

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.09.003

臭氧催化氧化处理白酒酿造生化出水的效能与稳定性

高 鹏^{1,2}, 王盼新², 张 磊³, 张桂红³, 付丽亚², 宋玉栋²,
吴昌永², 蒋 浩³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国环境科学研究院 环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100012; 3. 贵州茅台酒股份有限公司, 贵州 遵义 564501)

摘 要: 针对臭氧催化氧化处理高硬度白酒废水过程中存在的催化剂层易结垢、板结等现象,通过序批/连续流实验,考察了臭氧催化氧化对有机污染物的去除效能及钙离子迁移对效能稳定性的影响。在臭氧投加量为200 mg/L、温度为25 ℃条件下,相较于单独臭氧氧化,催化体系对COD与TOC的去除率分别提升了15.9%和10.5%;连续流运行20 h后,钙离子在体系中的截留率达42.6%,导致COD去除率由38.5%降至26.7%,TOC去除率同步降低15.1%。化学洗脱及表征实验表明,约70.4%的截留钙通过吸附/沉淀富集于催化剂孔隙,但初期形成的CaCO₃固体几乎全部从催化剂表面脱落形成悬浮颗粒。在工程中可结合反冲洗与前置软化或开发抗结垢工艺,以突破高硬度废水臭氧催化氧化应用瓶颈。

关键词: 臭氧催化氧化; 白酒废水; 高硬度; 结垢; 催化剂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0018-06

Efficiency and Stability of Catalytic Ozonation for Biochemical Effluent from Baijiu Brewing

GAO Peng^{1,2}, WANG Panxin², ZHANG Lei³, ZHANG Guihong³, FU Liya²,
SONG Yudong², WU Changyong², JIANG Hao³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Center of Environmental Pollution Control of Engineering Technology, Chinese

Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Kweichow Moutai

Distillery Co. Ltd., Zunyi 564501, China)

Abstract: To address catalyst layer scaling and bed clogging during catalytic ozonation of high-hardness biochemical effluent from Baijiu brewing, this study employed comparative batch and continuous-flow experiments to evaluate organic pollutant removal efficiency and the impact of calcium ion migration on process stability. Results demonstrated that under optimal conditions (ozone dosage of 200 mg/L, temperature of 25 ℃), the catalytic system enhanced COD and TOC removal efficiencies by 15.9% and 10.5%, respectively, compared with sole ozonation. During 20-hour continuous operation, 42.6% of calcium ions were retained within the system, causing COD removal efficiency to decline from

基金项目: 贵州茅台酒股份有限公司技术开发项目(GFST20232183); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(C类)(52500237); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2022YSKY-71)

通信作者: 蒋浩 E-mail: 15120259193@163.com

38.5% to 26.7%, accompanied by a 15.1% reduction in TOC removal. Chemical elution and characterization revealed that approximately 70.4% of the retained calcium accumulated in catalyst pores via adsorption/precipitation, whereas initially formed CaCO_3 solids detached almost entirely from the catalyst surface, forming suspended particles. For engineering applications, integrating backwashing with pre-softening or developing anti-scaling processes is recommended to overcome the engineering bottlenecks in catalytic ozonation of high-hardness wastewater.

Keywords: catalytic ozonation; biochemical effluent from Baijiu brewing; high hardness; scaling; catalyst

臭氧催化氧化技术因其高效、绿色、安全等特性,已在印染、制药废水深度处理中广泛应用^[1-3]。然而,在高盐高硬度废水处理场景中,易发生催化剂失活和催化剂层板结现象,引发双重负面效应:①沉积物覆盖催化剂活性位点并改变表面电荷分布,抑制羟基自由基($\cdot\text{OH}$)生成,显著削弱体系对废水中有机污染物的降解效能;②板结造成的床层压降上升会导致传质效率衰减和水力通量下降。上述问题迫使部分工程转而采用单独臭氧氧化工艺以规避结垢风险,但需同步提升臭氧投加量以确保处理效能^[4-6],从而造成处理成本大幅增加。

白酒酿造废水具有 COD 浓度高、pH 波动大及硬度高等特征^[7-8],传统生物法难以实现稳定达标。尽管臭氧催化氧化技术因强氧化性被视为白酒废水深度处理的优选方案^[9],但工程实践表明,针对白酒酿造生化处理出水的高硬度(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})及高碱度特性,该技术在长期运行中存在显著的催化剂钝化与床层堵塞风险^[10-11]。现有研究主要集中在催化剂性能优化,而有关连续运行中废水硬度离子变化与有机物去除效能衰退的关联机制却少有报道^[12-13]。

本研究对比分析了臭氧催化氧化和单独臭氧氧化工艺对白酒废水的处理效能,并重点关注催化体系的稳定性与钙离子浓度变化的关联,通过揭示催化体系“高效性-结垢敏感性”的双重特性,旨在为高硬度废水臭氧催化氧化工艺的稳定运行与工程优化提供理论依据,推动该技术在白酒酿造等高硬度废水处理中的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验所用化学试剂包括重铬酸钾、邻菲罗啉、硫酸亚铁、乙二胺四乙酸二钠镁(EDTA 二钠镁)、氯

化铵、EDTA 二钠、碳酸钙、铬黑 T、三乙醇胺、氢氧化钠、浓硝酸等,均为分析纯,购自国药集团化学试剂公司。所有溶液配制及器皿清洗均采用超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$)。使用 $0.22 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜(天津盛华为科技有限公司)截留悬浮物。催化剂为实验室自制 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基球形催化剂,通过浸渍-焙烧法负载 3% 铜活性组分,粒径为 3~5 mm,其制备过程如下:①利用去离子水将 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 小球清洗至中性 pH 后,放入 105°C 烘箱中烘干,取出冷却后备用;②将烘干后的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 小球在室温下放入金属盐溶液浸渍 8~12 h;③浸渍完成后放入 105°C 烘箱完全烘干,冷却至室温后于 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 马福炉中焙烧 4~6 h。

1.2 实验装置

臭氧催化氧化实验装置如图 1 所示,其由臭氧发生器、反应器和尾气处理单元组成。高纯氧气经 3S-A 臭氧发生器部分转化为臭氧,混合气体通过穿孔布气板(孔径为 2 mm)均匀分散后进入反应器($\varnothing 70 \text{ mm}\times 450 \text{ mm}$)底部,与催化剂(仅催化体系)及废水进行接触反应(两个反应器并联、独立运行)。序批式实验中样品由反应器上部取样口采集,连续流实验通过蠕动泵实现进出水动态平衡,水力停留时间(HRT)通过流量计精确控制。反应尾气经破坏器处理后排放。

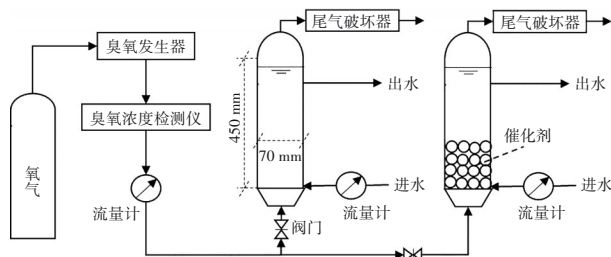


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.3 原水来源及水质

实验用水取自某白酒酿造企业污水处理厂的生化池出水, pH为7.62, COD为132.2 mg/L, TOC为35.1 mg/L, 碱度(以 CaCO_3 计)为924.6 mg/L, Ca^{2+} 为87.1 mg/L, Mg^{2+} 为52.7 mg/L, 浊度为28 NTU。水样采集后于4℃冷藏保存, 并在24 h内完成分析。

1.4 材料表征

使用GeminiSEM 300扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)对催化剂及截留物进行表征;使用赛默飞K-Alpha型X射线光电子能谱(XPS)仪对截留物的元素化学态进行分析;反应前后催化剂的孔容和平均孔径采用TriStar II型BET孔径分析仪进行检测。

1.5 臭氧(催化)氧化实验

序批式实验:向反应器注入1 L水样并填充400 g 催化剂(非催化实验省略此步骤),启动臭氧发生器,通过调节臭氧发生器档位和气体流量计控制臭氧投加量(200 mg/L,基于工程运行数据及预实验优化确定),待臭氧检测仪(UV-500,北京同林)读数稳定后将臭氧通入反应器开始计时。在预设时间(0、10、20、30、60、90、120、150、180 min)从出水口采集水样。

连续流实验:反应器有效容积为1 L,通过蠕动泵控制进水流量为25 mL/min(HRT=40 min),在反应开始后0、2、4、6、8、12、16、20 h时采集水样,其余参数与序批式实验一致。

除温度影响实验外,所有实验均在 (25 ± 2) ℃室温条件下进行,每组实验重复三次取平均值。钙、镁离子测定样品未经膜过滤,所得结果为总浓度(溶解态与悬浮态)。

反应结束后,将体系内的部分反应溶液通过滤膜过滤,截留物经冷冻干燥后进行表征;体系中的催化剂从反应器上部倒出,沥干后进行冷冻干燥,分别用于物理表征和钙离子溶出实验。

1.6 化学洗脱实验

称取40 g冷冻干燥后的催化剂样品,置于250 mL锥形瓶中,加入60 mL体积分数为5%的硝酸溶液,置于恒温振荡器,在 (25 ± 2) ℃条件下以120 r/min转速振荡浸取30 min,静置后取30 mL上清液经0.22 μm 滤膜过滤,用超纯水稀释5倍后进行钙浓度检测。

1.7 分析方法

采用重铬酸钾法测定COD;采用总有机碳分析仪测定TOC;采用EDTA滴定法测定溶液中的钙、镁离子;采用浊度仪测定浊度;采用原子吸收分光光度计测定水中的铜元素。

2 结果与讨论

2.1 臭氧催化氧化处理效能

2.1.1 对有机物的去除效果

在25℃的条件下,对比了臭氧催化氧化与单独臭氧氧化对白酒废水的处理效能,结果见图2。

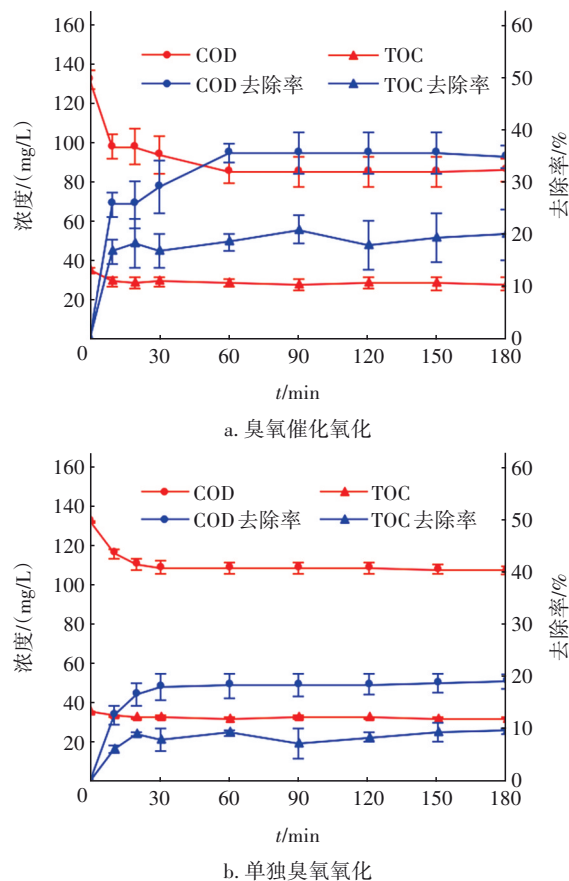


图2 臭氧催化氧化与单独臭氧氧化对有机污染物的去除效果

Fig.2 Removal of organic pollutants from wastewater by ozone catalytic oxidation and ozone oxidation

实验数据表明,催化体系可显著提升有机污染物降解效率。臭氧催化氧化体系将废水COD由初始的132.2 mg/L降至86.0 mg/L,去除率达34.9%,显著高于单独臭氧氧化的19.0%。TOC去除率亦呈现相同趋势,催化体系将TOC从35.1 mg/L降至28.1 mg/L(去除率为20.0%),显著高于单独臭氧氧化的9.5%。这种强化效应可归因于催化剂表面活

性位点对臭氧分子的活化作用,促进了羟基自由基($\cdot\text{OH}$)等活性氧物种的生成。 $\cdot\text{OH}$ 具有更高的氧化还原电位($E_0=2.8\text{ V}$),可有效攻击臭氧分子难以直接氧化的有机物,如含有强吸电子基团(如 $-\text{NO}_2$ 、 $-\text{SO}_3\text{H}$ 等)的有机物及饱和脂肪族化合物,从而实现更彻底的矿化^[3]。

2.1.2 钙、镁离子浓度变化

尽管臭氧催化氧化体系展现出优异的污染物去除效能,但已有研究指出,金属离子在催化剂表面的沉积可能诱发催化剂钝化现象。实验过程中,单独臭氧处理前后 Ca^{2+} (87.1 mg/L $\rightarrow$ 80.2 mg/L)、 Mg^{2+} (52.7 mg/L $\rightarrow$ 50.7 mg/L)浓度略有降低,而废水浊度由28 NTU增长到36 NTU。这可能是由于曝气过程对废水的扰动,促使水中溶解性 CO_2 逸出,引起溶液pH上升(约0.5)及 HCO_3^- 向 CO_3^{2-} 转化,从而增大了碳酸钙的过饱和度,在一定程度上破坏了废水中碳酸根与硬度离子的平衡,导致部分硬度离子以碳酸盐形式析出^[14],悬浮在溶液中或部分附着在反应器壁上。而催化体系中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度分别下降至41.3和43.6 mg/L,对应截留率分别为52.6%和17.4%。这表明引入催化剂后,其高比表面积和丰富的表面位点为硬度离子沉积创造了条件,促使钙、镁离子通过表面吸附或碳酸盐沉淀形式富集于催化剂和反应器壁上。值得注意的是,由于碳酸钙的溶度积远低于碳酸镁,且废水中钙离子浓度更高,体系更倾向于生成热力学稳定的碳酸钙沉淀。镁离子因沉淀倾向弱且浓度较低,对结垢行为的贡献度显著低于钙离子。因此,后续研究将聚焦钙离子迁移机制及其对催化性能的影响路径。

2.1.3 温度的影响

随着温度的升高,臭氧在水中的平衡溶解度下降,可能削弱臭氧催化氧化对有机物的去除效能^[15];同时,二氧化碳溶解度亦随温度升高而降低,易引起 CO_2 从溶液中逸出,打破碳酸体系平衡并导致溶液pH升高,从而可能增强碳酸钙的沉淀倾向,加剧体系结垢风险。考虑到实际工程中废水温度存在波动(10~40 $^{\circ}\text{C}$),为进一步明确温度对臭氧催化氧化过程的影响,考察了温度在5~45 $^{\circ}\text{C}$ 区间内的作用规律。结果表明,当温度为5、15、25、35、45 $^{\circ}\text{C}$ 时,COD去除率分别为39.3%、36.2%、34.9%、34.1%、33.7%,即随温度升高呈缓慢下降趋势,这主要归因于臭氧溶解度随温度升高而降低^[16],导致

溶解态臭氧浓度下降。与之相对应,反应后出水 Ca^{2+} 浓度也逐渐降低,分别为45.7、42.9、41.3、39.0、34.7 mg/L,这可能与碳酸钙溶解度对温度的依存性有关,其溶度积随温度升高而逐渐降低,强化了沉淀效应。考虑到温度调控的工程经济性及效能稳定性,后续实验选定25 $^{\circ}\text{C}$ 为优化反应温度。

2.2 臭氧催化氧化体系的废水处理稳定性评价

2.2.1 对有机物去除效能的稳定性

为评估臭氧催化氧化体系的运行稳定性,构建连续流反应系统进行20 h持续实验,结果如图3所示。运行8 h后,出水COD由初始的132.2 mg/L降至81.2 mg/L(去除率为38.5%),随运行时间延长至20 h,去除率逐渐衰减至26.7%(出水COD为96.9 mg/L),TOC去除率也较最高值降低了15.1%。表明随着反应的进行,臭氧催化氧化对白酒酿造生化出水的有机物降解效率呈递减趋势,处理效能的稳定性不足。该现象可能与废水中钙离子对催化剂活性位点的抑制有关^[17]。值得注意的是,由于实验出水中未检测到铜离子,可排除催化剂活性组分(Cu)溶出对有机物去除率衰减的贡献。

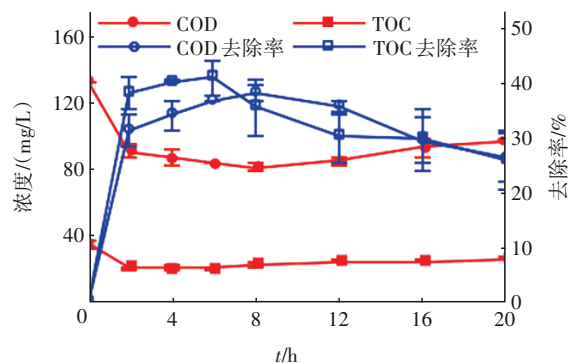


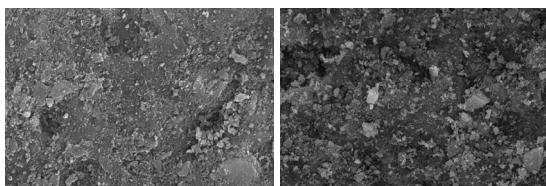
图3 臭氧催化氧化对有机污染物的去除效果随时间的变化

Fig.3 Change in removal effect of organic pollutants by ozone catalytic oxidation over time

2.2.2 钙离子浓度变化

水质监测数据显示,在0、2、6、12、16、20 h时出水 Ca^{2+} 浓度分别为87.1、59.1、53.0、50.4、50.6、49.3 mg/L,即连续流体系中出水 Ca^{2+} 浓度基本稳定在(50 $\pm$ 1.2) mg/L,在体系内的截留率达42.6%,证实钙离子在催化剂表面及反应器内发生持续吸附或沉积。然而反应前后催化剂的SEM形貌未发生显著变化(见图4),EDS元素分析亦未检出钙的特征峰。这一表观矛盾可归因于:①金属离子以非

晶态或亚稳态形式分散于催化剂孔隙;②相较于 Al_2O_3 载体(约为97%)及Cu活性组分(3%),Ca沉积量(<0.5%)低于EDS检测限;③水力剪切作用导致松散沉积物脱离催化剂表面。



a. 反应前

b. 反应后

图4 反应前后催化剂的SEM图像

Fig.4 SEM images of catalysts before and after reaction

2.3 钙离子迁移对系统稳定性的影响机制

为解析水质监测与表征分析的表现矛盾并定量评估臭氧催化剂对钙截留的贡献,采用体积分数为5%的硝酸溶液(60 mL)对连续流实验后的催化剂样品(40 g)进行化学洗脱。检测结果显示,浸出液中的 Ca^{2+} 浓度达1.29 g/L,经质量守恒计算,400 g催化剂累计截留774 mg的 Ca^{2+} ,占进水总钙削减量(约为1100 mg)的70.4%,而新鲜催化剂对照组的浸出液中未检出钙离子。BET结果显示,反应后催化剂的平均孔径和孔容积(6.9 nm和0.39 cm^3/g)相比于新鲜催化剂(7.1 nm和0.41 cm^3/g)均有一定程度的降低。这表明体系中减少的钙离子大多数通过吸附或沉淀赋存于催化剂内部孔隙,即体系中催化剂具有一定的结垢风险。而催化剂截留的 Ca^{2+} 计算量与进水总钙削减量之间约30%的差值可归因于:①催化剂纵向截留效率梯度分布(底部接触区>上部扩散区)导致的取样代表性偏差;②部分钙离子以悬浮态赋存于溶液中或附着在反应器壁。

连续流实验同样发现,反应后出水浊度较原水浊度明显增加,为阐明截留钙的赋存形态,对出水中的悬浮物进行了截留和表征。结果表明,截留物呈无定形絮状结构,EDS分析显示主要元素组成为O(59.8%)、Al(25.4%)、C(5.7%)以及Ca(4.5%),Ca 2p的结合能位于346.8和350.4 eV,分别代表Ca 2p_{3/2}和Ca 2p_{1/2},与 CaCO_3 中 Ca^{2+} 的化学态高度吻合^[18]。Al元素信号源于催化剂载体磨损,该现象可随着催化剂使用时间的延长而逐渐消失;而Ca的存在证实反应过程伴随碳酸钙固体生成。综合“出水中检出碳酸钙固体”而“催化剂表面未检出明显钙沉积”这一表现矛盾,可以推断:碳酸钙固体最初

在催化剂表面生成,但由于初期结晶不完善、结构松散,在水力剪切作用下从表面脱落,并以悬浮颗粒形态进入出水。这也解释了为何在实验周期内未能在催化剂表面直接检测到钙沉淀物。上述现象表明,初期形成的碳酸钙固体易在水力剪切作用下从催化剂表面脱落,这为通过定期反冲洗等水力手段缓解钙离子沉积对催化剂活性的不利影响提供了理论依据。

3 结论

① 臭氧催化氧化可显著提升白酒酿造生化出水的有机物去除效能,在臭氧投加量为200 mg/L、温度为25 °C的条件下,与单独臭氧氧化相比,其对COD和TOC的去除率分别提高了15.9%和10.5%。然而,该体系对高硬度水质较为敏感,废水中的钙离子易在催化剂表面发生吸附或沉积,导致长期运行中处理效能稳定性降低。

② 钙离子在臭氧催化氧化体系中的迁移富集特性是影响系统稳定性的关键因素。连续运行20 h内,约42.6%的钙离子被截留于体系内,化学洗脱结果表明其中70.4%的截留钙赋存于催化剂孔隙中,显著增加了催化剂的结垢风险,而常规SEM和EDS表征难以有效识别该初期沉积行为。

③ 系统解析了催化体系“高效性-结垢敏感性”的双重特性,为高硬度废水臭氧催化氧化工艺的优化提供了理论依据。工程实践中建议采用反冲洗协同前置软化或开发新型抗结垢催化剂与工艺,以缓解钙沉积引发的催化剂钝化与床层堵塞问题,推动该技术在白酒酿造等高硬度废水处理中的有效应用。

参考文献:

- [1] 张丽珍,蒋永伟,郭方峥,等. AO/MBR+臭氧催化氧化+BAF用于印染废水处理[J]. 中国给水排水, 2026, 42(2):68-73.
ZHANG L Z, JIANG Y W, GUO F Z, et al. AO/MBR + ozone catalytic oxidation + biological aerated filter for dyeing wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2026, 42(2):68-73(in Chinese).
- [2] LI L X, FU R, ZOU J L, et al. Research progress of iron-based catalysts in ozonation wastewater treatment [J]. ACS ES&T Water, 2023, 3(4):908-922.
- [3] DAI M, NIU Q Y, WU S H, et al. Hydroxyl radicals in

- ozone-based advanced oxidation of organic contaminants: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2024, 22 (6):3059–3106.
- [4] MANNA M, SEN S. Advanced oxidation process: a sustainable technology for treating refractory organic compounds present in industrial wastewater [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30 (10) : 25477–25505.
- [5] DING J T, LIN X Z, ZHAN J M, et al. Effect of the deposition of Ca^{2+} on the Fe-based catalyst in the catalytic ozonation of high-salinity wastewater[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 318:123958.
- [6] WANG J L, CHEN H. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: recent advances and perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135249.
- [7] PRAJAPATI A K, CHAUDHARI P K. Physicochemical treatment of distillery wastewater—a review [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2015, 202(8) : 1098–1117.
- [8] 赵以琦,甘玉金,韩勇,等. 生活污水与白酒生产废水协同处理可行性研究[J]. *中国给水排水*, 2025, 41 (14):26–34.
- ZHAO Y Q, GAN Y J, HAN Y, et al. Feasibility study on the synergistic treatment of domestic sewage and liquor wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41 (14):26–34(in Chinese).
- [9] AN W H, LI X F, MA J T, et al. Advanced treatment of industrial wastewater by ozonation with iron-based monolithic catalyst packing: from mechanism to application[J]. *Water Research*, 2023, 235:119860.
- [10] HE C, WANG J B, WANG C R, et al. Catalytic ozonation of bio-treated coking wastewater in continuous pilot- and full-scale system: efficiency, catalyst deactivation and in-situ regeneration [J]. *Water Research*, 2020, 183:116090.
- [11] 赵檬. 内循环流化床-臭氧催化氧化处理工业废水的应用研究[D]. 北京:中国环境科学研究院, 2023.
- ZHAO M. Study on the Application of Internal Circulating Fluidized Bed-Ozone Catalytic Oxidation in Industrial Wastewater Treatment [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2023(in Chinese).
- [12] 李博文, 梁家伟, 代吉华, 等. Cu/AC 臭氧催化氧化深度处理复糟酱香型白酒废水[J]. *中国酿造*, 2024, 43 (9) :140–146.
- LI B W, LIANG J W, DAI J H, et al. Advanced treatment of wastewater from sauce-flavor Baijiu production with reusing distillers' grains by Cu/AC ozone catalytic oxidation[J]. *China Brewing*, 2024, 43 (9) : 140–146 (in Chinese).
- [13] LI B Y, ZHAO X, SUN X, et al. Regeneration of deactivated ozone catalysts in the treatment of high-alkalinity industrial wastewater [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13 (1) : 115327.
- [14] 崔明启, 董翔宇, 徐新华, 等. 基于碳酸钙条件溶度积理论的造纸废水好氧曝气除钙[J], *环境工程学报*, 2023, 17(2):453–460.
- CUI M Q, DONG X Y, XU X H, et al. Calcium removal by aerobic aeration of papermaking wastewater based on CaCO_3 conditional solubility product theory [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(2): 453–460(in Chinese).
- [15] LEVANOV A V, ISAIKINA O Y, LUNIN V V. Thermodynamic and kinetic parameters of the solubility of ozone in water [J]. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2019, 93(7) :1230–1234.
- [16] HUSSAIN K, KHAN N A, VAMBOL V, et al. Advancement in ozone base wastewater treatment technologies: brief review [J]. *Ecological Questions*, 2022, 33(2) :7–19.
- [17] HE C, ZHANG Z, HAN J, et al. Advanced treatment of high-salinity wastewater by catalytic ozonation with pilot- and full-scale systems and the effects of Cu^{2+} in original wastewater on catalyst activity[J]. *Chemosphere*, 2023, 311:136971.
- [18] LUO L, TAN S, LUO Z, et al. Grass-to-stone surface inspired long-term inhibiting scaling[J]. *Nano Select*, 2022, 3(11) :1509–1525.
-
- 作者简介:**高鹏(2000—),男,江苏宜兴人,硕士研究生,从事水处理理论与技术研究。
E-mail:1257740664@qq.com
收稿日期:2025-12-03
修回日期:2026-02-12

(编辑:李德强)