



钼助催化 Fenton 法降解罗丹明 B 的效能研究

李明礼¹, 谭凤训¹, 罗从伟^{1,2}, 翟学东³, 武道吉^{1,2}, 成小翔^{1,2}

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101; 3. 鄂尔多斯市安信泰环保科技有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

[摘要] 为考察钼(Mo)助催化 Fenton 法对罗丹明 B(RhB)降解的效能, 研究了 Fe^{2+} 投加量、过氧化氢(H_2O_2)投加量、初始 pH、钼粉投加量、 Cl^- 投加量、腐殖酸(HA)投加量对 RhB 去除效果的影响。结果表明: Mo 能有效地提升体系中 RhB 的去除率, Mo 作为助催化剂可以有效提升活性羟基自由基的生成效率, 且 Mo 的重复使用性能稳定, 经过 5 次循环利用后, RhB 去除率基本保持不变。通过 LC-MS/MS 技术检测出 7 种氧化中间产物, 推测了 RhB 在羟基自由基作用下的氧化路径。

[关键词] 罗丹明 B; Fenton 试剂; 降解产物; 钼粉

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0143-07

Degradation of Rhodamine B from water by molybdenum-assisted Fenton reaction

LI Mingli¹, TAN Fengxun¹, LUO Congwei^{1,2}, ZHAI Xuedong³, WU Daoji^{1,2}, CHENG Xiaoxiang^{1,2}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;
2. Institute of Resources and Environment Innovation, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;
3. Ordos Anxintai Environmental Science and Technology Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: In order to investigate the degradation efficiency of Rhodamine B (RhB) by molybdenum (Mo) assisted Fenton method, the influences of Fe^{2+} dosage, H_2O_2 dosage, initial pH, molybdenum powder dosage, Cl^- dosage and HA dosage on RhB removal were studied. The results showed that Mo could effectively improve the degradation rate of RhB in the system. As a co-catalyst, Mo could effectively improve the generation efficiency of active hydroxyl radicals. Moreover, the reuse performance of Mo was stable. After 5 cycles, the degradation rate basically remained unchanged. Seven oxidation intermediates were detected by LC-MS/MS, and the oxidation pathway of RhB under the action of hydroxyl radical was speculated.

Key words: Rhodamine B; Fenton reagent; degradation product; molybdenum powder

印染行业在我国纺织工业中扮演重要角色,但也对生态环境造成了较大危害^[1]。印染废水成分复杂、色度高、难以脱色、有机物浓度高、生物降解性差,对水生态稳定和人类健康生活产生严重危害^[2]。罗丹明 B(RhB)是一种稳定的碱性有机染料,并且具有致癌性,传统的处理工艺对其很难达到预期处理效果^[3-4]。

由于水体的成分复杂,传统处理印染废水的方

法(化学、生物、物化)很难对其起到较好的处理效果,包含 Fenton 或类 Fenton 法在内的高级氧化工艺(AOPs)逐渐被大家关注。为了使传统 Fenton 充分发挥氧化能力,需将亚铁盐维持在较高浓度,促使 H_2O_2 分解产生活性羟基自由基($\cdot\text{OH}$)。然而 Fe^{2+} 不稳定,很容易被氧化成 Fe^{3+} ,抑制了 RhB 的降解,且 Fe^{3+} 的大量存在,会与 OH^- 反应产生含铁污泥,造成污染^[5]。钼粉作为一种优秀的助催化剂,能促使

[基金项目] 山东省重大研发计划项目(2020CXGC011203);山东省博士后创新项目(317202002023);中央引导地方科技发展基金项目(2020ZY0068);济南市科研带头人工作室项目(2019CXRC065)

$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 快速循环,有利于 H_2O_2 的分解,提高RhB降解的效率,抑制含铁污泥的产生^[6]。

本实验以RhB废水为目标物,研究了Fenton试剂中 Fe^{2+} 投加量、 H_2O_2 投加量、钼粉投加量、初始pH、Cl⁻投加量、腐殖酸(HA)投加量对RhB去除效果的影响以及Mo在水体中的循环效能。

1 材料和方法

1.1 试剂与仪器

试剂:罗丹明B(分析纯)、硫酸亚铁铵(分析纯)、过氧化氢(质量分数30%)、浓硫酸(质量分数98%)、钼粉(质量分数99.5%)、氯化钠(分析纯)、腐殖酸(分析纯)。实验过程中溶液配制均采用美国Millipore公司MiliQ系统制备的超纯水。

仪器:UV-9000紫外可见分光光度计,上海元析有限公司;NKSJ-1型恒温磁力搅拌器,常州诺基仪器有限公司;精密pH计,Sartorius公司;101-OES型电热鼓风干燥箱,北京市永光明医疗仪器有限公司;Q5200E型超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;T-214电子分析天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司。

1.2 模拟水样

配制2 mmol/L的RhB储备液:准确称取0.095 8 g RhB固体,用超纯水定容到100 mL,常温保存。

1.3 实验方法

(1)将200 mL超纯水置于烧杯中,在恒温磁力搅拌器的搅动下分别加入1 mL 2 mmol/L的模拟水样和一定量的钼粉。反应开始前,用3 mmol/L的 H_2SO_4 将pH调节至指定范围,然后用微型注射器加入一定量的 Fe^{2+} 溶液和 H_2O_2 溶液。分别在0、1、2、3、4、7、10、15、20 min取样,用紫外可见分光光度计在550 nm波长处测所取样品的吸光度。

(2)Mo循环实验中,反应体系为200 mL,初始RhB浓度为0.01 mmol/L, Fe^{2+} 浓度为0.02 mmol/L, H_2O_2 浓度为0.3 mmol/L,钼粉投加量为0.01 g,pH为3,反应时间为20 min,进行多组平行实验。反应完成后,将钼粉用超纯水清洗,离心后真空干燥12 h,干燥后的钼粉再次进行循环实验,共进行5次^[7]。

1.4 降解效率评估计算

实验中通过测定RhB的吸光度计算RhB去除率,计算公式见式(1)。

$$\eta = \frac{A_0 - A_i}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η ——RhB去除率,%;

A_0, A_i ——分别为原始RhB模拟废水和处理后的RhB模拟废水的吸光度。

2 结果和讨论

2.1 钼粉投加量对RhB去除率的影响

Mo作为一种金属催化剂,氧化状态极易发生改变。Mo可作为直接活跃的物种用于高级氧化反应,能促进低价金属离子的生成,从而更好地激活体系中的 H_2O_2 ^[8]。

在200 mL反应体系中,在初始RhB浓度为0.01 mmol/L, Fe^{2+} 浓度为0.02 mmol/L, H_2O_2 浓度为0.3 mmol/L,pH为3,反应时间为20 min的条件下,分别考察了不同Fenton体系和不同钼粉投加量对RhB降解的影响,结果见图1。

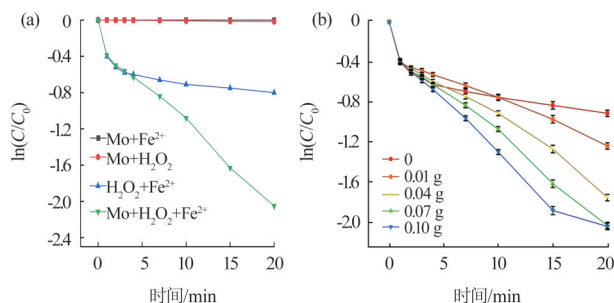


图1 不同Fenton体系(a)和钼粉投加量(b)对RhB降解的影响

Fig. 1 Effect of different Fenton systems (a) and molybdenum powder dosage (b) on RhB removal

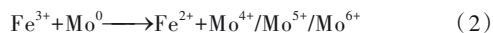
由图1(a)可以看出,Mo/ Fe^{2+} 体系和Mo/ H_2O_2 体系都不能对RhB起到降解作用。在 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 体系中,RhB在20 min时的去除率为55.17%。当体系加入钼粉,Mo/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ 体系在20 min时对RhB降解率提升至87.27%,说明Mo的存在能有效提升 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 体系对RhB的去除效果。

由图1(b)可以看出,当体系中不添加钼粉时,Fenton体系对RhB的去除率为55.17%;当钼粉投加量为0.01 g时,20 min时RhB降解率为71.26%;随钼粉投加量的增加,RhB去除率随之提高。但当钼粉投加量从0.07 g增加到0.1 g时,RhB去除率仅从87.07%提升至87.27%,表明继续添加钼粉并未给RhB的降解带来较大的提升。此外,反应1 min内钼

粉的投加并不会影响RhB的去除效果;1~3 min时,钼粉的添加会轻微抑制RhB的去除;3 min之后,钼粉作为助催化剂提升RhB去除效果明显。

导致上述现象的原因为:

(1) Mo作为助催化剂,其暴露在表面的还原金属位也参与了Fenton反应,可能发生的反应见式(2)~式(4)。



Mo^0 和 Mo^{4+} 的存在,使 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 有效循环,提高了 H_2O_2 的分解效率,更容易产生 $\cdot\text{OH}$,从而提高了RhB的降解效率,这与Qiuying YI等^[9]在Mo作为助催化剂的实验中加快了 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的循环效率结果一致。

(2) Mo作为助催化剂,能显著提高RhB的降解率,但最终RhB的降解率受体系中 $\cdot\text{OH}$ 浓度限值的影响,Mo的继续投加对RhB降解提升较小。

(3) Mo的投加在1~3 min表现为对RhB去除效率的抑制。在相同条件下,经过多次重复实验,推测可能是Mo作为助催化剂,同时具有很强的还原性,反应初期会对 $\cdot\text{OH}$ 产生一定的抑制作用。反应整体RhB降解效果较好,是因为在Mo的作用下, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 快速循环,充足的 Fe^{2+} 保证了体系的氧化能力。

2.2 H_2O_2 投加量对RhB降解率的影响

H_2O_2 浓度对RhB的去除效率有着重要影响。 H_2O_2 和 Fe^{2+} 共存时具有很强的氧化性,产生大量 $\cdot\text{OH}$,相比于其他氧化剂, $\cdot\text{OH}$ 有着更高的氧化还原电位,更容易氧化废水中的有机物^[9]。

在200 mL的反应体系中,在初始RhB浓度为0.01 mmol/L, Fe^{2+} 浓度为0.02 mmol/L,钼粉投加量为0.01 g,水体pH为3,反应时长为20 min的条件下,测定不同 H_2O_2 投加量下RhB的去除率,结果见图2。

由图2可以看出,当 H_2O_2 浓度从0.1 mmol/L增加至0.3 mmol/L时,RhB去除率随之提高。当 H_2O_2 投加量为0.3 mmol/L时,RhB的去除率在20 min时达到72.03%,RhB可被有效降解;当 H_2O_2 的浓度大于0.3 mmol/L时,RhB的去除率反而下降。与吴坚扎西等^[4,10]在采用Fenton体系降解RhB的实验中得出的 H_2O_2 过量RhB去除率下降的结论一致。

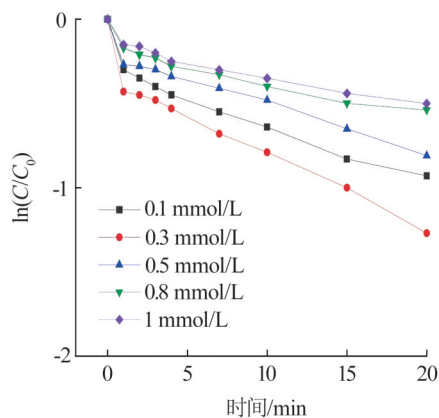


图2 H_2O_2 投加量对RhB去除效果的影响

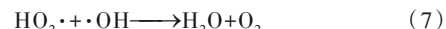
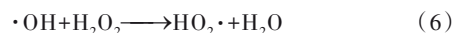
Fig. 2 Effect of H_2O_2 dosage on RhB removal

导致这种现象的原因是:

(1) 当 H_2O_2 浓度过低时, H_2O_2 的浓度相对于有机物的浓度较低,产生的 $\cdot\text{OH}$ 浓度偏低。随着 H_2O_2 浓度升高,体系会产生更多的 $\cdot\text{OH}$,RhB的去除效率提高,反应式见式(5)。



(2) 当 H_2O_2 投加量大于0.3 mmol/L时,RhB的去除率出现减小的趋势,Xinxin DING等^[11]认为过量的 H_2O_2 消耗了 $\cdot\text{OH}$,从而降低目标污染物的去除率,反应式见式(6)~式(7)。王伟亮等^[12]在US/UV-Fenton降解RhB的实验中认为 H_2O_2 在消耗 $\cdot\text{OH}$ 的同时也会将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,抑制 $\cdot\text{OH}$ 的生成。所以当 H_2O_2 浓度不断增加时,RhB的去除率会降低。

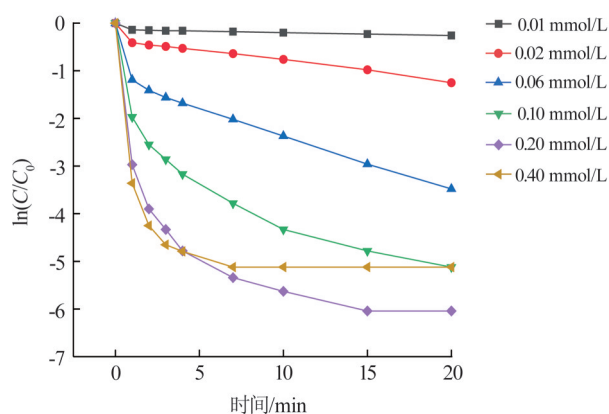


2.3 Fe^{2+} 投加量对RhB降解率的影响

Fe^{2+} 浓度是影响Fenton体系的重要因素之一, Fe^{2+} 作为催化剂在促使 H_2O_2 分解产生 $\cdot\text{OH}$ 方面有着极其重要的作用。

在200 mL的反应体系中,在初始RhB浓度为0.01 mmol/L,初始pH为3, H_2O_2 浓度为0.3 mmol/L,钼粉投加量为0.01 g,反应时间为20 min条件下,考察了不同 Fe^{2+} 浓度对RhB去除效果的影响,结果见图3。

由图3可知,当 Fe^{2+} 浓度为0.01 mmol/L时,20 min时RhB的降解率仅为22.63%;随着 Fe^{2+} 浓度的增加,RhB的降解率随之提高;在 Fe^{2+} 浓度提升至0.20 mmol/L时,RhB在20 min时的去除率达到了

图3 Fe²⁺对RhB去除效果的影响Fig. 3 Effect of Fe²⁺ dosage on RhB removal

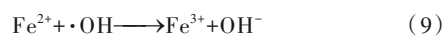
99.76%, 去除效果最佳。产生这种结果的原因可能是: H₂O₂ 自身氧化能力相对较弱, 对 RhB 的去除很难达到较好的效果, 需要在 Fe²⁺ 的作用下, 促使 H₂O₂ 分解, 产生大量 ·OH。在 Fe²⁺ 浓度为 0.01 mmol/L 时, Fe²⁺ 浓度过低, 生成 ·OH 速率较慢, RhB 的降解效率较低。随着 Fe²⁺ 浓度增加, H₂O₂ 分解效率提高, 体系中 ·OH 的浓度提高^[13]。但随着 Fe²⁺ 浓度从 0.20 mmol/L 继续升高至 0.40 mmol/L, RhB 的脱色开始受到抑制, 去除率反而出现了下降的趋势。与吴坚扎西等^[4]研究 Fenton 试剂处理染色废水的效果随着 Fe²⁺ 的增加先促进后抑制的结论一致。

RhB 去除率下降的原因是:

(1) 大量的 Fe²⁺ 使 ·OH 的产生速率过快, 部分 ·OH 未来得及和 RhB 结合, 自由基之间就发生复合, 见式(8)。



(2) 过多的 Fe²⁺ 会对 ·OH 产生捕获作用, 消耗 ·OH, 见式(9)。



2.4 pH 对 RhB 降解率的影响

pH 是影响 Fenton 反应的关键因素, 在酸性环境下, Fe²⁺ 主要以 Fe(OH)⁺ 的形态存在, 更容易促进 Fenton 体系的反应。H₂O₂ 在碱性环境中是不稳定的, 很容易分解。

在 200 mL 的反应体系中, 在初始 RhB 浓度为 0.01 mmol/L, Fe²⁺ 浓度为 0.02 mmol/L, H₂O₂ 浓度为 0.3 mmol/L, 钼粉投加量为 0.01 g, 反应时间 20 min 条件下, 考察不同 pH 对 RhB 去除效果的影响, 结果

见图 4。

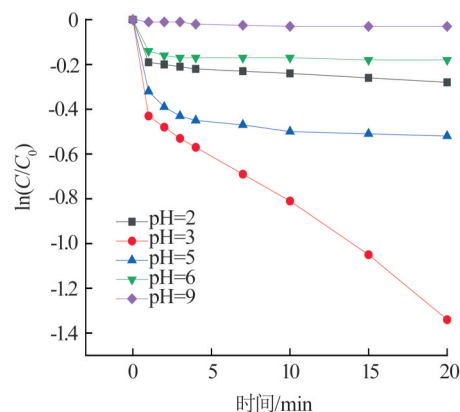


图4 pH对RhB去除效果的影响

Fig. 4 Effect of pH on RhB removal

由图 4 可以看出, 当 pH=2 时, RhB 的去除率受到了明显的抑制, RhB 的去除率仅为 24.60%。导致这种现象发生的原因可能是:

(1) 浓度较高的 H⁺ 将消耗 ·OH, 导致产生 ·OH 的效率降低, 从而影响 RhB 的降解效率。

(2) V. KAVITHA 等^[14]认为, 当 H⁺ 浓度较高时, 体系中的 H₂O₂ 会转换成 [H₃O₂]⁺, 而 [H₃O₂]⁺ 相对稳定, 体系中的 H₂O₂ 和 Fe²⁺ 反应活性降低, 无法产生足量的 ·OH。

当反应体系 pH=3 时, 去除效果最好, 反应 20 min 后, 去除率为 73.79%。当 pH>3 时, RhB 的去除率降低, 与 W. CHU 等^[15]在 Fenton 降解阿特拉津的实验现象一致。当 pH>5 时, 生成 Fe(OH)₃ 沉淀, 影响 Fe²⁺ 的浓度, 此时反应体系对 RhB 几乎没有降解效果。这与丛俏等^[10,12]用 Fenton 降解染料的实验结果一致。

2.5 Cl⁻ 投加量对 RhB 降解率的影响

Cl⁻ 普遍存在于自然水体和废水中, 是地表水中含有浓度相对较多的阴离子^[16], 天然水系统中 Cl⁻ 的浓度从 1 mmol/L 到 10 mmol/L 不等, 在一些地表水中甚至可能 >20 mmol/L。

在 200 mL 的反应体系中, 当初始 RhB 浓度为 0.01 mmol/L, Fe²⁺ 浓度为 0.02 mmol/L, H₂O₂ 投加量为 0.3 mmol/L, 钼粉投加量为 0.01 g, pH 为 3, 反应时间为 20 min 的条件下, 设置 Cl⁻ 的浓度分别为 0、1、3、6、10 mmol/L, 考察不同 Cl⁻ 浓度对 RhB 去除效果的影响, 结果见图 5。

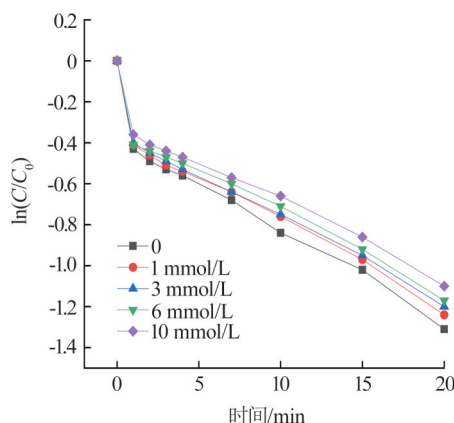


图5 Cl⁻对RhB去除效果的影响

Fig. 5 Effect of Cl⁻ dosage on RhB removal

由图5可知,Cl⁻对RhB的去除有轻微的抑制作用。Cl⁻浓度越高,对RhB去除效果的抑制作用越明显。可能导致这种现象的原因:

(1)Cl⁻的存在对·OH的生成速率产生了抑制。反应式见式(10):



(2)Cl⁻会与Fe²⁺发生络合反应,Fe²⁺被消耗,体系的氧化能力降低。

Cl⁻的存在会抑制Fenton反应的进程,这与黄进等^[17-18]在阴离子对Fenton的影响实验中Cl⁻抑制Fenton反应进程的结论一致。

2.6 HA投加量对RhB降解率的影响

腐殖酸(HA)在地表水中广泛存在,是影响Fenton氧化能力的关键因素。在200 mL反应体系中,在初始RhB浓度为0.01 mmol/L,Fe²⁺浓度为0.02 mmol/L,H₂O₂浓度为0.3 mmol/L,钼粉投加量为0.01 g,pH为3,反应时间为20 min的条件下,考察不同质量浓度HA对RhB去除效果的影响,结果见图6。

由图6可知,当HA的质量浓度从1 mg/L逐渐增加到5 mg/L时,RhB降解效率从66.99%降至53.47%,HA的存在对RhB的去除有明显的抑制作用。可能导致这种现象的原因:

(1)HA与RhB竞争·OH,从而抑制了RhB的降解效率^[19]。

(2)HA分子与Fe³⁺发生络合反应,导致RhB降解效率降低。

与杨国姣等^[20]在研究HA对Fenton降解RhB的

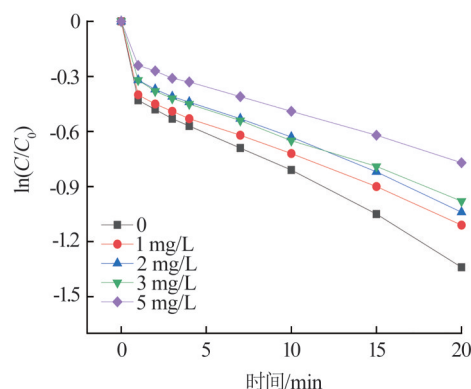


图6 HA对RhB去除效果的影响

Fig. 6 Effect of HA dosage on RhB removal

实验中,HA浓度越大,抑制RhB降解越明显的结论一致。

2.7 Mo在水体中的循环效能研究

考察Mo助催化剂对RhB降解的可重复使用性。在200 mL的反应体系中,在实验初始RhB浓度为0.01 mmol/L,Fe²⁺浓度为0.02 mmol/L,H₂O₂浓度为0.3 mmol/L,钼粉投加量为0.01 g,pH为3,每组反应时间为20 min的条件下,循环进行5次助催化反应,结果见图7。

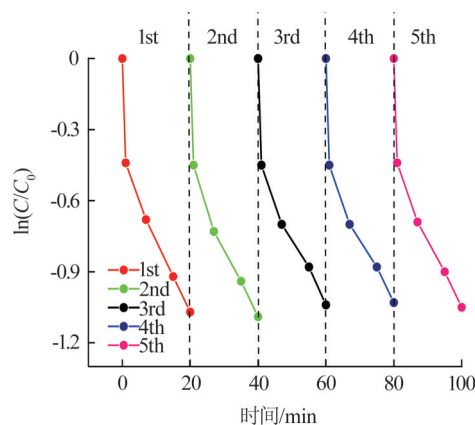


图7 Mo助催化降解RhB的循环实验

Fig. 7 Cycling tests of RhB degradation co-catalyzed by Mo powder

由图7可知,在5次循环中,RhB去除率没有明显下降,说明了Mo作为助催化剂在此体系中的稳定性,这与Qiuying YI等^[7]在研究Mo促进Fe²⁺/Fe³⁺循环实验中得出的结论一致。

2.8 RhB降解机制研究

为了更加直观地表达Mo/Fenton对RhB的降解效

果,在RhB浓度为0.01 mmol/L, Fe^{2+} 浓度为0.02 mmol/L, H_2O_2 浓度为0.3 mmol/L, 钼粉投加量为0.01 g, pH为3的条件下,对体系进行了紫外可见光全扫描,扫描波长为200~800 nm。通过紫外可见光全波长扫描对RhB反应体系进行分子定性分析,结果见图8。

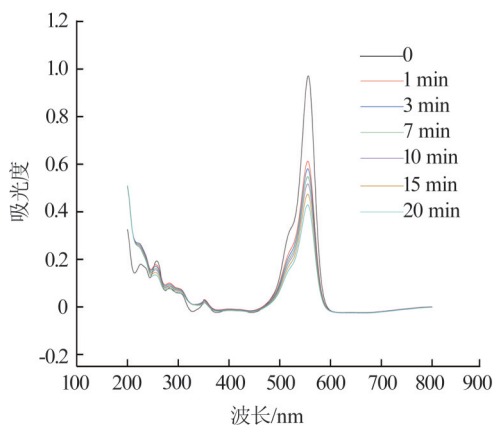


图8 罗丹明B不同时间的全扫实验

Fig. 8 Total scanning experiment of RhB at different time

由图8可知, RhB的特征吸收峰在550 nm处。随着体系反应的进行, 峰值逐渐降低, RhB在体系中的浓度逐渐减小, 说明Mo/Fenton降解RhB的效果明显。导致这种现象产生的原因可能是 $\cdot\text{OH}$ 的存在破坏了RhB中的共轭结构, 使RhB开环, 转化为小分子物质。

2.9 RhB产物降解路径

在初始RhB浓度为0.01 mmol/L, Fe^{2+} 浓度为0.02 mmol/L, H_2O_2 浓度为0.3 mmol/L, 钼粉投加量为0.01 g, pH为3的条件下, 采用LC-MS/MS技术探究了RhB的降解途径, RhB产物采用Waters高效液相色谱系统(Milford, MA, USA)分析。随着反应的进行, RhB分子开始分解, 产生芳香族环中间体; RhB通过脱乙基这一过程, 分解成多个中间体; 通过自由基进一步氧化, 分解成分子质量更小的物质。推测产物见表1。

根据推测出的RhB分解的中间产物, 其氧化途径见图9。

3 结论

(1)在相同条件下, 传统Fenton的RhB去除率为55.17%。在Mo的助催化下RhB的去除率可达到87.27%, Mo的存在能有效提升RhB的去除效果。

表1 Mo/Fenton氧化RhB产物

Table 1 Oxidation products of RhB decayed by Mo/Fenton

编号	产物	m/z
1	$\text{C}_{26}\text{H}_{27}\text{N}_2\text{O}_3^+$	416
2	$\text{C}_{24}\text{H}_{23}\text{N}_2\text{O}_3^+$	388.1
3	$\text{C}_{22}\text{H}_{19}\text{N}_2\text{O}_3^+$	360
4	$\text{C}_{20}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_3^+$	332
5	$\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{NO}_3^+$	316.8
6	$\text{C}_{19}\text{H}_{15}\text{N}_2\text{O}^+$	288.1
7	$\text{C}_{13}\text{H}_{13}\text{N}_2\text{O}^+$	213.2

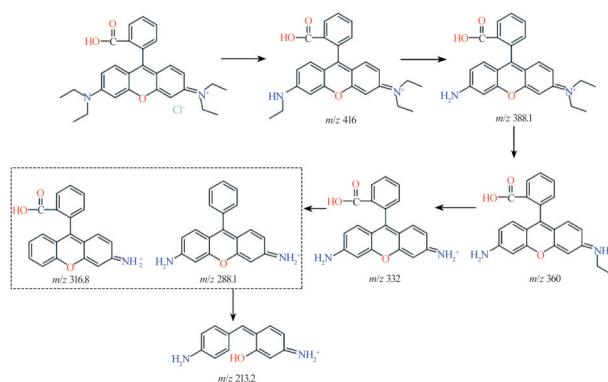


图9 RhB在Mo/Fenton体系中的氧化途径

Fig. 9 Proposed reaction pathway of RhB decayed by Mo/Fenton

(2) H_2O_2 浓度适当增加能促进RhB的去除效果, 但当 H_2O_2 浓度过高时, 对 $\cdot\text{OH}$ 的捕获能力增强, 反而会使RhB的去除率降低。

(3) 水体中HA与RhB竞争 $\cdot\text{OH}$, 从而降低RhB的降解效率。

(4) 水体中 Cl^- 会对RhB的降解产生轻微的抑制, 会消耗一部分的 $\cdot\text{OH}$ 。

(5) 在Mo的助催化下, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 形成良好的循环, 减少了药剂的投加量。在Mo的多次循环利用中, RhB的降解效率并未有明显的降低, 可重复性高。

(6) RhB通过脱乙基分解成许多芳香环中间体, 并进一步开环转化为分子质量更小的物质。

参考文献

- [1] 唐晓剑. 印染废水治理技术应用及进展探讨[J]. 轻纺工业与技术, 2020, 49(10): 107-108.
TANG Xiaojian. Application and progress of printing and dyeing wastewater treatment technology[J]. Light and Textile Industry and Technology, 2020, 49(10): 107-108.
- [2] 董文博. 印染废水综合净化技术研究[D]. 大连: 大连海事大学,

- 2020.
- DONG Wenbo. Research on comprehensive purification technology of printing and dyeing wastewater[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [3] 陈静, 吴诗平, 潘荣楷. Cu^{2+} - Mn^{2+} - H_2O_2 体系催化氧化降解罗丹明B[J]. 化工环保, 2009, 29(1): 26-30.
- CHEN Jing, WU Shiping, PAN Rongkai. Degradation of Rhodamine B catalytic oxidation in Cu^{2+} - Mn^{2+} - H_2O_2 system[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009, 29(1): 26-30.
- [4] 吴坚扎西, 张科杰. Fenton试剂处理酸性玫瑰红B的研究[J]. 环境保护科学, 2005, 31(6): 27-30.
- WU Jianzhaxi, ZHANG Kejie. Study on acid rose red B treated by Fenton reagent [J]. Environmental Protection Science, 2005, 31(6): 27-30.
- [5] YIN Xianglu, LI Yuewei, HUANG Xiaohui, et al. Scalable and efficient extraction of two-dimensional MoS_2 nanosheets from dispersions as a co-catalyst for enhancing Fenton reactions[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(29): 14358-14372.
- [6] LUO Hongwei, CHENG Ying, ZENG Yifeng, et al. Enhanced decomposition of H_2O_2 by molybdenum disulfide in a Fenton-like process for abatement of organic micropollutants[J]. Science of the Total Environment, 2020, 732: 139335.
- [7] YI Qiuying, LIU Wenyuan, TAN Jinjin, et al. Mo^0 and Mo^{4+} bimetallic reactive sites accelerating $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ cycling for the activation of peroxymonosulfate with significantly improved remediation of aromatic pollutants[J]. Chemosphere, 2020, 244: 125539.
- [8] ZHOU Xin, LUO Haopeng, SHENG Bo, et al. $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ cycle promoted PMS decomposition with the assistance of Mo for the degradation of organic pollutant [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 411: 125050.
- [9] YI Qiuying, JI Jiahui, SHEN Bin, et al. Singlet oxygen triggered by superoxide radicals in a molybdenum cocatalytic Fenton reaction with enhanced REDOX activity in the environment [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(16): 9725-9733.
- [10] 丛俏, 任春雪. UV/ TiO_2 /Fenton体系催化氧化降解罗丹明B的研究[J]. 净水技术, 2007(5): 52-54.
- CONG Qiao, REN Chunxue. Degradation of Rhodamine B by UV/ TiO_2 /Fenton catalytic oxidation system[J]. Water Purification Technology, 2007(5): 52-54.
- [11] DING Xinxin, GUTIERREZ L, CROUE J P, et al. Hydroxyl and sulfate radical-based oxidation of RhB dye in UV/ H_2O_2 and UV/persulfate systems: Kinetics, mechanisms, and comparison [J]. Chemosphere, 2020, 253: 126655.
- [12] 王炜亮, 王玉番, 卢少勇, 等. US/UV-Fenton体系处理高浓度罗丹明B特性研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2329-2336.
- WANG Weiliang, WANG Yufan, LU Shaoyong, et al. Characteristic studies on treatment of high concentration Rhodamine B with US/UV-Fenton system [J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2329-2336.
- [13] XIE Yinde, CHEN Feng, HE Jianjun, et al. Photoassisted degradation of dyes in the presence of Fe^{3+} and H_2O_2 under visible irradiation [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2000, 136(3): 235-240.
- [14] KAVITHA V, PALANIVELU K. Destruction of cresols by Fenton oxidation process[J]. Water Research, 2005, 39(13): 3062-3072.
- [15] CHU W, CHAN K H, KWAN C Y, et al. Degradation of atrazine by modified stepwise-Fenton's processes[J]. Chemosphere, 2007, 67(4): 755-761.
- [16] 罗从伟, 马军, 江进, 等. UV/ H_2O_2 降解2,4,6-三氯苯甲醚动力学及产物研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1831-1837.
- LUO Congwei, MA Jun, JIANG Jin, et al. Degradation of 2,4,6-trichloroanisole by UV/ H_2O_2 : Kinetics and products[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1831-1837.
- [17] 黄进. 天然水中典型阴离子对芬顿反应的影响[J]. 化学工程师, 2004(9): 3-6.
- HUANG Jin. The influence of typical posion in natural water to Fenton[J]. Chemical Engineer, 2004(9): 3-6.
- [18] 苏荣芬. 芬顿试剂氧化污水及无机离子影响的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2008(2): 210-213.
- SU Rongjun. Study on oxidation of life wastewater using Fenton reagent and influence of inorganic ions [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2008(2): 210-213.
- [19] LUTZE H V, BIRCHER S, RAPP I, et al. Degradation of chlorotriazine pesticides by sulfate radicals and the influence of organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(3): 1673-1680.
- [20] 杨国姣, 欧晓霞, 董玉瑛, 等. 草酸和腐殖酸对芬顿法降解罗丹明B的影响研究[C]//第六届全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会摘要集. 上海: 中国化学会, 2011: 457.
- YANG Guojiao, OU Xiaoxia, DONG Yuying, et al. Effects of oxalic acid and humic acid on degradation of Rhodamine B by Fenton method[C]// Abstracts of the 6th National Conference on Environmental Chemistry and Exhibition of Environmental Scientific Instruments and Analytical Instruments. Shanghai: Chinese Chemical Society, 2011: 457.

[作者简介] 李明礼(1997—), 硕士。电话: 15550033661, E-mail: 904605541@qq.com。

[收稿日期] 2021-12-23(修改稿)