

铁基 MOF/还原石墨烯复合泡沫镍 降解罗丹明 B 的研究

高 樱^{1,2*}, 谢芳舒³, 林歆昊⁴, 朱维晃³

1. 西安交通大学城市学院, 智能建造与环境学院, 陕西 西安 710018;
2. 陕西科技大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710016;
3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;
4. 中国建筑第八工程局有限公司西北分公司, 陕西 西安 710061)

摘要:为改善传统电芬顿氧化技术对污染物降解效率有限和添加的可溶性二价铁(Fe^{2+})导致二次污染等问题,通过水热-煅烧法构建出还原石墨烯/铁基 MOF 修饰的泡沫镍(rGO/MIL-88A/NF)电芬顿阴极。通过仪器分析与电化学测试确定了 rGO/MIL-88A/NF 的物化性能与电化学活性。以罗丹明 B(RhB)为目标污染物,研究 rGO/MIL-88A/NF 阴极对 RhB 的降解性能,以及不同电位与 pH 条件对体系降解 RhB 的影响。结合淬灭实验与 XPS 分析,探究 rGO/MIL-88A/NF 降解污染物的运行机理。结果表明,rGO/MIL-88A/NF 无需外界投加 H_2O_2 与 Fe^{2+} ,为高效降解污染物的新型电芬顿阴极开发提供研究基础与思路。

关键词:铁基 MOF;还原石墨烯;阴极;电芬顿

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)04-0147-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.04.026

Degradation of Rhodamine B by iron-based MOF/reduced graphene modified nickel foam

GAO Ying^{1,2*}, XIE Fang-shu³, LIN Xin-hao⁴, ZHU Wei-huang³

1. School of Intelligent Construction and Environment, City College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710018, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710016, China;
3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
4. The Northwest Branch Company of China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: The traditional electro-Fenton oxidation technology has a limited efficiency in degrading pollutants, and will lead to the secondary pollution due to the addition of soluble divalent iron (Fe^{2+}). In order to solve these issues, a reduced graphene/iron-based MOF modified nickel foam (rGO/MIL-88A/NF) electro-Fenton cathode is constructed via hydrothermal-calcination method. Through instrument characterization and electrochemical testing, the physicochemical properties and electrochemical activity of rGO/MIL-88A/NF are clarified. Taking Rhodamine B (RhB) as the target pollutant, the degradation performance of rGO/MIL-88A/NF cathode to RhB is studied, and the influences of different potentials and pH conditions on the degradation of RhB by the cathode are explored. Combined with the quenching experiment and XPS analysis, the operational mechanism for rGO/MIL-88A/NF in degrading pollutants is researched. It is found that rGO/MIL-88A/NF does not require external addition of H_2O_2 and Fe^{2+} , which provides a research foundation and approach for the development of a novel electro-Fenton cathode that can remove pollutants efficiently.

Key words: iron-based MOF; reduced graphene; cathode; electro-Fenton

染料废水是一种常见的工业废水,具有排放量大、成分复杂、难生物降解等特点。染料废水不仅对国家的生态环保、可持续发展造成威胁,还会对人类的健康造成危害^[1]。罗丹明 B(RhB)作为三苯甲烷类染料之一,广泛应用于印染行业、有色玻璃等领域^[2]。RhB 不仅刺激人类眼睛、皮肤和呼吸道,吸食后更对肾脏、肺部以及心脑血管造成危害^[3]。因此,开发高效降解 RhB 的方法具有重要意义。

电芬顿法主要通过阴极还原氧生成过氧化氢(H_2O_2), H_2O_2 进而与 Fe^{2+} 发生芬顿反应生成氧化还原电位高达 2.8 eV 的羟基自由基($\text{OH}\cdot$),实现对各类污染物无选择地深度降解^[4-5]。然而,阴极有限的 H_2O_2 产量与铁泥引发二次污染的问题限制着电芬顿的实际性能。针对上述问题,国内外研究者设计出不同的改性阴极与异相 H_2O_2 活化剂,一定程度上解决了传统电芬顿的限制性因素^[6-7]。有

收稿日期:2024-07-08;修回日期:2025-02-06

基金项目:中国博士后科学基金(2024MD763996);西安市青年人才托举计划资助项目(959202313073)

作者简介:高樱(1993-),女,博士,讲师,主要从事环境催化材料、芬顿氧化技术研究,通讯联系人,5158@sust.edu.cn。

金属框架(MOF)是一系列以金属团簇或金属离子为中心,连接着有机配体的多孔晶体材料。MOF特殊的晶体结构有助于保持其活性位的稳定性,因而成为芬顿催化理想的候选材料^[8-9]。以过渡金属为中心原子的 MOF 系列表现出优异的 H₂O₂ 催化分解活性^[10]。Li 等^[11]发现 H₂O₂ 经 Cu(I)-MOF 活化后,对磺胺甲噁唑有良好的去除效果。以 MIL-53、MIL-88B 与 MIL-101 等为代表的 Fe-MOF 在超声/H₂O₂ 环境下表现出高效的四环素降解能力,主要反应途径是 Fe-MOF 上配位不饱和铁位点对 H₂O₂ 的吸附和分解效果,有助于大量强氧化自由基的生成^[12]。然而,MOF 的连接配体通常是弱导电性或绝缘性的,限制着阴极表面的电子转移。还原石墨烯(rGO)由于其独特的晶体结构,能够弥补 MOF 配体导电性不足的缺陷,有助于改善 MIL-88A-Fe 修饰阴极的电荷传递效率。

因此,笔者以具有稳定活性位的 MIL-88A 为 H₂O₂ 活化剂,通过 rGO 的修饰将 MIL-88A 固定于泡沫镍(NF)基底,制得同时具有自产 H₂O₂/活化 H₂O₂ 双功能阴极材料(rGO/MIL-88A/NF)。通过仪器表征、电化学测试等分析 rGO/MIL-88A/NF 的理化性质与电化学活性;以 RhB 为目标污染物,研究不同反应条件(外加电位、pH)对 RhB 降解率的影响;结合淬灭实验和 X 射线能谱(XPS)探究 rGO/MIL-88A/NF 阴极的微观运行机制。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

石墨,青岛华泰有限公司生产;九水合硝酸铁、反丁烯二酸、叔丁醇,天津天力有限公司生产;RhB、硫酸钠,科密欧生产;对苯醌,梯希爱生产,以上试剂均为分析纯。实验用水由超纯水仪制备。

1.2 阴极制备

GO 的制备:采用改进的 Hummers 法制备 GO。

MIL-88A 的制备:将 140 mg 反丁烯二酸溶解于 20 mL 水中,在 70℃ 水浴中保持 10 min。将 530 mg 九水合硝酸铁溶解于 10 mL 水中,缓慢加入上述反丁烯二酸溶液中,将混合溶液水浴搅拌 10 min。将上述混合物加入聚四氟乙烯内衬的反应釜(40 mL)中,110℃ 下保持 6 h。冷却至室温后,用乙醇洗涤沉淀物数次,在 70℃ 下干燥 12 h,得到 MIL-88A。

rGO/MIL-88A/NF 的制备:取 2 mg MIL-88A 溶于 60 mL 乙醇中,超声 5 min 后向上述溶液加入 1 mg GO 与 10 μL Nafion。将上述混合物均匀涂覆

于 NF 表面(2 cm×2 cm)。在 80℃ 干燥 12 h 后,得到 rGO/MIL-88A/NF。

1.3 实验装置

电化学性能测试与降解性能测试的实验装置主要包括:电化学工作站(上海辰华 CHI600E);rGO/MIL-88A/NF 工作电极、铂对电极(213 型)、银/氯化银参比电极(sat.KCl,0.195 V vs SHE)组成的三电极体系。

1.4 电化学性能测试

循环伏安曲线(CV)的扫描速率为 50 mV/s,测试范围为-0.8~0.8 V。交流阻抗测试(EIS)的频率范围为 100 kHz~10 mHz,使用 Zsimwin 软件对 EIS 数据进行拟合。

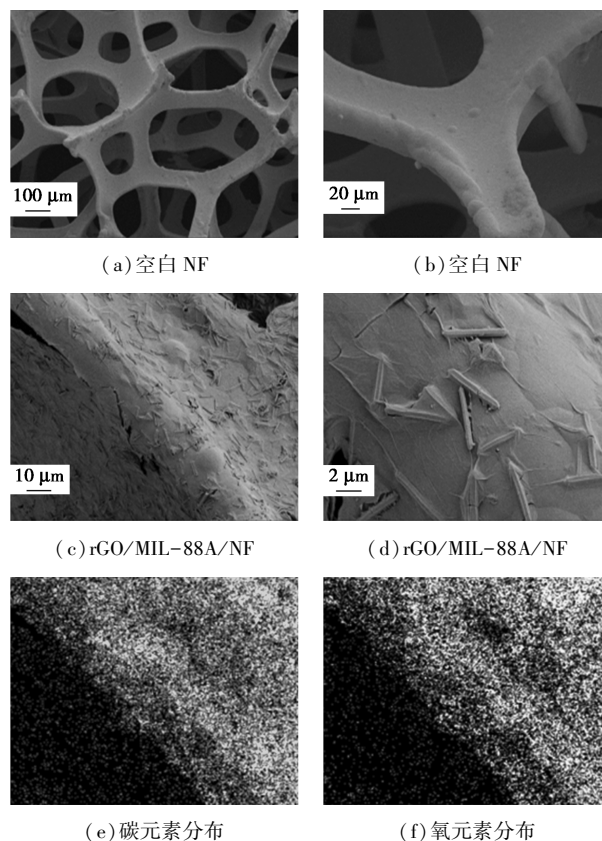
1.5 降解性能测试

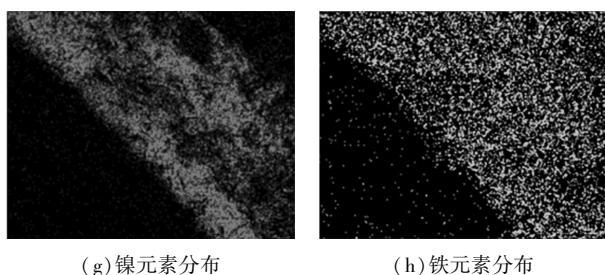
以 20 μmol/L 的 RhB 为目标污染物、硫酸钠为电解质,采用上海辰华 CHI600E 型电化学工作站的 i-T 模式向体系施加恒电位,进行污染物降解性能测试。利用紫外分光光度计在最大吸收波长为 554 nm 时测定吸光度并计算降解率。

2 结果与讨论

2.1 rGO/MIL-88A/NF 的表征

空白 NF 与 rGO/MIL-88A/NF 的 SEM 图和 EDS 图如图 1 所示。





(g) 镍元素分布 (h) 铁元素分布

图 1 空白 NF 与 rGO/MIL-88A/NF 的 SEM 图和 EDS 图

从图 1(a)、(b)中可以看出,未修饰空白 NF 的 SEM 形貌中可见空白 NF 有序的孔状结构,放大数倍后可清晰看到其光滑的表面。从图 1(c)、(d)中可以看出,MIL-88A 呈现出棒状外形,与文献[13]中的报道相吻合。此外,MIL-88A 高均匀性地附着在 NF 表面。rGO 在固化 MOF 时起类似粘结剂作用,在 MIL-88A 与 NF 之间形成一层薄膜,将 MIL-88A 均匀地固定于基底 NF 上,保证 rGO/MIL-88A/NF 的结构稳定性。从图 1(e)~(h)中可以看出,rGO/MIL-88A/NF 主要由元素 C、O、Ni 和 Fe 组成,其中部分 C、O 来源于 rGO 的修饰,Fe 归因于 MIL-88A 的修饰,表明 rGO 与 MIL-88A 已经成功复合于 NF 表面。

空白 NF 与 rGO/MIL-88A/NF 的 XPS 谱图如图 2 所示。

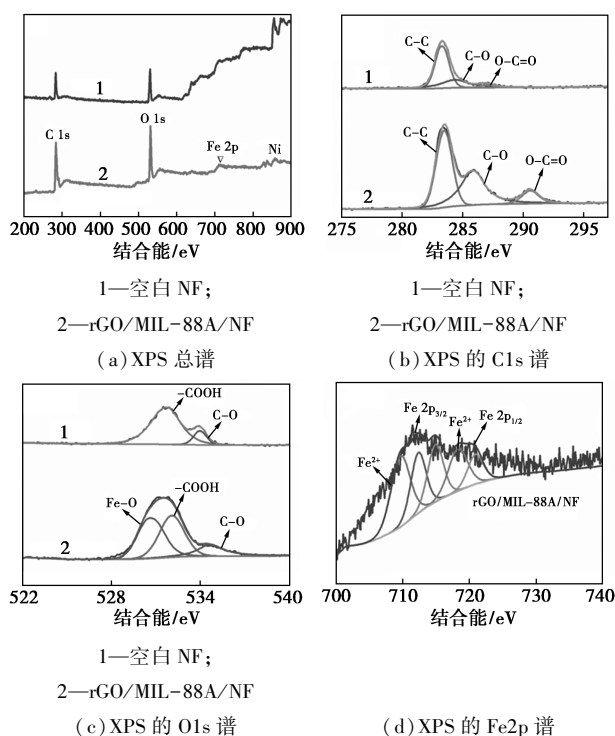


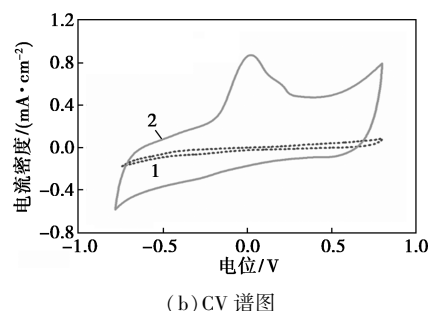
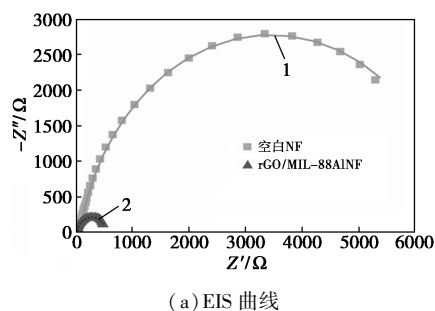
图 2 空白 NF 与 rGO/MIL-88A/NF 的 XPS 谱图

从图 2(a)中可以看出,rGO/MIL-88A/NF 主要

由 C、O、Ni、Fe 元素组成,与 EDS 的测试结果吻合。其中,rGO/MIL-88A/NF 的 C1s、O1s 与 Fe2p 的峰强度高于空白 NF,这与 rGO 和 MIL-88A 的修饰有关。由图 2(b)可知,rGO/MIL-88A/NF 的 C—O 与 O—C=O 峰面积高于空白 NF,C—O 与 O—C=O 等基团有助于改进阴极的亲水性,并提供双电子氧还原反应的表面活性位点。由图 2(c)可知,不同于空白 NF,rGO/MIL-88A/NF 在 531 eV 左右出现 Fe—O 键,这主要归因于 MIL-88A 的中心原子 Fe。由图 2(d)可知,rGO/MIL-88A/NF 的铁元素价态由 Fe²⁺ 与 Fe³⁺ 组成,其中 Fe²⁺ 约占总 Fe 的 61.1%,有利于阴极产生 H₂O₂ 后的 H₂O₂ 原位活化分解,保证体系中充足的 OH·生成与高效的污染物降解。

2.2 rGO/MIL-88A/NF 的电化学性能

通过电化学测试分析 rGO/MIL-88A/NF 的电催化活性与导电性能,结果如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,通过 Zimpwin 软件对所得数据进行拟合,得到 rGO/MIL-88A/NF 的 R_{ct} 为 534.3 Ω ,相同条件下空白 NF 的 R_{ct} 高达 6728 Ω ,说明 rGO 能够提高 NF 基底的导电性能,使 rGO/MIL-88A/NF 阴极具有较高的电子传递速率,有助于提升阴极的 H₂O₂ 产量。此外,MIL-88A 均匀分布于 rGO 上,该阴极的三维结构有利于反应物与活性位点接触,利于进行高效的氧还原反应。从图 3(b)中可以看出,测试所用扫描速率为 50 mV/s,测试电位范围为 -0.8 ~



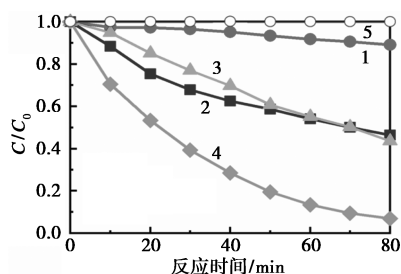
1—空白 NF;2—rGO/MIL-88A/NF

图 3 rGO/NF、MIL-88A/NF 和 rGO/MIL-88A/NF 的 EIS 曲线与 CV 谱图

0.8 V。结果表明在 0.51 V 和 0.02 V 左右, rGO/MIL-88A/NF 分别出现还原峰和氧化峰。而空白 NF 的 CV 谱图无明显的氧化还原峰出现, 这归因于 rGO/MIL-88A/NF 上的 Fe^{2+}/Fe^{3+} 价态循环^[14]。此外, rGO/MIL-88A/NF 的响应电流远高于空白 NF, 表明 rGO 与 MIL-88A 的修饰对 NF 电化学活性提升起到协同增效作用。其中, rGO 为阴极上电子传递提供途径, 增强 MIL-88A 的 Fe^{2+}/Fe^{3+} 价态循环。

2.3 rGO/MIL-88A/NF-电芬顿降解污染物

电芬顿体系对 RhB 的降解效果受到阴极材料、外加电位、溶液 pH 等因素影响。不同阴极材料在相同条件下的 RhB 降解能力对比如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 相较于其他阴极, 80 min 内 rGO/MIL-88A/NF 阴极对 RhB 的降解能力达到最高, 这主要归因于 rGO 优异的导电性与 MIL-88A 稳定的活化作用。此外, rGO/MIL-88A/NF 与空白 NF 体系的 H_2O_2 累积量对比如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 在反应进行 10 min 后, rGO/MIL-88A/NF 与空白 NF 体系的 H_2O_2 累积量差异达到最高。然而, 随着反应进行, 两体系之间的差异逐渐减小, 这是由于 rGO/MIL-88A/NF 上的活性 Fe^{2+} 使大量 H_2O_2 活化分解所致。



1—CF; 2—rGO/CF; 3—MIL-88A/CF; 4—rGO/MIL-88A/NF; 5—吸附

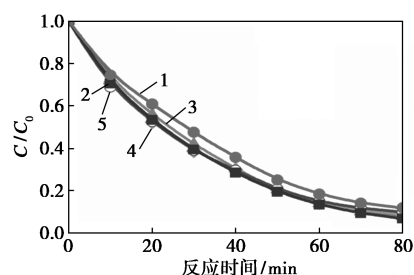
图 4 不同阴极的性能对比

表 1 H_2O_2 累积量对比

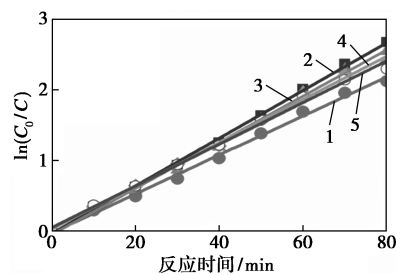
时间/min	H_2O_2 累积量/($mg \cdot L^{-1}$)	
	空白 NF	rGO/MIL-88A/NF
10	3.97	9.36
20	5.59	11.33
30	7.66	13.58
40	9.50	14.70
50	11.58	15.95
60	13.88	16.95

不同外加电压 (-0.3、-0.4、-0.5、-0.6 V 和 -0.7 V) 条件下电芬顿体系降解 RhB 的能力对比如

图 5(a) 所示。从图 5(a) 中可以看出, 当外加电压为 -0.3 V 时, 80 min 内 RhB 降解率达到 88.0% 左右。随着电压增加到 -0.4 V, RhB 降解率提高到 93.1% 左右。而当电压进一步升高, RhB 降解率反而降低。这是由于过高的电压会导致 H_2O_2 分解或其他副反应产生, 抑制强氧化自由基的高效生成, 降低 RhB 的降解率。对 RhB 的降解数据进行拟合, 发现符合一级反应动力学规律, 如图 5(b) 所示。不同电位降解 RhB 的动力学方程及系数如表 2 所示, 根据表 2 中的动力学系数 k 可知, 在电位为 -0.4 V 的条件下, RhB 的降解速率达到最高。



(a) 电位对降解率的影响



(b) 降解动力学

1—-0.3 V; 2—-0.4 V; 3—-0.5 V; 4—-0.6 V; 5—-0.7 V

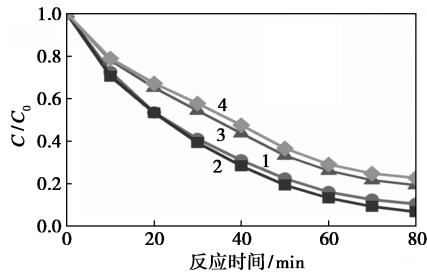
图 5 不同电位对 RhB 降解的影响

表 2 不同电位降解 RhB 的动力学方程及系数

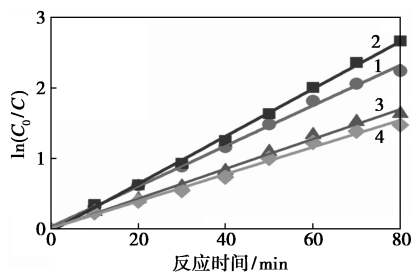
电位/V	动力学方程	反应速率系数 k/min^{-1}	R^2
-0.3	$y=0.0275x-0.0207$	0.0275	0.9950
-0.4	$y=0.0336x-0.0292$	0.0336	0.9982
-0.5	$y=0.0326x-0.0434$	0.0326	0.9966
-0.6	$y=0.0305x+0.0320$	0.0305	0.9958
-0.7	$y=0.0294x+0.0555$	0.0294	0.9944

溶液 pH (1.0、3.0、5.0 和 7.0) 对污染物降解的影响如图 6 所示, 不同 pH 降解 RhB 的动力学方程及系数如表 3 所示。从图 6(a) 中可以看出, 调节溶液 pH 为 1.0 时, 80 min 内 RhB 的降解率达到 89.4%; 溶液 pH 为 3.0 的条件下, 电芬顿体系对 RhB 降解率达到最高; pH 为 5.0 和 7.0 时, 80 min 内 RhB 的降解率仅为 80.6% 和 77.3%。以上实验

现象主要由于溶液的 pH 过低时,体系中过量的 H⁺ 导致副反应发生。H⁺ 消耗体系中的氧分子并生成水分子,限制阴极催化还原氧的效率^[15]。当溶液的 pH 过高时,阴极上铁离子的存在形式发生改变,部分具有活性的 Fe²⁺ 由 FeOOH 或 Fe₂O₃ 取代,导致 H₂O₂ 活化效率降低。根据图 6(b) 及表 3 中的动力学系数 k 可知,在溶液 pH 为 3.0 的条件下,RhB 的降解速率达到最高。



(a) pH 对降解率的影响



(b) 降解动力学

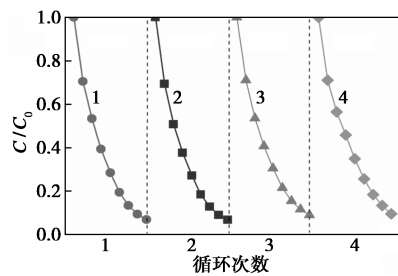
1—pH=1.0; 2—pH=3.0; 3—pH=5.0; 4—pH=7.0

图 6 初始 pH 对 RhB 降解的影响

表 3 不同 pH 降解 RhB 的动力学方程及系数

pH	动力学方程	反应速率系数 k/min^{-1}	R^2
1.0	$y=0.0287x+0.0333$	0.0287	0.9967
3.0	$y=0.0336x-0.0292$	0.0336	0.9982
5.0	$y=0.0211x+0.0109$	0.0211	0.9946
7.0	$y=0.0192x+0.0139$	0.0192	0.9919

通过循环实验确定 rGO/MIL-88A/NF 阴极的催化稳定性,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,



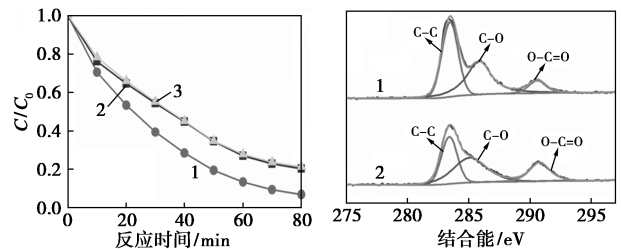
1—第 1 次循环; 2—第 2 次循环; 3—第 3 次循环; 4—第 4 次循环

图 7 RhB 降解循环实验

经过 4 次循环实验后,80 min 内 RhB 的降解率仍然能达到 90% 以上,表明该 rGO/MIL-88A/NF 阴极具有良好的稳定性,为阴极表面的氧还原与 H₂O₂ 活化提供持续的催化活性。

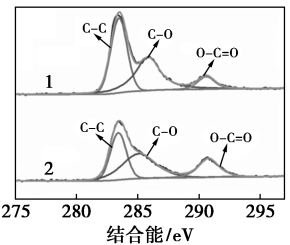
2.4 rGO/MIL-88A/NF-电芬顿的反应机理

使用叔丁醇(TBA)和对苯醌(BQ)作为自由基淬灭剂,分别用于清除反应体系中的 OH·和超氧自由基(O₂·⁻)。不同的淬灭剂对反应体系降解 RhB 的影响如图 8(a) 所示。从图 8(a) 中可以看出,当溶液中添加 5 mmol/L TBA 后,80 min 内 RhB 的降解率仅为 78.8%,这是由于加入 TBA 导致体系内的 OH·被清除。而当溶液中添加 5 mmol/L BQ 后,80 min 内 RhB 的降解率仅为 79.6%。因此,OH·和 O₂·⁻ 是该反应体系的主要活性自由基。



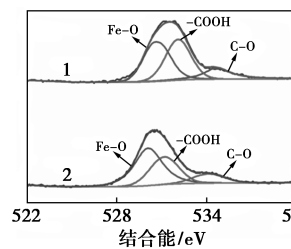
1—未加淬灭剂;
2—5 mmol/L BQ;
3—5 mmol/L TBA

(a) 淬灭实验



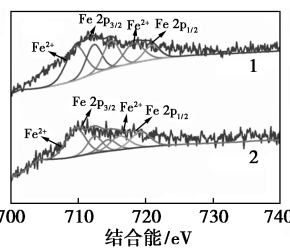
1—未使用; 2—使用后

(b) XPS 的 C1s 谱



1—未使用; 2—使用后

(c) XPS 的 O1s 谱



1—未使用; 2—使用后

(d) XPS 的 Fe2p 谱

图 8 淬灭实验及使用前后 rGO/MIL-88A/NF 的 XPS C1s, O1s, Fe2p 谱

为了进一步研究 rGO/MIL-88A/NF 的作用机理,测试了反应前后的 rGO/MIL-88A/NF 的 C 1s、O 1s 与 Fe 2p 的 XPS 高分辨谱图,结果如图 8(b) ~ (d) 所示。从图 8(b) ~ (d) 中可以看出,反应前后 rGO/MIL-88A/NF 的 C 1s、O 1s 谱图并未出现显著变化。然而,对 Fe 2p 谱图数据进行分析后发现,反应后 rGO/MIL-88A/NF 中 Fe²⁺ 的质量分数由 61.1% 转化为 59.7%,同时 Fe³⁺ 的质量分数相较反应前略微提升,表明 Fe³⁺ 能通过阴极的还原作用转

化为 Fe^{2+} 。Zhu 等^[15]发现碳基材料与含铁化合物可以发生络合作用形成 C—O—Fe 键。类似地, rGO/MIL-88A/NF 中 rGO 和 MIL-88A 通过 C—O—Fe 键形成稳定的结构。因此,阴极上的电子可通过 C—O—Fe 键进行传输,提高了电子传递速率。这不仅保证反应体系中持续的 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 价态循环,还保持了 rGO/MIL-88A/NF 阴极的高催化活性,有利于 RhB 的高效降解。

结合淬灭实验及 XPS 测试结果,推断出 rGO/MIL-88A/NF 阴极反应机理,如图 9 所示。氧分子吸附于 rGO/MIL-88A/NF 阴极表面,经过活性位点的催化激活,与体系中的质子和电子结合后最终生成 H_2O_2 。rGO 为 rGO/MIL-88A/NF 阴极提供导电性,而 MIL-88A 是阴极原位激活分解 H_2O_2 的主要原因。 H_2O_2 被 MIL-88A 的中心原子 Fe^{2+} 活化后生成具有强氧化性的 $\text{OH}\cdot$,同时 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} 。rGO/MIL-88A/NF 阴极使电子快速通过 C—O—Fe 键,还原 MIL-88A 中的 Fe^{3+} 。因此,具有高氧还原活性的双功能 rGO/MIL-88A/NF 阴极不仅实现芬顿体系高效原位生成 H_2O_2 ,并能够原位活化解 H_2O_2 ,最终实现 RhB 的高效降解。

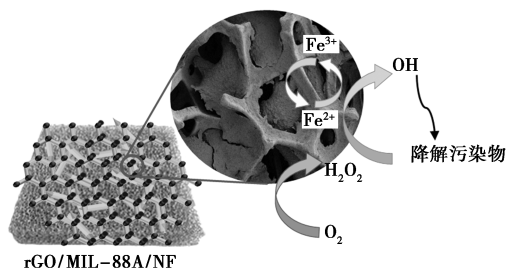


图 9 rGO/MIL-88A/NF 阴极机理示意图

3 结论

(1)通过水热法制备出形态规则的 MIL-88A,通过与 rGO 的共同修饰,最终制备出具有稳定形貌结构的 rGO/MIL-88A/NF。经过重复性实验后, rGO/MIL-88A/NF 仍保持良好的催化稳定性。

(2)相比于未修饰 NF, rGO/MIL-88A/NF 作用的电芬顿体系对 RhB 的降解性能显著提升。在电压为 -0.4 V 、pH 为 3.0 的条件下,80 min 内对 RhB 的降解率达到 94%。此外, rGO 与 MIL-88A 为阴极性能提供协同增效作用, rGO 提升阴极的导电性,加快 MIL-88A 上 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 价态循环,实现零添加 H_2O_2 与 Fe^{2+} 高效降解污染物。

参考文献

- [1] Holkar C R, Jadhav A J, Pinjari D V, *et al.* A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches[J]. *J Environ Manage*, 2016, 182(1): 351-366.
- [2] Mancipe S, Martinez J, Pinzon C, *et al.* Effective photocatalytic degradation of Rhodamine B using tin semiconductors over hydrothermalite-type materials under sunlight driven[J]. *Catal Today*, 2020, 372(15): 191-197.
- [3] Dao T B T, Ha T T L, Nguyen T D, *et al.* Effectiveness of photocatalysis of MMT-supported TiO_2 and TiO_2 nanotubes for rhodamine B degradation[J]. *Chemosphere*, 2021, 280: 130802.
- [4] Wang Z N, Liu M Y, Xiao F, *et al.* Recent advances and trends of heterogeneous electro-Fenton process for wastewater treatment-review[J]. *Chinese Chem Lett*, 2022, 33(2): 653-662.
- [5] Sirés I, Brillas E. Upgrading and expanding the electro-Fenton and related processes[J]. *Curr Opin Electroche*, 2021, 27: 100686.
- [6] Wang K X, Li H B, Yang Y, *et al.* Making cathode composites more efficient for electro-fenton and bio-electro-fenton systems: A review[J]. *Sep Purif Technol*, 2023, 304(1): 122302.
- [7] Brillas E. Fenton, photo-Fenton, electro-Fenton, and their combined treatments for the removal of insecticides from waters and soils. A review[J]. *Sep Purif Technol*, 2022, 284(1): 120290.
- [8] Cheng M, Lai C, Liu Y, *et al.* Metal-organic frameworks for highly efficient heterogeneous Fenton-like catalysis[J]. *Coordin Chem Rev*, 2018, 368(1): 80-92.
- [9] 石姝彤, 邓翠萍, 刘雨冽, 等. 氨基修饰增强的 Fe/Cu-MOF 对罗丹明 B 的光催化降解性能及相关机理[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(2): 441-451.
- [10] Li Y C, Wang X Y, Duan Z Y, *et al.* Zn/Co-ZIFs@ MIL-101 (Fe) metal-organic frameworks are effective photo-Fenton catalysts for RhB removal[J]. *Sep Purif Technol*, 2022, 293(15): 121099.
- [11] Li X H, Li X, Wang C L, *et al.* A novel design of Cu(I) active site on the metal-organic framework for exploring the structural transformation of Fenton-like catalysts through in situ "capturing" $\text{OH}\cdot$ [J]. *J Colloid Interf Sci*, 2023, 648(15): 778-786.
- [12] Geng N N, Chen W, Xu H, *et al.* Insights into the novel application of Fe-MOFs in ultrasound-assisted heterogeneous Fenton system: Efficiency, kinetics and mechanism[J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 72: 105411.
- [13] Omar A M A, Mohamed H S H, Khabiri G. In situ growth of semiconducting 1T/3R- MoS_2 nanosheets on spindle Mil88a as a novel heterostructure for outstanding photocatalytic performance[J]. *Sep Purif Technol*, 2024, 339(2): 126712.
- [14] Luo Z P, Liu M T, Tang D Y, *et al.* High H_2O_2 selectivity and enhanced Fe^{2+} regeneration toward an effective electro-Fenton process based on a self-doped porous biochar cathode[J]. *Appl Catal B-Environ*, 2022, 315(15): 121523.
- [15] Zhu R L, Zhu Y P, Xian H Y, *et al.* CNTs/ferrihydrate as a highly efficient heterogeneous Fenton catalyst for the degradation of bisphenol A: The important role of CNTs in accelerating $\text{Fe}(\text{III})/\text{Fe}(\text{II})$ cycling[J]. *Appl Catal B-Environ*, 2020, 270(5): 118891. ■