文章编号:1674-2869(2024)03-0267-07

多壁碳纳米管/还原氧化石墨烯气凝胶的水蒸发性能研究

薛开诚,郭 立,刘银波,付 萍*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:石墨烯片层间由于π-π相互作用会形成堆叠结构,不利于水体传输,影响石墨烯基材料的水蒸发性能。为改善石墨烯片层间的堆叠结构,形成较多的水体传输通道,提高石墨烯基材料的水蒸发性能,在氧化石墨烯(GO)中复合不同含量的多壁碳纳米管(MWCNT),采用水热还原法得到复合水凝胶,最后利用冷冻干燥法得到多壁碳纳米管复合还原氧化石墨烯气凝胶(MWCNT/rGOA)。研究了MWCNT含量对还原氧化石墨烯气凝胶微观结构与水蒸发性能的影响,并对MWCNT/rGOA的结构和性能进行了表征。结果表明,当MWCNT含量较低(MWCNT与GO质量比为0~0.4)时,随着MWCNT含量的增加,石墨烯片层间距增大,气凝胶内部水通道更加丰富,水蒸发性能增强。随着MWCNT含量的继续增加(MWCNT与GO质量比为0.4~0.7),MWCNT大量团聚,破坏了气凝胶内部的水通道,水蒸发性能减弱。当MWCNT与GO质量比为0.4时,MWCNT/rGOA的水蒸发速率和光热转化效率均达到最大值,分别为1.75 kg/(m^2·h)和91.1%。

关键词:还原氧化石墨烯;多壁碳纳米管;气凝胶;蒸发性能
中图分类号:TB33 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202306019

Water evaporation properties of multi-walled carbon nanotubes/reduced graphite oxide aerogel

XUE Kaicheng, *GUO Li*, *LIU Yinbo*, *FU Ping**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Through ππ interaction, graphene sheets form a kind of stacking structure, which is not conducive to water transport and affects the water evaporation performance of graphene-based materials. To improve the stacking structure between graphene sheets for forming more water transport channels and enhancing the water evaporation performance of graphene-based materials, multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) with different contents were compounded in graphene oxide (GO), and the composite hydrogel was prepared by a hydrothermal reduction method. Eventually, the reduced graphene oxide composite multi-walled carbon nanotube aerogel (MWCNT/rGOA) was obtained by a freeze-drying method. In this paper, the effects of MWCNT content on the microstructure and water evaporation performance of reduced graphene oxide aerogels were investigated, and the structure and properties of MWCNT/rGOA were characterized. The results show that when the MWCNT content is low (the mass ratio of MWCNT to GO is 0-0.4), the water channels inside the aerogel are more abundant, and the water evaporation performance is enhanced with the increase of MWCNT content. As the MWCNT content continues to increase (the mass ratio of MWCNT to GO is 0.4-

收稿日期:2023-06-21
基金项目:武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金(CX2022258)
作者简介:薛开诚,硕士研究生。Email:908077027@qq.com
***通信作者**:付 萍,博士,教授。Email:fuping751128@163.com
引文格式:薛开诚,郭立,刘银波,等. 多壁碳纳米管/还原氧化石墨烯气凝胶的水蒸发性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(3):267-273.

0.7), MWCNT agglomerates in large quantities, destroying the water channels inside the aerogel, and weakening the water evaporation performance. When the mass ratio of MWCNT to GO is 0.4, the water evaporation rate and photothermal conversion efficiency of MWCNT/rGOA reach maximum values, which are 1.75 kg/(m^2·h) and 91.1%, respectively.

Keywords: reduced grapheneoxide; multi-walled carbon nanotubes; aerogel; evaporation properties

淡水资源在人类社会发展中有着至关重要的地位,我国淡水资源短缺的问题一直难以解决[1-2]。因此,我国迫切需要大规模、高效的海水淡化技术。太阳能水蒸发技术因其能高效利用太阳能,减少非再生能源损耗,所以在水净化、液-液相分离和消毒领域成为最有前途的太阳能收集技术之一。然而只有在高强度的光照条件下,才能有较高的太阳能利用率,这导致自然环境下无法直接进行高效光热转换。因此需要研发具有较低导热系数、较高宽带光吸收能力、物化性质稳定以及较高光热转换效率的光热转化材料[3-6]。

气凝胶具有高的比表面积(高达1 000 m^2/g)和低的热导率以及较为稳定的力学结构。将材料制备成多孔结构的气凝胶,能使材料快速补水并提供蒸汽快速溢出的通道,从而具有更高的光吸收效率和吸水效率。

碳纳米管[7]、石墨烯[8]以及富勒烯等碳纳米材料因具有较高的宽带光吸收性能和优异的物化稳定性,在太阳能水蒸发领域中脱颖而出[9-11]。石墨烯及其衍生物不但具有宽带光吸收能力,而且独特的结构赋予了其高的比表面积和优良的力学性能,在水蒸发领域有较高的研究价值[12]。但是石墨烯的导热系数高达5 150 W/(m·K)[13],超高的导热系数会导致蒸发过程中热量向环境中大量流失。还原氧化石墨烯(reduced grapheneoxide, rGO)除了具备优异的光热性能外还具有较低的导热系数[2.98 W/(m·K)][13]和易于大面积制备的特点,在太阳能水蒸发领域有其自身优势。Wang等[14]在真空条件下将rGO与多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotube, MWCNT)悬浮液负载在聚偏氟乙烯膜上制备的rGO-MWCNT光热膜,水蒸发速率达到1.22 kg/(m^2·h)。然而rGO以二维片层结构存在,在复合过程中由于π-π相互作用极易产生片层间的堆叠,导致石墨烯基材料的比表面积以及孔隙率明显下降,降低其水蒸发性能[15]。因此,改善rGO片层间的相互堆叠对提升材料的水蒸发性能具有重要意义[16]。

MWCNT在整个太阳光谱的波长范围内都具有极高的吸光度,能高效地将吸收的太阳光转化为热能,同时还具有稳定的物化性能、热稳定性以及成本低廉等优点。MWCNT分子结构内部有大量的共轭π键,极易与rGO片层发生π-π相互作用,改善rGO片层间的堆叠。

在本研究中,制备了多壁碳纳米管复合还原氧化石墨烯气凝胶(multi-walled carbon nanotube/reduced grapheneoxide aerogel, MWCNT/rGOA)光热转换材料。一方面,通过复合MWCNT,在提高材料光吸收率的同时改善了石墨烯片层之间的堆叠结构。另一方面,气凝胶的多孔结构降低了材料的导热系数,减少了水蒸发过程中的热量损失,因此提高了水蒸发速率以及光热转换效率。

1 实验部分

1.1 试剂与材料

氧化石墨烯(graphene oxide, GO)(纯度>94.3%,深圳市宏达昌进化科技有限公司)、MWCNT(纯度>97%,深圳市纳米港有限公司)、抗坏血酸(L-ascorbic acid, L-AA)(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)、乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 MWCNT/rGOA的制备 (1)将GO粉末加入去离子水中配制质量浓度为4 mg/mL的GO水溶液。将MWCNT分散于GO水溶液中,MWCNT与GO的质量比分别为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7。超声分散30 min,再磁力搅拌24 h,使其分散均匀。

(2)将MWCNT/GO混合液转移至直口玻璃瓶(直径22 mm,高度60 mm)中,加入还原剂L-AA($m_{L\text{-}AA}$:m_{GO}=0.75),用橡皮塞封住玻璃瓶口,并将玻璃瓶置于带有内衬(聚四氟乙烯)的高压反应釜中,于95 ℃下水热还原90 min,制备得到多壁碳纳米管复合还原氧化石墨烯基水凝胶(multi-walled carbon nanotube/reduced grapheneoxidehy-drogel, MWCNT/rGOH),用去离子水反复清理5次,去除多余杂质。

(3)将MWCNT/rGOH放入冰箱中冷冻成固体状态,再将其置于冷冻干燥机中冷冻干燥24 h得到MWCNT/rGOA。将MWCNT与GO的质量比为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7的MWCNT/rGOA

分别命名为MGA-1、MGA-2、MGA-3、MGA-4、MGA-5、MGA-6、MGA-7。

1.2.2　表　征　使用场发射扫描电子显微镜（field emission scanning electron microscope，FESEM）（GeminiSEM 300，Zeiss，德国）观察气凝胶的微观结构。采用KBr压片法，使用傅里叶变换红外光谱仪（Fourier transform infrared spectrometer，FTIR）（Nicolet Impact 420，美国）测试样品的FTIR光谱，扫描波数范围为3 700~400 cm^{-1}。使用532 nm激光波长的拉曼光谱仪（LabRAM HR-800，Horiba，法国）测试样品的拉曼光谱。使用紫外-可见-近红外分光光度计（ultraviolet-visible near infrared spectrophotometer，UV-Vis-NIR）（UV-3600，日本）测试样品在500~2 500 nm范围内的光吸收特性；使用全自动比表面积及微孔物理吸附仪（ASAP 2020，美国）测试样品的比表面积、平均孔径和平均孔体积。使用太阳能模拟蒸发测试系统（GXAS335、Solar-500T，北京纽比特科技有限公司）在光照强度为1 kW/m^2下测试样品的水蒸发性能及样品的热焓值。光热转换效率（η）是评估水蒸发性能的一个重要参数，计算如下[17-19]：

$$\dot{m} = \frac{m}{At} \tag{1}$$

$$U_{in} = \Delta H_{vap} m_0 = \Delta H_{equ} m_g \tag{2}$$

$$h_{lv} = \lambda_{lv} + C_p\left(T_1 - T_0\right) \tag{3}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} h_{lv}}{q} \times 100\% \tag{4}$$

式（1）~式（4）中：$\dot{m}$是蒸发速率[kg/(m^2·h)]；m是水体的质量损失（g）；A是光照面积（m^2）；t是蒸发时间（s）；U_{in}为外界输入的能量；ΔH_{vap}为纯水的蒸发焓（2 257 kJ/kg）；m_0为纯水体系蒸发过程的质量变化（g）；ΔH_{equ}和m_g分别为等效蒸发焓、其他体系蒸发过程的质量变化；h_{lv}是蒸发相变焓；λ_{lv}是其他体系的潜热[等同于式（2）中的等效蒸发焓]；$C_p(T_1 - T_0)$为蒸发体系的显热，其中C_p为水的比热容[4.2 kJ/(kg·℃)]，T_1为材料的稳态温度，T_0为材料的初始温度）；q为垂直照射的模拟太阳光功率（实验中取为1 kW/m^2）；η为光热转换效率。

2　结果与讨论

2.1　材料的组成与结构

图1为rGOA、MGA-1、MGA-4和MGA-7的截面FESEM图。由图1（a）可见，rGO片层紧密堆叠形成较为有序的直孔道，孔道壁面较厚，壁面间距为100~200 μm，部分孔壁发生了折叠弯曲。在MGA-1中[图1（b）]，MWCNT分布在rGO片层间，增加了孔道数目，孔道壁面变薄。随着MWCNT含量的进一步增加，由于rGO片与MWCNT间的π-π共轭作用，气凝胶内部局部区域出现蜂窝状孔洞。MWCNT在气凝胶内壁高度缠绕[图1（c）]。随着MWCNT含量继续增大，MWCNT的团聚破坏了原有的孔道，导致孔壁发生卷曲交联，孔道发生坍缩，孔道数量下降[图1（d）]。

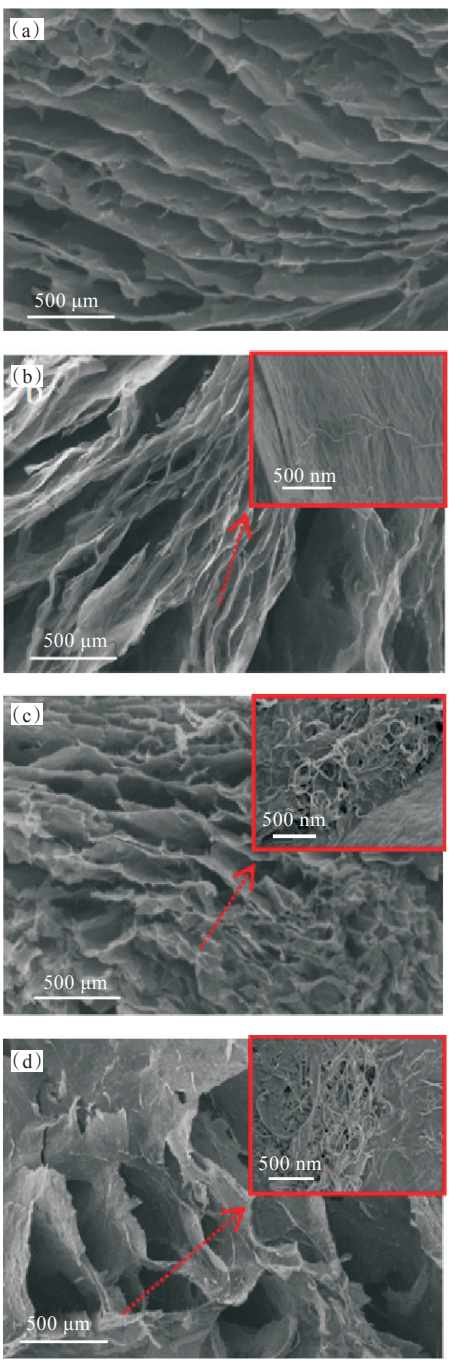


图1　纵截面FESEM图：（a）rGOA，（b）MGA-1，（c）MGA-4，（d）MGA-7

Fig. 1　FESEM images of longitudinal-section：（a）rGOA，（b）MGA-1，（c）MGA-4，（d）MGA-7

表1为样品的比表面积、平均孔体积和平均孔径。rGOA的比表面积为31.098 m^2/g，孔体积为0.059 cm^3/g，平均孔径为7.588 nm。MGA-1、MGA-4和MGA-7的比表面积分别为33.193、51.065和47.390 m^2/g，随MWCNT含量的增加呈现出先增大后减小的趋势。孔体积和孔径的变化趋势与比表面积类似，当MWCNT与GO的质量比为0.4时，孔体积和孔径达到最大值，分别为0.129 cm^3/g和15.492 nm。MWCNT通过π-π相互作用与石墨烯片层相互作用[20]，改善了rGO纳米片层的堆叠。当MWCNT与GO的质量比低于0.4时，随其含量的增加，MWCNT与rGO片层相互作用，改变了气凝胶内部的孔道形状，出现了蜂窝状孔洞，比表面积、孔体积和孔径随之增大。当MWCNT与GO的质量比高于0.4时，由于MWCNT数量过多，MWCNT与rGO片层间的π-π共轭作用导致原有孔壁卷曲，部分孔道坍塌，比表面积和孔径都有所下降。

表1 rGO基气凝胶的比表面积、平均孔体积和平均孔径

Tab. 1 Specific surface area, average pore volume and average pore size of rGO-based aerogels

样品	比表面积 /（m^2/g）	平均孔体积 /（cm^3/g）	平均孔径 / nm
rGOA	31.098	0.059	7.588
MGA-1	33.193	0.109	8.569
MGA-4	51.065	0.129	15.492
MGA-7	47.390	0.128	10.826

图2(a)是GO、MWCNT及rGO基气凝胶的FTIR光谱图。GO存在大量含氧官能团，3 581 cm^{-1}处为O—H伸缩振动峰，1 731 cm^{-1}处为C=O伸缩振动峰，1 618 cm^{-1}处为COOH的C=O伸缩振动峰，1 220 cm^{-1}处为C—O伸缩振动峰，1 049 cm^{-1}处为C—O—C伸缩振动峰[21-22]。MWCNT的3 452 cm^{-1}处的特征吸收峰对应O—H伸缩振动峰，1 637 cm^{-1}处的特征吸收峰对应C=C伸缩振动峰。rGOA的C—O、C—O—C和C=O基团的振动峰消失，说明GO的一些含氧官能团被去除，共轭结构部分恢复，GO被还原为rGO。rGOA、MGA-1、MGA-4与MGA-7的FTIR图谱中，O—H伸缩振动峰的相应峰值先红移再蓝移又再次红移，分别为3 448、3 436、3 453和3 436 cm^{-1}，C=C伸缩振动峰有着相同的变化趋势，相应峰值分别为1 639、1 635、1 641、1 633 cm^{-1}，这表明MWCNT与rGO间产生了π-π共轭作用，导致C=C伸缩振动峰蓝移，当MWCNT与GO的质量比为0.4时蓝移达到最大值。当MWCNT含量继续增大时，MWCNT对π-π相互作用的影响减弱，导致C=C伸缩振动峰再次红移。

图2(b)是GO、MWCNT及rGO基气凝胶的拉曼光谱图。GO的拉曼光谱图在1 351 cm^{-1}和1 596 cm^{-1}处有2个典型的谱带，分别对应于sp^3杂化的D带(无序诱导带)和sp^2杂化的G带(平面内拉伸模式)[23]。rGO的D带出现在1 347 cm^{-1}处，G带出现在1 579 cm^{-1}处。D带与G带的强度比(I_D/I_G)是检测rGO结构中缺陷(即rGO化学修饰程度)的有效方法之一[24]，比值越小，表明结构中共轭程度增大，sp^2杂化程度越高，结构越有序。rGOA、MGA-1、MGA-4与MGA-7的I_D/I_G值分别为1.10、1.22、1.51和1.17，说明当MWCNT与GO的质量比低于0.4时，随着MWCNT含量的增大，MWCNT与石墨烯片层间由于π-π相互作用，石墨烯片层间的堆叠得到改善，无序度增加，内部出现更多的孔道。MWCNT含量继续增加，更多的

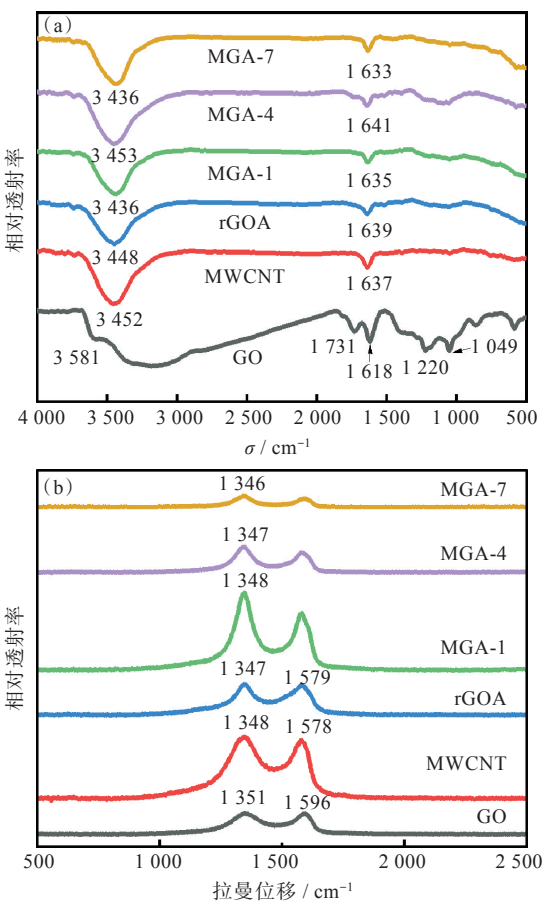


图2 GO、MWCNT、rGOA、MGA-1、MGA-4和MGA-7的FTIR光谱(a)和拉曼光谱(b)

Fig. 2 FTIR spectra (a) and Raman spectra (b) of GO, MWCNT, rGOA, MGA-1, MGA-4 and MGA-7

MWCNT与rGO发生π-π相互作用，导致原有的气凝胶内部结构坍塌，内部结构孔道减少，无序度降低。MGA-1、MGA-4与MGA-7的G带分别蓝移到了1 581、1 587和1 588 cm^{-1}处，这同样表明MWCNT和rGO之间产生了π-π相互作用。

图3是rGOA、MGA-1、MGA-4和MGA-7的紫外-可见-近红外漫反射吸收图谱。rGOA、MGA-1、MGA-4和MGA-7在500~2 500 nm的波长范围内，平均光吸收率分别为88.74%、88.23%、92.61%和89.85%，MGA-4在4种样品中具有最高的光吸收率。MGA-4具有最大的孔径数量与孔径尺寸，相比于其他样品，多的孔洞数量与大的内部孔道空间可以增加入射光在气凝胶内部的反射次数与入射光光程[25]，有助于材料提高光吸收性能[26]。

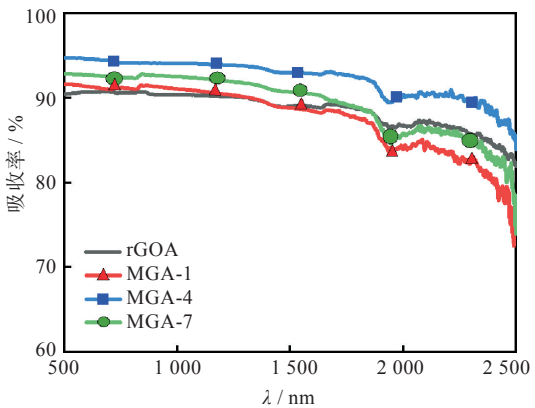


图3　rGOA、MGA-1、MGA-4和MGA-7在波长500~2 500 nm范围内的吸收率

Fig. 3　Absorption rates of rGOA, MGA-1, MGA-4 and MGA-7 in the wavelength range of 500−2 500 nm

2.2　水蒸发性能

图4分别为rGOA和MGA-4在蒸发开始和蒸发30 min时的红外热成像照片。rGOA的初始温度和稳定蒸发温度分别为21.8和31.8 ℃[图4(a−b)]，MGA-4的初始温度和稳定蒸发温度分别为18.8和42.2 ℃[图4(c−d)]。由于MWCNT的复合，MGA-4比rGOA具有更高的稳定蒸发温度，表明MGA-4的光热转化性能更加优异，在相同的蒸发条件下，高的稳定蒸发温度有助于提高材料的水蒸发速率[27]。图5(a)为样品蒸发过程中的质量损失图，图5(b)为样品的水蒸发速率和光热转化效率。rGOA的水蒸发速率为1.2 kg/(m^2·h)，约为纯水蒸发速率[0.38 kg/(m^2·h)]的3倍。MGA-1−MGA-7的水蒸发速率分别为1.29、1.44、1.46、1.75、1.48、1.43和1.37 kg/(m^2·h)。可见，MGA的水蒸发速率相较于rGOA均有所提高。其中，MGA-4的水蒸发速率最大为1.75 kg/(m^2·h)，与纯rGOA的水蒸

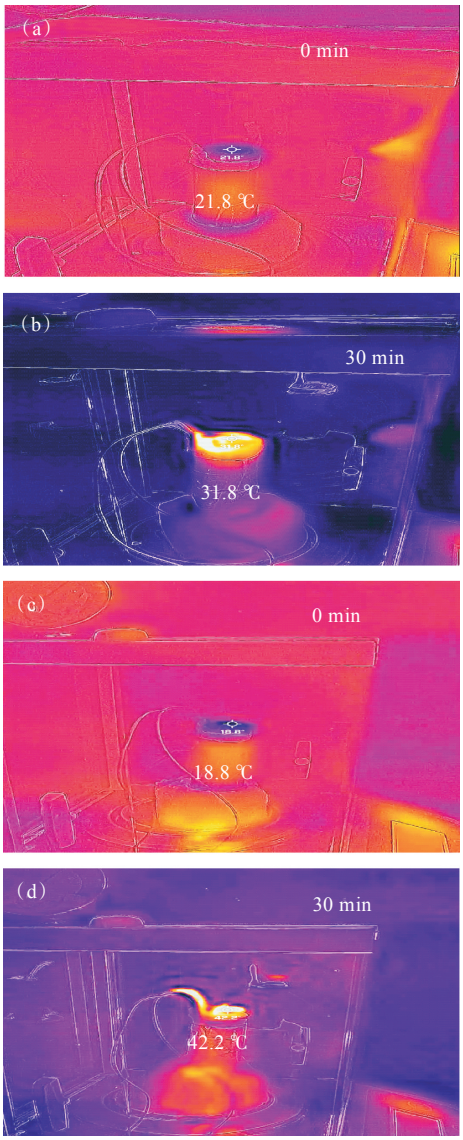


图4　样品的红外热成像照片：(a−b)rGOA，(c−d)MGA-4

Fig. 4　Infrared thermal imaging photos of samples: (a−b)rGOA, (c−d)MGA-4

发速率相比，提高了46%。这是由于在rGOA内部，石墨烯片间存在的π-π相互作用导致气凝胶内部的水通道基本由堆叠的rGO片层构成，无法形成更丰富的水传输体系，影响了材料的水蒸发速率。复合MWCNT后，由于MWCNT与rGO片层间的π-π相互作用，rGO基气凝胶内部的MWCNT于内壁间高度缠绕，片层间相互交联、堆叠、卷曲形成了三维多孔网络结构，有效增加了气凝胶内部孔道的数量与体积，使气凝胶内部形成了更加丰富的水传输体系。然而，当MWCNT与GO的质量比大于0.4并增加到0.7时，水蒸发速率由1.75 kg/(m^2·h)降至1.36 kg/(m^2·h)，这是因为MWCNT含量过多时，MWCNT产生大量团聚，堵

塞了内部部分水体通道，部分管壁也卷曲坍缩，水通道遭到破坏，孔道数量下降，导致气凝胶水蒸发速率下降。如图5(b)所示，rGOA的光热转化效率为56.2%，MGA-1−MGA-7的光热转化效率分别为67.1%、75.2%、76.4%、91.1%、76.8%、74.9% 和70.9%，MGA的光热转化效率也随着MWCNT含量的增加呈现出先增大后减少的趋势。MGA-4具有最佳的水蒸发性能，其水蒸发速率和光热转换效率分别为1.75 kg/(m²·h)和91.1%。

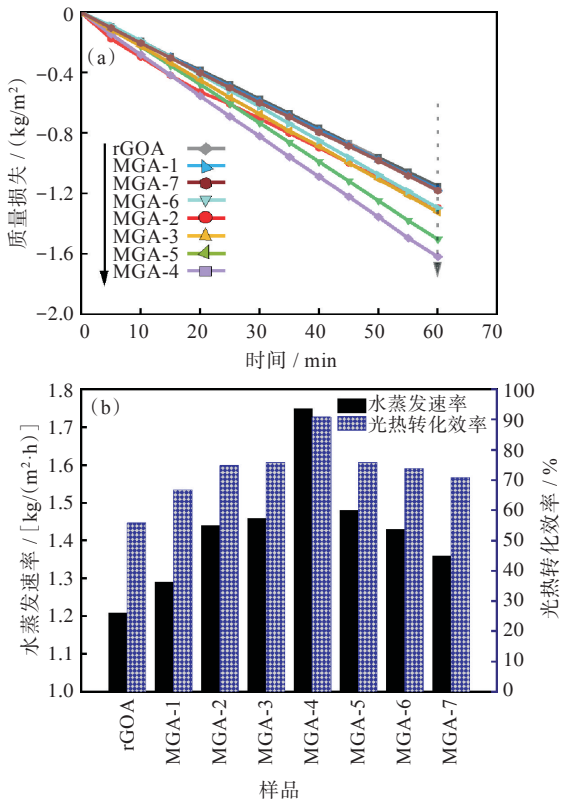


图5 rGOA和MWCNT/rGOA的水蒸发性能：(a)水体质量损失，(b)水蒸发速率和光热转化效率

Fig. 5 Water evaporation performance of rGOA and MWCNT/rGOA: (a) water mass loss, (b) water evaporation rate and photothermal conversion efficiency

3 结 论

本文将GO与MWCNT共混并通过水热还原法和冷冻干燥法成功制备了MWCNT/rGOA。石墨烯纳米片之间由于π-π相互作用，片层间产生堆叠，降低了气凝胶的比表面积，未能形成更加丰富的内部水通道，影响材料的水蒸发性能。通过将MWCNT与rGO复合，MWCNT通过π-π相互作用附着于rGO的表面和片层之间，改善了石墨烯片层间的相互堆叠。MWCNT含量较低时，内部孔道数目增多，随MWCNT含量的增加，MWCNT于内壁间高度缠绕，形成了三维多孔网络结构，有效增加了气凝胶内部孔道的数量与体积，使气凝胶内部形成了更加丰富的水传输体系，气凝胶的水蒸发性能得到增强。当MWCNT与GO的质量比达到0.4时，气凝胶的水蒸发速率和光热转化效率达到最大值1.75 kg/(m²·h)和91.1%。当MWCNT的含量进一步增加时，由于MWCNT的团聚加剧，堵塞了气凝胶内部水通道，并且由于内壁MWCNT含量增多，内壁发生弯曲，原有部分孔道坍塌，导致水蒸发速率下降，光热转换效率降低。

参考文献

[1] RASUL G. Food, water, and energy security in South Asia: a nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan region [J]. Environmental Science & Policy, 2014, 39: 35−48.

[2] LIU W F, ANTONELLI M, KUMMU M, et al. Savings and losses of global water resources in food-related virtual water trade [J]. WIREs: Water, 2019, 6(1): e1320.

[3] SCHWARZENBACH R P, EGLI T, HOFSTETTER T B, et al. Global water pollution and human health [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2010, 35: 109−136.

[4] WANG Q, YANG Z M. Industrial water pollution, water environment treatment, and health risks in China [J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 358−365.

[5] 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.

[6] MENG X Y, YANG J H, RAMAKRISHNA S, et al. Gradient vertical channels within aerogels based on N-doped graphene meshes toward efficient and salt-resistant solar evaporation [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(12): 4955−4965.

[7] BIENER J, STADERMANN M, SUSS M, et al. Advanced carbon aerogels for energy applications [J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(3): 656−667.

[8] 陈惠燕，何明宏，李亮，等. 三维硫氮双掺杂石墨烯/二氧化锰复合水凝胶的制备及性能研究[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(3)：282−287.

[9] WANG C J, WANG L Q, LIANG W D, et al. Enhanced light-to-thermal conversion performance of all-carbon aerogels based form-stable phase change material composites [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 605: 60−70.

[10] ERICKSON D, SINTON D, PSALTIS D. Optofluidics

for energy applications [J]. Nature Photonics, 2011, 5(10): 583−590.

[11] YANG T S, LIN H, LIN K T, et al. Carbon-based absorbers for solar evaporation: steam generation and beyond [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2020, 25: e00182.

[12] YANG L, CHEN G L, ZHANG N, et al. Sustainable biochar-based solar absorbers for high-performance solar-driven steam generation and water purification [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(23): 19311−19320.

[13] ZENG W, TAO X M, LIN S P, et al. Defect-engineered reduced graphene oxide sheets with high electric conductivity and controlled thermal conductivity for soft and flexible wearable thermoelectric generators [J]. Nano Energy, 2018, 54: 163−174.

[14] WANG Y C, WANG C Z, SONG X J, et al. A facile nanocomposite strategy to fabricate a rGO-MWCNT photothermal layer for efficient water evaporation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(3): 963−971.

[15] HU X Z, XU W C, ZHOU L, et al. Tailoring graphene oxide-based aerogels for efficient solar steam generation under one sun [J]. Advanced Materials, 2017, 29(5): 1604031.

[16] ZHANG C, REN L L, WANG X Y, et al. Graphene oxide-assisted dispersion of pristine multiwalled carbon nanotubes in aqueous media [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(26): 11435−11440.

[17] LI X Q, NI G, COOPER T, et al. Measuring conversion efficiency of solar vapor generation [J]. Joule, 2019, 3(8): 1798−1803.

[18] COOPER T A, ZANDAVI S H, NI G W, et al. Contactless steam generation and superheating under one sun illumination [J]. Nature Communications, 2018, 9: 5086.

[19] ZHUANG P Y, FU H Y, XU N, et al. Free-standing reduced graphene oxide (rGO) membrane for salt-rejecting solar desalination via size effect [J]. Nanophotonics, 2020, 9(15): 4601−4608.

[20] SHILYAEVA E A, NOVAKOVSKAYA Y V. Certain features of graphite oxide functional groups as drawn from simulations and experiment [J]. Structural Chemistry, 2019, 30: 583−594.

[21] ZHANG C, DABBS D M, LIU L M, et al. Combined effects of functional groups, lattice defects, and edges in the infrared spectra of graphene oxide [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119(32): 18167−18176.

[22] KIM S J, PARK S J, KIM H Y, et al. Characterization of chemical doping of graphene by *in-situ* Raman spectroscopy [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(20): 203111.

[23] FERRARI A C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects [J]. Solid State Communications, 2007, 143(1/2): 47−57.

[24] XU H, SONG G J, MA L C, et al. Evolution of properties and enhancement mechanism of large-scale three-dimensional graphene oxide-carbon nanotube aerogel/polystyrene nanocomposites [J]. Polymer Testing, 2021, 97: 107158.

[25] ZHANG W Y, KONG Q Q, TAO Z C, et al. 3D thermally cross-linked graphene aerogel-enhanced silicone rubber elastomer as thermal interface material [J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(12): 1900147.

[26] HUO B B, JIANG D G, CAO X Y, et al. N-doped graphene/carbon hybrid aerogels for efficient solar steam generation [J]. Carbon, 2019, 142: 13−19.

[27] YIN X Y, ZHANG Y, GUO Q Q, et al. Macroporous double-network hydrogel for high-efficiency solar steam generation under 1 sun illumination [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(13): 10998−11007.

本文编辑：苗　变