

负载 MoS_2 纳米片的 聚丙烯酰胺气凝胶的研究

王桂灵, 毛辉麾*, 王璐

(常州大学石油化工学院, 江苏常州 213164)

摘要:合成了一种低带隙、富缺陷的纳米花球状 MoS_2 , 并利用其作为太阳能吸收材料, 再以亲水性聚丙烯酰胺为骨架, 通过交联发泡聚合法制备了一种具有良好机械稳定性和耐盐性的海绵状 MoS_2 基多孔气凝胶 (MoS_2 -PH)。该气凝胶具有协同界面光蒸汽转化性能和催化降解水中有机污染物的双功能, 可重复利用性好。分析结果表明, 合成的 MoS_2 纳米片组装形成同心、分离良好的分层结构, 类似于纳米花球; 合成的 MoS_2 -PH 不仅具有 $3.954 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的高蒸发速率, 而且还具有显著的染料降解效率 (81%), 这研究为解决淡水短缺和水污染提出了一种巧妙的方法。

关键词:有机气凝胶; 太阳能; 界面太阳能蒸汽转化; 高级氧化工艺

中图分类号: O684.17

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S1-0240-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.044

Study on polyacrylamide aerogels loaded with MoS_2 nanoplates

WANG Gui-ling, MAO Hui-hui*, WANG Lu

(School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: A low band-gap, defect-rich nanoflower spheroidal MoS_2 is synthesized, and used as a solar energy absorbing material. Taking hydrophilic polyacrylamide as the framework, a spongy MoS_2 -based porous aerogel (MoS_2 -PH) with good mechanical stability and salt resistance is prepared via cross-linking foaming polymerization method. This aerogel has two functions including synergistic interfacial photo-vapor conversion and catalyzing the degradation of organic pollutants in water, and shows a good reusability. Analysis results show that the assembled MoS_2 nanosheets form a concentric and well-separated layered structure, which is similar to nanospheres. The synthesized MoS_2 -PH has a high evaporation rate of $3.954 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and exhibits a remarkable dye degradation efficiency (81%), which presents an ingenious solution to the shortage of fresh water and water pollution.

Key words: organic aerogels; solar energy; interfacial solar energy steam conversion; advanced oxidation process

利用不可携带的废水或海水生产淡水是满足巨大淡水需求的重要途径。反渗透^[1]、膜蒸馏^[2]等常规水处理技术存在设备投资高、化石能源消耗大等问题。太阳能是一种清洁、免费、取之不尽、用之不竭的能源, 已被广泛用于发电、热能、燃料等方面^[3]。因此, 有效利用太阳能被认为是解决未来能源和环境问题的有效方案。本文利用界面光蒸汽转化技术 (IPVCT) 将光热材料限制在空气-水界面^[4], 再融合硫酸盐基高级氧化工艺 (SR-AOP)^[5]。首先通过水热法制备了低带隙、富缺陷的 MoS_2 纳米花, 然后以亲水性聚丙烯酰胺 (AM) 为多孔水凝胶骨架、*N,N*-亚甲基双丙烯酰胺 (MBA) 为交联剂、十二烷基硫酸钠 (SDS) 为发泡剂、四甲基乙二胺 (TMEDA) 为催化剂、过硫酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 为引发剂, 采用多孔发泡工艺制成一种具有良好机械稳定性和耐盐性的海绵状 MoS_2 基多孔气凝胶 (MoS_2 -PH)^[6]。其水蒸发速率高达 $3.954 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 且

对亚甲基蓝、罗丹明 B 等水污染物有高效光催化降解效果^[7], 可重复利用, 在水源处理方面有广阔的应用前景。

1 实验部分

1.1 仪器

BSM-220.4 电子天平, 上海卓精电子科技有限公司生产; DHG-9035A 型鼓风干燥箱, 上海鳌珍仪器制造有限公司生产; GHX-3 型光化学反应仪, 扬州大学城科教仪器有限公司生产; 其他仪器为实验室常规操作仪器。

1.2 试剂

四水合钼酸铵 (A.R)、氯化钠 (A.R), 国药集团化学试剂有限公司生产; 丙烯酰胺 (A.R)、*N,N*-二甲基双丙烯酰胺 (A.R)、十二烷基硫酸钠 (A.R)、四甲基乙二胺 (A.R)、过硫酸铵 (G.R)、亚甲基蓝 (C.P)、过硫酸氢钾 (A.R), 上海阿拉丁生化科技股

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-05-22

作者简介: 王桂灵 (1999-), 女, 硕士生, 研究方向为水凝胶材料, 18851769226@163.com; 毛辉麾 (1981-), 男, 博士后, 副教授, 研究方向为石墨相氮化碳、石墨烯等碳质材料的研究开发及其在光催化和双碳技术方面的应用等, 通讯联系人, maohuihui_beijing@126.com。

份有限公司生产;罗丹明 B(A.R)、硫脲(A.R),上海凌峰化学试剂有限公司生产。

1.3 实验步骤

1.3.1 样品制备

制备低带隙、富缺陷的纳米花球状 MoS₂^[8]:将原料 1.236 g 四水合钼酸铵[(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O]和 2.128 g 硫脲(CH₄N₂S)溶解与 35 mL 的去离子水中,超声反应 30 min,再搅拌 30 min 使其混合均匀。再将所得的悬浮液在 220℃ 下加热 18 h,所得溶液冷却至室温后用水和乙醇多次洗涤,以去除未反应的试剂和其他杂质,最后放入 60℃ 烘箱中干燥 6 h,最终得到低带隙、富缺陷的纳米花结构 MoS₂。

MoS₂ 基多孔气凝胶的制备^[9]:取所制得的 MoS₂(质量为 AM 质量的 20%、30%、50%,记为样①、样②、样③)加入 10 mL 去离子水搅拌 8~12 h。在所得的悬浮液中加入 1.68 g AM、0.14 g MBA,超声反应 10 min 后加入 12 mg SDS,快速机械搅拌 5 min,使悬浮液充满气泡,将 TMEDA 作为催化剂加入悬浮液中,气泡消失,开始交联形成流体水凝胶;最后加入 0.15 g (NH₄)₂S₂O₈ 作为形成剂,流体水凝胶迅速变成固体水凝胶,将所得固体水凝胶冷冻干燥 24 h 形成 MoS₂ 基多孔气凝胶^[10],记为 MoS₂-PH。制备过程如图 1 所示。

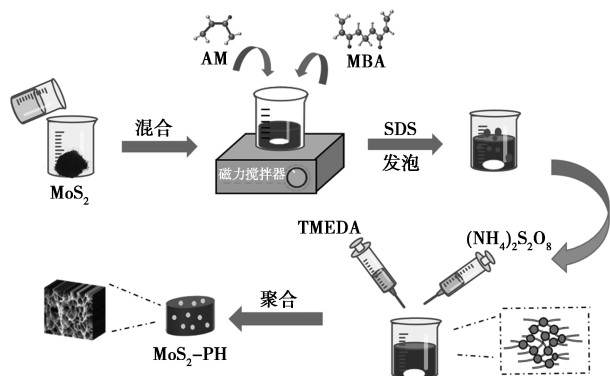


图 1 MoS₂-PH 的制备过程

1.3.2 样品表征

利用扫描电镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)观察了 MoS₂ 和 MoS₂-PH 的微观结构和形貌。采用比表面积测试仪(BET)研究孔隙结构,样品预热温度 85℃,预热时间 24 h。用 X 射线衍射仪(XRD)分析了晶体结构。傅里叶变换红外(FT-IR)光谱由 TENSOR27 (Brook, Switzerland) 提供,使用含有 KBr 粉末的颗粒。用微光学接触角测量仪(Dataphysics OCA15EC)记录水接触角。用可见分光光度计(Lambda 750 s)测定其吸收性能。光热转

换性能测试在 300 W 氙灯下进行。X 射线光电子能谱(XPS)分析元素价态变化。在 Lab RAM HR (Horiba JobinYvon, France) 上用 532 nm 的激发激光器进行了拉曼光谱分析。

1.3.3 太阳能蒸汽产生实验

太阳能蒸汽产生实验^[11]在 300 W 氙灯下进行,该氙灯具有标准 AM 1.5 光谱的滤光片,其提供的太阳通量范围为 0.5~3.0 kW/m²。配置 3.5% 的氯化钠溶液用于模拟海水,取 100 mL 3.5% 氯化钠溶液加入 200 mL 烧杯中,加入半径 1.5 cm、约 0.5 cm 厚度的 MoS₂-PH,同时进行不加 MoS₂-PH 的空白实验对照,进行 6 h 的界面光蒸汽转化实验,称取反应前后烧杯质量变化,计算凝胶的水蒸发性能^[12]。所有太阳能蒸汽发生实验均在环境温度为 26±2℃、湿度为 30±3% 的条件下进行。

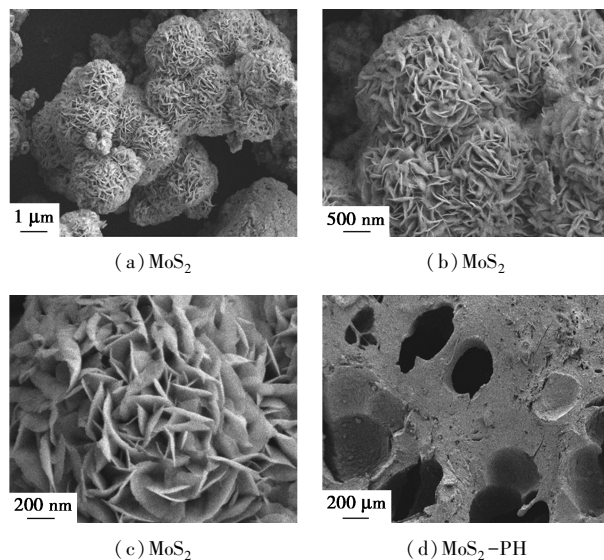
1.3.4 MB 的光催化降解实验

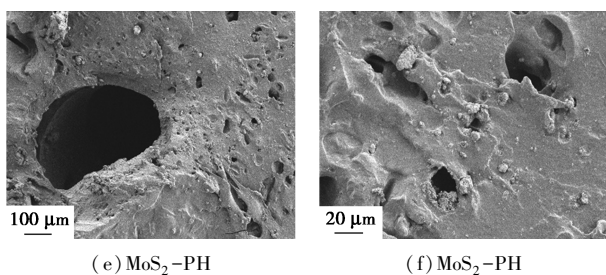
精准称量 10 mg MB,加入至半个烧杯去离子水,超声溶解,倒入 1 000 mL 容量瓶,烧杯用去离子水润洗 2~3 次,用去离子水定容至刻度。取 100 mL 配好的 MB 溶液放入 200 mL 烧杯中,加入 2 g MoS₂-PH,然后将 20 mg 过硫酸氢钾(PMS)加入到溶液中,加入转子,先将烧杯在黑暗环境下搅拌 10 min,然后在 300 W 氙灯照射下每隔 10 min 取一次样,每次取 3 mL,采用可见分光光度计在 664 nm 处测样品吸光度,共取 5 次样,观察 50 min 内 MoS₂-PH 对 MB 的降解效果^[13]。

2 结果与讨论

2.1 MoS₂ 和 MoS₂-PH 的微观结构和形貌分析

MoS₂、MoS₂-PH 的 SEM 图如图 2 所示。





(e) MoS₂-PH (f) MoS₂-PH

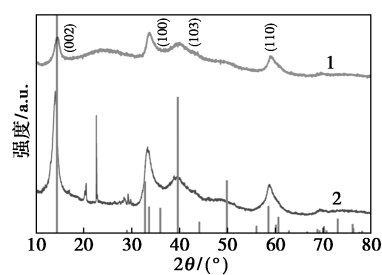
图 2 MoS₂ 与 MoS₂-PH 的 SEM 图

由图 2(a)~图 2(c) 可见, MoS₂ 纳米片组装形成同心、分离良好的分层结构, 类似于花球 (MoS₂ 纳米片组装), 其中纳米片薄片形成花瓣。MoS₂ 纳米组件的形成主要是由于水热过程中生长的薄片在较高温度下发生的奥斯特瓦尔德成熟。由于波纹形态, MoS₂ 纳米片保持不堆叠, 提供更大的表面积和易于形成表面缺陷^[14]。

从 MoS₂-PH 的 SEM 图 [图 2(d)~图 2(f)] 可以看出, MoS₂-PH 内部同时存在微米级孔隙和纳米级孔隙, 有利于水分向 MoS₂-PH 表面输送。另一方面, 入射光可以在丰富的孔隙中反射, 提高了吸附效率。有机污染物和 PMS 也可以进入材料内部和反应位点充分接触。

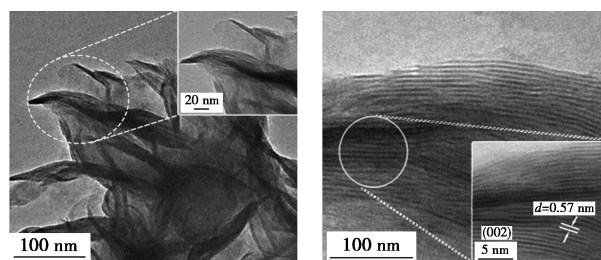
通过 XRD 分析进一步探究了 MoS₂ 的晶体结构^[15], MoS₂ 基材的 XRD 谱图、MoS₂ 纳米片的 TEM 图以及 MoS₂ 纳米片的 HRTEM 图见图 3。

纯 MoS₂ 和 MoS₂-PH 的 XRD 谱图 [图 3(a)] 显示, 在 14.4°、32.7°、39.6°、58.6° 处有清晰的衍射峰, 分别对应于 MoS₂ (JCPDS No.03-065-0160) 的



1—MoS₂; 2—MoS₂-PH

(a) MoS₂ 基材的 XRD 谱图

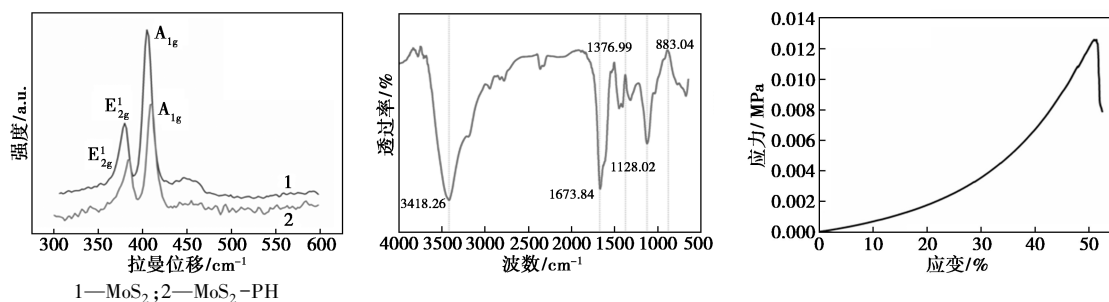


(b) MoS₂ 纳米片的 TEM 图 (c) MoS₂ 纳米片的 HRTEM 图

图 3 MoS₂ 基材的 XRD 谱图、MoS₂ 纳米片的 TEM 图以及 MoS₂ 纳米片的 HRTEM 图

(002)、(100)、(103)、(110) 晶面。通过 TEM 图 [图 3(b,c)] 证实, 晶格间距为 0.57 nm, 对应于 MoS₂ 的 (002) 晶面, 与 XRD 结果相符。因此, 形成凝胶前后, MoS₂ 的晶体结构没有变化, 表明 MoS₂ 的结构稳定。此外, 对 MoS₂ 和 MoS₂-PH 的拉曼分析也证实了 MoS₂ 成功地附着在气凝胶骨架上。

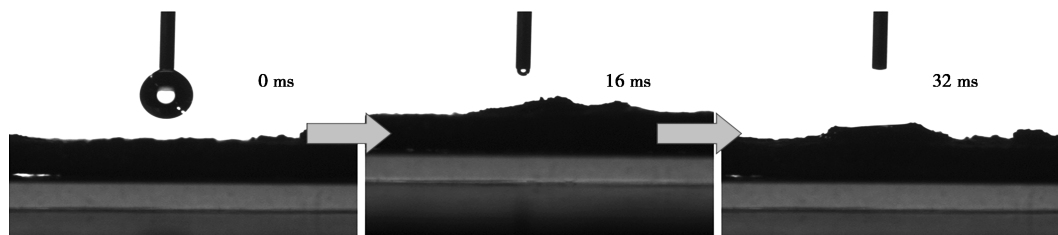
MoS₂ 基材的拉曼光谱、MoS₂-PH 的红外光谱、MoS₂-PH 压缩性能测试、MoS₂-PH 水接触角性能测试见图 4。



(a) MoS₂ 基材的拉曼光谱

(b) MoS₂-PH 的红外光谱

(c) MoS₂-PH 压缩性能测试



(d) MoS₂-PH 水接触角性能测试

图 4 MoS₂ 基材的拉曼光谱、MoS₂-PH 的红外光谱、MoS₂-PH 压缩性能测试及 MoS₂-PH 水接触角的性能测试

由图 4(a)可知,在 374 和 408 cm^{-1} 处出现了两个明显的特征峰,分别对应于 MoS_2 中 Mo-S 键的面内 (E_{2g}^1) 和面外 (A_g^1) 拉曼峰。相比之下, $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 的两个拉曼特征峰发生了红移,这可能是 MoS_2 与水凝胶之间相互作用的结果。

随后研究了 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 的表面亲水性和机械稳定性^[16]。首先为了探究官能团对光热材料亲水性的影响,对 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 进行了 FT-IR 分析,得到的光谱如图 4(b)所示。 $3\ 418.26\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 376.99\text{ cm}^{-1}$ 处的峰可以归因于羟基的振动,光谱中的主要信号清晰地显示出聚丙烯酰胺的特征吸收峰,包括在 $1\ 673.84\text{ cm}^{-1}$

[C=O 组酰胺(酰胺 I)]、 $1\ 114.81\text{ cm}^{-1}$ [C-N 和 N-H 键(酰胺 III)]。酰胺是亲水性官能团,容易与吸收的水分子形成氢键。水接触角测试观察到液滴可以在大约 32 ms 内被 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 完全吸收[图 4(d)],因此, $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 具有优异的亲水性,为水的连续输送和蒸发提供了有利条件。压缩性能测试[图 4(c)]显示凝胶的压缩性能良好,这对实际应用中的海水淡化至关重要。

最后根据 MoS_2 粉末和 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 的 XPS 进行对比分析, MoS_2 粉末、 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ (b) 的 X 射线光电子能谱见图 5。

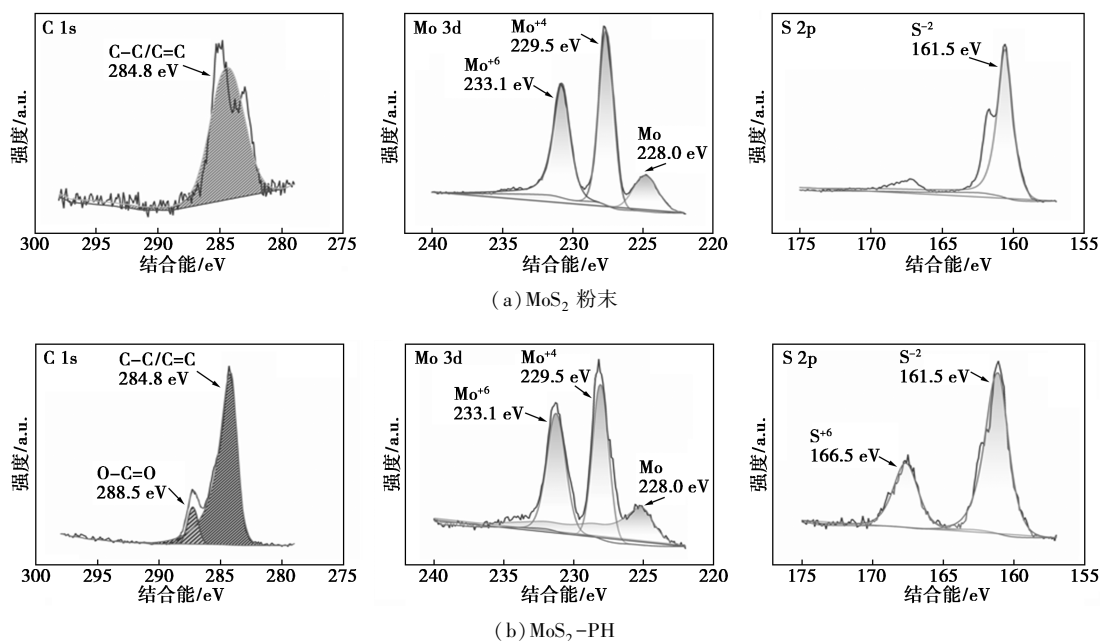


图 5 MoS_2 粉末和 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 的 X 射线光电子能谱

图 5 表明, $\text{C}1s$ 轨道 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 比 MoS_2 粉末多出 288.5 eV 的 C=O , 为凝胶骨架酰胺基团的加入; $\text{Mo}3d$ 轨道制成凝胶前后不变,表明制成凝胶对二硫化钼的功能没有影响; $\text{S}2p$ 轨道 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 比 MoS_2 粉末多出 166.5 eV 的 S^{+6} , 为凝胶催化剂过硫酸铵的加入影响。

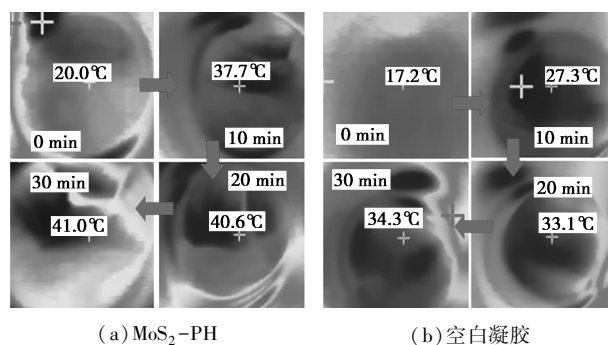
2.2 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 的光热转换性能测试

在工作状态下,对光热材料的表面温度进行实时记录, $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 、空白凝胶、纯水在 1 个太阳(一个太阳光指 AM1.5 标准太阳光谱,描述太阳光入射于地表之平均照度,其辐照度为 $1\ 000\text{ W/m}^2$,实验室用 300 瓦灯通过调节光源与蒸发器表面之间的距离模拟的)照射下不同时间的红外图见图 6。

由图 6(a)所示可见,30 min 后 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 的表面温度从 20°C 上升到稳定的 41°C ,相比之下,加热

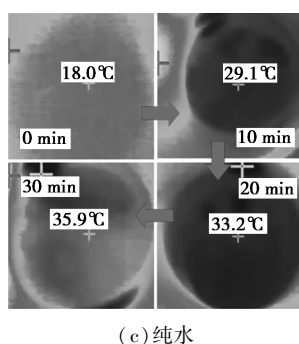
30 min 后空白凝胶和纯水的表面温度分别有限升高 17.1°C 和 17.9°C [图 6(b)、图 6(c)]。 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 30 min 温度升高 21.0°C ,表明太阳能可以有效地转化为热量进行局部蒸发^[17]。

这种局部加热可能导致 $\text{MoS}_2\text{-PH}$ 表面的蒸汽气泡自发形成并在薄水层中生长。当气泡的大小超过薄水层的厚度时,气泡将破裂,使大量的水直接转



(a) $\text{MoS}_2\text{-PH}$

(b) 空白凝胶



(c) 纯水

图 6 MoS₂-PH、空白凝胶和纯水

在 1 个太阳照射下不同时间的红外图

化为空气,而无需经历相变(液体到蒸汽),从而显著节省能源。

配置 3.5% 的氯化钠溶液用于模拟海水^[18],取 100 mL 3.5% 氯化钠溶液加入 200 mL 烧杯中,加入半径 1.5 cm、0.5 cm 厚度的 MoS₂-PH,该实验在 300 W 氙灯下进行,同时进行不加 MoS₂-PH 的空白实验对照,进行 6 h 的界面光蒸汽转化实验。实验结果见图 7。实验结果表明所制备的气凝胶蒸发器光热转换性能较好,加入凝胶单体丙烯酰胺质量 30% 的 MoS₂ 所制成的气凝胶(样品②)光热转换性能最佳,可达到 3.954 kg/(m²·h),优于目前的大多数凝胶蒸发器。

2.3 MoS₂-PH 的光催化降解性能测试

按照 1.3.4 进行测试,实验结果见图 7。

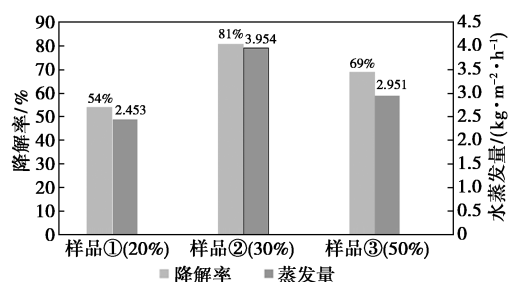


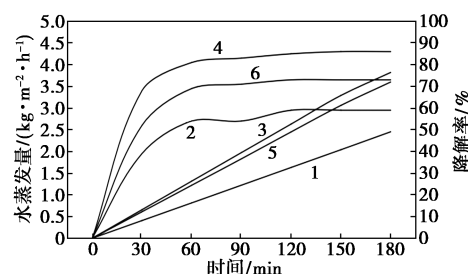
图 7 双功能气凝胶蒸发器水处理结果

实验结果表明,所制备的气凝胶对 MB 有较高的降解效率,加入凝胶单体丙烯酰胺质量 30% 的 MoS₂ 所制成的气凝胶(样品②)对 MB 的降解效果最好,50 min 内降解率为 81%。

2.4 MoS₂-PH 同时光催化及界面光蒸汽转化性能测试

取 97 mL 配好的 MB 溶液放入 200 mL 烧杯中,加入 3.5 g NaCl,加入 20 mg PMS,加入转子,加入半径 1.5 cm、0.5 cm 厚度的 MoS₂-PH,该实验在 300 W 氙灯下进行,同时进行不加 MoS₂-PH 的空白实验对

照,每隔 30 min 测试其对 MB 的降解率和水蒸发量,测试结果如图 8,双蒸发器表现出良好的光热蒸发和 AOP 诱导的催化降解的协同作用。



1—样品①水蒸发量;2—样品①降解率;3—样品②水蒸发量;4—样品②降解率;5—样品③水蒸发量;6—样品③降解率

图 8 MoS₂-PH 同时光催化及界面光蒸汽转化的测试结果

3 结论

通过交联发泡聚合法,以低带隙、富缺陷 MoS₂ 作为光响应材料,制备了一种用于界面蒸发和染料降解的双功能气凝胶蒸发器。合成的 MoS₂ 具有优异的吸光性,MoS₂-PH 具有丰富的孔隙结构和较高的染料催化活性。MoS₂-PH 内均匀分布的活性位点作为催化中心,将 PMS 分解为 SO₄^{·-}、·OH、O₂^{·-} 和 ¹O₂ 等活性自由基,达到降解污染物的目的。此外,由亲水性凝胶组成保证了水的快速输送。因此,双功能 MoS₂-PH 气凝胶蒸发器在 300 W 氙灯照射下,表现出快速的水分蒸发[3.954 kg/(m²·h)]和高效的污染物降解(81%),并表现出光热蒸发和 AOP 诱导的催化降解的协同作用。这项工作为实现淡水生产和污水净化的良好结合提供了一种新的途径。

参考文献

- [1] Hu R, Chang H, Zou Y, et al. Enhanced reverse osmosis concentrate disposal and nutrients conversion to microalgae bioenergy with a gradient-fed strategy [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(2): 874-882.
- [2] Teisala H, Tuominen M, Kuusipalo J. Superhydrophobic coatings on cellulose-based materials: Fabrication, properties, and applications [J]. Advanced Materials Interfaces, 2014, 1: 1300026.
- [3] Li P, Zheng T, Li L, et al. Efficiency and cost of bioecological rural wastewater treatment powered almost by wind and solar [J]. ACS ES&T Water, 2021, 1(3): 562-572.
- [4] Javed M, Sui Y, Nawaz M Z, et al. Integrated multi-layered fabric with tunable water supply to the photothermal conversion layer for an efficient solar water evaporation [J]. ACS ES&T Water, 2022, 2(5): 873-882.
- [5] Gao M, Zhu L, Peh C K, et al. Solar absorber material and system

- designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production[J]. *Energy Environ Sci*, 2019, 12: 841.
- [6] Arachchige I U, Brock S L. Sol-gel assembly of cds nanoparticles to form porous aerogel networks[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(24): 7964-7971.
- [7] Wen Y, Rentería-Gómez Á, Day G S, *et al.* Integrated photocatalytic reduction and oxidation of perfluorooctanoic acid by metal-organic frameworks: Key insights into the degradation mechanisms[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, 144(26): 11840-11850.
- [8] Sánchez J, Moreno A, Mondragón F, *et al.* Morphological and structural properties of MoS₂ and MoS₂-amorphous silica-alumina dispersed catalysts for slurry-phase hydroconversion[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(6): 7066-7077.
- [9] Chen L, Wang J, Yu L, *et al.* Experimental investigation on the nanosilica-reinforcing polyacrylamide/polyethylenimine hydrogel for water shutoff treatment[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(6): 6650-6656.
- [10] Liu K, Pan X, Chen L, *et al.* Ultrasoft self-healing nanoparticle-hydrogel composites with conductive and magnetic properties[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(5): 6395-6403.
- [11] Duan Y, Weng M, Zhang W, *et al.* Multi-functional carbon nanotube paper for solar water evaporation combined with electricity generation and storage [J]. *Energy Convers Manage*, 2021, 241: 114306.
- [12] Wani T A, Gupta V, Garg P, *et al.* In situ latent heat transfer for nearly 100% condensation in single-stage interfacial solar steam generation[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(26): 9595-9600.
- [13] Akbal F. Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of titanium dioxide under UV and solar light: Effect of operational parameter[J]. *Environ Prog*, 2005, 24: 317.
- [14] Gopalakrishnan D, Damien D, Shaijumon M M. MoS₂ quantum dot-interspersed exfoliated MoS₂ nanosheets [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(5): 5297-5303.
- [15] Koppens F H L, Mueller T, Avouris P, *et al.* Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems [J]. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9: 780.
- [16] He M, Herr A E. Polyacrylamide gel photopatterning enables automated protein immunoblotting in a two-dimensional microdevice [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(8): 2512-2513.
- [17] Jiang B P, Zhang L, Guo X L, *et al.* Poly(*N*-phenylglycine)-based nanoparticles as highly effective and targeted near-infrared photothermal therapy/photodynamic therapeutic agents for malignant melanoma[J]. *Small*, 2017, 13: 1602496.
- [18] Gao L, Zhang X, Fan L, *et al.* Algae-based approach for desalination: An emerging energy-passive and environmentally friendly desalination technology [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(26): 8663-8678. ■

(上接第 239 页)

(4) 对发酵油与牡丹籽油的抗氧化活性进行比较,结果表明,发酵油的抗氧化活性强于牡丹籽原油,发酵油的 DPPH·清除率可达到84%;·O₂⁻清除率达到 88% (IC₅₀ = 7.04 mg/mL)。

综合以上,通过最佳工艺条件得到的发酵油具有良好的感官效果、理化性质、乳化能力及抗氧化活性,对植物油用于护肤品行业具有重要意义。

参考文献

- [1] 毛方华,王鸿飞,周明亮.山茶油的功能特性[J]. *食品科技*, 2010, 35(1): 181-185.
- [2] 王姝畅,吴亚妮.山茶油在化妆品应用中的功效研究[J]. *香料香精化妆品*, 2018, (1): 67-71.
- [3] 张延龙,韩雪源,牛立新,等.9种野生牡丹籽油主要脂肪酸成分分析[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(4): 72-75, 79.
- [4] 张东,薛雅琳,段章群,等.牡丹籽油和亚麻籽油化学组成分析与比较[J]. *中国油脂*, 2017, 42(10): 34-38.
- [5] 刘向慧,张岩松,袁铭,等.牡丹不同部位的护肤功效研究进展[J]. *山东化工*, 2020, 49(23): 71-73.
- [6] 董绍军.油性皮肤用精华油须讲究[J]. *家庭医学*, 2022, (1): 45.
- [7] 朱向东.微生物发酵工艺优化研究进展[J]. *化工管理*, 2019, (16): 202, 205.
- [8] 谭文中.微生物发酵中草药及其活性物质的研究进展[J]. *现代盐化工*, 2021, 48(2): 12-13.
- [9] 刘晓雨,陈召,赵晓昱,等.离子液体在药物提取中的应用[J]. *应用化工*, 2019, 48(9): 2256-2259.
- [10] De Gaetano Y, Mohamadou A, Boudesocque S, *et al.* Ionic liquids derived from esters of glycine betaine: Synthesis and characterization [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 207: 60-66.
- [11] 王普,周丽敏,何军邀,等.离子液体在生物催化反应中的应用进展[J]. *浙江工业大学学报*, 2008, 36(6): 622-627.
- [12] 付丽,甄玉国,赵巍,等.乳酸杆菌 BRF01 发酵条件的优化[J]. *中国饲料*, 2014, (17): 31-33.
- [13] 段章群,薛雅琳.我国油料油脂品质评价标准的研究与展望[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(5): 101-109.
- [14] 张志秋.基于不同结构乳化剂的活性原油界面性能及流变性能研究[D].大庆:东北石油大学, 2020.
- [15] 李静,邓毛程,陈维新,等.植物油酯生物合成表面活性剂及产物分析[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(4): 171-176.
- [16] 陈鹏飞,梅新,黄士荣,等.不同品种马铃薯薯尖的总酚、总黄酮含量及抗氧化活性比较[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(3): 132-138.
- [17] 梁思琪,郑祝,管佩瑶,等.尖叶四照花籽油理化性质及抗氧化活性分析[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(5): 94-97.
- [18] 粟春兰,杨宪,郑红,等.木香籽油理化性质及脂肪酸组成分析[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(1): 75-77. ■