



改性活性炭催化过硫酸盐处理甲基橙废水

赵娟娟, 丘烨铃, 胡 赟, 陈惠莹, 马承威, 王 超, 许佳雨

(河北省危险化学品安全与控制技术重点实验室,
华北科技学院化学与环境工程学院, 河北廊坊 065201)

[摘要] 为获得低成本、高效率的偶氮染料废水处理方法, 采用改性活性炭催化过硫酸盐(PS)氧化降解甲基橙染料废水。通过单因素实验分别研究改性活性炭、PS 及 Fe^{2+} 浓度对甲基橙降解的影响, 降解过程遵循拟一级动力学模型, 反应速率常数为 $0.075\ 7\sim 1.717\ 8\ \text{min}^{-1}$ 。采用 Box-Behnken Design 响应面研究各因素及其交互作用对甲基橙降解的影响, 各因素贡献排序为: 催化剂投加量>PS 浓度> Fe^{2+} 浓度, 最佳反应条件: 催化剂投加量为 $0.73\ \text{g/L}$ 、PS 浓度为 $2.0\ \text{mmol/L}$ 、 Fe^{2+} 浓度为 $1.08\ \text{mol/L}$ 。对改性活性炭催化 PS 氧化降解甲基橙染料废水的机理进行探究, 电子顺磁共振波谱实验表明降解体系中存在羟基自由基和硫酸根自由基, 自由基猝灭实验表明改性活性炭表面的羟基自由基在甲基橙降解过程中起重要作用。

[关键词] 甲基橙; 过硫酸盐; 改性活性炭; 动力学

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)01-0115-06

Treatment methyl orange with persulfate activated by modified activated carbon

ZHAO Juanjuan, QIU Yeling, HU Yun, CHEN Huiying, MA Chengwei, WANG Chao, XU Jiayu
(Hebei Key Laboratory of Hazardous Chemicals Safety and Control Technology, School of Chemical and
Environmental Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

Abstract: For the low cost and high efficiency treatment of azo dyeing wastewater, modified activated carbon was applied to activate persulfate (PS) to degrade methyl orange wastewater. Single-factor experiments were performed to investigate the effects of the dosage of modified activated carbon, the concentration of PS and Fe^{2+} on methyl orange degradation. The degradation followed a pseudo-first-order kinetic model, with the pseudo first-order rate constant from $0.075\ 7$ to $1.717\ 8\ \text{min}^{-1}$. The response surface method based on Box-Behnken Design was simulated, and the effects of various factors and their interactions on the degradation of methyl orange were studied. The factors contributed on the degradation were as follows: the dosage of modified activated carbon>the PS concentration>the Fe^{2+} concentration. The optimum condition was $0.73\ \text{g/L}$ modified activated carbon, $2.0\ \text{mmol/L}$ PS and $1.08\ \text{mol/L}\ \text{Fe}^{2+}$. The mechanism of methyl orange degradation was investigated. Hydroxyl and sulfate radicals were identified by electron paramagnetic resonance spectroscopy during methyl orange degradation. The surface-adsorbed hydroxyl radicals played important roles by radical scavenging tests.

Key words: methyl orange; persulfate; modified activated carbon; kinetics

全球每年生产的染料超过 $7\times 10^5\ \text{t}$, 其中约 10%~15% 染料被排放到环境中^[1]。这些染料具有不可生物降解性、潜在的致癌、致畸性和致突变性, 可对人类健康和生态环境产生严重危害^[2]。其中, 偶氮染

料广泛应用于纺织、印刷、皮革、食品、化妆品等行业, 是目前使用最多的合成染料。

高级氧化技术 (Advanced Oxidation Processes, AOPs) 是通过产生强氧化能力自由基 (如 $\cdot\text{OH}$ 和

$\text{SO}_4^{\cdot-}$ 降解有机污染物的技术^[3]。 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 可由热^[4]、光^[5]、过渡金属^[6]或活性炭^[7]等活化过硫酸盐(Persulfate, PS)产生,与 $\cdot\text{OH}$ 相比,其具有氧化还原电位高(2.5~3.1 V)、pH适用范围宽(4<pH<9)和寿命长(30~40 μs)等优点^[8],目前广泛应用于染料废水处理^[9]。

活性炭热稳定性好、重复利用率高、价格低廉,是一种环保绿色材料。近年来,不少学者采用活性炭活化PS氧化降解有机污染物。如M. FOROUZESH等^[10]用颗粒活性炭活化PS降解甲硝唑,研究了活性炭投加量、甲硝唑浓度和PS/甲硝唑物质的量比对甲硝唑降解率的影响;Shiying YANG等^[11]用颗粒活性炭活化PS降解酸性橙7(AO7),研究了活性炭投加量、PS浓度和溶液pH对酸性橙降解的影响;Chen-hui YAO等^[12]研究活性炭活化PS降解对氯苯胺,考察了活性炭投加量和溶液pH对降解过程的影响。

常规活性炭往往难以达到理想的处理效果,在实际应用中需要对活性炭进行改性以提高其性能^[13]。本研究采用活性炭负载 Fe^{2+} 制备改性活性炭,并将其用于催化PS降解甲基橙(MO),通过单因素实验研究催化剂投加量、PS和 Fe^{2+} 浓度对MO降解的影响,并探明降解反应动力学规律。在此基础上,通过响应面法研究各因素对MO降解率贡献大小和最佳反应条件,并探明改性活性炭催化PS降解MO机理,为处理染料废水提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

试剂:MO、活性炭、过硫酸钠、硫酸亚铁、甲醇、叔丁醇、2,6-二甲基吡啶N-氧化物(DMPO)均为分析纯试剂,实验用水为去离子水。

仪器:UV-2600型分光光度计,日本岛津有限公司;MS-5000型电子顺磁共振仪,德国弗莱贝格仪器有限公司;SK-G05143型真空气氛管式电炉,天津中环电炉股份有限公司;85-2A型数显恒温测速磁力搅拌器,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 改性活性炭催化剂的制备

称取一定量活性炭于锥形瓶中,加入80 mL 2 mol/L盐酸,摇匀,以200 r/min转速搅拌24 h。再用去离子水反复清洗至上清液近中性,过滤,将活性炭置于真空干燥箱中烘干。

取一定量烘干的活性炭于烧杯中,加入一定浓度的硫酸亚铁溶液,搅拌,转移至水热合成反应釜中,在100 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中浸渍24 h,冷却至室温,用去离子水反复冲洗,直至清洗液中滴加邻二氮菲溶液不变色。过滤,将所得固体放入真空干燥箱中烘至恒重。最后将该固体放入管式电炉,在通入氮气条件下于800 $^{\circ}\text{C}$ 保温2 h,冷却至室温,将制备的催化剂放入密封袋,置于干燥器中备用。

1.2.2 改性活性炭催化PS降解MO实验

在室温条件下,将一定量改性活性炭和PS加入100 mg/L MO溶液反应,在一定的反应时间取样,样品经0.22 μm 滤膜过滤后快速加入甲醇,并加入硫酸调节溶液pH,用分光光度计在508 nm测样品吸光度。在不同催化剂投加量及PS浓度下反应,每组实验重复3次,结果取平均值分析讨论。

1.2.3 MO降解率计算

绘制MO标准工作曲线,通过样品吸光度计算MO浓度,MO降解率计算方法见式(1)。

$$D=(1-C_t/C_0)\times 100\% \quad (1)$$

式中: D ——MO降解率,%;

C_0 ——MO初始质量浓度,g/L;

C_t ——反应 t 时刻MO质量浓度,g/L。

1.2.4 数据分析处理

根据单因素实验确定各因素的水平区间,采用Design Expert软件中Box-Behnken Design(BBD)原理,进行3因素3水平,5个中心点重复实验设计,共计17组实验。对实验数据进行建模,得到关于3因素与MO降解率 D 的二次多项式回归方程,对该模型进行方差分析,并绘制各因素两两之间等高线和响应面图。

2 结果与分析

2.1 单因素优化实验研究

2.1.1 催化剂投加量对MO降解的影响

固定PS浓度为1.05 mmol/L, Fe^{2+} 浓度为0.75 mol/L,考察催化剂质量浓度分别为0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 g/L时对MO降解的影响,结果见图1。

由图1可知,随着催化剂投加量的增加, C_t/C_0 明显下降,即MO去除率明显升高。当催化剂质量浓度为0.3 g/L时,MO去除率在反应30 min时为84%;当催化剂质量浓度为0.6 g/L时,MO去除率在30 min

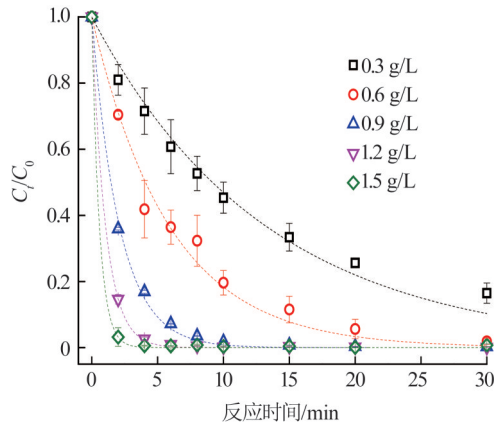


图1 催化剂投加量对MO去除率的影响

Fig. 1 Effects of catalyst dose on MO degradation

时可达98%;当催化剂质量浓度增加到0.9 g/L时,MO在20 min时基本完全降解。这是因为改性活性炭表面存在活性点位,随着催化剂投加量增加,表面活性点位越多,MO降解率越高。

研究发现,催化剂活化PS氧化降解MO符合拟一级动力学规律,即满足式(2),经变换可得式(3):

$$dC_t/dt = -k_{obs} C_t \quad (2)$$

$$C_t/C_0 = e^{-k_{obs} t} \quad (3)$$

式中: C_t ——反应 t 时刻MO质量浓度,g/L;

t ——反应时间,min;

k_{obs} ——拟一级反应速率常数,min⁻¹。

在MO降解过程中, C_t/C_0 与 t 呈指数关系,拟合曲线如图1中虚线所示,动力学方程及参数见表1。

表1 不同催化剂投加量的降解反应动力学参数

Table 1 Kinetic parameters under different catalyst dose

催化剂投加量/ (g·L ⁻¹)	动力学方程	速率常数/min ⁻¹	R ²
0.3	$C_t/C_0 = e^{-0.075 7t}$	0.075 7±0.003 2	0.983 8
0.6	$C_t/C_0 = e^{-0.169 9t}$	0.169 9±0.010 6	0.977 8
0.9	$C_t/C_0 = e^{-0.476 2t}$	0.476 2±0.013 6	0.998 1
1.2	$C_t/C_0 = e^{-0.955 3t}$	0.955 3±0.011 0	0.999 9
1.5	$C_t/C_0 = e^{-1.717 8t}$	1.717 8±0.076 0	0.999 8

由表1可知,拟合曲线的 R^2 接近1,说明该动力学模型与实验结果拟合性较好。

2.1.2 PS浓度对MO降解的影响

固定催化剂投加量为0.6 g/L、Fe²⁺浓度为0.75 mol/L,考察PS初始浓度分别为0.25、0.45、0.65、0.85、1.05、1.25 mmol/L时对MO降解的影响。降解反应符合拟一级反应动力学模型,拟合曲线和反应速率常数见图2。

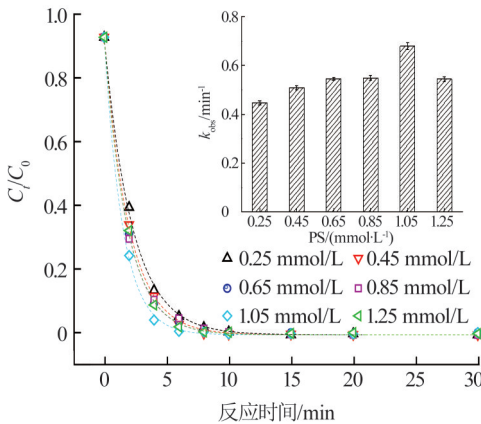
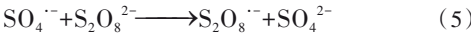
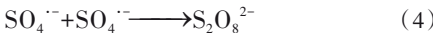


图2 过硫酸盐浓度对降解MO反应速率常数的影响

Fig. 2 Effects of PS concentration on MO degradation

由图2可知,当PS浓度由0.25 mmol/L增加到1.05 mmol/L时,反应速率常数逐渐增加。这是因为PS浓度越高,反应过程中产生的活性种越多,降解MO的反应速率常数越大。但当PS浓度由1.05 mmol/L增加到1.25 mmol/L时,反应速率常数反而下降,这是因为PS浓度过高时,体系在短时间内产生大量的SO₄^{·-},进而发生猝灭SO₄^{·-}反应,如式(4)和(5)所示,SO₄^{·-}的浓度降低,导致MO降解率下降。因此,反应体系中PS浓度并非越高MO降解效果越好。为保证体系中MO降解率较高,同时又不造成药品浪费,宜采用的PS浓度为1.05 mmol/L。



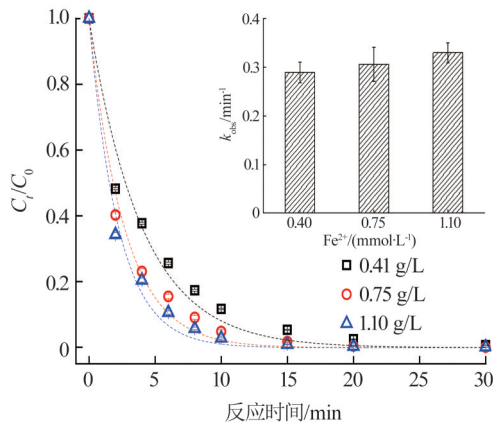
2.1.3 Fe²⁺浓度对MO降解的影响

固定催化剂投加量为0.6 g/L、PS浓度为1.05 mmol/L,考察Fe²⁺浓度分别为0.40、0.75、1.10 mol/L时对MO降解的影响。降解反应符合拟一级反应动力学模型,拟合曲线和反应速率常数见图3。

由图3可知,随着Fe²⁺浓度的增加,反应速率常数缓慢增加。当Fe²⁺浓度由0.40 mmol/L增加到0.75 mmol/L时,反应速率常数增加5.7%;当Fe²⁺浓度由0.75 mmol/L增加到1.10 mmol/L时,反应速率常数增加7.7%。这是因为Fe²⁺浓度越高,反应过程中产生的活性种增加,MO降解的反应速率常数增大。

2.2 响应面法实验设计及分析

采用Design Expert软件中Box-Behnken Design进行实验设计,以催化剂投加量、PS浓度和Fe²⁺浓度3个因素为自变量,反应时间设为15 min,以MO降

图3 Fe^{2+} 浓度对降解MO反应速率常数的影响Fig. 3 Effects of Fe^{2+} concentration on MO degradation

解率为响应值,进行3因素3水平,5个中心点重复实验设计,实验设计与结果见表2。

表2 响应曲面设计与结果

Table 2 Design and results of the response surface method

编号	A: 催化剂投加量/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	B: PS 浓度/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	C: Fe^{2+} 浓度/ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	降解率/%
1	0.60	1.05	0.75	95.73
2	0.60	1.05	0.75	95.21
3	0.60	2.00	1.08	99.43
4	0.60	1.05	0.75	91.74
5	0.60	1.05	0.75	93.74
6	0.30	2.00	0.75	76.77
7	0.60	0.10	0.41	95.51
8	0.30	1.05	0.41	65.53
9	0.90	1.05	0.41	99.95
10	0.60	0.10	1.08	95.76
11	0.30	0.10	0.75	52.10
12	0.60	2.00	0.41	94.54
13	0.30	1.05	1.08	64.91
14	0.90	0.10	0.75	99.23
15	0.90	1.05	1.08	99.96
16	0.60	1.05	0.75	96.95
17	0.90	2.00	0.75	99.93

用Design Expert 对表2中的实验数据进行建模,可以得到关于催化剂投加量A、PS浓度B、 Fe^{2+} 浓度C与MO降解率D之间的二次多项式回归方程(6):

$$D = 94.67 + 17.47A + 3.51B + 0.5662C - 5.99AB + 0.1575AC + 1.16BC - 13.19A^2 + 0.5280B^2 + 1.11C^2 \quad (6)$$

对该模型进行方差分析,结果见表3。

由表3可知,该模型具有显著性($p < 0.0001$)。由回归方程中一次项系数的绝对值大小和各因素的方差显著性初步判断各因素对MO降解率贡献排序为:催化剂投加量>PS浓度> Fe^{2+} 浓度。根据回归方

表3 回归方程的方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression equation

数据来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	3 425.62	9	380.62	31.52	<0.000 1
A	2 441.61	1	2 441.61	202.21	<0.000 1
B	98.49	1	98.49	8.16	0.024 5
C	2.57	1	2.57	0.212 4	0.658 8
AB	143.64	1	143.64	11.90	0.010 7
AC	0.099 2	1	0.099 2	0.008 2	0.930 3
BC	5.38	1	5.38	0.445 8	0.525 7
A ²	733.03	1	733.03	60.71	0.000 1
B ²	1.17	1	1.17	0.097 2	0.764 3
C ²	5.17	1	5.17	0.428 1	0.533 8
剩余	84.52	7	12.07		
失拟	68.46	3	22.82	5.68	0.063
纯误差	16.06	4	4.02		
总和	3 510.15	16			

注: 方差差异极显著($p < 0.0001$), 方差差异显著($p < 0.05$)。

程(6),分别对各因素两两之间作等高线和响应面图,结果见图4(图中颜色越深则表明MO降解效率越高,曲面越陡,说明该因素对反应体系的作用越显著)。

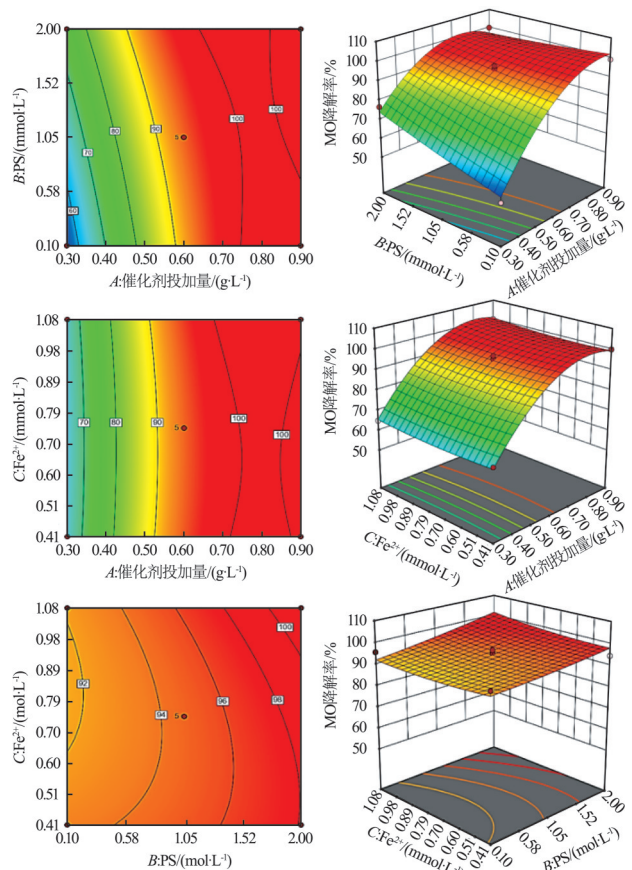


图4 各因素对MO降解影响的等高线和响应面

Fig. 4 Effects of various parameters on MO degradation contour and 3D surface

由图4可知,在实验研究范围内催化剂投加量对MO降解的影响最显著。通过软件的“数值优化”功能对工艺参数进行优化,并进行MO降解率预测。该模型预测最大MO降解率可达100%,最优操作条件为:催化剂投加量为0.73 g/L、PS浓度为2.0 mmol/L和 Fe^{2+} 浓度为1.08 mol/L。

2.3 机理分析

2.3.1 EPR 实验

电子顺磁共振波谱(EPR)可通过超精细耦合相互作用辨别自由基种类,采用DMPO作为捕获剂,测得EPR谱图见图5。

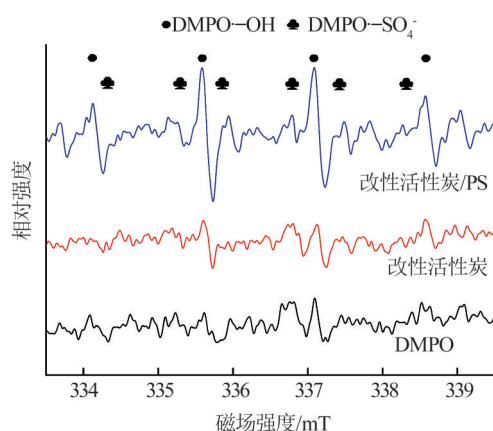


图5 改性活性炭体系EPR谱图

Fig. 5 EPR spectra of modified activated carbon system

由图5可知,单独的DMPO和改性活性炭没有明显信号,改性活性炭活化PS体系可以观察到明显羟基自由基信号($A_N=14.8$ G, $A_H=14.8$ G),也可观察到较弱的硫酸根自由基信号($A_N=13.51$ G, $A_H=9.93$ G, $A_H^1=1.34$ G和 $A_H^2=0.88$ G)^[14],因此改性活性炭活化PS降解体系中存在羟基和硫酸根自由基。

2.3.2 自由基猝灭实验

自由基猝灭实验可以确定反应过程中自由基的作用。在改性活性炭催化PS氧化降解MO过程中分别加入甲醇、乙醇和叔丁醇猝灭剂,MO降解率见图6。

由图6可知,加入甲醇和乙醇后MO的降解率未明显降低,这是因为甲醇和乙醇亲水性很好,不容易扩散到固体催化剂表面,不能猝灭催化剂表面的自由基^[15];而加入叔丁醇后MO降解率明显下降,这是因为叔丁醇与催化剂表面接触效果良好,能有效猝灭催化剂表面产生的羟基自由基,证明催化剂表面羟基自由基在MO降解过程中起重要作用。

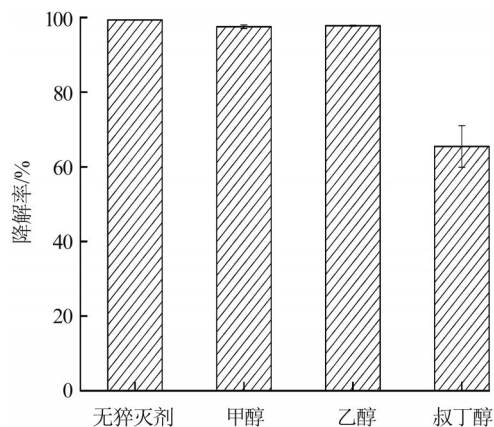


图6 自由基捕获剂对MO降解率影响

Fig. 6 Effect of radical scavengers on MO degradation efficiency

3 结论

采用改性活性炭催化PS氧化降解MO废水,考察了改性活性炭投加量、PS及 Fe^{2+} 浓度对MO降解的影响,并通过响应面优化实验得到MO降解的最佳反应条件,主要结论如下:

(1)当MO质量浓度为100 mg/L、PS浓度为1.05 mmol/L、 Fe^{2+} 浓度为0.75 mol/L、催化剂质量浓度为0.9 g/L时,MO在反应20 min时基本完全降解。

(2)降解过程遵循拟一级动力学模型,研究范围内反应速率常数为0.075 7~1.717 8 min^{-1} 。

(3)各因素对MO降解率贡献排序:催化剂投加量>PS浓度> Fe^{2+} 浓度,最佳反应条件:催化剂投加量为0.73 g/L、PS浓度为2.0 mmol/L和 Fe^{2+} 浓度为1.08 mol/L。

(4)改性活性炭催化PS降解体系中存在羟基和硫酸根自由基,催化剂表面的羟基自由基在MO降解过程中起重要作用。

参考文献

- [1] ROBATI D, MIRZA B, RAJABI M, et al. Removal of hazardous dyes-BR 12 and methyl orange using graphene oxide as an adsorbent from aqueous phase[J]. Chem. Eng. J., 2016, 284: 687-697.
- [2] KONICKI W, ALEKSANDRZAK M, MOSZYŃSKI D, et al. Adsorption of anionic azo-dyes from aqueous solutions onto graphene oxide: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies[J]. J. Colloid Interf. Sci., 2017, 496: 188-200.
- [3] ZHAO Juanjuan, SUN Yujiao, ZHANG Yang, et al. Heterogeneous activation of persulfate by activated carbon supported iron for efficient amoxicillin degradation[J]. Environ. Technol. Innov., 2021, 21: 101259.

- [4] SUN Yujiao, ZHAO Juanjuan, ZHANG Botao, et al. Oxidative degradation of chloroxylenol in aqueous solution by thermally activated persulfate: Kinetics, mechanisms and toxicities[J]. Chem. Eng. J., 2019, 368: 553-563.
- [5] GHAUCH A, BAALBAKI A, AMASHA M, et al. Contribution of persulfate in UV₂₅₄ activated systems for complete degradation of chloramphenicol antibiotic in water[J]. Chem. Eng. J., 2017, 317: 1012-1025.
- [6] AYOUB G, GHAUCH A. Assessment of bimetallic and trimetallic iron-based systems for persulfate activation: Application to sulfamethoxazole degradation[J]. Chem. Eng. J., 2014, 256: 280-292.
- [7] 吕志超, 宋秀兰, 赵青云. 颗粒活性炭激活过硫酸盐氧化法深度处理焦化废水[J]. 工业水处理, 2021, 41(2): 88-91.
LÜ Zhichao, SONG Xiulan, ZHAO Qingyun. Advanced treatment of coking wastewater by persulfate oxidation catalyzed by granular activated carbon[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(2): 88-91.
- [8] ZHANG Yang, ZHANG Botao, TENG Yanguo, et al. Heterogeneous activation of persulfate by carbon nanofiber supported Fe₃O₄@carbon composites for efficient ibuprofen degradation[J]. J. Hazard. Mater., 2021, 401: 123428.
- [9] 杨生滢, 毕文龙, 张健, 等. 硫酸根自由基对甲基橙的处理效果及机理[J]. 工业水处理, 2020, 40(4): 55-59.
YANG Shenghan, BI Wenlong, ZHANG Jian, et al. Effect and mechanism of sulfate radical on methyl orange treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(4): 55-59.
- [10] FOROUZESH M, EBADI A, AGHAEINEJAD-MEYBODI A. Degradation of metronidazole antibiotic in aqueous medium using activated carbon as a persulfate activator[J]. Sep. Purif. Technol., 2019, 210: 145-151.
- [11] YANG Shiyong, YANG Xin, SHAO Xueting, et al. Activated carbon catalyzed persulfate oxidation of Azo dye acid orange 7 at ambient temperature[J]. J. Hazard. Mater., 2011, 186(1): 659-666.
- [12] YAO Chenhui, ZHANG Yongqing, DU Meimei, et al. Insights into the mechanism of non-radical activation of persulfate via activated carbon for the degradation of *p*-chloroaniline[J]. Chem. Eng. J., 2019, 362: 262-268.
- [13] JIANG Shunfeng, LING Lili, CHEN Wenjing, et al. High efficient removal of bisphenol A in a peroxymonosulfate/iron functionalized biochar system: Mechanistic elucidation and quantification of the contributors[J]. Chem. Eng. J., 2019, 359: 572-583.
- [14] ZHAO Dan, LIAO Xiaoyong, YAN Xiulan, et al. Effect and mechanism of persulfate activated by different methods for PAHs removal in soil[J]. J. Hazard. Mater., 2013, 254/255: 228-235.
- [15] 王丽娟, 张海潇, 张锐, 等. 石墨相氮化碳活化过硫酸钠暗反应降解亚甲基蓝[J]. 工业水处理, 2020, 40(8): 75-79.
WANG Lijuan, ZHANG Haixiao, ZHANG Rui, et al. Degradation of methylene blue by sodium persulfate dark reaction activated with graphitic carbon nitride[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(8): 75-79.
- 【作者简介】 赵娟娟(1981—), 硕士, 副教授. E-mail: zhjj@ncist.edu.cn.
【收稿日期】 2021-11-12(修改稿)
-
- (上接第 114 页)
- [20] 曲久辉, 刘会娟. 水处理电化学原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 209-217.
QU Jiuhui, LIU Huijuan. Electrochemical technologies in wastewater treatment: Principles and techniques[M]. Beijing: Science Press, 2007: 209-217.
- [21] 郭沛涌, 陈克诚, 刘英. 化学混凝法处理制革废水中铬的研究[J]. 工业水处理, 2008, 28(9): 37-39.
GUO Peiyong, CHEN Kecheng, LIU Ying. Study on the removal of chromium from tanning water by chemical coagulation method[J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(9): 37-39.
- [22] 宋晓乔, 刘罡, 宋少花, 等. 聚合硫酸铁对麦草浆造纸废水预处理的效果研究[J]. 应用化工, 2019, 48(8): 1866-1868.
SONG Xiaojiao, LIU Gang, SONG Shaohua, et al. Study on the pre-treatment of wheat straw pulp papermaking wastewater by PFS[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(8): 1866-1868.
- [23] 刘文龙, 钱仁渊, 包宗宏. 吹脱法处理高浓度氨氮废水[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 56-59.
LIU Wenlong, QIAN Renyuan, BAO Zonghong, et al. Treatment of high concentration ammonia-nitrogen wastewater by air stripping[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 30(4): 56-59.
- [24] 宋士丽. 新颖高效乙炔黑-PTFE 阴极制备及过氧化絮凝处理染料废水[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
SONG Shili. Preparation of a highly effective acetylene black-ptfe cathode and treatment of dye waste water by peroxi-coagulation[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- 【作者简介】 王志刚(1985—), 博士后, 电话: 027-81928255, E-mail: wangzhigang@cwcec.com. 通讯作者: 周明华, 教授, 博士生导师. E-mail: zhousmh@nankai.edu.cn.
【收稿日期】 2021-11-15(修改稿)