

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.002

聚苯胺/碳纳米管改性聚乙烯醇气凝胶的制备及性能

李敏, 朱艳, 潘奕婷, 王一硕, 王妍霄, 王佳悦, 贾仕奎

(陕西理工大学材料科学与工程学院矿渣综合利用环保技术国家地方联合工程实验室, 陕西汉中 723001)

摘要: 太阳能界面蒸发技术在水处理领域具有广阔应用前景, 为开发高效、稳定的太阳能界面蒸发器件, 本文以聚乙烯醇(PVAL)为基体, 3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)改性碳纳米管(m-CNT)和盐酸掺杂聚苯胺(m-PANI)为光热增强剂, 采用冷冻干燥技术成功构筑了PVAL、PVAL/m-CNT、PVAL/m-PANI和一系列PVAL/CNT/PANI复合气凝胶(PC_xP_y)。利用扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱对气凝胶的微观结构和化学组成进行了表征, 并系统研究了其吸水性能、导热性能、光热转换与界面蒸发性能。结果表明, m-PANI改性PVAL气凝胶内层形成了褶皱状形貌、与适量的m-CNT协同可构建出多级孔道结构。当m-CNT与m-PANI质量比为9:1时, 该PC₉P₁气凝胶吸水比达7.32, 热导率为0.102 W/(m·K), 在1.5 kW/m²光照下表面温度达101.0 °C。然而, 蒸发性能并非仅与光热温度正相关, 还受到孔隙结构和亲水性的影响, PC₉P₁的淡水蒸发速率2.20 kg/(m²·h)略低于PC₅P₁ [2.28 kg/(m²·h)]和PC₇P₁ [3.13 kg/(m²·h)]; 而PC₅P₁在盐水中蒸发性能最优。这些结果表明, 最佳蒸发性能受到光热转换、水传输与热管理等因素共同作用, 在淡水环境中气凝胶的光热转化性能更突出, 高盐环境则供水能力与抗盐垢性能成为主导。本研究为多组分复合蒸发材料的设计提供了实验支撑。

关键词: 气凝胶; 聚乙烯醇; 聚苯胺; 碳纳米管; 界面蒸发

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)04-0011-10

Preparation and performance of polyvinyl alcohol aerogel modified with polyaniline/carbon nanotube

LI Min, ZHU Yan, PANG Yiting, WANG Yishuo, WANG Yanxiao, WANG Jiayue, JIA Shikui

(National & Local Joint Engineering Laboratory for Slag Comprehensive Utilization and Environmental Technology, School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Solar interfacial evaporation technology holds broad application prospects in the field of water treatment. To develop efficient and stable solar interfacial evaporation device, polyvinyl alcohol (PVAL) was utilized as the matrix, 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES)-modified carbon nanotubes (m-CNT) and hydrochloric acid-doped polyaniline (m-PANI) were used as photothermal enhancers, pure PVAL, PVAL/m-CNT, PVAL/m-PANI, and a series of PVAL/CNT/PANI composite aerogels (PC_xP_y) were successfully constructed by using freeze-drying technology in this paper. The microstructure and chemical composition of the aerogels were characterized using by scanning electron microscopy and fourier transform infrared spectroscopy. Their water absorption, thermal conductivity, photothermal conversion, and interfacial evaporation properties were systematically studied. The results indicate that the inner layer of m-PANI-modified PVAL aerogel presents a wrinkled morphology, and combined with an appropriate amount of m-CNT, a hierarchical pore structure can be synergistically constructed. When mass ratio of m-CNT and m-PANI is 9:1, PC₉P₁ aerogel achieves a water absorption ratio of 7.32, a thermal conductivity of 0.102 W/(m·K), and a surface temperature of 101.0 °C under 1.5 kW/m² illumination. However, evaporation performance is not only positively correlated with photothermal temperature, but also influenced by pore structure and hydrophilicity. The evaporation rate of PC₉P₁ [2.20 kg/(m²·h)] in freshwater is slightly lower than that of PC₅P₁ [2.28 kg/(m²·h)] and PC₇P₁ [3.13 kg/(m²·h)], while PC₅P₁ has the best evaporation performance in salt water. These results demonstrate that the optimal evaporation performance is influenced by the combined factors of photother-

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(202510720016), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2025JC-YBMS-595, 2025JC-YBMS-469)

通信作者: 朱艳, 硕士, 高级实验师, 主要从事聚合物基复合气凝胶制备、微观结构及功能化研究

收稿日期: 2026-02-08

引用格式: 李敏, 朱艳, 潘奕婷, 等. 聚苯胺/碳纳米管改性聚乙烯醇气凝胶的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(4): 11-20.

LI Min, ZHU Yan, PANG Yiting, et al. Preparation and performance of polyvinyl alcohol aerogel modified with polyaniline/carbon nanotube [J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 11-20.

mal conversion, water transport and thermal management. Aerogels exhibit more prominent photothermal conversion performance in freshwater environments, while the water supply capacity and saltscale resistance are dominant in high-salt environments. This study provides experimental support for the design of multi-component composite evaporation materials.

Keywords: aerogel ; polyvinyl alcohol ; polyaniline ; carbon nanotubes ; interfacial evaporation

淡水资源短缺已成为制约全球经济社会可持续发展的重大全球性挑战,海水淡化与污水处理是缓解水资源危机的关键途径。太阳能界面蒸发技术凭借清洁无污染、能量来源可持续的独特优势,无需复杂设备即可实现高效水蒸发,在水处理领域展现出广阔应用前景^[1-3]。该技术的核心在于光热材料的设计与制备,其性能直接决定太阳能捕获、热量局域化及水输运效率,因此开发兼具高效光热转换、快速水分传输和稳定结构性能的蒸发材料成为研究热点^[4]。

气凝胶作为一类具有高孔隙率、大比表面积和低热导率的多孔材料,能够构建理想的一体式界面蒸发器骨架,既可为光热组分提供稳定支撑,又能实现高效隔热水分输运。当前,气凝胶的应用已从传统质轻、隔热拓展至吸附、传感、催化等多个前沿领域^[5-6]。例如,Liang等^[7]通过构建碳纳米管(CNT)/聚丙烯腈(PAN)纳米纤维气凝胶复合三维网络,实现了97.6%的光吸收与2.07 kg/(m²·h)的蒸发速率。为进一步优化界面蒸发器在极端条件下水处理能力,Jing等^[8]合成了磺化共轭微孔聚合物气凝胶,在极端pH和高盐条件下仍保持稳定蒸发,并对Pb²⁺离子具有选择性吸附能力。Pu等^[9]在双层气凝胶中集成二氧化亚铁铜光催化剂,实现了2.19 kg/(m²·h)的蒸发速率与78.4%的四环素降解率,展现了光热-光催化协同净水的潜力。

研究发现,基于聚乙烯醇(PVAL)的气凝胶骨架在支撑相变材料、实现高效太阳能-热能存储与转换方面展现出巨大潜力。同时,PVAL因良好的生物相容性、可降解性和优异亲水性,成为制备气凝胶基体的优选材料,但其对太阳光的吸收能力有限,光热转换效率不足,亟需引入高效光热组分进行改性^[11]。Tavakoli等^[12]将氧化石墨烯与二氧化硅气凝胶引入PVAL基水凝胶,通过结构优化实现了高效稳定的蒸发。为了进一步降低水蒸发能耗,Hu等^[13]创新性地采用高内相Pickering乳液法,构建了疏水碳纳米纤维与亲水PVAL/纤维素纳米纤维3D柱状孔气凝胶,通过诱导Marangoni对流等方式,在1个太阳

光照下其蒸发速率达到6.857 kg/(m²·h)。这些研究揭示了多组分复合与微纳结构调控是提升PVAL基气凝胶蒸发性能的关键。

虽然上述策略显著提升了太阳能界面器的蒸发速率,但在宏量制备、光热转化及利用、耐盐碱等方面仍面临着障碍。为了进一步提升界面蒸发器的光热转化性能,通常引入CNT进行协同^[14-16]。其中,简宏伟^[15]通过构建Janus润湿结构,使PVAL/CNT基蒸发器在1个太阳光照下可实现1.34 kg/(m²·h)的蒸发速率和85.71%的光热效率,并表现出优异的耐盐性与污染物去除能力。同时,为了提高CNT在PVAL基体中的分散性和PVAL基气凝胶的蒸发性能,笔者所在课题组将羧基化CNTs与MXene引入到PVAL中,再利用FeSO₄将羧基化CNTs还原,从而确保PVAL/CNT_s/MXene取向孔结构的复合气凝胶高的光热转化性能,在1个太阳光照下,蒸发速率达到3.35 kg/(m²·h),且在20%的浓盐水中蒸发速率仍保持2.51 kg/(m²·h)^[9]。这些研究表明,特殊孔结构设计与碳基材料的改性将有效提升蒸发器的综合性能。

然而,为了进一步降低气凝胶的制备成本和提高其化学稳定性,聚苯胺(PANI)作为本征态吸光高分子,具有成本低廉、化学稳定性优良等特点^[17]。基于此,本文提出一种协同改性策略:以PVAL为三维骨架,同时引入盐酸掺杂改性的PANI(m-PANI)和3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)修饰的CNT(m-CNT),通过冷冻干燥技术制备PVAL/CNT/PANI(PC_xP_y)复合气凝胶。本研究的创新点在于采用APTES改性CNT提升其在PVAL基体中的分散性,同时通过盐酸掺杂增强PANI的光热转换能力,构建高效协同光热网络,并系统调控m-CNT与m-PANI的质量比,揭示其对气凝胶微观结构(孔道连通性、纤维取向)及宏观性能(亲水性、光热性能、蒸发性能)的协同调控规律,获得最优配比,且验证制备的复合气凝胶在高盐度环境中的蒸发性能,旨在为开发新型高效太阳能水处理材料提供实验依据与理论支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PVAL:聚合度 1 788,国药集团化学试剂有限公司;

冰乙酸(CH_3COOH)、盐酸(HCl)、浓硫酸(H_2SO_4)、十二烷基硫酸钠(SDS)、APTES:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

PANI 粉末、CNT:上海麦克林生化科技股份有限公司;

硼砂($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$):分析纯,天津市北辰方正试剂厂。

1.2 主要仪器及设备

循环水式多用真空泵:SHZ-D(Ⅲ),上海力辰邦西仪器有限公司;

数控超声波清洗器:KQ-300DE,昆山市超声仪器有限公司;

真空干燥箱:DZF-6051,上海一恒科学仪器有限公司;

模具压片机:HF-2A,天津市拓普仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:LGJ-12A,北京四环起航科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6460LV,日本电子株式会社;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet6700,美国安捷伦科技有限公司;

红外热像仪:FLIR-E4,美国安捷伦科技有限公司;

双数显恒温磁力搅拌:HJ-4B,新瑞仪器有限公司;

接触角测量仪:XDES-A,锡德恩斯仪器科技有限公司;

激光闪射法导热仪:LFA457,德国耐驰公司;

模拟太阳能氙灯光源系统:CEL-S500/350,北京中教金源科技有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 改性 PANI 的制备

将 1 g 本征态 PANI 粉末分散于 140 mL、1.5 mol/L 的 HCl 溶液中,60 °C 下磁力搅拌 24 h。抽滤,用去离子水洗涤至滤液呈中性,于 60 °C 真空干燥箱中干燥 12 h,研磨后得到改性 PANI(m-PANI)粉末。

1.3.2 改性 CNT 的制备

首先,将浓硫酸与浓盐酸按 3:1 的体积比混合,再离子水稀释至四倍体积,配制成混酸溶液。随后,取 1 g 原始 CNT 分散于 70 mL 该混酸中,超声处理 15 min 后,在 60 °C 下磁力搅拌反应 24 h。反应结束后进行抽滤,并以去离子水反复洗涤至滤液为中性($\text{pH}=7$),所得固体于 60 °C 真空干燥箱中干燥 12 h,得到酸化 CNT。将酸化后的 CNT 研磨后分散于 140 mL 乙醇/水混合溶剂(体积比 3:1)中,超声处理 30 min,形成均匀悬浮液。另将 0.4 g 的 APTES 溶于 22 mL 乙醇/水溶液(体积比 10:1)中,用冰乙酸调节 pH 值至 4~5,制得 APTES 水解液。在搅拌条件下,将水解液缓慢滴加至 CNT 悬浮液中,于 30 °C 反应 3 h,再于 25 °C 继续反应 3 h,使接枝反应充分进行。最后经抽滤,并依次以无水乙醇和去离子水各洗涤至中性,于 60 °C 真空干燥 24 h,得到 APTES-CNT(m-CNT)粉末。

1.3.3 PVAL 基气凝胶的制备

所有 PVAL 基复合气凝胶均采用相同的冷冻干燥工艺制备,仅调整填料种类与配比。具体步骤如下:首先将 2.5 g 的 PVAL 粉末加入到 100 mL 蒸馏水中并在 60 °C 下充分搅拌溶解。接着,分别按表 1 配方加入相应质量 m-CNT 或 m-PANI 改性剂,其改性剂总质量为 1 g。将上述 PVAL 基混合液在 60 °C 下磁力搅拌 2 h,超声处理 1 h 使改性剂均匀分散,随后加入 0.05 g SDS 和 0.05 g 硼砂,室温搅拌 30 min。将所得悬浮液倒入聚四氟乙烯冰模板中,置于 -18 °C 冰箱中预冻 12 h,最后在真空冷冻干燥机中干燥 48 h,得到相应的气凝胶样品。图 1 为 PVAL 基复合气凝胶制备流程示意图。纯 PVAL、PVAL/m-CNT、PVAL/m-PANI 及不同配比的 m-CNT/m-PANI 改性 PVAL(PC_xP_y)($x:y$ 为 m-CNT 与 m-PANI 质量比)气凝胶的命名与具体配比见表 1。

1.4 测试与表征

1.4.1 微观形貌测试

采用 SEM 对 PVAL/m-PANI、PVAL/m-CNT 和 PC_xP_y 复合气凝胶进行表面及内部孔形貌测试,对试样喷金后在真空环境下,10 kV 加速电压下进行观察。

1.4.2 官能团及相互作用测试

通过 FTIR 仪对 PVAL、PVAL/m-PANI、PVAL/

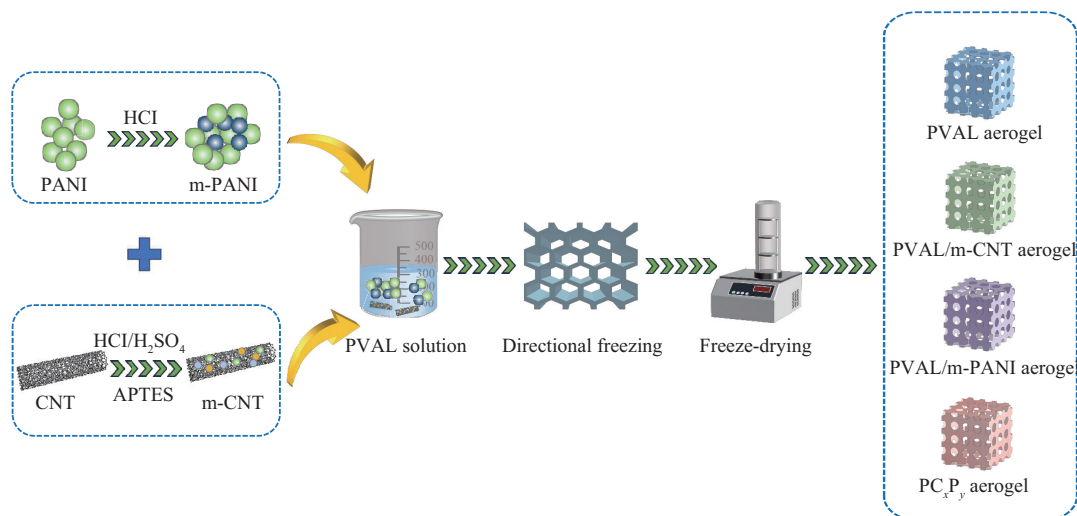


图1 PVAL基复合气凝胶制备流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation of PVAL-based composite aerogel

表1 PANI和CNT改性PVAL复合气凝胶的配比

Tab. 1 Component ratio of PANI and CNT modified PVAL composite aerogel

Sample	PVAL	CNT	PANI	g
PVAL	2.5	—	—	
PVAL/m-CNT	2.5	1.0	—	
PVAL/m-PANI	2.5	—	1.0	
PC ₁ P ₁	2.5	0.500	0.500	
PC ₃ P ₁	2.5	0.750	0.250	
PC ₅ P ₁	2.5	0.834	0.166	
PC ₇ P ₁	2.5	0.875	0.125	
PC ₉ P ₁	2.5	0.900	0.100	

m-CNT和PC_xP_y复合气凝胶进行官能团测试。将充分干燥的试样与溴化钾混合(1:500)并充分研磨,取约0.060 g研磨后粉末压片,10 MPa保压时间3 min。分辨率为4 cm⁻¹,扫描范围400~4 000 cm⁻¹。

1.4.3 亲水性能测试

通过接触角测量仪对PVAL、PVAL/m-PANI、PVAL/m-CNT和PC_xP_y复合气凝胶的亲水性进行测试,液滴体积为2 μL,环境相对湿度为45%,温度为25 ℃,测试过程全程视频记录。

1.4.4 吸水性能测试

通过水传输速率和吸水比两项指标进行评估。记录气凝胶对水的容积能力,通过称重法计算吸水比(吸水后质量与干燥质量之比),单位为g/g。

1.4.5 光热性能分析

利用太阳能氙灯光源系统模拟的太阳光作为光源,光照强度为1.5 kW/m²,对PVAL、PVAL/m-PANI、PVAL/m-CNT和PC_xP_y复合气凝胶置于稳定的光源下,在样品正上方使用红外热像仪进行摄

像,并记录温度变化。

1.4.6 导热性能测试

使用激光闪射法导热仪测试PVAL基复合气凝胶热导率。试样直径45 mm,厚度10 mm,每组测试3个试样,并取平均值。

1.4.7 耐盐性能测试

将PVAL、PVAL/m-PANI、PVAL/m-CNT和PC_xP_y复合气凝胶分别放置于浓度20%的盐水中进行蒸发性能测试,在1.5 kW/m²光照1 h后,取出试样并拍摄试样亲水面和试样外观,观察试样耐盐和盐垢状态。

1.4.8 蒸发性能测试

将PVAL、PVAL/m-PANI、PVAL/m-CNT和PC_xP_y复合气凝胶分别放置于蒸馏水或浓度20%的盐水烧杯(100 mL)中,测试其淡水或盐水蒸发性能。通过太阳能氙灯光源系统模拟的太阳光作为光源,将烧杯放置于电子天平上,每3 min记录电子天平示数,共记录20次示数变化。由式(1)和式(2)分别计算气凝胶的蒸发速率和蒸发效率^[12,18]。

$$\nu = \frac{\Delta m}{A \cdot h} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\nu h_{L_v}}{q} \quad (2)$$

式中: ν 为气凝胶蒸发率,单位kg/(m²·h); A 为光照面积,单位m²;h为蒸发时间,单位s; Δm 为质量变化,单位g; η 为气凝胶蒸发效率; h_{L_v} 为水的蒸发焓,2 256 J/g,其计算过程中采用了固定值,随着蒸发过程的进行,其蒸发焓稍有下降; q 为入射太阳功率密度,1.5 kW/m²。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌分析

图2清晰给出了PVAL、PVAL/m-CNT、PVAL/m-PANI、PC₁P₁、PC₃P₁、PC₅P₁、PC₇P₁、PC₉P₁的内层SEM照片。从图2a可看出,PVAL呈现出较为规整的层状纤维结构,纤维排列相对紧密且取向性较好;PVAL/m-CNT的纤维层状结构出现轻微卷曲,表面粗糙度略有提升,纤维分散良好,这得益于表面改性引入的极性基团改善了m-CNT与PVAL基体的相容性;PVAL/m-PANI的纤维结构卷曲程度进一步增大,形成了交错的褶皱状形貌,构建了初级的多孔框架;PC₁P₁则表现出局部团聚特征,纤维层间出现明显的堆叠与黏结现象;PC₃P₁样品纤维交织形成网状孔隙,分布较为均匀;当m-CNT与m-PANI质量比为1:1时(PC₅P₁,图2f),气凝胶内部形成了均一、发达的多级孔道结构,这种结构有利于增加光

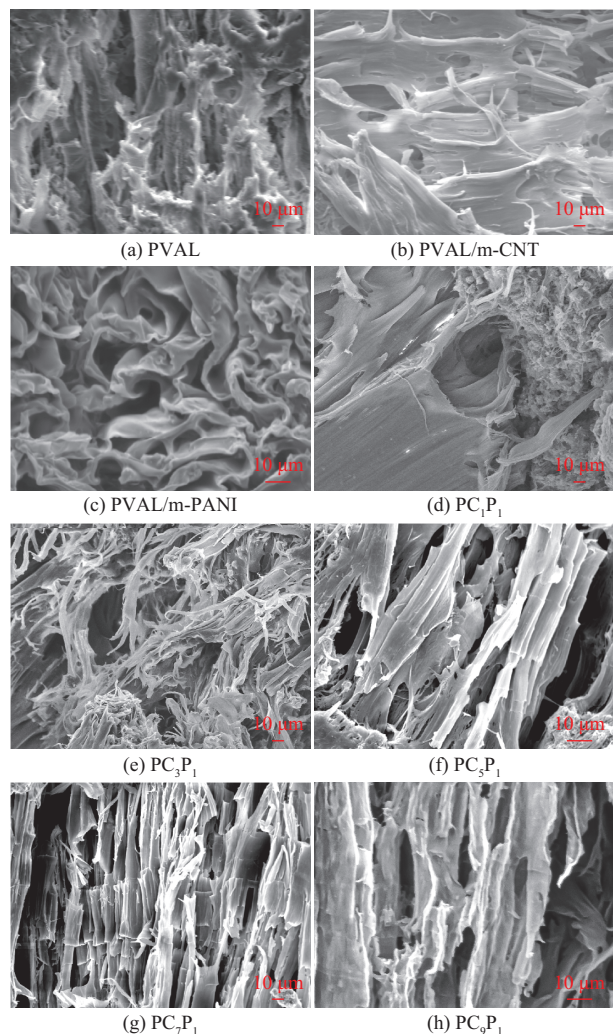


图2 PVAL及PC_xP_y复合气凝胶内层SEM照片

Fig. 2 SEM photos of interior of PVAL and PC_xP_y aerogels

散射路径(提高光吸收)、提供充足的水分传输通道并允许蒸汽高效逸出。PC₇P₁的纤维取向性逐渐增强,纤维束的规整度提升,且纤维间的间隙有所减小;然而,当CNT比例过高时(PC₉P₁,图2h),过量的CNT可能发生局部堆积,导致部分孔道被堵塞或变得狭小,这可能会对水的毛细输运产生不利影响。

图3为PVAL及PC_xP_y复合气凝胶光热表层SEM照片。PVAL/m-CNT(图3b)的光热表层图像展现出定向排列的纤维状结构,纤维束交织形成规整的条纹状形貌;而PVAL/m-PANI(图3c)表现出致密的颗粒聚集体形貌,颗粒间结合紧密且孔隙率大幅降低;当m-CNT与m-PANI质量比为1:1时(PC₁P₁,图3d),光热表层图像为均一的细颗粒堆积结构,颗粒尺寸相较于质量比为3:1时(PC₃P₁,图3e)更小,整体形貌更为致密且细颗粒的紧密堆积进一步增大

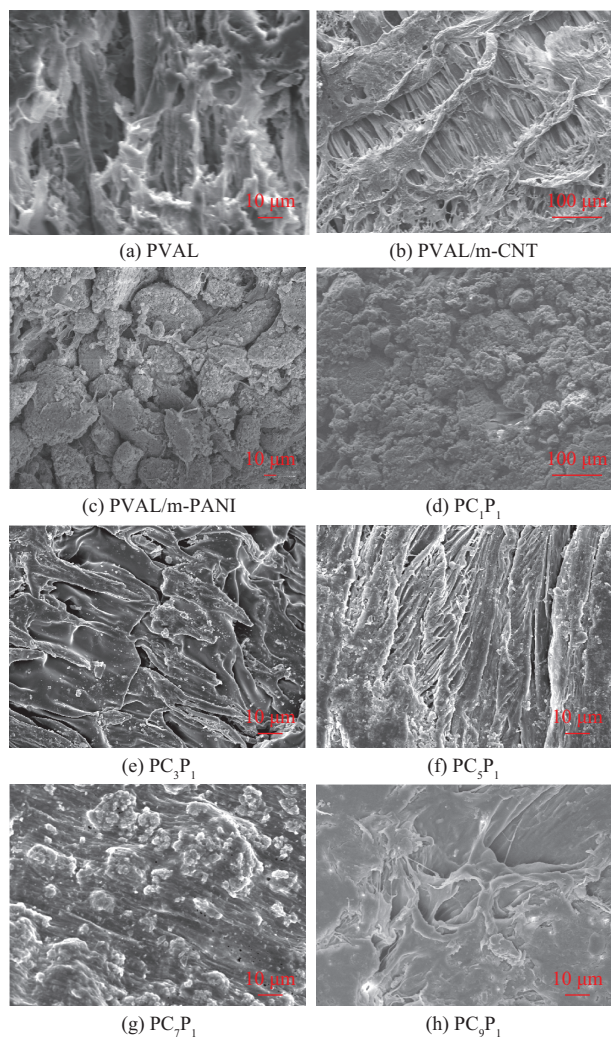


图3 PVAL及PC_xP_y复合气凝胶光热表层SEM照片

Fig. 3 SEM photos of photothermal surface layer of PVAL and PC_xP_y aerogels

了光热材料的接触面积,有利于光热性能的发挥,但另一方面,也可能导致热量传递的局部集中和不利于水的传输。 PC_5P_1 的光热表层图像为高度定向的纤维束结构,纤维的排列规整度达到最优,纤维束间的间隙狭窄且均匀。 PC_7P_1 的光热表层图像表现为颗粒/纤维复合的杂化形貌,颗粒均匀负载在纤维表面并填充于纤维间隙,这种杂化结构结合了颗粒高的光吸收特性与纤维的结构支撑性,实现了光热性能与力学性能的协同优化。 PC_9P_1 的光热表层图像呈现出致密的层状聚集形貌,层片相互融合且孔隙基本消失,表面趋于平整,致密的层状结构可降低光热层的热导率损失,减少热量向基底的传递,提升光热转换的利用率^[19-20]。 PC_5P_1 的定向纤维束结构(图3f)形成了天然的“光陷阱”,纤维束间的微米级间隙可引发多次反射,增强光吸收;同时,纤维的高长径比有利于热量沿纤维轴向传导至蒸发界面,实现高效热局域化。而 PC_9P_1 的致密层状结构(图3h)虽减少了热损失,但光滑的表面降低了光捕获效率,且缺乏供水通道,导致热量集中于表层却无法有效用于蒸发。

2.2 化学结构分析

图4为PVAL基复合气凝胶的FTIR谱图。所有样品在 3439.9 cm^{-1} 附近均出现O—H和N—H的伸缩振动叠加峰。 $m\text{-CNT}$ 气凝胶在此处的峰强显著,证实了其表面成功引入了一 NH_2 等官能团。在 1628.1 cm^{-1} 和 1447.1 cm^{-1} 附近的吸收峰分别归属于PANI醌环中C=C的伸缩振动和苯环中C—C的伸缩振动^[18-19]。在 1139.5 cm^{-1} 附近出现的特征吸收峰,被指认为掺杂态PANI的特征峰(C—N伸缩振动),同时也可能包含Si—O—C的贡献。该峰的出现明确了PANI的成功掺杂和APTES在CNT表面的接枝。 PC_xP_y 复合气凝胶的谱图中均出现了上述各组分的特征峰,且并未出现新的特征峰,证实了

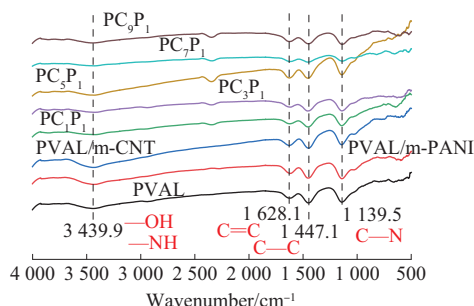


图4 PVAL基复合气凝胶的FTIR谱图

Fig. 4 FTIR spectra of PVAL-based composite aerogels

复合材料的成功制备。

2.3 亲水性分析

图5为PVAL、PVAL/ $m\text{-CNT}$ 、PVAL/ $m\text{-PANI}$ 和 PC_1P_1 气凝胶亲水层的接触角照片。如图5a所示,纯PVAL气凝胶表现出优异的亲水性,这归因于其分子链上富含的羟基(—OH)能与水分子形成强烈的氢键作用。 CNT 由于其本征的疏水特性,未改性 CNT 气凝胶表现出高度疏水性,会阻碍水分的横向运输。经过酸化和APTES改性后,PVAL/ $m\text{-CNT}$ 气凝胶的亲水性发生了显著提升(图5b),其亲水层初始接触角降至 31.71° ,3 s后其接触角进一步降至 17.25° 。这是因为酸化过程在 CNT 表面引入了羧基(—COOH)、羟基(—OH)等亲水官能团,而后续的APTES接枝又引入了氨基(— NH_2),并通过形成Si—O—C键强化了与基体的结合,从而显著增强了其亲水性能。

PANI本身亲水性有限。经盐酸掺杂后,其亲水性得到显著改善(图5c)。PVAL/ $m\text{-PANI}$ 气凝胶的亲水层初始接触角为 84.66° ,但液滴在1 s内即被完全吸收。这种提升源于HCl掺杂在PANI分子链上,引入了一 NH_2 等强极性基团,并使其分子链结构变得更为疏松,增大了与水的接触面积。

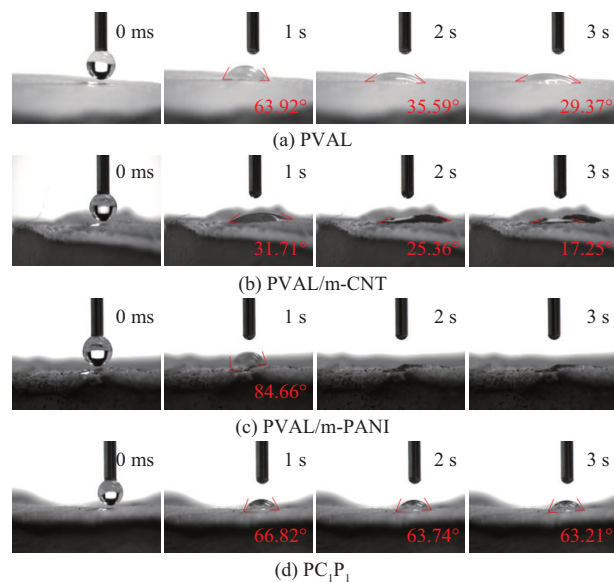


图5 PVAL、PVAL/ $m\text{-CNT}$ 、PVAL/ $m\text{-PANI}$ 和 PC_1P_1 气凝胶亲水层的接触角照片

Fig. 5 Contact angle photos of hydrophilic layer of PVAL, PVAL/ $m\text{-CNT}$, PVAL/ $m\text{-PANI}$ and PC_1P_1 aerogels

进一步,对于 PC_xP_y 复合气凝胶系统研究了填料比例对气凝胶亲水性的影响。图6a至图6d展示了其初始接触角随 CNT 含量变化的趋势,随着亲水改

性的m-CNT在PVAL基体中质量占比的增加,气凝胶亲水层的亲水性总体呈先增强后减弱的趋势。值得注意的是,PC₃P₁气凝胶的亲水层表现出最佳的亲水特性,初始水接触角低至25.31°。同时,PC₇P₁和PC₉P₁气凝胶的亲水层初始接触角分别为37.54°和36.43°,良好的亲水性将有利于水分在蒸发器内连续、稳定地输运。

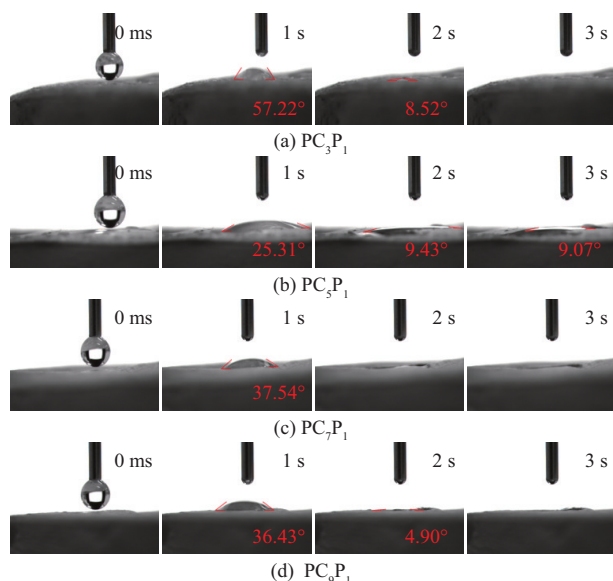


图6 PC_xP_y复合气凝胶亲水层的接触角照片

Fig. 6 Contact angle photos of hydrophilic layer of PC_xP_y aerogels

然而,PC₉P₁虽然静态吸水比最高(7.32 g/g),但其初始接触角(36.43°)大于PC₅P₁(25.31°),这表明亲水性不仅取决于总吸水量,更与表面润湿动力学相关。PC₉P₁中过量CNT堆积导致部分区域被疏水的CNT簇覆盖,形成“亲水-疏水”异质表面,使得液滴初始铺展受阻;而PC₅P₁中亲水官能团分布更均匀,液滴能快速铺展并渗透。这一差异直接影响了后续蒸发过程中的水分补给速率。

2.4 吸水性分析

图7为纯PVAL及不同改性PVAL基气凝胶的吸水质量比。由图可知,纯PVAL气凝胶的吸水比为8.51,其分子链上富含的羟基(—OH)能与水分子形成强烈氢键作用,赋予其优异的亲水吸水特性,但单一PVAL基体缺乏有效光热组分,导致后续蒸发效率低下。同时,吸水比测试结果发现,PVAL/m-CNT、PVAL/m-PANI、PC₁P₁、PC₃P₁、PC₅P₁、PC₇P₁、PC₉P₁复合气凝胶吸水比分别较纯PVAL的降至3.12、3.92、4.93、6.89、6.37、4.24、7.32,其中PVAL/m-CNT单组分改性气凝胶吸水比最低,这是由于尽管APTES改性在CNT表面引入了氨基(—NH₂)等亲水

官能团,但管状结构的局部聚集和致密的三维网络仍一定程度上抑制了水分的深度渗透;PVAL/m-PANI分子链结构变得更为疏松,且引入了一NH₃⁺等强极性基团,亲水性较本征态PANI明显改善,其吸水比高于PVAL/m-CNT单组分改性样品。

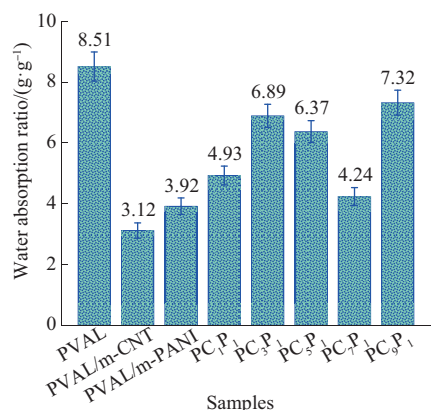


图7 纯PVAL及其复合气凝胶的吸水比

Fig. 7 Water absorption ratio of neat PVAL and its composite aerogels

在PC_xP_y系列复合气凝胶中,吸水比随CNT含量变化呈现先升高后降低的趋势,这与微观形貌及亲水性分析结果一致。其中,可能由于PC₁P₁和PC₇P₁样品的光热组分分散不均,孔道连通性不足,导致吸水比相对较低,分别为4.93和4.24;当m-CNT与m-PANI质量比为3:1和5:1时,PC₃P₁和PC₅P₁样品吸水比分别达到6.89和6.37。此外,当进一步提高m-CNT的质量比时,PC₉P₁吸水比提升至7.32,这是因为适量CNT与PANI的复合构建了连续发达的多级孔道结构,二者表面的亲水官能团(—NH₂、—COOH等)形成协同作用,增强了与水分子的相互作用,同时孔道连通性改善降低了水分传输阻力,使吸水性能得到优化;而PC₅P₁样品吸水比(6.37)略低于PC₃P₁、PC₉P₁,可能与该配比下组分分散状态及孔道结构的细微差异相关。然而,吸水比仅反映静态储水能力,动态供水速率对蒸发性能同样关键。结合2.1节的孔结构分析,PC₅P₁虽吸水比略低,但其连通性更好的多级孔道可实现更快的毛细补水;而PC₉P₁的高吸水比主要来源于微孔的毛细储水,但孔道潜在堵塞导致补水速率下降。

2.5 光热性能分析

图8清晰地展示了不同气凝胶在1.5 kW/m²模拟太阳光照射下的红外热成像图及表面最高温度对比。纯PVAL气凝胶光热转换能力最弱,表面温度最低,照射2 min后其表面温度仅为35.6℃。引入光热组分后,所有复合气凝胶的表面温度均显著

提升。然而,PVAL/m-CNT气凝胶的表面温度达到97.5℃,这归因于CNT优异的光热吸收及转化能力;且PVAL/m-PANI气凝胶的表面温度达到91.4℃,这源于酸掺杂优化了其分子结构,增强了光吸收^[20-21]。

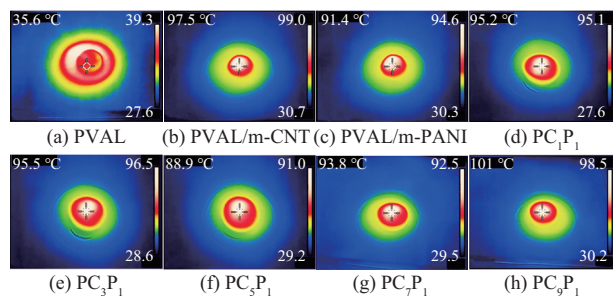


图8 PVAL及PC_xP_y复合气凝胶的红外热成像图

Fig. 8 Infrared thermography images of PVAL and PC_xP_y aerogels

更重要的是,PANI与CNT在构筑高效光热网络方面展现出显著的协同效应。随着CNT含量的增加,复合气凝胶的表面温度呈现持续上升的趋势,PC₉P₁气凝胶达到了最高的表面温度101.0℃。这主要归因于:一方面,CNT本身具有极宽的太阳光谱吸收范围和高的光热转换效率;同时,PANI与CNT在三维空间中形成了紧密结合的光热转换单元,共同构建了一个能够有效捕获光子并将其转化为热量的连续网络,且气凝胶良好的隔热性能确保了热量集中于蒸发界面。

2.6 热导率分析

图9为纯PVAL、PVAL/m-CNT、PVAL/m-PANI以及不同改性复合气凝胶的热导率,清晰地呈现了PANI与CNT复合改性对PVAL基体热传导性能的调控作用。由图可知,纯PVAL气凝胶的本征热导率仅为0.025 W/(m·K),热量传递主要依赖分子振动,难以满足界面蒸发的热输运需求。当引入m-CNT改性后,PVAL/m-CNT气凝胶热导率提升至0.057 W/(m·K),m-CNT的高导热特性初步构建了热传导路径,但单一填料的分散性与界面结合性有限,热导率提升幅度较小;进一步引入m-PANI复合改性后,PVAL/m-PANI气凝胶热导率增至0.029 W/(m·K),PANI的共轭结构与PVAL基体形成强界面作用,减少了声子散射带来的热阻^[31]。

PVAL基复合气凝胶的热导率呈现显著提升趋势:PC₁P₁、PC₃P₁、PC₅P₁、PC₇P₁与PC₉P₁的热导率分别达到0.036、0.042、0.065、0.089和0.102 W/(m·K),其中PC₉P₁体系热导率较纯PVAL气凝胶提升约

308%。这主要归因于:一方面,m-CNT与m-PANI的复合填料通过界面重构在PVAL基体中形成了连续的导热通路,加速了声子的快速传导;另一方面,m-PANI与PVAL基体在溶液混合作用下形成强烈的氢键作用,有效降低了填料-基体间的界面热阻,减少了界面缺陷引发的热损耗。

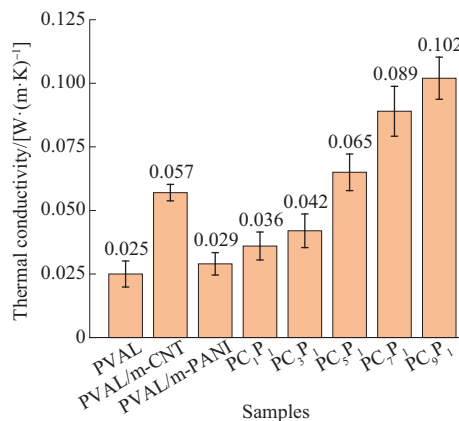


图9 纯PVAL及其复合气凝胶的热导率

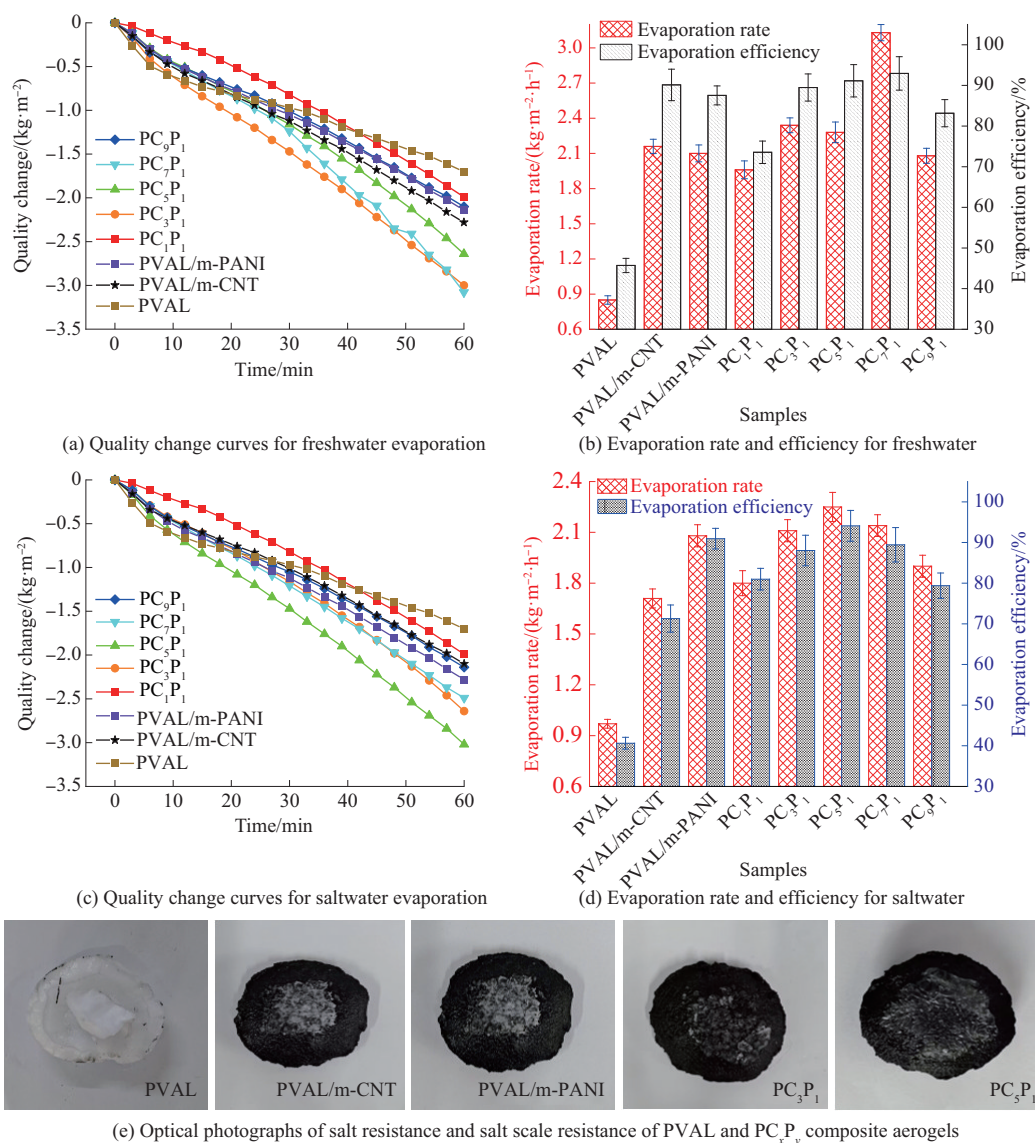
Fig. 9 Thermal conductivity of pure PVAL and its composite aerogels

总之,m-CNT与m-PANI复合改性明显提升了PVAL气凝胶的热导率,解决了纯PVAL气凝胶低热导率导致的界面蒸发热量传递不足问题,为后续优化气凝胶的光热-热输运-蒸发耦合效率、提升界面蒸发性能奠定了材料基础。

2.7 界面蒸发性能分析

图10展示了不同气凝胶在淡水和盐水中的蒸发性能。在所有样品中,纯PVAL气凝胶的蒸发性能最差。复合气凝胶的蒸发性能均得到极大提升,这得益于其优异的光热性能和优化的多孔结构。在淡水蒸发中(图10a和图10b),PC₇P₁复合气凝胶表现最佳,其淡水蒸发速率达到3.13 kg/(m²·h),是纯PVAL气凝胶的3.1倍,蒸发效率达到92.96%。PVAL/m-CNT [淡水蒸发速率2.16 kg/(m²·h)、蒸发效率90.13%]和PVAL/m-PANI [淡水蒸发速率2.10 kg/(m²·h)、蒸发效率87.55%]气凝胶也表现出色,这与其规整的取向孔道和高效的光热转换性能直接相关。此外,PC₉P₁的淡水蒸发速率2.20 kg/(m²·h)略低于PC₃P₁ [2.28 kg/(m²·h)]和PC₇P₁的,这归因于淡水蒸发速率受到孔隙结构与光热转化能力的双重影响。

在盐水蒸发中(图10c和图10d),PC₅P₁复合气凝胶的性能最为突出,蒸发速率和效率分别达到2.25 kg/(m²·h)和94.11%,而PC₉P₁复合气凝胶的盐

图10 PVAL及 PC_xP_y 复合气凝胶的淡水/盐水蒸发性能曲线图与耐盐性能Fig. 10 Freshwater/saltwater evaporation and salt resistance performances of PVAL and PC_xP_y composite aerogels

水蒸发速率和效率也能保持较高水平,分别达到 $2.14 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 89.44% 。这些结果表明,蒸发性能的提升源于三方面的协同作用:(1) m-PANI 和 m-CNT 复合光热网络实现了高效的太阳能-热能转换;(2)经过亲水改性的表面和相互连通的孔道确保了水分的快速、持续供应;(3)气凝胶固有的低热导特性将热量限制在蒸发界面,减少了热损失。在盐水蒸发中, Na^+ 和 Cl^- 易在蒸发传输的表界面结晶,阻塞孔道。 PC_5P_1 气凝胶可能具备更优的孔道连通性和亲水性,能更有效地将结晶的盐分溶解并随水分子扩散回溶液中,从而维持了相对稳定的蒸发速率。而过量 CNT 导致的孔隙率下降和潜在堵塞(如 PC_9P_1),则会削弱其抗盐垢性能。如图 10d 所示,

PVAL 气凝胶在 20% 盐水中蒸发 1 h 后,其亲水层堆积了大量的盐结晶,且表面有塌陷,而 PC_5P_1 复合气凝胶亲水层仅有较少的盐结晶,且外观保持完好。

进一步表明, PC_5P_1 气凝胶在盐水中的优异表现可能与其优化的孔道连通性和亲水性相关:多级孔结构可提供充足的盐离子扩散通道,使结晶的盐分能及时溶解并随水分子扩散回溶液中;而 PC_9P_1 中过量 CNT 导致的孔道堵塞和亲水性下降,则可能削弱其抗盐垢性能。类似的多孔结构对盐结晶的抑制机制在文献中已有报道^[13,16],例如,具有垂直取向孔道的气凝胶能够通过快速水分传输实现与下方水体的盐离子交换,从而有效抑制表面盐结晶的积累。因此, PC_5P_1 的抗盐性优势主要源于其更优的孔

道结构和亲水特性,能更有效地将结晶的盐分溶解并随水分子扩散回溶液中,从而维持了相对稳定的蒸发速率。而过量CNT导致的孔隙率下降和潜在堵塞(如PC₉P₁),则可能会削弱其抗盐垢性能。

3 结论

(1) SEM与FTIR分析证实,改性后的PANI与CNT在PVAL基体中成功复合,构筑了具有规整三维多孔结构的复合气凝胶。

(2)吸水比测试表明,不同配比复合改性后,气凝胶的吸水比(3.12~7.32)均显著低于纯PVAL气凝胶(8.51),其中PC₉P₁样品的吸水比最高(7.32)。

(3)热导率测试表明,复合改性明显提升了气凝胶的热传导性能,其中PC₉P₁气凝胶的热导率可达0.102 W/(m·K),较纯PVAL提升约308%。

(4)红外热成像分析表明,复合气凝胶具有优异的光热转换性能,m-PANI与m-CNT的协同作用显著提升了其表面温度,PC₉P₁气凝胶表面最高温度达101.0℃。

(5)界面蒸发测试发现,复合气凝胶在淡水和盐水中均表现出高效、稳定蒸发能力。PC₉P₁气凝胶的淡水蒸发速率和效率分别达3.13 kg/(m²·h)和92.96%,盐水蒸发速率和效率分别达2.14 kg/(m²·h)和89.44%。

参考文献

- [1] YANG R, LI X K, XIE W, et al. Exceeding the theoretical limit of interfacial evaporation efficiency by using the carbon-based aerogel evaporator with cold evaporation surface[J]. *Desalination*, 2024, 592. DOI:10.1016/j.desal.2024.118165.
- [2] SAJJAD M, ABDELSALAM M A, RAZA A, et al. Capillary pumping-evaporation modeling and experimental characterization of saline water transport for passive solar desalination[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 223. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125172.
- [3] MAO W, LI L C, ZHOU B, et al. Beyond material selection: The critical role of thermal conductivity in 3D solar-driven interfacial evaporators for desalination[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 53(8). DOI:10.1016/j.seppur.2025.133524.
- [4] ZHAO Y L, TENG J Z, WANG Z X, et al. Solar interfacial evaporators: from regulatory mechanisms to emerging applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 230. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116670.
- [5] 吴城皓,俞旭宇,何昕圆,等.多级太阳能界面蒸发系统的研究进展[J/OL]. *化工进展*, 2026, 1-15. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1383>.
- [6] WU Chenghao, YU Xuyu, HE Xinyuan, et al. Research progress on multi-stage solar interfacial evaporation systems[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2026, 1-15. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1383>.
- [7] 宋秀萍,闫彪彪,翟志腾,等.多重交联网络MXene/纳米纤维素气凝胶与双驱动加热应用[J/OL]. *高分子材料科学与工程*, 2025, 41(10):48-57.
- [8] SONG Xiuping, YAN Biaobiao, ZHAI Zhiteng, et al. MXene/nanocellulose aerogel with multiple crosslinked networks and dual-drive heating applications[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2025, 41(10):48-57.
- [9] LIANG Y, WU S Q, ZHAO Y J, et al. High-performance fiber-based aerogel evaporator for solar desalination and wastewater purification[J]. *Desalination*, 2026, 622. DOI: 10.1016/j.desal. 2025. 119756.
- [10] JING Y J, WANG J, SUN H X, et al. Sulfonic acid-functionalized conjugated microporous polymer aerogels for solar-driven interfacial evaporation and selective metal ion removal[J]. *Separation and Purification Technology*, 2026, 382. DOI: 10.1016/j.seppur. 2025. 136103.
- [11] PU Y P, JIN N, WANG Y Y, et al. Structurally integrated lignin-derived biochar/CuFeO₂ aerogel for salt-resistant solar-driven interfacial evaporation and wastewater purification[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2026, 14(1). DOI: 10.1016/j.jece.2025.120695.
- [12] LI J H, ZHANG Y, LIU Q H, et al. Oil-Resistant and wood-inspired superhydrophilic poly(vinyl alcohol) aerogel with vertically aligned channels for effective solar interfacial desalination and wastewater treatment[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2025, 17(11):17 636-17 650.
- [13] 李萌,王甜,侯宪广,等.聚乙烯醇/海藻酸钠复合气凝胶的制备及其高效海水淡化应用[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(10):5 726-5 735.
- [14] LI Meng, WANG Tian, HOU Xianguang, et al. Preparation of polyvinyl alcohol/sodium alginate composite aerogel and its application in high-efficiency seawater desalination[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(10):5 726-5 735.
- [15] TAVAKOLI M, ZARE F. Electron beam crosslinked PVA/PAM/GO/SA hydrogel for high-efficiency solar desalination: Synergistic design and performance optimization[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2026, 295. DOI:10.1016/j.solmat.2025.113980.
- [16] HU Z S, WANG D Y, LI C Y, et al. Open porous aerogels with a hybrid hydrophobic-hydrophilic framework for highly efficient solar steam generation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2026, 387. DOI:10.1016/j.seppur.2025.136688.

(下转第57页)