

引用:张智翔,康萌,周建华. 聚乙烯醇基气凝胶的制备及其太阳能光热驱动染料废水净化研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(3): 362-369.

Citation: ZHANG Zhixiang, KANG Meng, ZHOU Jianhua. Polyvinyl alcohol-based aerogel for solar-driven dye wastewater purification[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(3): 362-369.

文章编号 1672-6634(2025)03-0362-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024100014

聚乙烯醇基气凝胶的制备及其太阳能光热驱动染料废水净化研究

张智翔^{1,2}, 康萌¹, 周建华¹

(1. 桂林电子科技大学 材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 光电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要 水中挥发性有机污染物在光照下很容易与水一起蒸发, 造成收集水的二次污染, 从而增加了染料废水的净化难度。鉴于此, 以普鲁士蓝(PB)作为芬顿降解的催化中心, 聚吡咯(PPy)作为光热中心, 聚乙烯醇(PVA)作为功能性载体, 采用冷冻干燥法一步合成了 PB/PPy/PVA 气凝胶。PB/PPy/PVA 气凝胶在 15 min 内可降解 99.5% 的甲基橙。在一个太阳光强下, 蒸发速率为 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 且稳定性良好。所得 PB/PPy/PVA 气凝胶实现了高效降解水中有机污染物的同时收集清洁冷凝水, 在染料废水净化中有着广阔应用前景。

关键词 光热; 水蒸发; 芬顿催化; 气凝胶; 废水净化

中图分类号 TQ427.26; X703

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Polyvinyl alcohol-based aerogel for solar-driven dye wastewater purification

ZHANG Zhixiang^{1,2}, KANG Meng¹, ZHOU Jianhua¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. College of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract Volatile organic pollutants in water are easily evaporated together with water under light irradiation, causing secondary pollution of the collected water, which increases the difficulty of dye wastewater purification. In this regard, PB/PPy/PVA aerogel was synthesized by freeze-drying using Prussian blue (PB) as the catalytic center for Fenton degradation, polypyrrole (PPy) as the photothermal center, and polyvinyl alcohol (PVA) as the functional carrier. PB/PPy/PVA aerogel could degrade 99.5% methyl orange within 15 min. Under one-sun illumination, the evaporation rate was $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ with the excellent stability. As-synthesized PB/PPy/PVA aerogel realizes efficient degradation of organic pollutants in water while collecting clean condensate water, which has a broad application prospect in the purification of dye wastewater.

Keywords photothermal; water evaporation; Fenton catalysis; aerogel; wastewater purification

收稿日期: 2024-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52173094); 广西杰出青年基金项目(2019GXNSFFA245010)资助

通信作者: 周建华, 男, 汉族, 博士, 教授, 广西杰出青年基金获得者, 研究方向: 太阳能界面蒸发、气凝胶功能材料, E-mail: jian-huazhou@guet.edu.cn.

0 引言

随着人口增长、工业化和城市化的加速,淡水短缺危机日益严重。因此,利用丰富的海水和工业废水生产洁净水是解决水资源短缺危机最有效的策略之一。目前已经有许多可行的技术用于高效废水处理,如光催化^[1-3]、芬顿与类芬顿催化^[4]、太阳能光热驱动水蒸发^[5-6]等。受自然光合作用启发的光催化有潜力同时解决严重的水污染,满足不断增长的可持续能源需求。值得注意的是,水中有毒挥发性有机化合物(VOCs)在光照下很容易蒸发,会造成水环境二次污染甚至富集。合理设计和构建能够有效去除 VOCs 的多功能水净化系统仍然是一个巨大的挑战。

染料废水作为工业废水中难处理的废水之一,有排放量大、色度高、成分复杂等特点,如何有效处理染料废水成为焦点。目前,芬顿法(Fenton)作为高级氧化技术因其成本低、降解效率高被广泛应用在污水处理中^[7]。经典的 Fenton 体系是由 H_2O_2 和 Fe^{2+} 的均匀溶液组成,但是它们的化学性质都不稳定,特别容易失活,易导致试剂浪费。另外,反应过程中产生的 Fe^{3+} 在 $\text{pH}>3$ 时以羟基氧化物的形式形成铁污泥,不仅会导致铁物种的损失和催化活性的降低,还会对环境造成二次污染。为了克服传统 Fenton 反应的缺点,一些学者开始对非均相 Fenton 体系开展深入研究^[8-10],该体系可以防止铁离子的浸出,拓宽 pH 值范围,减少铁污泥的产量。活性炭、碳纳米管、分子筛、氧化石墨烯等常被用作 Fenton 试剂的载体^[11-12],可以增大催化剂的比表面积,使催化剂具有更好的吸附能力,为催化剂提供更多的活性位点。载体的结构和组成可以有效促进电子从 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 的转移,加速 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 的还原反应,实现 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的有效循环,从而提高异相 Fenton 体系的降解能力。载体的保护作用可防止铁物种浸入溶液中,减少铁物种的损失,所以选择合适的载体可以提高异相 Fenton 体系整体的催化效果。

太阳能驱动水蒸发技术可以实现环保、低成本、无需额外电力投入的清洁水生产,在可持续水净化处理方面展现出巨大的潜力^[13-15]。近年来,人们开发了碳材料^[16]、等离子体金属纳米颗粒^[17]、半导体颗粒^[18]和聚合物^[19]等光热转换材料来提高水的蒸发速率。此外,增强光吸收以优化光热转换效率、提高抗盐能力、调节水分子蒸发焓、从环境吸能等也是提高水蒸发速率的策略^[20-21]。然而,盐、重金属离子和高沸点有机物在蒸发过程中会富集在水中,低沸点的 VOCs 会与水一起蒸发和冷凝,从而导致收集到的水质较低^[22]。因此,当前迫切需要开发具有高效水蒸发和卓越光催化性能的新型材料,用于可持续的水处理。

为了同时满足光热驱动水蒸发和催化降解的需求,材料设计应考虑以下三个因素:(1) 具有全光谱吸收的多级孔结构和优异的亲水性;(2) 具有较高的比表面积和催化活性;(3) 具有低密度,确保可以漂浮在水面。气凝胶作为一种具有多层次孔道结构、高比表面积、骨架组分和功能可调的理想候选材料,可以实现在空气-水界面的热局域效应,协同增强水蒸发和净化。以普鲁士蓝(PB)作为催化中心,聚吡咯(PPy)作为光热中心,聚乙烯醇(PVA)作为功能性载体,通过冷冻干燥法合成了一种新型光热催化协同气凝胶材料,用于增强太阳能光热驱动染料废水净化的性能。聚乙烯醇基气凝胶具有轻质、多孔、高比表面积和亲水性好等特点,经冷冻干燥法制备的气凝胶具有丰富的孔洞通道,为水的运输以及水中污染物与芬顿催化剂充分接触提供可能。光芬顿催化与太阳能光热驱动水蒸发结合的策略,为实际条件下废水净化开辟了新的途径。

1 实验部分

1.1 PVA 溶液制备

将 10 g PVA 加入 190 mL 去离子水中,在 85 °C 水浴下溶胀 2.5 h,然后升温至 95 °C 剧烈搅拌溶解。待冷却至室温后,加入 5 mL 质量分数为 1% 的戊二醛水溶液进行交联,搅拌 10 min。随后加入稀释的盐酸(1 mol/L),将溶液 pH 值调整为 5,最后得到质量分数为 5% 的 PVA 溶液。

1.2 PB/PPy/PVA 气凝胶制备

取 60 μL 蒸馏提纯后的吡咯溶液加入 8 g 质量分数为 5% 的 PVA 溶液中,超声 30 min。加入 25 mg $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,加热至 75 °C 搅拌混合 10 min 后,再加入 2 mL 0.092 mol/L 的 FeCl_3 溶液。搅拌 10 min 后,倒入模具中冷冻干燥 24 h,得到 PB/PPy/PVA 气凝胶。

1.3 样品表征

采用 X 射线衍射仪(XRD,D8-ADVANCE,德国)分析样品的晶体结构。采用配有能谱仪(EDS)的扫描电子显微镜(SEM,QUANTA-450 FEG,美国)表征样品的表面形貌和成分。利用紫外-可见-近红外分光光度计(UV-Vis-NIR,JASCO V-570,日本)分析样品的吸收光谱。利用傅里叶变换红外光谱(FTIR,Thermo Scientific Nicolet iS10,美国)分析样品的结构信息。

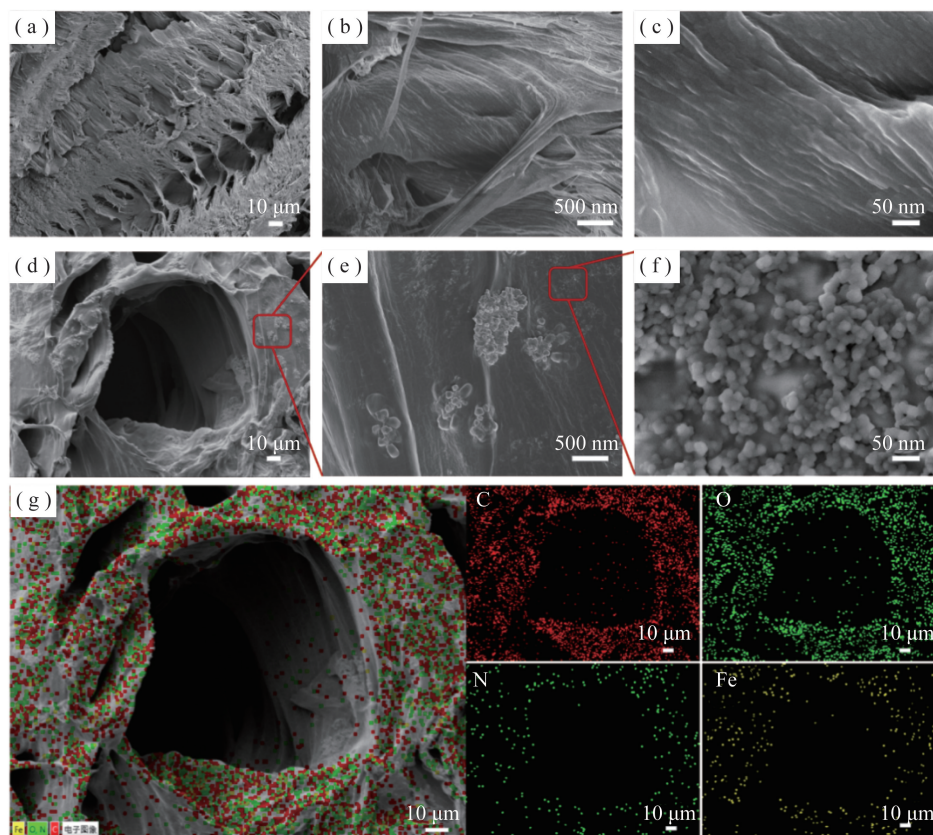
1.4 光芬顿催化性能测试

通过自组装的光芬顿催化装置进行测试,该装置由低温恒温反应浴(冷却水循环泵)、双层石英套杯、氙灯光源与磁力搅拌器组成。采用低温恒温反应浴与双层石英套杯控制反应体系的温度,氙灯模拟太阳光,磁力搅拌使催化剂与污染物溶液充分接触。测试过程中,将污染物溶液与一定量的芬顿催化剂及过氧化氢置于双层石英套杯里反应,每间隔 15 min,取 2 mL 反应液,测试其吸光度。将吸光度代入污染物溶液浓度的标准曲线方程可得剩余污染物的浓度。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌分析

将冻干后的 PB/PPy/PVA 气凝胶用液氮脆断后,通过 SEM 观察凝胶内部的形貌结构。图 1(a~c)为 PVA 气凝胶的 SEM 图像,可以看到内部含有大量的交叉错落的孔洞,表面呈褶皱状,这为蒸发过程中水分稳定输送到蒸发界面提供了可能。从图 1(d)中可以看出,PB/PPy/PVA 气凝胶保留了 PVA 的多孔骨架,孔洞壁上与截面上存在大量呈立方体形状的 PB 颗粒[图 1(e)]与 PPy 小球[图 1(f)],证明了一步合成 PB/PPy/PVA 气凝胶过程中生成了催化剂 PB 与光热材料 PPy。气凝胶的多孔结构为 PB 与污染物溶液接触提供了更多的机会。从图 1(g)能谱面扫图像中可以看到,PB/PPy/PVA 气凝胶表面分布大量的铁元素,这为优异的芬顿催化性能提供了保障。



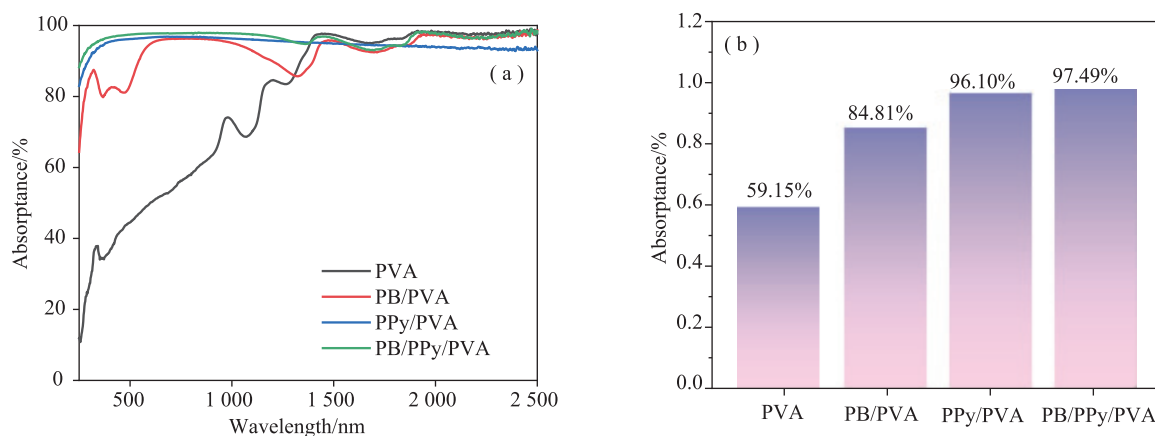
注:(a~c) PVA 和(d~f) PB/PPy/PVA 的 SEM 图;(g) PB/PPy/PVA 的 SEM 图及对应的 C、O、N、Fe 元素分布图。

图 1 样品的 SEM 图和元素分布图

Fig. 1 SEM images and elemental mapping images of samples

2.2 UV-Vis-NIR 吸收光谱分析

图 2(a)为 PVA、PB/PVA、PPy/PVA 和 PB/PPy/PVA 的 UV-Vis-NIR 吸收光谱,图 2(b)为对应的太阳光波段的吸光率。相比于 PVA,添加了 PB 与 PPy 的气凝胶在整个太阳光波段都有较强的吸收能力,吸光率分别为 84.81% 和 96.10%。说明普鲁士蓝与聚吡咯具有较高的光吸收能力。在共轭电子结构的影响下, $\pi-\pi^*$ 跃迁的特殊形式决定了 PB 和 PPy 的吸收截止波长在红外波段^[23],因而 PB/PPy/PVA 复合气凝胶表现出很强的光吸收能力。



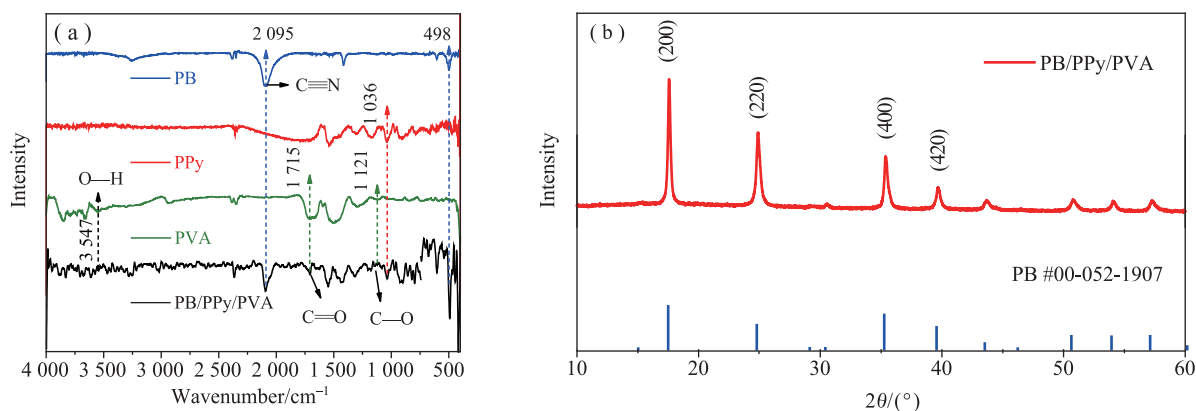
注:(a) UV-Vis-NIR 吸收光谱;(b) 吸光率。

图 2 样品的紫外-可见-近红外吸收光谱和对应的吸光率

Fig. 2 UV-Vis-NIR absorption spectra and the corresponding absorptivity

2.3 FTIR 与 XRD 分析

通过 FTIR 光谱进一步分析 PB/PPy/PVA 气凝胶中的基团。如图 3(a)所示,PB/PPy/PVA 气凝胶样品在 498 和 2 095 cm^{-1} 处出现了 Fe(II)-CN-Fe(III)基团和 C $\equiv$ N 键的拉伸振动峰,证明在该样品合成过程中成功制备了 PB 芬顿催化剂。吡咯环的变形峰出现在了 1 036 cm^{-1} 处,也证明了该样品中 PPy 的生成。在 1 121 和 3 547 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应 C—O 和 O—H 的拉伸振动峰,均为 PVA 的基本成分。1 715 cm^{-1} 处的吸收峰为 C=O 的拉伸振动峰,是在 PVA 制备过程中添加了戊二醛交联剂所致。图 3(b)为 PB/PPy/PVA 气凝胶 XRD 图谱,四个主要衍射峰分别对应于面心立方 PB 纳米颗粒的(200)、(220)、(400)和(420)晶面^[24],进一步证实了 PB 芬顿催化剂的成功合成。



注:(a) FTIR 光谱;(b)XRD 图谱。

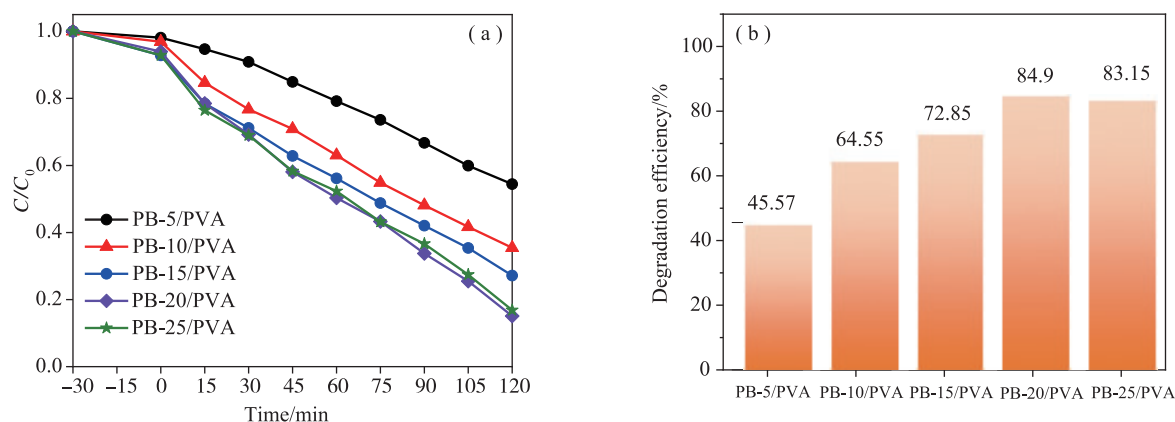
图 3 样品的 FTIR 光谱和 XRD 图谱

Fig. 3 FTIR spectra and XRD pattern of samples

2.4 光芬顿催化性能测试

将 PB/PPy/PVA 气凝胶用于染料废水处理,污染物模拟溶液为 100 mL 甲基橙(MO)溶液(10 mg/L)。

过氧化氢添加量为 1.12 g/L, 溶液 pH 值为 5。反应前, 将 PB/PPy/PVA 气凝胶浸泡在污染物溶液中半小时, 达到吸附平衡, 再加入过氧化氢开始芬顿催化降解反应。

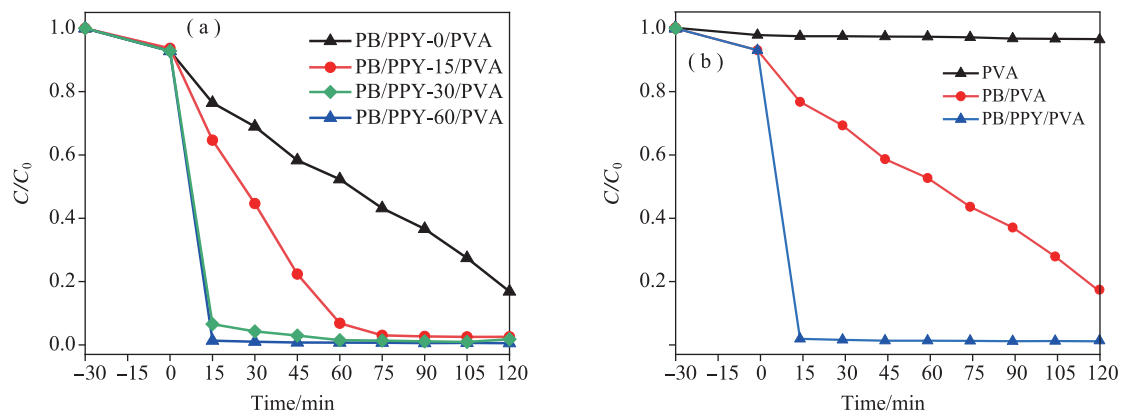


注: (a)降解曲线; (b)降解效率。

图 4 不同 PB 添加量样品的芬顿降解 MO 的曲线和 2 h 时的降解效率

Fig. 4 Fenton degradation curves of MO over samples with different PB contents and degradation efficiencies in 2 h

首先探究了 PB 的含量对芬顿催化降解 MO 效果的影响。从图 4 可以看出, 随着气凝胶中的 PB 含量的增加, 样品对 MO 的降解量逐渐增加。PB 含量为 25 mg 时的降解率与含量 20 mg 的降解率相差不大, 可能是气凝胶结构难以提供更多的表面使 PB 颗粒与污染物接触, 暴露在孔洞外的 PB 颗粒已经达到饱和。因此, 在后续研究中, 选择气凝胶中的 PB 含量为 20 mg。其次, 在 PB-20/PVA 的基础上, 调控单体吡咯的添加量, 研究了 PPy 含量对芬顿催化降解效率的影响。从图 5(a)可知, 随着 PPy 含量的增加, 降解速率也逐渐加快。图 5(b)结果表明, 纯 PVA 没有降解效果, 复合了 PB 与 PPy 后降解性能大幅度提升。气凝胶中的 PB 含量为 20 mg、吡咯单体添加量为 60 μ L 时(样品统一标记为 PB/PPy/PVA), 可以在 15 min 内降解 99.5% 的甲基橙。



注: (a) 不同聚吡咯添加量样品; (b) PVA、PB/PVA、PB/PPy/PVA。

图 5 样品的芬顿降解 MO 曲线

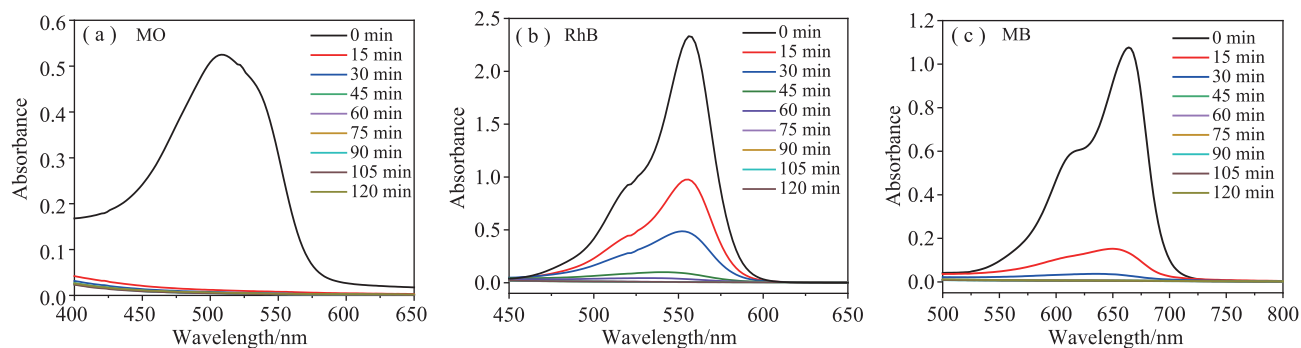
Fig. 5 Degradation curves of MO over samples

为了验证该催化剂对染料废水的广泛适用性, 以甲基橙(MO)、罗丹明 B(RhB)和亚甲基蓝(MB)作为模拟污染物(体积和质量浓度均分别为 100 mL 和 10 mg/L)进行了芬顿降解实验。图 6 为在光芬顿降解过程中不同时刻、不同污染物剩余溶液的吸光度曲线。实验结果表明, PB/PPy/PVA 气凝胶对这三种染料均能很快降解去除, 且对染料废水具有优异的适应性, 其降解速率顺序为: MO > MB > RhB。

2.5 光热驱动水蒸发性能测试

采用自制实验装置对 PB/PPy/PVA 气凝胶进行光热驱动水蒸发性能测试^[25-26], 其中样品直径为

2.3 cm。在一个太阳光强(1 kW/m^2)下,通过红外相机记录不同时刻气凝胶的表面温度,如图 7(a, b)所示。PB/PPy/PVA 气凝胶的表面温度在前 5 min 快速上升,随后升速降低。经过 1 h 的实验,PB/PPy/PVA 气凝胶的表面温度达到了 48.5°C ,而 PVA 气凝胶表面温度仅为 36.2°C 。以上结果说明 PB/PPy/PVA 气凝胶具有优异的光转热性能。

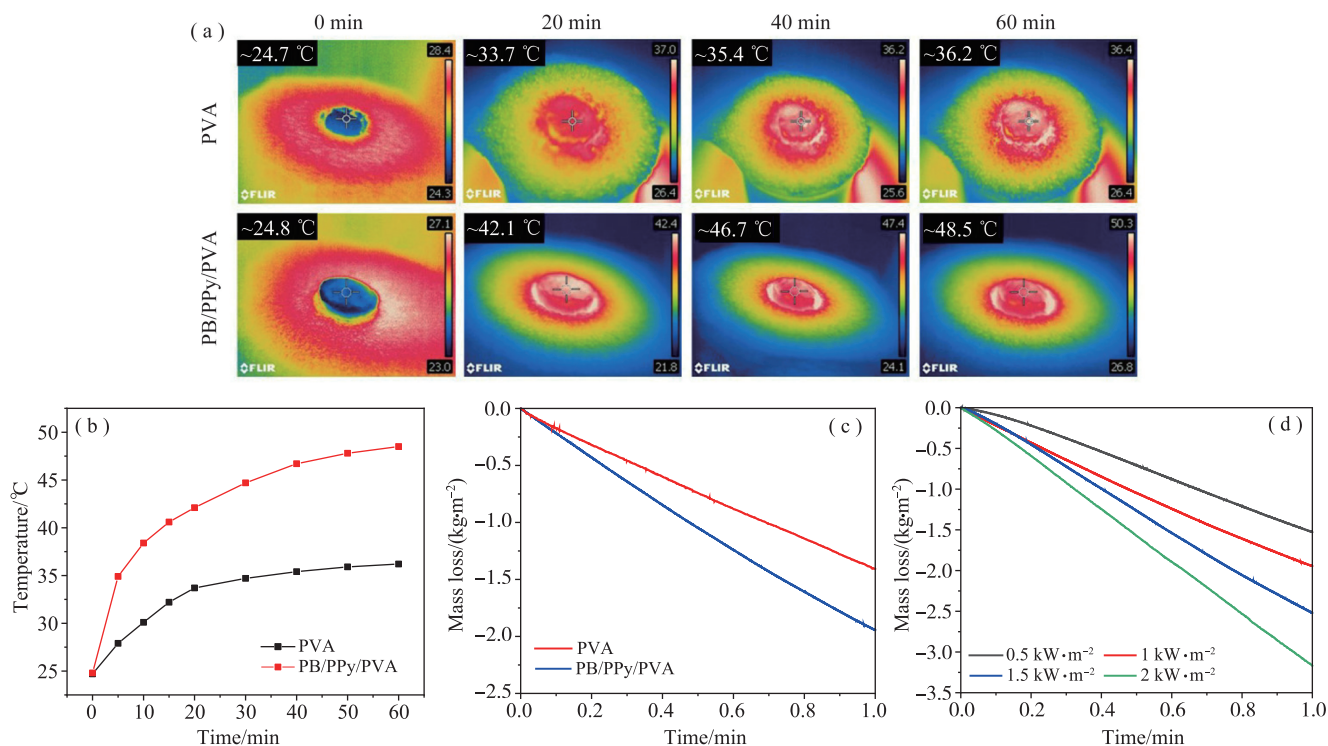


注:(a) MO; (b) RhB; (c) MB。

图 6 PB/PPy/PVA 降解不同染料的吸光度曲线

Fig. 6 Absorbance curves of degraded diffent dyes over PB/PPy/PVA

图 7(c)为水蒸发质量损失与时间的关系曲线。在一个太阳光强照射下,PB/PPy/PVA 气凝胶的蒸发速率达到了 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,远远高于同等情况下 PVA 的蒸发速率。图 7(d)展示了不同光照强度下的蒸发速率曲线。随着光照强度的增加,1 h 内的水蒸发量也逐渐增加。当光照强度为 2 kW/m^2 时,蒸发速率达到了 $3.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。



注:(a) PB/PPy/PVA 和 PVA 的红外热成像图;(b) 相应的表面温度变化曲线;(c) 一个太阳下不同蒸发器的质量变化;(d) 不同光照强度下蒸发器的质量变化。

图 7 样品的光热性能和水蒸发性能

Fig. 7 Infrared thermal performances and water evaporation performances of samples

在一个太阳光照强度下评估了 PB/PPy/PVA 气凝胶的光热驱动水蒸发的稳定性。以光热驱动水蒸发性能测试 1 h 为一次循环。由图 8 可以看出,PB/PPy/PVA 在 20 次循环过程中蒸发速率相差不大,平均蒸

发速率仍然维持在 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这证实了 PB/PPy/PVA 气凝胶具有稳定的太阳能光热驱动水蒸发性能。

2.6 太阳能驱动染料废水净化性能

利用自制装置进行太阳能光热驱动染料废水净化实验,如图 9(a, b)所示。利用聚苯乙烯泡沫,将 PB/PPy/PVA 气凝胶漂浮在石英容器的溶液表面,用盖子密封防止水蒸气逸出。水蒸气在循环水泵的作用下进入冷凝管冷凝后,流入收集瓶中。光照反应 120 min 后,石英容器里的 MO 溶液颜色已经完全褪去,同时在收集瓶中得到了经蒸发-冷凝的清洁水[图 9(c)]。图 9(d)的吸光度测试结果表明,反应 120 min 后的溶液中 MO 的特征吸收峰完全消失,说明 MO 被完全降解。收集到的冷凝水的吸收峰为平滑的直线,并无 MO 的吸收峰。以上实验结果验证了 PB/PPy/PVA 气凝胶在淡水生产和染料废水净化领域具有潜在应用。

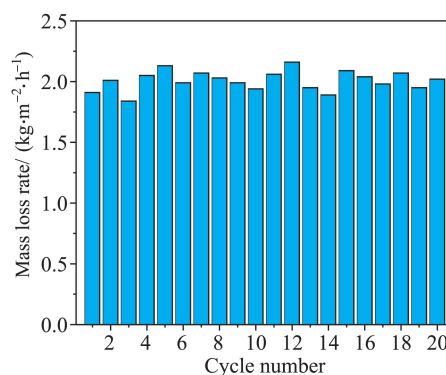
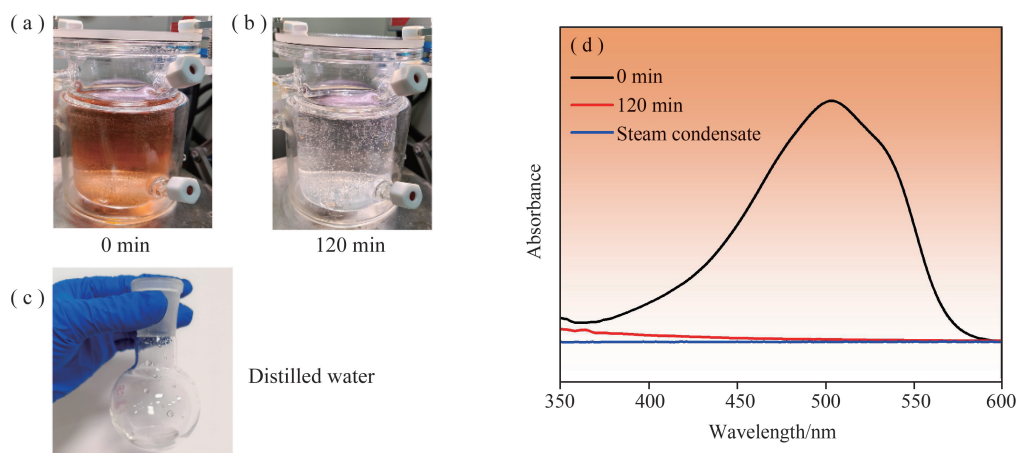


图 8 PB/PPy/PVA 气凝胶的蒸发稳定性测试

Fig. 8 Cyclic stability of PB/PPy/PVA aerogel



注:反应(a) 0 min 和(b) 120 min 时 MO 溶液的光学照片;(c) 反应 120 min 收集的蒸馏水的光学照片;(d) 不同溶液的吸光度曲线。

图 9 MO 溶液和蒸馏水的光学照片;MO 溶液的吸光度曲线

Fig. 9 Optical photos of MO solutions and distilled water; Absorbance curves of different MO solutions

3 结论

通过冷冻干燥法一步合成了具有芬顿降解性能与太阳能光热转换能力的 PB/PPy/PVA 气凝胶,该材料以 PB 作为催化中心,PPy 作为光热中心,PVA 作为功能性载体,实现了高效催化降解水中有机污染物的同时收集清洁冷凝水,适用于 MO、RhB、MB 多种染料污染物。随着气凝胶中的 PB 与 PPy 含量的增加,样品对染料的降解量逐渐增加。PB 含量为 20 mg,吡咯单体添加量为 60 μL 时 PB/PPy/PVA 气凝胶在 15 min 内可降解 99.5% 的 MO。PB/PPy/PVA 气凝胶具有优异的光热转换性能,在一个太阳光强下,气凝胶的表面温度提升到 48.5°C ,蒸发速率为 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,且稳定性能良好。这项作为实现染料废水净化和淡水生产的有机结合提供了新的思路。在进一步的研究中,应开发具有光热协同催化活性的新型催化剂和多功能的太阳能蒸发器,促进太阳能在清洁水生产中的高效利用。

参 考 文 献

- [1] YU H J, DAI M, ZHANG J, et al. Interface engineering in 2D/2D heterogeneous photocatalysts[J]. Small, 2023, 19: 2205767.
- [2] 袁浩, 孙鑫海, 李瑞广, 等. 碳点/铁酸镍复合光催化剂的宽光谱芬顿降解四环素研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(2):

69-79.

- [3] YANG M, LI H B, LIU F L, et al. Mechanism insight into oxygen vacancy-dependent effect in Fe_1/TiO_2 single-atom catalyst for highly enhanced photo-Fenton mineralization of phenol[J]. *Applied Catalysis B: Environmental and Energy*, 2024, 354: 124071.
- [4] WU Q S, SIDDIQUE M S, WANG H J, et al. Visible-light-driven iron-based heterogeneous photo-Fenton catalysts for wastewater decontamination: a review of recent advances[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137509.
- [5] ZHOU J H, GU Y F, LIU P F, et al. Development and evolution of the system structure for highly efficient solar steam generation from zero to three dimensions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29: 1903255.
- [6] ZHANG Z Y, XU W L, WANG J, et al. Improving solar vapor generation by eliminating the boundary layer inhibition effect of evaporator pores[J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8: 2276-2283.
- [7] VORONTSOV A V. Advancing Fenton and photo-Fenton water treatment through the catalyst design[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 372: 103-112.
- [8] GOU Y, CHEN P, YANG L, et al. Degradation of fluoroquinolones in homogeneous and heterogeneous photo-Fenton processes: a review[J]. *Chemosphere*, 2021, 270: 129481.
- [9] XIN L W, HU J Q, XIANG Y, et al. Carbon-based nanocomposites as Fenton-like catalysts in wastewater treatment applications: a review[J]. *Materials*, 2021, 14(10): 2643.
- [10] GUPTA A D, SINGH H, VARJANI S, et al. A critical review on biochar-based catalysts for the abatement of toxic pollutants from water via advanced oxidation processes (AOPs)[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 849: 157831.
- [11] AN X Q, HOU Z A, YU Y, et al. Red mud supported on reduced graphene oxide as photo-Fenton catalysts for organic contaminant degradation[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 640: 128461.
- [12] PARK E, HUR J. Three-dimensionally interconnected porous PDMS decorated with poly(dopamine) and Prussian blue for floatable, flexible, and recyclable photo-Fenton catalyst activated by solar light[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 545: 148990.
- [13] WANG J H, SUN M Y Z, LIU C L, et al. Customized microenvironments spontaneously facilitate coupled engineering of real-life large-scale clean water capture and pollution remediation[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35: 2306103.
- [14] MU X J, GU Y F, WANG P F, et al. Strategies for breaking theoretical evaporation limitation in direct solar steam generation[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2021, 220: 110842.
- [15] WU X, LU Y, REN X H, et al. Interfacial solar evaporation: from fundamental research to applications[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36: 2313090.
- [16] WANG Y D, WU X, GAO T, et al. Same materials, bigger output: a reversibly transformable 2D-3D photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation[J]. *Nano Energy*, 2021, 79: 105477.
- [17] WU X T, LI C C, ZHANG Z Q, et al. Nitrogen-doped microporous graphite-enhanced copper plasmonic effect for solar evaporation[J]. *Carbon Energy*, 2024, 6: e466.
- [18] YANG B, ZHANG Z M, LIU P T, et al. Flatband λ - Ti_3O_5 towards extraordinary solar steam generation[J]. *Nature*, 2023, 622: 499-506.
- [19] GENG X M, YANG P, WAN Y F. How to reduce enthalpy in the interfacial solar water generation system for enhancing efficiency? [J]. *Nano Energy*, 2024, 123: 109434.
- [20] CHAULE S, HWANG J, HA S J, et al. Rational design of a high performance and robust solar evaporator via 3D-printing technology [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(38): 2102649.
- [21] WANG J L, WANG W K, FENG L, et al. A salt-free superhydrophilic metal-organic framework photothermal textile for portable and efficient solar evaporator[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2021, 231: 111329.
- [22] YAN S W, SONG H J, LI Y, et al. Integrated reduced graphene oxide/polypyrrole hybrid aerogels for simultaneous photocatalytic decontamination and water evaporation[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2022, 301: 120820.
- [23] HE M T, DAI H Y, LIU H J, et al. High-performance solar steam generator based on polypyrrole-coated fabric via 3D macro-and micro-structure design[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(34): 40664-40672.
- [24] PAN Y P, SHI Z Z, LI J, et al. Graphene oxide laminates intercalated with Prussian blue nanocube as a photo-Fenton self-cleaning membrane for enhanced water purification[J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 672: 121465.
- [25] SUN Z Q, WANG M, MU X J, et al. Sustainable β -cyclodextrin modified polyacrylamide hydrogel for highly efficient solar-driven water purification[J]. *Materials Today Energy*, 2023, 35: 101330.
- [26] ZHOU J H, SUN Z Q, MU X J, et al. Highly efficient and long-term stable solar-driven water purification through a rechargeable hydrogel evaporator[J]. *Desalination*, 2022, 537: 115872.

(责任编辑:蒲锡鹏)