 cm^{-1} (CH-键在吡咯环上的面内振动和苯环的弯曲振动), 886 cm^{-1} (=C-H 键的面外弯曲振动), 1033 cm^{-1} 和 1166 cm^{-1} (面内变形振动吸收=C-H 键), 1446 cm^{-1} 和 1536 cm^{-1} (聚吡咯环中=C-N, C=C 的拉伸振动峰) 3344 cm^{-1} (聚吡咯中的 N-H 键),因此更加证明了吡咯在 CF 表面的成功聚合^[89]。不仅如此还通过 4-2(d)EDS 对碳纤维毡表面的元素进行分析,发现除去碳纤维本身的 C 元素和回收碳纤维存在的少量 Si 元素以外,还存在着 O 元素,这可能是由于聚吡咯与空气中的氧发生反应或碳纤维表面氧化形成的氧化层。而 Cl 和 S 元素则是来源于在改性过程中的 HCl 和 AQSA,通过 EDS 更能明显的证明吡咯在碳纤维表面的成功聚合。

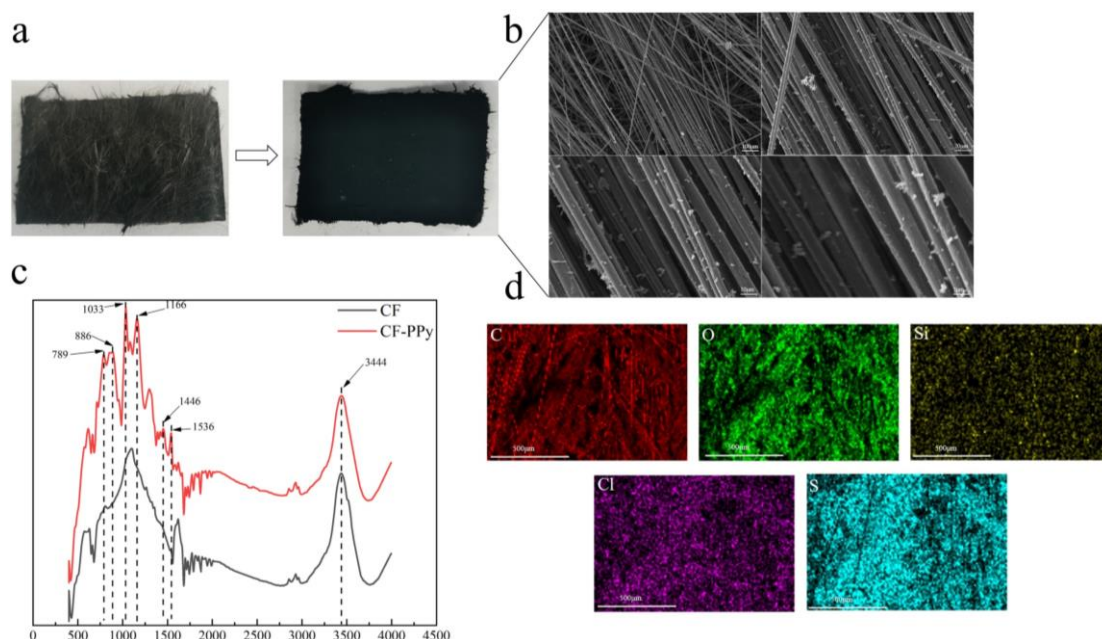


图 4-2 CF-PPy 样品(a)光学图片(b)SEM 测试结果(c)FT-IR 测试结果(d)EDS 测试结果

Fig.4-2 CF-PPy sample (a) optical image (b) SEM test results (c) FT-IR test results (d) EDS test results

由于氮的 X 射线峰较小,因此在低氮含量的样品中,氮的信号可能受到背景噪声的干扰,特别是在像碳纤维这样含有大量碳和氧等元素的样品时,所以我们通过 XPS 来表征是否含有 N 元素的存在判断是否改性成功。XPS 谱图如下图 4-3 所示,聚吡咯改性碳纤维的表面元素组成和化学状态显示出显著的变化,尤其表明聚吡咯在改性过程中对碳纤维表面化学性质的影响。碳元素(C)占主要比例,约 78.6%,氮元素(N)和氧元素(O)的含量分别为 5.99%和 15.41%,这表明聚吡咯的引入增加了氮和氧的含量。具体而言,C1s 谱峰中出现了 C-H、C-N 和 C-O 等不同的化学状态,尤其是 C-N 信号的明显增强,直接证明了聚吡咯中氮元素的存在,并且这些氮元素与碳纤维表面形成了共价键。这表明聚吡咯成功地将氮源引入碳纤维表面。N1s 谱峰中,-NH、C=N 和 NO_x 等不同的氮化学态信号也进一步验证了聚吡咯的改性作用,其中 C=N 和-NH 的峰值说明氮元素与碳纤维发生了化学结合,形成了多种氮源结构。O1s 谱峰中的 C=O 和 C-O 信号则表明氧化反应的发生,可能是聚吡咯改性过程中氧化剂与碳纤维表面反应形成了氧化基团,这也证实了聚吡咯改性的成功。

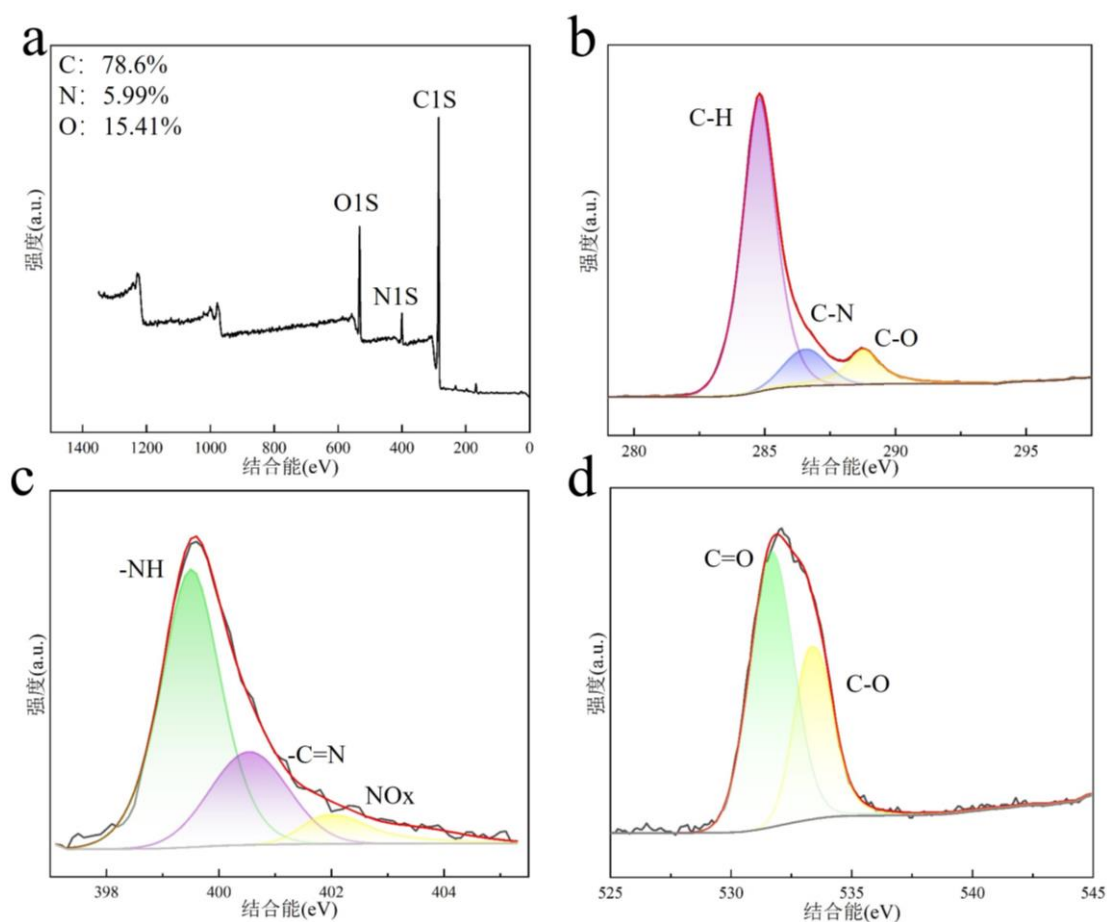


图 4-3 CF-PPy 的 XPS(a)总峰(b) C1s 谱峰(c) N1s 谱峰(d) O1s 谱峰

Fig.4-3 XPS (a) total peak (b) C1s peak (c) N1s peak (d) O1s peak of CF PPy

在实际的水处理中,样品的本身的强度也是十分重要的,否则难以在水中长期稳定的进行工作,所以对机械性能做出研究。如图 4-4 所示 CF-PPy 所承受的最大应力为 0.67 MPa,比 CF 的应力要提升了 22%,这是因为聚吡咯的聚合过程会在碳纤维表面形成均匀的涂层或薄膜,这种涂层能够对碳纤维的形态和组织结构进行改性。通过改变碳纤维的表面形态,聚吡咯能够提升材料的力学性能,不仅如此还可以通过与碳纤维表面形成氢键、 π - π 相互作用或共价键等方式增强碳纤维之间的界面粘结力。这种增强的界面粘结力有助于提高材料的整体力学性能,这样更能保证 CF-PPy 在水中工作的稳定性,为实际应用提供了有效的保障。

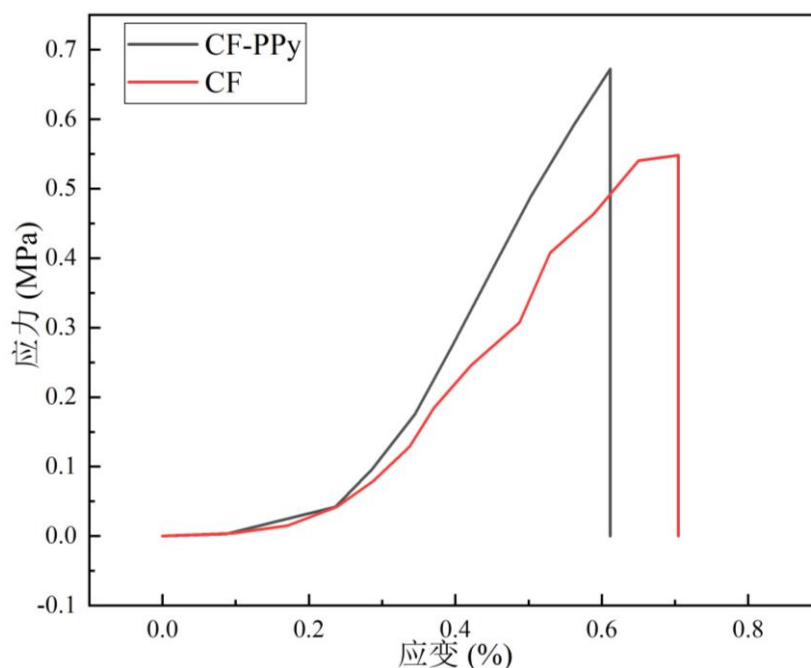


图 4-4 CF 以及 CF-PPy 的拉伸应力应变曲线

Fig.4-4 Tensile stress-strain curves of CF and CF-PPy

4.2.3 PDA 改性及其力学性能研究

如图 4-5(a)所示,可以看出在光学图片下, CF-PDA 黑色的程度要比 CF 的明显更深一点, 这样可以初步确认是 PDA 在 CF 表面的聚合。之后我们通过 4-5(b)的 SEM 图像来对样品的表面进行更进一步的探究, 从 SEM 图片中可以明显的看出, 在光滑的碳纤维表面聚合出了团簇的 PDA, 正是 PDA 的作用导致碳纤维表面显得更加黑。为了更加确定是 PDA 在 CF 的表面聚合, 通过 FIRI 光谱对改性前后的样品进行表征, 如图 4-5(c)所示与未改性碳纤维相比, PDA 改性后出现了一些新的吸收峰, 同时部分原有吸收峰强度发生变化, 3441.35 cm^{-1} (-OH 和 -NH 的伸缩振动) 此宽峰变得更宽, 是由于 PDA 中丰富的酚羟基(-OH)和胺基(-NH)引入的结果。 1623.77 cm^{-1} (C=C 和 C=N 的振动峰) 归因于 PDA 的芳香结构(C=C)和胺基的 C=N 振动。 1104.53 cm^{-1} (C-O 的伸缩振动) 来源于聚多巴胺的酚羟基(-OH)中的 C-O 键。PDA 分子中含有酚羟基(-OH)、胺基(-NH)、芳香环(C=C)和喹啉(C=N)等特征基团, 其在红外光谱中对应的吸收峰在改性碳纤维的光谱中均得以体现, 改性后出现的新峰和峰强度的变化, 直接证实了 PDA 涂层成功沉积。不仅如此, 还通过对 EDS 对改性之后碳纤维毡的表面进行元素分析, 如图 4-5(d)所示, 发现除了回收碳纤维含有的 C、Si 元素之外, 还存在着 O 元素, 这是因为 PDA 本身的元素组成就有着 O 元素, 而 Cl、Cu、S 等元素的存在则是因为在改性过程中的 HCl 和 CuSO_4 , 通过 EDS 也能够表明 PDA 在 CF 表面的沉积。

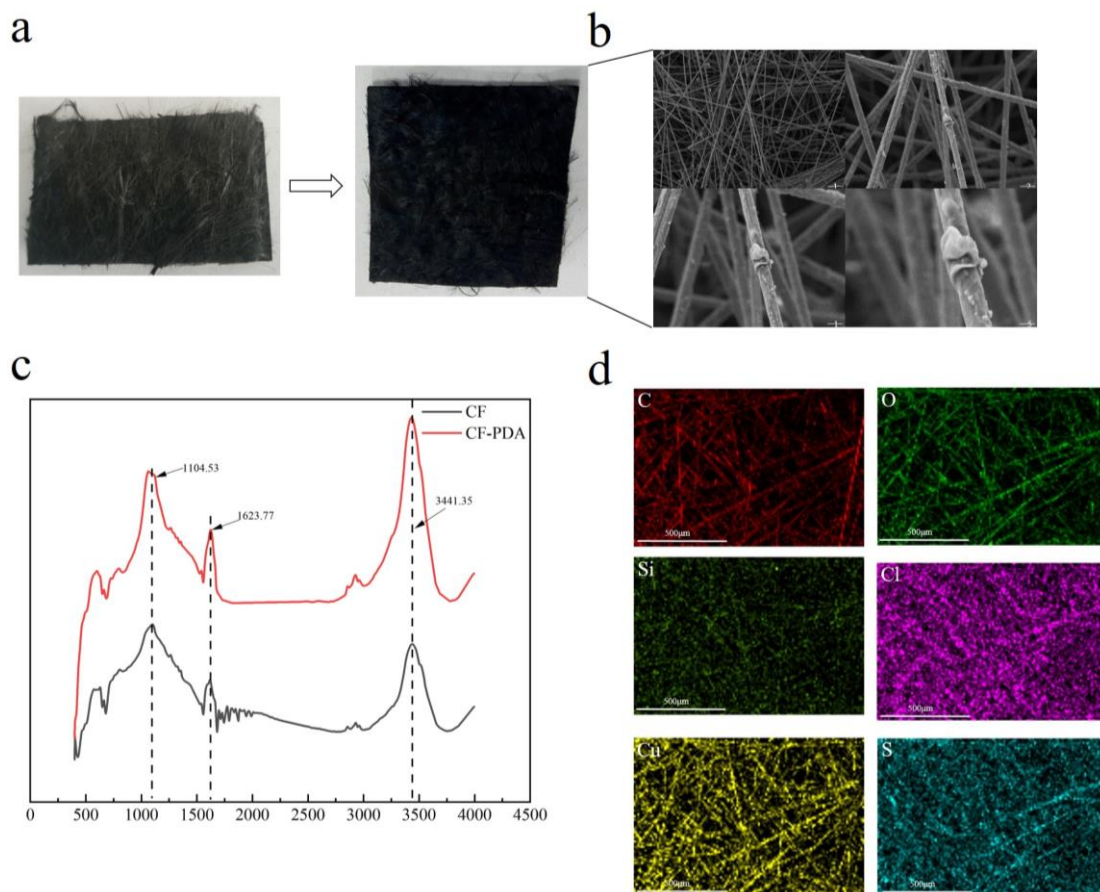


图 4-5 CF-PDA 样品(a)光学图片(b)SEM 测试结果(c)FT-IR 测试结果(d)EDS 测试结果

Fig.4-5 CF-PDA sample (a) optical image (b) SEM test result (c) FT-IR test result (d) EDS test result

为了进一步证明聚多巴胺改性的成功性,通过 XPS 对样品表面进行测试表征,如图 4-6 所示可以看出聚多巴胺(PDA)对碳纤维表面的改性作用得到了明确的证实。图 4-6(a)显示改性碳纤维的元素组成,其中碳(C)、氮(N)和氧(O)的相对含量分别为 75.31%、5.92% 和 18.76%。氮元素的显著存在表明聚多巴胺分子中的氨基团成功地引入到碳纤维表面,作为改性过程的直接证据。C1s 谱图中, C-N、C-O 和 C-C 三个峰的出现进一步支持了聚多巴胺的改性作用。特别是 C-N 峰的增强,表明聚多巴胺中的氨基团通过化学键与碳纤维表面发生了反应,形成了牢固的碳氮键,从而证明聚多巴胺在碳纤维表面的改性效果。N1s 谱图显示了 C-N 和 C=N 的峰,同时还观察到少量的 N^+ 峰,表明氮元素在改性过程中不仅参与了碳氮键的形成,还可能与氨基类结构相关。这一结果进一步验证了聚多巴胺氨基团的参与。O1s 谱图显示了 C-O 和 C-OH 的峰,指示了氧基团的引入,这些氧基团通常源自聚多巴胺中的苯醌和醌胺结构,进一步证实了聚多巴胺对碳纤维表面的改性,导致了更多氧化物和氢键的生成。

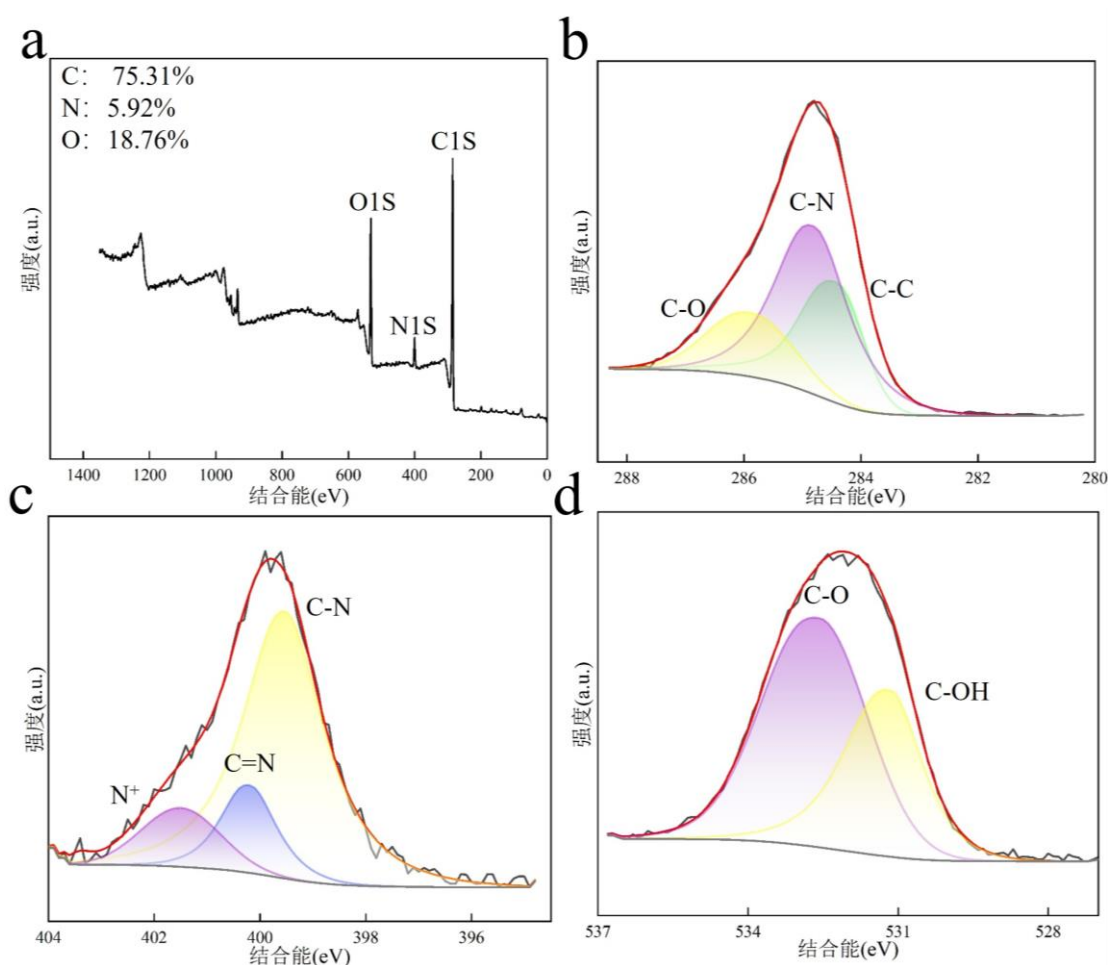


图 4-6 CF-PPy 的 XPS(a)总峰(b) C1s 谱峰(c) N1s 谱峰(d) O1s 谱峰

Fig.4-6 XPS (a) total peak (b) C1s peak (c) N1s peak (d) O1s peak of CF PPy

同样我们对 CF-PDA 的机械性能做出测试, 如图 4-7 所示 CF-PDA 能够承受的最大应力为 1.27 MPa, 相较于 CF 提高了 130%, 有着很大的提升, 这是因为聚多巴胺具有类似于天然酪氨酸的结构, 能够在碳纤维表面形成一层致密的涂层, 这个涂层可以提供一定的保护作用, 防止碳纤维受到环境的影响, 不仅如此聚多巴胺的化学结构使其在力学作用下能够提供一定的柔性和缓冲作用, 所以改性后的碳纤维毡会有着较高的强度。

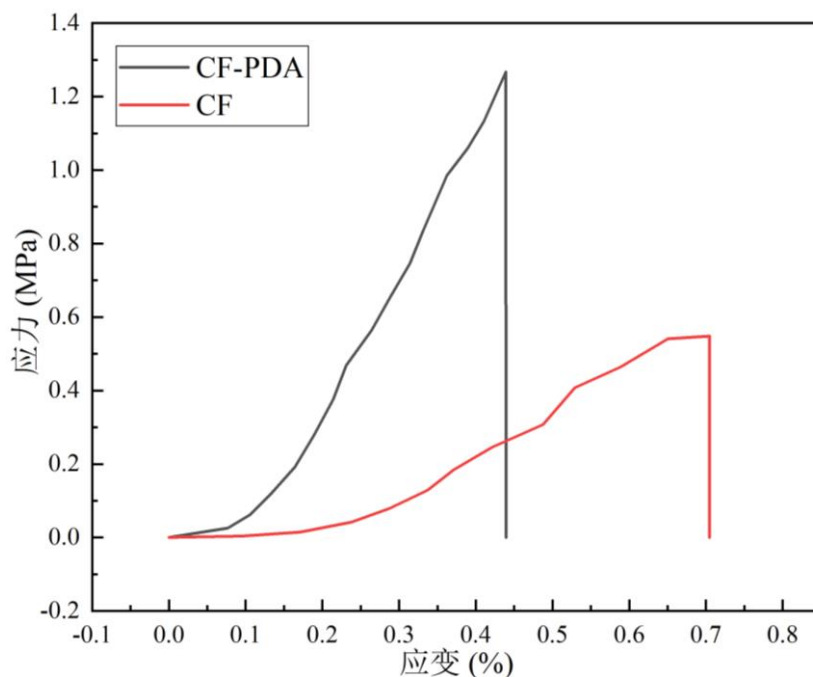


图 4-7 CF 以及 CF-PDA 的拉伸应力应变曲线

Fig.4-7 Tensile stress-strain curves of CF and CF-PDA

4.2.4 改性对碳纤维毡的光热性能研究

强的的宽光谱吸收是实现高效太阳能海水淡化的前提。通过紫外-可见-近红外分光光度计测量碳纤维毡在改性前后在整个太阳能光谱范围内的透射率和反射率。如图 4-8 所示展示了改性前后的碳纤维毡在紫外、可见光和近红外光谱范围内的透射率和反射率。通过透过率(T)和反射率(R)计算得出吸收率($A=1-T-R$)。从图中可以看出,无论是原始碳纤维毡(CF)、改性后的 CF-PPy 还是 CF-PDA,材料在整个太阳光谱范围内的吸光率达到了 99%。这意味着它们对太阳光的吸收非常强,尤其是宽光谱范围内的光吸收,这一特点对于实现高效太阳能海水淡化至关重要。由于光吸收率达到 99%,这些材料表现出了卓越的光吸收性能,能够最大程度地利用太阳光能量,这正符合高效界面式太阳能蒸发器所需的性能要求。

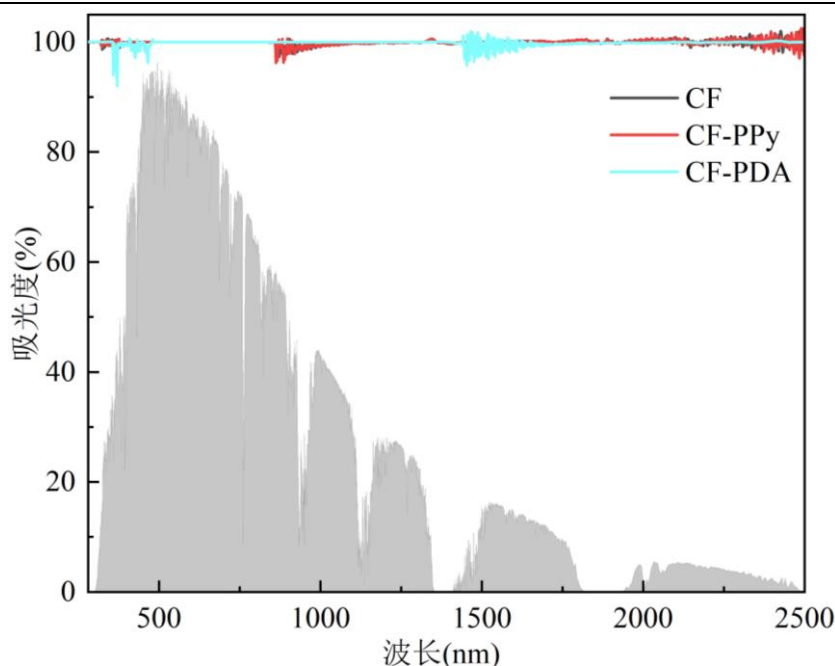


图 4-8 改性前后样品的吸光度

Fig.4-8 The absorbance of samples before and after modification

为了深入研究碳纤维改性对其光热蒸发性能的影响,本实验通过在模拟阳光条件下进行水蒸发实验,探讨不同改性材料在光热蒸发过程中的表现。实验中,太阳能氙气灯为样品提供了接近自然阳光强度的光照条件。水蒸发的主要途径是通过碳纤维间的毛细管效应,将水分传输到样品表面,从而加速蒸发过程。我们通过一套实时监测系统,研究了在不同条件下样品的水蒸发性能,同时借助红外热成像仪对样品的温度响应进行测量。在实验开始时,使用电子天平记录不同条件下蒸发系统的质量变化,实验周期为 1 h,并每隔 5 分钟记录一次质量数据。为了进一步评估样品的暗蒸发速率,我们首先在无光照的条件下进行水蒸发实验。如图 4-9(a)所示,在完全黑暗的环境下,样品的暗蒸发速率为 $0.051 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。根据图 4-9(b)中的数据,计算得出在光照条件下,CF 样品的蒸发速率为 $1.04 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,相较于暗蒸发速率,蒸发速率显著提高,表明碳纤维具有优异的光热转换性能,适合作为光热蒸发材料。通过进一步改性,CF-PDA 的蒸发速率提升至 $1.25 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,比 CF 提升了约 20%,表明 PDA 改性能在一定程度上提高光热效应并优化蒸发性能。而 CF-PPy 的蒸发速率则达到了 $1.58 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,比 CF 提升了 52%,这一显著的提升表明,PPy 改性在增强碳纤维光热蒸发性能方面效果最佳。此外,利用红外热成像仪,我们记录了蒸发器表面温度在 1 h 内的变化,并将其绘制成温度随时间变化的曲线(如图 4-9(c)和图 4-9(d)所示)。实验结果表明,蒸发器表面温度在实验开始阶段迅速升高,约 20 分钟后趋于平稳。具体来说,CF-PPy 样品的表面温度最高,达到了 43.7°C ,明显高于 CF-PDA(41.3°C)和 CF(40.5°C),这进一步验证了 PPy 改性对碳纤维光热转换性能的最佳提升效果。

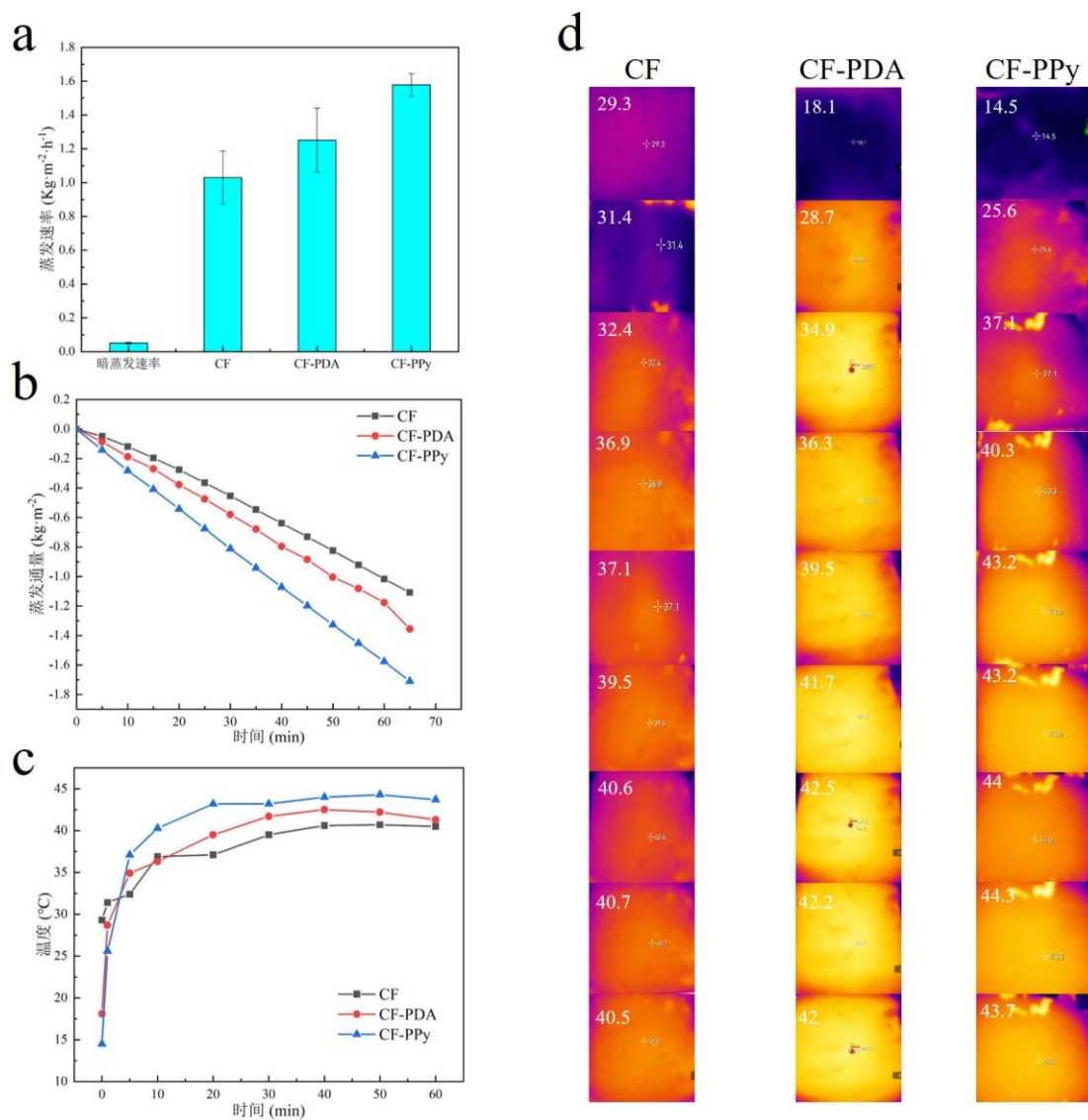


图 4-9 改性前后样品光热条件(a)蒸发速率(b)蒸发通量(c)温度变化(d)热红外图
Fig.4-9 Thermal conditions of samples before and after modification (a) evaporation rate (b) evaporation flux (c) temperature change (d) thermal infrared image

4.2.5 改性碳纤维毡的电热性能探究

为了探究改性碳纤维的电热以及电热催动水蒸发能力, 通过将直流电源设定为事先确定好参数 5 V, 进行水蒸发实验, 蒸发系统中的水传输主要通过碳纤维之间的毛细管效应传输到样品的表面来进行水蒸发, 通过实时测量系统来研究样品在不同的条件下的水蒸发性能, 相应的温度响应由红外热成像仪测量。蒸发开始时用电子天平记录系统记录在不同条件下 1 h 内每隔 5 分钟的质量变化, 如图 4-10(a)所示。从结果计算出蒸发速率如图 4-10(b)所示, 计算出 CF 在电热条件下的蒸发速率可以达到 $1.99 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 相对于在纯光条件下的蒸发速率提升了 93%, 这说明碳纤维有着良好的电热性能, 适合用作于电热元件。通过聚多巴胺改性之后的 CF-PDA 的蒸发速率达到了 $2.65 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 相较于 CF 的电热蒸发速率提升了 33%说明 PDA 改性确实达到了改良 CF 的电热性能的效

果。最后通过聚吡咯改性之后的 CF-PPy 的蒸发速率达到 $3.20 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 相较于 CF 的蒸发速率提高了 61%，大幅度提升了 CF 的电热性能，说明 PPy 改性对于 CF 的电热有着比 PDA 改性更好的效果。同时利用红外热成像仪记录蒸发器在 1 h 内的表面温度的变化，并绘制成时间的函数。如图 4-10(c、d)所示在实验开始时蒸发器表面迅速升温，在 20 分钟之后逐渐趋于平稳，而温度的结果也正如我们所预料的，CF-PPy 的表面温度可以达到 56.8°C ，比 CF-PDA 的 52.8°C 和 CF 的 46.9°C 均要高出一部分，这更加确定了 PPy 改性对 CF 电热效果影响最佳。

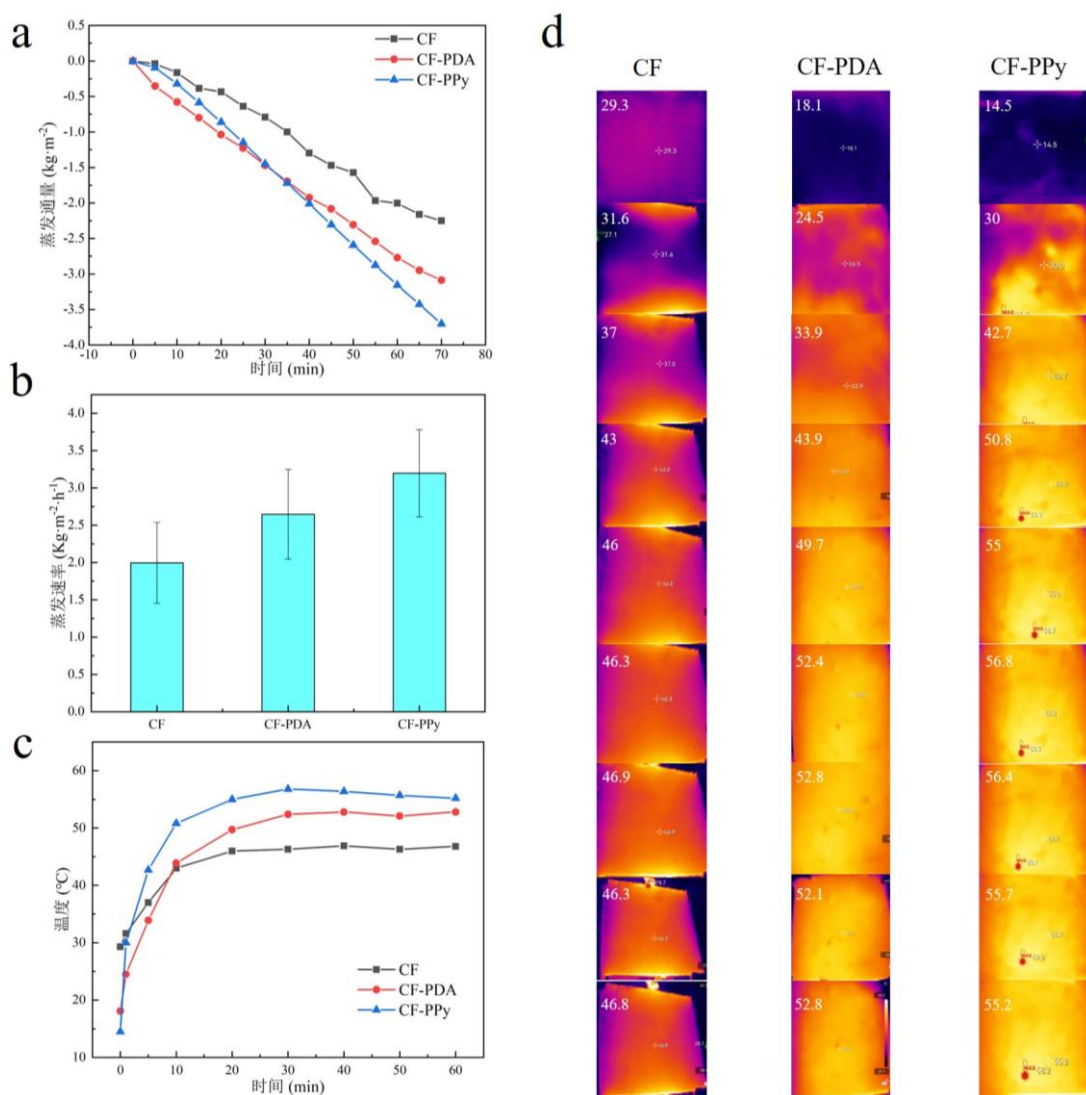


图 4-10 改性前后样品电热(a)蒸发通量 (b)蒸发速率(c)温度变化(d)热红外图

Fig.4-10 Sample electric heating before and after modification (a) Evaporation flux (b) Evaporation rate (c) Temperature change (d) Thermal infrared image

4.2.6 光电耦合界面蒸发器的光电性能研究

为了研究碳纤维改性对其光电耦合界面蒸发性能的影响，本实验在结合太阳能氙气灯和直流电源的条件下，模拟了太阳能光强与 5 V 电压共同作用的环境，对不同样品进行了水蒸发实验。蒸发过程中，水分的传输主要通过碳纤维之间的毛细管效应，将水分

引导到样品表面，从而加速蒸发。通过实时监测系统，研究了不同条件下样品的水蒸发性能，同时使用红外热成像仪记录了样品的温度响应。实验开始时，电子天平记录了在不同条件下，蒸发系统每隔 5 分钟的质量变化，实验时长为 1 h。如图 4-11(a)所示，计算结果表明，在光电耦合条件下，CF 样品的蒸发速率为 $3.52 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，相较于仅光照条件下的蒸发速率提高了 238%，相比于电热蒸发速率则提高了 77%。这一结果表明，光电耦合方式在碳纤维界面蒸发中的应用非常成功，能够显著提高其蒸发速率，具有重要的实际应用前景。在 PDA 改性的条件下，CF-PDA 的蒸发速率达到了 $3.87 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，相比于 CF 的蒸发速率提高了 10%，表明 PDA 改性在一定程度上提升了光电耦合界面蒸发的效果。CF-PPy 样品则表现出更显著的提升，其蒸发速率达到了 $5.36 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，比 CF 的蒸发速率提高了 52%，这表明 PPy 的改性在增强光电耦合界面蒸发性能方面效果最佳。同时，利用红外热成像仪监测了蒸发器表面温度的变化，并绘制了温度随时间变化的曲线(如图 4-11(c、d)所示)。实验结果显示，蒸发器表面温度在实验开始后迅速上升，并在 10 分钟后趋于平稳。具体来看，CF-PPy 的表面温度最高，达到了 62.8°C ，明显高于 CF-PDA 的 60.2°C 和 CF 的 57.8°C ，这一结果进一步确认了 PPy 改性对碳纤维光电耦合蒸发性能的最佳提升作用。

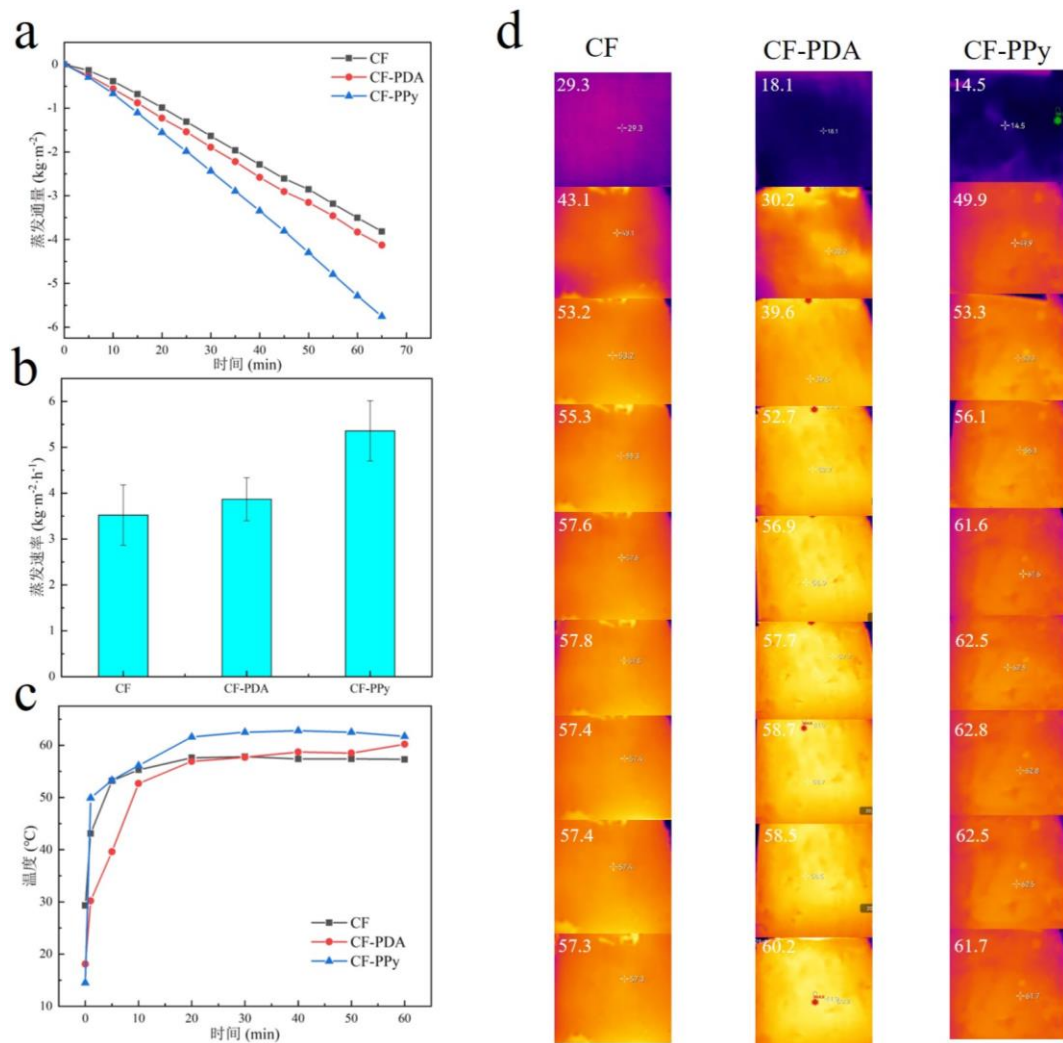


图 4-11 改性前后样品光电耦合(a)蒸发通量 (b)蒸发速率(c)温度变化(d)热红外图

Fig.4-11 Photoelectric coupling of samples before and after modification (a) Evaporation flux (b) Evaporation rate (c) Temperature change (d) Thermal infrared image

4.3 本章小节

在本章研究中，碳纤维毡的电热性能、光热性能以及其改性对这些性能的影响得到了深入的探讨。首先，电压对碳纤维毡的电热效果起着至关重要的作用。通过施加不同电压(3 V、4 V、5 V、6 V)后，蒸发速率随着电压的增大而显著提高，特别是在 5 V 电压下，电热性能得到了优化。在 5 V 条件下，碳纤维的蒸发速率达到了最优水平，而进一步提高电压至 6 V 时，蒸发速率的增幅变得较小，提示在实际应用中可能需要平衡电热效能与能耗之间的关系。

改性对碳纤维的性能提升同样发挥了关键作用。聚吡咯(PPy)和聚多巴胺(PDA)两种改性方法显著改善了碳纤维的导电性、机械强度及光热性能。PPy 改性后，碳纤维的光热蒸发速率提升最为显著，相较于未改性碳纤维，提升了 52%。这一效果不仅表明 PPy 的导电性有助于增强电热效应，也显示出其在提升光热性能方面的潜力。而 PDA 的改性效果虽然不如 PPy 显著，但也能有效提升碳纤维的强度和光热蒸发速率，证明其在一定条件下对材料的性能优化同样有积极作用。

进一步的实验表明，光电耦合蒸发模式能够在一定程度上提高碳纤维的蒸发速率。通过将光热和电热效应结合，样品的蒸发速率显著高于单独使用光照或电热时的结果。例如，CF-PPy 在光电耦合条件下的蒸发速率提高了 52%，进一步表明聚吡咯改性对于提升光电耦合蒸发性能的效果尤为突出。

尽管 PPy 和 PDA 改性能够显著提升碳纤维的性能，但这些改性材料的耐久性、长期稳定性和生产成本仍是需要重点关注的问题。特别是在实际应用过程中，材料的长期承受能力、耐腐蚀性以及环境友好性可能会直接影响其商业化前景。因此，未来的研究可以进一步探讨这些改性材料在长期使用中的性能变化，并优化其制备工艺，以便在不同领域实现更广泛的应用。此外，碳纤维毡的改性方法也可以与其他纳米材料或功能性涂层结合，进一步提升其在极端环境下的稳定性和效率。

第 5 章 改性碳纤维毡的光电耦合在界面蒸发应用中的研究

5.1 引言

全球水资源短缺和污染问题日益严重，尤其是海水淡化和废水处理的需求不断上升。根据联合国的统计，超过 20 亿人生活在水资源严重缺乏的地区，而海水淡化作为一种重要的解决方案，逐渐成为解决水资源短缺问题的重要途径。而在处理染料废水方面，染料废水含有复杂的有机物质和无机污染物，处理难度较大，传统的处理方法如活性炭吸附、化学沉淀和生物处理等，往往存在效率低、处理时间长和成本高等问题。因此，寻找一种高效、低能耗的水处理技术成为当今研究的热点。

界面蒸发技术作为一种新型的水处理手段，因其较低的能量消耗和简便的操作特点，逐渐成为海水淡化和废水处理的研究热点之一。界面蒸发利用材料表面和液体界面之间的热传递来促进水分蒸发，能够在较低的温度下实现水的蒸发，尤其在太阳能驱动的环境下，展现出广泛的应用潜力。尽管界面蒸发技术在理论和实验中表现出较高的效率，但在实际应用中仍面临着一系列挑战，尤其是在复杂水质环境中的应用。传统的界面蒸发器虽然可以利用太阳能进行蒸发，但由于盐分沉积和污染物阻塞的原因，其蒸发效率在实际应用中会有所降低。因此，如何优化界面蒸发器的性能，尤其是在复杂水质环境下的稳定性和高效性，成为了亟待解决的问题。近年来，碳基材料，尤其是碳纤维材料，因其优异的导热性、电导性和机械性能，成为了界面蒸发器的重要候选材料。为了克服这些问题，研究者们通过表面聚合物改性方法，进一步改善了碳纤维的光热、电热和抗腐蚀性能，增强了其在复杂水质环境中的适应性。此外，光电耦合技术的引入，将光热效应与电热效应相结合，使得界面蒸发器在低光照或高盐浓度环境下仍能保持较高的蒸发效率，这为海水淡化和废水处理提供了更为高效的解决方案。

为了验证和进一步优化界面蒸发技术在海水淡化和染料废水处理中的应用，在上一章研究的前提下选择了 CF-PPy 材料，并结合光电耦合技术，研究其在不同水质环境下的蒸发性能。通过光热、电热和光电耦合三种加热方式，比较其在海水和染料废水中的蒸发效果，分析不同加热方式和水质环境对蒸发速率的影响。并通过紫外光谱分析，对处理后的水体透明度进行分析表征，观察该蒸发器在染料废水处理中的性能。这些研究为界面蒸发技术在实际应用中的推广奠定了基础，尤其是在低能耗、低成本的水处理系统中，展现了巨大的应用潜力。

5.2 结果与讨论

5.2.1 界面蒸发器的抗盐性

为了证实所制备的蒸发器能在海水淡化中的可操作性，我们将 CF-PPy 蒸发器应用于 3.5% 浓度模拟海水环境下进行太阳光纯化实验。实验结果如 5-1(a) 图所示，可以看出在纯光热条件下仅经过 1 h 的海水处理之后在蒸发器表面就出现了盐分结晶，这是因为在水蒸发的过程中盐分并不会随着蒸发的水一起流失，而是会沉积在蒸发器表面，随着导水层的水而流回其中，但是总会有部分盐结晶沉积在蒸发器表面影响水蒸发的进行，但是在光电耦合界面蒸发中，碳纤维表面并没有沉积盐结晶，而是向电极负极沉积，不会影响水的蒸发。并且在海水环境下，CF-PPy 在光热、电热和光电耦合的条件下的蒸发速率分别为 $1.50 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $3.10 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $4.39 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 依旧保持着一个相当高的蒸发速率进行工作，如图 5-1(b、c) 所示，这也证明了 CF-PPy 蒸发器在海水淡化领域的巨大潜力。

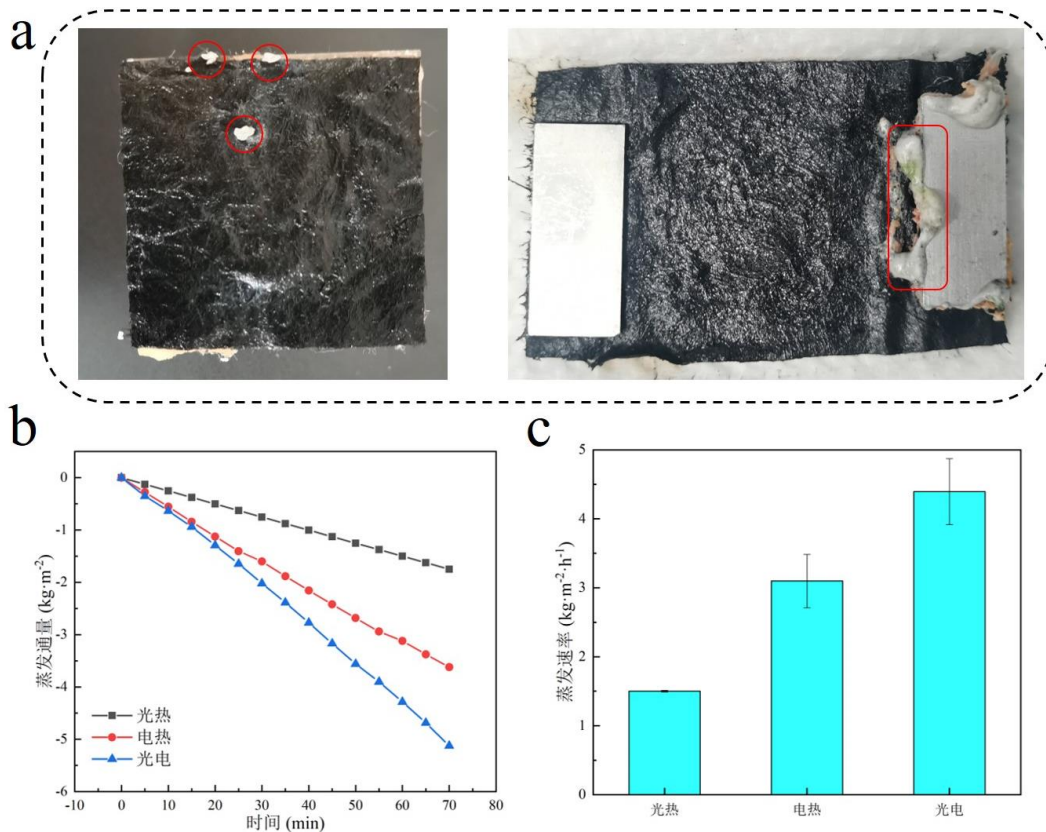


图 5-1 CF-PPy 样品在模拟海水条件下(a)在光热以及光电耦合条件下表面盐沉积情况(b)蒸发通量(c)蒸发速率

Fig.5-1 CF-PPy sample under simulated seawater conditions (a) surface salt deposition under photothermal and optoelectronic coupling conditions (b) evaporation flux (c) evaporation rate

为了针对各种复杂的水质环境我们研究了 CF-PPy 界面蒸发器在不同盐水浓度下的蒸发速率，并探讨了不同加热方式对蒸发效果的影响。实验数据如图 5-2 显示，在光热条件下，蒸发速率随着盐浓度的增加逐渐下降，从 3.5% 浓度时的 $1.50 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 降至 12.5%

浓度的 $1.39 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。电热条件下的蒸发速率总体高于光热条件，但也随盐浓度增加呈下降趋势，3.5%浓度时为 $3.10 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，12.5%浓度时为 $2.90 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。而光电条件下在所有浓度下的蒸发速率均表现为最高，并且变化幅度较小，3.5%浓度时为 $4.39 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，12.5%浓度时为 $4.05 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。这表明，随着盐浓度的增加，蒸发速率普遍呈下降趋势，这可能与盐水溶液的沸点升高以及盐分对热传导的抑制作用有关。然而，光电加热方式通过结合光热与电热的优势，在不同盐浓度条件下仍能维持较高的蒸发速率。这表明 CF-PPy 界面蒸发器在高盐浓度条件下也能表现出较强的蒸发性能。这使得该界面蒸发器在海水淡化、盐水处理等应用中，能够在低温和低能耗条件下实现高效蒸发。其次，材料本身具有良好的导热性和耐腐蚀性，能够适应多种复杂的水质环境，并具有较长的使用寿命。此外，该界面蒸发器设计有较好的热管理能力，通过优化加热方式和材料特性，能够有效降低能量损失，提高整体系统的能源利用效率。因此，这种界面蒸发器在实际应用中，尤其是在需要长时间运行和节能的脱盐和水处理系统中，具有较大的潜力。

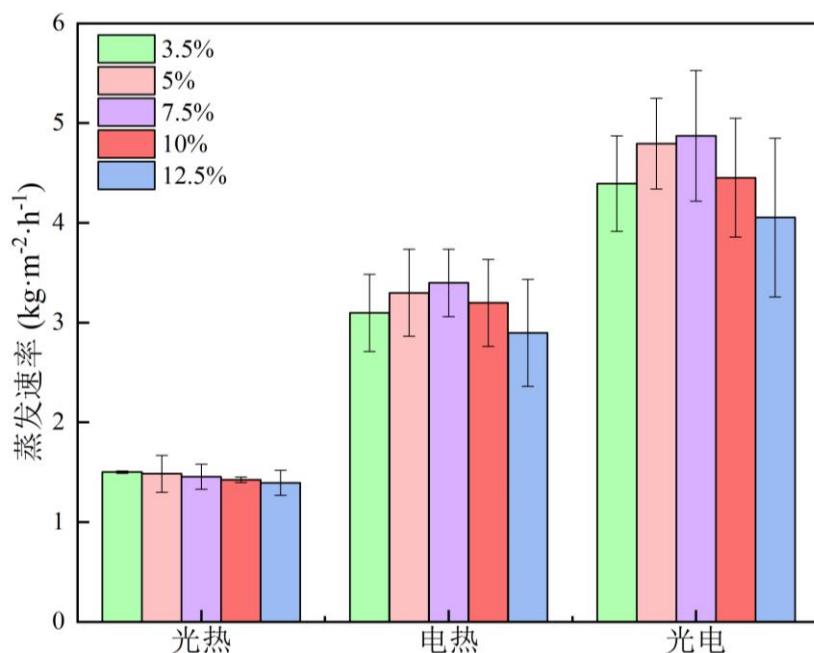


图 5-2 在不同浓度海水条件下光热、电热以及光电耦合蒸发速率

Fig.5-2 Under different concentrations of seawater, the evaporation rates of photothermal, electrothermal, and photoelectronic coupling

5.2.2 界面蒸发器的稳定性

为了评估蒸发器在实际应用中的稳定性，采用 CF-PPy 蒸发器进行持续 8 h 的光电耦合界面蒸发实验，并监测其蒸发速率及工作稳定性，结果如图 5-3(a)所示。实验结果表明，蒸发速率始终保持在约 $5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 的水平，尽管在长时间运行过程中呈现轻微下降趋势，但整体蒸发速率依然保持在较高的水平，充分证明了蒸发器在长时间运行中的良好稳定性。这一结果表明，CF-PPy 蒸发器具有较强的耐久性，能够有效地维持较高的

蒸发性能，尤其在对长期稳定性要求较高的应用中，展现出其优越的性能。此外，为了进一步验证蒸发器在不同环境条件下的稳定性，进行了不同光强条件下的光电耦合界面蒸发实验。通过调节氙气灯模拟太阳光，设置了 1 kW m^{-2} 、 2 kW m^{-2} 和 3 kW m^{-2} 的光照强度，实验结果如图 5-3(b、c)所示。随着光照强度的增加，蒸发速率显著提高，分别达到了 $5.36 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $8.1 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $11.3 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。这一趋势不仅表明蒸发速率与光照强度呈现正相关关系，还进一步验证了蒸发器在不同工作条件下的稳定性。特别是在强光照条件下，蒸发器能够持续高效工作，蒸发速率保持稳定并未出现明显波动，显示出其在恶劣环境中的可靠性。这一特性使其在实际应用中具有广泛的潜力，尤其适用于需要长时间稳定运行的环境，如海水蒸发、太阳能蒸馏等领域。

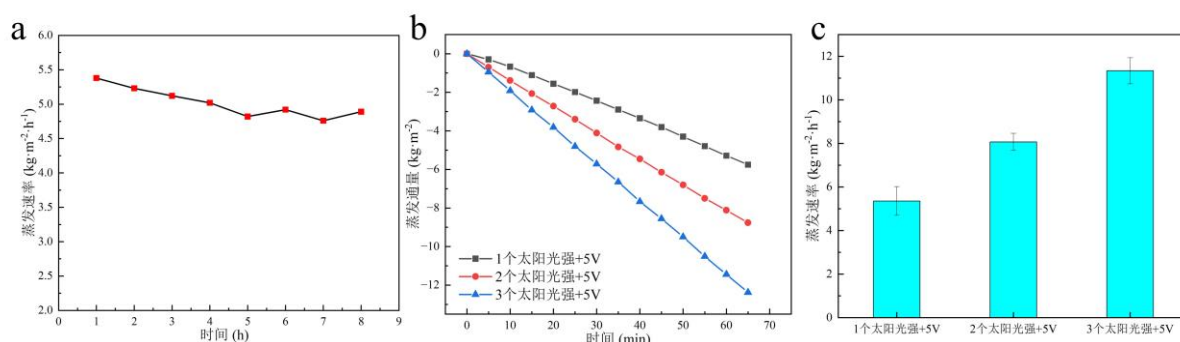


图 5-3 CF-PPy 样品(a)8h 的光电耦合蒸发速率(b)不同太阳光强下施加电压蒸发通量(c)同太阳光强下施加电压蒸发速率

Fig.5-3 CF-PPy sample (a) 8-hour photoelectric coupling evaporation rate (b) voltage evaporation flux under different solar intensities (c) voltage evaporation rate under the same solar intensity

5.2.3 染料废水净化

为了深入探讨蒸发器在染料处理过程中的效果，本研究选取了三种常见的染料亚甲基蓝(MB)、甲基橙(MO)和 Y-3RB，配置浓度为 50 mg/L ，进行了净化处理。实验结果如图 5-4(a、b、c)所示。通过蒸发器处理后，收集到的液体明显呈现出透明状态，且经过紫外光谱分析，染料的吸收峰几乎完全消失，显示出蒸发器在去除染料方面的显著效果。这表明，蒸发器不仅能够有效地去除染料，还能显著改善水体的透明度，从而提高水质。除了使用配制的染料溶液外，为了进一步验证蒸发器在实际应用中的效果，我们还采用了实际染料溶液进行处理。实验结果如图 5-4(d)所示，实际染料的紫外光谱吸收峰同样几乎完全消失，这进一步证明了蒸发器在处理实际染料溶液中的高效性和可靠性。通过这一系列实验，我们可以得出结论，蒸发器不仅在实验室条件下对染料处理效果显著，而且在实际染料溶液的处理过程中同样展现了卓越的性能，具有广泛的应用前景。通过对比不同染料的净化效果，本文还探讨了染料种类对蒸发器处理效果的影响，指出不同染料分子在吸收紫外光谱时的差异可能会影响处理效果，但总体而言，蒸发器都能在短时间内有效去除大部分染料分子，显著降低水中染料浓度。

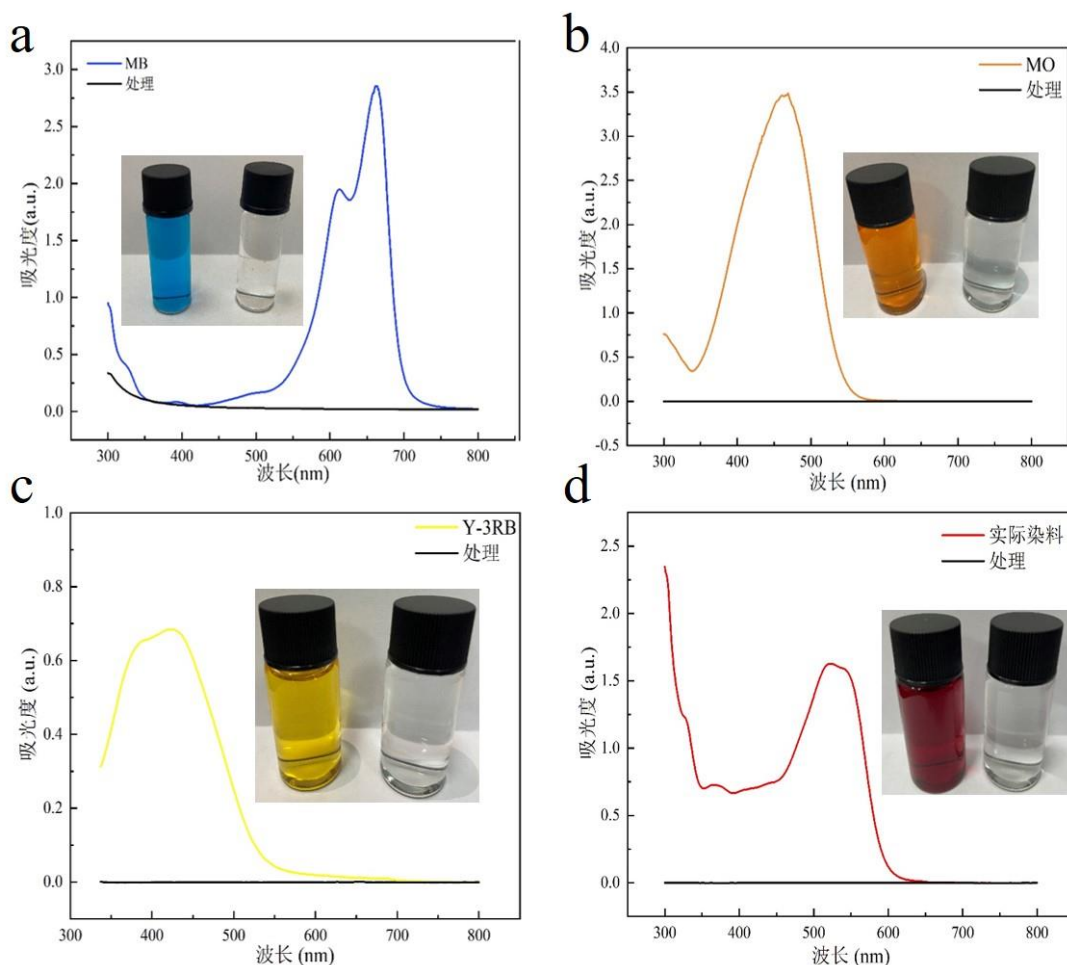


图 5-4 不同染料处理结果(a)亚甲基蓝(b)甲基橙(c) Y-3RB (d)实际染料

Fig.5-4 Different dye treatment results (a) methylene blue (b) methyl orange (c) Y-3RB (d) actual dye

5.2.4 模拟海水处理及水质检测

根据图 5-5(a)中的数据, 使用 CF-PPy 蒸发器进行太阳能海水淡化实验后, 模拟海水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 等主要离子的浓度在处理后可显著降低, 且这些浓度远低于世界卫生组织(WHO)规定的健康饮用水标准。具体而言, Na^+ 的浓度减少尤为明显, 表明 CF-PPy 蒸发器在去除盐分方面表现出优异的效果。经过处理的海水盐度低于反渗透和普通蒸馏所获得的盐度水平, 符合健康饮用水的标准, 进一步验证了 CF-PPy 蒸发器在太阳能海水淡化中的高效性和可行性。此外, 图 5-5(b)展示了 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 等有害金属离子的浓度变化, 结果表明这些污染物在处理后可得到显著去除。这表明 CF-PPy 蒸发器不仅能有效减少盐分浓度, 还能去除有害金属离子, 提升水质, 符合饮用水安全标准。CF-PPy 蒸发器的优异水处理性能, 使其在太阳能海水淡化系统中具有重要的应用潜力。它通过高效的蒸发和冷凝过程, 能够在低能耗的条件下实现海水的深度淡化, 为海水资源的可持续利用提供了可行的解决方案。

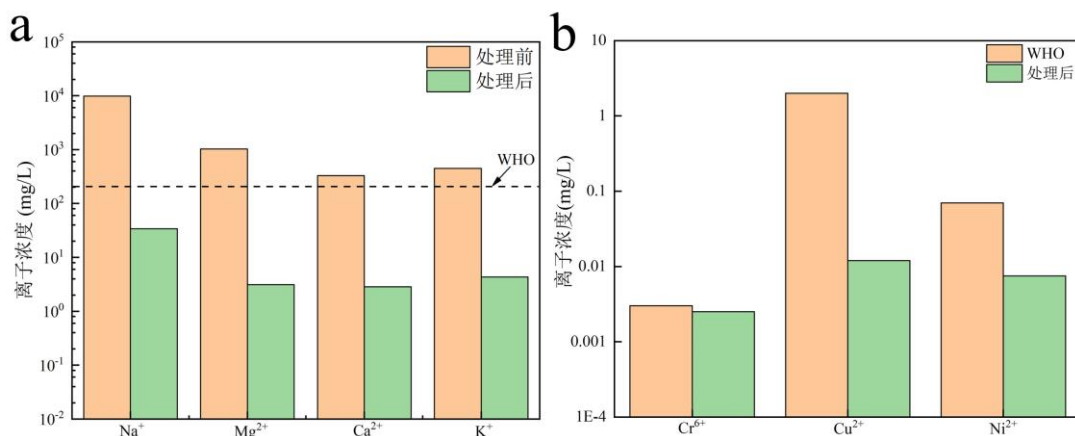


图 5-5 蒸发器对模拟海水处理后水质检测(a) Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺和 K⁺ (b) Cr⁶⁺、Cu²⁺和 Ni²⁺
Fig.5-5 Evaporator for water quality detection after simulated seawater treatment (a) Na⁺,Mg²⁺,Ca²⁺ and K⁺
(b) Cr⁶⁺,Cu²⁺ and Ni²⁺

5.2.5 界面蒸发器的户外蒸发测试

为了进一步探究光电耦合界面蒸发器在实际应用场景中的性能,本文利用太阳能光伏板、导线和碳纤维材料,成功制备了一款自制光电耦合界面蒸发器(图 5-6(a)所示)。该蒸发器的创新之处在于无需依赖传统直流电源供电,而是通过光伏板发电,将太阳能转化为电能,进而为碳纤维提供电热。此设计充分利用了太阳能资源,提高了能源利用效率。蒸发器的水蒸发量通过电子天平进行实时记录,为实验数据的可靠性提供了保障。为了验证其性能,本文在全天候户外环境下进行了蒸发实验,实验分别于 2024 年 9 月 29 日和 10 月 24 日的 9:00 至 16:00 期间,在安徽省芜湖市安徽工程大学纺织服装学院楼顶进行。实验还同步监测了不同时刻的太阳光强度变化。图 5-6(b)和图 5-6(d)分别展示了 CF-PPy 和 CF 两种材料的光强变化规律,而图 5-6(c)和图 5-6(e)则分别呈现了两种材料的蒸发速率随时间的变化趋势。从实验数据可以看出,太阳能光强在中午时分(约 12:00 至 13:00)达到峰值,但实验环境下的光强并未达到一个标准太阳光强(1 kW/m²)。尽管如此,蒸发速率的下降幅度并不显著,与实验室环境相比差异较小。这一现象可能与蒸发环境中的空气流动有关。空气流动可以有效增强水的蒸发速率,通过带走蒸发面上的水蒸气分子,减小了局部蒸汽浓度,提高了蒸发效率^[90]。此外,从全天候 8 h 的实验结果来看,无论是 CF-PPy 还是 CF 材料,其蒸发速率基本能够与太阳光强的变化规律保持一致。这说明光电耦合界面蒸发器能够较好地响应自然光强的动态变化,表现出良好的环境适应性。

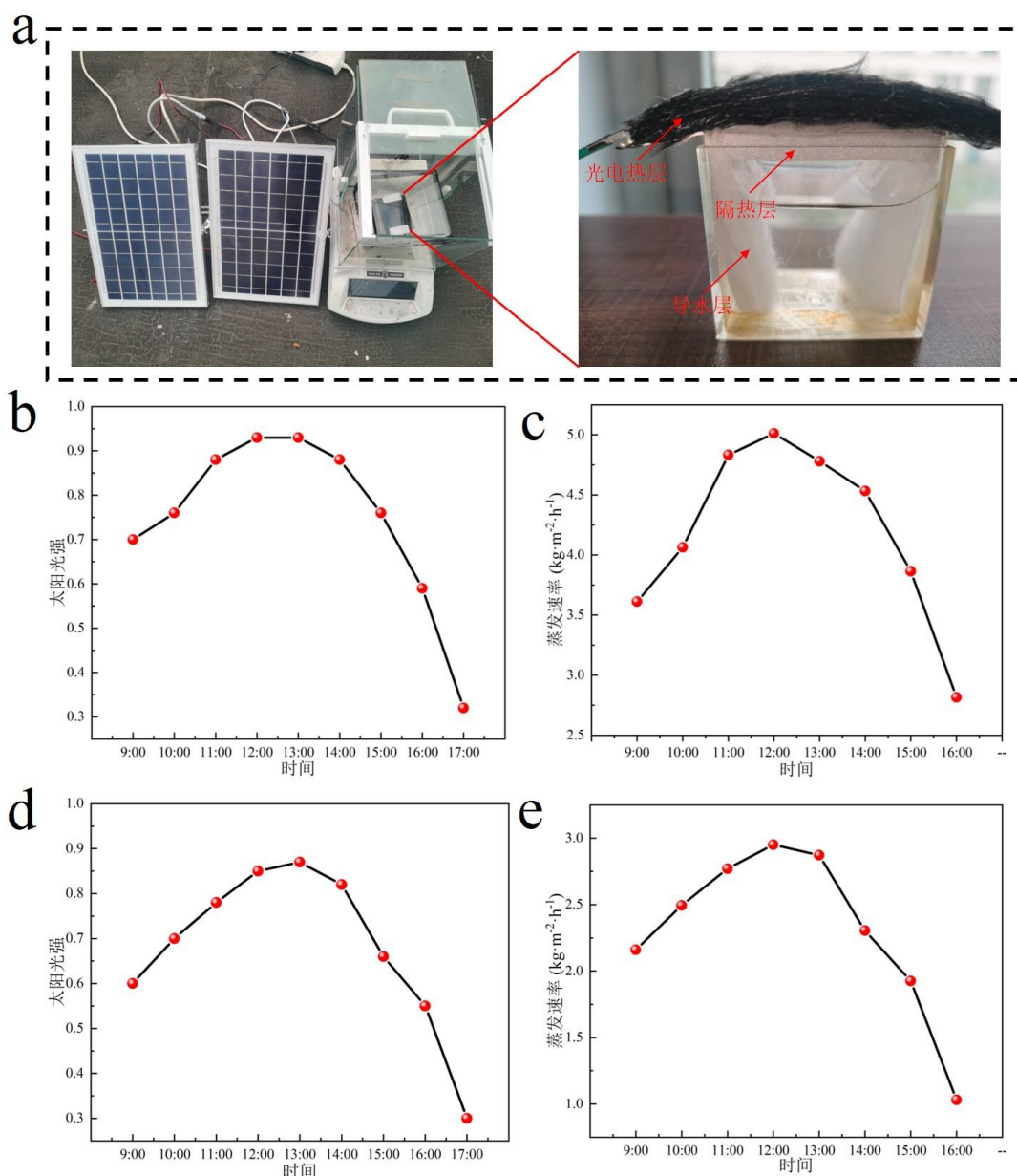


图 5-6 (a)实际蒸发器件(b) CF-PPy 蒸发时太阳光强变化(c)CF-PPy 的蒸发速率变化(d) CF 蒸发时太阳光强变化(e) CF 的蒸发速率变化

Fig.5-6 (a) Actual evaporation device (b) Change in solar intensity during CF-PPy evaporation (c) Change in evaporation rate of CF-PPy (d) Change in solar intensity during CF evaporation (e) Change in evaporation rate of CF

5.3 本章小节

本文在实验的前提下对蒸发器的实际应用做出一系列表征，详细探讨了 CF-PPy 蒸发器在海水淡化、染料废水净化和水质改善等领域的应用潜力，特别是在太阳能驱动的光电耦合界面蒸发中表现出的高效性和稳定性。实验结果表明，CF-PPy 蒸发器在不同水质环境中均表现出优异的蒸发性能，在模拟海水环境下，无论是光热、光电还是电热

条件下，蒸发速率均较高，尤其在光电耦合条件下，蒸发速率在各种盐浓度条件下依旧保持较高水平，表明其能够适应不同盐水浓度的变化，且盐分的沉积不会显著影响蒸发过程。这使得 CF-PPy 蒸发器在海水淡化和盐水处理领域具有重要的应用价值。

另外，CF-PPy 蒸发器表现出了较强的稳定性和耐久性。在长时间运行过程中，其蒸发速率虽呈现轻微下降趋势，但整体保持在较高水平，表明其能够满足长期稳定运行的需求。尤其在光照强度下，蒸发速率随着光强增加而提高，表明该蒸发器能够适应不同环境条件，并有效响应自然光的变化。此外，CF-PPy 蒸发器不仅能够去除盐分，还能有效去除水中的有害金属离子和染料，显著提升水质，具有广泛的实际应用前景。

在户外蒸发测试中，CF-PPy 蒸发器通过结合太阳能光伏板供电和碳纤维的热电转化，成功实现了自供能工作。这种设计不仅提高了能源利用效率，还展示了其在实际环境中应用的可行性，表明该系统具有良好的环境适应性和稳定性。

CF-PPy 蒸发器的成功应用为海水淡化和水质改善提供了一种低能耗、高效率的解决方案。未来，在进一步优化材料性能和系统设计的基础上，CF-PPy 蒸发器有望在更广泛的领域中发挥作用。特别是在偏远地区或能源短缺的环境下，光电耦合的自供能设计将极大降低运行成本，并提高系统的普及性和适用性。同时，通过结合智能化控制技术，蒸发器的运行效率和水处理质量还可以得到进一步提升。此外，随着纳米技术和新型材料的不断发展，CF-PPy 蒸发器的性能有望得到更大的提升，为全球水资源的可持续利用提供更为高效和经济的解决方案。

第 6 章 总结与展望

6.1 结论

本研究的主要目标是探索基于碳纤维材料的太阳能驱动界面水蒸发技术，并在通过施加电压的条件下研究其蒸发效果。研究表明，使用碳纤维材料，特别是在结合电压以及改性的光吸收层时，水蒸发速率得到了显著提高。主要结论如下

(1) 在界面蒸发装置中通过将回收的碳纤维制成粉末和毡状材料，获得了具有较高光吸收效率的光热材料，能够高效地将太阳能转化为热能，进而驱动水的蒸发。碳纤维材料的光吸收率可达到 99% 以上，显著优于其他传统材料。特别是在与 Janus 织物结合后，蒸发器的水蒸发速率得到了极大提升。研究表明，由于碳纤维粉的堆叠结构通过增加蒸发面积提高了蒸发效率，显示出显著的性能优势，蒸发速率可以达到 $1.56 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，在 8 h 的循环测试中，蒸发效率维持在 $1.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，证明其长期稳定工作性能。并通过在样品上施加电压，探究出电热蒸发的可能性。

(2) 进一步提升样品的蒸发效率，采用光电耦合的界面蒸发形式以及对碳纤维毡样品进行聚合物改性的方式，提升其光热以及电热性能。该系统能够在光照较弱的情况下通过外加电压提供额外的热量，从而确保蒸发系统的稳定运行，并且研究发现聚合物改性方法显著改善了碳纤维的导电性、机械强度及光热性能，聚多巴胺改性碳纤维(CF-PDA)的蒸发速率比 CF 提升了约 20%，而聚吡咯改性碳纤维(CF-PPy)的蒸发速率比 CF 提升了 52%。在电热以及光电耦合条件下，CF-PPy 的蒸发效率也达到最高，分别为 $3.20 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 以及 $5.36 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。改性以及施加电压的方法给界面蒸发器带来了在实际场景应用的更大的可能性。且在高浓度盐水中(20 wt% NaCl)，没有出现明显的盐积累。

(3) 通过模拟实验验证了所制备的界面蒸发器实际水处理中的优越性能。针对其具体实际中的应用进行研究，探究了其在海水淡化、染料废水净化和水质改善等领域的应用潜力，特别是在太阳能驱动的光电耦合界面蒸发中表现出的高效性和稳定性。实验结果表明，CF-PPy 蒸发器在不同水质环境中均表现出优异的蒸发性能，以及水处理效果。并且在搭建的户外蒸发器件也能够平稳的进行水蒸发实验，回收碳纤维的使用不仅增强了蒸发器的环保性，也提高了其经济性和可持续性。

回收碳纤维基太阳能驱动界面蒸发系统在水处理领域表现出优异的性能，特别是在提高蒸发速率、增强盐积累耐受性和延长使用寿命方面具有显著优势。所采用的光热与电热协同技术为系统的稳定性提供了有力保障，表明该技术在海水淡化、废水处理等领域具有广泛的应用前景。

6.2 创新点

(1) 增强碳纤维光热以及电热效果的改性

基于碳纤维良好的光热以及电热的条件下，对碳纤维表面进行沉积聚合一些物质，以期达到提高光热以及电热性能的效果。通过在碳纤维表面原位聚合导电聚合物，制备出聚合物改性碳纤维毡，在对改性之后的表面形态、吸光度等性能进行表征，重点研究改性对于碳纤维的光热以及电热性能的影响，从而导致的蒸发速率的影响。

(2) 界面光—电耦合水蒸发系统的构建

在普通太阳能界面水蒸发系统的基础下引入电能，通过施加电压在碳纤维的两端辅以太阳光的照射从而达到光—电耦合的效果，在户外条件下直接使用太阳能光伏板替代电源，并利用储能器件达到全天候的水蒸发。在蒸发的同时使用收集装置将冷凝的水收集起来，并对其作出测试表征，分析是否可以达到正常使用的水平。

6.3 展望

尽管本研究取得了显著成果，但仍有许多方面可以进一步优化，以提升碳纤维基太阳能驱动蒸发系统的效率与应用范围。

(1) 材料性能的优化仍是提高系统效率的关键。尽管碳纤维材料表现出了良好的光热转化能力，但进一步的表面改性或涂层可能会减少能量损失并提高热能利用效率。未来的研究可以探索与碳纤维相结合的其他导电材料或复合材料，诸如金属纳米粒子或导电高分子，以进一步增强光吸收与热导性能。

(2) 从实验室研究向实际应用的过渡仍是一个挑战。虽然实验室测试表明该系统具有较高的蒸发效率，但需要进一步评估其在真实环境中的长期运行效果，例如太阳辐射变化、温度波动以及设备老化等因素对性能的影响。因此，开展中试规模的试验与实际环境下的测试，是进一步验证系统实用性的必要步骤。此外，实际应用中可能面临的各种环境条件需要考虑，以确保该系统在不同气候条件下的适应性和稳定性。

(3) 能量存储技术的结合可以为系统的持续运行提供更多支持。通过结合太阳能与储能技术(如电池或超级电容器)，可以确保在夜间或阴天时依然能保持高效的水蒸发过程。未来研究中应关注开发更加高效且低成本的储能系统，以提升光电耦合蒸发系统的整体性能。

(4) 碳纤维基太阳能驱动界面蒸发系统的应用前景广阔。除了海水淡化和废水处理外，未来还可以拓展到农业水净化、工业废水处理等领域。随着技术的不断发展，碳纤维基系统在不同水处理场景中的应用将得到进一步推广，尤其是在水资源短缺的地区，这一技术可能成为解决水危机的重要手段。

基于回收碳纤维的太阳能驱动界面水蒸发系统具有较大的发展潜力。在未来的研究中，继续优化材料性能、扩大应用范围并结合能量存储技术，将有助于推动这一技术的广泛应用，为全球水资源短缺问题提供可持续的解决方案。

参考文献

- [1] GAO S, DONG X, HUANG J, et al. Bioinspired Soot-Deposited Janus Fabrics for Sustainable Solar Steam Generation with Salt-Rejection [J]. *Glob Chall*, 2019, 3(8): 1800117.
- [2] LI G, LU L. Modeling and performance analysis of a fully solar-powered stand-alone sweeping gas membrane distillation desalination system for island and coastal households [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205.
- [3] JANG H, CHOI J, LEE H, et al. Corrugated Wood Fabricated Using Laser-Induced Graphitization for Salt-Resistant Solar Steam Generation [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(27): 30320-7.
- [4] HUANG C H, HUANG J X, CHIAO Y H, et al. Tailoring of a Piezo-Photo-Thermal Solar Evaporator for Simultaneous Steam and Power Generation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(17).
- [5] XU K, WANG C, LI Z, et al. Salt Mitigation Strategies of Solar-Driven Interfacial Desalination [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31(8).
- [6] GENG Y, SUN W, YING P, et al. Bioinspired Fractal Design of Waste Biomass-Derived Solar-Thermal Materials for Highly Efficient Solar Evaporation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31(3).
- [7] TUFA RAMATO A, CURCIO E, BRAUNS E, et al. Membrane Distillation and Reverse Electrodialysis for Near-Zero Liquid Discharge and low energy seawater desalination [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 496: 325-33.
- [8] BIAN Y, TANG K, TIAN L, et al. Sustainable Solar Evaporation while Salt Accumulation [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(4): 4935-42.
- [9] DONG X, SI Y, CHEN C, et al. Reed Leaves Inspired Silica Nanofibrous Aerogels with Parallel-Arranged Vessels for Salt-Resistant Solar Desalination [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7): 12256-66.
- [10] BU Y, ZHOU Y, LEI W, et al. A bioinspired 3D solar evaporator with balanced water supply and evaporation for highly efficient photothermal steam generation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(6): 2856-66.
- [11] ZHANG Y, XIONG T, NANDAKUMAR D K, et al. Structure Architecting for Salt-Rejecting Solar Interfacial Desalination to Achieve High-Performance Evaporation With In Situ Energy Generation [J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2020, 7(9): 1903478.
- [12] LI Z, XU X, SHENG X, et al. Solar-Powered Sustainable Water Production: State-of-the-Art Technologies for Sunlight-Energy-Water Nexus [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(8): 12535-66.
- [13] ZHANG R, LI C, LIU W, et al. The photothermal synergy effect of pure $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ in

- antibacterial reaction and its mechanism [J]. *Environmental Science: Nano*, 2021, 8(5): 1446-55.
- [14]XIE G, DU S, HUANG Q, et al. Photonic Hydrogels for Synergistic Visual Bacterial Detection and On-Site Photothermal Disinfection [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(4): 5856-66.
- [15]CHEN Y, YANG Q, MA D, et al. Metal-organic frameworks/polydopamine coating endows polyetheretherketone with disinfection and osteogenicity [J]. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2021, 71(10): 783-94.
- [16]ZHANG C, HUANG L, SUN D-W, et al. Interfacing metal-polyphenolic networks upon photothermal gold nanorods for triplex-evolved biocompatible bactericidal activity [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 426.
- [17]YANG J, SUN L, HUI S, et al. Ag functionalized SnS₂with enhanced photothermal activity for safe and efficient wound disinfection [J]. *Biomaterials Science*, 2021, 9(13): 4728-36.
- [18]ZHANG Y, MA T, ZHANG F, et al. Yolk-like non-stoichiometric nickel sulfide-based Janus hydrogel photothermal film for enhanced solar-driven water evaporation and multi-media purification [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 607: 1446-56.
- [19]XIA M, ZHAO S, HASI Q M, et al. Superhydrophilic and oil-repellent porous material based on halloysite nanotubes and wood fibers for efficient solar steam generation [J]. *Materials Today Energy*, 2021, 21.
- [20]IBRAHIM I, SEO D H, MCDONAGH A M, et al. Semiconductor photothermal materials enabling efficient solar steam generation toward desalination and wastewater treatment [J]. *Desalination*, 2021, 500.
- [21]WEI N, LI Z, LI Q, et al. Scalable and low-cost fabrication of hydrophobic PVDF/WS₂ porous membrane for highly efficient solar steam generation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 588: 369-77.
- [22]NASEEM S, WU C-M, MOTORA K G. Novel multifunctional RbxWO₃@Fe₃O₄ immobilized Janus membranes for desalination and synergic-photocatalytic water purification [J]. *Desalination*, 2021, 517.
- [23]ZHANG W, CHEN L, CUI M, et al. Successively triggered Rod-shaped protocells for enhanced tumor Chemo-Photothermal therapy [J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2021, 169: 1-11.
- [24]ZHAO L, YANG Q, GUO W, et al. Non-stoichiometric cobalt sulfide nanodots enhance photothermal and chemodynamic therapies against solid tumor [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 600: 390-402.
- [25]LIU Y, WANG T, GAO X, et al. Dual Responsive Hybrid Nanoparticle for Tumor Chemotherapy Combined with Photothermal Therapy [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*,

2021, 110(12): 3851-61.

[26]HUANG S, LI G, YANG Z, et al. CuFeS₂ Nanoassemblies With Intense Near-Infrared Absorbance for Photothermal Therapy of Tumors [J]. *Frontiers in Materials*, 2020, 7.

[27]ZHANG W, WU C, YIN P, et al. Carbon Spheres for Photothermal Therapy of Tumor Cells: Rapid Preparation and High Photothermal Effect [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2021, 36(11).

[28]LIANG P, LIU S, DING Y, et al. A self-floating electrospun nanofiber mat for continuously high-efficiency solar desalination [J]. *Chemosphere*, 2021, 280.

[29]LUO X, SHI J, ZHAO C, et al. The energy efficiency of interfacial solar desalination [J]. *Applied Energy*, 2021, 302.

[30]ZHENG Y, CACERES GONZALEZ R, HATZELL M C, et al. Concentrating solar thermal desalination: Performance limitation analysis and possible pathways for improvement [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 184.

[31]SONG C, WANG L, LI X, et al. A Chitin/CuS composite film for efficient solar seawater desalination [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2021, 133.

[32]GUAN W, GUO Y, YU G. Carbon Materials for Solar Water Evaporation and Desalination [J]. *Small*, 2021, 17(48).

[33]SHI Y, LI R, JIN Y, et al. A 3D Photothermal Structure toward Improved Energy Efficiency in Solar Steam Generation [J]. *Joule*, 2018, 2(6): 1171-86.

[34]CHEN H, WU S-L, WANG H-L, et al. Photothermal Devices for Sustainable Uses Beyond Desalination [J]. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2021, 2(3).

[35]XIE Z, DUO Y, LIN Z, et al. The Rise of 2D Photothermal Materials beyond Graphene for Clean Water Production [J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2020, 7(5): 1902236.

[36]CAO S, JIANG Q, WU X, et al. Advances in solar evaporator materials for freshwater generation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(42): 24092-123.

[37]REN P, LI J, ZHANG X, et al. Highly efficient solar water evaporation of TiO₂@TiN hyperbranched nanowires-carbonized wood hierarchical photothermal conversion material [J]. *Materials Today Energy*, 2020, 18.

[38]ZHU R, LIU M, HOU Y, et al. Mussel-inspired photothermal synergetic system for clean water production using full-spectrum solar energy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 423.

[39]IRSHAD M S, ARSHAD N, WANG X. Nanoenabled Photothermal Materials for Clean Water Production [J]. *Glob Chall*, 2021, 5(1): 2000055.

[40]ZOU Y, YANG P, YANG L, et al. Boosting solar steam generation by photothermal enhanced polydopamine/wood composites [J]. *Polymer*, 2021, 217.

[41]GUO Y, WU H, GUO S, et al. Tunable all-in-one bimodal porous membrane of ultrahigh

- molecular weight polyethylene for solar driven interfacial evaporation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 302.
- [42]GAO M, ZHU L, PEH C K, et al. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production [J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(3): 841-64.
- [43]VéLEZ-CORDERO J R, HERNÁNDEZ-CORDERO J. Heat generation and conduction in PDMS-carbon nanoparticle membranes irradiated with optical fibers [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 96: 12-22.
- [44]ZHOU Q, LI H, LI D, et al. A graphene assembled porous fiber-based Janus membrane for highly effective solar steam generation [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2021, 592: 77-86.
- [45]KIM M, YANG K, KIM Y S, et al. Laser-induced photothermal generation of flexible and salt-resistant monolithic bilayer membranes for efficient solar desalination [J]. *Carbon*, 2020, 164: 349-56.
- [46]JO S, LEE W, PARK J, et al. Wide-range direct detection of 25-hydroxyvitamin D(3) using polyethylene-glycol-free gold nanorod based on LSPR aptasensor [J]. *Biosens Bioelectron*, 2021, 181: 113118.
- [47]CHEN J, YE Z, YANG F, et al. Plasmonic Nanostructures for Photothermal Conversion [J]. *Small Science*, 2021, 1(2).
- [48]SUN Z, WANG J, WU Q, et al. Plasmon Based Double-Layer Hydrogel Device for a Highly Efficient Solar Vapor Generation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(29).
- [49]TONG D, SONG B. A high-efficient and ultra-strong interfacial solar evaporator based on carbon-fiber fabric for seawater and wastewater purification [J]. *Desalination*, 2022, 527.
- [50]杜恒, 方剑, 葛灿, 等. 界面光热水蒸发用碳纤维材料的研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(06): 3115-24.
- [51]LI T, FANG Q, XI X, et al. Ultra-robust carbon fibers for multi-media purification via solar-evaporation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(2): 586-93.
- [52]ZHAO G, CHEN Y, PAN L, et al. Plant-inspired design from carbon fiber toward high-performance salt-resistant solar interfacial evaporation [J]. *Solar Energy*, 2022, 233: 134-41.
- [53]JI M, LIU H, CHENG M, et al. Plasmonic Metal Nanoparticle Loading to Enhance the Photothermal Conversion of Carbon Fibers [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2022, 126(5): 2454-62.
- [54]LIU H, HUANG G, WANG R, et al. Carbon Nanotubes Grown on the Carbon Fibers to Enhance the Photothermal Conversion toward Solar-Driven Applications [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(28): 32404-11.
- [55]WU M, WANG Z, YAO S, et al. A self-floating photothermal evaporator with 3D gradient water channel for highly efficient solar seawater desalination [J]. *Reactive and Functional*

Polymers, 2023, 185.

[56]CHONG W, MENG R, LIU Z, et al. Superhydrophilic Polydopamine-Modified Carbon-Fiber Membrane with Rapid Seawater-Transferring Ability for Constructing Efficient Hanging-Model Evaporator [J]. Advanced Fiber Materials, 2023, 5(3): 1063-75.

[57]WU C-M, CHENG C T, TESSEMA A A, et al. Staple carbon fabric/polyurethane Janus membranes for photothermal conversion and interfacial steam generation [J]. Journal of Polymer Research, 2023, 30(6).

[58]WAN J, XU J, ZHU S, et al. Flexible biomimetic materials with excellent photothermal performance and superhydrophobicity [J]. J Colloid Interface Sci, 2023, 629(Pt B): 581-90.

[59]王业文, 董洁, 孙润军, 等. 碳纤维电加热元件最新研究进展 [J]. 高科技纤维与应用, 2023, 48(06): 18-25.

[60]韩朝锋, 薛有松, 张东生, 等. 碳纤维复合材料电导特性和力电耦合行为研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(06): 3136-52.

[61]杨小平, 荣浩鸣, 沈曾民. 碳纤维面状发热材料的性能研究 [J]. 高科技纤维与应用, 2000, (03): 39-42+8.

[62]LI Q, YING Y, TAO Y, et al. Assemblable Carbon Fiber/Metal–Organic Framework Monoliths for Energy-Efficient Atmospheric Water Harvesting [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(3): 1344-54.

[63]LEE J-S, HOANG V-T, KWEON J-H, et al. Multifunctional Ni-plated carbon fiber reinforced thermoplastic composite with excellent electrothermal and superhydrophobic properties using MWCNTs and SiO₂/Ag microspheres [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 171.

[64]ZHAO S, ZHANG X, WEI G, et al. All-weather photothermal-electrothermal integrated system for efficient solar steam generation [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 458.

[65]HUANG J, HE Y, HU Y, et al. Coupled photothermal and joule-heating process for stable and efficient interfacial evaporation [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 203.

[66]XU D, GE C, CHEN Z, et al. Composite Braided Fabric Coupled with Photothermal and Electrothermal Processes for Stable and Continuous All-Day Desalination [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(46): 52087-95.

[67]WANG C, XU K, SHI G, et al. Water Skin Effect and Arched Double-Sided Evaporation for Boosting All-Weather High Salinity Desalination [J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(21).

[68]JIANG D, DAI Y, JIANG Y, et al. Polydopamine/Fe₃O₄ modified wood-based evaporator for efficient and continuous water purification [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 652: 1271-81.

[69]WU Y, ZHONG X, LI Y, et al. Fully waste-based solar evaporator in interfacial solar-driven

- seawater desalination [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5).
- [70] CHEN S, ZHOU J, LI K, et al. Superhydrophobic and robust photothermal/electrothermal PVDF-a/CNT-s@PDMS membrane for crude oil removal and dye adsorption [J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 244.
- [71] LI D, CHEN S, HUANG R, et al. Photothermal, photocatalytic, and anti-bacterial Ti-Ag-O nanoporous powders for interfacial solar driven water evaporation [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(14): 19800-8.
- [72] GUO Y, DUNDAS C M, ZHOU X, et al. Molecular Engineering of Hydrogels for Rapid Water Disinfection and Sustainable Solar Vapor Generation [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(35).
- [73] LIU G, CHEN T, XU J, et al. Salt-Rejecting Solar Interfacial Evaporation [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2021, 2(1).
- [74] TANZIM F, SUBESHAN B, ASMATULU R. Improving the saline water evaporation rates using highly conductive carbonaceous materials under infrared light for improved freshwater production [J]. *Desalination*, 2022, 531.
- [75] ZHANG X, WANG X, WU W D, et al. Self-floating monodisperse microparticles with a nano-engineered surface composition and structure for highly efficient solar-driven water evaporation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(12): 6963-71.
- [76] LIU S, HUANG C, LUO X, et al. Performance optimization of bi-layer solar steam generation system through tuning porosity of bottom layer [J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 504-13.
- [77] BAI B, YANG X, TIAN R, et al. High-efficiency solar steam generation based on blue brick-graphene inverted cone evaporator [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163.
- [78] FAN Y, BAI W, MU P, et al. Conductively monolithic polypyrrole 3-D porous architecture with micron-sized channels as superior salt-resistant solar steam generators [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 206.
- [79] SUN H, LI Y, LI J, et al. Facile Preparation of a Carbon-Based Hybrid Film for Efficient Solar-Driven Interfacial Water Evaporation [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(28): 33427-36.
- [80] WANG H, ZHANG C, ZHANG Z, et al. Artificial Trees Inspired by Monstera for Highly Efficient Solar Steam Generation in Both Normal and Weak Light Environments [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(48).
- [81] XU Y, GUO Z, WANG J, et al. Harvesting Solar Energy by Flowerlike Carbon Cloth Nanocomposites for Simultaneous Generation of Clean Water and Electricity [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(23): 27129-39.
- [82] CAO P, ZHAO L, ZHANG J, et al. Gradient Heating Effect Modulated by

Hydrophobic/Hydrophilic Carbon Nanotube Network Structures for Ultrafast Solar Steam Generation [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(16): 19109-16.

[83] YANG D, ZHOU B, HAN G, et al. Flexible Transparent Polypyrrole-Decorated MXene-Based Film with Excellent Photothermal Energy Conversion Performance [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(7): 8909-18.

[84] XIONG Z C, ZHU Y J, QIN D D, et al. Flexible Salt-Rejecting Photothermal Paper Based on Reduced Graphene Oxide and Hydroxyapatite Nanowires for High-Efficiency Solar Energy-Driven Vapor Generation and Stable Desalination [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(29): 32556-65.

[85] ZHANG H, LI L, JIANG B, et al. Highly Thermally Insulated and Superhydrophilic Corn Straw for Efficient Solar Vapor Generation [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(14): 16503-11.

[86] 陈根余, 陶能如, 李明全, 等. 碳纤维复合材料激光制孔技术研究进展 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(04): 1395-410.

[87] YU R, TIAN M, QU L, et al. Fast and simple fabrication of SiO₂/poly(vinylidene fluoride) coated cotton fabrics with asymmetric wettability via a facile spray-coating route [J]. Textile Research Journal, 2018, 89(6): 1013-26.

[88] 聂文琪, 许帅, 孙江东, 等. 锌@聚吡咯/织物电极的制备与性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(12): 5792-802.

[89] GUO L, WANG W, YANG X, et al. Comparative study on anti-corrosion behavior of granular polypyrrole and polypyrrole nanotube in waterborne epoxy coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 478.

[90] LI N, QIAO L, HE J, et al. Solar-Driven Interfacial Evaporation and Self-Powered Water Wave Detection Based on an All-Cellulose Monolithic Design [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 31(7).

攻读学位期间发表论文和获奖情况

- [1]吴浩,王洪杰,王赫,等.碳纤维基太阳能驱动界面水蒸发器件研究进展[J].复合材料学报,2025,42(02):692-703.
- [2]阮芳涛,吴浩,朱金伟,等.TEOS 改性和长秸秆纤维取向对 PP/SF 复合材料性能的影响[J].中国塑料,2024,38(02):14-19.
- [3]吴浩, 阚辰光, 李小娟, 等.基于回收碳纤维和 Janus 织物制备界面光热蒸发器及性能研究[J].化工新型材料(已接收)
- [4] Fangtao Ruan, Hao Wu , Chenguang Kan et.al. Preparation and Application of Interfacial Water Evaporation Devices Based on Pyrrole-Modified Recycled Carbon Fibers[J] Industria Textila Journal (已接收)

致谢

行文至此，落笔为终。转眼间，我的研究生生涯已近尾声。回首这段充满挑战与成长的时光，万千感慨涌上心头，谨以此文向所有给予我支持与关怀的人致以最诚挚的谢意。

首先，我要衷心感谢我的导师阮芳涛教授。从论文选题、框架搭建到细节打磨，您始终以严谨的治学态度、渊博的专业知识和敏锐的学术洞察力为我指明方向。您常说“做学问要如履薄冰”，这句话不仅塑造了我的学术品格，更让我领悟到科研工作者应有的责任与担当。您对学术纯粹性的坚守、对学生成长的包容与耐心，将成为我终身受益的精神财富。

感谢课题组的全体成员。特别感谢杨庆永师兄在实验设计中的关键建议，感谢阚辰光同学在数据收集阶段的鼎力相助，感谢刘鑫师弟协助完成大量基础工作。感谢许帅、孙少阳和李泉君学长在实验受挫的时候给予我的安慰，感谢江舒、胡黄飞、王容容、窦甜甜、李荣南同学在办公室的陪伴，感谢王胡涛、李杰、祖逸凡学弟在平时对我的帮助，更要感谢我的室友们徐亚宁、万梓豪、杨祥斌在我生病时对我的照顾，感谢王荣达学弟、陈焯琳学妹给我带来的欢乐。那些共同挑灯夜战的日子、激烈讨论后豁然开朗的瞬间、遭遇瓶颈时彼此鼓励的温暖，都将成为我记忆中最珍贵的片段。

最后，我要把最深沉的感激献给我的家人。感谢父母二十余载的养育之恩，你们用布满老茧的双手托起我的求学之路；感谢我的女朋友始终如一的理解与支持，你的包容消解了我无数个焦虑的深夜。你们是最坚实的后盾，亦是我不懈前行的动力。

韶光如水，研究生的求学时光不仅让我收获了专业知识，更让我深切体会到学术道路上的传承与温度。未来，我将带着这份感恩继续前行，努力在自己的领域发出微光，不负所有师友亲人的期许。

谨以此文献给所有在我生命中留下温暖印记的人。