



MXene/CNF 复合气凝胶的制备及其光热转换性能

黄俊文^a, 唐 峰^a, 李营战^b, 周 颖^b, 余厚咏^b, 姚菊明^a

(浙江理工大学, a.材料科学与工程学院; b.纺织科学与工程学院(国际丝绸学院), 杭州 310018)

摘 要: 通过氢氟酸(HF)刻蚀法制备了过渡金属碳化物/碳氮化物(MXene)二维纳米材料, 并与纤维素纳米纤维(CNF)复合制备了 MXene/CNF 复合气凝胶。利用 SEM、X 射线衍射仪(XRD)、EDS 元素分析、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、热重测试(TGA)和红外热成像仪(IR)等技术分析了该复合气凝胶的微观形貌、晶体结构、化学组成、化学结构、热稳定性和光热转换性能。结果表明: MXene 呈片状二维结构, 复合气凝胶呈三维多孔结构; MAX 中的 Al 元素被成功地去除, MXene 和 CNF 之间没有化学相互作用; 复合气凝胶的热稳定性随着 MXene 添加量的增加而提高; MXene/CNF 复合气凝胶能够快速从室温(18.9 °C)升高至 26.1 °C, 水蒸气蒸发速率达到了 584.00 g/(m²·h), 是相同条件下 CNF 气凝胶水蒸气蒸发速率的 2.06 倍。制备的 MXene/CNF 复合气凝胶具有优异的循环稳定性。

关键词: 过渡金属碳化物/碳氮化物(MXene); 纤维素纳米线; 气凝胶; 光热转换

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2021) 11-0744-07

Preparation of MXene/CNF composite aerogel and its photothermal conversion property

HUANG Junwen^a, TANG Feng^a, LI Yingzhan^b, ZHOU Ying^b, YU Houyong^b, YAO Juming^a

(a. School of Materials Science & Engineering, b. School of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: MXene, which is a kind of two-dimensional (2D) nanomaterial, was prepared by hydrofluoric (HF) acid etching. And then, the prepared MXene was compounded with cellulose nanofibers (CNF) to prepare MXene/CNF composite aerogels. The microstructure, crystal structure, chemical composition, chemical structure, thermal stability and photothermal conversion properties of the composite aerogels were analyzed by SEM, X-ray diffractometer (XRD), EDS elemental analysis, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Thermogravimetric Analysis (TGA) and Infrared Imaging (IR). The results showed that Mxene presented a flaky two-dimensional structure, and the composite aerogel presented a 3D porous structure. The Al element in MAX was successfully removed. There was no chemical interaction between MXene and CNF. The thermal stability of composite aerogel increased with the increase of the addition of MXene. The MXene /CNF composite aerogel could rapidly increase from room temperature (18.9 °C) to 26.1 °C, and the vapour evaporation rate reached 584 g/(m²·h), which is 2.06 times of vapour evaporation rate of pure CNF aerogel under the same conditions. In addition, MXene/CNF composite aerogels had excellent cycling stability.

Key words: MXene; cellulose nanofiber; aerogel; photothermal conversion

0 引 言

随着人类社会的发展以及水资源利用的增加，对淡水资源需求也越来越高，绿色、高效的海水淡化材料越来越为人们所需要^[1-2]，光热海水蒸发技术由于在一定的条件下利用太阳光便可以源源不断地产生淡水，受到研究者的极大关注^[3]。多孔材料由于具有较高的输水能力和光吸收能力被广泛应用于光热转换材料中。具有高孔隙率、低密度、隔热性的纤维素气凝胶是众多种类的多孔材料中的一种典型代表^[4]，可应用于光热转换领域^[5]。纯纤维素气凝胶的光吸收能力差，满足不了光热转换材料对光热转换效率的需求^[6]。

过渡金属碳化物/碳氮化物(MXene)是一种新型的二维晶体^[7-9]，母体材料是具有六方晶体结构的纳米层状化合物(MAX)，MXene 的化学式是 $M_{n+1}X_n$ ($n=1,2,3$)，其中：M 是早期的过渡金属元素，X 是碳或氮元素。其具有优异的光热转换、力学、电化学等性能^[10-11]，并且 MXene 表面带有的—F、—OH 等官能团^[12-13]，使其能够与纤维素材料表面的羟基通过氢键或分子间相互作用形成交联结构，这让 MXene 融入纤维素材料基体成为可能。纳米纤维素纤维(CNF)是一种原料丰富且可再生的绿色环保材料^[14]，然而于其本身而言，并不具备导电性，需要添加其他物质与之复合后才能具备。国内外许多研究者对此进行了研究并取得了一定成果，证实了 MXene 与纳米纤维素复合的可行性，而且在加入 MXene 后，MXene/CNF 复合气凝胶的光热转换能力远高于 CNF 气凝胶的光热转换能力。Dong 等^[6]使用碳纳米管和 CNF 制备了太阳能海水淡化气凝胶，Javadi 等^[15]使用石墨烯和 CNF 制备的隔热气凝胶，与这两种气凝胶制备中使用的原料碳纳米管或石墨烯等普通碳材料相比较，MXene 材料的成本远低于这些普通碳材料，因而具有更加广泛的应用。CNF 碳气凝胶材料(如 Xu 等^[16]制备的碳化 CNF/MWCNT 油水分离气凝胶)在制备时需要进行耗费大量能源的碳化步骤，而 MXene/CNF 复合气凝胶的制备方法简单且消耗能源少，因此对于其工业化应用也有着重要的现实意义^[17-19]。

CNF 是一种绿色环保材料，然而其本身并不具备导电性，MXene 则是一种有着优异性能的导电材料。本文首先通过氢氟酸刻蚀 MAX 得到 MXene，并将二者复合成三维多孔的气凝胶，得到一种轻质、高性能的光热转换材料；然后机械搅拌 Mxene 与

CNF，再用冷冻干燥的干燥方法制备了 MXene/CNF 复合气凝胶；最后利用 SEM、X 射线衍射仪等仪器对其微观形貌和化学结构进行表征，并对其热稳定性和光热转换性能进行了测试。

1 材料与方法

1.1 实验试剂

钛碳化铝(Ti_3AlC_2 ，98.0%，200 目)、溴化钾(KBr，分析纯)、CNF(分析纯)、氟化锂(LiF，分析纯)、盐酸(HCl，分析纯)、无水乙醇(C_2H_5OH ，分析纯)和海盐，均购自上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 MXene 的制备

使用 HF 酸刻蚀 MAX 的方法，先将 100 mL 12 mol/L HCl 与 100 mL H_2O 相混合置于烧杯中，并添加 10.00 g LiF，得到 HF 溶液；随后缓慢加入 10.00 g Ti_3AlC_2 材料粉末进行刻蚀，将此溶液在集热式恒温加热磁力搅拌器于 35 ℃、200 r/min 的条件下搅拌 24 h，使其充分反应。将以上混合物在高速离心机中以 12000 r/min 离心 15 min，然后用去离子水洗涤，需要重复多次，直至最终的混合物 pH 值为 7，以保证去除多余的 HF。混合物在冷冻干燥机中冷冻干燥得到 MXene 粉末。

1.3 MXene/CNF 复合气凝胶的制备

采用 CNF(质量分数 1.2%)与 MXene 相混合后进行机械搅拌后冷冻干燥的方法制备得到 MXene/CNF 复合气凝胶。首先取 5 个微量瓶，各加入不同质量的 MXene 粉末(见表 1)和 6.66 g H_2O ，然后置于多点磁力搅拌机上搅拌 30 min。各加入 10.00 g CNF 溶液(质量分数 2.0%)，并置于超声波清洗器超声 30 min，得到均一分散的凝胶。将所得凝胶倒入准备好的模具中，用液氮等预处理使其凝固后，在冷冻干燥机的真空环境下进行 48 h 的冷冻干燥，产物即为 MXene/CNF 复合气凝胶。

表 1 不同配比 MXene/CNF 复合气凝胶样品的组成		
$m(MXene):m(CNF)$	$m(MXene)/g$	$m(CNF)/g$
1:1	0.20	0.20
1:3	0.07	0.21
1:5	0.04	0.20
3:1	0.60	0.20
5:1	1.00	0.20
0:1	0.00	0.20

1.4 表征方法

1.4.1 理化性质

采用场发射扫描电子显微镜(Ultra 55，德国

Carl Zeiss)分析样品表面形貌,加速电压为 3 kV。采用 X 射线衍射仪(K-Alpha,美国 Thermo Fisher Scientific)分析样品的晶体结构。采用傅里叶红外光谱仪(Nicolet iS50,美国 Thermo Electron)分析样品的化学组成。采用热失重分析仪(209F1,杭州汉泽仪器有限公司)分析复合气凝胶的热稳定性。采用红外热成像仪(Ti450,美国福禄克公司)测量太阳照射前后样品表面的温度。

1.4.2 MXene/CNF 复合气凝胶的光热转换性能表征

将 MXene/CNF 复合气凝胶和对比样 CNF 纤维素气凝胶放置在提前制备好的漂浮器上,并且使得气凝胶底端浸在质量分数为 3.5%的海盐水(模拟海水)中,在一倍太阳光强的直射下,记录不同照射时间下通过气凝胶蒸发的水蒸气量,采用红外热成像仪记录气凝胶表面的温度,用来考核 MXene/CNF 复合气凝胶对阳光的响应性以及光热转换速率,同时考核了 MXene/CNF 复合气凝胶气凝胶光热转换的可循环性能。经过测试,将 MXene/CNF 复合气凝胶置于海盐水中 0.5 h 后达到稳定,计算得到 MXene/CNF 复合气凝胶的水蒸气蒸发速率达到 584.00 g/(m²·h),吸水之后 MXene/CNF 复合气凝胶的密度达到了 867.76 mg/cm³,并且经过 15 个循环后依然能保持高效的水蒸气蒸发速率。水蒸气蒸发速率计算公式为:

$$P=\frac{m_0-m_t}{sT}\tag{1}$$

其中: P 为水蒸气蒸发速率,g/(m²·h); m_0 为气凝

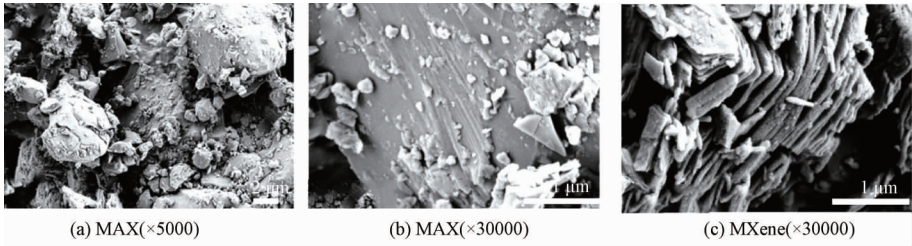


图1 MAX 和 MXene 的 SEM 图

2.1.3 XRD 表征分析

MAX 和 MXene 的 XRD 图谱如图 2 所示。图 2 表明:MXene 特征峰为 34.3°(101)、39.0°(104)和 42.3°(105)等;刻蚀使得 MAX 的部分特征峰有着极大的降低甚至消失,由于暴露在表面的 Ti 原子与—OH、—F 所结合形成 Ti₃C₂(OH)₂ 和 Ti₃C₂F₂,在部分位置出现了新的特征峰;一些峰发生了较小的偏移,其原因为 Ti—C 的键强于 Ti—Al 键,在 Al 元素被除去后材料的内部构造发生膨胀,使其层间距发生了改变。

胶初始质量,g; m_t 为光照一定时间后气凝胶的质量,g; s 为蒸发面积,m²; T 为时间,h。

气凝胶的密度计算公式为:

$$\rho=\frac{m_{\text{Aerogel}}}{V}\tag{2}$$

其中: ρ 为气凝胶密度,mg/cm³; m_{Aerogel} 为气凝胶质量,mg; V 为气凝胶体积,cm³。

2 结果与讨论

2.1 MXene 的制备分析

2.1.1 EDS 表征分析

利用 EDS 测试表征 MAX 与 MXene 的元素含量,结果如表 2 所示。从表 2 可以看到,刻蚀前后 Al 元素的重量百分比和原子含量发生了降低,Ti 与 Al 的原子比的升高,证明 MAX 成功的被 HF 刻蚀。

表 2 MAX 与 MXene 的元素含量				
元素	MAX		MXene	
	重量百分比/%	原子含量/%	重量百分比/%	原子含量/%
C	33.15	63.19	54.83	82.22
Al	10.09	8.66	2.71	1.81
Ti	56.76	27.43	42.46	15.97

2.1.2 微观形貌表征分析

对 MAX 和制备得到的 MXene 在 SEM 下进行观察,结果如图 1 所示。在图 1(a)一(b)中可以看到,MAX 呈现独特的六方层状结构;而从图 1(c)中可看出,MXene 呈现典型的片状结构,与文献[20]的结果相同,进一步证实了 HF 对 MAX 的成功刻蚀。

2.2 MXene/CNF 复合气凝胶的制备分析

2.2.1 MXene/CNF 复合气凝胶的宏观形貌分析

MXene/CNF 复合气凝胶和 CNF 气凝胶的实物照片如图 3 所示。从图 3 可以看到 MXene/CNF 复合气凝胶呈现明显的灰黑色,而 CNF 气凝胶为白色,表明 MXene 已经融入了 CNF 中;MXene/CNF 复合气凝胶整体外观形貌呈现黑色,有利于光的吸收。MXene 复合材料由于其优异的电磁波吸收能力^[21],能够有效地吸收阳光,Shahzad 等^[22] 对于

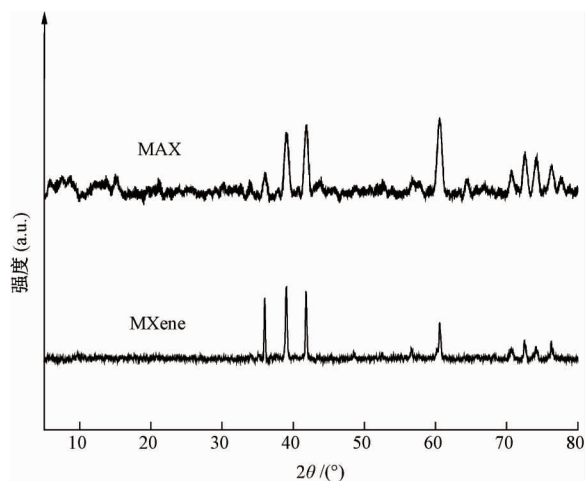


图 2 MAX 和 MXene 的 XRD 图谱

MXene 相关材料提出一个电磁干扰屏蔽效应,在未反射的电磁波可以通过 MXene 晶格结构进行层间的内部反射,并最终被吸收,辐射可以忽略不计,保证了 MXene 材料在广泛的太阳光谱范围内的有效光吸收,复合材料可以从阳光中吸收光子发生光激发,移动电荷所携带的能量由光感应电场驱动,最终将太阳能转化为热能。

2.2.2 MXene/CNF 复合气凝胶的微观形貌表征分析

不同配比下 MXene/CNF 复合气凝胶和 CNF

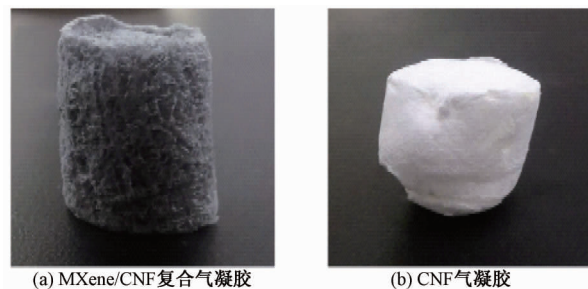


图 3 气凝胶的数码照片

气凝胶的 SEM 照片如图 4 所示。由于氢键作用和官能团之间的结合,使得 MXene 纳米片上连接有类似蛛网的相互连结的 CNF,从而构成了微观下错综复杂的三维网状结构^[20],图 4(b)–(c)显示,复合气凝胶在厚度方向上明显的更为紧凑。在冷冻干燥过程中,由于冰晶从底部垂直方向生长,在其升华后留下了大量孔洞^[23],微观下,气液界面溶剂蒸发产生的毛细管压力传递到气凝胶的孔壁,同时毛细管压力也会作用于气凝胶的孔壁,使得气凝胶具备极大的孔隙率,并且 MXene 比重越高,其孔洞越少,在图 4(e)–(f)中可以看到,气凝胶表面比较粗糙,存在有少量的颗粒物杂质。

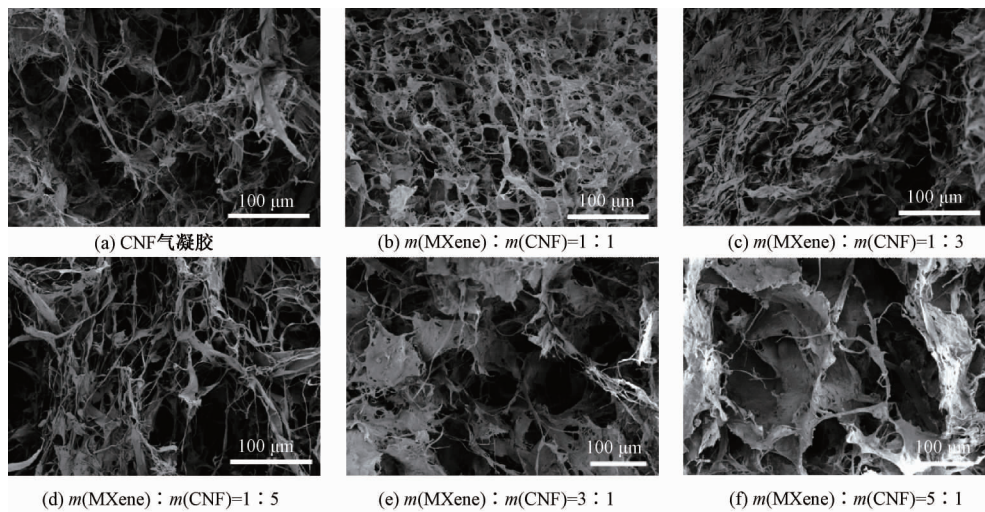


图 4 MXene 和 CNF 按不同质量比复合的气凝胶的 SEM 照片

2.2.3 MXene/CNF 复合气凝胶的化学结构表征分析

不同配比下 MXene/CNF 复合气凝胶的傅里叶变换红外光谱如图 5 所示。图 5 表明,6 组曲线在 3460 cm^{-1} 处和 1639 cm^{-1} 左右处都有较为明显突出的吸收峰,分别是由于 —OH 伸缩振动和 —OH 弯曲振动所导致的,后者是 H_2O 的吸收峰,表明了样品吸收了空气中的水蒸气,具有一定的吸水性; 2920 cm^{-1} 处 C—H 的伸缩振动、 1160 cm^{-1} 处

C—O—C 糖苷键的不对称伸缩振动吸收峰和 663 cm^{-1} 的 —OH 平面外弯曲的吸收峰^[24];在 5 组复合气凝胶的红外光谱上都发现了典型的 CNF 的吸收峰,表明了 MXene 的加入并未使 CNF 发生化学结构上的破坏,才能使得这些吸收峰保持完整。在 1387 cm^{-1} 处和 584 cm^{-1} 处有吸收峰,分别对应 MXene 中的表面端基 C—F 和 C—OH ,表明了 MXene 与 CNF 成功地复合在了一起。

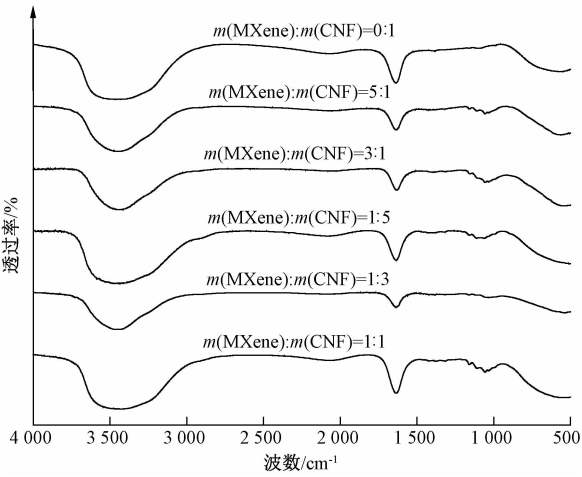


图5 不同配比的MXene/CNF复合气凝胶的傅里叶变换红外光谱图

2.2.4 MXene/CNF复合气凝胶的热稳定性表征分析

不同配比下MXene/CNF复合气凝胶的TG分析如图6所示。图6表明,CNF气凝胶的初始分解温度大约在270℃,而 $m(\text{MXene}):m(\text{CNF})=5:1$ 的气凝胶的初始分解温度在~310℃,且经过热失重测试后,CNF气凝胶的剩余质量最低,而 $m(\text{MXene}):m(\text{CNF})=5:1$ 的气凝胶剩余质量最高,同质量的复合气凝胶中MXene的含量越高,剩余的质量越多,热稳定性能随MXene含量的增加而提升。

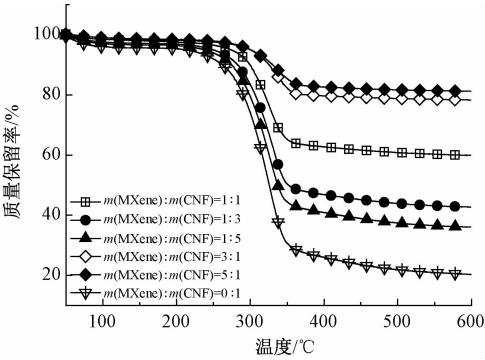


图6 不同配比的MXene/CNF复合气凝胶的TG曲线

不同配比下MXene/CNF复合气凝胶的DTG分析如图7所示。由图7可知,6组样品都只有一个热降解过程,图中峰越向下突出则表明其质量下降越快,添加的MXene量越多,峰越平缓;MXene在复合材料中的比重增加后,峰出现了明显的右移倾向,CNF气凝胶的最大分解温度在320℃附近,而 $m(\text{MXene}):m(\text{CNF})=5:1$ 的气凝胶的最大分解温度在335℃左右,也可以证明复合气凝胶的热稳定性随MXene的增加而提高。

2.3 MXene/CNF复合气凝胶的光热转换能力评价

利用红外热成像仪测量了MXene/CNF复合气

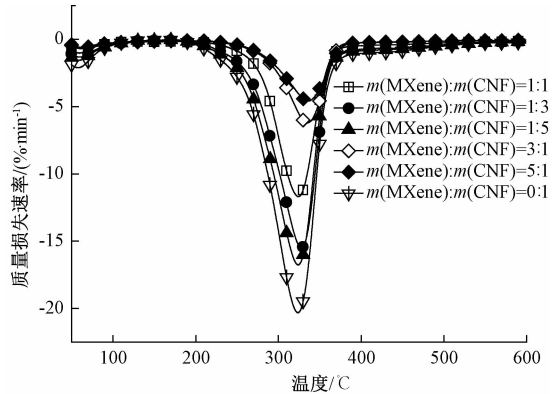


图7 不同配比的MXene/CNF复合气凝胶的DTG曲线

凝胶的表面温度,MXene/CNF复合气凝胶的温度随时间变化图以及红外热成像照片如图8和图9所示。由图8和图9可知,在10 min内,MXene/CNF复合气凝胶的表面温度快速从18.9℃升高至25.5℃,其原因是光线照射到材料表面时,呈蛛网状三维多孔结构MXene/CNF复合气凝胶会将光在其内部进行折射和漫反射,提升光吸收效率;MXene/CNF复合气凝胶中的MXene具有优异的光吸收能力,进而将吸收的光能转换成热量提升复合气凝胶的温度。但随着照射时间的继续增加,MXene/CNF复合气凝胶表面温度逐渐达到一个稳定值(26.1℃),其原因是继续吸收的光热产生的热量与复合材料通过热辐射和热传导散失的热量达到了一个动态平衡,最终使得材料的表面温度保持在了一个稳定值。以上结果表明,MXene/CNF复合气凝胶具有优异的光热转换能力。

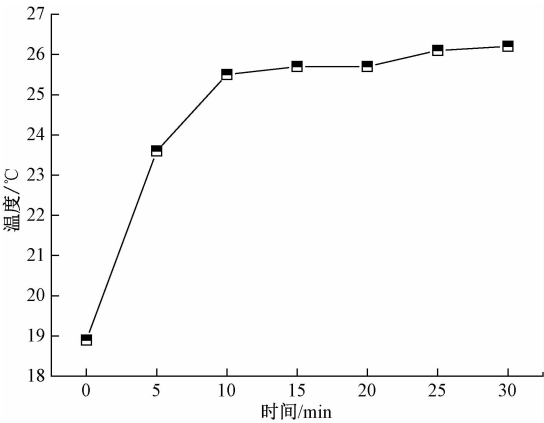


图8 MXene/CNF复合气凝胶的光热转换能力

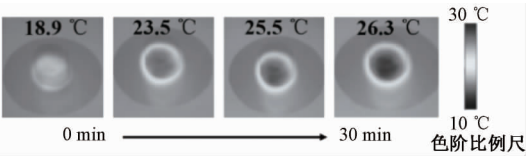


图9 MXene/CNF复合气凝胶红外热成像照片

光热转换材料的吸水能力是影响其水蒸发效率

的另一个重要因素,材料的吸水量越大,说明材料在使用过程中,其储存水的能力越强,其输水能力也越强,那么其蒸发速率也可以随之提高。图 10 为 MXene/CNF 复合气凝胶在吸水之前与吸水之后的密度对比。图 10 表明,MXene/CNF 复合气凝胶具有很高的吸水量,吸水之前 MXene/CNF 复合气凝胶的密度为 55.94 mg/cm^3 ,吸水之后 MXene/CNF 复合气凝胶的密度达到了 867.76 mg/cm^3 ,通过吸水之前与吸水之后的质量计算得到气凝胶的吸水量达到了 14.51 g/g ,其原因是 CNF 气凝胶材料三维蛛网状多孔结构和纳米纤维素的亲水性,赋予其极强的吸水能力,进而有效地增加蒸发过程中的水分运输能力。

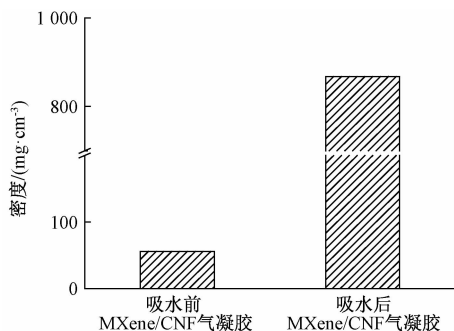


图 10 MXene/CNF 复合气凝胶吸水前后的密度对比

MXene/CNF 复合气凝胶和 CNF 气凝胶的水蒸气蒸发速率随时间变化如图 11 所示。图 11 显示,MXene/CNF 复合气凝胶具有良好的光热吸收能力和光热转换能力,在气凝胶表面温度达到稳定时,能够将水分充分蒸发从而有较高的光热转换速率;MXene/CNF 复合气凝胶的水蒸气蒸发速率达到了 $584.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,作为比对的 CNF 气凝胶的水蒸气蒸发速率只有 $284.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,MXene/CNF 复合气凝胶的水蒸气蒸发速率相比较于 CNF 气凝胶提高了 2.06 倍,其原因为加入 MXene 后,气凝胶内部的网状结构以及微孔中都充满着 MXene,提高了光热吸收能力以及光热转换能力。

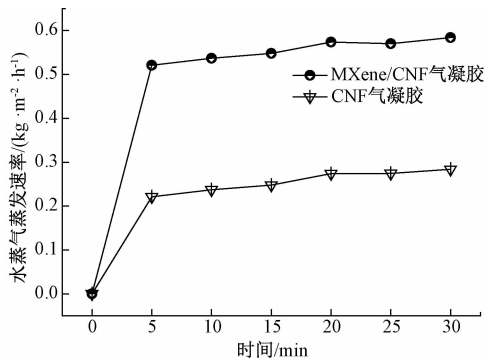


图 11 CNF 气凝胶和 MXene/CNF 复合气凝胶的水蒸气蒸发速率随时间变化曲线

通过循环试验,验证了 MXene/CNF 复合气凝胶使用的重复利用性和耐久性,结果如图 12 所示。图 12 表明,在经过 15 个循环的水蒸气蒸发测试后,MXene/CNF 复合气凝胶仍然能够保持较高的水蒸气蒸发速率,且与开始时的光热转换能力相差无几,证明 MXene/CNF 复合气凝胶由于 CNF 具有高长径比,同时富含羟基,能够通过氢键形成物理缠结点等优点,使气凝胶的三维蛛网状多孔结构保持稳定,因此循环使用后仍然具备较好的稳定性。

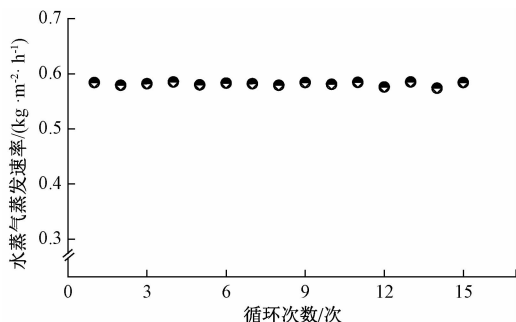


图 12 MXene/CNF 复合气凝胶的耐久性测试结果

3 结 论

本文使用 HF 酸刻蚀法制备了 MXene 二维材料,将得到的 MXene 与 CNF 物理复合,制备了 MXene/CNF 复合气凝胶,并考察其热稳定性能等性能,探究其光热转换能力,主要结论如下:

a)成功制备得到 MXene, Al 原子的含量由 8.66%降低到 1.81%,MAX 中 Al 层被成功地刻蚀;SEM 结果表明其微观结构发生了改变,由 MAX 的六方层状结构变为 MXene 的二维片状结构。

b)MXene/CNF 复合气凝胶呈三维多孔结构,密度为 55.94 mg/g ,且孔洞随着 MXene 比重的增多而减少,MXene 的添加可以明显地改善复合气凝胶的热稳定性能。

c)MXene/CNF 复合气凝胶具备较好的光热转换能力,其水蒸气蒸发速率达到了 $584.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,相比较于 CNF 气凝胶提高了 2.06 倍,经过耐久性测试后复合气凝胶仍然具有良好的光热转换性能,证明其具有良好的耐久性。

参考文献:

- [1] Abdelbasir S M, Shalan A E. An overview of nanomaterials for industrial wastewater treatment[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2019, 36(8): 1209-1225.
- [2] Shindhal T, Rakholiya P, Varjani S, et al. A critical

- review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater [J]. Bioengineered, 2021, 12(1): 70-87.
- [3] 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.
- [4] 张雪洁. 功能化纤维素纳米纤维气凝胶的制备及应用[D]. 济南: 山东大学, 2019: 50-63.
- [5] Peng F J, Xu J, Bai X L, et al. A Janus solar evaporator with 2D water path for highly efficient salt-resisting solar steam generation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 221: 110910.
- [6] Dong X Y, Cao L T, Si Y, et al. Cellular structured CNTs@SiO₂ nanofibrous aerogels with vertically aligned vessels for salt-resistant solar desalination[J]. Advanced Materials, 2020, 32(34): 1908269.
- [7] 张天, 潘丽梅, 唐欢, 等. 二维晶体 Ti₂CT_x MXene 的制备、剥离及其电化学性能[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(6): 1514-1519.
- [8] 申长洁, 王李波, 张恒, 等. 二维晶体材料 MXene 的电化学应用研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(19): 148-153.
- [9] Jiang Y, Xie X, Chen Y, et al. Hierarchically structured cellulose aerogels with interconnected MXene networks and their enhanced microwave absorption properties[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(32): 8679-8687.
- [10] Zhao X, Zha X J, Tang L S, et al. Self-assembled core-shell polydopamine@MXene with synergistic solar absorption capability for highly efficient solar-to-vapor generation[J]. Nano Research, 2020, 13(1): 255-264.
- [11] Zhao J Q, Yang Y W, Yang C H, et al. A hydrophobic surface enabled salt-blocking 2D Ti₃C₂MXene membrane for efficient and stable solar desalination[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(33): 16196-16204.
- [12] Naguib M, Mochalin V N, Barsoum M W, et al. 25th anniversary article: MXenes: A new family of two-dimensional materials[J]. Advanced Materials, 2014, 26(7): 992-1005.
- [13] 叶代勇. 纳米纤维素的制备[J]. 化学进展, 2007, 19(10): 1568-1575.
- [14] Zhao M Q, Xie X Q, Ren C E, et al. Hollow MXene spheres and 3D macroporous MXene frameworks for Na-ion storage [J]. Advanced Materials, 2017, 29(37): 1702410.
- [15] Javadi A, Zheng Q, Payen F, et al. Polyvinyl alcohol-cellulose nanofibrils-graphene oxide hybrid organic aerogels [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(13): 5969-5975.
- [16] Xu Z, Jiang X, Tan S, et al. Preparation and characterisation of CNF/MWCNT carbon aerogel as efficient adsorbents[J]. IET Nanobiotechnology, 2018, 12(4): 500-504.
- [17] Sun R H, Zhang H B, Liu J, et al. Highly conductive transition metal carbide/carbonitride (MXene) @ polystyrene nanocomposites fabricated by electrostatic assembly for highly efficient electromagnetic interference shielding [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(45): 1702807.
- [18] He P, Cao M S, Shu J C, et al. Atomic layer tailoring titanium carbide MXene to tune transport and polarization for utilization of electromagnetic energy beyond solar and chemical energy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(13): 12535-12543.
- [19] Naguib M, Come J, Dyatkin B, et al. MXene: A promising transition metal carbide anode for lithium-ion batteries [J]. Electrochemistry Communications, 2012, 16(1): 61-64.
- [20] Li Y Z, Grishkewich N, Liu L L, et al. Construction of functional cellulose aerogels via atmospheric drying chemically cross-linked and solvent exchanged cellulose nanofibrils[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 366: 531-538.
- [21] Xu D X, Li Z D, Li L S, et al. Insights into the photothermal conversion of 2D MXene nanomaterials: Synthesis, mechanism and applications[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(47): 2000712.
- [22] Shahzad F, Alhabeab M, Hatter C B, et al. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)[J]. Science, 2016, 353(6304): 1137-1140.
- [23] Zha X J, Zhao X, Pu J H, et al. Flexible anti-biofouling MXene/cellulose fibrous membrane for sustainable solar-driven water purification[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(40): 36589-36597.
- [24] Cao W T, Chen F F, Zhu Y J, et al. Binary strengthening and toughening of MXene/cellulose nanofiber composite paper with nacre-inspired structure and superior electromagnetic interference shielding properties[J]. ACS Nano, 2018, 12(5): 4583-4593.