

CNT@C 膜的制备及其水蒸发性能研究

王宽迪, 刘 通, 李 爽, 贺高红, 姜晓滨, 吴雪梅, 肖 武, 李祥村*

(大连理工大学 化工学院, 精细化工国家重点实验室, 膜科学与技术研究开发中心, 大连 116024)

摘要: 针对太阳能水蒸发系统中光热材料光捕获能力差、热损大、光热转换效率低等问题, 本研究以 CNTs 及其复合材料为光热转换材料, 通过对水蒸发系统的结构调控实现高效、稳定的太阳能蒸发性能。通过相转化法制备了碳纳米管为骨架的多孔 CNT@C 水蒸发膜, 并研究了其在太阳能水蒸发中的应用。CNT@C 膜的分级孔道结构为水分的运输提供了保障, CNT@C 膜中碳纳米管良好的吸光性能能够确保广泛的太阳光被吸收。以 CNT@C-1 膜为光热材料的隔离式水蒸发系统, 在 1 个太阳光强照射下 (1 kW/m^2), 水蒸发速率为 $2.35 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 在真实海水的测试中, CNT@C-1 膜的蒸发速率为 $2.31 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

关键词: 相转化法; 水蒸发; 碳膜; 碳纳米管

中图分类号: TQ152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)05-0112-09

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.05.011

随着工业化社会的发展, 水资源短缺已经成为一个亟需解决的全球性问题^[1-3]。而传统的水处理方法需要持续的外界能源消耗, 生产成本低而且污染环境, 不满足可持续发展的要求^[4-5]。太阳能作为一种可再生的清洁能源, 被认为是解决水资源短缺问题的重大力量^[6]。但由于传统的光热材料对太阳光的吸收率较低, 以及光热材料向其他介质传热造成的热损失, 导致蒸发系统的光热转换效率较低。目前已被报道的光热转化材料主要包括四类, 分别为有机聚合物材料、金属基纳米材料、碳基纳米材料、半导体材料。有机聚合物材料主要包括吡啶菁染料和共聚高分子类, 这类材料在浓度过大时会发生团聚, 与大多数有机光热转化材料一样, 表现出较差的光热稳定性^[7-9]。金属纳米粒子因其独特的局域表面等离子体共振效应也同样被人们青睐, 并

且运用到太阳能光热利用中, 但贵金属纳米粒子在工业生产中成本高, 不适用于大规模海水淡化系统^[10-11]。半导体光热转化材料在进行光热转化时有着和贵金属纳米粒子相似的原理, 即表面等离子体共振效应, 在多次或者很长时间光照射后仍能保持较高的光热稳定性^[12-13]。但半导体材料制备过程复杂, 成本较高, 不易规模化生产并形成光热吸收层。

近年来, 许多具有宽波段太阳光吸收特性的材料被用于太阳能水蒸发, 其中碳基材料在宽光谱范围内具有很强的光吸收能力, 同时具有导热系数高、抗污染性强的优点, 被认为是水蒸发系统中优良的光热材料^[14-15]。特别是碳纳米管(CNTs)作为一种典型的一维纳米结构材料, 具有超强的光吸收能力和热传递能力, 经常被掺杂到膜中以提高其光吸收

收稿日期: 2025-03-17; 修改稿收到日期: 2025-04-28
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(22478054); 创新群体项目(22021005)
第一作者简介: 王宽迪(2003-), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要研究方向为膜制备及水处理。* 通讯作者, E-mail: lixiangcun@dlut.edu.cn
引用本文: 王宽迪, 刘 通, 李 爽, 等. CNT@C 膜的制备及其水蒸发性能研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(5): 112-119, 132.
Citation: Wang K D, Liu T, Li S, et al. Preparation and water evaporation properties of CNT@C membrane[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(5): 112-119, 132.

能力^[16-17]。

基于以上背景,利用相转化法制备了一种以碳纳米管为骨架的多孔碳膜(CNT@C)作为水蒸发材料,采用隔离式水蒸发系统并建立一维水路通道进行太阳能水蒸发测试。CNT@C 膜中碳纳米管优良的吸光性能能够确保水蒸发过程中太阳光尽可能被吸收,并且分级的孔道结构可以促进水分的运输。以 CNT@C-1 膜为光热转换材料的水蒸发系统,具有高效的蒸发速率和海水淡化能力。

1 实验部分

1.1 CNT@C 膜的制备

将 1 g 聚丙烯腈(PAN,分析纯,麦克林试剂有限公司)、1 g 碳纳米管(羧基多壁碳纳米管, C139835, > 95%, 阿拉丁试剂有限公司)、12 g N, N-二甲基甲酰胺(DMF,分析纯,阿拉丁试剂有限公司)置于 50 mL 带盖玻璃瓶中,在 60~80 °C 油浴中搅拌 12 h,至形成均匀、黏稠的黑色铸膜液。待铸膜液冷却至室温后,使用自动涂覆机将铸膜液涂覆于干燥洁净的玻璃板上,形成厚度为 200 μm 的液膜。将玻璃板迅速转移至去离子水中,基于相转化原理形成多孔膜,即碳纳米管掺杂的 PAN 基膜,浸泡 24 h 后取出晾干,再将其转移至真空干燥箱中,在 90 °C 下真空干燥 4 h 以去除膜中剩余的水分。将干燥后的多孔膜转移至马弗炉中,以 2 °C/min 的升温速率升温至 250 °C,保温 2 h,待温度自然降至室温后完成预氧化处理,然后将膜放置在充满氩气的管式炉中,以 5 °C/min 的升温速率升温至 700 °C,保温 1 h 进行碳化处理,得到 CNT@C 膜。其他药品用量不变,将碳纳米管的用量改为 0.5 g 和 0.8 g,分别制备 CNT@C 膜,按照碳纳米管的添加量分别将其命名为 CNT@C-0.5 膜、CNT@C-0.8 膜和 CNT@C-1 膜。CNT@C-0.5 膜和 CNT@C-0.8 膜的制备过程与 CNT@C-1 膜的制备方式相同。当膜制备过程中 CNT 添加量增大到 1.2 g 时,铸膜液的黏度增大,难以制备孔结构均匀的蒸发膜。

1.2 CNT@C 膜的表面表征

使用场发射扫描电子显微镜及 X 射线能谱(SEM,NOVA Nano SEM 450,JEM-F200,FEI 公司),对 CNT@C 膜的形貌和元素构成分别进行表征,使用 X 射线衍射仪对 CNT@C 膜的晶型进行表

征(XRD,D8 Advance,德国布鲁克公司),使用紫外可见近红外分光光度计测试 CNT@C 膜对光的吸收、透过及反射光谱(1J1-0015,日本株式会社日立制作所),使用接触角测量仪测量 CNT@C 膜的水接触角[DSA30S,克吕士科学仪器(上海)有限公司]。

1.3 CNT@C 膜的水蒸发性能测试

1) 隔离式水蒸发器的制备

将带有圆孔的聚苯乙烯(PS)泡沫按照聚四氟乙烯烧杯的尺寸进行剪裁,将其置于烧杯中作为 CNT@C 膜的隔热层,并与烧杯中的水面之间留有一定空间(不与水接触),使用吸水绳作为一维水路通道向 CNT@C 膜材料提供足够、连续的水分,如图 1 所示。采用的蒸发膜为厚度约 150 μm 、直径为 1.7 cm 的膜片。

2) 水蒸发性能的测试

在湿度为 35%~45%,温度为(20 $\pm$ 5) °C 的环境下进行水蒸发实验。使用去离子水、海水对水蒸发器进行测试,并且分别进行不同光照强度下的蒸发测试。所有太阳能水蒸发实验均在均匀光氙光源(CEL-PE300L-3A,300W 氙灯,AM1.5 滤光片)的照射下进行。光强度由光功率计(CEAULIGHT CEL-NP2000)测试。使用精度为 0.001 g 的电子天平(Sartorius)在相同的时间间隔记录质量变化。

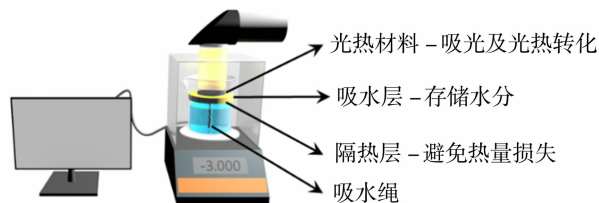


图 1 隔离式水蒸发系统装置图

Fig. 1 Installation diagram of solar water evaporation system

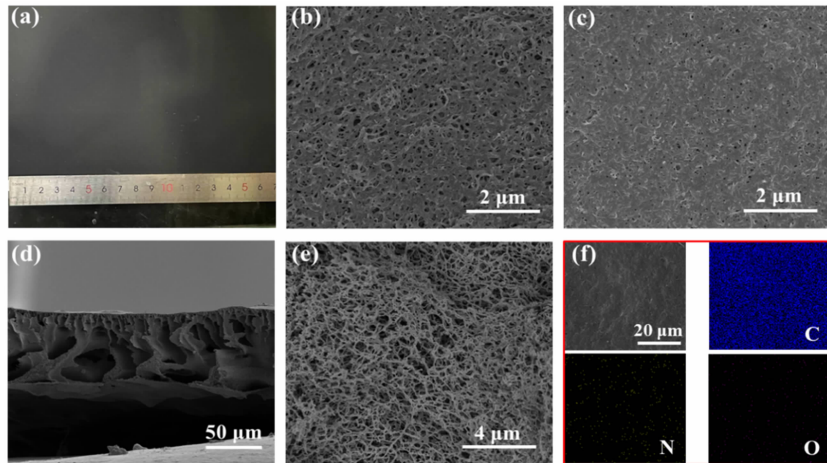
2 结果与讨论

2.1 CNT@C 膜的结构与光谱性能分析

如图 2(a)所示,利用相转化法得到的 CNT-PAN 膜呈现黑色,表面平整,膜面积较大,适合大规模生产^[18-21]。CNT-PAN 膜经预氧化、碳化后得到 CNT@C-1 膜,碳化后膜具有更好的吸光导热性能。膜表面的扫描电镜照片如图 2(b)、2(c)所示,膜的一面为多孔层,另一面是致密层,两面都有较多的孔,这是由于碳纳米管是一种溶剂/非溶剂相容性

较差的物质,将其加到铸膜液中会导致聚合物在相转化过程中难以快速聚集形成致密层,所以 CNT@C膜的致密层也会有较多的孔。膜断面的扫描电镜照片如图 2(d)所示,显示出不对称的分级孔道结构,即典型的指状孔结构。放大后的电镜照片如图 2(e)所示,可以看出大量的碳纳米管相互交错在一起,形成网络结构,这样相互连接的多孔结构有

利于水蒸发过程中水分的运输,分层的多级孔道结构会促进水的流动,有利于盐的自由循环。通过 EDX 结果[图 2(f)]可以看出膜表面有大量的 C 存在,N 和 O 的含量较少并且在膜中均匀分布。N 元素的存在有利于增强膜的极性和亲水性能,协同孔结构的毛细作用、膜两侧水浓度差促进水在膜内传输并达到膜表面蒸发。



(a) CNT-PAN 膜的数码照片;(b)、(c)CNT@C-1 膜表面的扫描电镜照片;
(d)、(e)CNT@C-1 膜断面的扫描电镜照片;(f) CNT@C-1 膜表面的元素分布图

图 2 SEM 图像及 EDX 图谱

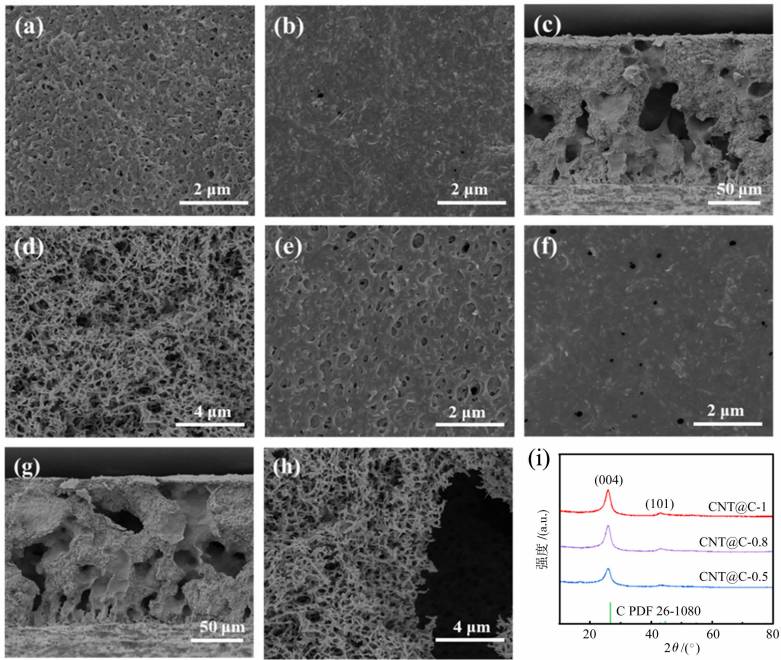
Fig. 2 SEM image and EDX spectra

除此之外,还制备了两种 CNT@C 膜,分别为 CNT@C-0.5 和 CNT@C-0.8 膜。图 3(a)、3(b)和 3(e)、3(f)分别是 CNT@C-0.5 膜和 CNT@C-0.8 膜表面的扫描电镜图片,从中可以看出膜的两侧依然是一面致密一面多孔。断面也显示出指状孔结构及交错的网络结构,图 3(c)、3(d)为 CNT@C-0.5 膜断面的扫描电镜图,图 3(g)、3(h)为 CNT@C-0.8 膜断面的扫描电镜图。CNT@C 膜的晶体结构采用 X 射线衍射仪测定,在图 3(i)中可以清楚地观察到分布于 25.95° 、 43.15° 左右的 2θ 衍射峰,分别对应 CNT 的(004)和(101)晶面(PDF 26-1080)。由扫描电镜可知,三种膜具有类似的网络孔结构,孔隙率为 $86\%\sim 89\%$ 。

材料的亲水性对水分蒸发过程中的输水作用有着重要的影响。使用接触角测量仪测量 CNT@C- x ($x=0.5, 0.8, 1$)膜的水接触角,如图 4(a)~4(f)所示,其中 CNT@C-0.5 膜的水接触角开始时为 79° ,经过 2 s 后变为 65° ;CNT@C-0.8 膜的水接触角开始为 77° ,经过 2 s 后变为 64° ;CNT@C-1 膜的水接触角开始为 76° ,经过 2 s 后变为 61° 。说明三

种 CNT@C 膜均具有良好的亲水性,有利于水蒸发过程中及时将水运输至材料表面,以保证有源源不断的水可用于蒸发。且由于本研究采用的羧基碳纳米管,因此随着其含量的增大,CNT@C 的亲水性增强、接触角减小。

为了探究 CNT@C- x 膜的光吸收性能,利用紫外可见近红外分光光度计测试了碳膜在 $250\sim 2\,500$ nm 波长范围的光吸收、透过、反射光谱,分别对应图 4(g)~4(i)。从图 4(g)的光吸收光谱中可以看出,CNT@C-1 膜在紫外区域($250\sim 400$ nm)的平均光吸收度为 62.7% ,在可见光区($400\sim 760$ nm)的平均光吸收度为 68.21% ,在红外光区域($760\sim 2\,500$ nm)的平均光吸收度为 66.03% ;同理,CNT@C-0.8 膜分别为 59.84% 、 59.58% 和 57.78% ;而 CNT@C-0.5 膜分别为 42.26% 、 44.82% 和 43.79% 。从图 4(h)的光透过光谱中可以看出,CNT@C-1 膜在在可见光区($400\sim 760$ nm)的平均光透过率为 43.05% ,在红外光区域($760\sim 2\,500$ nm)的光透过率为 40.02% ;CNT@C-0.8 膜分别为 59.84% 、 46.69% 和 42.21% ;而 CNT@C-0.5



(a)、(b) CNT@C-0.5 膜表面的扫描电镜照片；(c)、(d) CNT@C-0.5 膜断面的扫描电镜照片；
(e)、(f) CNT@C-0.8 膜表面的扫描电镜照片；(g)、(h) CNT@C-0.8 膜断面的扫描电镜照片；
(i) CNT@C-0.5 膜、CNT@C-0.8 膜及 CNT@C-1 膜的 XRD 图谱

图 3 SEM 图像及 XRD 图谱

Fig. 3 SEM image and XRD patterns

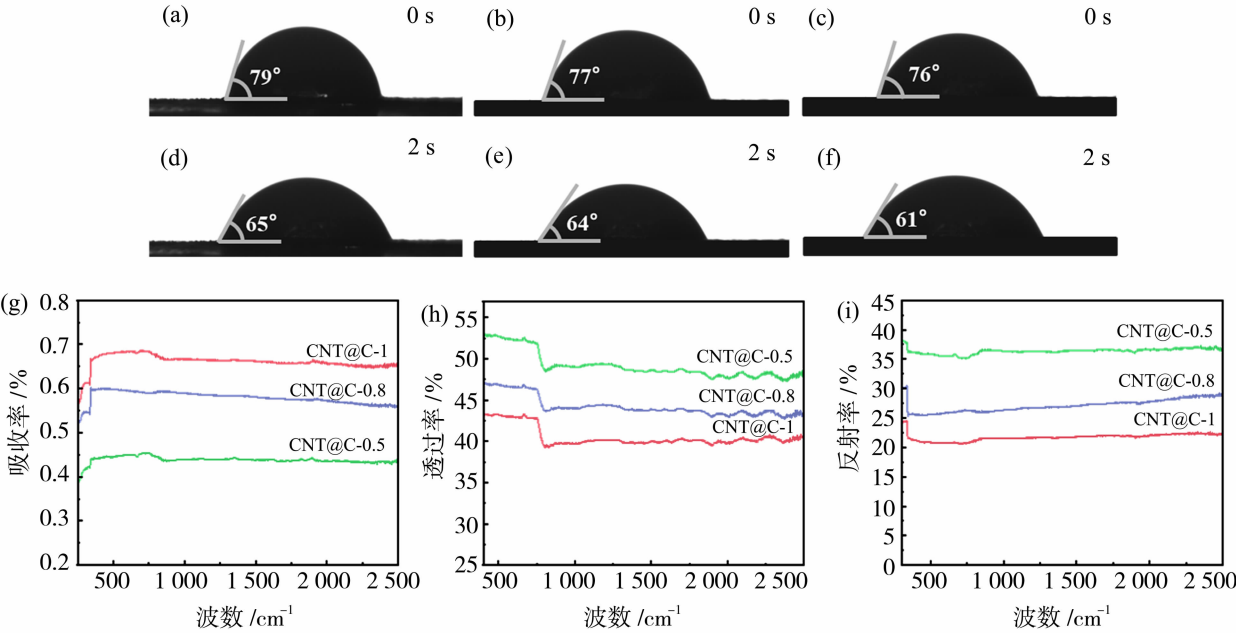


图 4 CNT@C-0.5 膜[(a)、(d)]、CNT@C-0.8 膜[(b)、(e)],及 CNT@C-1 膜[(c)、(f)]在 0 s 和 2 s 时的水接触角；CNT@C-0.5 膜、CNT@C-0.8 膜及 CNT@C-1 膜的紫外可见近红外光谱：吸收(g)，透过(h)，反射(i)

Fig. 4 Water contact angle of CNT@C-0.5 membrane [(a),(d)], CNT@C-0.8 membrane [(b),(e)] and CNT@C-1 membrane [(c),(f)] at 0 s and 2 s; UV-vis near-infrared spectra of CNT@C-0.5, CNT@C-0.8 and CNT@C-1 membranes: absorbance (g), transmittance (h), reflectance (i)

膜分别为 46.38%、52.44%和 48.52%。从图 4(i)的光反射光谱中可以看出,CNT@C-1 膜在紫外区域(250~400 nm)的平均光反射率为 23.68%,在可见光区(400~760 nm)的平均光反射率为 20.79%,在红外光区域(760~2 500 nm)的光反射率 21.86%;同理,CNT@C-0.8 膜分别为 28.71%、25.83%和 27.35%;而 CNT@C-0.5 膜分别为 37.82%、35.63%和 36.48%。由此可见,CNT@C-1 膜具有高效及宽波长的太阳光吸收能力,并具有较低的透过及反射性,这与碳纳米管的强吸光特性和膜表面多孔的结构有密切的联系^[21]。

2.2 CNT@C 膜的水蒸发性能

对膜进行太阳能水蒸发测试。在相同的室温和湿度条件下,测试了不同太阳光强度下的去离子水蒸发性能,图 5(a)是配置 CNT@C-1 膜的水蒸发器在不同光强下 2 h 的质量损失。可以看出随着光照强度的增加水蒸发系统在光照 2 h 后的

质量损失也越来越多,在 0.5、1、1.5、2 kW/m² 的光照 2 h 后,水蒸发器系统的质量改变量分别为 2.1、4.9、6.7、9.3 kg/m²,通过斜率计算出基于 CNT@C-1 膜在不同光照强度下的水蒸发速率分别为 1.07、2.35、3.40、4.71 kg/(m² · h)。即膜材料的水蒸发速率与太阳辐射强度呈正相关。为了验证水蒸发器在太阳能海水淡化中的应用,使用真实海水进行蒸发测试。如图 5(b)、5(c),在光照 2 h 后,水蒸发器中 CNT@C-0.5 膜的蒸发系统质量减少 3.6 kg/m²,蒸发速率为 1.81 kg/(m² · h);CNT@C-0.8 膜的蒸发系统质量减少 4.2 kg/m²,蒸发速率为 2.14 kg/(m² · h);CNT@C-1 膜的蒸发系统质量减少 4.6 kg/m²,蒸发速率为 2.31 kg/(m² · h)。光照 2 h 后,CNT@C-1 膜的表面温度为 38.4 °C [图 5(d)]。随着 CNT 含量的升高,三种膜的光热转化效率分别为 80.5%、91.6%和 95.8%。

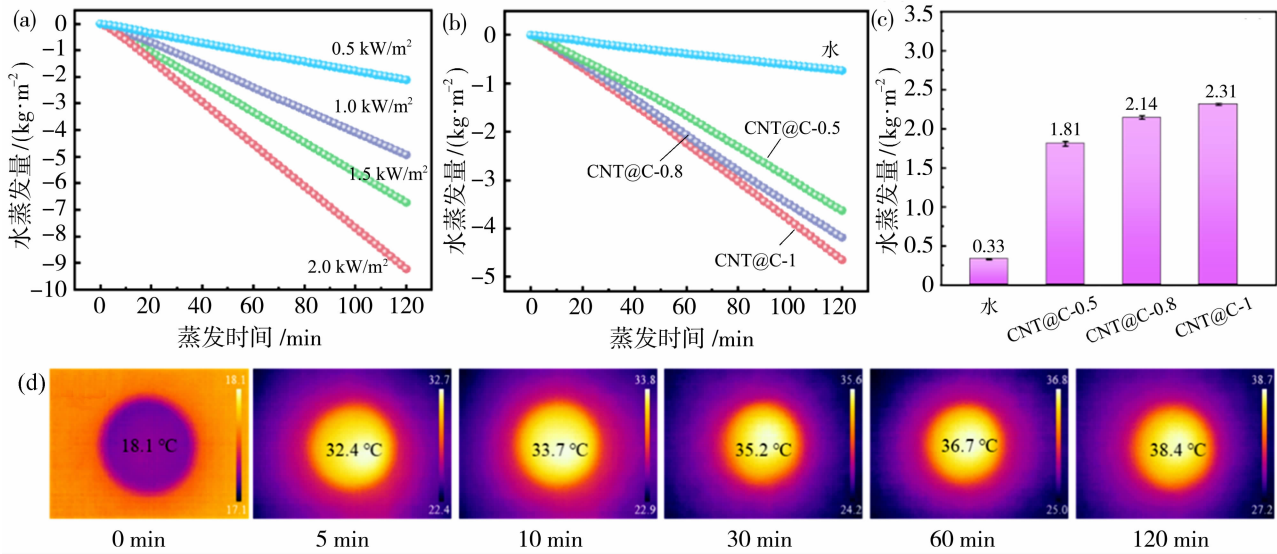


图 5 不同光强下水质量随时间的变化曲线(a);水质量随时间的变化曲线(b);水蒸发速率(c);蒸发膜表面温度(d)
Fig. 5 The variation curve of water mass with time for different sunlight intensity (a) ; water quality curve with time (b) ; water evaporation rate (c) ; temperature of membrane surface (d)

太阳能水蒸发系统的光热稳定性对其应用非常重要^[22-23]。基于此,对 CNT@C-1 膜进行循环 20 次蒸发测试,结果如图 6(a)所示。测试在 1 个太阳光强下照射 2 h,每次实验结束后会将蒸发器中的 CNT@C-1 膜浸泡在水中 5 min,然后在烘箱中干燥,即在相同的实验条件下进行重复实验。CNT@C-1 膜的水蒸发速率在 2.25~2.37 kg/(m² · h)之间。为了验证膜的耐盐性,在 1 个太阳光强下对 CNT@C-1 膜进行 12 h 的蒸发实验,如图 6(b)。

经过 12 h 的蒸发实验后,膜的隔离式水蒸发系统质量减少了 26.3 kg/m²,蒸发速率为 2.202 kg/(m² · h)。并且在蒸发过程中 CNT@C-1 膜表面没有明显的盐分积累,如图 6(c)所示。说明 CNT@C-1 膜具有良好的循环稳定性和一定的耐盐性。图 6(e)为膜在海水 12 h 蒸发实验后的断面结构,可以看到其仍保持较好的网络孔结构,和实验前结构[图 6(d)]类似,没有盐的沉积和堵塞。抗盐机理在于羧基碳纳米管骨架膜具有极好的亲水性,能够在蒸发

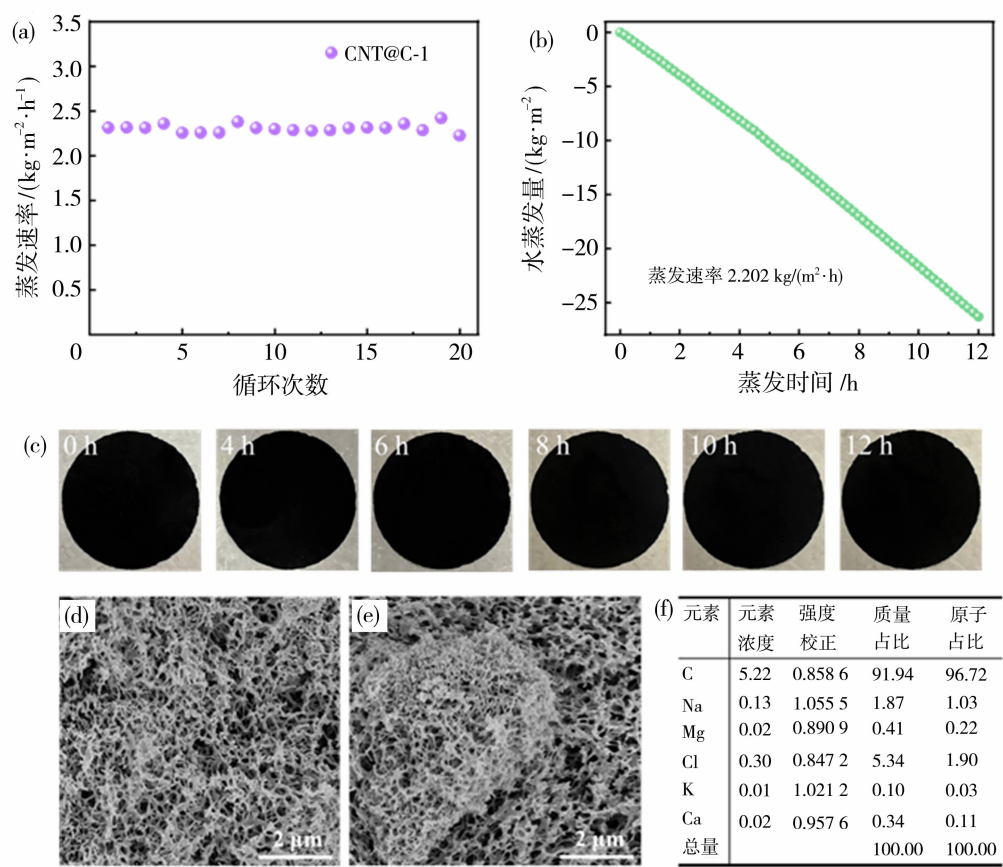


图 6 基于 CNT@C-1 膜水蒸发系统在海水中的光热循环性能(a);基于 CNT@C-1 膜的隔离式水蒸发系统在海水中长时间照射时的蒸发性能(b);CNT@C-1 膜在海水中长时间照射过程中的膜表面照片(c); CNT@C-1 膜蒸发 12 h 前后的膜断面结构[(d)、(e)];蒸发 12 h 后膜表面元素分布(f)

Fig. 6 Photothermal cycling performance of the isolated water evaporation system based on CNT@C-1 membrane in seawater (a); evaporation performance of the long-term irradiation in seawater (b); photos of the membrane surface during long-term irradiation in seawater (c); the cross-section SEM images of the CNT@C-1 membrane after and before 12 h evaporation in seawater [(d), (e)]; the element distribution on the membrane surface after 12 h evaporation in seawater (f)

过程盐形成浓度极化后及时向蒸发界面运输水分子并向下运输盐离子。图 6(f)显示膜使用后表面的盐离子浓度较低,进一步证明了膜孔道内未出现盐分的积累。

为了验证 CNT@C-1 膜的海水淡化性能,使用水蒸发系统收集海水淡化后冷凝水。从图 7(a)中可以看出,海水中的 Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 和 Mg²⁺ 质量浓度从 11 360、353.75、500.5 和 1 201.5 mg/L 降到 6.898、0.351 7、0.290 4 和 0.603 9 mg/L。四种离子的浓度均降低了 3 个数量级,淡化后的水离子浓度明显低于世界卫生组织(WHO)制定的饮用水标准。Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 和 Mg²⁺ 的离子截留率分别达到 99.94%、99.90%、99.94%和 99.95%,如图7(b)所示。此外,基于 CNT@C-1 膜的水蒸发系统还可

用于处理 0~25%(质量分数,下同)的 NaCl 盐溶液。图 7(c)显示了在 1 个太阳光强度照射下,水蒸发系统在不同浓度的盐溶液中光照 2 h 的质量损失。从图 7(d)可以看出,盐浓度的增加会导致 CNT@C-1 膜蒸发系统的蒸发速率降低。在 0%、3.5%、5%、15%和 25%的盐溶液中光照 2 h 后水蒸发系统的质量改变为 4.59、4.57、4.42、4.27 和 3.90 kg/m²,蒸发速率为 2.31、2.31、2.26、2.17 和 1.92 kg/(m²·h),表明基于 CNT@C-1 膜的隔离式水蒸发系统具有高效的海水淡化性能。这是因为真实海水中由正负离子存在导致水分子和盐离子之间存在静电吸引,进而导致了可自由蒸发的水分子数量减少,从而降低了水蒸气压,导致蒸发速率下降。

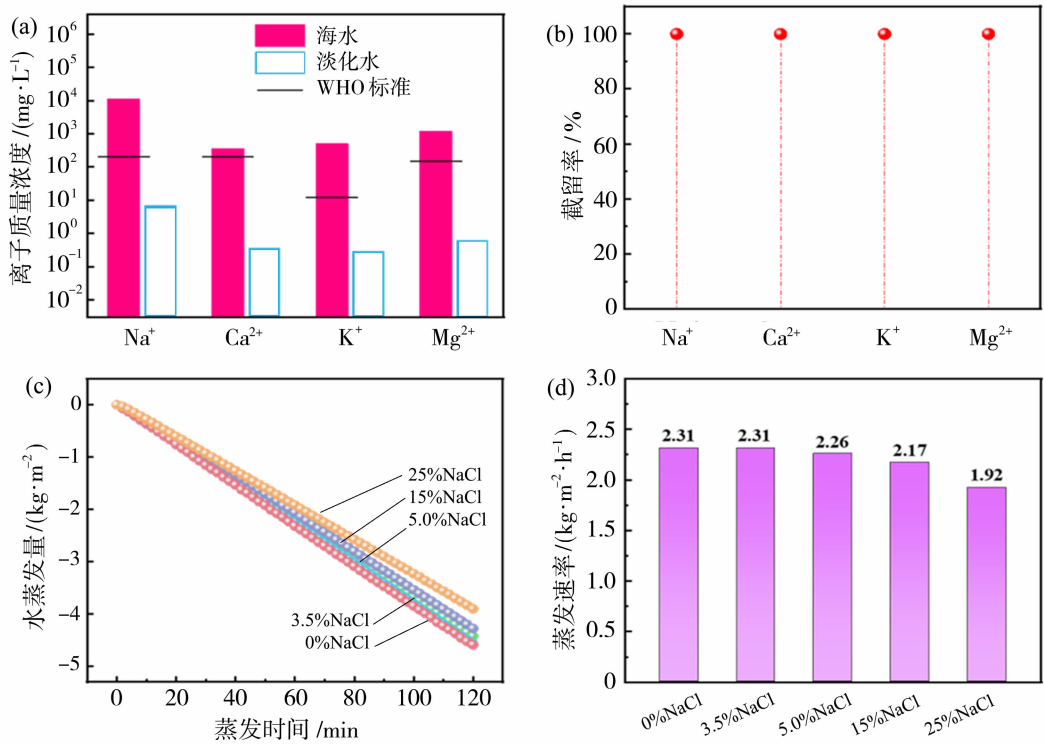


图 7 基于 CNT@C-1 膜的隔离式水蒸发系统在海水淡化前后 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的离子浓度(a)；海水淡化后 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的离子截留率(b)；基于 CNT@C-1 膜的隔离式水蒸发系统在不同浓度的盐溶液中水质量随时间的变化曲线(c)及水蒸发速率(d)

Fig. 7 The ion concentrations of Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ and Mg^{2+} before and after desalination in the isolated water evaporation system based on CNT@C-1 membrane (a)；the ion retention rates of Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ and Mg^{2+} after desalination (b)；curve of water mass with time (c) and water evaporation rate (d) in salt solutions of different concentrations in an isolated water evaporation system based on CNT@C-1 membrane

3 结论

采用相转化法制备了碳纳米管掺杂的多孔膜并进行太阳能水蒸发测试。CNT@C 膜具有丰富的孔道结构,能够在蒸发过程运输水分;掺杂碳纳米管的 CNT@C 膜对太阳光具有良好的光吸收能力;蒸发器的一维水路通道结构可以减少光热转换材料与主体水直接的热量传递,使得碳膜的光热转换能力提高,将更多的热量用于水蒸发,提升了碳膜的水蒸发性能。CNT@C-1 膜在 1 个太阳光强度的照射下,水蒸发速率为 $2.35 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,膜表面温度为 37.4°C ,在真实海水中的蒸发速率为 $2.31 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,膜表面温度为 38.4°C ,在 20 次循环测试中保持较为稳定的蒸发速率。

参考文献:

[1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Sci Adv, 2016, 2 (2):

1500323.
[2] Verbeke R, Gómez V, Vankelecom I F J. Chlorine-resistance of reverse osmosis (RO) polyamide membranes[J]. Pro Polym Sci, 2017, 72: 1-15.
[3] Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wie J M. Advances in seawater desalination technologies [J]. Desalination, 2008, 221(1/2/3): 47-69.
[4] Chen C L, Zhao X W, Ye L. Low percolation threshold and enhanced electromagnetic interference shielding in polyoxymethylene/carbon nanotube nanocomposites with conductive segregated networks[J]. Ind Eng Chem Res, 2022, 61(11): 3962-3972.
[5] He P P, Hao L, Liu N, et al. Controllable synthesis of sea urchin-like carbon from metal-organic frameworks for advanced solar vapor generators[J]. Chem Eng J, 2021, 423: 130268.
[6] Wang Z H, Liu Y M, Tao P, et al. Bio-inspired evaporation through plasmonic film of nanoparticles at the air-water Interface[J]. Small, 2014, 10(16): 3234-

- 3239.
- [7] Han B, Zhang Y L, Chen Q D, *et al.* Carbon-based photothermal actuators[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, 28 (40): 1802235.
- [8] Wang Z X, Han M C, He F, *et al.* Versatile coating with multifunctional performance for solar steam generation[J]. *Nano Energy*, 2020, 74: 104886.
- [9] Zou Y, Chen X F, Yang P, *et al.* Regulating the absorption spectrum of polydopamine [J]. *Sci Adv*, 2020, 6(36): eabb4696.
- [10] 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.
- [11] Yang B, Li C Y, Wang Z F, *et al.* Thermoplasmonics in solar energy conversion: Materials, nanostructured designs, and applications[J]. *Adv Mater*, 2022, 34 (26): 2107351.
- [12] Mu C H, Song Y Q, Deng K, *et al.* High solar desalination efficiency achieved with 3D $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanosheet-assembled membranes [J]. *Adv Sustain Syst*, 2017, 1(10): 1700064.
- [13] Tu W, Zhou Y, Zou Z. Versatile graphene-promoting photocatalytic performance of semiconductors: Basic principles, synthesis, solar energy conversion, and environmental applications [J]. *Adv Funct Mater*, 2013, 23(40): 4996-5008.
- [14] Ren H, Tang M, Guan B, *et al.* Hierarchical graphene foam for efficient omnidirectional solar-thermal energy conversion[J]. *Adv Mater*, 2017, 29 (38): 1702590.
- [15] Zhang P, Liu F, Liao Q, *et al.* A microstructured graphene/poly(*N*-isopropylacrylamide) membrane for intelligent solar water evaporation[J]. *Angew Chem Int Edit*, 2018, 57(50): 16343-16347.
- [16] Zhao F, Guo Y H, Zhou X Y, *et al.* Materials for solar-powered water evaporation[J]. *Nat Rev Mater*, 2020, 5(5): 388-401.
- [17] Zhao Y, Pan H, Lou Y, *et al.* Plasmonic Cu_{2-x}S nanocrystals: Optical and structural properties of copper-deficient copper(I) sulfides[J]. *J Am Chem Soc*, 2009, 131(12): 4253-4261.
- [18] Hu X R, Jiang H L, Hou Q, *et al.* Scalable SPAN membrane cathode with high conductivity and hierarchically porous framework for enhanced ion transfer and cycling stability in Li-S batteries[J]. *ACS Mater Lett*, 2023, 5(8): 2047-2057.
- [19] Hou Q, Yu M, Jiang H L, *et al.* Scalable, flexible and fire-retardant Janus membranes for simultaneously inhibiting dendrite growth and catalyzing polysulfide conversion in lithium-sulfur batteries [J]. *Energy Storage Mater*, 2023, 60: 102807.
- [20] Cai G C, Jiang H L, Chu F Y, *et al.* Highly-ordered arrangement of $\text{Co}(\text{OH})\text{F}$ filaments: Planting flower-like $\text{Co}(\text{OH})\text{F}$ in conductive membrane substrate accelerating Li^+ transfer and redox reaction in Li-S batteries[J]. *Chem Eng J*, 2023, 454: 140178.
- [21] Yang X, Yang Y, Fu L, *et al.* An ultrathin flexible 2D membrane based on single-walled nanotube- MoS_2 hybrid film for high-performance solar steam generation[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, 28(3): 1704505.
- [22] Chang M, Ai L, Yang R, *et al.* Two-dimensional layered MBene membrane towards sustainable freshwater production from solar interfacial evaporation[J]. *Chem Eng J*, 2024, 486: 150078.
- [23] Zhang X S, Mao S, Wang J, *et al.* Boron nanosheets boosting solar thermal water evaporation [J]. *Nanoscale*, 2024, 16(9): 4628-4636.

Preparation and water evaporation properties of CNT@C membrane

WANG Kuandi, LIU Tong, LI Shuang, HE Gaohong,
JIANG Xiaobin, WU Xuemei, XIAO Wu, LI Xiangcun

(School of Chemical Engineering, State Key Laboratory of Fine Chemicals, Membrane Science and Technology Research and Development Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor light capture ability, high heat loss and low conversion efficiency
(下转第 132 页)

Investigation of blending preparation and anti-fouling mechanisms of MXene/PVDF composite membranes

*YANG Haochuan*¹, *WEI Jiaqi*^{1,2}, *YANG Linlin*¹,
ZHANG Jie^{1,3,4}, *CHENG Chenhong*¹, *ZHANG Yuanyuan*¹,
*JIANG Minmin*¹, *WEI Qiaoyan*¹, *ZHENG Junjian*¹

(1. College of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 3. School of Chemistry and Materials Engineering, Huizhou University, Huizhou 516007, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, South University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Conventional polyvinylidene fluoride (PVDF) membranes exhibit strong hydrophobicity and poor anti-fouling performance, which are critical limitations for their applications in water filtration fields including wastewater treatment, seawater desalination and drinking water purification. In this study, MXene/PVDF composite membranes using a NIPS (non-solvent induced phase separation) method by blending MXene with PVDF were prepared, and the impact of different MXene loadings on the membrane's anti-fouling properties was systematically investigated. The results demonstrated significant improvements in the physicochemical properties of the composite membranes compared to pristine PVDF membranes, including pore size, porosity, contact angle and Zeta potential. When the MXene loading was 1.5 g (mass fraction of 7.0%, dosage per unit membrane area was 11.54 g/m²), in comparison to the pristine PVDF membrane, water flux increased from 10.7 L/(m² · h) to 45.3 L/(m² · h) for the composite membrane, while the flux recovery rate improved markedly from 60.9% to 80.8%. XDLVO theory analysis indicated that the energy barrier for the pristine PVDF membrane was 0.58 KT, significantly lower than that of the composite membrane MD5 (0.78 KT), suggesting a stronger repulsion tendency towards pollutants in the composite membrane. Long-term experimental results showed that the operational cycle of the composite membrane MD5 in an anaerobic-aerobic membrane bioreactor could reach up to 35 d, approximately 3.9 times longer than that of the pristine PVDF membrane (9 d). These findings indicate the excellent practical application potential of the MXene/PVDF composite membranes.

Key words: PVDF membrane; MXene; membrane modification; anti-fouling performance; XDLVO

(上接第 119 页)

of photothermal materials in solar water evaporation system, in this paper, carbon-based CNTs and their composites were used as photothermal conversion materials to achieve efficient and stable solar evaporation performance through structural regulation of the water evaporation system. The porous water-evaporated CNT@C membranes with carbon nanotubes as skeleton were prepared by phase conversion method, and its application in solar water evaporation was studied. The hierarchical pore structure of CNT@C membrane provides a guarantee for water transport. The good light absorption performance of the carbon nanotubes in CNT@C membrane ensures that a wide range of sunlight can be absorbed. In an isolated water evaporation system using CNT@C-1 membrane as photothermal material, the evaporation rate of water was 2.35 kg/(m² · h) under one sunlight irradiation. In the test of real seawater, the evaporation rate of CNT@C-1 membrane was 2.31 kg/(m² · h).

Key words: phase conversion; water evaporation; carbon membrane; carbon nanotube