

# Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 异质结的界面调控及其压电协同催化性能研究

葛吕洁, 毛辉麾\*

(常州大学石油化工学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:**针对传统铁基催化剂易浸出、循环性差的问题,通过 Fe 掺杂与 Flaws-MoS<sub>2</sub> 复合策略,在 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 基底上构建了三元异质结催化剂 (Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>),系统探究了界面调控对压电协同催化的增强机制。结果表明:Fe 掺杂显著提升了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的比表面积 (15 m<sup>2</sup>/g 增至 80.95 m<sup>2</sup>/g),并通过形成 Fe-N<sub>x</sub> 活性位点抑制铁离子浸出;Flaws-MoS<sub>2</sub> 的边缘 S 位点诱导酸性微环境,促进 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 循环效率,同时异质结结构加速光生载流子分离。优化后的催化剂 (x=3%) 在超声协同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 条件下,20 min 内对罗丹明 B (RhB) 的去除率达 99.91% ( $k_{\text{obs}}=0.2449 \text{ min}^{-1}$ ),较纯 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 提升近 5 倍。自由基淬灭实验证实 ·OH 为主导活性物种,EPR 表征进一步揭示了 ·O<sub>2</sub><sup>-</sup> 与 ·OH 的协同作用。此外,压电催化性能与光芬顿效率相当 (可见光+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 99.41%),5 次循环后仍保持 87.57% 活性。

**关键词:**铁基催化剂;界面工程;异质结;压电催化

中图分类号:TQ31

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)03-0166-09

DOI:10.16606/j.cnki.iissn0253-4320.2026.03.027

## Defective MoS<sub>2</sub>/Fe-doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterojunction composites for enhancing advanced oxidation processes

GE Lv-jie, MAO Hui-hui\*

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

**Abstract:**To address the challenges of iron leaching and poor recyclability in traditional Fenton systems, a ternary heterojunction catalyst (Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) was constructed via Fe doping and defective MoS<sub>2</sub> coupling on a g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> substrate. The interfacial regulation mechanism and piezoelectric-catalytic synergy were systematically investigated. Results demonstrated that Fe doping significantly increased the specific surface area of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (from 15 to 80.95 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>) and stabilized Fe sites through Fe-N<sub>x</sub> bonding, effectively suppressing iron leaching. The edge S defects in MoS<sub>2</sub> induced an acidic microenvironment, enhancing Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> cycling and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> activation. The optimized catalyst (3% Fe) achieved a RhB removal rate of 99.91% ( $k_{\text{obs}}=0.2449 \text{ min}^{-1}$ ) within 20 min under ultrasound-assisted H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> conditions, outperforming pristine Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by 5-fold. Quenching experiments confirmed ·OH as the dominant reactive species, while EPR analysis revealed synergistic contributions from ·O<sub>2</sub><sup>-</sup> and ·OH. Notably, the piezoelectric-catalytic efficiency (Visible light with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 99.41%) rivaled photo-Fenton performance, and the catalyst retained 87.57% activity after 5 cycles.

**Key words:** iron-based catalyst; interface engineering; heterojunction; piezoelectric catalysis

近几十年来,环境污染问题日益严峻,国际社会对污染物治理制定了更为严格的标准,尤其在生物与化工领域,生产过程排放的高毒性污染物对水环境构成显著威胁,亟需开发高效绿色的废水处理技术。传统化学氧化法虽可将污染物降解为小分子(如 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O),但对高稳定性污染物的处理效率有限。在此背景下,高级氧化工艺(Advanced Oxidation Processes, AOPs)因其能通过光、热或催化剂诱导产生高活性羟基自由基(·OH),实现有机污染物的深度矿化而备受关注<sup>[1]</sup>。与传统技术相比,AOPs 在

反应条件适应性、矿化彻底性及运行成本方面优势显著,尤其适用于难降解毒性物质的去除<sup>[2]</sup>。

芬顿(Fenton)工艺作为 AOPs 的核心技术之一,通过·OH 的强氧化性降解污染物<sup>[3]</sup>,其衍生技术包括常规 Fenton 法、光 Fenton 法及电 Fenton 法<sup>[4]</sup>。然而,铁基催化剂普遍存在铁离子浸出、分散性差及二次污染等问题,限制了其实际应用<sup>[5]</sup>。研究表明,g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的“六倍腔”结构可有效锚定铁原子,抑制浸出<sup>[6]</sup>。其吡啶氮位点通过形成 Fe-N<sub>x</sub> 键稳定铁活性中心<sup>[7-8]</sup>,同时 Fe 掺杂可调控 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

收稿日期:2025-05-29;修回日期:2026-01-08

基金项目:常州市社会发展项目(CE20235038)

作者简介:葛吕洁(2000-),女,硕士生,研究方向为纳米功能材料,2529843428@qq.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。

能带结构,增强可见光吸收并抑制光生载流子复合<sup>[9-10]</sup>。此外,半导体异质结策略(如与 MoS<sub>2</sub> 复合)可进一步提升光生电子-空穴对分离效率。

除了掺杂策略,半导体复合策略也可以通过使半导体与 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 形成异质结,促进催化剂中光生电子与空穴的分离效率。Yan 等<sup>[11]</sup>通过机械球磨法制备出 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> 复合催化剂,显著提高了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 在可见光下对 RhB 的催化活性。Niu 等<sup>[12]</sup>发现,MoS<sub>2</sub> 的复合极大提高了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的产氢性能,但其循环实验表明该体系的稳定性有待提高。二维 MoS<sub>2</sub> 材料因其较大的比表面积和适宜的禁带宽度,被广泛应用于光电催化等诸多领域。尽管过渡金属二硫化物(如 MoS<sub>2</sub>、WS<sub>2</sub>)在压电催化领域取得进展<sup>[13]</sup>,其效率仍低于光/电催化技术,缺陷工程成为提升其活性的关键策略<sup>[14]</sup>。

基于上述研究,本文设计了一种新型三元异质结材料(Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>),旨在通过以下途径提升催化性能:(1)利用 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 负载 Fe 位点构建 2D/3D 界面结构,优化电子传输路径并增加活性位点密度;(2)通过缺陷工程调控 MoS<sub>2</sub> 边缘 S 位点,形成酸性微环境以促进 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 循环,抑制铁泥生成;(3)探索超声振动下压电催化与 Fenton 反应的协同机制,为机械能驱动的绿色催化技术提供新思路。

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器

OTL-1200 管式炉,购于南京南大设备有限公司;100 mL 聚四氟内胆不锈钢水热反应釜,购自郑州豫华仪器制造有限公司;DHG-9035A 型鼓风干燥箱,购于上海鳌珍仪器制造有限公司;85-1B 型光化学反应仪,购于扬州大学城科教仪器有限公司;DH7000D 电化学工作站,购于东华分析仪器有限公司。

### 1.2 实验试剂

四水合钼酸铵[(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O]、六水合

三氯化铁(FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)、双氰胺(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>N<sub>4</sub>)、硫脲(CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、过氧单硫酸盐(PMS, K<sub>2</sub>H<sub>3</sub>S<sub>4</sub>O<sub>18</sub>)、罗丹明 B(RhB, C<sub>28</sub>H<sub>31</sub>ClN<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、对苯醌(BQ, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)、组氨酸(L-HIS, C<sub>6</sub>H<sub>9</sub>N<sub>3</sub>O<sub>2</sub>)和叔丁醇(TBA, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O)均购自阿拉丁化学有限公司(中国);氢氧化钠(NaOH)、乙醇(EtOH, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)、甲醇(MeOH, CH<sub>3</sub>OH)、盐酸(HCl)、重铬酸钾(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)和草酸铵(AO)均购自国药控股化学试剂有限公司(中国)。所有实验都使用蒸馏水。所有化学试剂均未进一步纯化。

### 1.3 实验步骤

#### 1.3.1 样品制备

(1)制备 Flaws-MoS<sub>2</sub>:采用水热法对钼进行调节,制备多缺陷型 MoS<sub>2</sub><sup>[15]</sup>。具体而言,将 2 mmol 的四水钼酸铵和 70 mmol 的硫脲溶解于 75 mL 的去离子水中,前驱体溶液中钼与硫的摩尔比为 1:5,以确保形成多缺陷结构。随后,将前驱体溶液在 220℃ 下进行水热反应 18 h,反应完成后冷却至室温,使用去离子水和无水乙醇对产物进行洗涤,最后在真空条件下于 60℃ 干燥 12 h,得到的黑色样品标记为 Flaws-MoS<sub>2</sub>。

(2)制备 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:采用热缩聚法合成 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。具体操作为将六水合三氯化铁溶解于含有 5.0 g 双氰胺的 25 mL 混合溶剂中,随后在 60℃ 条件下搅拌 30 min,直至水分完全蒸发。接着在 80℃ 的条件下进行 12 h 的真空干燥处理。将干燥后的固体转移至氧化铝坩埚内,以 5℃/min 的升温速率加热至 550℃,并在氮气氛围的管式炉中煅烧 2 h,最终获得淡黄色样品。将样品进行研磨后备用。FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 的添加量分别为 0.136、0.408、0.680 g,相应地,所得的 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 催化剂分别标记为 1% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、3% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、5% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。其中, x% 代表 Fe 在催化剂中的质量百分比(以 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的质量为基准进行计算)。

(3)合成 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:采用水热法合成 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合催化剂(图1)。

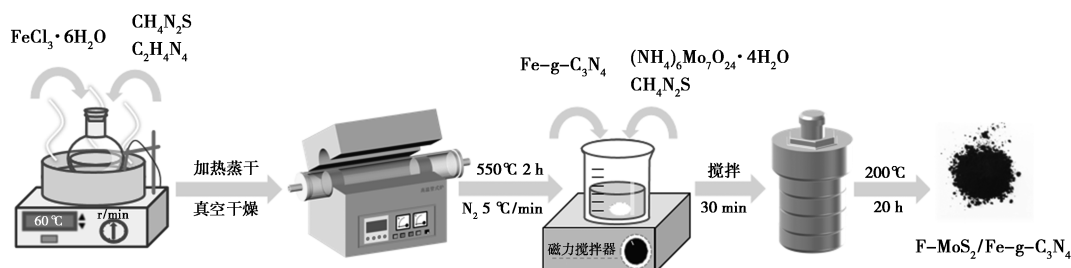


图1 催化剂的合成流程图

具体操作为:准确称取 1 g Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 粉末,与 0.386 3 g 四水合钼酸铵和 0.800 9 g 硫脲混合,溶解于 40 mL 去离子水中,于室温下搅拌直至完全溶解。随后,将所得混合溶液转移至 100 mL 聚四氟乙烯内衬的高压反应釜中,在 200℃ 条件下进行 20 h 的水热反应。反应完成后,待反应釜自然冷却,分离出黑色沉淀物,并在 60℃ 下进行 12 h 的干燥处理。

### 1.3.2 样品表征

获得的样品分别用 X 射线粉末衍射仪(XRD)分析样品的晶体结构,傅里叶红外光谱仪(FT-IR)表征官能团,扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)观察样品的微观形貌,能量散射光谱仪(EDS Mapping)分析样品的元素组成及化学态,全自动比表面及孔隙度分析仪(BET)检测样品的比表面积,X 射线光电子能谱分析仪(XPS)测量样品的组成和元素状态,电子顺磁共振光谱仪(EPR)检测反应产生活性物质。

### 1.3.3 催化实验

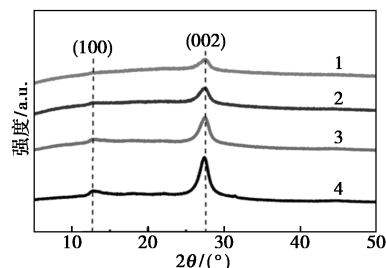
向 100 mL 浓度为 10 mg/L 的罗丹明 B 溶液中加入 20 mg 样品先进行搅拌 30 min 以排除吸附作用对催化数据的影响。接着加入一定量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/PMS 进行类芬顿催化降解反应,每隔一段时间取样测吸光度,通过罗丹明 B 溶液浓度的标准曲线处理数据并制图制表分析结果。考虑所制备样品的光催化性能通过在 300 W 氙灯(扬州大学城科教仪器有限公司)下降解污染物来评估;考虑压电催化效应在自然光超声振动(US)条件下进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合材料的形貌及微观结构表征

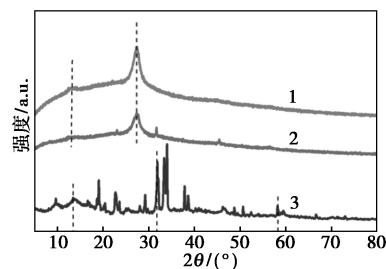
图 2(a) 为不同比例铁掺杂氮化碳的 XRD 图谱,图 2(b) 为 Flaws-MoS<sub>2</sub>、Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(x%=3%) 及其复合材料的 XRD 图谱。在图 2(a) 中,2θ=13.7° 和 27.8° 处观察到两个显著的衍射峰,分别对应于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的三嗪环单元的(100)晶面,其强度与三嗪环的周期性排列相关;以及一种典型的层间堆叠共轭芳香族体系的(002)晶面,其强度与环状芳香物层间堆积相关。这些特征与标准 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> XRD 谱图(JCPDS 87-1526)相吻合,证实了所制备的催化剂为石墨相氮化碳。在图 2(b) 中,14.3°、32.6° 和 58.3° 的衍射峰分别对应 MoS<sub>2</sub> 的(002)、(100) 和(110)晶面(JCPDS 37-1492)。与 MoS<sub>2</sub> 相比,复合材料在 14.3° 处的典型(002)衍射峰向小角度方向

偏移,衍射强度亦有所减弱,这归因于 MoS<sub>2</sub> 层间距的增加,层状结构由紧密变为蓬松,从而增加了催化反应的活性位点<sup>[16]</sup>。Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 在 13.7° 处对应的(002)峰强度减弱,是由于水热复合作用导致 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 层状结构变薄,晶面间阶数降低<sup>[17]</sup>。这表明水热反应过程促进了 MoS<sub>2</sub> 与 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 层状材料的复合。



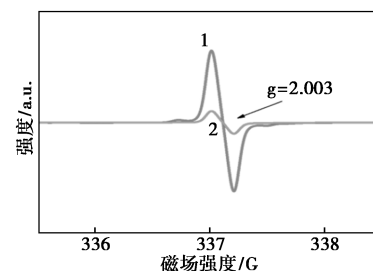
1—5% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 2—3% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 3—1% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 4—Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

(a) x% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 XRD 图



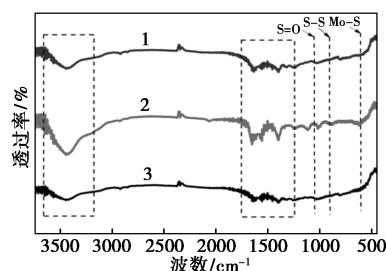
1—3% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 2—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 3—Flaws-MoS<sub>2</sub>

(b) 3% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Flaws-MoS<sub>2</sub> 及其复合材料的 XRD 图



1—Flaws-MoS<sub>2</sub>; 2—MoS<sub>2</sub>

(c) Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 MoS<sub>2</sub> 的 EPR 图



1—3% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 2—Flaws-MoS<sub>2</sub>; 3—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

(d) 3% Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Flaws-MoS<sub>2</sub> 及其复合材料的红外图

图 2 XRD、EPR 和 FT-IR 表征图

为了确认合成的样品具有 S 缺陷,对 Flaws-MoS<sub>2</sub> 样品进行了电子顺磁共振(EPR)测试,在图 2(c)发现有一个信号峰, $g$  因子为 2.003,表明样品具有 S 缺陷,与上述 XRD 表征结果相互佐证。

图 2(d)展示了不同材料的红外光谱图。通过分析图中数据,可以观察到 608 cm<sup>-1</sup>处的振动峰,该峰的存在证实了 Mo—S 键的存在。在 821 ~ 985 cm<sup>-1</sup>的频段内,S—S 键的特征振动峰得以显现。此外,在 1 120 cm<sup>-1</sup>处,Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合材料的不对称 S=O 峰得以呈现<sup>[18]</sup>。在 1 250 ~ 1 700 cm<sup>-1</sup>的频段内,g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 结构中三嗪环的伸缩振动特征峰清晰可见。在 3 200~3 400 cm<sup>-1</sup>的频段内,表面羟基的振动峰被检测到,而在 3 000~3 500 cm<sup>-1</sup>的频段内,则是—OH 和—NH 伸缩振动峰的显现。复合材料中 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 结构单元上的羟基与 Flaws-MoS<sub>2</sub> 之间形成的氢键及其他作用力导致了相应振动峰强度的减弱。

采用 SEM、EDS Mapping 以及 TEM 对样品的微观形貌和化学组成进行了详细表征(图 3)。对 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合材料的微观结构进行了 SEM 分析,如图 3(a),Flaws-MoS<sub>2</sub> 由众多形状规则且均匀分散的纳米花球状颗粒构成,这些颗粒展现出纳米级花瓣结构,有助于增加活性边缘的暴露,从而提升其压电催化性能。图 3(b)、(c)揭示了 Flaws-MoS<sub>2</sub> 在 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 基底上的生长情况,层片状的 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与 MoS<sub>2</sub> 结构相互交织,形成了优化的异质结结构,促进了多层蓬松 3D 结构的形成,这种结构的疏松性显著增强了光生电子的传输效率。图 3(e)、(f),图 3(h)、(i)展示了 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合材料的 TEM 图像,清晰地显示出 Fe 掺杂对催化剂形貌产生了显著影响,形成了多孔结构,显著提升了材料的比表面积。孔道结构的形成可能归因于 Fe 掺杂导致的前驱体在高温下的分解,从而产生了大量气体。MoS<sub>2</sub> 的复合对催化剂的形貌影响较小,未改变原有的多孔道结构。图 3(i)中的高分辨率 TEM(HRTEM)图像中可以明显观察

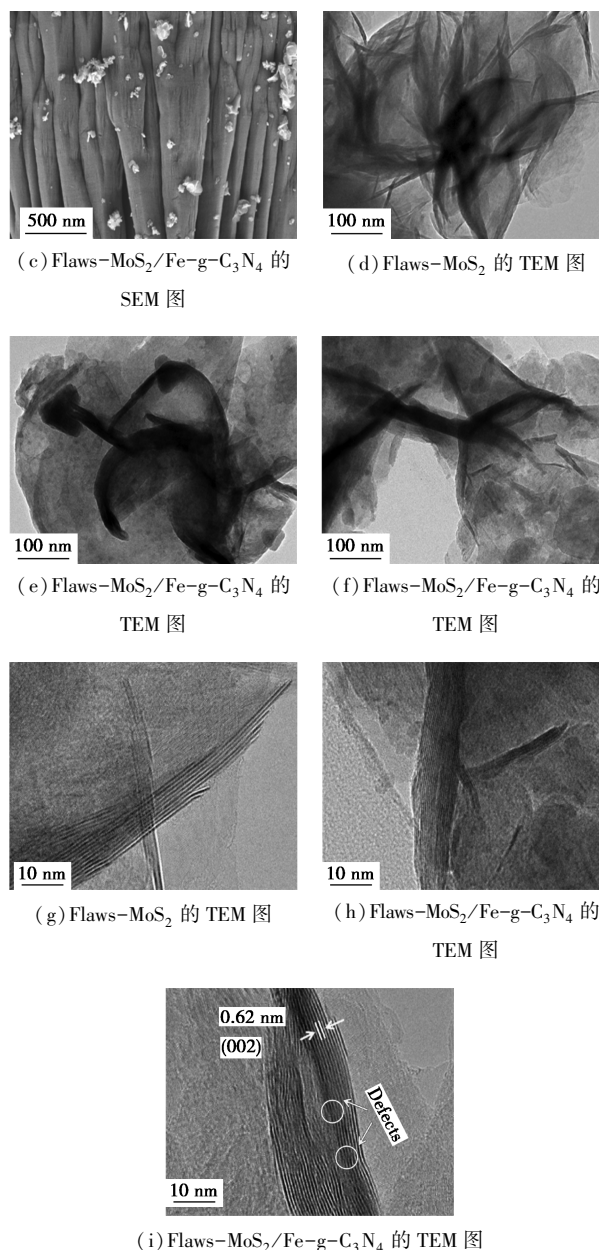
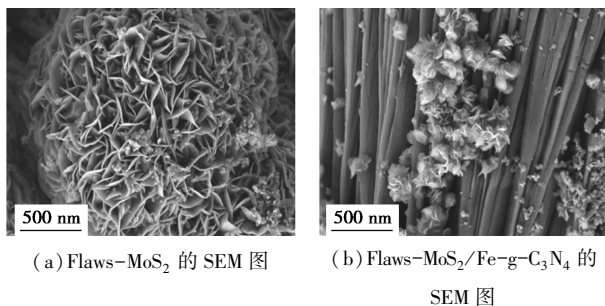


图 3 Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 SEM 及 TEM 图

到六方晶系 Flaws-MoS<sub>2</sub>(002) 晶面的 0.62 nm 晶格间距以及缺陷结构与 XRD 以及 EPR 表征结果相互佐证。

为了研究样品掺杂及复合材料比表面积对催化性能的影响,进行了 BET 比表面积测试。表 1 对 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 3 种材

表 1 不同催化剂的比表面积、孔容量和孔径

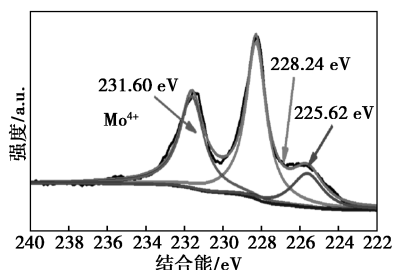
	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$V_{\text{p}}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$R_{\text{d}}/\text{nm}$
g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	15.26	0.03	18.38
Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	80.95	0.09	12.81
Flaws-MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	67.17	0.02	7.49

料的比表面积、孔径和孔隙率进行比较。Fe 的掺杂,使  $g-C_3N_4$  比表面积从  $15 \text{ m}^2/\text{g}$  大幅增加至  $80.95 \text{ m}^2/\text{g}$ 。Flaws-MoS<sub>2</sub> 的复合,使 Fe- $g-C_3N_4$  小幅减小到  $67.17 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

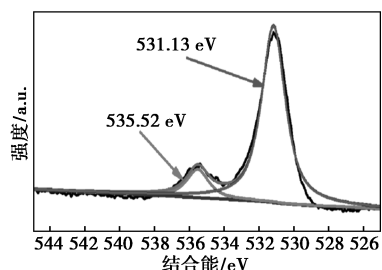
为探究 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe- $g-C_3N_4$  复合材料的元素价态与化学组成,本研究对 Flaws-MoS<sub>2</sub> 及 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe- $g-C_3N_4$  进行了 XPS 分析,结果如图 4、图 5 所示。

(1) Mo 3d 峰的解析:图 4(a) 中,Flaws-MoS<sub>2</sub> 典型层间位点的 231.60 eV 对应 Mo<sup>4+</sup>,在图 5(a) 中合成的复合材料中亦有所体现,表明二硫化钼中钼的主要价态为 4 价<sup>[19]</sup>。值得注意的是,复合后 Mo<sup>4+</sup> 峰发生裂分,形成 231.3 eV 和 232.49 eV 2 个峰,这表明 Fe 的引入导致 Mo<sup>4+</sup> 的电子云密度增加,此现象可归因于 Fe 的电负性低于 Mo,致使电子向 Mo 偏移。Fe 与 Mo 形成的 Mo—O—Fe 和 Mo—S—Fe 键进一步证实了 MoS<sub>2</sub> 与  $g-C_3N_4$  上其他元素之间的键合。图 5(a) 中复合材料 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe- $g-C_3N_4$  的 Mo 3d 在 235 eV 附近出现了一个新峰,归属于 Mo<sup>6+</sup>,表明与  $g-C_3N_4$  的复合促进了高价 Mo<sup>6+</sup> 的形成<sup>[20]</sup>。Mo<sup>6+</sup> 的结合能从 235.28 eV 移至 235.56 eV,上移 0.28 eV 反映了与  $g-C_3N_4$  之间的电子迁移作用,增强了光生载流子的分离效率。

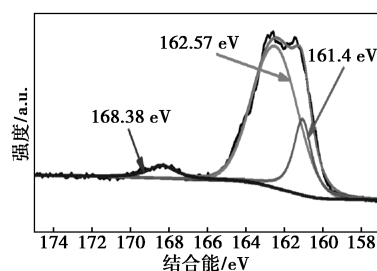
(2) S 2p 峰的动力变化:图 4(c) 中 162.57 eV 和 161.40 eV 处的峰分别对应 S 2p<sub>1/2</sub> 和 S 2p<sub>3/2</sub>。与图 4(c) 中的 Flaws-MoS<sub>2</sub> 相比,图 5(c) 中复合材料 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe- $g-C_3N_4$  的 S 2p 新增了一个位于 163.18 eV 的峰,这是未完全配位的 S<sup>2-</sup> 的典型特征,表明在二硫化钼中形成了更多的边缘硫 S<sup>2-</sup>。这类活性位点能够吸附 H<sup>+</sup>,从而形成酸性微环境<sup>[21]</sup>。



(a) Mo 3d

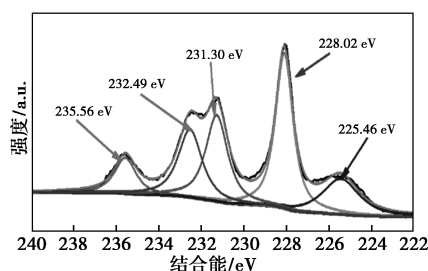


(b) O 1s

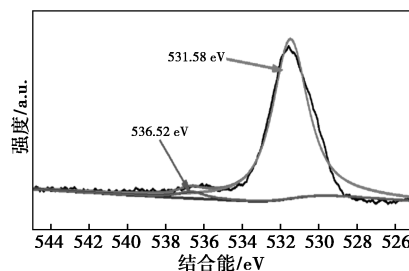


(c) S 2p

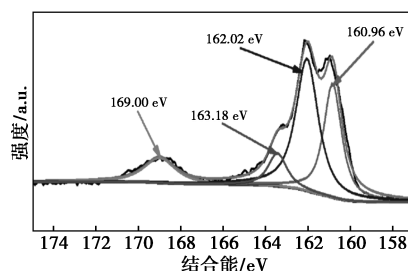
图 4 Flaws-MoS<sub>2</sub> 的 Mo 3d、O 1s、S 2p 的 XPS 谱图



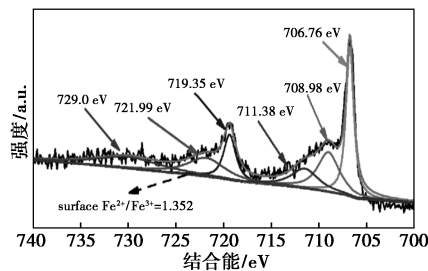
(a) Mo 3d



(b) O 1s



(c) S 2p



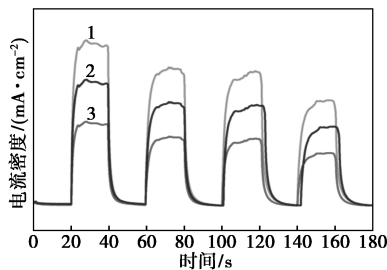
(d) Fe 2p

图 5 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe- $g-C_3N_4$  的 Mo 3d、O 1s、S 2p 和 Fe 2p 的 XPS 谱图

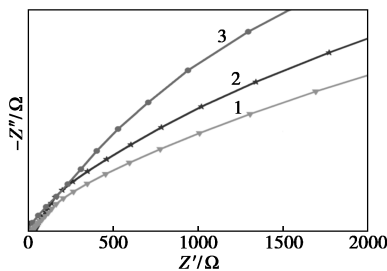
## 2.2 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe- $g-C_3N_4$ 的电化学性能分析

为深入探究所制备光催化剂的光诱导电荷分离

效率、迁移效率以及界面电荷转移电阻,本研究执行了光电流瞬态响应实验和 EIS 分析。图 6(a) 揭示,相较于 Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 复合材料展现出更高的光电流强度,表明光生载流子的复合过程得到了显著抑制。此外,图 6(b) 所示的 EIS 结果表明,与 Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 相比,Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的阻抗图弧半径最小,这说明构建的异质结优化了电子解离和电荷转移特性,从而促进了光催化降解反应中电子和空穴的参与度,与光降解活性结果相一致。



(a) Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Flaws-MoS<sub>2</sub> 及其复合材料的  $I-t$  图



(b) Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Flaws-MoS<sub>2</sub> 及其复合材料的 EIS 图

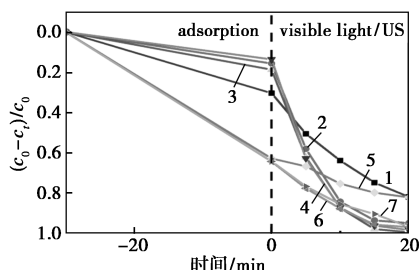
1—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 2—Flaws-MoS<sub>2</sub>; 3—Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

图 6 Flaws-MoS<sub>2</sub>、Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的  $I-t$  图及 EIS 图

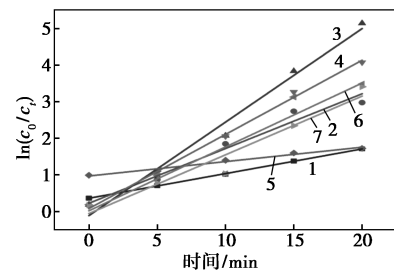
## 2.3 催化实验

### 2.3.1 催化实验

如图 7、表 2 所示,复合材料 MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 在光芬顿催化降解 RhB 反应中,20 min 去除率达 81.89% ( $k_{\text{obs}} = 0.0636 \text{ min}^{-1}$ ); 构造缺陷的复合材料 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 去除率为 99.41% ( $k_{\text{obs}} = 0.2552 \text{ min}^{-1}$ ),可见构造 Flaws-MoS<sub>2</sub> 对降解效率



(a) MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 及 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的光芬顿降解曲线



(b) MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 及 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的拟一级反应速率曲线

1—MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (light+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>);

2—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ( $x=1$ ) (light+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>);

3—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ( $x=3$ ) (light+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>);

4—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ( $x=5$ ) (light+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>);

5—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (US); 6—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (US+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>); 7—Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (US+PMS)

图 7 不同比例样品光芬顿降解曲线和拟一级反应速率曲线

表 2 不同比例样品的降解率和拟一级反应速率常数

样品	降解条件	降解率/%	$k_{\text{obs}}/\text{min}^{-1}$	$R^2$
MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Visible light+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	81.89	0.0636	0.9970
Flaws-MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ( $x=1$ )	Visible light+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	94.88	0.1494	0.9718
Flaws-MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ( $x=3$ )	Visible light+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	99.41	0.2552	0.9821
Flaws-MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ( $x=5$ )	Visible light+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	98.29	0.2024	0.9958
Flaws-MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	US	82.14	0.0285	0.9334
Flaws-MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	US+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	99.91	0.2449	0.8555
Flaws-MoS <sub>2</sub> /Fe-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	US+PMS	99.68	0.2375	0.9963

有着明显的提升。其中,在不同比例样品中,Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ( $x=3$ ) 催化降解性能最佳,光芬顿催化降解 RhB 中实现 99.41% 的去除率 ( $k_{\text{obs}} = 0.2552 \text{ min}^{-1}$ )。

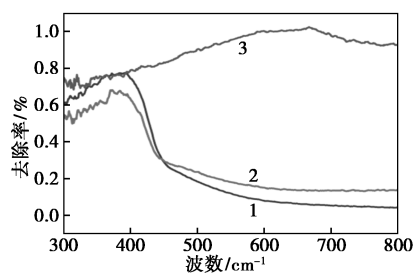
对复合材料 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ( $x=3$ ) 进行压电催化测试,在没有光照只在超声振动 (US) 条件下,该催化剂也有着优异的降解能力,20 min 去除率可达到 82.14%。加入和光芬顿同等条件下的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/PMS,此时超声+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 实现 99.91% 的去除率 ( $k_{\text{obs}} = 0.2449 \text{ min}^{-1}$ ); 超声+PMS 实现 99.68% 的去除率 ( $k_{\text{obs}} = 0.2375 \text{ min}^{-1}$ ); 压电催化条件下的降解率和拟一级反应速率常数几乎和光芬顿条件下持平,显示良好的压电催化性能。

相同实验条件下,分别对 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 Flaws-

MoS<sub>2</sub> 超声下进行压电催化测试, Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 RhB 去除率仅为 21.81%, Flaws-MoS<sub>2</sub> 的 RhB 去除率高达 76.21%, 可见, 起主要压电催化性能的为 Flaws-MoS<sub>2</sub>。

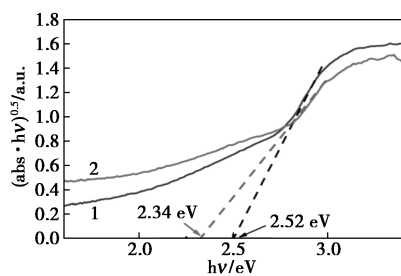
### 2.3.2 能带结构分析

进一步对所制备材料进行能带结构分析。图 8 (a) 为不同光催化剂的紫外-可见-漫反射 (UV-Vis) 谱图, 掺杂 Fe 催化剂在 400~450 nm 处的特征吸收边出现微弱的蓝移, 在可见光区域 (450~800 nm) 紫外吸收明显增加, 可以降低催化剂的带隙能, 这与图 8 (b) 禁带宽度从 2.52 eV 减少到 2.34 eV 对应。Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 使光吸收范围向可见光区延展, 增加了可见光的利用率。带隙可以通过 Tauc plot 公式计算得到, 图 8 (c) 中 Flaws-MoS<sub>2</sub> 的带隙为 1.47 eV。由图 8 (d)、(e) Mott-Schottky 曲线可看出 Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 都属于 n 型半导体, 其平带电位电势  $E_{FB}$  (vs Ag/AgCl) 分别为 -0.28、-0.74 eV。由  $E$  (vs NHE) =  $E$  (vs Ag/AgCl) + 0.197, 计算出 Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 在标准氢电极下的平带电势的  $E_{FB}$  (vs NHE) 分别为 -0.543 eV 和 -0.083 eV。由于 n 型半导体的  $E_{FB}$  (vs. NHE) 值通常比导带高 0.3 eV, 而 p 型半导体的  $E_{FB}$  (vs. NHE) 值通常比价带低 0.3 eV<sup>[22]</sup>, 综上所述, 估计 Flaws-MoS<sub>2</sub> 的导带值约为 -0.84 eV, 而 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的导带估计值约为 -0.38 eV。根据公式  $E_g = E_{CB} - E_{VB}$ , 计算出 Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 价带在标准氢电极下的电势  $E_{VB}$  (vs NHE) 分别为 0.63 eV 和 1.96 eV。综上所述, 得到 Flaws-MoS<sub>2</sub> 和 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 带隙结构图, 如图 8 (f) 所示。



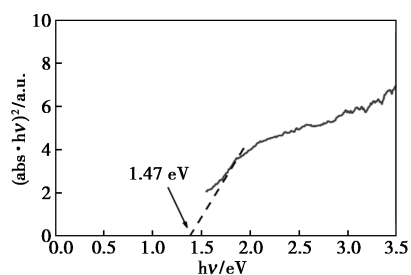
1—C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 2—Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 3—Flaws-MoS<sub>2</sub>

(a) Flaws-MoS<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 UV-Vis 图

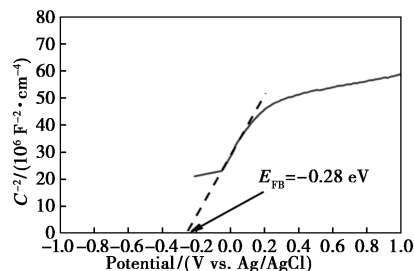


1—C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 2—Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

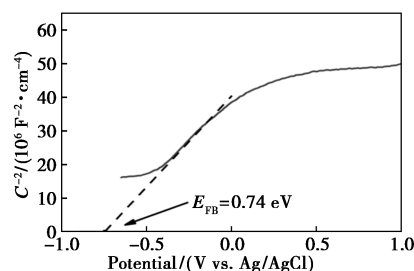
(b) C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的  $(\alpha h\nu)^{0.5}$  与光子能量关系图



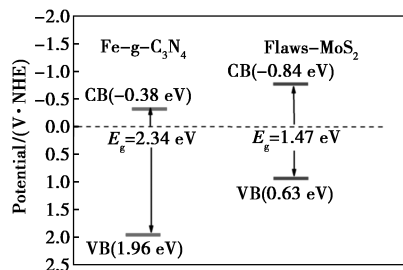
(c) Flaws-MoS<sub>2</sub>  $(\alpha h\nu)^2$  与光子能量关系图



(d) Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 Mott-Schottky 曲线



(e) Flaws-MoS<sub>2</sub> 的 Mott-Schottky 曲线



(f) Flaws-MoS<sub>2</sub> 与 Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的带隙结构图

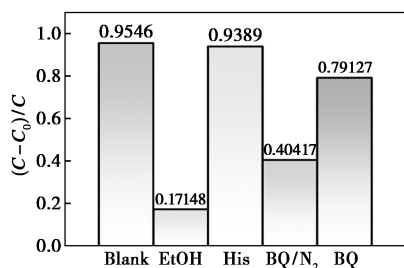
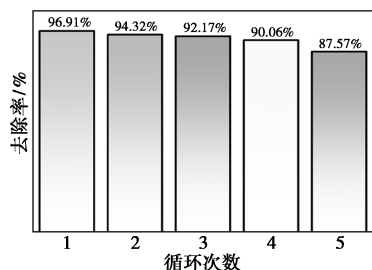
图 8 Flaws-MoS<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 UV-Vis 图; C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的  $(\alpha h\nu)^{0.5}$  与光子能量关系图; Flaws-MoS<sub>2</sub>  $(\alpha h\nu)^2$  与光子能量关系图; Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 Mott-Schottky 曲线; Flaws-MoS<sub>2</sub> 的 Mott-Schottky 曲线; 带隙结构图

### 2.3.3 淬灭实验及机理分析

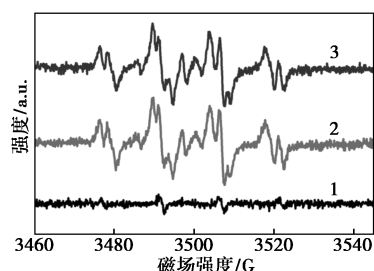
为了阐明活性物质对 RhB 的光降解的影响, 使用乙醇 (EtOH)、L-组氨酸 (His)、对苯醌 (BQ) 分别捕获  $\cdot\text{OH}$ 、 $^1\text{O}_2$  和  $\cdot\text{O}_2^-$ 。自由基淬灭结果如图 9 (a) 所示, 可以看出,  $^1\text{O}_2$  的影响较小,  $\cdot\text{O}_2^-$  和  $\cdot\text{OH}$  对光芬顿降解有一定的促进作用。加入乙醇后, 光芬顿反应几乎被完全抑制了, 20 min 内 RhB 降解率仅为 17.14%, 表明  $\cdot\text{OH}$  是体系中最主要的活性物质。添

加了L-组氨酸后降解效率基本无变化,表明<sup>1</sup>O<sub>2</sub>并非主要的活性物质。对苯醌的加入对反应也存在一定影响,说明·O<sub>2</sub><sup>-</sup>也参与了反应,降解率为79.13%。N<sub>2</sub>吹扫后降解率为40.41%,这是由于在反应体系中,超氧自由基会和Mo<sup>6+</sup>反应将其还原为Mo<sup>4+</sup>,从而一定程度上促进钼离子和铁离子的循环,水中的溶解氧和液相表面的氧气也会参与反应。有机污染物的光催化降解过程通常是直接利用VB或光激发后在局域态产生的光生空穴的氧化能力,或其他氧化活性物质(·O<sub>2</sub><sup>-</sup>和·OH)的氧化能力<sup>[23]</sup>。其中,·O<sub>2</sub><sup>-</sup>通常是由电子与吸附在表面的氧分子反应生成的,而羟基自由基是由空穴与吸附在光催化剂表面的水或氢氧根离子反应生成的。

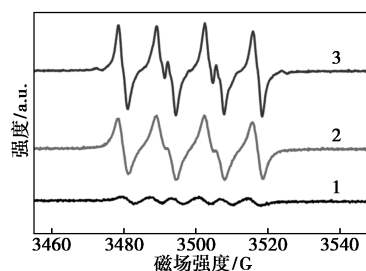
在可见光照射下用DMPO作为自由基捕获剂研究。在水分散体系和甲醇分散体系中研究了光催化剂的EPR。从图9(c)可以看出,EPR光谱显示了一个强度比为1:2:2:1典型的4倍峰,归为DMPO·OH;图9(d)1:1:1:1的强度峰,这可以归因于DMPO·O<sub>2</sub><sup>-</sup>。在0 min时黑暗条件时均产生了·O<sub>2</sub><sup>-</sup>或·OH的弱峰。当体系暴露在光下时显示出·O<sub>2</sub><sup>-</sup>和

(a) Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 催化剂自由基猝灭实验

(b) 内循环性能测试



1—3 min;2—1 min;3—0 min

(c) Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>·OH 自由基捕获实验

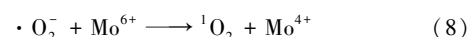
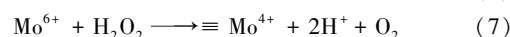
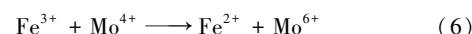
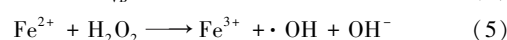
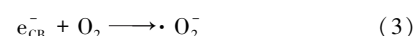
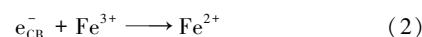
1—3 min;2—1 min;3—0 min

(d) Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>·O<sub>2</sub><sup>-</sup> 自由基捕获实验图9 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(x=3) 催化剂自由基猝灭实验、内循环性能测试和自由基捕获实验

·OH 的强特征峰,表明·O<sub>2</sub><sup>-</sup>和·OH 在 RhB 的降解过程中都参与了反应,这与自由基猝灭实验的结果基本符合。

基于以上结果,提出 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 可能的光降解 RhB 的潜在机制。

在光照的条件下对材料进行光激发,以在导带和价带中产生电子和空穴[式(1)],电子可以将部分三价铁转换为二价铁[式(2)],也可以和氧气反应生成超氧自由基[式(3)],而空穴可以和氢氧根反应生成小部分羟基自由基[式(4)]加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 后,材料中大量的 Fe<sup>2+</sup> 表面发生 Fenton 反应生成 Fe<sup>3+</sup> 和·OH[式(5)].而 Mo<sup>4+</sup> 也可以与 Fe<sup>3+</sup> 反应作用将其转化为 Mo<sup>6+</sup>,同时将 Fe<sup>3+</sup> 还原为 Fe<sup>2+</sup>[式(6)].两组 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 循环模式的存在极大提高了 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 转化的效率。Mo<sup>6+</sup> 也可以通过与过氧化氢和超氧自由基反应循环生成四价钼[式(7)、(8)].上述高价钼的存在已通过 XPS Mo 3d 光谱图证明。而 Mo<sup>6+</sup> 在还原的过程中产生 O<sub>2</sub>,又进一步强化了光生电子和 O<sub>2</sub> 结合产生超氧自由基的过程(3)。这也和猝灭实验结果吻合。整个体系可以快速分解 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,产生大量羟基自由基和超氧自由基来降解污染物,同时实现双 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 循环模式的极大钼和铁的循环效率,使光催化 Fenton 效率得到提升。



### 2.3.4 催化剂的稳定性和可回收性

Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的可重用性对其长期

使用至关重要。从图 9(b) 可知,在相同的条件下,对 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 进行 RhB 降解循环稳定性实验。连续 5 次循环后, RhB 的去除率分别为 96.91%、94.32%、92.17%、90.06%、87.57%, 催化剂对 RhB 的降解效率呈现逐渐降低的趋势,但 5 个循环使用后, 20 min 内的降解效率还能达到 87.57%。催化活性的小幅下降可归因于由于每次循环实验后处理过程中催化剂的质量损失, 导致光催化剂的效率随着循环时间的增加而略有下降。综上,表明 Flaws-MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 具有促进再利用的潜力,是一种具有稳定性良好的催化剂。

### 3 结论

通过 Fe 掺杂与缺陷 MoS<sub>2</sub> 复合,成功构建了 2D/3D 异质结构。Fe 的引入不仅扩增了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的比表面积 (80.95 m<sup>2</sup>/g), 还通过 Fe-N<sub>x</sub> 键稳定活性位点; MoS<sub>2</sub> 的缺陷工程精准调控边缘 S 位点,形成酸性微环境,协同促进 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 循环与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 活化。优化后的缺陷 MoS<sub>2</sub>/Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (x=3%) 在光芬顿与压电催化体系中均表现出卓越性能, 20 min 内 RhB 去除率 >99%, 其速率常数 ( $k_{\text{obs}} \approx 0.24 \text{ min}^{-1}$ ) 显著优于同类研究。自由基路径分析表明, ·OH 为主导活性物种, 而 Mo<sup>6+</sup>/Mo<sup>4+</sup> 与 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 的双循环机制是高效降解的关键。催化剂在 5 次循环后仍保持 87.57% 活性, 且压电催化效率与光驱动反应相当, 证实其实用于机械能驱动的绿色水处理技术。该研究为多场耦合催化体系的开发提供了理论支撑与材料基础。

### 参考文献

- [1] Saleh R, Taufik A. Degradation of methylene blue and congo-red dyes using Fenton, photo-Fenton, sono-Fenton, and sonophoto-Fenton methods in the presence of iron (II, III) oxide/zinc oxide/graphene (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZnO/graphene) composites [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 563–573.
- [2] Xu P, Zheng D, Xu H. The feasibility and mechanism of reverse electro-dialysis enhanced photocatalytic fuel cell-Fenton system on advanced treatment of coal gasification wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 220: 183–188.
- [3] Pignatello J J, Oliveros E, MacKay A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2006, 36(1): 1–84.
- [4] Neyens E, Baeyens J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 98(1/3): 33–50.
- [5] Wang X, Chen X, Thomas A, et al. Metal-containing carbon nitride compounds: A new functional organic-metal hybrid material [J]. Advanced Materials, 2009, 21(16): 1609–1612.
- [6] Liu Q, Guo Y, Chen Z, et al. Constructing a novel ternary Fe(III)/graphene/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite photocatalyst with enhanced visible-light driven photocatalytic activity via interfacial charge transfer effect [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 183: 231–241.
- [7] An S, Zhang G, Wang T, et al. High-density ultra-small clusters and single-atom Fe sites embedded in graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) for highly efficient catalytic advanced oxidation processes [J]. ACS Nano, 2018, 12(9): 9441–9450.
- [8] Hossen M, Artyushkova K, Atanassov P, et al. Synthesis and characterization of high performing Fe-NC catalyst for oxygen reduction reaction (ORR) in alkaline exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2018, 375: 214–221.
- [9] Gao L F, Wen T, Xu J Y, et al. Iron-doped carbon nitride-type polymers as homogeneous organocatalysts for visible light-driven hydrogen evolution [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(1): 617–624.
- [10] Miao B, Zhang M, Shen J, et al. Structural infrared analysis of ultra nanosized crystals of Yttria-stabilized zirconia [J]. Crystal Research and Technology, 2017, 52(9): 1600249.
- [11] Yan X, Gao Q, Hui X, et al. Preparation of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> nanosheet heterostructures by ball milling and their visible light photocatalytic performance [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(10): 3015–3020.
- [12] Niu H, Zhao W, Lv H, et al. Accurate design of hollow/tubular porous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> from melamine-cyanuric acid supramolecular prepared with mechanochemical method [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 411(12): 128400.
- [13] Zheng H, Wang Y, Liu J, et al. Recent advancements in the use of novel piezoelectric materials for piezocatalytic and piezo-photocatalytic applications [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2024, 341: 123335.
- [14] Li S, Ning X, Hao P, et al. Defect-rich MoS<sub>2</sub> piezocatalyst: Efficient boosting piezocatalytic activation of PMS activity towards degradation organic pollutant [J]. Dyes and Pigments, 2022, 206: 110678.
- [15] Leng X, Wang Y, Wang F. Alcohols assisted hydrothermal synthesis of defect-rich MoS<sub>2</sub> and their applications in humidity sensing [J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(11): 1900010.
- [16] Wang X, Hong M, Zhang F, et al. Recyclable nanoscale zero valent iron doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> for efficient photocatalysis of RhB and Cr(VI) driven by visible light [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(7): 4055–4063.
- [17] Tian Y, Zhou M, Pan Y, et al. MoS<sub>2</sub> as highly efficient co-catalyst enhancing the performance of Fe<sub>0</sub> based electro-Fenton process in degradation of sulfamethazine: Approach and mechanism [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 403: 126361.
- [18] Yan Q, Lian C, Huang K, et al. Constructing an acidic microenvironment by MoS<sub>2</sub> in heterogeneous Fenton reaction for pollutant control [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(31): 17155–17163.
- [19] Liu G, Dong G, Zeng Y, et al. The photocatalytic performance and active sites of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> effected by the coordination doping of Fe(III) [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2020, 41(10): 1564–1572.
- [20] Cao J, Fan H, Wang C, et al. Facile synthesis of carbon self-doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for enhanced photocatalytic hydrogen evolution [J]. Ceramics International, 2020, 46(6): 7888–7895.
- [21] Wang X, Zhang X, Zhang Y, et al. Nanostructured semiconductor supported iron catalysts for heterogeneous photo-Fenton oxidation: A review [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(31): 15513–15546.
- [22] Wang R, Yu W, Fang N, et al. Constructing fast charge separation of ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>@CuCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub> p-n heterojunction for efficient photocatalytic hydrogen energy recovery from quinolone antibiotic wastewater [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2024, 341: 123284.
- [23] Wang L, Lan X, Peng W, et al. Uncertainty and misinterpretation over identification, quantification and transformation of reactive species generated in catalytic oxidation processes: A review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 408: 124436. ■