

新型聚合水凝胶太阳能蒸发材料构建与 同步脱盐截酚研究

陈颖, 邓时海, 韩杰, 金鹏康

(西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对含酚废水深度脱盐与酚类有机物高效回收的双重需求问题, 基于太阳能界面蒸发水、盐及有机质的传输机理, 研发了聚(丙烯酰胺-海藻糖)/炭黑(PAT/CB)水凝胶材料。通过分子设计和结构优化, 同步强化 PAT/CB 水凝胶的光热蒸发与酚污染物截留能力, 在脱盐过程中降低冷凝水中的酚含量, 选择富集酚类物质为后续回收酚提供高浓度原料, 从而实现了高盐含酚废水的同步脱盐与酚拦截。研究结果表明: 通过调控海藻糖(Tre)比例和单体含量可优化水凝胶溶胀性能, 炭黑赋予材料 97% 的宽谱光吸收率和 14.9 °C 的热限域特性, 协同 Tre 的水合作用实现了 77% 的光热转换效率和 1.68 kg/(m² · h) 的蒸发速率, 在 NaCl 质量分数为 3.5%~10.5% 的高盐环境中具有稳定的蒸发性能; 差示扫描量热法与拉曼光谱分析结果证实, Tre 能够提升中间水比例至 26%, 显著降低蒸发焓至 1895 J/g, 从分子层面揭示了蒸发机制, 同步实现了大于 99% 的盐离子拦截和 73% 的苯酚截留效率。该研究可为太阳能界面蒸发技术在高盐含酚废水处理中的应用提供理论依据与技术支持。

关键词: 太阳能界面蒸发; 水凝胶; 酚类有机物; 脱盐; 丙烯酰胺

中图分类号: X131.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202602011 **文章编号:** 0253-987X(2026)02-0113-12

Construction of a Novel Polymeric Hydrogel Solar Evaporation Material and Study on Simultaneous Desalination and Phenol Interception

CHEN Ying, DENG Shihai, HAN Jie, JIN Pengkang

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the dual requirements of deep desalination and efficient recovery of phenolic organics from phenol-containing wastewater, a poly (acrylamide-trehalose)/carbon black (PAT/CB) hydrogel material was developed based on the transport mechanisms of water, salts, and organic matter in solar interfacial evaporation. Through molecular design and structural optimization, both the photothermal evaporation performance and phenol pollutant interception capability of the PAT/CB hydrogel were simultaneously enhanced. During the desalination process, the phenol content in the condensate water was reduced, while phenolic compounds were selectively enriched, providing high-concentration raw material for subsequent phenol recovery, thereby achieving simultaneous desalination and phenol interception in high-salinity phenol-containing

收稿日期: 2025-05-31。 作者简介: 陈颖(1999—), 女, 博士生; 邓时海(通信作者), 男, 研究员, 博士生导师。 基金项目: 西安交通大学青年拔尖人才支持计划资助项目(HJ6J008); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-QN-0477)。

网络出版时间: 2025-08-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250825.1101.002>

wastewater. The results show that the swelling properties of the hydrogel can be optimized by adjusting the trehalose (Tre) ratio and monomer content. Carbon black imparts a broadband light absorption rate of 97% and a thermal localization characteristic of 14.9 °C to the material. Combined with the hydration effect of Tre, a photothermal conversion efficiency of 77% and an evaporation rate of 1.68 kg/(m² · h) were achieved, with stable evaporation performance maintained in high-salinity environments containing 3.5% to 10.5% NaCl. Differential scanning calorimetry and Raman spectroscopy analyses indicate that Tre increases the proportion of intermediate water to 26%, significantly reducing the evaporation enthalpy to 1 895 J/g, thus revealing the evaporation mechanism at the molecular level. Simultaneous interception efficiencies of over 99% for salt ions and 73% for phenol were achieved. This study provides a theoretical basis and technical support for the application of solar interfacial evaporation technology in the treatment of high-salinity phenol-containing wastewater.

Keywords: solar interfacial evaporation; hydrogel; phenolic organic compounds; desalination; acrylamide

水作为生命的基本物质,是人类生存和经济发展的基本资源之一。随着人口增长、工业发展和气候变化,淡水资源的需求逐渐增加,提供充足和安全的淡水资源已成为巨大挑战^[1]。面对日益严峻的淡水资源危机,海水淡化技术逐渐成为重要解决方案之一。然而,传统的淡水技术,如膜蒸馏、反渗透、多效闪蒸,不但需要配置精密且造价高昂的处理装置,而且在运行过程中还会持续消耗大量不可再生能源^[2],这种双重制约因素严重影响了技术的经济性和可持续性。

太阳能是一种可再生的清洁能源,在实际生活中应用非常丰富,例如太阳能发电、海水淡化、光催化和其他领域^[3]。太阳能驱动的净化水生产系统是解决水资源不足的一个好方法,在海水淡化和清洁水生产过程中具有应用前景,特别是在阳光充足的偏远地区。因此,研发太阳能蒸发系统为海水淡化领域开辟了可持续的发展路径,为经济落后地区提供了巨大的发展潜力。基于太阳能的脱盐技术可从含盐水体(包括海水、高盐度地下水及工业废水等)中分离出纯净水,为解决全球水资源短缺问题提供了创新性方案^[4]。

太阳能蒸发材料的选取主要基于其输水能力与导热性能,其中碳基材料、凝胶材料和陶瓷材料凭借多孔结构、良好亲水性和低导热性成为理想选择^[5]。碳基材料具有成本低、稳定性高的优势,多孔特性和大比表面积使其在重金属废水处理中表现优异,但存在海水环境中易腐蚀的缺点^[6]。凝胶材料凭借独特的多孔结构和低导热性成为优质的热-水传输介质,多孔结构、大比表面积和亲水性羟基使其能处理

多种复杂废水,包括印染废水、有机污染物废水和含油废水^[7]。陶瓷材料则展现出卓越的环境适应性,耐高温、抗氧化、耐酸碱腐蚀等特性使其适用于极端环境,如沙漠地区的高温脱盐和工业热处理领域^[8]。除了单独的某一材料外,复合材料具有多功能特性,可根据实际应用环境进行定制。

随着工业化的快速发展,高盐含酚废水的大规模排放已成为制约环境可持续发展的严峻挑战,其主要来源于焦化、煤气、炼油和以苯酚或酚醛为原料的化工、制药等生产过程^[9]。此类废水不仅盐度极高,还含有高浓度酚类污染物(如苯酚、甲酚等),兼具强腐蚀性、生物毒性与挥发性。传统处理技术如多效蒸发、膜分离或生物降解等具有操作范围广、再生简单等特点,但同时存在能耗高、二次污染风险大、酚类难彻底去除等问题^[10]。

目前,太阳能蒸发技术的研究多聚焦于提升蒸发效率,对高盐含酚废水的处理关注较少。对于含酚废水,由于沸点接近水的酚类污染物会随水蒸发污染蒸馏水,因此蒸发时确保蒸馏水的质量符合世界卫生组织标准至关重要^[11]。当前,应用太阳能蒸发技术处理含酚废水时,主要采用吸附、光催化、光-芬顿反应、活化过硫酸盐反应等方法^[12],通过物理吸附、化学氧化等反应对有机物进行去除,以减少进入淡水的酚类污染物,避免了酚在蒸发过程中的二次污染。酚类物质作为一种高附加值化学品,其高效回收是实现资源化循环的关键,但以上方法均不适用于含酚废水处理中酚类有机物的回收。

本文旨在开发一种新型水凝胶太阳能蒸发材料,通过水凝胶分子设计同步强化光热蒸发与酚污

染物截留能力,降低脱盐过程中冷凝水中的酚浓度,选择富集酚类物质为后续回收酚提供高浓度原料,以实现高盐含酚废水的同步脱盐与酚拦截,并揭示其科学机制,为工业含酚废水资源化处理提供理论支撑。

1 实验方法

1.1 聚合水凝胶材料的制备

(1) 聚(丙烯酰胺-海藻糖)(PAT)水凝胶的制备。将丙烯酰胺单体(AAm)与海藻糖(Tre)通过超声辅助溶解形成均相溶液,依次加入交联剂 N、N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBAA)和自由基引发剂过硫酸铵(APS),保持体系温度为 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,在氮气保护下磁力搅拌 20 min 形成透明预聚液。将预聚液注入带有石英盖子的培养皿模具,置于功率为 200 W、波长为 365 nm 的紫外灯下辐射 2 h 以完成聚合。最后,将水凝胶置于纯水中溶胀平衡,得到具有三维网络结构的 PAT 水凝胶。

(2) 聚(丙烯酰胺-海藻糖)/炭黑(PAT/CB)水凝胶的制备。以 PAT 水凝胶制备为基础,添加炭黑(CB)构建 PAT/CB 高性能光热蒸发体系。CB 的添加能够增强 PAT 的光热转换性能,PAT/CB 水凝胶兼具 Tre 的保湿性能与 CB 的光热转化特性,适用于太阳能界面蒸发应用。

(3) 制备过程的关键控制参数。采用氮气氛围合成水凝胶,以抑制氧阻聚,保障自由基聚合效率。预聚液经 30~60 min 超声处理消除微气泡,避免凝胶结构缺陷。溶胀平衡阶段,通过动态换水(每 24 h 更换超纯水)彻底去除未反应单体和杂质,利用 APS 在紫外光下的快速分解特性实现高效成型。CB 经聚乙烯醇分散剂实现纳米级均匀负载,以赋予材料波长为 300~2 500 nm 的宽光谱高吸收性能,用于后续光热蒸发实验。

1.2 太阳能界面蒸发系统

如图 1 所示,太阳能界面蒸发装置的核心组件包括氙灯太阳光模拟器、数据采集系统和蒸发主体。光热转换单元采用配备 AM 1.5G 滤光片的 CELHXF300 型氙灯光源系统模拟太阳光源,通过 CELNP200010 型全光谱光功率计校准光照强度至 1 kW/m^2 (标准太阳辐照度)。蒸发主体采用直径为 5.5 cm、高度为 6.0 cm 的玻璃反应器,蒸发器底部采用聚苯乙烯泡沫作为隔热支撑体,其厚度为 0.5 cm,导热系数为 $0.033\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,外壁包裹反射率大于 95% 的铝箔以减少热辐射损失,确保热量集中于蒸发界面。采用高精度的数据传输电子天平实时监测蒸发过程

中的质量变化,采用多维数据采集系统每 60 s 自动记录数据,采用红外热像仪同步采集蒸发器表面的温度场分布,其红外分辨率为 640×480 像素。

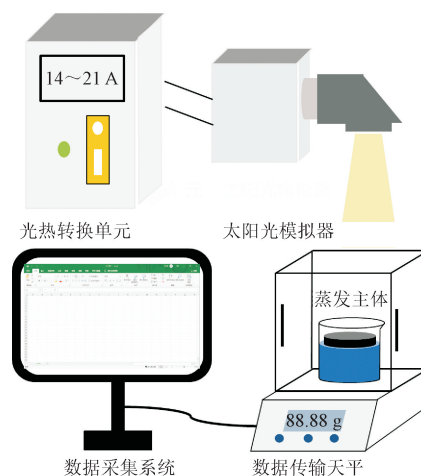


图 1 太阳能界面蒸发装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of solar interface evaporation device

1.3 太阳能界面蒸发实验研究

记录未纯化水凝胶的初始质量 m_0 ,将其置于去离子水中溶胀,等待一定时间 t 后取出拭干后称其质量为 $m(t)$,重复上述过程直到达到溶胀平衡质量 m_s ,随后冷冻干燥测定其质量为 m_d 。吸水率 $W_A(t)$ 和溶胀比 S_R 的计算式如下

$$W_A(t) = \frac{m(t) - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_R = \frac{m_s - m_d}{m_d} \quad (2)$$

蒸发实验旨在评估水凝胶的光热转换与蒸发性能,测试前将水凝胶充分溶胀至孔隙饱和,置于 NaCl 质量分数为 3.5% 的 100 mL 溶液中,开启氙灯光源并校准光照强度至 1 kW/m^2 ,暗态平衡 30 min 消除初始热扰动后,进行 1 h 连续蒸发测试。

设计了典型污染物处理实验,配制 NaCl 质量分数为 3.5% (模拟海水淡化) 和质量浓度为 25 mg/L 的苯酚 (代表工业难降解有机废水) 混合溶液作为处理对象,增设冷凝水收集装置以形成密闭蒸馏体系,采用全量收集法连续 8 h 蒸发。污染物去除效果通过以下方法分析:采用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-OES)测定 Na^+ 的质量浓度,检测下限为 0.01 mg/L;在 270 nm 波长下,采用紫外-可见分光光度计测定苯酚的质量浓度,标准曲线线性范围为 0.1~100.0 mg/L (相关系数 $R^2 > 0.9998$)。

2 结果与讨论

2.1 PAT/CB 材料的聚合机理

采用多尺度表征技术对 PAT/CB 水凝胶进行系统解析:通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)揭示共聚物中酰胺基团与 Tre 羟基的特征振动峰;借助扫描电子显微镜(SEM)阐明 Tre 诱导的微孔结构梯度分布和表面拓扑形貌演变规律;结合接触角测量仪定量分析材料表面润湿特性。

如图 2 所示,聚丙烯酰胺(PA)水凝胶在 $3\,346\text{ cm}^{-1}$ 处呈现 —NH_2 基团的不对称伸缩振动峰,在 $1\,645\text{ cm}^{-1}$ 处呈现酰胺 I 带 C=O 伸缩振动,在 $1\,450\text{ cm}^{-1}$ 处对应 C—N 键的弯曲振动。文献[13]指出,Tre 的特征峰呈现 $3\,400\sim 3\,200\text{ cm}^{-1}$ 的宽峰(—OH 伸缩振动)和 $1\,075\text{ cm}^{-1}$ 处的吡喃环 C—O—C 振动。而在图 2 的 PAT 水凝胶 FTIR 谱中, —OH 峰位移至 $3\,280\text{ cm}^{-1}$,且 C=O 伸缩振动峰宽增加,表明 Tre 羟基与 AAm 酰胺基(—CONH_2)形成了强氢键网络。此外, $1\,075\text{ cm}^{-1}$ 处 C—O—C 峰强度的减弱表明,Tre 糖环通过共价交联而非物理共混嵌入聚合物主链。

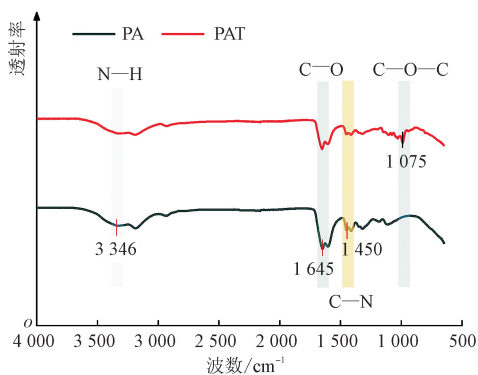
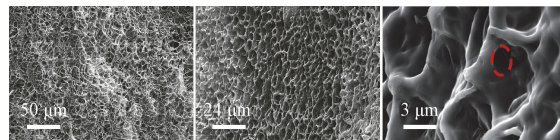


图 2 PAT 水凝胶的 FTIR 谱

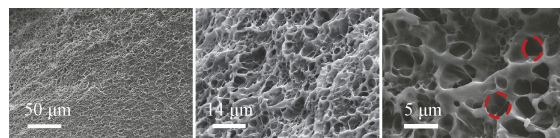
Fig. 2 FTIR spectrum of PAT hydrogel

图 3 给出了不同 Tre 质量分数下 PAT 水凝胶的 SEM 微观形貌。由图可见,Tre 的引入显著改变了水凝胶的孔结构特征。如图 3(a)所示,纯 PA 水凝胶具有丰富的孔结构但不规则,平均孔径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。引入 Tre 后,水凝胶的孔结构发生变化。如图 3(b)所示,当 Tre 质量分数为 20% 时,PAT 水凝胶的孔径增大至 $5\text{ }\mu\text{m}$,且孔道呈现定向排列特征。图 3(c)结果显示,当 Tre 质量分数增至 40% 时,孔径增大至 $10\text{ }\mu\text{m}$,并出现纳米级褶皱结构。这种结构变化是由于 Tre 的羟基与 AAm 链的氢键作用抑

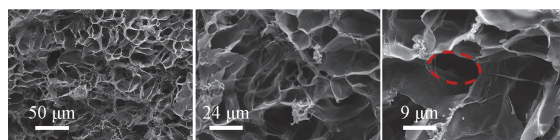
制了相分离,使得孔分布更加均匀。此外,Tre 作为刚性组分增加了网络刚度,限制冰晶生长导致孔扩张,这种分级多孔特性有利于毛细管力驱动的水分传输与储存^[14]。



(a) Tre 质量分数为 0



(b) Tre 质量分数为 20%

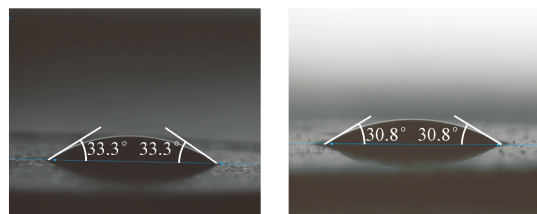


(c) Tre 质量分数为 40%

图 3 PAT 水凝胶的 SEM 微观形貌

Fig. 3 SEM micro-morphology of PAT hydrogel

图 4 的接触角分析结果表明,Tre 的引入增强了水凝胶体系的亲水特性。由图可见,PA 水凝胶因表面酰胺基团(—CONH_2)的亲水作用,呈现 $(33.3\pm 1.2)^\circ$ 的接触角;而 PAT 水凝胶的平均接触角降低至 $(30.8\pm 0.7)^\circ$,展示出更为优异的界面润湿能力。这种亲水特性源于 Tre 分子中 8 个羟基能够通过界面水合作用形成致密水分子层,降低了固液界面能,且 Tre 与 AAm 的氢键网络增强了表面极性基团密度^[15]。



(a) PA

(b) PAT

图 4 不同水凝胶接触角测试结果的对比

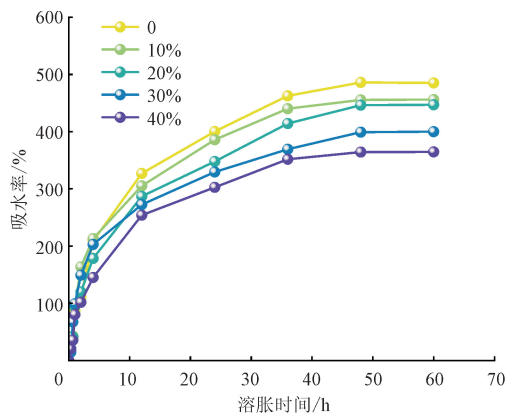
Fig. 4 Comparison of contact angle test results for different hydrogels

2.2 合成条件对 PAT/CB 材料性能的影响

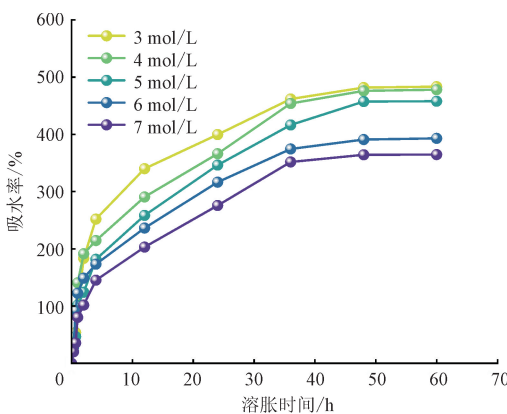
2.2.1 对溶胀性能的影响

采用式(1)计算不同 Tre 质量分数和 AAm 浓

度下的吸水率,得到的结果如图5所示。对PAT/CB的溶胀过程进行分阶段解析:在0~4 h,水凝胶处于初始快速吸水阶段,符合Fickian扩散机制,吸水率由70.51%显著降低至36.31%;在4~36 h的后续扩散控制阶段,水凝胶显示出非Fickian特征,表明聚合物链松弛过程成为溶胀速率的主要控制因素^[16]。



(a) 不同 Tre 质量分数



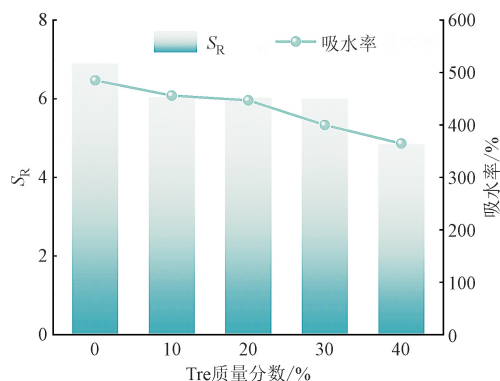
(b) 不同 AAm 浓度

图5 PAT/CB水凝胶吸水率随溶胀时间的变化

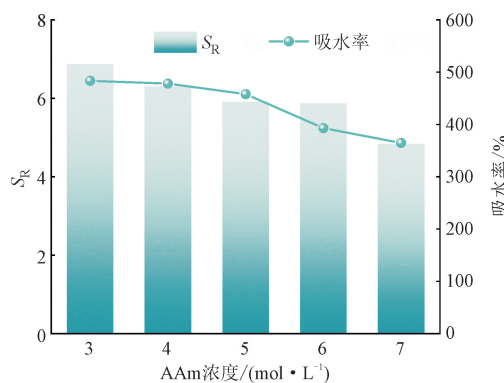
Fig. 5 Change of water absorption rate of PAT/CB hydrogel with swelling time

采用式(2)计算不同Tre质量分数和AAm浓度下的溶胀比 S_R ,得到的结果如图6所示。由图6(a)可见,随着Tre质量分数从0增至40%,水凝胶吸水率从485%下降至364%,对应的 S_R 从6.87降至4.84。当Tre质量分数从20%增加至40%时,吸水率从447%降至364%,对应的 S_R 降低了1.19,影响更显著。这归因于Tre分子中环状四醇结构的立体位阻效应和氢键交联密度的协同增强。由图6(b)可见,AAm浓度不同对水凝胶的吸水率也有显著影响。随着AAm浓度从3 mol/L增加至7 mol/L,水凝胶的吸水率从483%降低至364%, S_R 从6.87降至4.84。由此可知,PAT水凝胶中Tre质量分数越高、AAm

浓度越高,水凝胶的溶胀性能越差。这是因为高Tre质量分数下氢键网络与刚性氢键的协同效应占据了主导地位。



(a) 不同 Tre 质量分数



(b) 不同 AAm 浓度

图6 PAT/CB水凝胶的溶胀比

Fig. 6 Swelling ratio of PAT/CB hydrogel

2.2.2 对水状态的影响

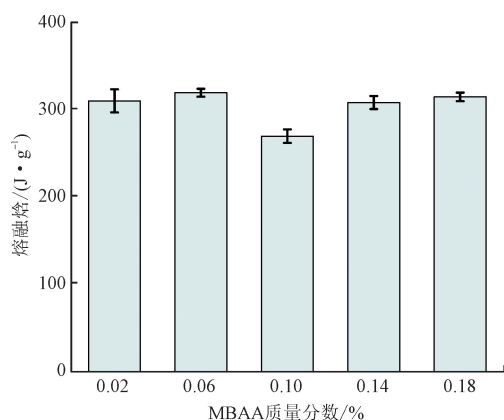
水凝胶中的水分为可冻结水和不可冻结水,其中不可冻结水与聚合物通过强氢键结合,抑制水的蒸发^[17]。通过差示扫描量热法(DSC)评估水凝胶中可冻结水和不可冻结水的含量,对溶胀平衡样品以5℃/min速率进行-40~40℃温度扫描。图7给出了评估结果。

(1)交联剂投加量的影响。如图7(a)所示,当MBAA质量分数从0.02%增加至0.18%时,水凝胶的熔融焓呈现先降后升的非单调趋势。在MBAA质量分数为0.10%时,熔融焓达到最小,为16.25 J/g,对应不可冻结水质量占比最高。此现象可归因于适度交联形成的均质网络能够通过氢键有效束缚水分子,而过高交联密度导致网络刚性增强,限制了聚合物链段的动态运动,反而使得部分结合

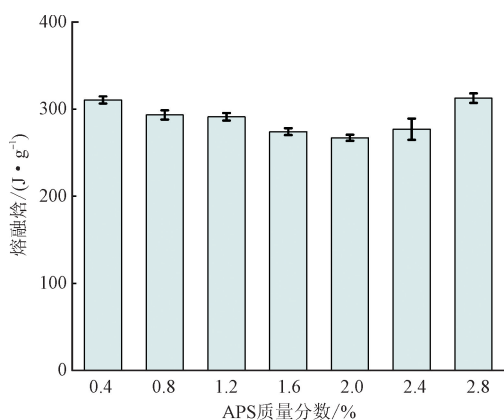
水被挤出至孔隙中形成可冻结相。

(2)引发剂 APS 投加量的影响。APS 含量决定了自由基生成速率,进而影响到聚合反应程度。如图 7(b)所示,在 APS 质量分数从 0.4% 增加至 2.8% 的过程中,熔融焓在 APS 质量分数为 2.0% 时出现拐点。这主要是因为低 APS 含量导致引发效率不足,单体转化率较低,未反应单体残留在网络中形成缺陷;而过高含量则会引发暴聚反应,形成局部致密区与松散区交替的非均质结构,二者均削弱不可冻结水的稳定性。

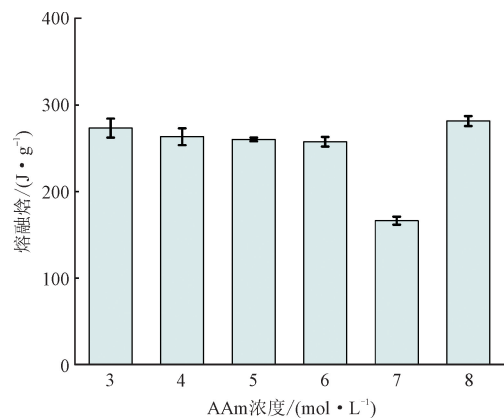
(3)不同 AAm 浓度与 Tre 质量分数的协同效应。如图 7(c)所示,熔融焓随 AAm 浓度的增加呈先下降后上升趋势,在 7 mol/L 时取得最小值 14.2 J/g,此时网络内亲水基团($-\text{CONH}_2$ 、 $-\text{OH}$)的空间分布密度达到最优。若此时 AAm 浓度进一步增加,将导致交联点过载,网络收缩迫使部分结合水脱离束缚。值得注意的是,添加 Tre 强化了不可冻结水的稳定性,如图 7(d)所示,与未添加 Tre 材料相比, PAT/CB 凝胶的熔融焓降低,表明聚合物网络中的可冻结水含量减少。



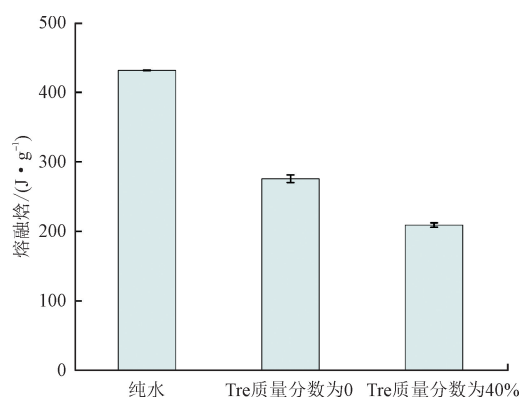
(a)不同 MBAA 投加量



(b)不同 APS 投加量



(c)不同 AAm 浓度



(d)不同 Tre 质量分数

图 7 不同工况下 PAT/CB 水凝胶的熔融焓对比

Fig. 7 Comparison of melting enthalpy of PAT/CB hydrogel under different conditions

2.3 PAT/CB 材料的同步脱盐截酚性能研究

2.3.1 光热转换性能

采用 UV-Vis-NIR 光谱测试 PAT/CB 水凝胶的光吸收性能,如图 8 所示。

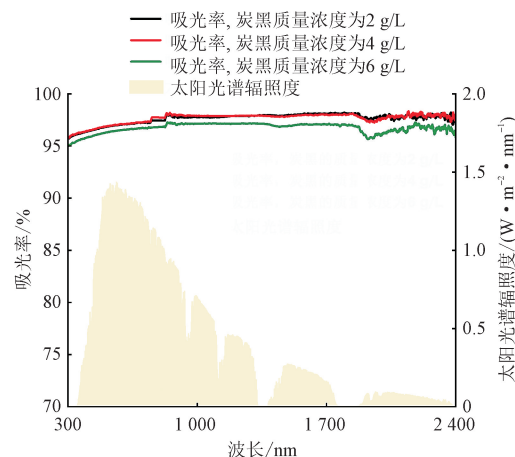


图 8 PAT/CB 水凝胶的吸光性能

Fig. 8 Light absorption of PAT/CB hydrogel

由图 8 可见,当 CB 质量浓度分别为 2、4、6 g/L 时,水凝胶在太阳光谱范围内的平均吸光率分别达到 95%、97% 和 96%。这是因为 Tre 的多羟基结构通过氢键网络促进了 CB 纳米颗粒的均匀分散,同时其螺旋构象增强了光散射路径^[18],最终实现对波长为 200~2 400 nm 宽光谱 97% 的高效吸收。

在太阳能蒸发实验中,采用红外热像仪实时监测蒸发材料表面温度场演变。图 9 所示的温度-时间曲线揭示了 Tre 分子对蒸发材料光热响应性能的显著优化作用。由图可见,在光照强度为 1 kW/m² 的模拟太阳辐照下,当 Tre 质量分数为 40% 时, PAT/CB 水凝胶表面温度在初始 5 min 内的平均升温速率为 1.5 °C/min,较未添加 Tre 的对照组显著提升了约 114%;持续辐照 60 min 后,蒸发器表面达到稳态温度,与未添加 Tre 对照组的稳态温度 (37.9±0.2) °C 相比, PAT/CB 的稳态温度提升至 (40.0±0.2) °C,表明添加 Tre 分子能够优化材料的光吸收和热传导,大幅增强了光热转换效率。

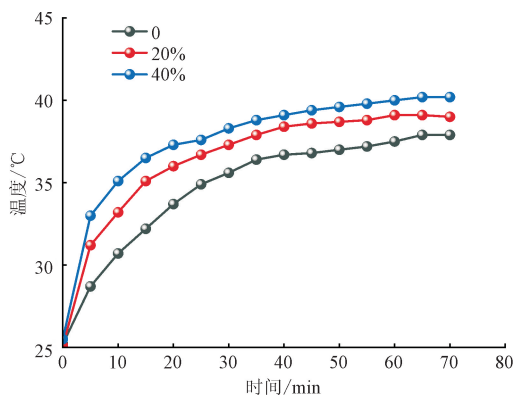


图 9 不同 Tre 质量分数下 PAT/CB 水凝胶表面温度随时间的变化

Fig. 9 Change of surface temperature of PAT/CB hydrogel with time under different Tre mass fraction

图 10 的温度场分布显示,蒸发器中心区域温度较边缘高,具有优异的热限域能力,表明 Tre 的高水合特性抑制了横向热扩散。随着辐照强度梯度增加,蒸发界面温度在 30 min 内呈现规律性上升。在光照强度为 3 kW/m²、持续 2 h 的极端辐照条件下,材料表面未出现炭化,材料表面温度稳定维持在 (58.7±0.8) °C,红外热成像显示热局域化效率达 93%,表明材料具有优异的耐候性。在标准光照强度为 1 kW/m² 时, PAT/CB 水凝胶的光热转换效率达到 77%。

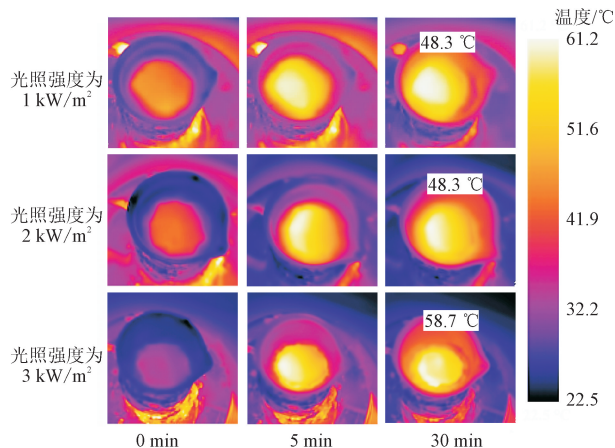
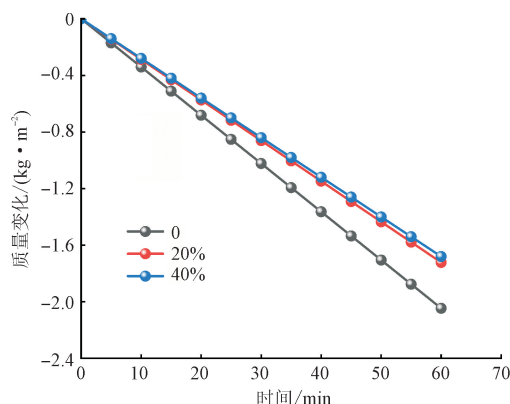


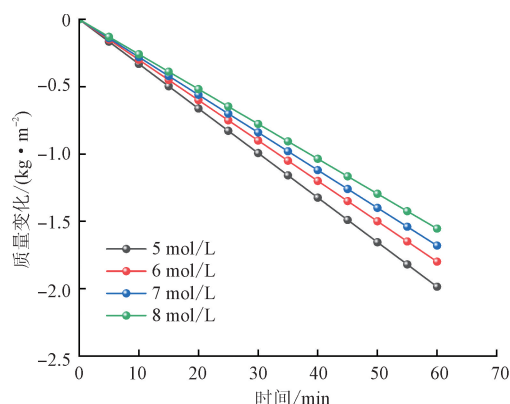
图 10 不同光照强度下 PAT/CB 水凝胶蒸发表面的温度变化
Fig. 10 Temperature changes of evaporation surface of PAT/CB hydrogel under different light intensities

2.3.2 光热蒸发性能

通过正交实验,考察 Tre 质量分数、AAM 浓度、NaCl 质量分数和光照强度等关键参数对蒸发速率的协同影响规律,结果如图 11~图 13 所示,图中直线的斜率表示蒸发速率。



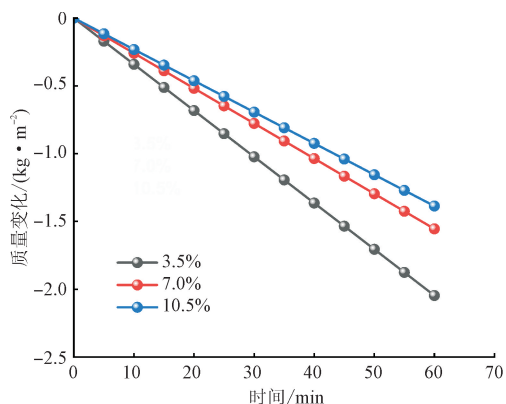
(a) 不同 Tre 质量分数



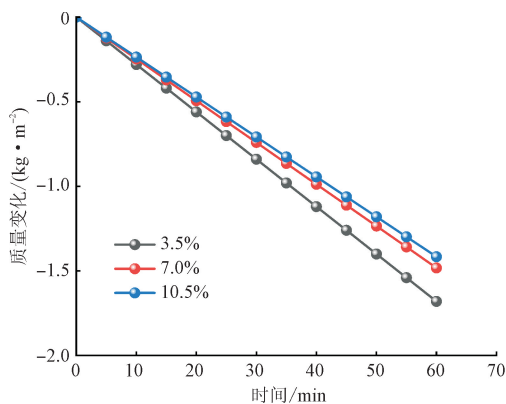
(b) 不同 AAM 浓度

图 11 不同 Tre 质量分数和 AAM 浓度对蒸发速率的影响

Fig. 11 Influence of different Tre mass fractions and AAM concentrations on evaporation rate



(a) Tre 质量分数为 0



(b) Tre 质量分数为 40%

图 12 不同 NaCl 质量分数对蒸发速率的影响

Fig. 12 Influence of different NaCl mass fractions on evaporation rate

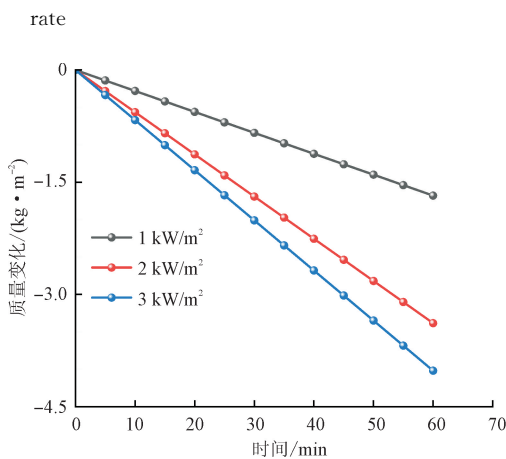


图 13 不同光照强度对蒸发速率的影响

Fig. 13 Influence of different light intensities on evaporation rate

(1) Tre 质量分数与 AAm 浓度的协同调控。由图 11(a)可见,当 Tre 质量分数从 0 增至 40% 时,蒸发速率由 $2.05 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 线性下降至 $1.68 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。这与 Tre 的分子特性密切相关:Tre 分子中 8 个羟基基团与 AAm 的酰胺基形成多重氢键,Tre 的多羟基结构通过氢键增强聚合物链间作

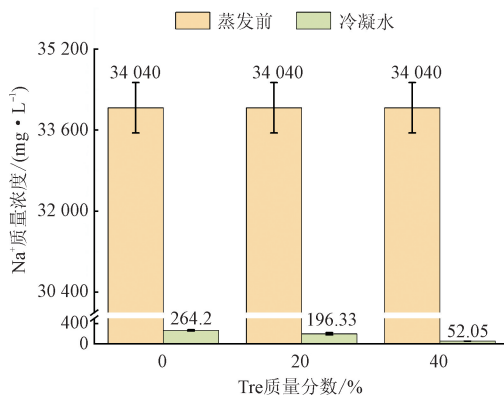
用力,这种氢键间的相互作用显著提升了交联密度(溶胀率由 320% 降至 215%),进而降低了孔道连通性。图 11(b)表明,蒸发速率随浓度的增加呈现衰减,这与凝胶网络密实化密切相关。

(2) NaCl 质量分数对蒸发性能的影响。当 AAm 浓度为 7 mol/L 时,通过不同 NaCl 质量分数下的蒸发测试,揭示了 Tre 对 PAT/CB 水凝胶抗盐性能的显著提升作用。如图 12(a)所示,对于未添加 Tre 的样品,NaCl 质量分数从 3.5% 增至 10.5%,蒸发速率由 $2.05 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降至 $1.39 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,降幅达 32%。由图 12(b)可知,当 Tre 质量分数为 40% 时,蒸发速率的降幅约为 15%,且水凝胶表面无盐结晶。这种抗盐性能的提升归因于 Tre 的羟基与水分子形成的强氢键网络,与未添加 Tre 的水凝胶相比,含 Tre 的水凝胶通过优先吸附自由水分子,降低了盐离子迁移率。与此同时,NaCl 质量分数增大,动态溶胀率变化范围变窄,产生类似“离子泵”效应,将 Na^+/Cl^- 通过孔道挤出,周期性地盐离子排出孔道^[14]。

(3) 光照强度的影响。对 PAT/CB 水凝胶开展宽域光照强度响应实验,得到的结果如图 13 所示。由图可见,当光照强度从 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ 提升至 $3 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时,蒸发速率从 $1.68 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 跃升至 $4.02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。此时,光热转换效率稳定在 89%,显著优于传统界面蒸发材料 70%~80% 的光热转换效率^[19]。

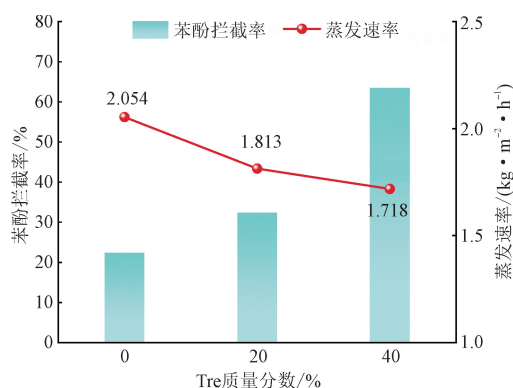
2.3.3 脱盐截酚性能

(1) Na^+ 净化性能。PAT/CB 水凝胶太阳能蒸发材料不仅具备高效光热蒸发能力,还由于独特的多级孔道结构和表面化学特性而具备优异的水净化性能。如图 14 所示,不同 Tre 质量分数下,PAT/CB 水凝胶对 NaCl 质量分数为 3.5% 的溶液中 Na^+ 的截留

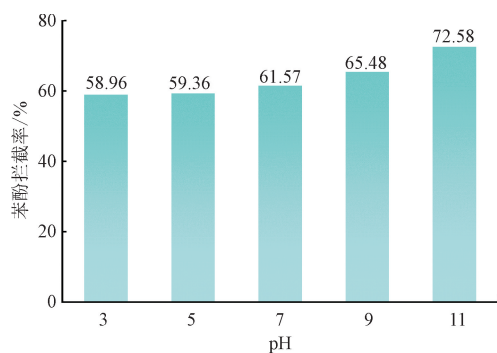
图 14 不同 Tre 质量分数对 Na^+ 净化性能的影响Fig. 14 Influence of different Tre mass fractions on the purification performance of Na^+ ions

率均超过 99%。尤其是当 Tre 质量分数为 40% 时,截留后溶液中的 Na^+ 质量浓度仅为 52.05 mg/L,远低于 200 mg/L 的世界卫生组织 (WHO) 饮用水标准。

(2) 酚类污染物净化性能。含苯酚的溶液直接蒸发,90% 以上的苯酚会进入冷凝水中,造成冷凝水污染^[20]。如图 15(a) 所示, PAT/CB 材料用于含苯酚的盐溶液蒸发时,随着 Tre 质量分数的增加,蒸发速率逐渐减小,对苯酚的拦截效率逐渐上升,在 Tre 质量分数为 40% 时,拦截效率达到 64% 左右。为进一步增加水凝胶太阳能蒸发器对酚类污染物的拦截性能,探究不同 pH 下水凝胶太阳能蒸发器对苯酚的拦截性能,结果如图 15(b) 所示。由图可见,当 pH=11 时,苯酚的拦截效率最高,可达 73%,蒸发速率为 $1.42 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。当 pH=3 时,苯酚的拦截效率下降,仅为 59% 左右。这是由于不同 pH 下,苯酚以分子态或离子态存在^[21],具体的存在形态决定了化合物的挥发性,进而影响其在蒸发过程中的行为。当 pH=11 时,苯酚几乎完全解离为酚盐离子 ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$)^[22],这种离子化状态显著影响了其与水凝胶的相互作用。



(a) 随 Tre 质量分数的变化



(b) 随 pH 的变化

图 15 PAT/CB 水凝胶的苯酚拦截效率

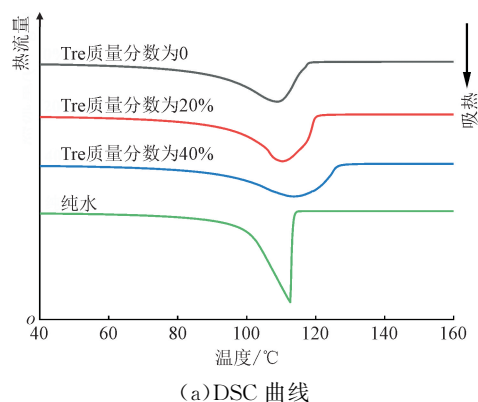
Fig. 15 Phenol interception efficiency of PAT/CB hydrogel

2.4 PAT/CB 材料的蒸发机制及稳定性

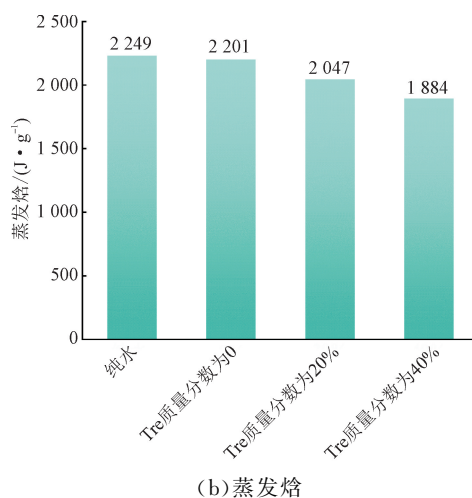
2.4.1 PAT/CB 材料的蒸发机制

水凝胶的独特特征为聚合物和水的相互作用能显著降低水的蒸发焓,因此水凝胶内部水分的存在状态及其热力学特性是解析其光热蒸发性能的关键热力学基础^[7]。

采用 DSC 与拉曼光谱联用技术,揭示中间水 (IW) 与自由水 (FW) 比例对蒸发焓的调控规律以及对光热蒸发性能的增效作用,结果如图 16 所示。图 16(a) 展示了纯水和不同 Tre 质量分数的 PAT/CB 水凝胶在 30~200 °C 的 DSC 曲线特征。由图可见,纯水呈现出典型的单峰吸热特征峰,符合理想相变过程的热力学特征,计算得到此时的蒸发焓为 $(2249 \pm 45) \text{ J/g}$,与标准参考值 2257 J/g 高度吻合^[23],误差小于 2%,验证了实验的可靠性。与纯水相比, PAT/CB 水凝胶的吸热峰显著变宽,峰值温度向低温方向偏移,且相变焓呈下降趋势,表明 PAT/CB 水凝胶中的水更容易被蒸发。图 16(b) 表明,当 Tre 质量分数从 0 增至 40% 时,蒸发焓由 2201 J/g 逐步降至 1884 J/g ,



(a) DSC 曲线



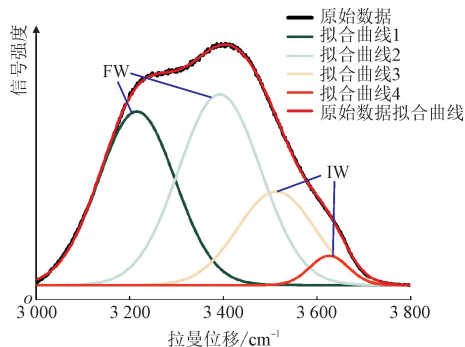
(b) 蒸发焓

图 16 不同 Tre 质量分数下 PAT/CB 水凝胶的 DSC 曲线和蒸发焓

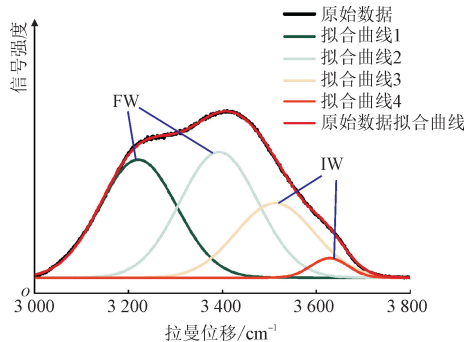
Fig. 16 DSC curve and evaporation enthalpy of PAT/CB hydrogel with different Tre mass fractions

降幅达 14%，均低于纯水的蒸发焓。这是由于，Tre 的刚性双吡喃环通过氢键与 AAm 的酰胺基 ($-\text{CONH}_2$) 形成拓扑交联点，能够对网络结构实行动态调控，提升了 IW 占比，从而降低了蒸发焓^[24]。因此，可通过添加 Tre 来调节蒸发焓，从而改善 PAT/CB 水凝胶太阳能蒸发器的蒸发性能。

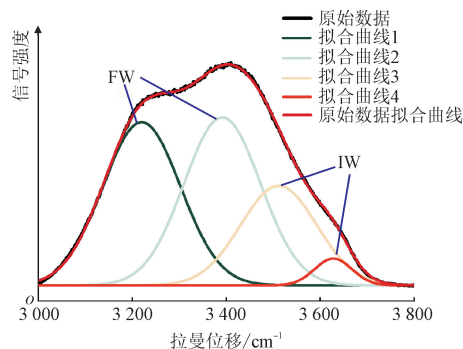
为深入揭示 PAT/CB 水凝胶蒸发焓调控的分子机制，采用拉曼光谱对水凝胶内水分子的氢键网络进行定量解析^[25]。在 $3\,200\sim 3\,400\text{ cm}^{-1}$ 范围内， $3\,220\text{ cm}^{-1}$ 的强氢键与 $3\,392\text{ cm}^{-1}$ 的中等氢键处的特征峰归属于 FW，而 $3\,512\text{ cm}^{-1}$ 的弱氢键与 $3\,627\text{ cm}^{-1}$ 的断裂氢键处的信号则对应 IW^[26]。基于高斯模型对光谱数据进行分峰处理，对 O—H 伸缩振动区 ($3\,000\sim 3\,800\text{ cm}^{-1}$) 进行谱峰分离，有效分析水凝胶中的水分子状态，计算不同 Tre 质量分数 PAT/CB 水凝胶的 IW 与 FW 之比，结果如图 17 所示。对图中数据进行计算可知，未改性水凝胶中 FW 质量分数高达 78%，但 IW 与 FW 的质量分数之比仅为 0.28；加入质量分数为 20% 和 40% 的 Tre 后，IW 质量分数分别小幅提升至 24%、26%，此时 IW 与 FW 的质量分数之比分别达到 0.31、0.35。这种变化源于 Tre 的羟基基团与 AAm 链形成竞争性氢键，削弱了水分子与聚合物主链的结合强度。



(a) Tre 质量分数为 0



(b) Tre 质量分数为 20%

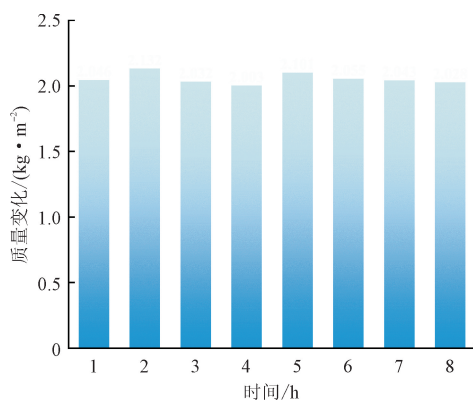


(c) Tre 质量分数为 40%

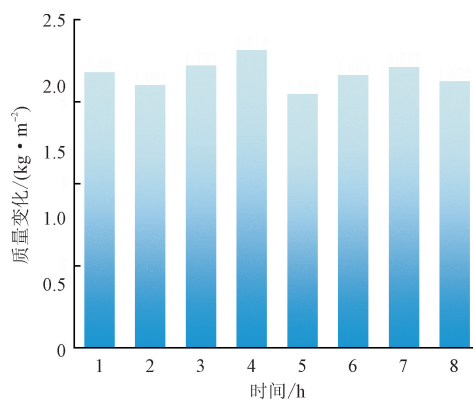
图 17 不同 Tre 质量分数下 PAT/CB 水凝胶的拉曼光谱
Fig. 17 Raman spectra of PAT/CB hydrogel with different Tre mass fractions

2.4.2 PAT/CB 材料的持久性和循环稳定性

材料的长期稳定性是评估其工业化应用价值的核心指标，因此本文通过系统性耐久实验，得到 PAT/CB 蒸发材料在复杂盐度环境下的长效稳定性能，如图 18 所示。



(a) Tre 质量分数为 0

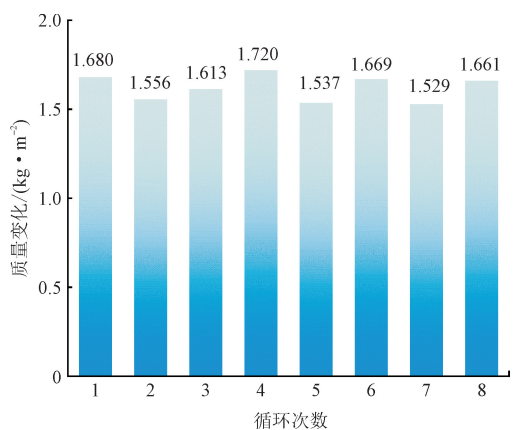


(b) Tre 质量分数为 40%

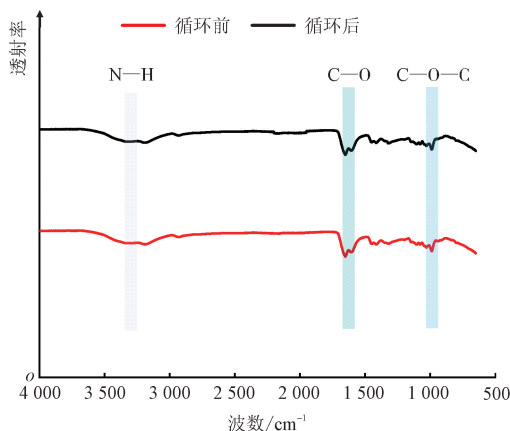
图 18 不同 Tre 质量分数下 PAT/CB 水凝胶的持久性能
Fig. 18 Durability of PAT/CB hydrogel with different Tre mass fractions

由图 18(a)和 18(b)可见,将 NaCl 质量分数为 3.5% 的溶液连续蒸发 8 h,未添加 Tre 的水凝胶蒸发速率稳定在 $(2.06 \pm 0.04) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而 Tre 质量分数为 40% 的水凝胶速率保持在 $(1.67 \pm 0.08) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,两者的波动幅度分别为 2%、5%,均不大于 5%,表明聚合物结构的持久稳定性优于传统聚丙烯酰胺基水凝胶。

为验证蒸发器的循环稳定性,对 Tre 质量分数为 40% 的水凝胶进行为期 14 d 的 8 次循环测试,每次循环包含 2 h 蒸发和 24 h 静置再生。图 19(a)给出了 PAT/CB 水凝胶的质量变化随循环次数的变化规律。计算可得,蒸发速率始终维持在 $(1.621 \pm 0.07) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。图 19(b)给出了 PAT/CB 水凝胶的 FTIR 谱,显示 Tre 的化学结构在长期运行中能够保持稳定,表明 PAT/CB 具有良好的循环稳定性。



(a)不同循环次数



(b)FTIR 谱

图 19 PAT/CB 水凝胶的循环稳定性

Fig. 19 Cyclic stability of PAT/CB hydrogel

3 结论与展望

本文研发了新型聚合水凝胶太阳能蒸发材料

PAT/CB,并探究了其同步脱盐截酚性能,得到以下主要结论。

(1)采用紫外光引发自由基聚合法成功制备水凝胶,通过调控交联剂、引发剂、AAm 浓度和 Tre 质量分数,可进一步优化材料的溶胀性能和水状态。

(2)Tre 质量分数、AAm 浓度、NaCl 质量分数和光照强度均会影响 PAT/CB 水凝胶的蒸发性能。当 Tre 质量分数为 40% 时,蒸发速率为 $1.68 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;当 NaCl 质量分数为 10.5% 时,蒸发速率仅降低 15%,表明 PAT/CB 水凝胶具有良好的长期稳定性和循环稳定性。

(3)Tre 的引入能够提升中间水比例,显著降低蒸发焓至 1895 J/g ,这种水分状态的动态调控是 PAT/CB 水凝胶实现高效光热蒸发性能的原因。

目前,材料的性能研究仅局限于实验室阶段,在实际工业废水处理中仍面临长期稳定性、耐污染性、规模化制备等挑战。长期运行中,污染物和盐分积累会堵塞水传输通道,影响光吸收和使用寿命。为克服这些挑战,可考虑优化结构设计,采用全氟烷基硅烷对蒸发器进行表面修饰,利用其低表面能阻隔污染物渗透,提高蒸发器的耐污染性。此外,蒸发器的大规模制造仍然是其实际应用的主要障碍,可考虑选用低成本的生物质碳基光热材料,结合新型制造工艺开发可扩展且具有成本效益的水凝胶。

参考文献:

- [1] ARTO I, ANDREONI V, RUEDA-CANTUCHE J M. Global use of water resources: a multiregional analysis of water use, water footprint and water trade balance [J]. Water Resources and Economics, 2016, 15: 1-14.
- [2] AL-SAHALI M, ETTOUNEY H. Developments in thermal desalination processes: design, energy, and costing aspects [J]. Desalination, 2007, 214: 227-240.
- [3] ALVA G, LIU Lingkun, HUANG Xiang, et al. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68(Part 1): 693-706.
- [4] LIU Chang, YIN Zhenhao, HOU Yue, et al. Overview of solar steam devices from materials and structures [J]. Polymers, 2023, 15(12): 2742.
- [5] YUAN Jun, LEI Xiao, YI Chenqi, et al. 3D-printed hierarchical porous cellulose/alginate/carbon black hydrogel for high-efficiency solar steam generation [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430 (Part 2): 132765.

- [6] GUAN Weixin, GUO Youhong, YU Guihua. Carbon materials for solar water evaporation and desalination [J]. *Small*, 2021, 17(48): e2007176.
- [7] ZHOU Xingyi, ZHAO Fei, GUO Youhong, et al. Architecting highly hydratable polymer networks to tune the water state for solar water purification [J]. *Science Advances*, 2019, 5(6): eaaw5484.
- [8] WU Zhenhua, SUN Dong, SHI Congcan, et al. Moisture-thermal stable, superhydrophilic alumina-based ceramics fabricated by a selective laser sintering 3d printing strategy for solar steam generation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(45): 2304897.
- [9] AHMARUZZAMAN M, MISHRA S R, GADORE V, et al. Phenolic compounds in water: from toxicity and source to sustainable solutions; an integrated review of removal methods, advanced technologies, cost analysis, and future prospects [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112964.
- [10] 张滢心, 蒋文伟, 焦高成, 等. 高盐含酚工业废水的脱酚工艺研究与优化 [J]. *现代化工*, 2024, 44(S1): 201-206.
- ZHANG Yingxin, JIANG Wenwei, JIAO Gaocheng, et al. Study and optimization of dephenolization process for industrial wastewater containing high concentration salt and phenol [J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(S1): 201-206.
- [11] SHI Le, SHI Y, ZHUO Sifei, et al. Multi-functional 3D honeycomb ceramic plate for clean water production by heterogeneous photo-Fenton reaction and solar-driven water evaporation [J]. *Nano Energy*, 2019, 60: 222-230.
- [12] GAN Qimao, XIAO Yangyi, LI Chenxing, et al. g-C₃N₄/MoS₂ based floating solar still for clean water production by thermal/light activation of persulfate [J]. *Chemosphere*, 2021, 280: 130618.
- [13] VINCIGUERRA D, GELB M B, MAYNARD H D. Synthesis and application of trehalose materials [J]. *JACS Au*, 2022, 2(7): 1561-1587.
- [14] HAN Zilong, WANG Peng, LU Yuchen, et al. A versatile hydrogel network: repairing strategy achieved by the covalent-like hydrogen bond interaction [J]. *Science Advances*, 2022, 8(8): eabl5066.
- [15] DEREKA B, YU Qi, LEWIS N H C, et al. Crossover from hydrogen to chemical bonding [J]. *Science*, 2021, 371(6525): 160-164.
- [16] FENG Wenjun, WANG Zhengke. Tailoring the swelling-shrinkable behavior of hydrogels for biomedical applications [J]. *Advanced Science*, 2023, 10(28): 2303326.
- [17] LE CAËR S, PIN S, ESNOUF S, et al. A trapped water network in nanoporous material: the role of interfaces [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, 13(39): 17658-17666.
- [18] 李斌鹏, 王成国, 王雯. 碳基吸波材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2012, 26(7): 9-14.
- LI Binpeng, WANG Chengguo, WANG Wen. Progress of electromagnetic wave absorbing materials based on carbon [J]. *Materials Review*, 2012, 26(7): 9-14.
- [19] TAO Peng, NI G, SONG Chengyi, et al. Solar-driven interfacial evaporation [J]. *Nature Energy*, 2018, 3(12): 1031-1041.
- [20] 宋澄杰. 太阳能界面蒸馏中蒸出有机物的原位去除研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [21] 郭星星. 石墨烯基复合纤维膜制备及其光热/光催化性能与机理 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [22] XIAO Qingbo, ZHU Yan, XI Yonglan, et al. Highly charged hydrogel with enhanced Donnan exclusion toward ammonium for efficient solar-driven water remediation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430(Part 3): 133019.
- [23] LEI Chuxin, GUAN Weixin, GUO Youhong, et al. Polyzwitterionic hydrogels for highly efficient high salinity solar desalination [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(36): e202208487.
- [24] STEINER T. The hydrogen bond in the solid state [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2002, 41(1): 48-76.
- [25] PASTORCZAK M, KOZANECKI M, ULANSKI J. Water-polymer interactions in PVME hydrogels: Raman spectroscopy studies [J]. *Polymer*, 2009, 50(19): 4535-4542.
- [26] GU Yuanjie, WANG Danning, GAO Ying, et al. Solar-powered high-performance lignin-wood evaporator for solar steam generation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(43): 2306947.

(编辑 李慧敏)