复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

多巴胺@氮化硼-碳纳米管/聚酰亚胺复合气凝胶太阳能蒸发器的制备与性能

汪日圆 陈浩然 陈芳琳 黎涛 鲁红典 杨伟

Preparation and performance of dopamine@boron nitride-carbon nanotubes/polyimide composite aerogel solar-driven evaporator

WANG Riyuan, CHEN Haoran, CHEN Fanglin, LI Tao, LU Hongdian, YANG Wei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220410.001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

(PEDOT-PSS)-碳纳米管复合膜硅基太阳能电池

(PEDOT-PSS)-carbon nanotubes composite films for Si solar cells

复合材料学报. 2017, 34(11): 2385-2391 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170228.001

碳纳米管-石墨烯气凝胶的制备与性能

Preparation and properties of CNTs-graphene aerogel

复合材料学报. 2017, 34(10): 2296-2303 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161129.002

胶合板表面层层自组装聚磷酸铵-壳聚糖/氮化硼及其阻燃性能

Flame retardancy of ammonium polyphosphate-chitosan/boron nitride on plywood surface via layer-by-layer self-assembly method

复合材料学报. 2021, 38(4): 1252-1261 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200824.002

碳纳米管/油酸复合物制备的纳米流体导电与润湿性能

Electroconductivity and wettability of nanofluids prepared by carbon nanotubes/oleic acid composite

复合材料学报. 2020, 37(10): 2582-2589 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200313.001

取向碳纳米管/环氧树脂复合薄膜制备及结构与性能表征

Preparation and characterization of aligned carbon nanotubes/epoxy composite films

复合材料学报. 2021, 38(9): 2767-2775 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210215.003

球磨对碳纳米管增强泡沫铝基复合材料压缩与吸能性能的影响

Effect of ball milling on the compressive property and energy absorption capacity of the carbon nanotube reinforced aluminum composite foams

复合材料学报. 2018, 35(6): 1518-1524 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170713.002

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 40 卷 第 3 期 3 月 2023 年
Vol. 40 No. 3 Mar 2023

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20220410.001

多巴胺@氮化硼-碳纳米管/聚酰亚胺复合气凝胶太阳能蒸发器的制备与性能

分享本文

汪日圆，陈浩然，陈芳琳，黎涛，鲁红典*，杨伟

（合肥学院 能源材料与化工学院，合肥 230601）

摘 要：利用太阳能蒸发器进行水蒸发是生产清洁用水的重要途径之一。为了提高聚酰亚胺 (PI) 气凝胶的太阳能蒸发性能，本文通过添加多巴胺改性氮化硼 (PDA@BN) 和羟基化碳纳米管 (CNT)，采用四定向冷冻干燥和亚胺化工艺制备了 PDA@BN-CNT/PI 复合气凝胶。研究了 PDA@BN 和 CNT 的加入对气凝胶的形貌结构、润湿性能、太阳能蒸发性能的影响。结果表明：PDA@BN-CNT/PI 复合气凝胶不仅具有良好的亲水性和太阳能光热转换能力，而且其独特的低弯曲度管状结构促进了水在气凝胶内部的运输，提高了太阳能蒸发性能。该气凝胶在 2 kW/m^2 光照下的蒸发速率为 1.95 kg/(m^2·h)，并展现出优异的循环使用性能、化学稳定性和高效的污水净化能力。

关键词：太阳能蒸发；聚酰亚胺气凝胶；氮化硼；碳纳米管；水净化

中图分类号：TB332 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2023)03-1494-07

Preparation and performance of dopamine@boron nitride-carbon nanotubes/polyimide composite aerogel solar-driven evaporator

WANG Riyuan , CHEN Haoran , CHEN Fanglin , LI Tao , LU Hongdian* , YANG Wei

(School of Energy, Materials and Chemical Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China)

Abstract: It is one of the important ways to produce fresh water through solar-driven evaporator. In order to improve the solar-driven evaporation performance of polyimide (PI) aerogel, PDA@BN-CNT/PI composite aerogel was prepared by adding dopamine-modified boron nitride (PDA@BN) and hydroxylated carbon nanotubes (CNT) through four-directional freeze-drying and imidization. The influence of PDA@BN and CNT on the morphology, structure, wettability and solar-driven evaporation of the aerogel were studied. The results indicate that PDA@BN-CNT/PI aerogel has good hydrophilicity and solar photothermal conversion performance. Moreover, it exhibits unique low bending tubular structure, which is conducive to promoting the transportation of water inside the aerogel and improving the performance of solar-driven evaporator. The aerogel exhibits high evaporation rate of 1.95 kg/(m^2·h) under 2 kW/m^2 sun irradiation and excellent recycling performance, chemical stability and efficient wastewater purification ability.

Keywords: solar-driven evaporation; polyimide aerogel; boron nitride; carbon nanotubes; water purification

清洁水资源是人类赖以生存的生命之源，随着工业化进程的不断深入，由此产生的水资源污染问题日趋严重，导致可直接使用的清洁水日渐匮乏[1-2]。充分利用丰富清洁的太阳能进行水蒸发和净化，进而获得清洁用水是解决清洁水资源匮乏问题的重要途径之一[3-4]，因而探索和制备高效的太阳能蒸发材料，用于污水蒸发和净化显得十分必要和迫切。

收稿日期：2022-03-11；**修回日期**：2022-03-26；**录用日期**：2022-03-26；**网络首发时间**：2022-04-12 09:59:25
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220410.001
基金项目：安徽省自然科学基金杰出青年科学基金 (2008085J26)
通信作者：鲁红典，博士，教授，硕士生导师，研究方向为低维纳米材料、聚合物复合材料 E-mail: luhdo@hfuu.edu.cn
引用格式：汪日圆，陈浩然，陈芳琳，等. 多巴胺@氮化硼-碳纳米管/聚酰亚胺复合气凝胶太阳能蒸发器的制备与性能 [J]. 复合材料学报，2023，40(3)：1494-1500.
WANG Riyuan, CHEN Haoran, CHEN Fanglin, et al. Preparation and performance of dopamine@boron nitride-carbon nanotubes/polyimide composite aerogel solar-driven evaporator[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1494-1500(in Chinese).

太阳能蒸发材料的构筑和设计包括光热转换、传热和水运输等重要方面[5]。聚合物气凝胶由于具有灵活的可设计性、高孔隙率、低密度及丰富的网络多孔通道等“天然”的特点，在太阳能蒸发材料领域占有重要的地位[6]，国内外学者在制备聚合物气凝胶用于水蒸发方面进行了广泛而深入的研究[7-8]。目前，采用冰模板法结合冷冻干燥或超临界干燥是获得相互连通的三维网状结构气凝胶的主要途径[9-11]。然而由于冰晶的生长难以控制，通常造成气凝胶的孔道结构随机分布，当其用作太阳能蒸发器时，在一定程度上限制了太阳能蒸发过程中的水运输，不利于水的蒸腾，进而影响气凝胶的蒸发速率。Xu 等[12] 以聚丙烯酰胺 (PAM) 和碳纳米管 (CNT) 为原料，通过径向冷冻工艺调控冰晶的生长，制备出具有高长径比的径向分级管孔结构的 CNT/PAM 气凝胶，其对水的运输能力优于具有三维网络结构的 CNT/PAM 气凝胶，并由此提高了材料的蒸发性能，Yu 等[13] 和 He 等[14] 也得出了类似的结论。为制备出具有径向孔道结构的新型太阳能蒸发材料，国内外学者从荷叶及树干等结构中得到启发制备并出具有竖向孔道结构的太阳能蒸发材料[15-18]，展现出较好的蒸发性能。

聚酰亚胺 (PI) 气凝胶因其优异的耐高温性能、力学性能及化学稳定性，在航空航天、电子器件等领域得到了广泛而深入的应用，但是其疏水性及较低的光热转换能力限制了它在太阳能水蒸发领域的应用[19-20]。本文以聚酰胺酸 (PAA) 为前驱体，通过添加亲水性多巴胺改性氮化硼 (PDA@BN) 及具有高效光热转换能力的羟基化碳纳米管 (CNT)，优化设计四定向冷冻干燥并结合亚胺化工艺制备出具有低弯曲度管状结构的多巴胺@氮化硼-碳纳米管/聚酰亚胺 (PDA@BN-CNT/PI) 复合气凝胶，该气凝胶具有优异的太阳能蒸发性能。

1 实验部分

1.1 原材料

六方氮化硼 (BN)、盐酸多巴胺 (DA)，阿拉丁试剂 (上海) 有限公司；异丙醇 (IPA)、三羟甲基氨基甲烷 (Tris)、N,N-二甲基乙酰胺 (DMAC)、三乙胺 (TEA)、过硫酸铵 (AP)，国药集团化学试剂有限公司；二甲基-二氨基联苯 (DMBZ)，上海阿达玛斯试剂有限公司；三氨基苯氧基苯 (TAB)，上海楷树化学科技有限公司；联苯四甲酸二酐 (BPDA)，上海麦克林生化科技有限公司；羟基化碳纳米管 (CNT)，苏州碳丰石墨烯科技有限公司。

1.2 材料制备

PDA@BN 分散液的制备：按文献 [21] 的方法制备羟基化氮化硼 (BNNS-OH)。将 BNNS-OH、DA 和 AP 按 25∶10∶6 的质量比加入到浓度为 1.2 mg/mL 的 Tris 溶液中 (pH=4.5)，搅拌均匀后在 60℃ 水浴中反应 10 h，经离心、洗涤、干燥后得到 PDA@BN 粉末，再经超声分散获得 5 mg/mL 的 PDA@BN 水性分散液。

PAA 的制备：将一定量的 DMBZ 完全溶解于 DMAC 中，在 0℃ 下缓慢加入 BPDA，搅拌反应 4 h 后加入 TAB 继续搅拌至均匀透明黏稠状，经洗涤、冷冻干燥后得到 PAA。

PDA@BN-CNT/PI 复合气凝胶的制备：将 PAA 和 TEA 完全溶解在去离子水中，加入一定量的 PDA@BN 分散液和 CNT 分散液，搅拌至均匀。将混合溶液倒入模具中，在四定向冷冻装置中成型 (图 1)，并经真空冷冻干燥及亚胺化处理后得到 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶，其中 PAA 与 PDA@BN 及 CNT 的质量比为 80∶15∶5。纯 PI 及 PDA@BN/PI 气凝胶 (PAA 与 PDA@BN 的质量比为 80∶20) 按上述方法制备。作为对比，将模具直接浸没于液氮中成型，最终获得无规冷冻制备的气凝胶样品 PDA@BN-CNT/PI-R。

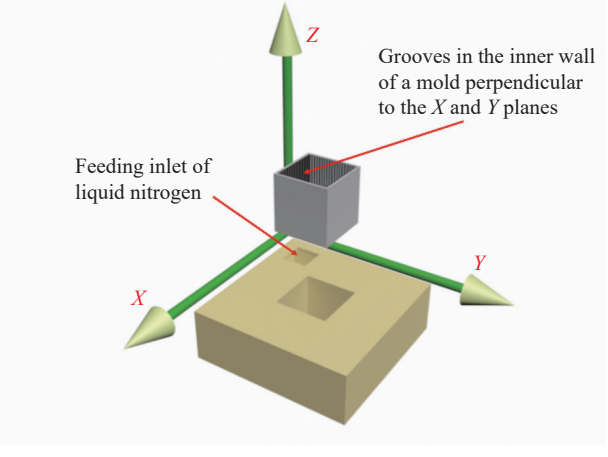


图 1 四定向冷冻实验装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the four-directional freezing experimental mold

1.3 测试与分析

采用 Rigaku 型 X 射线衍射仪 (日本，Rigaku) 在 2θ=5°~65°角度范围内测定样品的 XRD 图谱；采用 Netzsch TG 209 F1 热分析仪 (德国，耐驰) 对样品进行热失重分析，吹扫气体为氮气，升温速率

为 10°C/min；采用 SU8010(日本，Hitachi) 场发射扫描电镜观察样品的微观形貌；采用 DXR 型激光共聚焦显微拉曼光谱仪 (美国，Thermo Fisher) 对样品进行拉曼光谱分析，拉曼位移为 450~3 000 cm^{-1}；采 JC2000 DM 精密自动型接触角测量仪 (北京，中教金源) 对样品的接触角进行性测定；采用 K-Alpha 型 X 射线光电子能谱仪 (美国，Thermo Scientific) 对样品进行 XPS 能谱分析。采用 900 T 型原子吸收光谱仪 (美国，PE) 对样品中金属离子浓度进行测定；采用 Testo 865 型热像仪 (德国，Testo) 在室温条件下对样品的温度进行测定。

太阳能水蒸发性能测试：太阳能水蒸发系统如图 2 所示，采用 CEL-S500 型氙灯能 (北京，中教金源) 模拟太阳光源，通过监测由于太阳能蒸发器蒸发造成的水的质量变化，计算出水的蒸发速率，太阳光辐照强度为 2 kW/m^2。

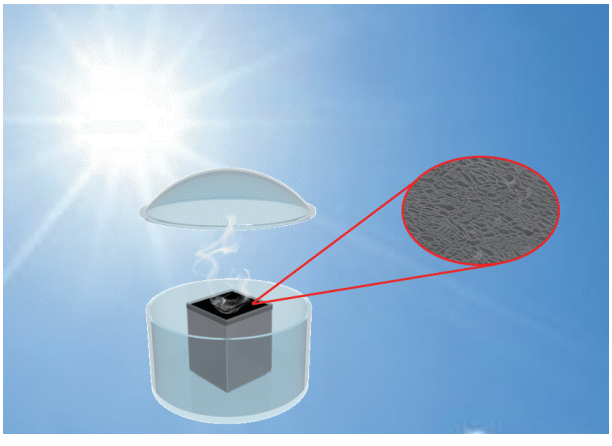


图 2　太阳能水蒸发系统示意图

Fig. 2　Schematic illustration of solar-driven evaporation

2　结果与讨论

2.1　PDA@BN 的结构表征

图 3 为 PDA@BN 的 XRD、Raman 和 XPS 图谱及 TGA 曲线。如图 3(a) 所示，经过修饰后，PDA@BN 展现出与 BNNS-OH 相一致的 XRD 图谱。图 3(b) 为 BNNS-OH 和 PDA@BN 的 Raman 图谱。可以看出 PDA@BN 在 1 586 cm^{-1} 处出现一特征峰，归属于聚多巴胺 (PDA) 结构中邻苯二酚羟基中的—OH 伸缩振动[22-25]。如图 3(c) 和表 1 所示，XPS 结果表明 PDA@BN 的 O 和 C 元素含量从 BNNS-OH 的 4.19at% 和 5.11at% 分别提高到 7.46at% 和 31.39at%。上述结果说明 PDA 已成功包覆在 BNNS-OH 表面，但是并没有改变其晶体结构。从图 3(d) 的 TGA 曲线可知 BNNS-OH 和 PDA@BN 在 800°C 分别剩余 99.4wt% 和 96.3wt%，表明包覆在 BNNS-OH 表面的 PDA 的质量分数为 3.1wt%

2.2　PDA@BN-CNT/PI-R 气凝胶的表面润湿性能

图 4 是水在气凝胶表面的接触角 (WCA) 随时间的变化图。如图 4(a1) 和图 4(a2) 所示，纯 PI 气凝胶呈现疏水特性，其 WCA 为 128°，且随时间的延长未出现渗透现象。PDA@BN 的加入使 PDA@BN/PI 气凝胶的 WCA 在 2 s 内降低至 67°(图 4(b1)、图 4(b2))。这是由于包覆在氮化硼表面的 PDA 具有大量的氨基和羟基等亲水基团，提高了材料的亲水性能。而 CNT 的加入进一步提高了 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶的亲水性能，使 WCA 在 2 s 内降低至 64°，如图 4(c1) 和图 4(c2) 所示。这种表面润湿性能的转变使 PI 基气凝胶在太阳能蒸发材料中的应用成为可能。PDA@BN-CNT/PI-R 气凝胶的 WCA 在 2 s 内降低为 66°(图 4(d1)、图 4(d4))，与 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶的 WCA 变化相似。

2.3　PDA@BN-CNT/PI-R 气凝胶的微观结构

图 5 分别是四定向冷冻法制备的 PI、PDA@BN/PI 和 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶及无规冷冻法制备的 PDA@BN-CNT/PI-R 气凝胶截面 (垂直 *XY* 平面，平行 *ZY* 平面) 的 SEM 图像。如图 5(a)~5(c) 所示，四定向冷冻赋予气凝胶独特的低弯曲度管状结构，而无规冷冻使 PDA@BN-CNT/PI-R 气凝胶产生无规的网络状结构，如图 5(d) 所示。这是由于在四定向冷冻过程中，冷源沿着 *X* 轴和 *Y* 轴从四周均匀地向样品中心传递，而且模具内表面上的平行于 *Z* 轴的浅凹槽对冰晶的生长具有诱导作用，这有利于促进冰晶沿着 *Z* 轴垂直于冷源面生长，从而形成管状结构。

2.4　PDA@BN-CNT/PI-R 气凝胶的水运输性能

图 6 是气凝胶的水运输性能对比图。在 3 mm 厚的样品薄片上放置一纸巾薄片，并将其一同放入盛装蓝墨水的表面皿中，通过观察上方纸巾薄片的润湿情况来判断气凝胶样品的水运输性能。图 6(a1)~6(a4) 和图 6(b1)~6(b4) 分别是 PDA@BN-CNT/PI 和 PDA@BN-CNT/PI-R 在不同时间点时上方纸巾的照片。如图 6(a1)~6(a4) 所示，PDA@BN-CNT/PI 用时 10 s 即可将蓝墨水运输至顶部，开始润湿润纸巾并在 12 s 将纸巾全部润湿。而对比之下，如图 6(b1)~6(b4) 所示，PDA@BN-CNT/PI-R 上的纸巾在 22 s 才开始被逐渐润湿，并于 24 s 时

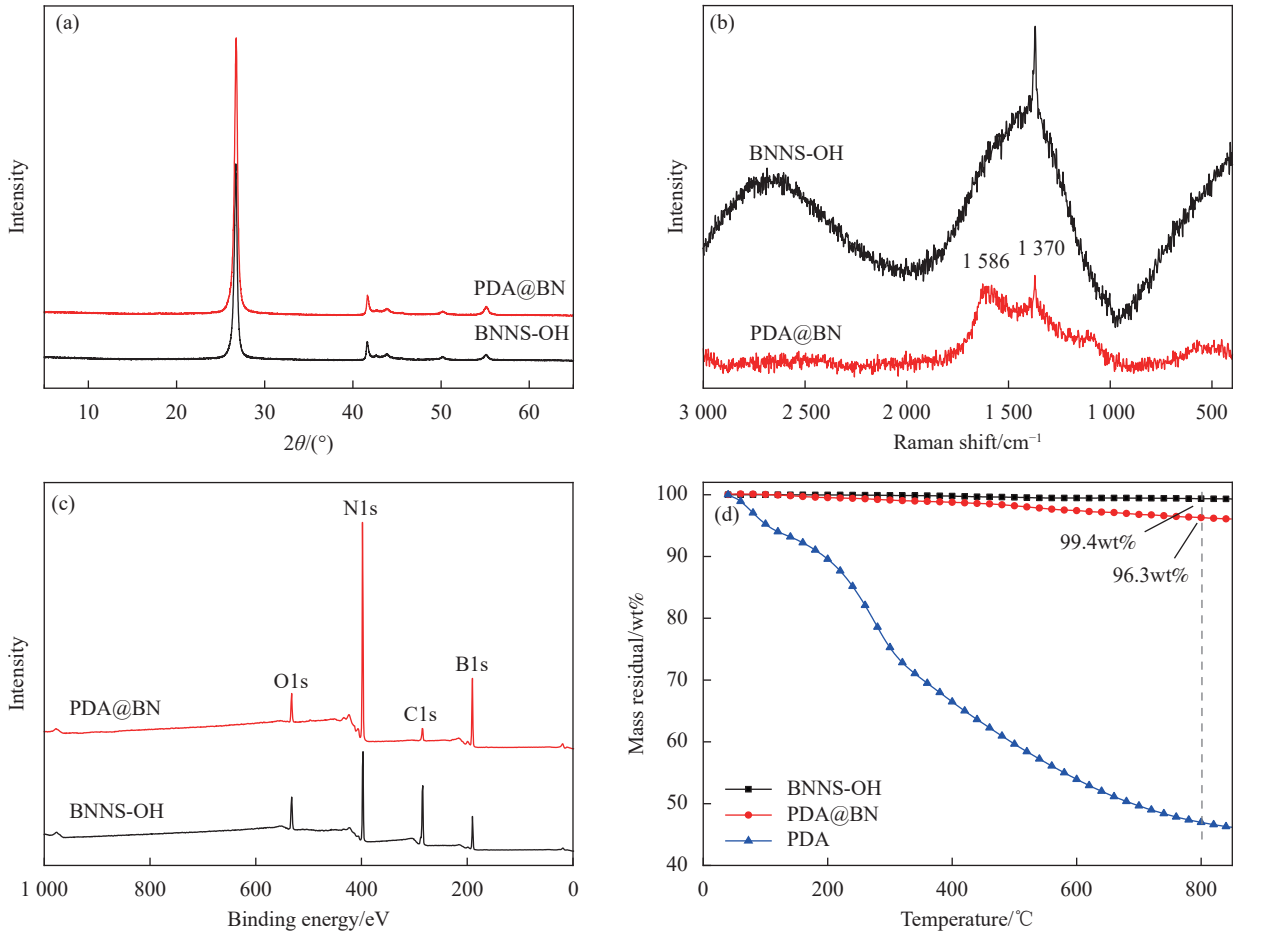


图 3　羟基化氮化硼 (BNNS-OH) 和多巴胺改性氮化硼 (PDA@BN) 的 XRD 图谱 (a)、Raman 图谱 (b)、XPS 图谱 (c) 和 TGA 曲线 (d)

Fig. 3　Boron nitride hydroxyl (BNNS-OH) and dopamine-modified boron nitride (PDA@BN) characterized by XRD patterns (a), Raman spectra (b), XPS spectra (c) and TGA curves (d)

表 1　BNNS-OH 和 PDA@BN 的表面组成

Table 1　Surface composition of BNNS-OH and PDA@BN

Sample	B/at%	N/at%	O/at%	C/at%
BNNS-OH	50.27	40.43	4.19	5.11
PDA@BN	34.28	28.26	7.46	31.39

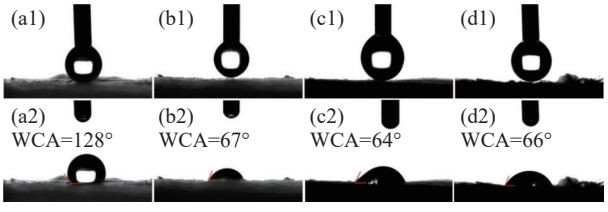


图 4　水在气凝胶表面的接触角 (WCA) 随时间的变化：(a) 聚酰亚胺 (PI)；(b) PDA@BN/PI；(c) PDA@BN-碳纳米管 (CNT)/PI；(d) 无规冷冻制备的 PDA@BN-CNT/PI(PDA@BN-CNT/PI-R)

Fig. 4　Variation of water contact angle (WCA) with time on aerogel surface: (a) Polyimide (PI); (b) PDA@BN/PI; (c) PDA@BN-carbon nanotube (CNT)/PI; (d) Random freezing prepared PDA@BN-CNT/PI (PDA@BN-CNT/PI-R)

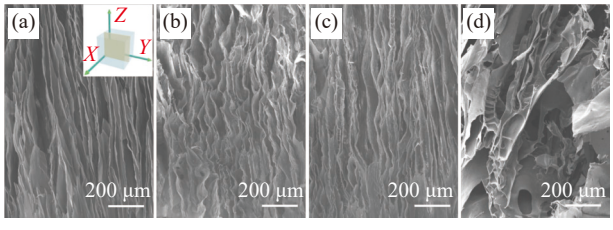


图 5　气凝胶的 SEM 图像：(a) PI；(b) PDA@BN/PI；(c) PDA@BN-CNT/PI；(d) PDA@BN-CNT/PI-R

Fig. 5　SEM images of aerogels: (a) PI; (b) PDA@BN/PI; (c) PDA@BN-CNT/PI; (d) PDA@BN-CNT/PI-R

被全部润湿。这反映出 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶相较于无规网络状结构的 PDA@BN-CNT/PI-R 气

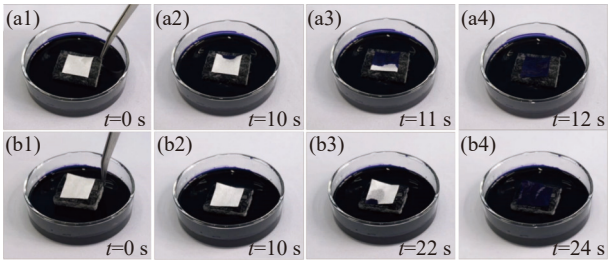


图 6　气凝胶的水运输性能对比：(a) PDA@BN-CNT/PI 在 12 s 内的水运输照片；(b) PDA@BN-CNT/PI-R 在 24 s 内的水运输照片

Fig. 6　Comparison of water transport performance of aerogels: (a) Water transport status at different times in 12 s for PDA@BN-CNT/PI; (b) Water transport status at different times in 24 s for PDA@BN-CNT/PI-R

凝胶，其独特的低弯曲度管状结构降低了水在气凝胶内部的运输路径，能够快速将底部蓝水运输至顶部，并润湿纸巾。这有利于该类气凝胶在太阳能蒸发材料中的应用。

2.5　PDA@BN-CNT/PI-R 气凝胶水蒸发性能

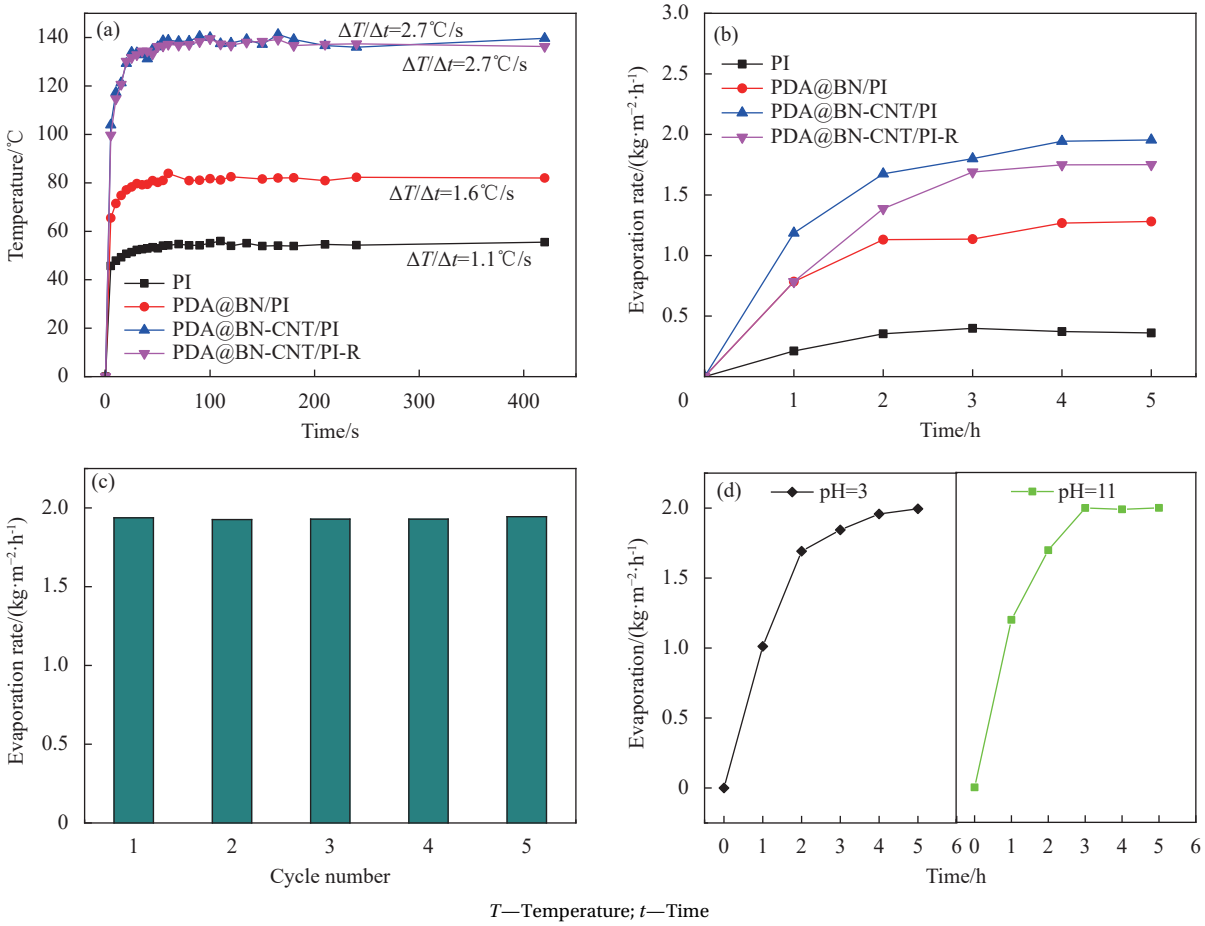
图 7 是气凝胶蒸发性能测试结果。图 7(a) 给出了模拟 2 kW/m^2 太阳光光照下气凝胶的表面温度变化。可知，在光照 60 s 后，材料的表面温度达到平衡，PI、PDA@BN/PI、PDA@BN-CNT/PI 和 PDA@BN-CNT/PI-R 的表面温度分别为 53、80、136 和 137℃，它们在 0~50 s 内的升温速率分别达到 1.1、1.6、2.7 和 2.7℃/s。由此可知，具有良好导热性能的多巴胺改性氮化硼及黑色 CNT 的加入，显著提高了 PDA@BN-CNT/PI 复合气凝胶的光热转换效率。从而使气凝胶表面迅速升温并达到恒定值。

图 7(b) 是 4 种气凝胶材料的去离子水蒸发速率曲线，蒸发速率如下式所示：

$$v = \frac{m}{St}\left(\mathrm{kg/(m^2 \cdot h)}\right) \tag{1}$$

式中：v 为去离子水的蒸发速率；m 为去离子水失去的质量；S 为样品面积；t 为样品接受光照的时间。

在光照 4 h 后，气凝胶的蒸发速率趋于稳定，



T—Temperature; *t*—Time

图 7　气凝胶的太阳能蒸发性能：(a) 气凝胶的表面温度随光照时间的变化；(b) 太阳能水蒸发速率；((c), (d)) PDA@BN-CNT/PI 气凝胶的循环性能和化学稳定性

Fig. 7　Solar-driven evaporation performance of aerogels: (a) Variation of surface temperatures with time; (b) Solar-driven evaporation rate; ((c), (d)) Cycling performance and chemical stability of PDA@BN-CNT/PI aerogel

PDA@BN-CNT/PI 的蒸发速率达到 1.95 kg/(m²·h)，相比于 PI、PDA@BN/PI 和 PDA@BN-CNT/PI-R 分别提高了 440%、52% 和 11%。这也说明虽然 PDA@BN-CNT/PI-R 与 PDA@BN-CNT/PI 具有相似的润湿性能和光热转换效率，但是后者的低弯曲度径向管状结构拥有更高效的水运输性能，这有利于水的运输从而进一步提高水蒸发速率。

图 7(c) 是 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶蒸发速率的循环性能测试图。可知，材料的水蒸发速率在 5 次循环测试中均维持在 1.9 kg/(m²·h) 左右，表明该材料具有良好的循环使用性能。图 7(d) 显示了 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶对酸性和碱性溶液的水蒸发速率。可知材料的水蒸发速率保持稳定，说明该气凝胶具有优异的化学稳定性。

2.6 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶污水净化性能的测试与表征

图 8 为 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶在模拟太阳光 2 kW/m² 条件下分别蒸发含有 Cu^{2+}、Cr^{2+}、Mn^{2+}、Ni^{2+}、Zn^{3+}金属离子溶液的测试结果。可知 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶具有高效的污水净化性能。经过太阳能蒸发净化后，水中的金属离子浓度从初始浓度的 10^6 μg/L 分别降低到 3.4、0.5、3.2、5.9 和 2.1 μg/L，去除率均高于 99.99%，达到了国家的饮用水标准[26]。这是由于 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶在进行太阳能水蒸发的同时，大比表面积的氮化硼和碳纳米管对溶液中的金属离子具有良好的吸附能力，从而提高了该材料净化含有金属离子溶液的能力。

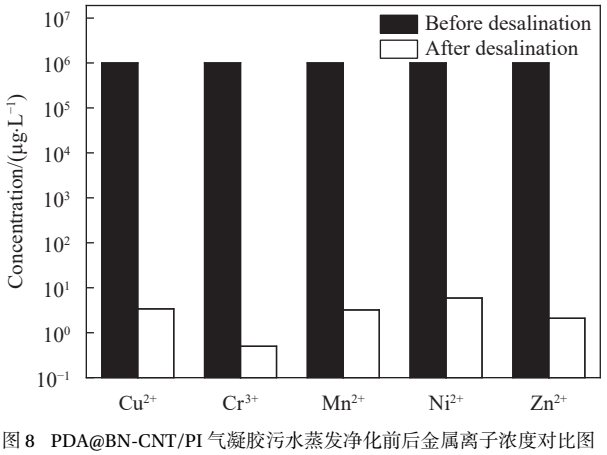


图 8 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶污水蒸发净化前后金属离子浓度对比图

Fig. 8 Comparison of metal ion concentration before and after wastewater evaporation purification of PDA@BN-CNT/PI aerogel

3 结论

(1) 通过添加多巴胺改性氮化硼和碳纳米管使得聚酰亚胺 (PI) 气凝胶的水接触角从 128°下降到多巴胺改性氮化硼 (PDA@BN)-羟基化碳纳米管 (CNT)/PI 的 64°。在 2 kW/m² 光照下，PDA@BN-CNT/PI 气凝胶在 60 s 时表面温度达到 136℃，远高于 PI 和 PDA@BN/PI 气凝胶。说明 PDA@BN 与 CNT 的加入赋予了 PI 气凝胶亲水特性并大幅提高其光热转换能力。

(2) 通过四定向冷冻干燥和亚胺化工艺制备了具有低弯曲度管状结构的 PDA@BN-CNT/PI 气凝胶，该气凝胶在 12 s 内即可将底部的蓝墨水运输至顶部并润湿小纸片，低于无规冷冻制备的 PDA@BN-CNT/PI-R 的 24 s。这表明低弯曲度管状结构促进了水在气凝胶内部的运输，进而有利于提高该气凝胶的太阳能水蒸发性能。

(3) PDA@BN-CNT/PI 在 2 kW/m² 光照下的水蒸发速率为 1.95 kg/(m²·h)，相较于 PI、PDA@BN/PI 和 PDA@BN-CNT/PI-R 分别提高了 440%、52% 和 11%。在 5 次循环蒸发及不同酸碱溶液中的水蒸发速率均维持在 1.9 kg/(m²·h)。而且含有金属离子的水溶液经 PDA@BN-CNT/PI 净化后达到了国家的饮用水标准。这表明该气凝胶具有优异的循环使用性能、化学稳定性和高效的污水净化能力。

参考文献：

[1] XIONG Z C, ZHU Y J, QIN D D, et al. Flexible fire-resistant photothermal paper comprising ultralong hydroxyapatite nanowires and carbon nanotubes for solar energy-driven water purification[J]. Small, 2018, 14(50): 1803387.

[2] XIONG Z C, ZHU Y J, WANG Z Y, et al. Tree-inspired ultralong hydroxyapatite nanowires-based multifunctional aerogel with vertically aligned channels for continuous flow catalysis, water disinfection, and solar energy-driven water purification[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 32(9): 2106978.

[3] ZHAO F, ZHOU X, SHI Y, et al. Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13: 489-495.

[4] FENG J, BAI B, YANG L, et al. Low-cost and facile hydrophilic amplification of raw corn straws for the applications of highly efficient interfacial solar steam generation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 271: 124904.

[5] 李帅. 基于纤维素凝胶的太阳能水蒸发器的结构设计及其性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
LI Shuai. Structure design and performance research of solar vapor generator based on cellulose gel[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021(in Chinese).

[6] 张超凡. 基于微纳米光热转换材料的高效太阳能水蒸发器件的设计与构筑[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.
ZHANG Chaofan. Design and construction of high-efficient solar water evaporation device based on micro-nano photothermal conversion materials[D]. Yantai: Ludong University, 2021(in Chinese).

[7] 苏丽芬, 常展鹏, 宁玉盈, 等. 柔性多孔硅橡胶负载纳米CuS的太阳能蒸发性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(18): 18024-18029.
SU Lifen, CHANG Zhanpeng, NING Yuying, et al. Flexible porous polydimethylsiloxane supported nano copper sulfide for efficient solar evaporation[J]. Materials Reports, 2021, 35(18): 18024-18029(in Chinese).

[8] WEN B Y, ZHANG X Y, YAN Y H, et al. Tailoring polypyrrole-based Janus aerogel for efficient and stable solar steam generation[J]. Desalination, 2021, 516: 115228.

[9] YANG Y, ZHAO R, ZHANG T, et al. Graphene-based standalone solar energy converter for water desalination and purification[J]. ACS Nano, 2018, 12(1): 829-835.

[10] 钟铠, 张弛, 仲亚, 等. 石墨烯气凝胶复合材料制备及吸附性能的研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(6): 1-6.
ZHONG Kai, ZHANG Chi, ZHONG Ya, et al. Research progress in the preparation and adsorption capability of graphene aerogel composite materials[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(6): 1-6(in Chinese).

[11] WANG N N, WANG H, WANG Y Y, et al. Robust, lightweight, hydrophobic, and fire-retarded polyimide/MXene aerogels for effective oil/water separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(43): 40512-40523.

[12] XU W, YUN X, LIU J, et al. Efficient water transport and solar steam generation via radially, hierarchically structured aerogels[J]. ACS Nano, 2019, 13(7): 7930-7938.

[13] YU Z C, WU P Y. Biomimetic MXene-polyvinyl alcohol composite hydrogel with vertically aligned channels for highly efficient solar steam generation[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(6): 2000065.

[14] HE J X, FAN Y K, XIAO C H, et al. Enhanced solar steam generation of hydrogel composite with aligned channel and shape memory behavior[J]. Composites Science and Technology, 2021, 204: 108633.

[15] XIE D, HE M, LI X R, et al. Tree-inspired efficient solar evaporation and simultaneous in-situ purification of ultra-highly concentrated mixed volatile organic wastewater[J]. Nano Energy, 2022, 93: 106802.

[16] WEI C J, ZHAG X H, MA S Y, et al. Ultra-robust vertically aligned three-dimensional (3D) Janus hollow fiber membranes for interfacial solar-driven steam generation with salt-resistant and multi-media purification[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 130118.

[17] DONG X Y, SI Y, CHEN C J, et al. Reed leaves inspired silica nanofibrous aerogels with parallel-arranged vessels for salt-resistant solar desalination[J]. ACS Nano, 2021, 15(7): 12256-12266.

[18] CHEN Y M, LI S J, LI X L, et al. Liquid transport and real-time dye purification via lotus petiole-inspired longrange-ordered anisotropic cellulose nanofibril aerogels[J]. ACS Nano, 2021, 15(12): 20666-20677.

[19] JIA W, ZHOU L, JIANG M, et al. Fabrication of polyimide/graphene nanosheet composite fibers via microwave-assisted imidization strategy[J]. RSC Advance, 2021, 11(52): 32647-32653.

[20] MIN C, LIU D, HE Z, et al. Novel polyimide nanocomposites enhanced by covalent modified graphene nanosheets based on friedel-crafts reaction[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 5484-5497.

[21] YANG W, WANG N N, PING P, et al. Novel 3D network architectured hybrid aerogel comprising epoxy, graphene, and hydroxylated boron nitride nanosheets[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(46): 40032-40043.

[22] ROY A K, PARK B, LEE K S, et al. Boron nitride nanosheets decorated with silver nanoparticles through mussel-inspired chemistry of dopamine[J]. Nanotechnology, 2014, 25(44): 445603.

[23] CAI W, GUO W W, PAN J, et al. Polydopamine-bridged synthesis of ternary h-BN@PDA@SnO_2 as nanoenhancers for flame retardant and smoke suppression of epoxy composites[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2018, 111: 94-105.

[24] 秦盼亮, 谢璠, 张楠, 等. AF-PDA@h-BN二元纸基复合材料导热绝缘性能的研究[J]. 中国造纸, 2018, 37(11): 7-11.
QIN Panliang, XIE Fan, ZHANG Nan, et al. The study of thermal conductivity and insulation properties of AF-PDA@h-BN binary paper-based composite[J]. China Pulp & Paper, 2018, 37(11): 7-11(in Chinese).

[25] BAI C, WANG F, ZHAO Z, et al. Mussel-inspired facile fabrication of dense hexagonal boron nitride nanosheet-based coatings for anticorrosion and antifriction applications[J]. Materials Today Nano, 2021, 15: 100129.

[26] 中华人民共和国卫生部, 国家标准化委员会. 生活饮用水卫生标准: GB/T 5749—2006[S]. 北京: 卫生部法监司, 2006.
Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB/T 5749—2006[S]. Beijing: Department of Health Law Enforcement and Supervision, 2006(in Chinese).