

引用本文: 孟庆祥, 石强, 陈安祥, 刘媚妍. 基于 $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ /PVDF 复合杂化膜的光催化降解性能与稳定性研究 [J]. 离子交换与吸附, 2026, 42(3): 175-182.

Citation: MENG Qing-xiang, SHI Qiang, CHEN An-xiang, LIU Mei-yan. Photocatalytic Degradation Performance and Stability of $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ /PVDF Hybrid Composite Membranes [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2026, 42(3): 175-182.

文章编号: 1001-5493(2026)03-0175-08

DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2026030175

基于 $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ /PVDF 复合杂化膜的光催化降解性能与稳定性研究*

孟庆祥, 石强**, 陈安祥, 刘媚妍

(华北理工大学材料科学与工程学院, 唐山 063210)

摘要: 文章通过在 MXene 片层上水热生长 MoS_2 , 制备了 $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ 负载型催化剂, 并以 PVDF 为载体, 采用非溶剂诱导相分离法构建光催化膜。实验结果表明, 通过原位 HF 法成功剥离得到 MXene 纳米片, 并在其表面水热生成花状 MoS_2 , XRD、FTIR 等测试结果证实了其成功制备。紫外-可见漫反射光谱与光电化学测试显示, $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ 的催化性能优于 MoS_2 , 其中 $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ -40 催化剂与 $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ /PVDF-2 光催化膜的降解性能最优, 在光照 60 min 和 120 min 后对罗丹明 B 的降解率分别为 70.1% 和 88.8%, 对四环素的降解率分别为 72% 和 78%。经 3 次循环后, 材料降解率仍可维持初始值的 94.77%, 展现出良好的稳定性。

关键词: MoS_2 , MXene, PVDF, 光催化

中图分类号: O647.3 **文献标志码:** A

1 前言

当前, 水环境污染问题日益严峻, 尤其是有机污染物问题不断加剧, 已对人类健康和生态系统构成严峻威胁^[1-5]。在各类水处理技术中, 半导体光催化技术可直接利用太阳能驱动反应, 具有污染物降解彻底、环境友好等优势, 是极具应用前景的解决方案。然而, 该技术在实际推广应用仍面临核心挑战: 光催化材料的催化效率与稳定性不佳, 且粉末催化剂难以回收再利用。

二硫化钼 (MoS_2) 作为典型的过渡金属硫化物半导体, 具有合适的能带结构和丰富的活性位点, 在光催化领域展现出良好的应用潜力。但其本征特性存在明显缺陷: 光生电子-空穴对极易复合, 导致光催化效率偏低; 长期光照下易发生光腐蚀, 材料稳定性较差; 粉末形态使

其在实际水处理中难以分离回收, 造成二次污染并增加成本^[6-11]。因此, 提升 MoS_2 的光生电荷分离效率、解决催化剂回收难题, 是推动其实际应用的关键。

新兴二维材料 MXene (如 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$), 具有类金属的高导电性、丰富的表面官能团 ($-\text{OH}$ 、 $=\text{O}$)、优异的亲水性和较大的比表面积^[12-17], 为 MoS_2 的改性提供了理想载体。构建 $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ 异质结可有效解决光生电子-空穴对易复合的问题: MXene 可作为高效的电子受体和传导通道, 显著加速 MoS_2 光生电子的转移, 抑制复合, 从而提升材料的光催化活性与稳定性。同时, 实现光催化剂的固定化是其推广应用的必然路径。聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜具有优异的化学稳定性、力学强度和成熟的制膜工艺, 在膜分离领域得到广泛应用^[18]。将高性能光催化剂

* 收稿日期: 2025-07-27

作者简介: 孟庆祥 (1999—), 硕士研究生。

**通信作者: 石强, E-mail: shiq_1989@163.com。

MoS₂@MXene固载于PVDF膜基质,可研发出兼具高效光催化降解功能和膜分离特性的光催化自清洁膜。这类有机-无机杂化膜不仅能利用光催化作用降解污染物、缓解膜污染问题,还能通过简单的物理分离实现催化剂的便捷回收与循环使用,具有显著的实际应用价值。

基于此,本研究提出一种协同策略:首先,通过水热法在MXene纳米片上原位生长MoS₂,制备高性能MoS₂@MXene光催化剂,提高材料的光吸收能力与电荷分离效率;其次,采用非溶剂诱导相分离(NIPS)法将MoS₂@MXene负载于PVDF基体,制备MoS₂@MXene/PVDF复合杂化的光催化膜,实现催化剂的易回收与重复利用。

2 实验部分

2.1 试剂和仪器

实验试剂:钛碳化铝(Ti₃AlC₂)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、氟化锂(LiF),购自上海泰坦科技股份有限公司;硫脲,购自上海麦克林生化科技股份有限公司;罗丹明B,购自天津市大茂化学试剂厂;钼酸铵、无水乙醇、氢氧化钠(NaOH),购自天津市永大化学试剂有限公司;N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP),购自天津市科密欧化学试剂有限公司;PVDF(苏威-6010),购自苏威集团;以上试剂均为分析纯。

实验仪器:PLS-SXE300氙灯光源,北京泊菲莱科技有限公司;T6新世纪紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;DZF-6030A真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;FX101-1电热鼓风干燥箱,上海树立仪器仪表有限公司;TG-20高速离心机,四川蜀科仪器有限公司。

2.2 实验方法

2.2.1 MXene纳米材料的制备

在聚四氟乙烯烧杯中加入4.8 g LiF粉末与20 mL浓度为9 mol/L的浓盐酸,搅拌10 min至LiF完全溶解;随后分多次缓慢加入3 g Ti₃AlC₂粉末,持续搅拌,室温下搅拌反应24 h。将反应后的产物以8000 r/min转速离心5 min,得到黑色浆状产物,用去离子水和无水乙醇反复离心洗涤,直至上清液pH值呈中性。最后,将制得的浆状产物置于60 °C真空干燥箱中干燥12 h。

将干燥后的产物放入研钵中研磨,得到MXene。

2.2.2 MoS₂@MXene复合材料的制备

MoS₂@MXene复合材料采用水热法制备:将0.0122 g SDBS、1.236 g 钼酸铵和1.197 g 硫脲加入35 mL去离子水中,在室温下超声30 min。复合材料组按MoS₂的质量分别添加质量分数为0%、20%、40%、60%、80%的MXene,其他步骤相同,样品依次命名为MoS₂、MoS₂@MXene-20、MoS₂@MXene-40、MoS₂@MXene-60和MoS₂@MXene-80。

将超声处理后的溶液转移至聚四氟乙烯高压反应器中,220 °C下反应24 h。用去离子水和乙醇以8000 r/min转速离心洗涤粉末,直至上清液pH值为6~7。将所得黑色粉末置于60 °C烘箱中干燥过夜,研磨后得到MoS₂@MXene复合材料粉末。

2.2.3 MoS₂@MXene/PVDF光催化膜的制备

复合膜采用NIPS法制备:先将MoS₂@MXene粉末和NMP混合超声30 min,确保粉末充分分散,随后加入PVDF和PVP-K30,在60 °C下搅拌5 h,具体配方如表1所示。将溶解完全的铸膜液在40 °C下脱泡12 h,再以质量分数为40%的NMP溶液为凝固浴进行刮膜,制备完成的膜保存在去离子水中,以备后续实验使用。

表1 MoS₂@MXene/PVDF的制备方案。

Table 1 Preparation scheme of MoS₂@MXene/PVDF.

组别	PVDF (%)	MoS ₂ @MXene (%)	PVP-K30 (%)	NMP (%)
MoS ₂ @MXene/PVDF-0	15	0	5	80
MoS ₂ @MXene/PVDF-2	15	2	5	78
MoS ₂ @MXene/PVDF-4	15	4	5	76
MoS ₂ @MXene/PVDF-6	15	6	5	74
MoS ₂ @MXene/PVDF-8	15	8	5	72

2.3 光催化实验

2.3.1 MoS₂@MXene复合粉末的光催化降解实验

光催化模拟实验在自制光化学反应装置中进行。首先,配制浓度为20 mg/L的罗丹明B溶液,采用紫外-可见分光光度计在波长为552 nm波长下测试其初始吸光度A₀;其次,在50 mL染料溶液中加入20 mg催化剂,进行黑暗条件下

的吸附实验, 吸附 30 min 后取少量溶液测试吸光度; 最后, 将含催化剂的染料溶液放置在氙灯正下方开展光催化降解实验, 每隔 10 min 取少量溶液测试其吸光度 A_t (t 为当前光照时间)。为验证催化剂的普适性, 选取 20 mg/L 的四环素溶液进行降解测试, 操作步骤与罗丹明 B 降解实验一致。

2.3.2 $\text{MoS}_2/\text{MXene}/\text{PVDF}$ 光催化膜的光催化降解实验

采用 50 mL 浓度为 5 mg/L 的罗丹明 B 溶液和 5 mg/L 的四环素溶液, 膜用量为 50 mg。先进行 1 h 暗反应吸附, 吸附完成后取少量溶液测试其吸光度; 随后将含催化膜的染料溶液放置在氙灯正下方进行光催化降解实验, 每隔 20 min 测试一次溶液吸光度。

2.3.3 $\text{MoS}_2/\text{MXene}/\text{PVDF}$ 光催化膜的光催化循环实验

光催化测试后的复合膜用乙醇反复冲洗, 再置于无水乙醇中浸泡 12 h, 确保膜内无残留溶液, 随后在 60 °C 条件下干燥。重复上述光催化实验步骤, 测试材料的循环使用性能。

2.4 干湿重法测孔隙率

将膜样品置于 60 °C 真空干燥箱中干燥至恒重, 去除游离水和吸附水, 称重并记为 W_{dry} ; 随后, 测量膜的面积 S 和厚度 d ; 将干燥后的膜完全浸入去离子水中, 确保孔隙充分被液体填充, 取出后拭去表面水分, 立即称重得到 W_{wet} 。膜样品体积按式 (1) 计算, 膜样品孔隙率 P 按式 (2) 计算:

$$V = S \times d \quad (1)$$

$$P = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{\rho_{\text{water}} \times V} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ρ_{water} 为水的密度, 取 1 g/cm³。

3 结果与讨论

3.1 MXene 及 $\text{MoS}_2/\text{MXene}$

图 1(a) 和图 1(b) 分别为化学蚀刻前后 Ti_3AlC_2 的扫描电子显微镜 (SEM) 图, 蚀刻后的 Ti_3C_2 呈现典型的手风琴状多层片层结构, 证明 Ti_3AlC_2 中的 Al 层被成功蚀刻, 单个层状纳米片的厚度使材料具有纳米尺度的微观结构。图 1(c) 为蚀刻前后样品的 X 射线衍射分析 (XRD) 谱图,

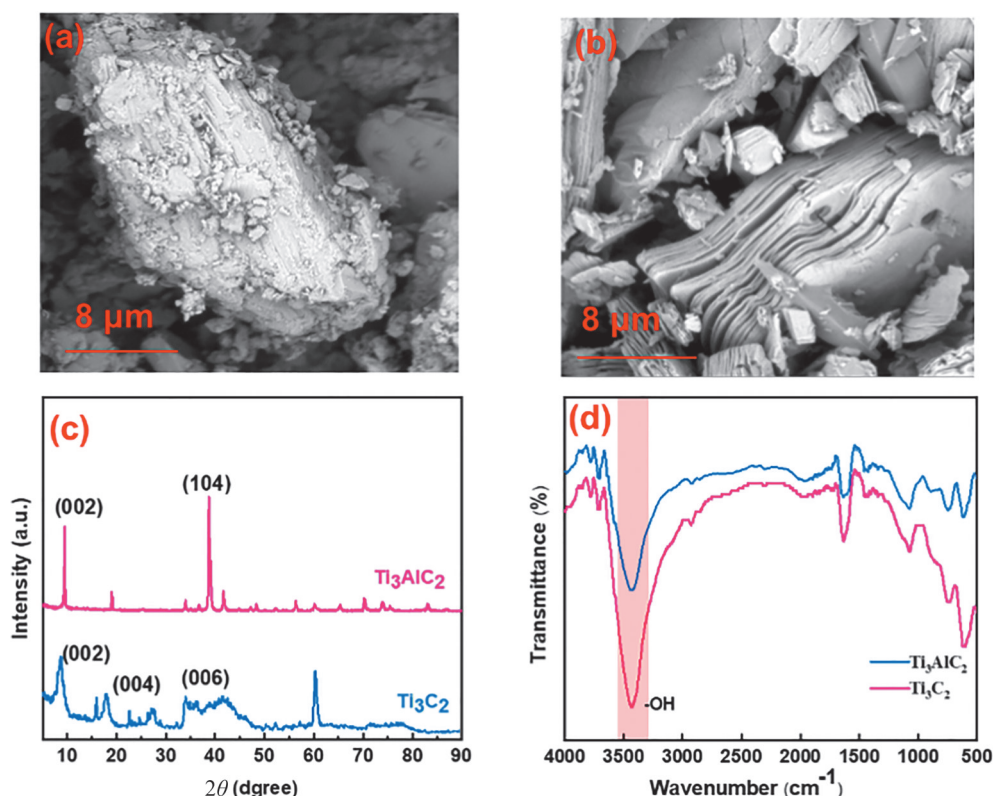


图1 (a) 原料 Ti_3AlC_2 的 SEM 图; (b) 蚀刻后 Ti_3C_2 的 SEM 图; (c) Ti_3AlC_2 和 Ti_3C_2 的 XRD 谱图; (d) Ti_3AlC_2 和 Ti_3C_2 的 FTIR 谱图。
Figure 1 (a) SEM image of the raw material Ti_3AlC_2 ; (b) SEM image of Ti_3C_2 after etching; (c) XRD patterns of Ti_3AlC_2 and Ti_3C_2 ; (d) FTIR spectra of Ti_3AlC_2 and Ti_3C_2 .

结果表明: 蚀刻后, (104) 晶面的特征峰消失, 证明 Al 元素被成功刻蚀^[13]; 同时, (002) 晶面的特征峰的强度显著下降, 半峰宽增大, 且向低角度偏移, 证明蚀刻后形成了 MXene 片层结构。傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 结果表明 (图 1(d)), 3435 cm^{-1} 和 1624 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应—OH 和 C—O 的振动吸收峰, 这是由于蚀刻过程中, 强酸性溶液的强氧化作用, 使 MXene 表面出现大量—OH 基团和含氧基团。

图 2(a) 为 $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 复合催化剂的 SEM 图, 可清晰观察到 MXene 纳米片表面生长出花状 MoS_2 结构, 直观证实了 $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 复合催化剂成功制备。在 $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 催化剂的 XRD 图谱中 (图 2(b)), 14.4°、33.4° 和 58.9° 处的峰分别对应 MoS_2 晶相的 (002)、(100) 和 (110) 晶面^[19-20], 且各峰强度随着 MoS_2 含量的增加而增强。此外, $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 复合物的衍射峰尖锐且特征明显, 表明材料结晶性能优异, 为 MoS_2 与 MXene 之间高效的电荷转移提供了结构基础。FTIR 光谱进一步表征了材料表

面的官能团 (图 2(c)) 组成: 3300~3500 cm^{-1} 范围内的宽吸收带源于吸附水分子中 O—H 键的伸缩振动; $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 复合催化剂在约 1464 cm^{-1} 处的特征峰归属于 S—Mo—S 键的振动, 510 cm^{-1} 处的峰则对应 S—S 键的振动; 同时, 581 cm^{-1} 附近的特征峰为 MXene 中 Ti—C 键的振动吸收峰。

3.2 催化剂的性能测试

为了深入探究复合材料光催化剂性能提升的内在机理, 对其光学性能进行系统表征。图 3(a) 为 MoS_2 、MXene 和 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 在 200~800 nm 波长范围内的吸光度曲线, 3 种材料均表现出较强的光吸收能力, 复合后的 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 可见光吸收能力显著提升, 且吸光度高于 MoS_2 和 MXene, 说明复合催化剂可有效提高材料对可见光的利用率。图 3(b) 为根据 Kubelka-Munk 理论绘制的 MoS_2 和 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 的 Tauc 曲线, 经计算, $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 的带隙为 1.79 eV, 低于纯 MoS_2 的 1.90 eV, 证明复合后催化剂的催化性能得到提高^[17]。

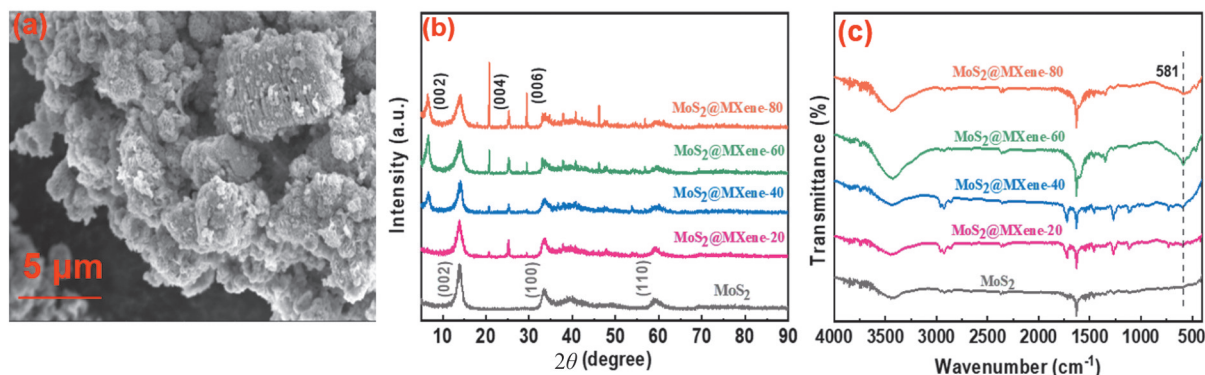


图 2 (a) $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 的 SEM 图; (b) MoS_2 、 $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 的 XRD 图; (c) MoS_2 、 $\text{MoS}_2@\text{MXene}$ 的 FTIR 图谱。

Figure 2 (a) SEM image of $\text{MoS}_2@\text{MXene}$; (b) XRD patterns of MoS_2 and $\text{MoS}_2@\text{MXene}$; (c) FTIR spectra of MoS_2 and $\text{MoS}_2@\text{MXene}$.

图 3(c) 为材料的光电流响应曲线。在相同测试条件下, MoS_2 和 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 复合光催化剂均产生快速的光电流响应, 且复合光催化剂的瞬态响应高于纯 MoS_2 。这表明在光照条件下, $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 表现出更强的光电流, 载流子传输特性更优异, 可高效分离光生电子-空穴对, 从而提升光催化活性。

为研究 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 光生载流子的分离和迁移性质, 对 MoS_2 、MXene 和 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 进行电化学阻抗谱 (EIS) 测试 (图 3(d))。结果显示, $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 的 Nyquist 曲线圆弧曲

率半径小于纯 MoS_2 , 表明其具有较小的电荷转移阻力和较高的表面光生载流子分离与迁移效率。由此可见, MXene 和 MoS_2 的结合降低了电极表面的电荷转移电阻, 提高了光生载流子的分离效率和迁移速率。

图 3 (e) ~ (f) 为材料的 Mott-Schottky 曲线图谱, 所有样品的曲线斜率均为正值, 符合 n 型半导体特征; 其中, MoS_2 和 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 的平带电位 (E_{fb}) 分别为 -0.61 eV 和 -0.47 eV。 $\text{MoS}_2@\text{MXene-40}$ 的 Mott-Schottky 曲线斜率更小, 说明载流子分离效率更高, 光催化性能更优异^[13]。

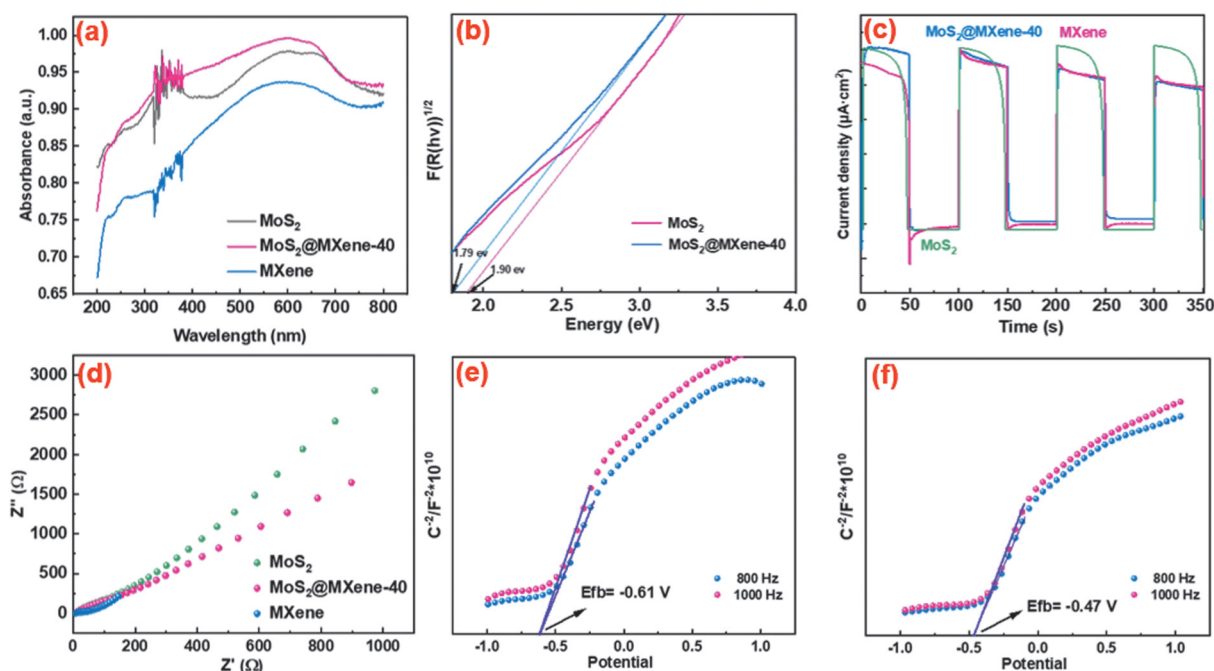


图3 (a) MoS_2 、 $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$ 和 MXene 的紫外-可见漫反射光谱; (b) MoS_2 和 $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$ 的 Tauc 曲线; (c) 光催化剂的瞬态光电流谱; (d) 光催化剂的 EIS; (e) MoS_2 和 (f) $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$ 在 800 Hz 和 1000 Hz 下的 Mott-Schottky 曲线拟合图谱。

Figure 3 (a) Ultraviolet-visible diffuse reflectance spectra of MoS_2 , $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$ and MXene; (b) Tauc curves of MoS_2 and $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$; (c) Transient photocurrent spectra of the photocatalyst; (d) Electrochemical impedance spectra of the photocatalyst; Mott-Schottky curve fitting diagrams of MoS_2 (e) and $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$ (f) at 800 Hz and 1000 Hz.

3.3 粉末催化剂的催化性能

图 4 (a) ~ (b) 分别为不同负载量的催化剂对罗丹明 B 和四环素的降解曲线。在无光条件下, 罗丹明 B 和四环素浓度均有所下降, 这是材料对污染物的吸附作用所致; 开启光源后, 纯 MoS_2 对罗丹明 B 几乎无降解效果^[21], 而使用复合催化剂 $\text{MoS}_2/\text{MXene}$ 后, 罗丹明 B 浓度下降, 其中 $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$ 的催化性能最优, 光

照 60 min 后, 对罗丹明 B 的降解率为 70.1%。此外, 粉末催化剂对四环素的降解实验结果表明, 所有催化剂均能降解四环素, 其中 $\text{MoS}_2/\text{MXene-40}$ 仍具有最佳降解性能, 光照 60 min 后, 对四环素的降解率为 72%。

3.4 $\text{MoS}_2/\text{MXene}/\text{PVDF}$ 复合杂化膜结构与分离性能

图 5 (a) ~ (b) 为 $\text{MoS}_2/\text{MXene}/\text{PVDF}$ 复合

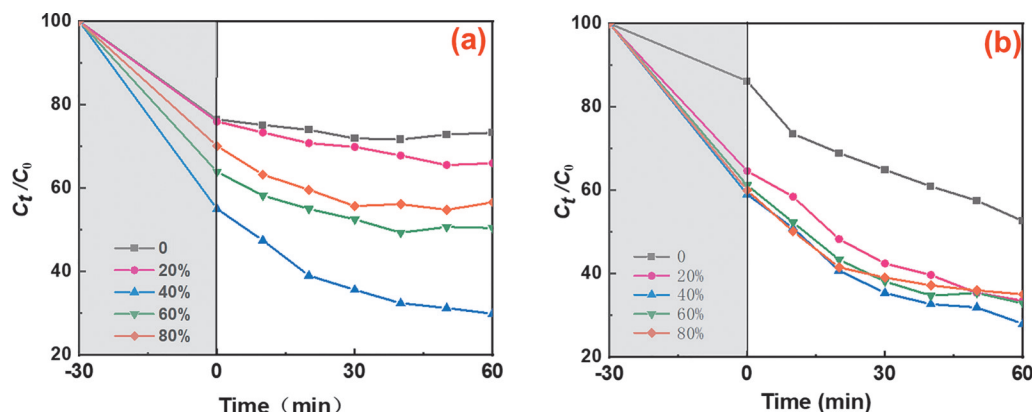


图4 (a) 粉末催化剂光催化降解罗丹明 B; (b) 粉末催化剂光催化降解四环素。

Figure 4 (a) Photocatalytic degradation of Rhodamine B by powder catalyst; (b) Photocatalytic degradation of Tetracycline by powder catalyst.

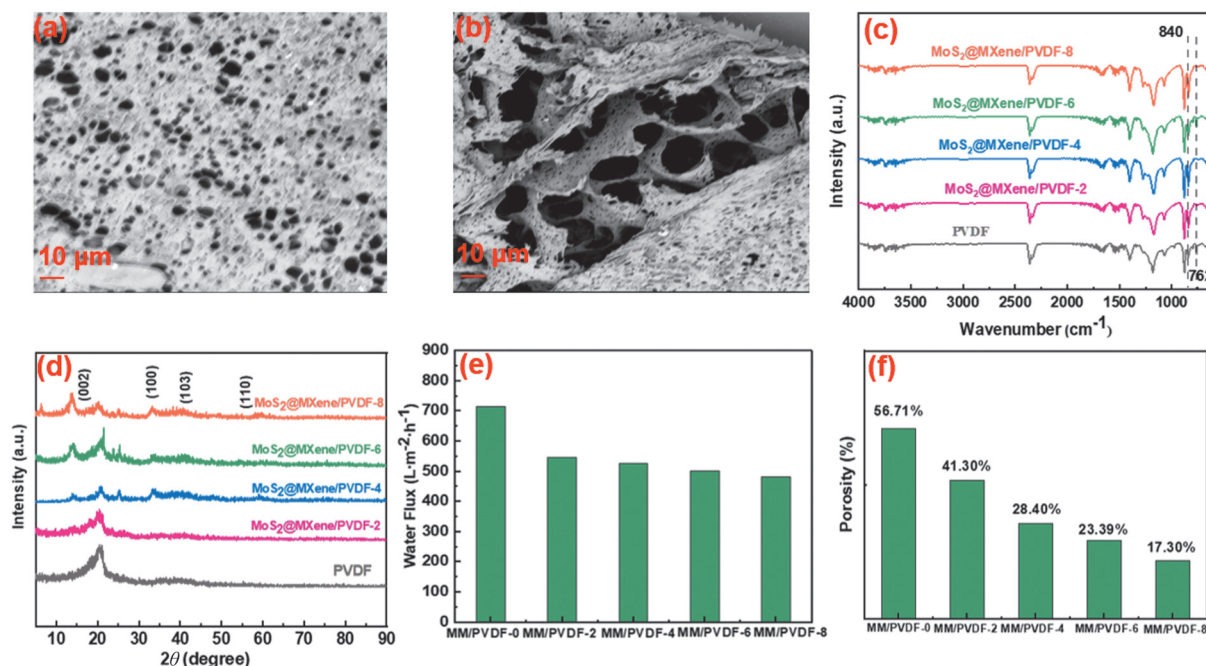


图5 (a) MoS₂@MXene/PVDF膜表面SEM图; (b) MoS₂@MXene/PVDF膜横截面SEM图; (c) PVDF、MoS₂@MXene/PVDF的FTIR图谱; (d) PVDF、MoS₂@MXene/PVDF的XRD图谱; (e) MoS₂@MXene/PVDF膜的水通量; (f) MoS₂@MXene/PVDF膜的孔隙率。

Figure 5 (a) SEM image of the surface of MoS₂@MXene/PVDF membrane; (b) SEM image of the cross-section of MoS₂@MXene/PVDF membrane; (c) FTIR spectra of PVDF and MoS₂@MXene/PVDF; (d) XRD spectra of PVDF and MoS₂@MXene/PVDF; (e) Water flux of MoS₂@MXene/PVDF membrane; (f) Porosity of MoS₂@MXene/PVDF membrane.

杂化膜表面SEM图,可见膜表面和内部形成了大小不一的孔,这种多孔结构有利于光线的折射与散射,进而提高光催化性能。图5(c)~(d)分别为纯PVDF膜和复合膜的FTIR与XRD图谱,图中出现了PVDF膜 α 相(762 cm⁻¹)和 β 相(840 cm⁻¹)的特征峰;随着催化剂掺入浓度的提高,MoS₂(002)、(100)及(110)晶面的特征峰强度逐渐增大,证明MoS₂@MXene催化剂成功负载到PVDF基膜上。图5(e)为MoS₂@MXene/PVDF膜的通量数据,掺入

催化剂后,膜通量由713.86 L/(m²·h)降至480.78 L/(m²·h)。这可能是引入催化剂后膜孔隙率下降所致(图5(f))。

3.5 光催化膜的催化性能与循环性能

图6(a)~(b)分别为不同MoS₂@MXene/PVDF杂化膜对罗丹明B和四环素的降解图,可见纯PVDF膜对两种污染物均无降解性能,在1 h内均达到吸附平衡;添加了粉末催化剂的PVDF膜对两种污染物均具有降解性能,其中催化剂添加量为2%的组别催化性能最优,光照

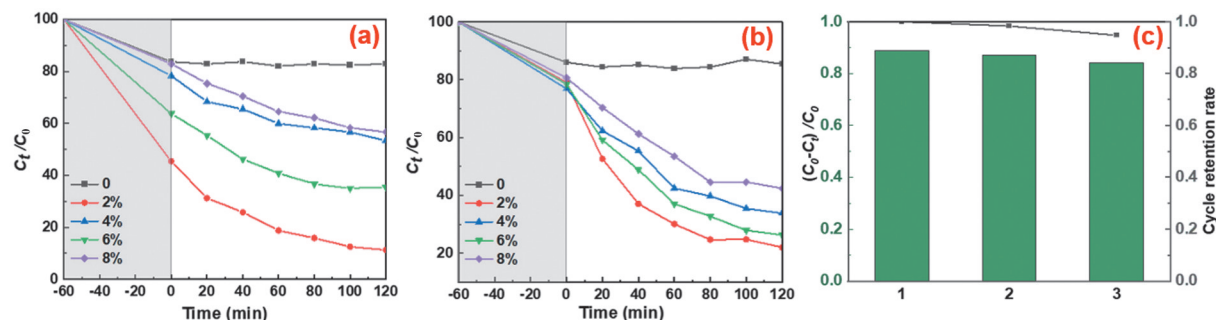


图6 (a) 复合杂化膜光催化降解罗丹明B; (b) 复合杂化膜光催化降解四环素; (c) 循环使用性能。

Figure 6 (a) Photocatalytic degradation of Rhodamine B by the composite hybrid membrane; (b) Photocatalytic degradation of Tetracycline by the composite hybrid membrane; (c) Performance of repeated use.

120 min 后, 对罗丹明 B 的降解率为 88.8%, 对四环素的降解率达到 78%。结合图 5(f) 中不同复合膜的孔隙率数据可知, 催化剂添加量为 2% 的组别孔隙率最高, 为 41.3%, 既可提供充分的光线通路, 又能暴露更多催化位点, 因此催化性能最佳; 随着粉末催化剂添加量的增加, 膜的孔隙率下降, 催化剂被膜包裹, 导致催化性能降低。光降解实验后, 对复合膜进行充分清洗, 经 3 次催化降解后, 膜对污染物的降解率仍保持在初始值的 94.77% (图 6(c)), 证明 $\text{MoS}_2/\text{MXene}/\text{PVDF}$ 光催化膜具有良好的循环性能, 为后续实际应用研究奠定了基础。

4 结 论

综上所述, 本研究采用原位法成功剥离出 MXene 纳米片, 通过简单的水热法将 MoS_2 负载于纳米片, 再利用 NIPS 法制备出 $\text{MoS}_2/\text{MXene}/\text{PVDF}$ 光催化膜。通过相关降解实验, 得出以下结论: (1) 当 MXene 的质量分数为 MoS_2 的 40% 时, 其催化性能最佳, 不仅可明显提高吸光性能, 还具有较小的电荷转移阻力和较高的表面光生载流子分离与迁移效率; (2) 当 $\text{MoS}_2/\text{MXene}$ 在 PVDF 中的添加量为 2% 时, 复合膜的孔隙率最高, 光催化性能最优, 且经 3 次循环实验后, 降解率仍达初始值的 94.77%。

参考文献

- 1 银淑铮, 刘刚, 方俊. 重金属与四环素类抗生素对发光菌的毒性研究 [J]. 农业环境科学学报, **2023**, 42(11): 2422-2429.
- 2 王挺, 徐坤苗, 吴礼光, 等. 基于地下水中四环素去除的缓释剂构建及其性能 [J]. 环境科学学报, **2022**, 42(6): 167-177.
- 3 马锋锋, 焦雅仙, 李庆, 等. 氨基功能化 MIL-53(Fe) 对罗丹明 B 的吸附性能及机制研究 [J]. 环境科学学报, **2025**, 45(7): 243-257.
- 4 张霞, 白羽石, 常熙, 等. BiOCl /聚苯胺的制备及其光催化降解罗丹明 B 性能 [J]. 无机化学学报, **2025**, 41(5): 913-922.
- 5 罗仙平, 李志豪, 唐学昆, 等. MnO_2 /纤维水镁石复合材料的制备及其活化 PMS 降解罗丹明 B [J]. 工业水处理, **2026**, 46(1): 138-146.
- 6 刘庆旺. $\text{MoS}_2/\text{Ag}/\text{g-C}_3\text{N}_4$ Z 型异质结的制备及其光催化性能 [J]. 无机化学学报, **2025**, 41(4): 821-832.
- 7 陆驰豪, 吕函函, 刘焕生, 等. 缺陷型 $\text{MoS}_2/\text{v-Mn}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{S}$ 的制备及其光催化析氢性能 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), **2025**, 51(3): 111-119.
- 8 刘发强, 夏培蓓, 吴咏梅. S 型 $\text{MoS}_2/\text{pg-C}_3\text{N}_4$ 异质结的构建及其光催化性能研究 [J]. 化工新型材料, **2025**, 53(7): 207-214.
- 9 胡琴, 陈柳云, 谢新玲, 等. Ni 掺杂构建电子桥及激活 MoS_2 惰性基面增强光催化分解水产氢 [J]. 物理化学学报, **2024**, 40(11): 44.
- 10 胡琴. $\text{MoS}_2/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$ 复合材料的结构调控及其光催化分解水产氢的研究 [D]. 南宁: 广西大学, **2024**.
- 11 毛梁, 翁海峰, 蔡晓燕. 少层 2H- MoS_2 包覆 $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 纳米台阶异质结构的设计及其高效光催化制氢 [J]. 光学学报, **2025**, 45(4): 144-153.
- 12 李红梅, 邱春生, 毛捷, 等. $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{MXene}$ 复合光催化材料的制备及其降解卡马西平性能 [J]. 环境科学学报, **2025**, 45(6): 68-78.
- 13 雒丽娜, 陈常东, 王芳芳. $\text{MXene}/\text{TiO}_2/\text{Co-MoS}_2\text{-xO}_y$ 复合材料的制备及其光催化性能研究 [J]. 石油化工高等学校学报, **2025**, 38(1): 74-80.
- 14 邹敏敏, 刘敬欣, 胡浩琳, 等. 电催化析氢二维 Mo_2CT_x MXene 材料研究进展: 从制备到应用 [J]. 无机材料学报, **2025**, 40(11): 1173-1187.
- 15 马军, 徐冰, 曹硕, 等. 反应条件下 $\text{Ni}/\text{Mo}_2\text{CT}_x$ MXene 催化剂结构演变调节 CO_2 还原性能 [J]. 催化学报, **2025**, 72(5): 243-253.
- 16 龚俊杰, 朱颖, 胡坤宏. $\text{MoS}_2/\text{MXene}$ 催化合成癸二酸二辛酯及其摩擦学性能研究 [J]. 合肥大学学报, **2025**, 42(2): 65-71.
- 17 李钦, 张慧慧, 顾华军, 等. Ti_3C_2 MXene 纳米片上原位生长的 $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$ 纳米棒实现高效可见光催化析氢

- [J]. 物理化学学报, **2025**, 41(4): 70-80.
- 18 董陈, 马泽群, 张志燃, 等. PVDF-HFP 柔性压电-光催化薄膜的制备及其降解罗丹明 B [J/OL]. 材料导报, **2025**:1-14[2025-06-24]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20250528.1105.020>.
- 19 王娜, 徐映琴, 黄国芳, 等. $\text{MoO}_x\text{-MoS}_2\text{/PPy}$ 三元纳米杂化复合催化剂的制备及电催化析氢性能研究 [J]. 复合材料学报, **2025**, 42(11): 6483-6495.
- 20 曹健, 金豆豆, 董朝旭, 等. $\text{MoS}_2\text{/Ni}_3\text{S}_2\text{@N-rGO}$ 异质结纳米片阵列的制备及电催化性能研究 [J]. 吉林师范大学学报 (自然科学版), **2025**, 46(2): 40-47.
- 21 范雪雪. Fe 掺杂 MoS_2 催化剂的制备及其降解罗丹明 B 的性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, **2022**.

Photocatalytic Degradation Performance and Stability of $\text{MoS}_2\text{@MXene/}$ PVDF Hybrid Composite Membranes

MENG Qing-xiang, SHI Qiang*, CHEN An-xiang, LIU Mei-yan

(North China University of Science and Technology, College of Materials Science and Engineering,
Tangshan 063210, China)

Abstract $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ supported catalyst was prepared by hydrothermal growth of MoS_2 on MXene sheets, and photocatalytic membrane with PVDF as the carrier was constructed by the nonsolvent-induced phase separation method. The experimental results showed that MXene nanosheets were successfully exfoliated by the in-situ HF method and flower-like MoS_2 was hydrothermally grown on their surface. The successful preparation was confirmed by XRD, FTIR and other test results. The UV-Vis diffuse reflectance spectrum and photoelectrochemical tests indicated that the catalytic performance of $\text{MoS}_2\text{@MXene}$ was superior to that of MoS_2 . Among them, the $\text{MoS}_2\text{@MXene-40}$ catalyst and $\text{MoS}_2\text{@MXene/PVDF-2}$ photocatalytic membrane had the best degradation performance. After 60 and 120 min of illumination, the degradation rates of Rhodamine B were 70.1% and 88.8%, respectively, and the degradation rates of tetracycline were 72% and 78%, respectively. After three cycles, the degradation rate of the material could still be maintained 94.77% of the initial value, which demonstrated good stability.

Keywords MoS_2 , MXene, PVDF, Photocatalysis

* Corresponding author: SHI Qiang, E-mail: shiq_1989@163.com.