

# 基于响应面法的微电解活化过硫酸盐降解 苯酚研究

胡俊生,李嘉宝,王海曼,张添淇

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 优化微电解活化过硫酸盐氧化处理苯酚废水体系的工艺条件,提高废水处理效果。方法 构建微电解活化过硫酸盐氧化降解体系,采用响应面法分析过硫酸盐浓度、初始 pH 值和反应温度对苯酚废水降解效果的影响,使用模型确定最佳工艺参数。结果 三个因素对苯酚降解率均有较显著影响,显著性由大到小依次为反应温度、过硫酸盐浓度、初始 pH 值;模拟得出的最佳工艺条件:过硫酸盐浓度为 15.98 mmol/L、初始 pH 值为 2.78、反应温度为 74.73 °C,并且模拟预测结果与试验数据非常接近。结论 该模型可以较为准确地预测微电解活化过硫酸盐降解苯酚废水的最佳反应条件与降解率。

**关键词** 过硫酸盐;微电解;响应曲面法;苯酚

中图分类号 TU99;X703

文献标志码 A

**引用格式:**胡俊生,李嘉宝,王海曼,等.基于响应面法的微电解活化过硫酸盐降解苯酚研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):570-576.(HU Junsheng,LI Jiabao,WANG Haiman,et al.Degradation of phenol by micro-electrolysis activated persulfate based on response surface method[J].Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2024,40(3):570-576.)

## Degradation of Phenol by Micro-electrolysis Activated Persulfate Based on Response Surface Method

HU Junsheng, LI Jiabao, WANG Haiman, ZHANG Tianqi

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The process parameters and the removal efficiency of micro-electrolysis activated persulfate in phenol wastewater treatment system were studied and optimized, so as to efficiently degrade phenol wastewater. The micro-electrolysis activated persulfate system was constructed. The effect of the persulfate concentration, initial pH value and reaction temperature on phenol degradation rate was analyzed by the response surface method (RSM). The parameters of micro-electrolysis activated persulfate process for phenol degradation were optimized by the fitted model of RSM. The results showed that all the dependent variables had significant effects on the response

收稿日期:2022-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51908377)

作者简介:胡俊生(1968—),男,教授,主要从事环境污染控制理论与技术等方面研究。

value, and the order of dominance from high to low was reaction temperature, persulfate concentration, and initial pH value. The optimal process conditions were as follows: persulfate concentration was 15.98 mmol/L, initial pH value was 2.78, and reaction temperature was 74.73 °C. The experimental results were consistent with the predicted values. Persulfate concentration and reaction temperature have obvious effects on phenol degradation rate, and this fitted model of RSM can accurately predict the optimal reaction conditions and degradation rate of phenol wastewater by micro-electrolysis activated persulfate.

**Key words:** persulfate; micro-electrolysis; response surface method; phenol

很多行业的工业废水中常含有大量的酚,石油化工产业废水中酚的质量浓度一般为 31~800 mg/L,酚醛树脂厂废水中酚的质量浓度更是高达 1 600 mg/L<sup>[1]</sup>。我国对酚类化合物的排放有严格的要求,根据《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)规定,苯酚的一级排放标准为质量浓度小于 0.3 mg/L。基于高级氧化技术(AOPs),通过活化过硫酸盐(PDS)生成具有较强氧化能力的自由基  $SO_4^{\cdot-}$  来氧化降解苯酚,使其分解成小分子或者直接矿化。相比于用  $Fe^{2+}$  活化 PDS,采用零价铁  $Fe^0$  活化 PDS,一方面避免了残存离子对水体的二次污染;另一方面避免过量的  $Fe^{2+}$  与 PDS 生成大量  $SO_4^{\cdot-}$ ,发生自由基淬灭<sup>[2]</sup>,同时  $Fe^{2+}$  与  $SO_4^{\cdot-}$  反应生成  $Fe^{3+}$ ,而  $Fe^{3+}$  很难转化为  $Fe^{2+}$ ,造成  $SO_4^{\cdot-}$  利用率降低,影响降解效果<sup>[3]</sup>。碳材料的引入,不仅可以活化 PDS,还可以与  $Fe^0$  构成微电解体系,促进苯酚降解。由于分散的铁和碳材料质量相差悬殊,易出现分层、生成氧化膜等现象,阻碍反应进行。王森等<sup>[4]</sup>将微电解技术与过硫酸盐技术相结合对造纸废水进行处理,研究发现 COD、色度去除率分别为 63%、95%,可以实现深度处理造纸废水。为进一步优化微电解活化过硫酸盐氧化体系的影响因素,高效降解苯酚废水,笔者通过微电解活化过硫酸盐体系降解苯酚,探究了 PDS 物质的量浓度、初始 pH 值和反应温度对苯酚降解率的影响,并应用响应面法对处理工艺进行优化。

## 1 试验

### 1.1 试验试剂与装置

试剂:过硫酸钠  $Na_2S_2O_8$  (PDS);苯酚;还原铁粉;活性炭;羧甲基纤维素钠;膨润土等。

试验装置:采用自制双层圆柱形反应器,高约 500 mm,外径 90 mm,内径 40 mm,有效容积 0.5 L。反应器外壁一侧通过套管连接自动循环水浴加热系统,另一侧沿垂直方向均匀设置 6 个取样口,用于取样分析。为防止铁碳微电解填料掉落,堵塞反应器,距反应器底部 40 mm 高度设有直径为 1 mm 的孔板(见图 1)。

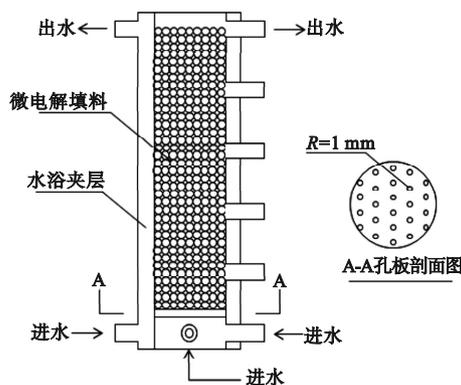


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

根据紫外可见分光光度计吸光度值计算苯酚降解率:

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

式中: $\eta$ 为苯酚降解率,%; $C_0$ 为苯酚初始质量浓度,mg/L; $C_t$ 为反应  $t$  时刻溶液中苯酚

质量浓度, mg/L。

## 1.2 铁碳微电解填料的制备

将质量比为 2:1 的铁碳主料与占主料质量 30% 的膨润土和 5% 的羧甲基纤维素钠混合均匀, 加入适量去离子水, 制成长度 10 mm、直径 3 mm 的柱形填料, 置于烘箱中 105 °C 固化 3 h, 之后移入马弗炉, 于 800 °C 下焙烧 1 h, 待填料冷却至室温后进行试验。

## 2 单因素影响试验

配制质量浓度为 200 mg/L 苯酚模拟废水, 调节溶液 pH 分别为 1.0、3.0、5.0、7.0、9.0, 分别配制物质的量浓度为 5、10、15、20、25 mmol/L 的 PDS 溶液, 控制反应温度分别为 35、45、55、65、75 °C, 按 800 g/L 的投放量将铁碳微电解填料置于反应器中, 控制反应时间为 120 min, 流速为 4.2 mL/min, 注入苯酚模拟废水和 PDS 溶液, 每隔 20 min 取样 0.5 mL。

### 2.1 过硫酸钠浓度

PDS 是反应体系中  $\text{SO}_4^- \cdot$  的主要来源, 并且  $\text{SO}_4^- \cdot$  的有效数量决定苯酚降解的效果。图 2 为不同 PDS 物质的量浓度对微电解活化过硫酸盐苯酚降解效果的影响。当 PDS 浓度从 5 mmol/L 提高到 15 mmol/L 时, 苯酚降解率从 90.21% 提高到 98.78%, 这是因为随着 PDS 质量浓度的增加, 体系中

微电解填料活化 PDS 使得活性物质增多, 降解率随之增加<sup>[5]</sup>。同时, 微电解体系也具备较高的处理能力, 其充足的原电池数量提供了足够的电流密度, 使得反应效率加快、降解效果提高。当 PDS 浓度为 15 mmol/L 时, 苯酚处理效果最佳。然而, 当浓度达到 25 mmol/L 时, 去除率却下降到 93.22%。这是由于 PDS 浓度过高, 过量的  $\text{SO}_4^- \cdot$  会发生淬灭反应, 导致  $\text{SO}_4^- \cdot$  减少<sup>[6]</sup>。

### 2.2 初始 pH 值

在过硫酸盐浓度为 15 mmol/L、反应温度为 65 °C 条件下, 不同初始 pH 值对微电解活化过硫酸盐降解苯酚的影响如图 3 所示。当 pH 为 3 时, 苯酚去除率为 98.7%, 当 pH 继续增加, 溶液呈中性时, 去除效果相比于酸性条件时下降, 但仍达到 91.47%。当 pH 再增加, 溶液为碱性时, 苯酚去除率略微升高为 93.42%。这是因为在酸性条件下, 溶液中  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$  可以与  $\text{H}^+$ 、 $\text{Fe}^0$  反应产生  $\text{SO}_4^- \cdot$ 。同时, 当 pH 值较低时, 原电池电极电位差较大, 溶液中含有大量的  $\text{H}^+$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$ , 原电池反应和絮凝沉淀作用共同进行, 促进反应进行<sup>[7]</sup>。在碱性条件下, 存在的自由基主要是  $\text{OH} \cdot$ <sup>[8-9]</sup>, 虽然仍具有强氧化性, 但其半衰期远小于  $\text{SO}_4^- \cdot$ 。可见, 酸性条件更有利于苯酚降解。

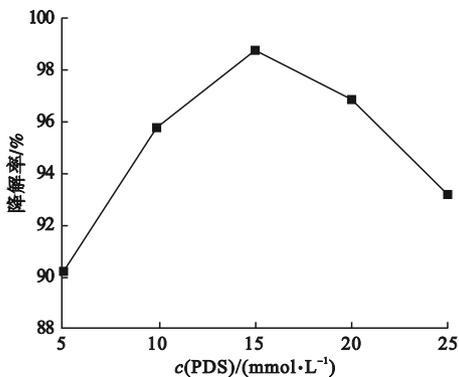


图 2 PDS 浓度对苯酚降解效果的影响

Fig. 2 Effect of PDS mass concentration on phenol degradation efficiency

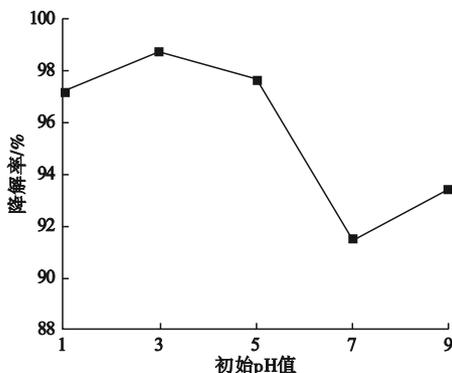


图 3 初始 pH 值对苯酚降解效果的影响

Fig. 3 Effect of initial pH value on phenol degradation efficiency

## 2.3 反应温度

在过硫酸盐浓度为 15 mmol/L, 初始 pH 值为 3 条件下, 不同反应温度对微电解活化过硫酸盐降解苯酚的影响如图 4 所示。120 min 内, 当温度为 35 °C 时苯酚降解率仅到达 89.41%, 而在 65 °C 时降解率则达到 98.76%, 当温度继续升高至 75 °C 时, 苯酚降解率仅增长 0.44%, 趋于平稳。温度的升高加快了过硫酸盐内 O-O 键的断裂, 产生  $\text{SO}_4^{\cdot-}$ , 提高了过硫酸盐活化效率, 促进了反应的进行<sup>[10]</sup>。温度升高会使得苯酚降解更加彻底, 与王晓晓等<sup>[11]</sup> 研究结果基本相同。

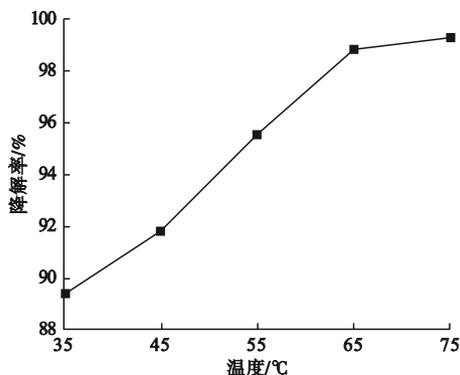


图 4 温度对苯酚降解效果的影响

Fig. 4 Effect of temperature on phenol degradation efficiency

## 3 响应面曲面法优化与分析

### 3.1 响应面法优化试验

根据单因素试验结果, 选取 PDS 物质的量浓度  $A$ 、初始 pH 值  $B$ 、反应温度  $C$  作为响应变量, 以苯酚降解率  $Y$  作为响应值, 借助 Design-Expert 软件对试验中影响因素进行优化分析。每个因素设置 3 个水平, 共 17 组试验。试验过程中, 每组重复 3 次, 以确保试验的准确性, 减少系统误差。响应面试验设计与结果如表 1 所示。

对试验结果进行多元回归拟合, 建立二次多项式模型:

$$Y = 98.30 + 1.24A + 0.78B + 4.00C + 0.70AB - 0.71AC - 0.64BC - 2.56A^2 - 1.18B^2 - 2.06C^2. \quad (2)$$

表 1 试验设计与结果

Table 1 Test design and results

组别	$A/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	$B$	$C/^\circ\text{C}$	$Y/\%$
1	10	3	75	97.12
2	20	1	65	94.28
3	20	5	65	97.18
4	15	3	65	98.35
5	15	3	65	98.89
6	10	3	55	87.64
7	15	5	55	92.56
8	15	3	65	97.84
9	15	3	65	97.68
10	10	5	65	93.45
11	15	1	55	89.64
12	20	3	55	91.68
13	15	3	65	98.76
14	20	3	75	98.31
15	15	1	75	98.85
16	15	5	75	99.21
17	10	1	65	93.36

模型的方差分析结果如表 2 所示。

表 2 回归方程的方差分析

Table 2 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方值	$F$ 值	$p$ 值
模型	207.11	9	23.01	132.20	<0.000 1
$A$	12.20	1	12.20	70.10	<0.000 1
$B$	4.91	1	4.91	28.23	0.001 1
$C$	127.76	1	127.76	733.96	<0.000 1
$AB$	1.97	1	1.97	11.34	0.012 0
$AC$	2.03	1	2.03	11.67	0.011 2
$BC$	1.64	1	1.64	9.41	0.018 1
$A^2$	27.53	1	27.53	158.15	<0.000 1
$B^2$	5.86	1	5.86	33.65	0.000 7
$C^2$	17.86	1	17.86	102.60	<0.000 1

$p < 0.000 1$ , 模型的  $p$  值为极显著水平, 失拟项  $p$  值为不显著水平,  $p = 0.973 2 > 0.05$ , 即该模型拟合良好。通过方差分析可知, 该模型  $R^2 = 0.986 6$ , 即该模型能解释 98.66% 的响应变化值; 信噪比为 35.817, 远大于 4, 变异系数为 0.44%, 远小于 10%, 表明该模型准确度高<sup>[12-13]</sup>。通过比较 PDS 物

质的量浓度、初始 pH 值、反应温度三者的  $F$  值,可知影响显著性由大到小依次为反应温度、PDS 物质的量浓度、初始 pH 值。

### 3.2 响应面法分析

#### 3.2.1 PDS 物质的量浓度与初始 pH 值

图 5 为 PDS 物质的量浓度与初始 pH 值对苯酚降解率的交互作用。

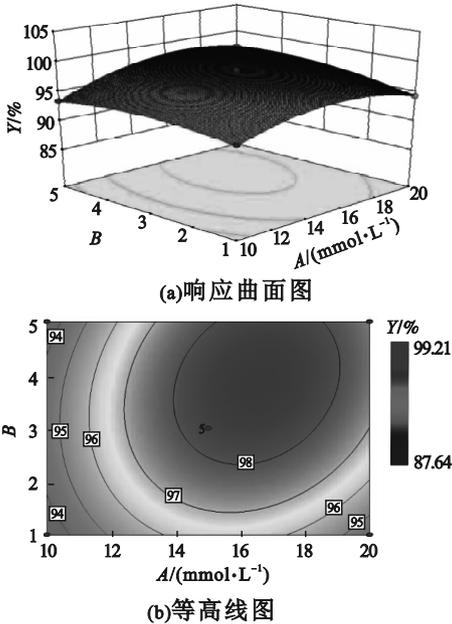


图 5 PDS 物质的量浓度和初始 pH 值对苯酚降解率影响

Fig. 5 Effect of PDS mass concentration and initial pH value on phenol degradation rate

表 2 显示  $p(AB) = 0.0120 < 0.05$ ,说明 PDS 物质的量浓度和初始 pH 值的交互作用显著。响应色谱沿着 PDS 浓度轴变化时,颜色由浅变深再变浅,即苯酚降解率随着 PDS 浓度增加出现先增后减的趋势,曲面呈凸面。在初始 pH 值处于较高水平, PDS 为较高浓度时的苯酚降解率明显优于低水平的降解率。这是因为低浓度的  $S_2O_8^{2-}$  通过活化产生少量的  $SO_4^{\cdot-}$ ,却不足以完全降解苯酚,此时铁碳微电解反应起主导作用。然而当体系中存在高浓度  $S_2O_8^{2-}$  时,会发生反应: $SO_4^{\cdot-} + S_2O_8^{2-} \rightarrow SO_4^{2-} + \cdot S_2O_8^{\cdot-}$ 、 $SO_4^{\cdot-} + SO_4^{2-} \rightarrow S_2O_8^{\cdot-}$ ,过量的  $SO_4^{\cdot-}$  会促使淬灭反应发生,

进而使  $SO_4^{\cdot-}$  减少,去除率下降<sup>[14]</sup>。此外,在适当的 pH 值条件下,填料中的  $Fe^0$  会溶出更多的  $Fe^{2+}$ ,与废水中  $S_2O_8^{2-}$  进行反应,生成更多的  $SO_4^{\cdot-}$ <sup>[15]</sup>,因此对苯酚降解能力更强。

#### 3.2.2 PDS 物质的量浓度与反应温度

图 6 为 PDS 物质的量浓度和反应温度对苯酚降解率的交互作用。无论 PDS 物质的量浓度为高水平或低水平,苯酚去除率都会随着反应温度的升高而增加,而随着 PDS 物质的量浓度值的升高,苯酚降解率会出现小幅度的升高或降低。响应色谱沿着反应温度轴变化时,在温度较高区域呈现深色,沿着 PDS 物质的量浓度轴变化时,颜色较浅。曲面整体坡度沿反应温度方向较陡峭,而在 PDS 物质的量浓度方向较平缓,可见,反应温度较 PDS 物质的量浓度对苯酚降解率显著。这是由于 PDS 的半衰期会随着温度的升高而减小,而 PDS 产生  $SO_4^{\cdot-}$  的速率与反应温度密不可分<sup>[16]</sup>。此外,温度的升高使得体系中分子热运动加快,反应速率因此加快,处理效果更彻底。可见,体系温度的升高促进了 PDS 的分解,产生更多的  $SO_4^{\cdot-}$ ,推动反应进行。

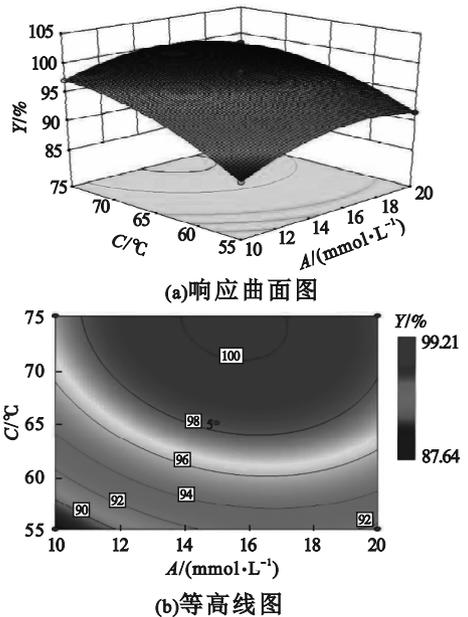


图 6 PDS 物质的量浓度和温度对苯酚降解率影响  
Fig. 6 Effects of PDS mass concentration and temperature on phenol degradation rate

### 3.2.3 初始 pH 值与反应温度

图7为初始 pH 值和反应温度对苯酚降解率的交互作用。 $p(BC) = 0.0181 < 0.05$ , 且等高线呈椭圆形, 说明其交互作用显著<sup>[17]</sup>。相比于初始 pH 值, 反应温度的曲线更加陡峭, 说明反应温度对体系的影响更加显著, 这也与表2结果一致, 可见, 反应温度高更有利于各 pH 值促进体系的反应。同时, 响应值随着初始 pH 值的增加, 色谱颜色变化显著, 即降解率先增加后减小, 初始 pH 值在3附近时, 苯酚降解率达到最高值, 且随着温度升高持续增加。在酸性条件下, 一方面铁碳微电解填料与  $S_2O_8^{2-}$  反应生成  $Fe^{2+}$ , 由  $Fe^{2+}$  活化 PDS 生成  $SO_4^{\cdot-}$ <sup>[18]</sup>, 反应方程式为:  $Fe^0 + S_2O_8^{2-} \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{\cdot-}$ 、 $Fe^{2+} + S_2O_8^{2-} \rightarrow Fe^{3+} + SO_4^{\cdot-} + SO_4^{2-}$ , 另一方面溶液中  $H^+$  也可以促使反应产生  $SO_4^{\cdot-}$ <sup>[19-20]</sup>, 因此, 酸性条件能促进苯酚高效降解。

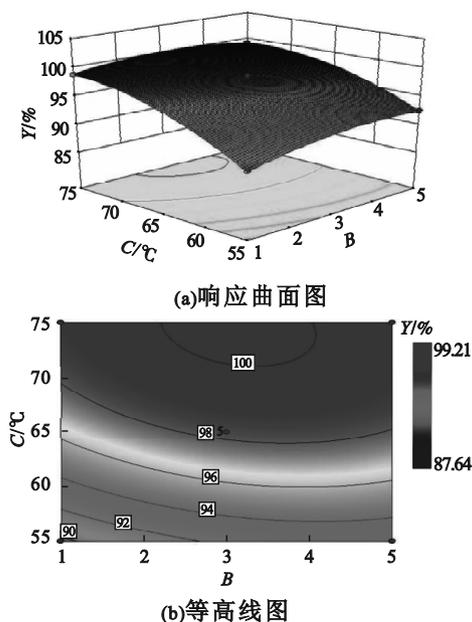


图7 初始 pH 值和温度对苯酚降解率影响

Fig. 7 Effect of initial pH and temperature on phenol degradation rate

### 3.3 试验验证

通过模型可预测出体系的最佳反应条件: PDS 物质的量浓度为 15.98 mmol/L、初始 pH 值为 2.78、反应温度为 74.73 °C, 预测

得到最优条件下苯酚降解率可达 100%。在最佳反应条件下进行试验, 得到苯酚降解率分别为 99.86%、99.91%、99.94%, 预测结果与试验结果很相近, 表明该模型具有一定可行性、可靠度, 能够预测微电解活化 PDS 降解苯酚的反应结果。

## 4 结论

(1) 通过模型的方差分析和响应面分析可知, PDS 物质的量浓度、初始 pH 值和反应温度这 3 个因素对响应值均有显著影响, 显著性由大到小依次为反应温度、PDS 物质的量浓度、初始 pH 值。

(2) 通过响应面模型验证得到体系的最佳反应条件: PDS 物质的量浓度为 15.98 mmol/L、初始 pH 值为 2.78、反应温度为 74.73 °C, 并且预测值与试验结果基本相符, 该模型具有可靠性, 可以较为准确地模拟微电解活化 PDS 降解苯酚废水。

## 参考文献

- [1] 蒋博龙, 史顺杰, 蒋海林, 等. 金属有机框架材料吸附处理苯酚污水机理研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4525-4539. (JIANG Bolong, SHI Shunjie, JIANG Hailin, et al. Research progress in phenol adsorption mechanism over metal-organic framework from wastewater [J]. Chemical industry and engineering progress, 2021, 40(8): 4525-4539.)
- [2] 冯俊生, 刘康齐, 张郢, 等. 零价铁活化过硫酸盐降解分散剂木质素磺酸钠研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1225-1232. (FENG Junsheng, LIU Kangqi, ZHANG Yun, et al. On the dispersant degradation of zero-valent iron activated by the persulfate sodium lignosulfonate [J]. Journal of safety and environment, 2021, 21(3): 1225-1232.)
- [3] JI Y, FERRONATO C, SALVADOR A, et al. Degradation of ciprofloxacin and sulfamethoxazole by ferrous-activated persulfate: Implications for remediation of groundwater contaminated by antibiotics [J]. Science of the total environment, 2014, 472(15): 800-808.
- [4] 王森, 肖雪莉, 程赛鸽, 等. 铁碳微电解联合过硫酸盐深度处理造纸废水的研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(4): 71-75. (WANG Sen, XIAO Xueli, CHENG Saige, et al. Study on advanced treatment of papermaking

- wastewater by iron-carbon micro-electrolysis combined with persulfate [J]. *Industrial water treatment*, 2020, 40(4): 71 - 75. )
- [ 5 ] 石月, 彭湃, 刘艳丽, 等. UV/Fe<sup>2+</sup>/过硫酸盐降解噻虫啉的响应曲面法优化研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5153 - 5159. ( SHI Yue, PENG Pai, LIU Yanli, et al. Degradation of thiacloprid via UV/Fe<sup>2+</sup>/persulfate system: Optimization using response surface methodology [J]. *China environmental science*, 2021, 41(11): 5153 - 5159. )
- [ 6 ] ZHU Jingping, LIN Yili, ZHANG Tianyang, et al. Modelling of iohexol degradation in a Fe(II)-activated persulfate system-science direct [J]. *Chemical engineering journal*, 2019, 367: 86 - 93.
- [ 7 ] WU Y, YUE Q. Performance of bimetallic nanoscale zero-valent iron particles for removal of oxytetracycline [J]. *Journal of environmental sciences*, 2018, 69(7): 173 - 182.
- [ 8 ] LIANG C, WANG Z S, BRUELL C J. Influence of pH on persulfate oxidation of TCE at ambient temperatures [J]. *Chemosphere*, 2007, 66(1): 106 - 113.
- [ 9 ] LI P, LIU Z, WANG X, et al. Enhanced decolorization of methyl orange in aqueous solution using iron-carbon micro-electrolysis activation of sodium persulfate [J]. *Chemosphere*, 2017, 180(8): 100 - 107.
- [ 10 ] ZRINYI N, PHAM L T. Oxidation of benzoic acid by heat-activated persulfate: Effect of temperature on transformation pathway and product distribution [J]. *Water research*, 2017, 120: 43 - 51.
- [ 11 ] 王晓晓, 王兆慧, 柳建设. 热活化过硫酸盐氧化降解水体中泛影酸钠的研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(5): 1519 - 1526. ( WANG Xiaoxiao, WANG Zhaohui, LIU Jianshe. Degradation of sodium diatrizoate by thermally activated persulfate oxidation process [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2019, 39(5): 1519 - 1526. )
- [ 12 ] 魏炜, 孙舶洋, 潘俊, 等. 响应曲面法对玉米秸秆稀酸水解还原糖条件的优化[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2019, 35(6): 1136 - 1142. ( WEI Wei, SUN Boyang, PAN Jun, et al. Optimization of corn straw cellulose dilute acid hydrolytic into reducing sugar by response surface methodology [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2019, 35(6): 1136 - 1142. )
- [ 13 ] ESCOBEDO E, CHO K, CHANG Y S. Electrochemical activation of hydrogen peroxide, persulfate, and free chlorine using sacrificial iron anodes for decentralized wastewater treatment [J]. *Journal of hazardous materials*, 2021, 423(2): 127068.
- [ 14 ] WANG X, ZHANG G, LIU X, et al. Effect of peroxydisulfate on the degradation of phenol under dielectric barrier discharge plasma treatment [J]. *Chemosphere*, 2019, 232(10): 462 - 470.
- [ 15 ] MA Y, GU Y, JIANG D, et al. Degradation of 2,4-DCP using persulfate and iron/E-carbon micro-electrolysis coupling system [J]. *Journal of hazardous materials*, 2021, 413: 125381.
- [ 16 ] SHANG W, DONG Z, LI M, et al. Degradation of diatrizoate in water by Fe(II)-activated persulfate oxidation [J]. *Chemical engineering journal*, 2019, 361: 1333 - 1344.
- [ 17 ] 谢慧娜, 嵇斌, 李杰, 等. 响应面法优化 Fenton 预处理精细化工废水[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(8): 1419 - 1426. ( XIE Huina, JI Bin, LI Jie, et al. Optimization of Fenton process for pretreatment of refractory fine chemistry wastewater with response surface methodology [J]. *Research of environmental sciences*, 2019, 32(8): 1419 - 1426. )
- [ 18 ] WANG Songlin, WU Junfeng, LU Xiuqing, et al. Removal of acetaminophen in the Fe<sup>2+</sup>/persulfate system: Kinetic model and degradation pathways [J]. *Chemical engineering journal*, 2018, 358: 1091 - 1100.
- [ 19 ] 傅晓艳, 赵委托, 杜江坤, 等. 稳定化纳米零价铁活化过硫酸盐降解罗丹明 B [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(11): 57 - 62. ( FU Xiaoyan, ZHAO Weituo, DU Jiangkun, et al. Degradation of Rhodamine B by nanoscale zero-valent iron activated persulfate [J]. *China water & wastewater*, 2020, 36(11): 57 - 62. )
- [ 20 ] 张磊, 林子雨, 张文静. 紫外强化 CuO 活化过硫酸盐降解罗丹明 B 染料废水[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(11): 82 - 89. ( ZHANG Lei, LIN Ziyu, ZHANG Wenjing. Degradation of dyeing wastewater containing Rhodamine B by CuO-activated persulfate with UV strengthening [J]. *Environmental science & technology*, 2020, 43(11): 82 - 89. ) (责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)