



改性赤泥钙钛矿催化降解药物废水 教学实验设计

王 吟¹, 程炳宏², 夏皖南¹, 刘 宁¹, 段云志¹, 张晓东¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 杭州市生态环境宣教信息中心, 杭州 310020)

摘要: 基于废弃物资源化理念以及环境工程专业前沿课题和研究基础, 设计了“改性赤泥钙钛矿催化降解药物废水”本科教学实验。实验整体过程可分为前期文献调研、实验方案设计、材料制备与表征、材料性能和机理考察、实验结果分析展示以及实验拓展 6 部分。通过对催化剂制备、结构表征及性能评价等多环节的设计, 使学生熟悉了大型表征仪器的使用方法, 加深了对催化氧化理论知识的理解。该实验把科学前沿内容带入本科实验教学之中, 具有操作便捷、现象明确、重复性佳等特点, 不仅培养了学生的实践操作技能和创新思想, 而且强化了学生的团队协作能力和环保意识。

关键词: 教学实验; 改性赤泥钙钛矿; 过硫酸盐活化; 催化降解; 药物废水

中图分类号: X71; G648.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240442

Design of a Teaching Experiment on Catalytic Degradation of Pharmaceutical Wastewater by Modified Red Mud-Perovskite

WANG Yin¹, CHENG Binghong², XIA Wannan¹, LIU Ning¹, DUAN Yunzhi¹, ZHANG Xiaodong¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Hangzhou Ecological Environment Publicity and Education Information Center, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Based on the concept of waste resource utilization and the foundational research in environmental engineering as a frontier subject, the undergraduate teaching experiment titled “Catalytic Degradation of Pharmaceutical Wastewater by Modified Red Mud-perovskite” is designed. The entire experimental process is divided into six parts: preliminary literature review, experimental design, material preparation and characterization, material performance and mechanism investigation, analysis and presentation of results, and experimental extension. Through a multi-stage design involving catalyst preparation, structural characterization, and performance evaluation, students have become familiar with the use of large-scale characterization instruments and deepened their understanding of the theoretical principles of catalytic oxidation. This experiment integrates cutting-edge scientific content into undergraduate experimental teaching, featuring advantages such as simple operation, clear phenomena, and excellent repeatability. It not only enhances students' hands-on skills and innovative thinking, but also reinforces their teamwork capabilities and environmental awareness.

Key words: teaching experiment; modified red mud-perovskite; activating PMS; catalytic degradation; pharmaceutical wastewater

近年来, 我国的高等工程教育建设不断深化教育教学改革, 培育专业知识坚实、科学思维活跃、实践能力优秀的综合性创新人才^[1]。环境工程作为一门新型的理论与实践相结合的综合应用型工程类学科, 致力于研究和解决各类环境问题,

于 2018 年 3 月被列入教育部办公厅颁布的首批“新工科”研究与实践项目, 由此可见环境工程在“新工科”建设中受到高度重视^[2]。环境工程是一门实践性较强的学科, 学生在学习过程中会接受大量实验操作的培训, 因此该学科的实验教学

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: 上海理工大学本科课程思政示范课程建设项目(KCSZ202506); 上海理工大学本研一体化课程建设项目(BY202408); 上海理工大学研究生教学成果奖培育项目(JXCG202411)。

作者简介: 王吟, 博士, 副教授, 主要从事环境功能材料研究和实验教学工作。E-mail: 625xiaogui@163.com

对于培养学生创新精神和实践能力至关重要。然而,传统的实验教学过程依然存在形式固化、内容陈旧等不足之处,作为“新工科”学科则应将培养中心聚焦在学科的交叉性、应用性与综合性方面^[3]。因此,在环境工程综合实验课程中,将科技前沿内容融入教学,有利于提高学生对专业的浓厚兴趣,并进一步训练其创新思维和实际操作技能^[4]。

当前水污染问题严峻,其中难降解有机物(如抗生素、染料等)因具有毒性强、浓度大、成分复杂的特点,对人类及生态环境产生极大危害,成为水体治理领域的研究重点。因此,开发高效、便捷、低成本的水体有机物处理技术至关重要^[5]。过硫酸盐(PMS)高级氧化技术通过产生具有高氧化还原电位的活性氧物种,可将难降解有毒有机物污染物转化为小分子物质。该技术的关键是寻找性能优良的活化方法,其中,基于非均相的过渡金属催化活化技术,因其无需添加外部能量,作为一种高效、低能耗且材料可重复利用的新型技术而被广泛使用^[6-7]。因此,为环境类本科生开设高级氧化技术处理水体有机污染物的开放性综合实验,不仅符合国家发展战略,也符合国家的人才培养需求。

1 综合实验设计思路

钙钛矿型催化剂具有较高的结构稳定性和氧迁移率,可控的 A、B 位元素,使其有着高催化活性,常被用作高级氧化过程的有效催化剂^[8]。同时,为尽可能降低钙钛矿催化剂的生产成本,选取工业废弃物赤泥作为合成钙钛矿的铁源,制备赤泥钙钛矿,不仅可以节约成本,还可以实现赤泥的高效资源化利用^[9-10]。因此,我们在前期开设的钙钛矿材料制备及其催化降解有机废水的环境工程实验基础上,改变钙钛矿制备原料,并增加催化剂改性的内容,在降低制备成本的基础上提高材料的催化性能,将其应用于活化 PMS 催化降解有机药物废水,在具体教学实施中增加前期方案讨论和后期成果分享环节,形成完整的综合型教学实验。实验内容包括材料改性方法探索、材料表征、活化过硫酸盐催化降解性能及机理考察等多个环节。将理论知识、实验操作技能和大型分析仪器使用等内容相互连结,在有效确保实验具有前沿性、探索性、操作便捷性等特点基

础上,锻炼学生挖掘热点问题和实践操作的能力,提升其科研兴趣。

1.1 实验原理

钙钛矿是一种 ABO_3 型结构的复合金属氧化物,其 A 位为稀土金属, B 位为过渡金属。赤泥作为氧化铝工业产生的固体废弃物,含有 50% 以上的铁元素,正好可以作为钙钛矿晶体中的过渡金属,用以进行催化反应。此外,通过酸溶液对钙钛矿进行改性,可改变材料表面结构(如颗粒大小、孔隙率等)及酸碱性,从而提升其催化活性^[11]。将钙钛矿用于活化 PMS,可通过钙钛矿中的过渡金属离子与 PMS 之间发生电子转移,使 O—O 键发生断裂,从而产生高氧化还原电位的硫酸根自由基($\cdot SO_4^-$)和少量羟基自由基($\cdot OH$),以实现有机污染物的氧化降解^[12],相关机理如图 1 所示。本实验以工业废弃物赤泥为铁源,采用溶胶-凝胶法制备赤泥钙钛矿,并采用酸溶液对钙钛矿进行改性,结合 X 射线衍射(XRD)、红外光谱分析(FT-IR)等手段对其进行表征分析,以环丙沙星(CIP)抗生素为目标污染物,对比考察其在活化 PMS 催化降解过程中的性能。

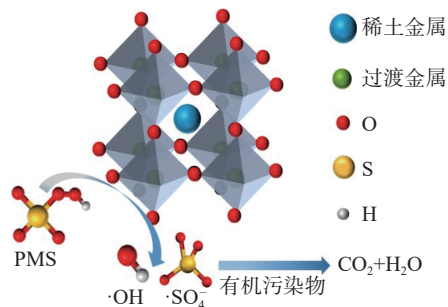


图 1 钙钛矿活化过硫酸盐降解有机污染物机理图

1.2 实验目的

促进学生全面了解高级氧化技术的理论知识,学习催化剂的制备、表征方法以及催化降解反应操作,结合实验结果对该技术的基本原理进行探讨分析,从而提高学生对问题的发现、分析以及解决能力,为后续在环境工程专业方面的学习奠定良好基础。具体体现在以下 5 个方面:

- 1) 了解并掌握基于 PMS 活化的高级氧化技术相关基本原理;
- 2) 掌握钙钛矿催化剂的制备及其改性流程;
- 3) 了解分析表征大型仪器原理,掌握其操作和分析方法;

4) 学习有机物降解实验以及机理分析实验的相关操作流程;

5) 学会文献检索、实验数据处理、谱图绘制和分析, 以及学术报告撰写等技能。

1.3 实验材料

试剂: 拜耳赤泥、硝酸铋($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)、乙酸(CH_3COOH)、硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)、过硫酸氢钾(KHSO_5)、环丙沙星($\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{FN}_3\text{O}_3$)、碘化钾(KI)、硝酸银(AgNO_3)、甲醇(CH_3OH)、异丙醇($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)。

仪器: 恒温加热磁力搅拌器、电热鼓风干燥箱、电子分析天平、台式高速离心机、傅里叶变换红外光谱仪、X射线衍射仪、紫外可见分光光度计。

1.4 实验内容

1.4.1 改性赤泥钙钛矿催化材料的制备

1) 制备赤泥钙钛矿。分别将 1.25 g 赤泥、4.85 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 4.20 g 柠檬酸溶于 10 mL 去离子水, 在室温条件下超声溶解 30 min 得到透明溶液。随后在水浴(80 °C)条件下磁力搅拌 2 h 至溶液呈凝胶状态, 最后将所得凝胶在 100 °C 下干燥 12 h, 并于 600 °C 下以 5 °C/min 的升温速率在 N_2 氛围中煅烧 4 h, 得到赤泥钙钛矿催化剂。

2) 使用酸溶液对赤泥钙钛矿进行改性。将制备出来的赤泥钙钛矿材料置于小烧杯中, 加入 0.1 mol/L 的酸溶液, 使溶液完全浸没材料, 使用膜覆盖杯口以减少盐酸的挥发, 浸泡 12 h 以上。之后取出材料, 置于离心机中多次清洗, 直到材料呈中性。将潮湿材料置于 60 °C 烘箱中干燥, 待水分完全蒸发后取出, 研磨得到改性赤泥钙钛矿催化剂。材料制备流程如图 2 所示。

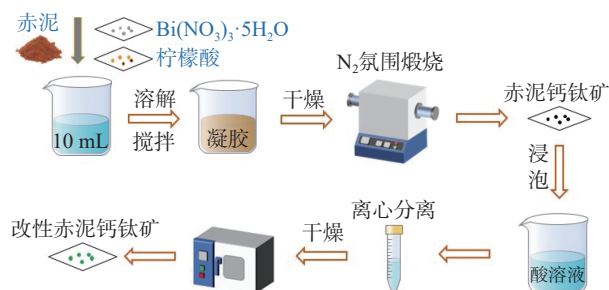


图 2 改性赤泥钙钛矿制备流程图

1.4.2 催化剂表征

使用日本日立公司 S-4800 型扫描电子显微镜

对材料的表面形貌和晶体结构等进行表征。将制备得到的样品粉末经干燥后均匀分散于样品台, 使用导电胶将粉末固定在样品台上以确保其稳定性, 使用喷镀仪在样品表面进行喷金处理以增加导电性, 防止电子束照射时产生的电荷积累。最后在施加 30 kV 加速电压的条件下观察样品表面形态。

使用美国 Nicolet iS10 型傅里叶变换红外光谱仪观察材料表面的化学官能团。取干燥后的样品与溴化钾(KBr)(质量比为 1:200)于玛瑙研钵中研磨 1 min, 充分研细并混合均匀。随后将混合好的样品置于压片磨具的上压头和下压头之间, 把模具放于压片机内, 在 15 MPa 左右的压力下维持 30~60 s, 得到均匀透明的锭片。最后将包含模套和样品锭的插板插入红外光谱仪的样品架上, 在 500~4000 cm^{-1} 的波数范围内进行扫描测试, 并根据吸收峰的位置及强度对材料进行表面分析。

1.4.3 催化降解性能测试

量取 50 mL CIP 溶液(20 mg/L), 分成 3 组置于三颈烧瓶中, 调节 pH 值为 5。称取 0.04 g 改性赤泥钙钛矿催化剂, 加入 CIP 溶液中, 并加入 1 mmol/L PMS。放入摇床中于室温下反应, 间隔一定时间(0、2、4、6、8、10、12、16、20 min)取样 2 mL, 经 0.45 μm 滤膜过滤后, 在 277 nm 波长下测定溶液中 CIP 浓度, 通过下式计算其去除率。

$$\text{去除率} = \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为反应前 CIP 溶液的浓度, 单位 mg/L; C_t 为反应 t min 后 CIP 溶液的浓度, 单位 mg/L。

同时考察反应条件对 CIP 降解效果的影响, 优化反应条件。分别设置不同初始 pH 值(3、5、7、9)、PMS 浓度(0、0.5、1.0、2.0、4.0 mmol/L)、CIP 浓度(10、20、30、40 mg/L), 重复上述操作过程。每次测试完成后将样品倒回原反应液中以减少溶液量误差, 所有实验设置 3 组平行实验并将结果求平均值。

1.4.4 活性物种淬灭实验

以碘化钾(KI)为空穴(h^+)清除剂, 硝酸银(AgNO_3)为电子(e^-)清除剂, 甲醇(MeOH)为硫酸根自由基($\cdot\text{SO}_4^-$)清除剂, 异丙醇(IPA)为羟基自由基($\cdot\text{OH}$)清除剂^[13], 在催化降解实验中分别加入 2 mmol/L 上述试剂, 反应 20 min 后测定溶液中 CIP 浓度, 并计算其去除率。

2 综合实验教学设计

2.1 实验方案自主规划：鼓励方案差异化，提高团队学习和自主创新

要求学生在课前以 3~5 人为 1 个小组进行中外文献的查阅，了解钙钛矿的制备及改性方法、形貌结构特征、催化特性及其相互关联等，通过文献对比，小组共同研讨形成初步实验方案。在实验规划过程中，各小组推选一名组长，负责整体统筹工作，协调每位同学在实验中的相应职责，并促进团队成员之间的有效沟通与合作，确保实验顺利进行。在催化材料设计上，鼓励学生尝试不同的制备改性方法，使实验手段灵活多样，充分挖掘学生的自主学习能力和创新能力。在钙钛矿的改性过程中，各组可以选择不同的酸改性溶液，也可以通过改变酸的浓度、浸泡时间、反应温度等因素得到多种不同的催化材料，从多角度对实验结果进行考察，并综合对比不同方案制备出的催化剂的性能差异。进一步引导学生建立起“材料制备方法-材料结构组成-材料使用性能”三者之间的相关性联系。如将其中一个大组的同学分为 3 个小组，着重探讨不同酸改性溶液对催化剂性能的影响。这 3 个小组分别选择乙酸(CH_3COOH)、硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)为改性药剂，制备了赤泥钙钛矿@ CH_3COOH 、赤泥钙钛矿@ H_2SO_4 和赤泥钙钛矿@ HCl 催化剂，同时以纯赤泥钙钛矿为对照。后续将通过材料表征和催化性能考察两方面来进行对比，并找到最佳的酸改性药剂。

2.2 实验现象分析讨论：化学实验结合材料表征，培养学生分析能力

要求学生对实验结果进行认真的思考总结，对获得的数据展开深入的分析讨论，引导学生透过现象看本质。首先，3 组同学对各自制备的催化剂进行催化降解 CIP 的性能测试。如图 3 所示，经过酸改性后，赤泥钙钛矿材料的催化能力均有所提升，并且不同酸改性所得的材料催化性能有所差异。具体来说，在经过 20 min 的反应后，根据式(1)计算得到的赤泥钙钛矿@ H_2SO_4 、赤泥钙钛矿@ CH_3COOH 、赤泥钙钛矿@ HCl 和赤泥钙钛矿对 CIP 的去除率依次为 65.65%、69.41%、81.42%和 62.21%，其降解性能排序为：赤泥钙钛矿

@ HCl > 赤泥钙钛矿@ CH_3COOH > 赤泥钙钛矿@ H_2SO_4 > 赤泥钙钛矿。其中，赤泥钙钛矿@ HCl 对 CIP 的降解性能最好，而赤泥钙钛矿@ H_2SO_4 和赤泥钙钛矿@ CH_3COOH 的性能提升不是特别明显。由此可知，当使用 HCl 对赤泥钙钛矿进行改性时，催化剂活性最高，降解性能可提高约 20%。

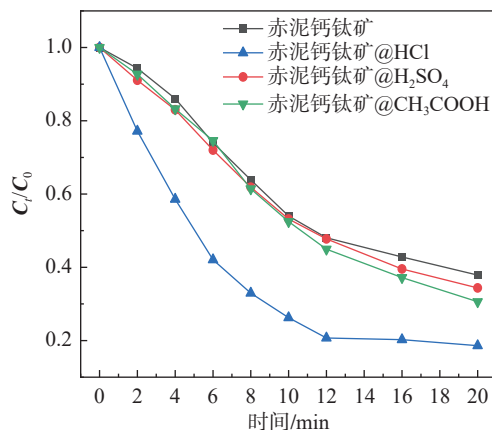


图 3 不同酸改性赤泥钙钛矿材料催化降解 CIP 性能对比图

随后，引导学生借助扫描电子显微镜(SEM)和傅里叶红外光谱(FTIR)两种表征技术进一步探讨催化剂形貌-结构-性能之间的内在联系。改性前后催化剂的 SEM 图如图 4 所示，从图中可以看出，纯赤泥钙钛矿催化剂颗粒较大，且相互聚集，通过酸改性后颗粒更为细小且分散，孔隙变大。但是赤泥钙钛矿@ H_2SO_4 和赤泥钙钛矿@ CH_3COOH 催化剂四周仍然存在一些大颗粒，说明 H_2SO_4 和 CH_3COOH 改性不均匀，从而导致催化剂大小不均匀。而赤泥钙钛矿@ HCl 催化剂的颗粒最细，基本为 1~2 μm ，且分布均匀，存在少量较大颗粒，并且图上可见发达的孔隙，这说明 HCl 掺杂改性可使催化剂拥有更优秀的微观形貌。

酸改性前后赤泥钙钛矿催化剂的 FTIR 光谱图如图 5 所示。4 种催化剂的特征吸收峰位置一致，其中 547 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 Fe—O 伸缩振动和弯曲振动^[14]，但纯相赤泥钙钛矿催化剂的吸收峰强度明显强于酸掺杂改性后的催化剂，说明当使用酸溶液对催化剂进行掺杂改性后，Fe—O 键吸收峰的强度降低，在降解过程中所起到的作用随之减小。另外， 3400 cm^{-1} 和 1634 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 H_2O 中 O—H 的伸缩振动以及氢键(H—O—H)^[15]，赤泥钙钛矿@ HCl 催化剂的 O—H

和 H—O—H 吸收峰明显强于另外 3 种催化剂, 说明其更容易吸附水中的溶解氧, 以产生更多的含氧活性物种。

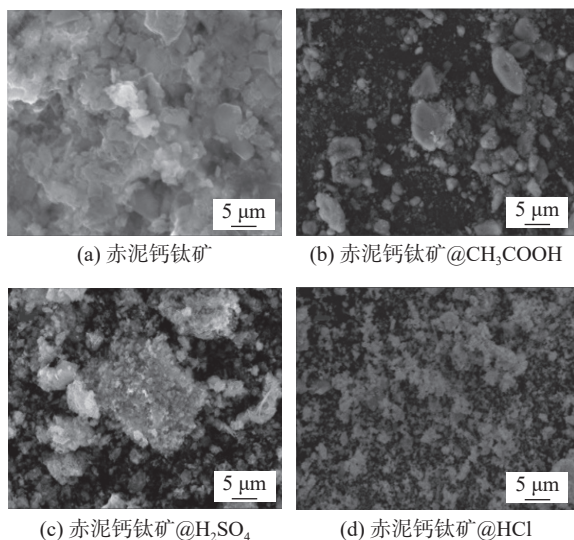


图 4 改性前后赤泥钙钛矿催化剂的 SEM 图

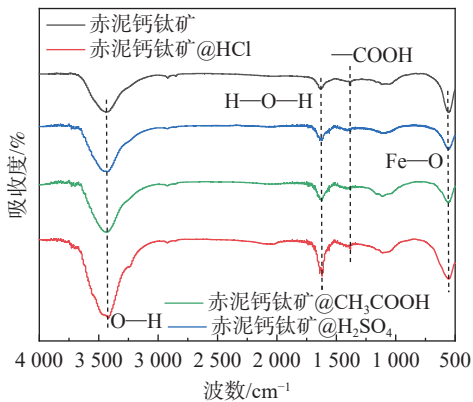


图 5 酸改性前后赤泥钙钛矿催化剂的 FTIR 光谱图

2.3 工艺参数对比优化: 引导学生关注实际操作, 提高工程意识

通过上述的研究结果可以发现, 赤泥钙钛矿@HCl 是表现最为优异的一种催化剂, 因此随后几组同学以这一材料为研究对象, 综合优化赤泥钙钛矿@HCl 活化 PMS 催化降解 CIP 工艺过程中的几种主要的工艺参数。通过改变溶液 pH 值、PMS 添加量、CIP 初始浓度来初步体会工艺参数变化对结果的影响, 并学会如何将其应用于实际工程。

不同 pH 条件下赤泥钙钛矿@HCl 对 CIP 的催化降解影响如图 6(a)所示。当 pH=3 时, CIP 的降解率最高, 达到 82.71%; 当 pH 升高至 9 时, CIP 降解率逐渐降低至 78.27%, 因此赤泥钙钛矿@HCl 催化剂在酸性条件下具有较高的催化活

性。由于 pH=3 时与 pH=5 时催化降解效果相差不多, 综合经济成本与环保等方面因素, 选择 pH=5 为最佳值。

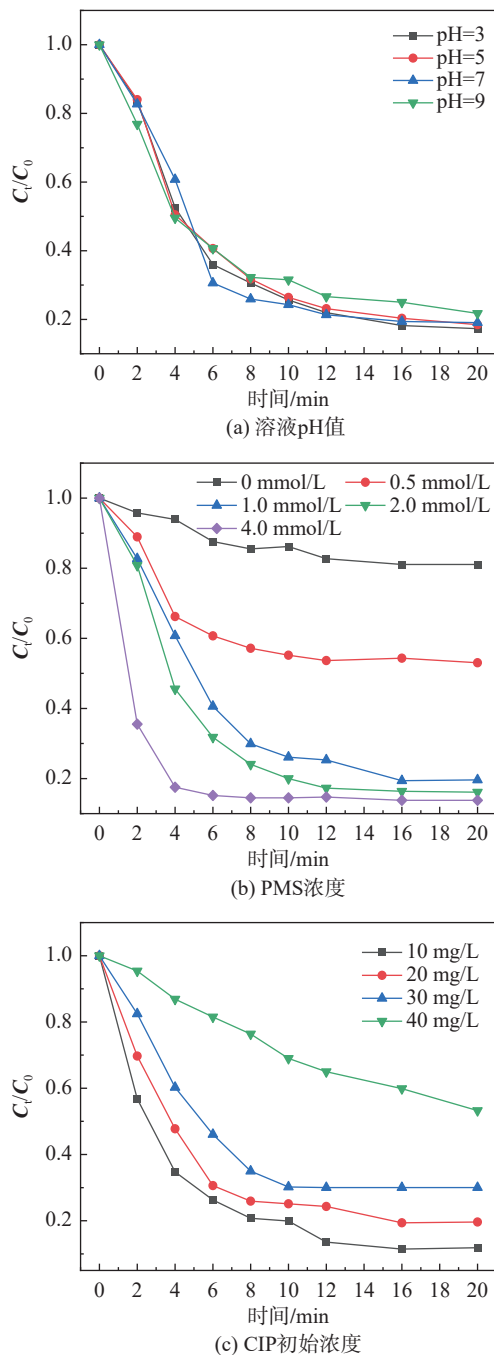


图 6 不同操作条件下赤泥钙钛矿@HCl 对 CIP 的催化降解性能影响图

不同 PMS 浓度对 CIP 的催化降解影响如图 6(b)所示。从图中可以看出, 随着体系中 PMS 浓度的不断增加, CIP 降解率逐渐上升。当 PMS 浓度为 2 mmol/L 时, CIP 降解率达到 83.88%; 当浓度为 4 mmol/L 时, 降解率达到最大, 为 86.21%。

由于 PMS 浓度为 2 mmol/L 和 4 mmol/L 时 CIP 的降解率相差仅 2.33%，结合对经济成本的考虑，选择 2 mmol/L 作为最佳 PMS 浓度。

不同 CIP 浓度条件下的催化降解影响如图 6(c) 所示。随着 CIP 浓度升高，赤泥钙钛矿@HCl 对 CIP 的降解性能逐渐降低，当底物浓度为 40 mg/L 时，降解率仅有 46.75%。这表明底物浓度是影响催化剂降解性能的重要因素，当处理较高浓度的 CIP 废水时，应适当增加催化剂的投加量。

2.4 降解机理深入探究：透过现象看本质，培养学生探索精神

通过之前的机理介绍，学生可以了解到 PMS 活化高级氧化技术是通过反应中产生的各种活性物种来实现有机物的降解的。但是在不同催化剂的催化下其产生的活性物种也各不相同，因此进一步进行了活性物种捕获实验，以探索赤泥钙钛矿@HCl/PMS 体系中主要的活性物种的类别，从而深入了解该系统的降解机理，综合培养学生的科研素养和探索精神。

不同活性物种清除剂对赤泥钙钛矿@HCl 催化降解 CIP 的影响如图 7 所示。

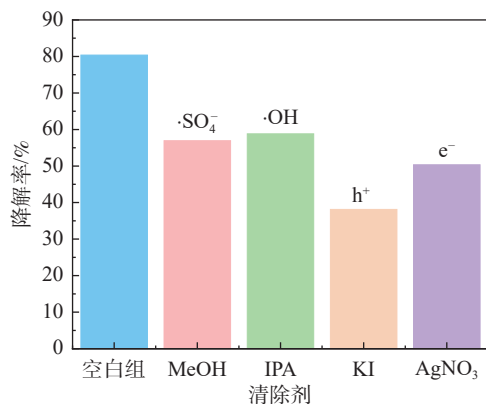


图 7 不同活性物种清除剂对赤泥钙钛矿@HCl 活化 PMS 催化降解 CIP 的影响图

当加入空穴(h^+)清除剂 KI 后，CIP 降解率由无清除剂时的 82.71% 下降至 38.12%，这表明 h^+ 在微波降解 CIP 过程中起着主导作用。投加硝酸银($AgNO_3$)为电子(e^-)清除剂后，体系中 CIP 降解率下降至 50.35%。加入 IPA 或 MeOH 后，CIP 降解率分别下降至 56.94% 和 58.82%，这表明在 PMS 活化过程中，存在羟基自由基($\cdot OH$)和硫酸根自由基($\cdot SO_4^-$)，且二者均起到一定促进作用。当二者被清除剂去除后，CIP 去除率均下降

20% 以上。以上结果表明，在赤泥钙钛矿@HCl 催化剂降解 CIP 过程中同时存在自由基和非自由基的共同作用促使催化反应的发生。其中非自由基(h^+ 、 e^-)占主导作用，但自由基($\cdot SO_4^-$ 、 $\cdot OH$)的作用也不可忽略。

2.5 实验结果分享展示：组间共享与交流，鼓励拓展新认知

上述实验仅介绍了改变酸溶液类型对催化剂性能的影响考察。由于实验方案的差异性，学生可以从催化剂改性药剂的品种、改性过程(反应时间、反应温度、混合顺序)等多角度对实验结果进行分析总结，使实验过程更趋于完整。这依赖于多组同学的组间协同作业，最后各小组将各自研究结果汇总并进行组间数据共享和交流，对比总结数据的内在规律，有助于学生在有限时间内获得更全面更多元的实验认知。学生需将结果撰写成实验报告，要求从研究背景、研究意义、技术路线、结果讨论、前景展望与实际拓展等方面进行阐述，并且在此基础上进行科研 PPT 的制作，以大组(4 个小组组成 1 个大组)的形式进行成果汇报，并进一步借助大量数据分析，基于环境工程所学的背景知识，结合实验现象进行合理分析，找寻适普性的规律，以更好地应对复杂的环境工程实际问题。

以上举措不仅有利于提高学生的学术思维能力以及用科学语言阐述环境问题的能力，更有利于组与组之间的信息共享和横向对比，有效提升团队内部成员和团队之间的合作意识及能力，优化工作效率。另一方面，学生在专业知识得到巩固的基础上，有效拓展了对新技术领域的认知和兴趣，进一步明确了自身的社会责任，并更好地促进专业研究与社会需求的对接^[16]。

3 综合实验教学实施

3.1 教学实施过程

本实验可作为大学高年级学生的环境工程综合实验，也可作为开放性实验。实验计划设计 30 学时，要求学生分组完成，每 3~5 人为一小组，12~15 人为一大组，具体内容包括实验前期(准备阶段)、实验中期(实施阶段)、实验后期(总结阶段)，如图 8 所示。

3.1.1 实验前期

课前要求学生通过文献查阅对实验大体内容

进行预习和了解(不占用实验计划学时);课上设置理论课程,讲解实验背景、原理、内容以及操作流程,对于具体催化剂改药剂、方法、合成条件、实验反应操作参数以及性能评价等要求学生分组讨论,自主确定实验方案,计划6学时。

3.1.2 实验中期

1) 材料制备及表征。以小组为单位进行材料的合成,首先每小组选取不同原料配比制备材料,然后各组间交叉进行SEM和FT-IR两种表征的制样和测试(制样过程由学生完成,仪器测试过程由老师进行),计划8学时(材料制备过程中涉及的搅拌、干燥、煅烧等步骤不占用实验计划学时)。

2) 材料性能测试。分别进行污染物降解性

能、动力学和机理考察,每小组选取不同配比材料进行实验,计划8学时。

3.1.3 实验后期

1) 数据处理及报告撰写。在实验过程中,各小组需进行实时交流,最后以大组为单位进行实验结果和数据的汇总和处理,并形成一份完整的报告,计划6学时。

2) 实验结束后将其制作成PPT,以小组为单位进行汇报交流,各组间可对比不同条件下的材料性能,进行信息共享,计划2学时。

3) 实验拓展。对于有创新能力及意愿的学生,可在教师指导下进行拓展实验研究,得到的成果可用于大学生创新创业训练项目以及各类竞赛,该部分内容不占用计划学时。

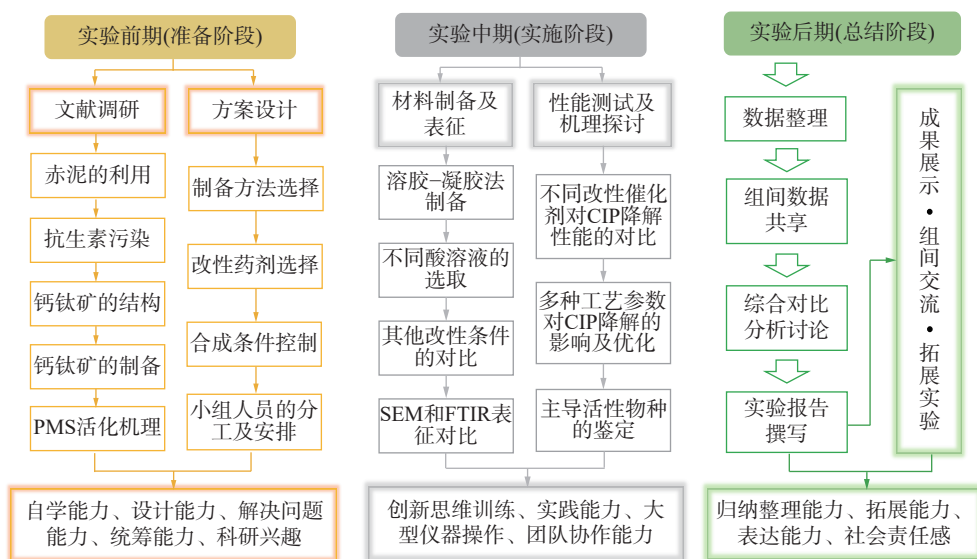


图8 改性赤泥钙钛矿催化降解药物废水综合实验教学流程图

3.2 特色与拓展

本实验将科学前沿内容带入本科实验教学,并与目前环境领域污染治理热点技术相结合,形成一体化的研究型综合实验,其教学特色主要体现在以下4个方面。

1) 实验前的分组预习及文献查阅工作能使学生对水污染现状及其相关处理基础、基本原理、发展进程有一个全面了解,可有效培养学生团队学习和解决问题的能力。

2) 催化剂的制备及表征有利于学生详细掌握大型仪器设备的基本原理及其操作使用方法。结合最新科研学术进展,使学生建立对催化材料设计的创新理念。

3) 注重催化材料的应用,通过对其性能考察和机理分析,培养学生将理论与实践相联系的能力。

4) 实验数据处理和分析使学生了解并熟悉各类数据处理软件的使用方法,提高其对数据的横向对比和归纳总结能力,培养严谨的科研精神。

在完成课堂实验的基础上,还可通过与“挑战杯”、大学生创新创业训练计划项目、节能减排社会实践大赛等活动,对本实验进行一系列的内容拓展。

1) 选取多种改性手段进行催化剂改性,并测试不同催化剂的物理化学性质以及催化性能,寻找最佳工艺,并可充分考虑制备成本。

2) 增加其他操作条件(如催化剂投加量、反应

温度、共存离子影响等)对抗生素降解率的影响,进一步优化条件以期达到理想的结果。

3) 后续可以增加污染物降解产物鉴定实验,以系统了解该技术对污染物的降解路径,并通过软件评估中间产物的生态风险,综合考察该技术的环境安全性及实用性。

拓展性实验可有效提升学生的科研兴趣,强化学生的团队意识和能力,深化学生对环境工程领域新技术的探索。学生在教师指导下得到专业准确的科研成果,并完成科研论文的写作和发表,从而促进教学与科研的相辅相成^[16]。

4 结束语

随着低碳发展理念的提出,固体废弃物资源化利用成为目前环境领域的发展前沿,本实验提出了以工业废弃物赤泥为原料制备具有强催化活性的赤泥基钙钛矿,用于水中典型抗生素污染物的降解。该实验源自教师自身科研内容,具有很强的整体性、创新性和研究性特征,在教学过程中采用“引导—设计—探索—展示”模式,鼓励学生全程独立思考与探索,培养其制定各种实验方案以研究各种因素与材料特性之间的构效关系。每个环节的开展都以理论知识为基础,以组内和组间协作的形式,在极大程度上促进其向具体实践的转化,同时也训练了学生从多方面思考问题的意识和创造性思维,增强了学生的职业认同和社会使命。本实验还为绿色环境功能材料研制和难降解有机污染物的去除开拓了新的道路,有着较大的环保意义和作用。

参考文献

- [1] 黄岚, 胡文云, 梅运军. 新工科背景下环境化学实验教学的改革与实践[J]. 大学化学, 2023, 38(3): 70-74.
- [2] 王鹏, 徐洲, 潘树林, 等. 新工科背景下环境工程专业实践教学改革举措[J]. 西部素质教育, 2022, 8(10): 142-144.
- [3] 陆志艳, 廖丽芳, 邱恺培, 等. “新工科”背景下能源与动力工程专业实践教学改革与实践[J]. 实验科学与技术, 2024, 22(6): 1-7.
- [4] 伍昌年, 薛莉娉, 冯少茹, 等. 新工科背景下“虚实结合”环境工程原理实验教学探索与实践[J]. 现代职业教育, 2024, (9): 49-52.
- [5] 方淑红, 林瑜, 刘伟, 等. 水中新污染物分析创新实验的设计与实践[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(5): 87-92.
- [6] LIU Z, PAN S Y, XU F, et al. Revealing the fundamental role of MoO₂ in promoting efficient and stable activation of persulfate by iron carbon based catalysts: Efficient Fe²⁺/Fe³⁺ cycling to generate reactive species[J]. Water Research, 2022, 225: 119142.
- [7] 霍远东. ZnCo-MOF 衍生碳负载纳米 Co 活化 PMS 降解废水中左氧氟沙星的性能研究 [D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [8] GAO P P, HE Y Y, LU S H, et al. Activation of peroxymonosulfate by La₂CuO₄ perovskite for synergistic removal of *Microcystis aeruginosa* and microcystin-LR in harmful algal bloom impacted water[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2023, 328: 122511.
- [9] LI Q, WEI G, ZHANG L, et al. Activation of peroxymonosulfate by a waste red mud-supported Co₃O₄ quantum dots under visible light for the degradation of levofloxacin[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139382.
- [10] 王夫美, 侯艺航, 曾亚军, 等. 废弃物衍生多孔炭的制备及对 CO₂ 吸附性能研究综合实验设计[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(6): 79-84.
- [11] LI Y, WANG Q, ZHANG X, et al. CoFe₂O₄/WS₂ as a highly active heterogeneous catalyst for the efficient degradation of sulfathiazole by activation of peroxymonosulfate[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 57: 104714.
- [12] CHAO L, MENG F L, XUE Q X, et al. Activation mechanism and strengthening strategies of perovskites activated peroxymonosulfate for organic pollutants degradation: Recent advances and perspective[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 973: 72898.
- [13] YANG M, HOU Z, ZHANG X, et al. Unveiling the origins of selective oxidation in single-atom catalysis via Co-N₄-C intensified radical and nonradical pathways[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(16): 11635-11645.
- [14] HUANG Z, ZHANG X, ZHU Z, et al. Enhanced peroxymonosulfate activation by highly magnetic FeCo-CoFe₂O₄ biphasic fibers for norfloxacin degradation[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480: 147883.
- [15] WANG X, HAN Y, LIU Y, et al. Rationally construct of CoS_x/MoS₂/g-C₃N₄ double heterojunction with promoting the separation of carriers for enhanced photocatalysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(8): 3048-3064.
- [16] 栾吉梅, 刘馨, 姜鹏, 等. 纳米二氧化钛光催化综合实验设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(11): 199-204.