

# 锰渣/ $H_2O_2$ 非均相 Fenton 体系催化降解亚甲基蓝的研究<sup>①</sup>

郑国庆<sup>1,2</sup>, 易允龙<sup>1,2</sup>, 薛兴勇<sup>1,2</sup>, 苏俏俏<sup>1,2</sup>, 韩要丛<sup>1,2,3</sup>, 蓝丽红<sup>1,2</sup>, 陈贞南<sup>3</sup>

(1.广西民族大学化学化工学院, 广西 南宁 530006; 2.广西高校化学与生物转化过程新技术重点实验室, 广西 南宁 530006; 3.吉利百矿集团有限公司, 广西 百色 533000)

**摘要:** 采用锰渣和  $H_2O_2$  构成的非均相 Fenton 体系降解亚甲基蓝, 研究了初始 pH 值、 $H_2O_2$  浓度、锰渣加入量及反应温度对降解性能的影响, 考察了锰渣的循环稳定性能, 探讨了锰渣/ $H_2O_2$  体系去除亚甲基蓝的机理。结果表明, 反应温度 25 °C、亚甲基蓝浓度 20 mg/L、 $H_2O_2$  浓度 10 mmol/L、初始 pH 值 2.5、锰渣加入量 2 g/L 条件下反应 120 min, 锰渣/ $H_2O_2$  体系对亚甲基蓝的去除率超过 98.1%; 锰渣循环使用 5 次后, 反应 300 min 时对亚甲基蓝的去除率仍可达 95.5%。在锰渣/ $H_2O_2$  非均相 Fenton 体系中,  $\cdot OH$  对亚甲基蓝的降解起主导作用。

**关键词:** 锰渣; 双氧水; 亚甲基蓝; Fenton 氧化; 非均相 Fenton; 催化降解; 有机工业废水处理

中图分类号: X703

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.028

文章编号: 0253-6099(2024)02-0119-05

## Degradation of Methylene Blue by Manganese Residue/ $H_2O_2$ Heterogeneous Fenton Catalyst

ZHENG Guoqing<sup>1,2</sup>, YI Yunlong<sup>1,2</sup>, XUE Xingyong<sup>1,2</sup>, SU Qiaoqiao<sup>1,2</sup>, HAN Yaocong<sup>1,2,3</sup>, LAN Lihong<sup>1,2</sup>, CHEN Zhennan<sup>3</sup>  
(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, Guangxi, China; 2. Guangxi Higher Education Institutes Key Laboratory for New Chemical and Biological Transformation Process Technology, Nanning 530006, Guangxi, China; 3. Geely Baikuang Group Co Ltd, Baise 533000, Guangxi, China)

**Abstract:** Methylene blue was degraded by adopting a heterogeneous Fenton system composed of manganese residue and  $H_2O_2$ , and the effects of initial pH value,  $H_2O_2$  concentration, dosage of manganese residue and reaction temperature on the degradation performance were studied. The reusability of manganese residue was investigated, and the removal mechanism of methylene blue in the manganese residue/ $H_2O_2$  system was also discussed. The results show that the removal rate of methylene blue can exceed 98.1% after 120 min reaction at temperature of 25 °C, with methylene blue concentration of 20 mg/L,  $H_2O_2$  concentration of 10 mmol/L, manganese residue dosage of 2 g/L, and initial pH value of 2.5. After the manganese residue is recycled for 5 times, the removal rate of methylene blue can be still up to 95.5% by 300 min reaction. In the manganese residue/ $H_2O_2$  heterogeneous Fenton system,  $\cdot OH$  plays a leading role in the degradation of methylene blue.

**Key words:** manganese residue; hydrogen peroxide; methylene blue; Fenton oxidation; heterogeneous Fenton; catalytic degradation; treatment of organic industrial wastewater

利用 Fenton 氧化技术降解有机污染物具有高效性和普适性, 目前已成功应用于处理多种难降解有机工业废水。传统的均相 Fenton 技术是以  $Fe^{2+}$  等过渡金属离子催化  $H_2O_2$  生成高氧化电位的羟基自由基  $\cdot OH$ ,  $\cdot OH$  先氧化分解有机污染物为中间体, 然后进

一步使其矿化生成  $H_2O$ 、 $CO_2$  和小分子有机酸等无害产物。均相 Fenton 反应的缺点是溶液中的  $Fe^{2+}$  含量较高(一般超过 50 mg/L), 需要在后续阶段中和去除, 从而产生大量  $Fe(OH)_3$  污泥。有研究表明, 赤铁矿 ( $Fe_2O_3$ )、黄铁矿 ( $FeS_2$ ) 和磁铁矿 ( $Fe_3O_4$ ) 等含铁矿物

① 收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 广西民族大学科研基金(引进人才科研启动项目, 2020KJQD15); 崇左市科技计划项目(崇科 2023ZY0502); 2022 年度广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2022KY0160); 广西自然科学基金(2021GXNSFBA196065)

作者简介: 郑国庆(1997—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为固废资源化利用。E-mail: 1463028875@qq.com

通信作者: 韩要丛(1982—), 男, 山东郓城人, 博士, 讲师, 主要研究方向为新型无机胶凝材料及固废资源化利用。E-mail: yc-han@163.com

可以催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成  $\cdot\text{OH}$ , 可作为非均相 Fenton 催化材料, 而且这些含铁矿物在水溶液中几乎不溶解, 可以避免产生  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  污泥。在众多含铁矿物中, 磁铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 催化活性高, 且具有磁性, 便于分离回收和重复使用, 是一种典型的非均相 Fenton 催化材料<sup>[1-3]</sup>。

锰渣是电解金属锰、电解二氧化锰或硫酸锰生产过程中, 碳酸锰矿或氧化锰矿经硫酸浸出和固液分离后得到的工业固体废弃物。锰渣主要化学成分为 Si、Al、Ca、Fe、S 等元素, 另外还含有可溶性  $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$  等有害离子, 锰渣若不经处理随意堆放, 会对周边空气、水和土壤等造成严重污染<sup>[4-5]</sup>。现阶段锰渣主要以渣库堆放为主, 亟待资源化综合利用<sup>[6]</sup>。在各种锰渣中, 氧化锰矿经高温还原和浸出后得到的锰渣铁元素含量较高, 且主要以  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  形式存在, 是一种潜在的非均相 Fenton 催化材料, 将其用于处理有机工业废水, 可实现“以废治废”。

本文拟以氧化锰矿产出的锰渣和  $\text{H}_2\text{O}_2$  构成非均相 Fenton 反应体系, 探索初始 pH 值、 $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度、锰渣加入量和反应温度对亚甲基蓝去除效果的影响, 考察催化剂的重复使用性能和降解机理, 研究锰渣作为非均相 Fenton 催化材料的可行性。

## 1 实验

### 1.1 实验原料与仪器

实验所用锰渣取自广西某电解二氧化锰企业, 使用前在烘箱中  $105\text{ }^\circ\text{C}$  干燥 24 h, 研磨后过 100 目 (0.147 mm) 筛。

实验试剂包括过氧化氢、盐酸、异丙醇、亚甲基蓝和铁标准溶液 (1.000 g/L), 均为分析纯。

实验仪器包括电热鼓风干燥箱 (上海精宏, DHG-9146A)、pH 计 (上海雷磁, PHS-3S)、空气摇床 (上海福玛, QYC-200)、原子吸收分光光度计 (北京普析通用, TAS-990)、紫外可见分光光度计 (美国安捷伦, Cary 60)、X 射线粉末衍射仪 (德国 Bruker, D8 advance) 和傅立叶红外光谱仪 (美国 Thermo Scientific, Nicolet 6700) 等。

### 1.2 锰渣催化 $\text{H}_2\text{O}_2$ 降解亚甲基蓝实验

取一定量锰渣于试剂瓶中, 倒入 100 mL 一定浓度的亚甲基蓝溶液, 用盐酸调节溶液初始 pH 值, 然后加入一定量  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 最后将试剂瓶置于摇床, 设定温度后以 250 r/min 振荡一定时间, 取样后用紫外可见分光光度计测定亚甲基蓝溶液浓度, 计算亚甲基蓝去除率 ( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $C_0$  和  $C_t$  分别为亚甲基蓝溶液的初始浓度和反应到  $t$  时刻的浓度, mg/L;  $t$  为降解时间, min。

### 1.3 循环实验

初次降解时, 取 0.2 g 锰渣于试剂瓶中, 倒入 100 mL 浓度 20 mg/L 的亚甲基蓝溶液, 用 1 mol/L 盐酸调节溶液初始 pH 值至 2.5, 加入  $\text{H}_2\text{O}_2$  调节其浓度至 10 mmol/L, 然后在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  的空气摇床中以 250 r/min 振荡 300 min。结束后将试剂瓶静置 12 h, 移出上清液, 倒入 100 mL 浓度 20 mg/L 的亚甲基蓝溶液, 用 1 mol/L 盐酸调节溶液初始 pH 值至 3.0, 其他条件同初次降解, 进行第二次降解实验; 重复以上步骤, 考察锰渣的循环使用性能。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 锰渣的表征与分析

锰渣的化学组成等理化性质与所用锰矿原料类型、产地及锰产品生产工艺有很大关系, 实验所用锰渣取自广西某电解二氧化锰企业, 该企业以高品位氧化锰矿为原料, 采用高温还原焙烧工艺生产二氧化锰。锰渣化学成分分析结果见表 1, X 射线衍射图谱见图 1。可以看出, 锰渣主要化学成分为 Al、Fe、S、Mn、Si 和 K 等元素, 对应矿物为  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。通过粒度仪和比表面分析仪测试得到锰渣的中位径  $D_{50}$  和比表面积分别为  $10.99\text{ }\mu\text{m}$  和  $29.95\text{ m}^2/\text{g}$ 。较高的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量、较小的粒度和较高的比表面积为锰渣催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  降解有机污染物提供了良好的基础。另外, 锰渣具有良好的磁性, 经磁滞回线测试仪器测试得到其饱和磁化强度为  $8.67\text{ emu/g}$ , 这使其可通过外加磁场的方式从降解体系中分离回收和循环利用。

表 1 锰渣主要化学成分 (质量分数) %

$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	MnO	$\text{SiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$
25.53	21.81	17.28	15.90	12.70	2.37

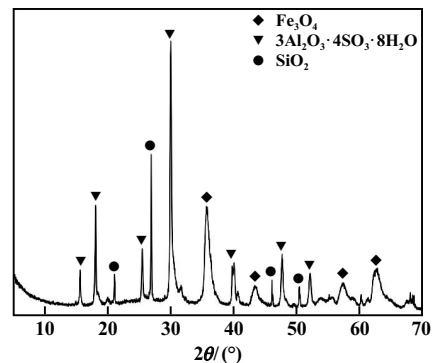


图 1 锰渣 X 射线衍射图谱

## 2.2 锰渣催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝

### 2.2.1 不同体系下亚甲基蓝的去除效果

反应温度 25 ℃、亚甲基蓝初始浓度 20 mg/L、反应时间 120 min 条件下,考察了不同体系对亚甲基蓝的去除效果,结果如表 2 所示。从表 2 可知,未加锰渣的体系,亚甲基蓝去除率非常低,说明亚甲基蓝自身较为稳定,仅使用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 难以去除;加入锰渣的体系,亚甲基蓝去除率明显提升,未加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 或未调节体系 pH 值时,亚甲基蓝去除率提升至 12.1%~21.3%,可见锰渣对亚甲基蓝具有一定的吸附作用;同时加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 并调节体系 pH 值至 2.5 时,亚甲基蓝去除率高达 99.10%,表明锰渣在适宜 pH 值下可有效催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 产生自由基,促进亚甲基蓝的降解。

表 2 不同体系下亚甲基蓝的去除率

序号	锰渣用量/g	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 浓度/ (mmol · L <sup>-1</sup> )	pH 值	亚甲基蓝 去除率/%
1	0	10	8.6(原液)	0.25
2	0	0	2.5	0.48
3	0	10	2.5	0.35
4	0.2	0	8.6(原液)	12.10
5	0.2	10	8.6(原液)	15.50
6	0.2	0	2.5	21.30
7	0.2	10	2.5	99.10

### 2.2.2 初始 pH 值对降解性能的影响

反应温度 25 ℃、亚甲基蓝浓度 20 mg/L、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 10 mmol/L、锰渣加入量 2 g/L 条件下,考察了体系在 pH 值 2.0~4.0 范围内对亚甲基蓝的去除效果,结果如图 2 所示。由图 2 可知,溶液初始 pH 值是锰渣催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝的重要影响因素,初始 pH 值为 2.5 和 3.0 时,亚甲基蓝去除率较高,反应 120 min 时,去除率分别达到 99.1% 和 95.2%。这是因为,反应体系 pH 值低于 2.5 时,催化生成的 ·OH 会相互结合重新生成 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,使得溶液中 ·OH 减少,亚甲基蓝去除率

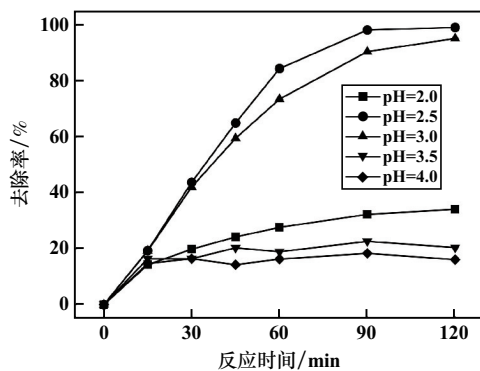


图 2 初始 pH 值对亚甲基蓝去除率的影响

降低。而当初始 pH 值较高时,亚铁离子易变成铁离子并形成络合物,从而降低锰渣的催化性能<sup>[7]</sup>。

### 2.2.3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度对降解性能的影响

反应温度 25 ℃、亚甲基蓝浓度 20 mg/L、锰渣加入量 2 g/L、初始 pH 值 2.5 条件下,考察了 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度对亚甲基蓝去除率的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可知,亚甲基蓝去除率随 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度提高呈先增加后降低的趋势。反应时间 120 min, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 1 mmol/L 时亚甲基蓝去除率为 93.3%;浓度增至 10 mmol/L 时,去除率达 99.1%;继续增加 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度至 20 mmol/L 和 40 mmol/L,亚甲基蓝去除率略有降低。·OH 作为 Fenton 催化降解反应中的关键物质,其生成速率和数量与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度紧密相关,提高 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度会增加 ·OH 的产生量,从而加快亚甲基蓝的降解<sup>[8]</sup>。然而, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度过高时,生成的 ·OH 会与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 反应生成氧化能力较弱的 ·O<sub>2</sub>H,致使亚甲基蓝去除率降低<sup>[9-10]</sup>,对应反应为:

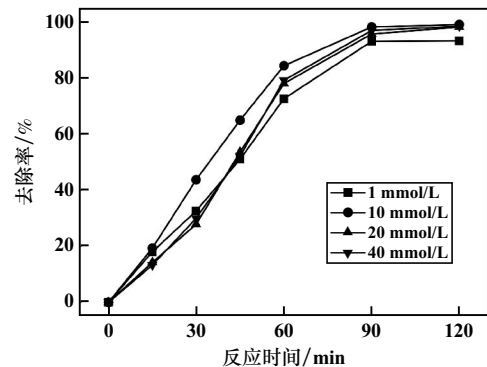
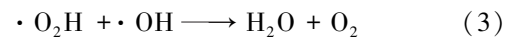
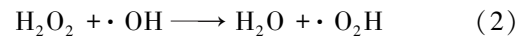


图 3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度对亚甲基蓝去除率的影响

### 2.2.4 锰渣加入量对降解性能的影响

反应温度 25 ℃、亚甲基蓝浓度 20 mg/L、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 10 mmol/L、初始 pH 值 2.5 条件下,考察了锰渣加入量对亚甲基蓝去除率的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可知,适量增加锰渣加入量可有效提高亚甲基蓝的去除速率,锰渣加入量从 1 g/L 增至 5 g/L 时,反应 60 min 时亚甲基蓝去除率从 32.1% 增至 96.2%。这是因为,增加锰渣加入量能为体系催化反应提供更多的表面活性位点,加快 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解,产生更多自由基,从而提高降解速率<sup>[11]</sup>。反应 120 min、锰渣加入量 1 g/L 时,亚甲基蓝去除率提升至 68.9%,锰渣加入量 2~5 g/L 时亚甲基蓝去除率均提升至 97% 以上。综合考虑,后续锰渣加入量选择 2 g/L。

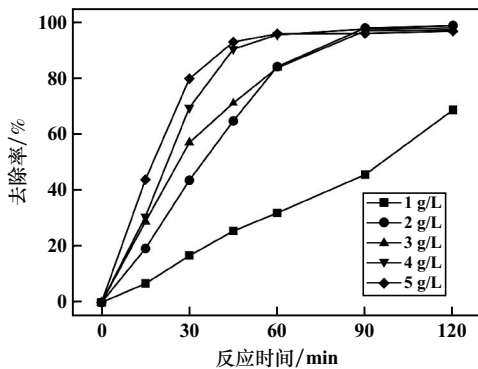


图4 锰渣加入量对亚甲基蓝去除率的影响

### 2.2.5 反应温度对降解性能的影响

亚甲基蓝浓度 20 mg/L、 $H_2O_2$  浓度 10 mmol/L、初始 pH 值 2.5、锰渣加入量 2 g/L 条件下,考察了反应温度对亚甲基蓝去除率的影响,结果如图 5 所示。由图 5 可知,提高反应温度可有效提升亚甲基蓝的去除速率。反应温度 10  $^{\circ}C$ ,反应 120 min 时,亚甲基蓝去除率仅 33.9%。反应温度 55  $^{\circ}C$  时,仅需反应 45 min 亚甲基蓝去除率即可达到 97.8%。从化学动力学角度看,升温使反应体系能量升高,分子平均动能增加,分子间碰撞概率提高,从而加快催化降解反应的进行<sup>[12]</sup>。从节能降耗方面考虑,后续实验反应温度选择 25  $^{\circ}C$ 。

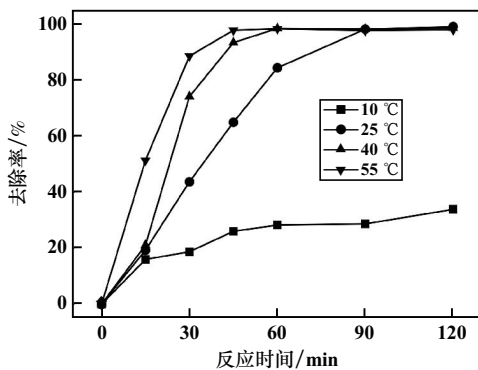


图5 反应温度对亚甲基蓝去除率的影响

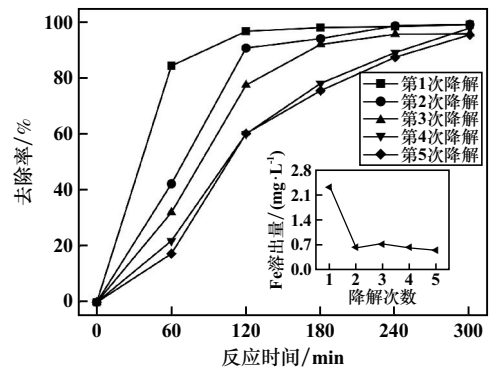
### 2.2.6 综合实验

由以上单因素实验得到锰渣催化  $H_2O_2$  去除亚甲基蓝的适宜条件为:反应温度 25  $^{\circ}C$ 、 $H_2O_2$  浓度 10 mmol/L、初始 pH 值 2.5、锰渣加入量 2 g/L。在该条件下进行了 3 次平行验证实验,反应 120 min 时亚甲基蓝去除率分别为 98.1%、98.5% 和 99.3%,与单因素实验结果基本一致。

### 2.2.7 循环稳定性研究

循环稳定性是非均相 Fenton 催化剂的重要性能指标。锰渣循环稳定性评价结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着使用次数增加,锰渣催化  $H_2O_2$  降解亚

甲基蓝的速率不断下降。第 5 次使用时,反应 120 min 时亚甲基蓝去除率仅 60.2%,但反应 300 min 时,去除率仍达 95.5%,说明锰渣作为非均相 Fenton 催化剂具有较好的重复使用性能。从循环实验过程中的 Fe 溶出量看,第 1 次降解后 Fe 溶出量为 2.33 mg/L,第 2~5 次降解后 Fe 溶出量在 0.52~0.73 mg/L 范围内,说明锰渣在循环使用过程中结构较为稳定,损耗较小,具有良好的循环稳定性。

图6 锰渣催化  $H_2O_2$  降解亚甲基蓝的循环稳定性

### 2.3 亚甲基蓝去除机理研究

反应温度 25  $^{\circ}C$ 、亚甲基蓝浓度 20 mg/L、 $H_2O_2$  浓度 10 mmol/L、初始 pH 值 2.5、锰渣加入量 2 g/L 条件下,测试不同反应时间下亚甲基蓝溶液的紫外可见吸收光谱,结果如图 7 所示。由图 7 可知,亚甲基蓝原溶液在 291 nm、613 nm 和 665 nm 处存在特征吸收峰,随着反应进行,3 处特征峰强度逐渐减弱,反应 120 min 时,3 处特征峰基本消失,且未出现新特征峰,同时亚甲基蓝溶液变为无色,说明溶液中的亚甲基蓝已被去除。

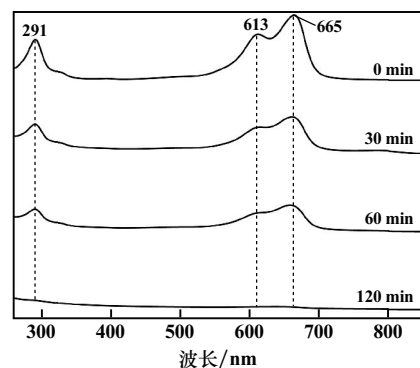


图7 亚甲基蓝降解过程的紫外可见吸收光谱

反应 120 min 后,将锰渣从溶液中过滤分离出来,烘干后进行红外光谱分析,并与亚甲基蓝及反应前锰渣的红外光谱进行比较,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,反应前后的锰渣红外光谱图无明显变化,特征

峰主要为 584 cm<sup>-1</sup> 处 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的 Fe—O 伸缩振动吸收峰、1 082 cm<sup>-1</sup> 处 SiO<sub>2</sub> 的 Si—O—Si 弯曲振动吸收峰、1 638 cm<sup>-1</sup> 和 3 448 cm<sup>-1</sup> 处 H<sub>2</sub>O 的特征吸收峰, 且反应后回收的锰渣中未出现亚甲基蓝的特征峰, 说明反应后的锰渣没有吸附亚甲基蓝, 亚甲基蓝的去除源于锰渣/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 非均相 Fenton 体系的催化降解作用。

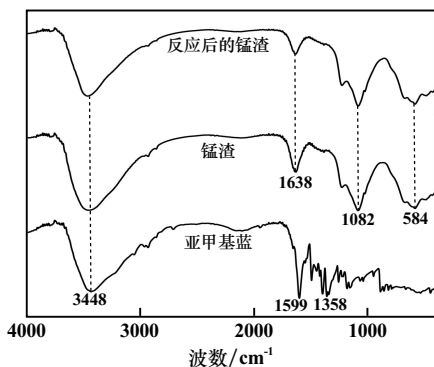


图8 亚甲基蓝及反应前后锰渣的红外光谱

在研究的 Fenton 体系中加入自由基淬灭剂, 通过对比添加淬灭剂前后有机污染物的降解效果, 可间接证实羟基自由基的存在, 并可定量计算对应自由基对有机污染物降解的贡献。本文选取常见·OH 淬灭剂异丙醇, 在反应温度 25 ℃、亚甲基蓝浓度 20 mg/L、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 10 mmol/L、初始 pH 值 2.5、锰渣加入量 2 g/L 条件下进行淬灭实验, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 加入异丙醇后, 亚甲基蓝去除率明显降低, 异丙醇加入量 10 mmol/L、反应 120 min 时亚甲基蓝去除率仅 33.0%, 表明在锰渣催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝过程中, ·OH 起主导作用。

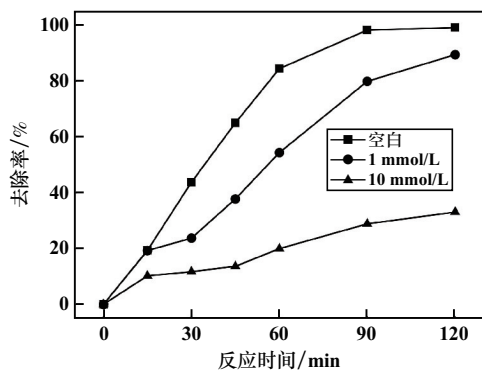


图9 不同淬灭剂条件下亚甲基蓝的去除率

### 3 结 论

1) 实验所用锰渣 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 含量较高, 且具有较小的

粒度、较高的比表面积和良好的磁性, 可与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 构成非均相 Fenton 催化体系处理有机工业废水, 实现“以废治废”。

2) 锰渣催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 去除亚甲基蓝的适宜条件为: 反应温度 25 ℃、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 10 mmol/L、初始 pH 值 2.5、锰渣加入量 2 g/L。在该条件下反应 120 min, 体系对 20 mg/L 亚甲基蓝的去除率超过 98.1%。锰渣重复使用 5 次后, 反应 300 min 时对亚甲基蓝的去除率仍可达 95.5%, 说明其具有良好的循环稳定性能。

3) 在锰渣催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理亚甲基蓝过程中, ·OH 的氧化降解作用对亚甲基蓝的去除起主导作用。

### 参考文献:

- [1] 俞乙平, 林少华, 钱子姣. 活化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的芬顿/类芬顿体系的研究现状[J]. 应用化工, 2022, 51(4): 1101-1108.
- [2] 陆衡, 叶正芳, 王鹏, 等. Fenton 氧化污泥资源化利用技术的研究进展[J]. 化工环保, 2022, 42(6): 654-660.
- [3] NIE M X, LI Y L, HE J Y, et al. Degradation of tetracycline in water using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanospheres as Fenton-like catalysts: kinetics, mechanisms and pathways[J]. New Journal of Chemistry, 2020, 44(7): 2847-2857.
- [4] TAO J, YANG B, SU S J, et al. Leaching characteristics and kinetics of iron and manganese from iron-rich pyrolusite slag in oxalic acid solution[J]. Separation Science and Technology, 2021, 56(9): 1612-1621.
- [5] 龙腾发, 周恒宇, 姚再恒, 等. 电解锰渣中氨氮的无废液脱除及稳定化研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(5): 88-91.
- [6] 练强, 张杰. 锰渣硫酸浸出正交实验探究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(2): 108-110.
- [7] 龙开先, 王鹏伟, 张基伟, 等. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 类 Fenton 法降解亚甲基蓝[J]. 应用化工, 2016, 45(5): 916-919.
- [8] 蔡文良, 谢艳云. Fenton 氧化-混凝沉淀处理电镀废水中重金属镍的研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 106-109.
- [9] 谢欣卓, 钟金魁, 李静, 等. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-nZVI 类 Fenton 法降解水中磺胺甲恶唑[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3103-3111.
- [10] Taşçı S, Özgüven A, Yıldız B. Multi-Response/Multi-Step Optimization of Heterogeneous Fenton Process with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Catalyst for the Treatment of Landfill Leachate[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021, 232: 275.
- [11] 李婷婷, 李瑞雪, 冯馨心, 等. 中空多孔磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/纤维素/海泡石微球异相 Fenton 催化降解亚甲基蓝[J]. 精细化工, 2022, 39(9): 1858-1865.
- [12] 吴颖, 张凯, 唐景春. Fenton 法处理丙烯酸废水的研究[J]. 石化技术, 2022, 29(9): 91-93.

引用本文: 郑国庆, 易允龙, 薛兴勇, 等. 锰渣/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 非均相 Fenton 体系催化降解亚甲基蓝的研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(2): 119-123.