



# 光热转换用碳基材料的制备及应用进展

向娇娇<sup>1</sup>,樊 莎<sup>1</sup>,高达利<sup>2</sup>,姜 超<sup>2</sup>,朱海霖<sup>1</sup>,刘国金<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学浙江省纤维材料和加工技术研究重点实验室,杭州 310018;

2. 中石化(北京)化工研究院有限公司,北京 122000)

**摘 要:** 光热转换技术可将太阳能转换为热能,是提升资源利用率、实现能源利用可持续发展的有效途径;碳基材料具有优异的宽光吸收性能和高光热转换效率,是太阳能光热转换用的核心材料。该文系统综述了光热转换用碳基材料的研究进展,概述了光热转换的基本原理和碳基材料的分类,总结了光热转换用碳基材料的制备方法,分析了光热转换用碳基材料在海水淡化、废水净化、光热除冰、光热治疗和热能存储等领域的应用进展,并对光热转换用碳基材料的研究方向作出展望。

**关键词:** 太阳能;光热转换;碳基材料;制备方法;应用进展;综述

**中图分类号:** TM914.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2023)01-0033-10

**引文格式:** 向娇娇,樊莎,高达利,等. 光热转换用碳基材料的制备及应用进展[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2023,49(1):33-42.

**Reference Format:** XIANG Jiaojiao, FAN Sha, GAO Dali, et al. Progress in preparation and application of carbon-based materials for photothermal conversion[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023,49(1):33-42.

## Progress in preparation and application of carbon-based materials for photothermal conversion

XIANG Jiaojiao<sup>1</sup>, FAN Sha<sup>1</sup>, GAO Dali<sup>2</sup>, JIANG Chao<sup>2</sup>, ZHU Hailin<sup>1</sup>, LIU Guojin<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Fiber Materials and Manufacturing Technology,

Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. SINOPEC (Beijing) Research

Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 122000, China)

**Abstract:** Photothermal conversion technology that can convert solar energy into heat energy is an effective way to improve resource utilization and realize sustainable development. Carbon-based materials have become the core materials for solar photothermal conversion because of their excellent wide light absorption and high photothermal conversion efficiency. In this paper, the development of carbon-based materials for photothermal conversion is reviewed, the basic principle of photothermal conversion and the classification of carbon-based materials are briefly described, the preparation methods of carbon-based materials for photothermal conversion are emphatically introduced, then the applications of carbon-based materials for photothermal conversion in aspects of seawater desalination, wastewater purification, photothermal deicing, photothermal therapy and thermal energy storage are depicted in details, and finally the prospects of carbon-based materials for photothermal conversion in research direction are given.

**Key words:** solar energy; photothermal conversion; carbon-based materials; preparation methods; application progress; review

收稿日期: 2022-04-26 网络出版日期: 2022-07-08

基金项目: 国家重点研发计划“高端功能与智能材料”重点专项项目(2021YFB3801500)

作者简介: 向娇娇(1998—),女,重庆开州人,硕士研究生,主要从事碳基材料制备与应用方面的研究。

通信作者: 刘国金, E-mail: guojin900618@163.com

## 0 引言

能源与水是全球可持续发展的重要物质基础<sup>[1-2]</sup>。然而,随着社会的快速发展,人类对水资源尤其是淡水资源的需求不断增加。利用燃煤、石油和天然气等化石能源产生的热能对海水进行淡化以及对废水进行净化处理,是获取淡水资源的有效途径。传统化石资源不可再生,在使用过程中还会造成一定的环境污染<sup>[3-5]</sup>,已无法满足社会可持续发展的要求,寻求可再生能源代替化石能源来获取淡水资源具有重要的现实意义。

太阳能作为一种可再生且无污染的能源,储量丰富、绿色安全,被公认为未来最具竞争力的能源之一。由于具有较高的能源转换效率,利用太阳能转换为热能的方式已成为缓解化石能源危机、淡水资源短缺等问题的有效方法之一<sup>[6-8]</sup>。研制在 200~2500 nm 波长范围内具有宽光吸收性能和优异光热转换性能的材料,是实现高效光热转换效率的关键。

碳基材料主要是指以碳为主体的材料,具有优异的光热效应、高吸光度和低发射度特性,在光热转换领域表现出巨大潜力,成为一种性能优异的光热转换材料<sup>[9]</sup>。由于还具有来源广泛、价格低廉等特征,碳基材料受到了太阳能光热转换领域研究者的密切关注。目前碳基材料作为太阳能吸收的热定位层,在海水淡化、废水净化、光热除冰和光热治疗等领域具有重要的应用前景<sup>[10-12]</sup>。碳基材料与其他材料,如聚合物材料、半导体材料或金属材料复合时,可以提高碳基材料的吸收光谱与太阳光谱的匹配度,实现更高的光热转换效率<sup>[13]</sup>。

本文在介绍碳基材料光热转换基本原理的基础上,将碳基材料分为天然植物衍生的碳基材料和人造碳基材料 2 大类,介绍了光热转换用碳基材料的制备方法以及在海水淡化、废水处理、光热除冰和光热治疗等领域的研究进展,并对光热转换用碳基材料存在的问题进行了探讨,将为碳基材料的研究与应用提供参考。

## 1 光热转换基本原理及碳基材料概述

### 1.1 光热转换基本原理

光热转换材料是一类将吸收的太阳能转换为热能的材料。与金属材料的局部等离子体表面效应<sup>[14]</sup>和半导体的带隙机理<sup>[15]</sup>不同,碳基材料是在太阳光照射下产生晶格振动,将吸收的太阳能转换为热能,从而实现光热转换<sup>[16]</sup>。碳基材料由混合键

组成,其中  $\pi$  键的电子键结合强度通常弱于  $\sigma$  键。因此,经过较低的太阳能辐射就可以激发电子从  $\pi$  轨道跃迁至  $\pi^*$  轨道<sup>[17]</sup>(见图 1)。当被激发电子恢复到原来的状态时,吸收的光能从激发电子转移到整个晶格的振动,引起材料表面温度上升,热量传递至周围环境,形成光热效应<sup>[18]</sup>。

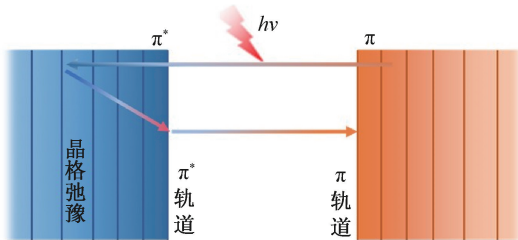


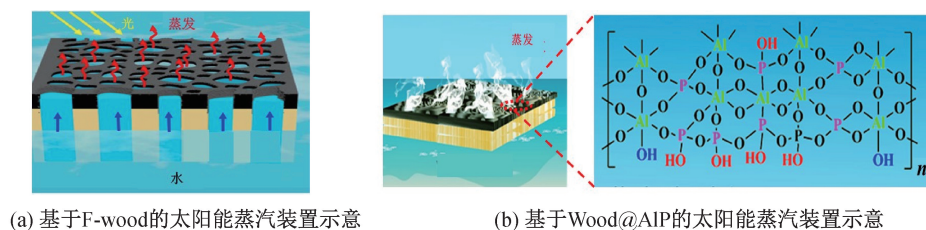
图1 碳基材料光热转换的基本原理<sup>[17]</sup>

### 1.2 碳基材料的分类

碳基材料可吸收全光谱范围(200~2500 nm)内的太阳光,具有高太阳能吸收率、优异的结构可调性和可加工性,在光热转换过程中表现出竞争优势。碳基材料可被设计出光热转换系统所需的各种结构<sup>[19]</sup>。根据材料的来源,碳基材料可分为天然植物衍生的碳基材料 and 人造碳基材料两大类。两类碳基材料均呈现黑色,在光照射下,太阳光经碳基材料内部多孔结构的散射与反射后转换为热能,由此获得优异的太阳能吸收性能。天然植物衍生的碳基材料在光热转换过程中易受外界环境的影响,人造碳基材料的隔热能力相对普通,限制了其应用范围。

#### 1.2.1 天然植物衍生的碳基材料

天然植物的吸水和蒸腾行为,来源于纤维具有的多孔通道输水结构和低导热性。这种行为与利用太阳能进行光热转换时的吸水机制和蒸发机制是相匹配的。因此,天然植物衍生的碳基材料(碳化蘑菇<sup>[20]</sup>、碳化向日葵<sup>[21]</sup>等)可作为光热转换系统中有力的候选者<sup>[22]</sup>。Xue等<sup>[23]</sup>发现,经过简单火焰处理得到的天然木材(Flame-treated wood, F-wood)具有超高的太阳能吸收率,内部孔道将水分输送到受热面,使木材表面产生高温蒸汽,实现了 78% 的光热转换效率(见图 2(a))。在此基础上,Chen等<sup>[24]</sup>通过在木材表面沉积磷酸铝(Aluminum phosphate, AIP)化合物,构建了一种双层多孔结构的光热转换系统(Wood@AIP)。该双层结构中的 AIP 化合物可以加速木材表面碳层的形成,同时获得具有分级多孔结构的磷酸铝层,有利于太阳能光的吸收和蒸汽的逸散。在 1 kW/m<sup>2</sup> 光照条件下可实现 90.8% 的太阳能转换效率,远高于简单火焰处理得到的木材光热转换系统(见图 2(b))。

图 2 不同木材的太阳能蒸汽系统<sup>[23-24]</sup>

### 1.2.2 人造碳基材料

人造碳基材料种类丰富,理化性质稳定,带隙间的能级跃迁和  $\pi$  结构使其材料对太阳光可以产生全光谱范围内的吸收,表现出优异的光热转换能力。

#### 1.2.2.1 石墨烯族

石墨烯是一种由  $sp^2$  杂化的碳原子相互连接排列成的二维蜂窝状网络单层材料,具有高孔隙率、高表面积、高光吸收性以及高的热稳定性和化学稳定性,在太阳光谱范围(200~2500 nm)内可达到 97% 以上的光吸收率,被认为是很有前途的光热转换材料之一<sup>[25-27]</sup>。目前基于石墨烯衍生出的氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)<sup>[28]</sup>、还原氧化石墨烯(Reduced graphene oxide, RGO)<sup>[29]</sup>或石墨烯基气凝胶<sup>[30]</sup>,因宽光吸收性能和高的光热转换效率被相继开发,用于实现太阳能到热能的转换。

#### 1.2.2.2 碳纳米管

碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTs)是石墨烯片层卷曲而成的一维纳米管状材料,主要是由碳原子呈六角形排列构成,结构稳定、重量轻、柔韧性好,具有良好的力学性能<sup>[31]</sup>。CNTs 中的共轭结构使其在可见光和近红外区域具有很强的吸收能力,可作为将太阳能转换为热能的光吸收层<sup>[32]</sup>。垂直排列的极黑 CNTs 可表现出类似黑体的光学行为,在 200~2000 nm 波长范围内对太阳能光的吸收率可达 98%~99%,具有极低的反射率和优异的光热转换能力<sup>[33]</sup>。CNTs 中不规则和粗糙的微观结构使其很容易被改性成功能化 CNTs。当 CNTs 与多孔结构的聚苯乙烯(Polystyrene, PS)泡沫等基底材料相结合时,在恶劣的条件下也表现出高的光热转换效率<sup>[34]</sup>。

#### 1.2.2.3 无定形碳

无定形碳的内部结构是具有石墨烯一样结构的晶体,但晶体中碳原子组成的六角形平面层状结构呈现零乱且不规则的形状,因此是一种近似非晶态的碳材料。无定形碳具有优异的光吸收能力和高的光热转换效率,且价格低廉、稳定性高、比表面积大。炭黑(Carbon black, CB)是无定形碳中的典型代表,在太阳光谱范围内具有超过 99% 的吸收率,表现出

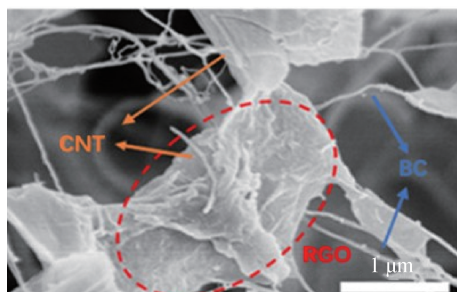
优异的宽带吸收和低导热性,可作为光吸收层的一种理想碳基材料<sup>[35-36]</sup>。除了 CB 外,活性炭(Activated carbon, AC)等<sup>[37]</sup>无定形碳材料在太阳光照射下也可以实现光热转换。

#### 1.2.2.4 碳纤维

碳纤维(Carbon fibre, CF)是人造碳基材料中另一种具有优异光热转换能力的材料,石墨微晶结构沿纤维轴的择优取向特性赋予 CF 高机械强度和热稳定性。此外,CF 还具有可编织结构、优异的耐化学性、重量轻和热稳定性等优点,CF 在 200~2500 nm 光谱范围内具有宽光吸收能力和光热转换性能,在光热转换领域表现出极大应用潜力<sup>[38]</sup>。

#### 1.2.2.5 碳复合材料

碳基材料由于成本低、优异的导热性、较大的比表面积和良好的光热转换能力,通常与其他材料混合,通过互补和协同作用获得光学性质更优异的碳复合材料<sup>[39-40]</sup>。碳复合材料不仅可以满足光热利用过程中的需求,如保持一定的隔热性能,还可以提高与太阳光谱的匹配度,增强材料的光热稳定性,实现更高的光热转换效率。Jin 等<sup>[41]</sup>通过在原位培养的细菌纤维素(Bacterial cellulose, BC)上附着 CNT 和 RGO 的混合物,制备出一种多孔网络结构的光热复合膜(CNT-RGO@BC),其中 BC 作为载体提供了活性位点,可以使 CNT 和 RGO 均匀分布在其表面,形成优良的光热层(见图 3)。该光热膜具有优异的结构和性能稳定性,在 250~2000 nm 波长范围内对太阳光的吸收率超过 99%,远高于纯 BC、RGO@BC 和 CNT@BC 的光吸收率。

图 3 CNT-RGO@BC 顶部的 SEM 图<sup>[41]</sup>



综上所述,碳基材料可成为光热转换材料的候选者,除了具有丰富的微孔结构和较大的表面积外,在全光谱范围内表面出优异的宽光吸收性能和稳定的光热转换能力,易与其他材料相结合,达到更高的光热转换效率。碳基材料在未来太阳能光热利用方面表现出重要的应用价值。

2 光热转换用碳基材料的制备方法

目前,光热转换用碳基材料的制备方法根据是否需要基底材料可分为纺丝法与沉积法两大类。

2.1 纺丝法

静电纺丝法是膜制备中一种常用方法,通过将碳基材料与其他材料复合配制成纺丝原液,可以制备出具有光热效应的电纺膜<sup>[42]</sup>。电纺膜中的孔隙由多层微米和纳米级纤维相互交织而成,能够有效减少热量损失,提高光热转换效率,并可以通过改变纺丝原液成分、电场强度等条件来调节电纺膜的孔隙结构。Fan 等<sup>[43]</sup>将 RGO、GO 分别与聚丙烯腈(Polyacrylonitrile,PAN)纳米纤维混合制备成前驱体溶液,电纺成一种用于太阳能驱动水蒸发的光热膜(RGO/PAN)。膜中纤维分布良好,孔隙结构丰富(见图 4)。RGO 和 GO 具有优异的宽光吸收能力和多孔结构,使 RGO/PAN 膜和 GO/PAN 膜在 350~2500 nm 波长范围内都表现出较高的吸光度;RGO/PAN 膜的黑度更高,能够减少反射光,光吸收率可达 80%以上,优于 GO/PAN 膜,纯 PAN 膜在同一区域的吸光度仅小于 20%<sup>[43]</sup>。因此,高光吸收能力的 RGO/PAN 膜可被称为光热膜。将 RGO/PAN 膜放置在 PS 泡沫制成的隔热层上时,在 1 kW/m<sup>2</sup> 光照条件下具有 89.4%的光热转换效率和 1.46 kg/(m<sup>2</sup>·h)的水蒸发速率<sup>[43]</sup>。

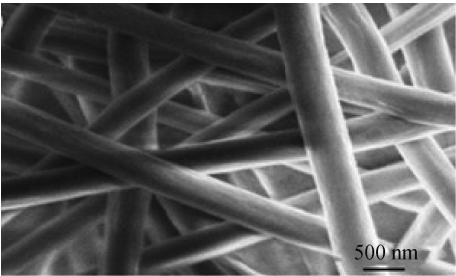


图 4 RGO/PAN 膜的 SEM 图像<sup>[43]</sup>

2.2 沉积法

沉积法是将碳基材料与液体溶剂混合配置成均匀的分散液,分散液以不同的方式附着在基底材料的表面或内部,从而得到具有光热效应的材料。其中基底材料应具备良好的隔热性能和多孔结构,与

光热转换材料之间黏合性强,保证在光热转换过程的长期稳定性。沉积法主要有原位沉积、浸渍、喷涂和抽滤 4 种方式。

2.2.1 原位沉积方式

原位沉积方式是指将含碳元素的材料溶于液体介质配成前驱体溶液后,与基底材料一起放入反应釜中,前驱体在一定温度下转变成相应光热材料附着在基底材料表面<sup>[44]</sup>。Li 等<sup>[45]</sup>以不同浓度葡萄糖溶液为前驱体,在 CF 表面原位沉积多尺度碳层,将极性官能团羧基(—COOH)和羟基(—OH)负载到 CF 表面,使得改性后的 CF 具有优异的润湿性和高极性表面能,且增加的碳化涂层提高了光吸收能力(见图 5)。当葡萄糖溶液的质量分数为 0.3%时,经过原位沉积后的 CF 在光照强度为 1 kW/m<sup>2</sup> 下可实现 1.47 kg/(m<sup>2</sup>·h)的水蒸发速率和 92.5%的蒸汽产生效率<sup>[45]</sup>。原位沉积方式操作简单,可将含有碳元素的材料于高温碳化形成具有光热效应的材料,增加了光热转换材料的选择范围,但前驱体浓度、反应时间及温度会对所制备的光热转换材料的形貌、厚度及大小等产生重要影响,进而影响宽光吸收性能和光热转换性能。

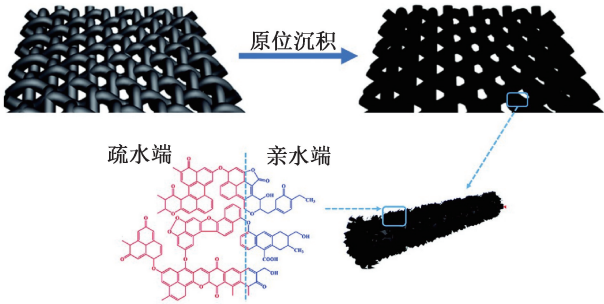


图 5 CF 表面原位沉积碳层的机理示意<sup>[45]</sup>

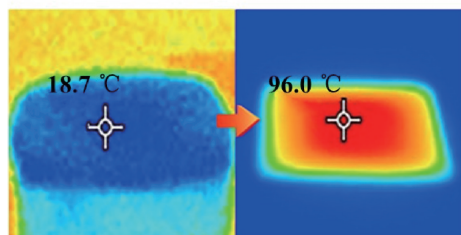
2.2.2 浸渍方式

浸渍方式是沉积法中制备光热转换用碳基材料的常用方法之一。采用该方式,首先需要将碳基材料溶于适当的溶剂中配置均匀分散液,然后将基底材料完全浸没于分散液中,通过超声、重力等外在条件,使光热转换材料以化学吸附或物理吸附等吸附机理均匀地分布于基体表面或者内部<sup>[46]</sup>。Cong 等<sup>[47]</sup>利用无纺布包裹的 PS 泡沫作为基底材料,通过浸渍方式制备出一种负载了改性 CB 纳米颗粒的自浮动太阳能蒸发器。该蒸发器在 1 kW/m<sup>2</sup> 光强下可达 78.7%的太阳能蒸发效率和 1.27 kg/(m<sup>2</sup>·h)的水分蒸发速率。浸渍方式的过程简单,对设备要求不高,但耗时长、效率低,难以制备出大面积的光热转换材料,距离工业化生产还有较长的路程。



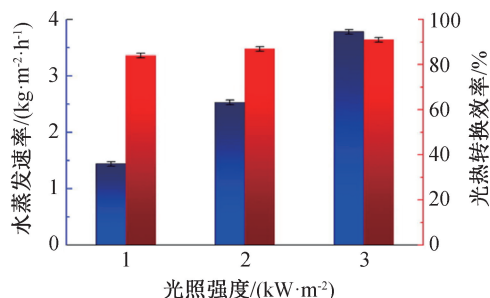
### 2.2.3 喷涂方式

喷涂作为一种简单且可以大规模生产的方式, 可以将碳基材料分散液通过喷枪喷涂在基底材料上制备出优异性能的光热吸收层。Li 等<sup>[48]</sup>将 CNTs 和聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 的分散液均匀喷涂在三聚氰胺海绵表面上, 制备出一种具有光热转换能力的太阳能蒸发器。CNTs 的高吸光度使蒸发器在 200~2500 nm 范围内的吸收



(a) 30 s 照射后蒸发器的温度变化

率高达 99%; 在 1 kW/m<sup>2</sup> 光照条件下, 蒸发器的表面温度在 30 s 内从 18.7 °C 迅速升高至 96.0 °C (见图 6(a))。CNTs 与海绵能够稳定结合是由于 PDMS 优异的黏合性。此外, 经过 CNTs 修饰后的三聚氰胺海绵, 吸光性和光热转换性能也会得到显著提升 (见图 6(b))。然而, 喷涂方式易受喷枪与分散液间适配性的影响, 实现工业化生产, 还需要进一步深入研究。



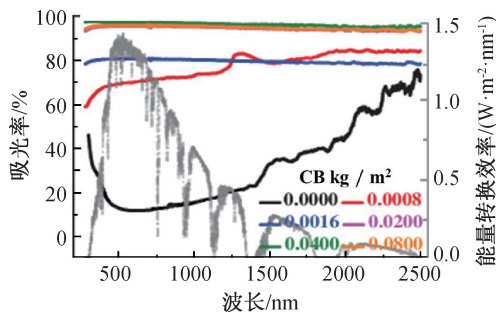
(b) 蒸发器在不同光照下的水蒸发率和太阳能-蒸汽转换效率

图 6 PDMS/CNTs 三聚氰胺太阳能蒸发器的光热效应<sup>[48]</sup>

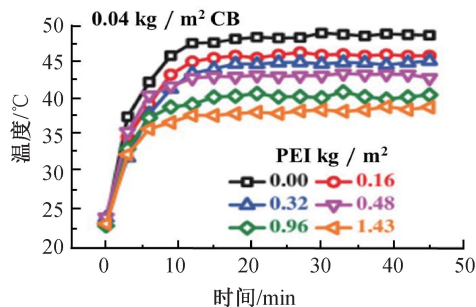
### 2.2.4 抽滤方式

抽滤方式是将碳基材料均匀分散在液体介质中, 在真空环境条件下将上述分散液沉积在基底表面得到具有光热转换能力的材料的过程, 该方法操作简单, 但要求基底材料的孔径尺寸小于光热材料尺寸, 光热转换材料每次只能附着在基底某一侧<sup>[49]</sup>。Liu 等<sup>[50]</sup>选取直径为 0.50~2.50 μm 的 CB, 以不同比例与聚乙烯亚胺 (Polyethyleneimine,

PEI)、BC 进行混合, 在真空环境下利用抽滤的方式将分散液沉积在孔径约为 0.22 μm 的聚偏氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride, PVDF) 膜表面, 制备出一种稳定且柔韧的光热复合膜; 当 CA 和 PEI 含量分别为 0.04 kg/m<sup>2</sup> 和 0.48 kg/m<sup>2</sup> 时, 光热复合膜的光吸收能力和光热转换能力优异, 在 1 kW/m<sup>2</sup> 的光照强度下可实现 85% 的能量转换效率和 1.23 kg/(m<sup>2</sup>·h) 的水蒸发速率 (见图 7)。



(a) 不同含量CB下CPB膜的吸收光谱



(b) 不同时间不同含量PEI下CPB膜的温度变化曲线

图 7 光照下 CPB 复合膜的光热效应<sup>[50]</sup>

## 3 光热转换用碳基材料的应用进展

### 3.1 海水淡化

碳基材料因具备优良的宽带光吸收性能、光热转换性能、大的比表面积的优点, 成为太阳能光热利用的最佳材料之一, 在海水淡化领域表现出良好的应用前景<sup>[51]</sup>。在海水淡化过程时, 碳基材料通常与其他材料相结合, 获得具有更优异的隔热性能和水

传输能力的复合光热转换材料<sup>[52]</sup>。Shen 等<sup>[53]</sup>以喷涂的方式将 CNTs 和聚乙烯吡咯烷酮 (Polyvinylpyrrolidone, PVP) 分散液沉积在滤纸上, 获得了具有超疏水性的机械稳定光热膜 (S-CPM); 在测试海水淡化能力时, S-CPM 以 PSt 泡沫作为支撑层和隔热层, 在连续运行和反复蒸发循环后未观察到盐分的累积, 且还能够长时间保持高吸光度。Xiong 等<sup>[54]</sup>以 RGO 为光热材料, 与超长羟基磷灰

石纳米线(Hydroxyapatite nanowires, HNs)混合后制备出高太阳光吸收和高光热转换效率的柔性多孔光热纸(RGO/HN);其中 RGO/HN- I 在光照强度为 1 kW/m<sup>2</sup> 照射下的水分蒸发速率和能量转换效率分别高达 1.48 kg/(m<sup>2</sup>·h)和 89%,在海水淡化领域具有广阔的应用前景(见图 8)。Zhang 等<sup>[55]</sup>开发了一种以疏水和多孔 CF 纳米膜作为光吸收层的太阳能海水淡化系统。在海水淡化实验中,由于 CF 纳米膜具有优异的疏水性,可以防止海水在膜内扩散,确保了蒸发过程中的高脱盐性能,冷凝水中 Na<sup>+</sup> 等离子浓度较对照降低了约 1~3 数量级。

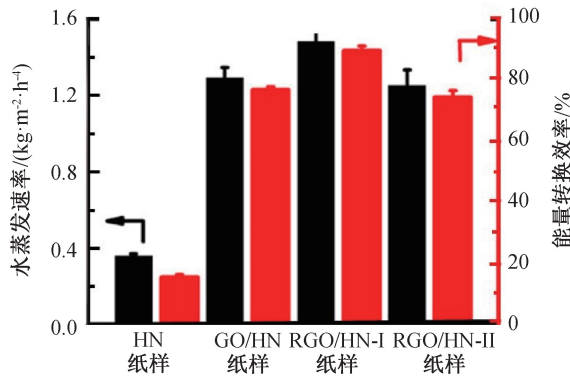
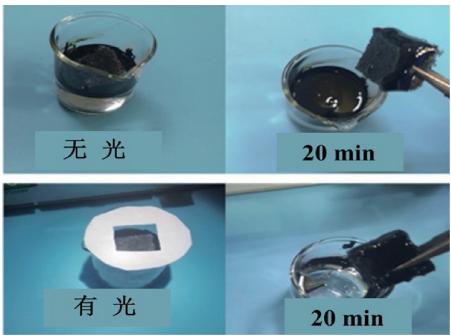


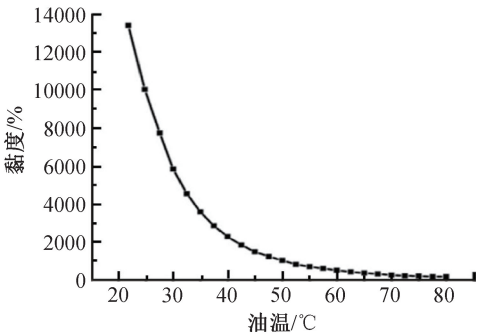
图 8 光照下不同纸样的水分蒸发性能<sup>[54]</sup>



(a) PDMS/CNFs-T 的油水分分离测试

3.2 废水净化

利用太阳能转换为热能是一种方便且高效的含油废水净化方法<sup>[56]</sup>。由碳基材料形成的光热转换系统因具有超亲油性和超疏水性,可在太阳光照射下起到油水分离的作用;此外,内部的多孔结构能吸附各种油类,油体黏度会随着温度的上升逐渐下降。碳基材料具有的光热转换能力能够降低油的黏度,可以有效缓解石油泄漏带来的水资源污染<sup>[57]</sup>。Chabot 等<sup>[58]</sup>将 RGO 通过浸渍方式牢固地沉积在聚合物泡沫上,当暴露于光照下,泡沫复合材料表面温度迅速升高,油体黏度显著降低,从而高效净化原油。Guo 等<sup>[59]</sup>将光热材料碳纳米纤维(Carbon nanofibers, CNFs)负载在多孔结构的 PDMS 泡沫上,制备出具有高性能油水分离的超疏水/超亲油的泡沫复合材料(PDMS/CNFs-T)。在模拟含油废水实验中,当油接触泡沫复合材料时,油被迅速吸收后扩散至泡沫内部,由于泡沫复合材料优异的超疏水性和防水性能,水被排斥在泡沫外,乳液逐渐变得透明(见图 9(a))。在模拟阳光照射下,PDMS/CNFs-T 材料将吸收的光能转换为热能,传递到下面的原油中,降低了油黏度,且除油率可达 90%(见图 9(b))。



(b) 原油黏度随油温的变化曲线

图 9 泡沫复合材料 PDMS/CNTs-T 的吸油情况<sup>[59]</sup>

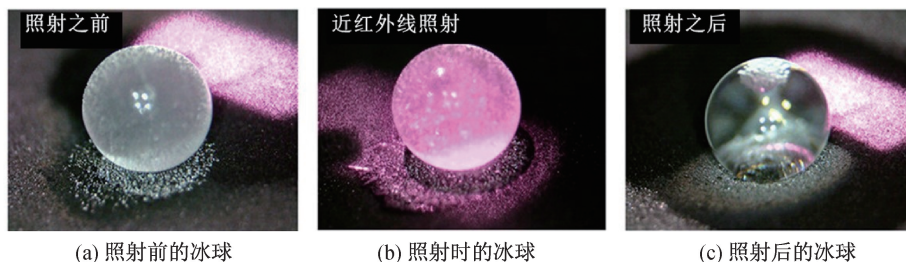
3.3 光热除冰

利用碳基材料的黑体特性和微纳分级结构制备出具有高光热转换效率和超疏水性能的光热转换材料,可用于光热除冰<sup>[60]</sup>。Jiang 等<sup>[61]</sup>通过喷涂方法制备了具有光热除冰性能的超疏水 SiC/CNTs 涂层,涂层的表面温度在近红外光(808 nm)连续照射下迅速升高,热量传递至周围环境,使冰固界面处的水滴融化,达到了高效的除冰效果(见图 10)。李回归等<sup>[62]</sup>制备出一种 CB/PDMS 光热超疏水涂层,涂层中 CB 将吸收的太阳能转为热能,使涂层表面的冰在太阳光的照射下迅速融化。Xie 等<sup>[63]</sup>报道了一种具有相互连接通道和表面超疏水的轻质聚乙烯/

GO 纳米片泡沫,该泡沫经短时间的太阳光照射后,冷冻水滴从开始的冻结状态到完全融化只需 20 s,融化过程中该泡沫仍保持着超疏水性能。结果表明均匀分散的 GO 纳米片与微纳米结构的聚乙烯泡沫协同作用有效提高了光热性能与除冰效率。

3.4 光热治疗

碳基材料作为一类丰富多样、价格低廉、生物相容性优良的光热转换材料,在近红外(808 nm)照射下可吸收光子的能量并将其转换为热能导致癌细胞死亡,不对周围健康组织造成伤害,已成为一类新的光热治疗材料<sup>[64-66]</sup>。Tondro 等<sup>[67]</sup>报道了一种由 CNTs 和聚吡咯(Polypyrrol, PPy)构成的光热治疗



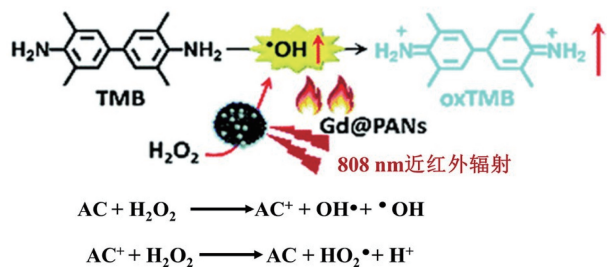
(a) 照射前的冰球

(b) 照射时的冰球

(c) 照射后的冰球

图 10 SiC/CNTs 涂层的光热除冰情况<sup>[61]</sup>

材料(CNTs@PPy),可用于处理铜绿假单细胞菌,在 808 nm 激光照射下,CNTs@PPy 将光能转换为热能,引起铜绿假单细胞菌温度升高,产生活性氧;而活性氧会破坏培养基中铜绿假单细胞的细胞膜,导致细菌的存活率下降。因此,CNTs@PPy 具有优异的光热杀菌能力。Wu 等<sup>[68]</sup>将钆二胺(Gadolinium diamine,Gd)负载到活性炭纳米颗粒(Activated carbon nanoparticles,ANs)上,用 PVP 包封后获得光热治疗材料 Gd@PANs,具有过氧化物酶模拟纳米酶活性和较好的光吸收效果。Gd@PANs 可在近红外光活化协同光热化学动力学进行癌症治疗,催化内源性  $H_2O_2$  的分解,在癌细胞内产生有毒的氧化羟基自由基( $\cdot OH$ ),破坏癌细胞结构(见图 11), $\cdot OH$  对正常细胞没有毒性,确保了该材料高效的光热治疗功能。

图 11 光照辐射下 Gd@PANs 增强过氧化物酶模拟活性的机制<sup>[68]</sup>

### 3.5 热能存储

相变材料(Phase change materials,PCMs)作为一种潜热蓄热材料,可将太阳能转换的热能在几乎恒定的温度下储存,在一定温度下可控释放,在太阳能光热能利用中发挥着重要作用。碳基材料能将吸收的太阳能转换为热能,当与具有优异储热性能的 PCMs 结合时,可以实现更有效的热能储存,扩大了太阳能光热的利用范围<sup>[69]</sup>。Maleki 等<sup>[70]</sup>在分布良好的 CNT 的高度多孔泡沫中渗入石蜡,开发出具有光热转换结构的复合相变材料,该复合材料表现出 119.3 J/g 的高潜热和 90% 的高光热转换效率。Li 等<sup>[71]</sup>报道了一种具有优异的光热转换和储热能

力复合相变材料,其中 PM18 梳状聚合物作为相变材料,RGO-CNTs 混合气凝胶作为支撑基质。Sun 等<sup>[72]</sup>通过将正二十二烷作为 PCMs 封装在二氧化硅壳中,在壳表面沉积聚多巴胺(Polydopamine,PDA)涂层,通过黏合作用将 CNTs 附着在 PDA 层上,成功制备具有层次结构的新型相变微胶囊系统,用于提高太阳能光热转换效率和光热储能能力。微胶囊系统不仅具有良好的潜热蓄热能力,相变焓超过 130 J/g,且具有 90% 的最佳光热转换效率,可广泛应用于太阳能光热转换领域。

## 4 结 语

碳基材料在 200~2500 nm 内具有高光吸收率和优异的光热转换性能,且成本低廉、结构稳定,在太阳能光热利用方面具有极大的应用潜力。随着对碳基光热材料研究的逐渐深入,越来越多的碳基材料被应用于制备光热转换材料,制备工艺也在不断优化和创新,但仍存在许多需要改进的地方:

a)碳基材料已经满足了在全光谱范围内具有宽光吸收性能和高光热转换能力,但在后续的研究中可以通过结构和表面的优化,以减少碳基材料表面的光反射,从而提升材料的太阳能吸收能力。

b)对于碳基材料在光热转换领域的研究,目前还局限在实验室的模拟环境中,与实际应用之间仍存在较大的差距,如在海水淡化领域中,需要克服暴雨、大风等外界气候条件的影响。因此,在实际应用环境下考察碳基材料的光热转换效率,将是推动碳基材料实现大规模应用必不可少的途径。

c)在太阳能光热利用过程中,提高碳基材料的太阳能捕集能力、传热效率及储热能力是其在产业化道路上所面临的技术难点。

以上问题若是能够得到解决,有望进一步推广光热转换用碳基材料的应用。

### 参考文献:

- [1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity [J]. Science Advances,



- 2016, 2(2): e1500323.
- [2] Panagopoulos A. Water-energy nexus: Desalination technologies and renewable energy sources [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(17): 21009-21022.
  - [3] Khoo H H, Tan R B H. Environmental impact evaluation of conventional fossil fuel production (oil and natural gas) and enhanced resource recovery with potential CO<sub>2</sub> sequestration[J]. Energy & Fuels, 2006, 20(5): 1914-1924.
  - [4] Su D S, Schlögl R. Chemistry of energy conversion and storage[J]. ChemSusChem, 2016, 9(4): 316-317.
  - [5] Gong J L, Li C, Wasielewski M R. Advances in solar energy conversion[J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(7): 1862-1864.
  - [6] Zhu L L, Gao M M, Peh C K N, et al. Recent progress in solar-driven interfacial water evaporation: Advanced designs and applications[J]. Nano Energy, 2019, 57: 507-518.
  - [7] Cao S S, Jiang Q S, Wu X H, et al. Advances in solar evaporator materials for freshwater generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(42): 24092-24123.
  - [8] Li L X, Zhang J P. Water harvesting from desert soil via interfacial solar heating under natural sunlight[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 607: 1986-1992.
  - [9] Badenhorst H. A review of the application of carbon materials in solar thermal energy storage [J]. Solar Energy, 2019, 192: 35-68.
  - [10] 王天逸, 黄恒波, 李昊亮, 等. 碳基功能材料在太阳能海水淡化中的研究进展[J]. 新型炭材料, 2021, 36(4): 683-701.
  - [11] Gao M, Zhu L L, Peh C, 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): 841-864.
  - [12] 郭星星, 高航, 殷立峰, 等. 光热转换材料及其在脱盐领域的应用[J]. 化学进展, 2019, 31(4): 580-596.
  - [13] Dao V D, Vu N H, Yun S N. Recent advances and challenges for solar-driven water evaporation system toward applications [J]. Nano Energy, 2020, 68: 104324.
  - [14] Fan X F, Mu H C, Xu Y L, et al. Silver nanoparticles-polydopamine-wax gourd: An antimicrobial solar evaporator with enhanced steam generation [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(7): 8949-8961.
  - [15] Ye M M, Jia J, Wu Z J, et al. Synthesis of black TiO<sub>x</sub> nanoparticles by Mg reduction of TiO<sub>2</sub> nanocrystals and their application for solar water evaporation [J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(4): 1601811.
  - [16] Liu G H, Xu J L, Wang K Y. Solar water evaporation by black photothermal sheets[J]. Nano Energy, 2017, 41: 269-284.
  - [17] Chen C J, Kuang Y D, Hu L B. Challenges and opportunities for solar evaporation[J]. Joule, 2019, 3(3): 683-718.
  - [18] Wu X, Chen G Y, Owens G, et al. Photothermal materials: A key platform enabling highly efficient water evaporation driven by solar energy[J]. Materials Today Energy, 2019, 12: 277-296.
  - [19] 沙畅畅, 陈宇超, 王心好, 等. 太阳能驱动水蒸发装置中的碳基光吸收材料的研究进展[J]. 石油化工高等学校学报, 2019, 32(5): 1-7.
  - [20] Xu N, Hu X Z, Xu W C, et al. Mushrooms as efficient solar steam-generation devices [J]. Advanced Materials, 2017, 29(28): 1606762.
  - [21] Sun P, Zhang W, Zada I, et al. 3D-structured carbonized sunflower heads for improved energy efficiency in solar steam generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(2): 2171-2179.
  - [22] Guan W X, Guo Y H, Yu G H. Carbon materials for solar water evaporation and desalination[J]. Small, 2021, 17(48): 2007176.
  - [23] Xue G B, Liu K, Chen Q, et al. Robust and low-cost flame-treated wood for high-performance solar steam generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(17): 15052-15057.
  - [24] Chen T J, Wu Z Z, Liu Z Y, et al. Hierarchical porous aluminophosphate-treated wood for high-efficiency solar steam generation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(17): 19511-19518.
  - [25] 孔玥, 黄燕山, 罗宇, 等. 石墨烯基复合材料在新能源转换与存储领域的应用现状、关键问题及展望[J]. 化工进展, 2021, 40(9): 5118-5131.
  - [26] Zhou Q X, Li H, Li D D, et al. A graphene assembled porous fiber-based Janus membrane for highly effective solar steam generation [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 592: 77-86.
  - [27] Yu R F, Zhu C Y, Wan J M, et al. Review of graphene-based textile strain sensors, with emphasis on structure activity relationship[J]. Polymers, 2021, 13(1): 151.
  - [28] Li X Q, Zhu B, Zhu J. Graphene oxide based materials for desalination[J]. Carbon, 2019, 146: 320-328.
  - [29] Liang H X, Liao Q H, Chen N, et al. Thermal efficiency of solar steam generation approaching 100% through capillary water transport [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2019, 58(52): 19041-

- 19046.
- [30] Storer D P, Phelps J L, Wu X, et al. Graphene and rice-straw-fiber-based 3D photothermal aerogels for highly efficient solar evaporation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(13): 15279-15287.
- [31] Zhong L L, Yu R F, Hong X H. Review of carbon-based electromagnetic shielding materials: film, composite, foam, textile [J]. *Textile Research Journal*, 2021, 91(9/10): 1167-1183.
- [32] Yang X D, Yang Y B, Fu L N, et al. An ultrathin flexible 2D membrane based on single-walled nanotube-MoS<sub>2</sub> hybrid film for high-performance solar steam generation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(3): 1704505.
- [33] Yin Z, Wang H M, Jian M Q, et al. Extremely black vertically aligned carbon nanotube arrays for solar steam generation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(34): 28596-28603.
- [34] Kou H, Liu Z X, Zhu B, et al. Recyclable CNT-coupled cotton fabrics for low-cost and efficient desalination of seawater under sunlight [J]. *Desalination*, 2019, 462: 29-38.
- [35] Li Y R, Jin X, Zheng Y D, et al. Tunable water delivery in carbon-coated fabrics for high-efficiency solar vapor generation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(50): 46938-46946.
- [36] Chen L, Wang H Y, Kuravi S, et al. Low-cost and reusable carbon black based solar evaporator for effective water desalination[J]. *Desalination*, 2020, 483: 114412.
- [37] Kumar P G, Vigneswaran S, Meikandan M, et al. Exploring the photo-thermal conversion behavior and extinction coefficient of activated carbon nanofluids for direct absorption solar collector applications [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(9): 13188-13200.
- [38] Li H R, He Y R, Hu Y W, et al. Commercially available activated carbon fiber felt enables efficient solar steam generation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(11): 9362-9368.
- [39] Yin M X, Hsin Y, Guo X G, et al. Facile and low-cost ceramic fiber-based carbon-carbon composite for solar evaporation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143546.
- [40] Zhang Q, Xu W L, Wang X B. Carbon nanocomposites with high photothermal conversion efficiency [J]. *Science China Materials*, 2018, 61(7): 905-914.
- [41] Jin M T, Wu Z T, Guan F Y, et al. Hierarchically designed three-dimensional composite structure on a cellulose-based solar steam generator[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(10): 12284-12294.
- [42] Zhu B, Kou H, Liu Z X, et al. Flexible and washable CNT-embedded PAN nonwoven fabrics for solar-enabled evaporation and desalination of seawater[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(38): 35005-35014.
- [43] Fan X F, Lv B W, Xu Y L, et al. Electrospun reduced graphene oxide/polyacrylonitrile membrane for high-performance solar evaporation[J]. *Solar Energy*, 2020, 209: 325-333.
- [44] Wang Z Z, Ye Q X, Liang X B, et al. Paper-based membranes on silicone floaters for efficient and fast solar-driven interfacial evaporation under one sun[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(31): 16359-16368.
- [45] Li T T, Fang Q L, Xi X F, et al. Ultra-robust carbon fibers for multi-media purification via solar-evaporation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(2): 586-593.
- [46] Qi Q B, Wang Y, Wang W, et al. High-efficiency solar evaporator prepared by one-step carbon nanotubes loading on cotton fabric toward water purification[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134136.
- [47] Cong C, Gao M, Xing G Y, et al. Carbon nanomaterials treated by combination of oxidation and flash for highly efficient solar water evaporation[J]. *Chemosphere*, 2021, 277: 130248.
- [48] Li Q W, Zhao X, Li L X, et al. Facile preparation of polydimethylsiloxane/carbon nanotubes modified melamine solar evaporators for efficient steam generation and desalination[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 584: 602-609.
- [49] Huang Q Q, Huang C L, Liu S, et al. Solar vapor generation optimization of a carbon-black/wood-flour system with strength enhanced by polystyrene[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(5): 3687-3696.
- [50] Liu S, Huang C L. A stable and flexible carbon black/polyethyleneimine-bacterial cellulose photothermal membrane for high-efficiency solar vapor generation [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(11): 8904-8918.
- [51] He W, Zhou L, Wang M, et al. Structure development of carbon-based solar-driven water evaporation systems[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(14): 1472-1483.
- [52] Xu N, Li J L, Wang Y, et al. A water lily-inspired hierarchical design for stable and efficient solar evaporation of high-salinity brine [J]. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaaw7013.
- [53] Shen C, Zhu Y Q, Xiao X D, et al. Economical salt-

- resistant superhydrophobic photothermal membrane for highly efficient and stable solar desalination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(31): 35142-35151.
- [54] 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 Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(29): 32556-32565.
- [55] Zhang W M, Yan J, Su Q, et al. Hydrophobic and porous carbon nanofiber membrane for high performance solar-driven interfacial evaporation with excellent salt resistance [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 612: 66-75.
- [56] Sun S J, Wang Y M, Sun B B, et al. Versatile janus composite nonwoven solar absorbers with salt resistance for efficient wastewater purification and desalination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(21): 24945-24956.
- [57] Zhu R F, Wang D, Liu Y M, et al. Bifunctional superwetting carbon nanotubes/cellulose composite membrane for solar desalination and oily seawater purification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433: 133510.
- [58] Chabot V, Higgins D, Yu A P, et al. A review of graphene and graphene oxide sponge: Material synthesis and applications to energy and the environment [J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(5): 1564.
- [59] Guo Z, Long B, Gao S J, et al. Carbon nanofiber based superhydrophobic foam composite for high performance oil/water separation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 123838.
- [60] Xie Z T, Wang H, Geng Y, et al. Carbon-based photothermal superhydrophobic materials with hierarchical structure enhances the anti-icing and photothermal deicing properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(40): 48308-48321.
- [61] Jiang G, Chen L, Zhang S D, et al. Superhydrophobic SiC/CNTs coatings with photothermal deicing and passive anti-icing properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(42): 36505-36511.
- [62] 李回归, 薛朝华, 贾顺田. 炭黑/PDMS 光热超疏水涂层的制备及防冰除冰性能[J]. *精细化工*, 2021, 38(5): 934-940.
- [63] Xie H, Xu W H, Du Y, et al. Cost-effective fabrication of micro-nanostructured superhydrophobic polyethylene/graphene foam with self-floating, optical trapping, acid-/alkali resistance for efficient photothermal deicing and interfacial evaporation [J]. *Small*, 2022, 18(17): 2200175.
- [64] Lagos K J, Buzzá H H, Bagnato V S, et al. Carbon-based materials in photodynamic and photothermal therapies applied to tumor destruction[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 23(1): 22.
- [65] Díez-Pascual A M. State of the art in the antibacterial and antiviral applications of carbon-based polymeric nanocomposites[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(19): 10511.
- [66] Bacakova L, Pajorova J, Tomkova M, et al. Applications of nanocellulose/nanocarbon composites: Focus on biotechnology and medicine [J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2020, 10(2): 196.
- [67] Tondro G H, Behzadpour N, Keykhaee Z, et al. Carbon@polypyrrole nanotubes as a photosensitizer in laser phototherapy of pseudomonas aeruginosa [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, 180: 481-486.
- [68] Wu G, Jiang B, Zhou L, et al. Coconut-shell-derived activated carbon for NIR photo-activated synergistic photothermal-chemodynamic cancer therapy[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(10): 2447-2456.
- [69] Atinafu D G, Wang C, Dong W J, et al. In-situ derived graphene from solid sodium acetate for enhanced photothermal conversion, thermal conductivity, and energy storage capacity of phase change materials[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 205: 110269.
- [70] Maleki M, Ahmadi P T, Mohammadi H, et al. Photothermal conversion structure by infiltration of paraffin in three dimensionally interconnected porous polystyrene-carbon nanotubes (PS-CNT) polyHIPE foam[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 191: 266-274.
- [71] Li J, Wang H X, Mao H Q, et al. Form-stable and light-to-thermal conversion properties of comb-like polymer composite phase change materials for thermal management application [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 217: 110704.
- [72] Sun Z, Shi T, Wang Y T, et al. Hierarchical microencapsulation of phase change material with carbon-nanotubes/polydopamine/silica shell for synergistic enhancement of solar photothermal conversion and storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 236: 111539.