

响应曲面法优化 Fenton 氧化处理 印染废水的研究

郜玉楠¹, 郭晓莹^{1,2}, 张伦秋³, 肖月鹏¹

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 广州京穗勘察设计有限公司, 广东 广州 510700; 3. 辽宁石油化工大学土木工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要 目的 研究 Fenton 氧化法在处理印染废水过程中各影响因素对 COD 去除率的影响, 并对 Fenton 氧化条件进行优化。方法 针对沈阳市某印染厂废水污染现状, 利用响应曲面设计试验方法(RSM), 选择 H_2O_2 质量浓度、 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 质量浓度、反应时间作为试验因子, 建立三因素三水平响应曲面回归模型, 将 COD 去除率作为响应值进行曲面分析。结果 3 个影响因子对 COD 去除率均具有显著影响 ($P < 0.0001$), 所得回归方程 R^2 值为 0.9923, 信噪比为 33.217, 拟合结果高度显著, 可以在设计范围内对响应值进行预测; 模型预测最佳试验条件: H_2O_2 质量浓度为 305 mg/L, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 质量浓度为 480 mg/L, 反应时间为 60 min; 原水 COD 质量浓度为 1400 mg/L, 采用 Fenton 氧化处理后 COD 去除率达 95.71%。结论 H_2O_2 质量浓度与 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 质量浓度两因素对 COD 去除率影响较为明显, 响应曲面设计模型可以较好地预测 Fenton 氧化法最佳反应条件与 COD 去除率。

关键词 Fenton 氧化; 响应曲面法; 印染废水; COD

中图分类号 TU992.3; X703

文献标志码 A

Response Surface Methodology Optimization of Fenton Oxidation Treatment on Printing and Dyeing Wastewater

GAO Yu'nan¹, GUO Xiaoying^{1,2}, ZHANG Lunqiu³, XIAO Yuepeng¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Guangzhou Jingsui Survey & Design Co. Ltd., Guangzhou, China, 510700; 3. School of Civil Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, China, 113001)

Abstract: The influence of various factors on COD removal rate in the process of Fenton oxidation treatment of printing and dyeing wastewater were studied, and the Fenton oxidation conditions were

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100500-03-03)

作者简介: 郜玉楠(1981—), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事饮用水安全与保障技术方面研究。

optimized. In response to the status quo of wastewater pollution in a printing and dyeing factory in Shenyang, the dosage of H_2O_2 , the dosage of $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, and the reaction time was selected as the test factors in the response surface design test method (RSM). A 3 factor 3 level response surface regression model was established, the COD removal rate as the response value. 3 impact factors had a significant effect on the COD removal rate ($P < 0.0001$). The R^2 value was 0.9923, and the sufficient precision value is 33.217, indicating that the model is highly significant and the response value can be predicted within the design range. The best test conditions predicted by the model were as follows: H_2O_2 mass concentration $305 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ mass concentration $480 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and reaction time 60 min. The COD removal rate reached 95.71% by Fenton oxidation treatment of the raw water's COD mass concentration $1400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Mass concentration of H_2O_2 and $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ have a clear influence on COD removal rate. The optimal reaction conditions and COD removal rate of Fenton oxidation can be predicted by the response surface test model.

Key words: Fenton oxidation; response surface method; dyeing waste water; COD

随着纺织工业的发展,化学助剂和染料被广泛用于印染工艺中,但同时产生了大量的印染废水。印染废水具有生物降解性差、强毒性、成分复杂和高盐含量等水质特性,是处理较为困难的工业废水之一^[1-2]。据《2020年中国环境统计年鉴》数据统计,2019年纺织行业COD排放总量为93547t,位居我国工业行业废水污染物排放量第三位^[3-6]。废水中所含污染物大致分为两类:一类是残存下来的纤维物质;另一类是来自印染浆料的污染、油污、化学添加剂等,其中难降解的重金属离子、卤化物等物质很难通过常规的废水处理工艺完全去除,且处理周期长,COD的质量浓度不能降解到要求范围内,水质难以达到排放标准^[7]。随着我国环境保护要求和污水排放标准的提高,印染废水的处理标准也随之提高。印染废水必须经过深入的高级氧化处理,废水中污染物浓度经过高级氧化后进一步降低,因此的深度处理尤为重要^[3,8-10]。基于此,笔者以沈阳市某印染厂的印染废水为对象,研究Fenton氧化法深度处理印染废水,分析不同初始pH、 H_2O_2 剂量、 Fe^{2+} 剂量和反应时间下COD的降解效果,探寻印染废水的最佳反应条件及处理效果。

1 试验

采用Fenton氧化法处理印染废水,该工

艺具有氧化能力强、无二次污染、运行经济等优点。其反应机理是 Fe^{2+} 与 H_2O_2 链式反应,产生羟基自由基($\cdot OH$),能有效去除有机物并降解COD^[11-12],而废水中有机物种类及浓度决定 Fe^{2+} 和 H_2O_2 的配比和质量浓度。

1.1 仪器设备与药品

主要试验仪器与设备见表1,试验药品见表2。

表1 主要试验仪器与设备

Table 1 Experimental instruments and equipment

仪器名称	型号	生产厂家
电子分析天平	FA2004N	深圳精密科学仪器有限公司
化学耗氧量测定仪	HH-6	江苏江分电分析仪器有限公司
移液枪	100-1 000 μL	美国 Thermofisher 供应商
纯水系统	HKD-10	深圳市华南高科水处理设备有限公司
pH计	S20	上海器宏仪器

1.2 试验原水

沈阳市某印染厂采用传统的活性污泥法处理印染废水,试验原水取自该厂的活性污泥出水,其出水COD质量浓度为1400mg/L,不符合国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)一级A要求。

表2 试验药品

Table 2 Experiment materials

药品名称	分子式	纯度类型
硫酸亚铁	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	分析纯
过氧化氢	H_2O_2	分析纯
浓硫酸	H_2SO_4	分析纯
重铬酸钾	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	优级纯
氢氧化钠	NaOH	分析纯
钼酸胺	$\text{H}_8\text{MoN}_2\text{O}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	分析纯
硫酸铝钾	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$	分析纯
硫酸亚铁铵	$(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$	分析纯
邻菲罗啉	$\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2$	分析纯
硫酸银	Ag_2SO_4	分析纯
硫酸汞	HgSO_4	分析纯

1.3 试验方法

笔者采用 Fenton 氧化法进行试验,而 Fenton 反应在碱性条件下效果极差,因此需适当调节 pH。原始水样初始 pH 为 12,需用硫酸溶液调节 pH 至酸性,以适应 Fenton 反应的进行,试验均在室温下进行,即反应温度为 25 ℃。取 200 mL 水样倒入 250 mL 烧杯中,向烧杯中滴加 1 mol/L 的硫酸,调节水溶液为酸性,并依次添加 Fenton 试剂 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和质量分数为 30% 的 H_2O_2 ,搅拌 3 ~ 5 min,静置 60 min,滴加 NaOH 溶液进行中和至水溶液 pH 为中性,静置 60 min,取上清液进行 COD 质量浓度的检测。

2 结果与分析

单因素分析与响应曲面分析试验的 COD 去除率按公式(1)计算。

$$RR_{\text{COD}} = \frac{\rho(\text{COD}_{\text{raw}}) - \rho(\text{COD}_{\text{tr}})}{\rho(\text{COD}_{\text{raw}})} \times 100\%. \quad (1)$$

式中: RR_{COD} 为 COD 去除率,%; $\rho(\text{COD}_{\text{raw}})$ 为原水 COD 浓度,mg/L; $\rho(\text{COD}_{\text{tr}})$ 为处理后 COD 浓度,mg/L。

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 初始 pH 的影响

试验水样的初始 pH 对 COD 去除率存在一定影响。因此针对不同酸性条件下 Fenton 反应情况进行考察。取 H_2O_2 质量浓度 225 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 300 mg/L,调初始 pH 为 2.0、2.5、3.0、3.5、

4.0、4.5、5.0 时对 COD 去除率的影响,反应时间均控制在 60 min(试验结果见图 1)。

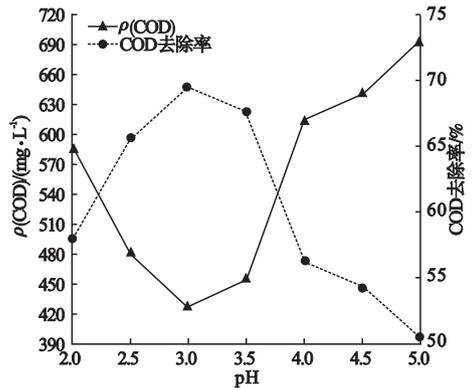


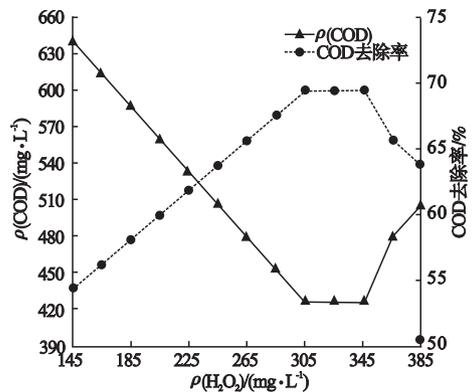
图1 初始 pH 对 COD 去除的影响

Fig. 1 Effect of initial pH on COD removal

从图 1 可以看出,COD 去除率从 pH 为 2.0 开始逐渐递增,pH 为 3.0 以后呈递减,且 pH 在 4.0 之后的 COD 降解效果不理想,初始 pH 为 2.5、3.0、3.5 时的 COD 降解效果较好。初始 pH = 3.0 时酸碱度适宜,应用到实际工程中也较为经济,因此试验适用的最佳初始 pH 设为 3.0。

2.1.2 H_2O_2 质量浓度的影响

H_2O_2 具有强氧化性,在 Fenton 反应中起着关键性作用。在调节水样初始 pH 为 3.0、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 300 mg/L 条件下,分别取 13 组不同质量浓度的 H_2O_2 进行平行试验,反应时间控制在 60 min,然后中和静置 60 min,取上清液测量反应后 COD 的质量浓度。试验结果如图 2 所示。

图2 H_2O_2 对 COD 去除的影响Fig. 2 Effect of initial H_2O_2 concentration on COD removal

从图2可以看出,随着 H_2O_2 质量浓度的增加,COD浓度逐渐降低, H_2O_2 质量浓度为305 mg/L时,COD去除率达到最高,为69.52%。COD去除率与 H_2O_2 质量浓度并非呈正比, H_2O_2 质量浓度超过345 mg/L时,COD去除率降低,这是因为过量 H_2O_2 导致副反应生成氧化能力较弱的 HO_2^- ^[13]。当 H_2O_2 质量浓度控制在305~345 mg/L时,COD去除率最高,并趋于稳定,综合考虑, H_2O_2 质量浓度为305 mg/L最适宜。

2.1.3 Fe^{2+} 质量浓度的影响

Fe^{2+} 作为Fenton氧化反应的关键药剂,影响COD的降解效率。初始pH调节为3.0, H_2O_2 质量浓度为305 mg/L,分别取不同质量浓度的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液进行11组平行试验,反应时间60 min,然后中和静置60 min,每组试验对COD的降解影响结果如图3所示。从图3可以看出,随着 Fe^{2+} 质量浓度逐渐增加,COD的质量浓度先降低后增大, Fe^{2+} 质量浓度增加到540 mg/L时,COD去除率最高,为92.38%。COD去除率与 Fe^{2+} 质量浓度不完全是线性关系,当 Fe^{2+} 质量浓度超过540 mg/L时,COD去除率反而下降,这是由于过量的 Fe^{2+} 与生成的 $\cdot\text{OH}$ 发生反应, $\cdot\text{OH}$ 还未接触到有机物就被消耗掉,导致 $\cdot\text{OH}$ 在反应体系中严重不足,影响了

Fenton反应的氧化能力^[14]。考虑到 Fe^{2+} 过量会导致污泥积聚,当 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为480 mg/L时,COD去除率为90.48%,满足要求,因此,取480 mg/L为 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的适宜质量浓度。

2.1.4 反应时间的影响

反应时间是Fenton氧化反应重要的影响因素之一。初始pH调节至3.0, H_2O_2 质量浓度为305 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 浓度为480 mg/L,进行11组不同反应时间平行试验,反应时间对COD去除的影响如图4所示。反应时间从30 min到60 min期间,COD的质量浓度快速下降,反应时间60~80 min时,COD的质量浓度趋于稳定,COD去除率达94.29%,为减少能源消耗,取反应时间60 min为最佳。

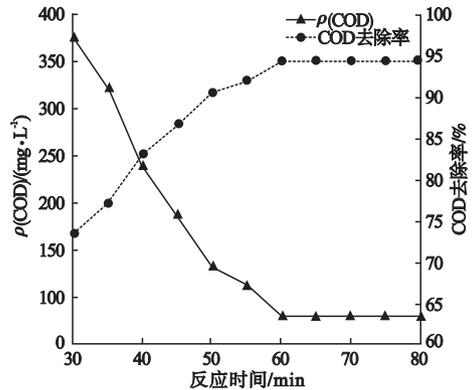


图4 反应时间对COD去除的影响

Fig. 4 Effect of reaction time on COD removal

2.2 Fenton氧化印染废水的响应曲面分析

2.2.1 试验方案设计及COD去除效果研究

通过单因素分析对Fenton试验条件的影响情况研究得到最佳试验条件:初始pH=3.0、 H_2O_2 质量浓度为305 mg/L、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为480 mg/L、反应时间为60 min。由于初始pH对试验影响不大,因此,只选取其他3个因素, H_2O_2 质量浓度(A)、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度(B),反应时间(C)作为影响因素,选取最佳试验条件附近的两个试验点为试验值,三因素三水平试验如表3所示。

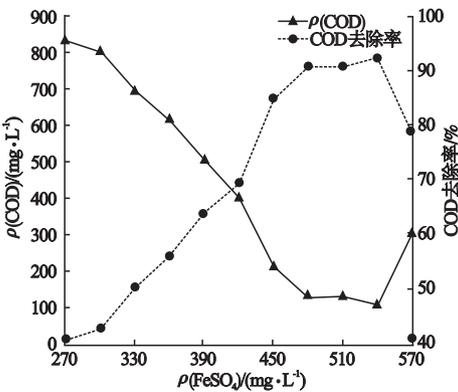


图3 FeSO_4 对COD去除的影响

Fig. 3 Effect of initial Fe^{2+} concentration on COD removal

表3 试验因素与水平

Table 3 Test factors and levels

水平	A/(mg·L ⁻¹)	B/(mg·L ⁻¹)	C/min
-1	285	450	55
0	305	480	60
1	325	510	65

根据表3 试验因素与水平,采用 Box-Behnken-Design (BBD) 试验,设计 17 组试验方案,并通过 Fenton 试验得到 17 组方案的 COD 去除率 Y_1 和对照的预测 COD 去除率 Y_2 (见表4)。

表4 试验方案及试验结果

Table 4 Test plan and results

试验序号	A/(mg·L ⁻¹)	B/(mg·L ⁻¹)	C/min	Y_1 /%	Y_2 /%
1	305	450	65	92.34	92.49
2	325	480	65	93.33	93.50
3	325	510	60	93.76	93.59
4	285	480	65	92.43	92.12
5	285	480	55	89.52	89.34
6	305	480	60	96.19	96.19
7	285	510	60	93.33	93.67
8	325	450	60	92.46	92.13
9	305	450	55	86.67	86.67
10	305	510	55	92.38	92.23
11	305	480	60	95.71	96.19
12	305	480	60	96.21	96.19
13	305	510	65	92.38	92.37
14	325	480	55	90.00	90.32
15	305	480	60	96.58	96.19
16	305	480	60	96.27	96.19
17	285	450	60	89.52	89.69

2.2.2 回归方程结果分析

利用 Design Expert 8.0.6.1 软件,在方程的拟合运算中选用表4 作为无交互作用的观测样本,对所得结果进行多元回归拟合。根据最小二乘法估计相应的系数,分别除去系数不显著的变量,得到多元二次多项式拟合 A、B、C 和 Y_2 之间的函数关系,获得关于 Y_2 的响应值曲面模型。

$$Y_2 = 96.19 + 0.59A + 1.36B + 1.49C - 0.63AB + 0.1AC - 1.42BC - 1.77A^2 - 2.15B^2 - 3.1C^2. \quad (2)$$

模型的拟合度是通过方程的决定系数 R^2 (见表5) 和回归方程的方差分析(见表6)

进行评判。回归方程的显著性水平和各项因子的影响通过方差分析来进行检验,并由做出的等高线图分析各个因素对 COD 去除率的影响和各个因素间的相互影响。

表5 决定系数 R^2 值Table 5 Coefficient R^2 value

R^2 值	预测 R^2 值	足够精度/%
0.992 3	0.982 4	33.217

表6 回归方程的方差分析

Table 6 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	126.05	9	14.01	100.44	<0.000 1
A	2.82	1	2.82	20.23	0.002 8
B	14.74	1	14.74	105.72	<0.000 1
C	17.73	1	17.73	127.16	<0.000 1
AB	1.58	1	1.58	11.30	0.012 1
AC	0.044	1	0.044	0.32	0.591 4
BC	8.04	1	8.04	57.64	0.000 1
A ²	13.24	1	13.24	94.97	<0.000 1
B ²	19.48	1	19.48	139.71	<0.000 1
C ²	40.42	1	40.42	289.90	<0.000 1
残差	0.98	7	0.14	—	—
失拟项	0.59	3	0.20	2.01	0.255 0
纯误差	0.39	4	0.097	—	—
总和	127.02	16	—	—	—

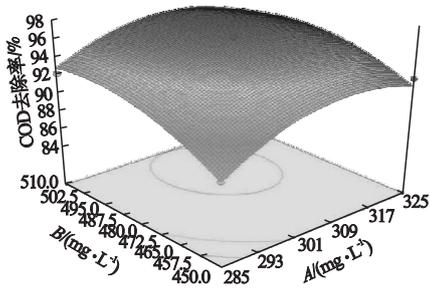
表6 中, F 值表示均方差与实际误差之比, F 值越高, P 值越小, 相关性越高, P 值反映了模型的显著性, $P < 0.1$, $P < 0.05$, $P < 0.01$ 表明模型水平差异具有统计学意义。对二次回归模型进行显著性分析, 由表6 可知, 自变量 A、B 和 C 均对 COD 的去除率有显著影响; AB、AC、BC 的 P 值均较低, 表明 H_2O_2 和 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 的质量浓度与反应时间之间存在交互作用且具有较强的显著影响, B^2 和 C^2 对 COD 去除率的曲面效应均表现为极显著。根据方差分析可得, 模型 F 值 100.44, P 值小于 0.000 1, 因此, 该模型已达到显著水平, 在整体研究区间内具有很高的良好拟合度, 比较真实地反映各影响因子对 COD 去除率的影响, 结果表明该模型具有较高的可信度和精研度, 试验足够信噪比为 $33.217 > 4$, 视为合理, 说明该模型对数据有

准确的预测能力。

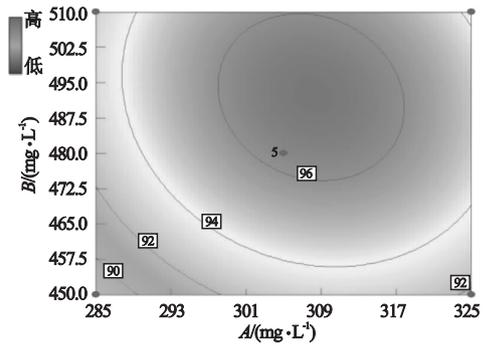
2.2.3 COD去除率的响应曲面分析

图5为反应时间60 min, H₂O₂质量浓度和 FeSO₄·7H₂O质量浓度对COD去除率的影响。由图5可知,当H₂O₂质量浓度低于293 mg/L或高于325 mg/L时,COD去除率偏低并且受到FeSO₄·7H₂O质量浓度的变化影响较小,301~317 mg/L为H₂O₂最佳质量浓度范围。当H₂O₂质量浓度在309 mg/L附近时,COD去除率随着FeSO₄·7H₂O质量

浓度的增大而逐渐升高,范围在472.5~510 mg/L内COD降解效果最好,当FeSO₄·7H₂O质量浓度取457.5~472.5 mg/L时COD去除率有明显的增高趋势,且COD去除率在短时间内快速增长,在480 mg/L后COD去除率变化速度逐渐减慢但仍持续增加。这是由于在Fe²⁺量一定的情况下,增加H₂O₂质量浓度,利于分解出更多的OH·,促进有机污染物的分解;当H₂O₂质量浓度过高时,部分H₂O₂发生无效分解,生成O₂,不利于反应的进行^[18]。



(a)响应曲面图



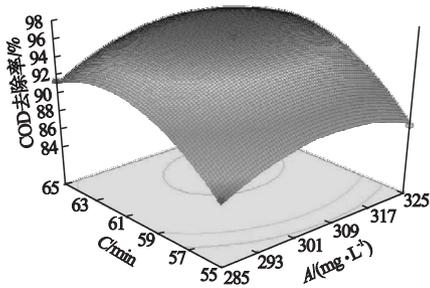
(b)等高线图

图5 H₂O₂质量浓度和FeSO₄·7H₂O质量浓度对COD去除率的影响

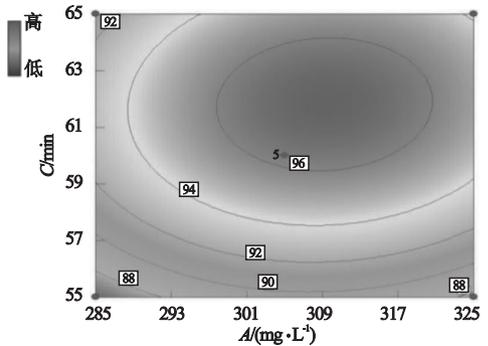
Fig. 5 Effect of H₂O₂ mass concentration and FeSO₄·7H₂O mass concentration on COD removal rate

图6为FeSO₄·7H₂O质量浓度为480 mg/L, H₂O₂质量浓度和反应时间对COD去除率影响。由图6可知,COD去除率随着H₂O₂质量浓度的增加而逐渐增大,在299 mg/L前增长速率较快,在299 mg/L后COD去除率变化速度开始缓慢,且受反应时间的影响较为明显,H₂O₂质量浓度取

299~321 mg/L时COD去除效果最佳。H₂O₂质量浓度在309 mg/L附近时,反应时间在60~64 min COD去除率最高,当反应时间超过64 min时COD去除率反而开始下降,这说明Fenton反应降解有机物是一个十分迅速的过程,反应初期,Fe²⁺催化H₂O₂快速分解出OH·,对有机物进行降解,而反应



(a)响应曲面图



(b)等高线图

图6 H₂O₂质量浓度和反应时间对COD去除率的影响

Fig. 6 Effect of H₂O₂ mass concentration and reaction time on COD removal rate

后期,主要以铁离子的絮凝作用为主^[19]。

图7为 H_2O_2 质量浓度 305 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度和反应时间对 COD 去除率影响。由图7可知,反应时间在 61 min 时,随着 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度的提高 COD 去除率逐渐增大,当 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质

量浓度超过 510 mg/L 时,COD 去除率开始下降, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度取 469 ~ 510 mg/L 最佳。当 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度在 490 mg/L 左右时,反应时间 59 ~ 64 min, COD 去除率最高,当反应时间超过 64 min 时 COD 去除率反而开始下降。

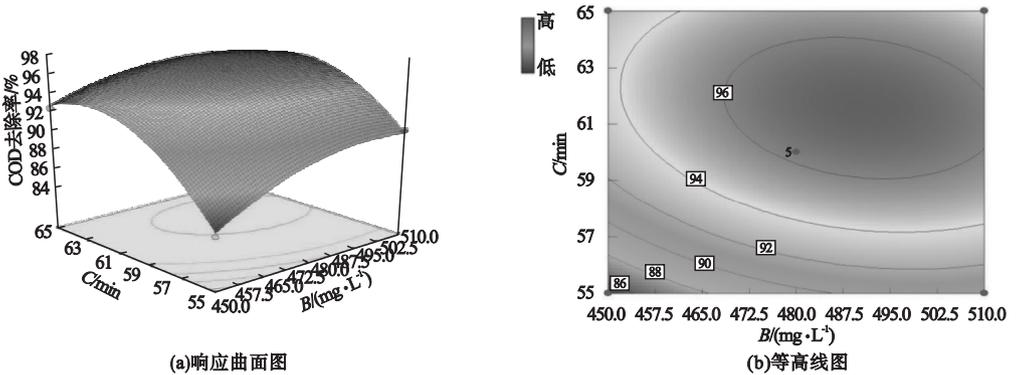


图7 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度和反应时间对 COD 去除率的影响

Fig. 7 Effect of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ mass and reaction time on COD removal rate

2.2.4 最佳试验条件及验证试验

由图5~图7分析总结得出,Fenton 氧化各影响因素的最佳取值范围: H_2O_2 质量浓度为 299 ~ 321 mg/L、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 469 ~ 510 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、反应时间 59 ~ 64 min。

Y_2 最高为 96.19%, 所对应的最佳 Fenton 氧化条件: H_2O_2 质量浓度为 305 mg/L、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 480 mg/L、反应时间为 60 min。利用上述得到的最佳氧化条件再次进行 Fenton 试验验证得 Y_1 为 95.71%, 此时,处理后的水 COD 质量浓度为 66.67 mg/L, 与模型预测值相差不大。模型预测结果说明回归方程能较真实地反映各影响因子对 COD 去除率的影响, 试验值与预测值拟合度良好, 该模型拟合结果显著。因此, 利用 BBD 试验建立的响应曲面模型能找到 Fenton 氧化得最佳反应条件。

3 结论

(1) 利用单因素试验, 得到各影响因素的最佳试验条件为: 初始 pH3.0, H_2O_2 质量浓度 305 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度

480 mg/L, 反应时间 60 min, COD 去除率为 94.29%。

(2) 采用 BBD 响应曲面法的模型设计进行试验, 得到显著有效的回归模型, 所得回归方程 R^2 值为 0.9923, $P < 0.0001$, 足够精度值为 33.217, 说明模型高度显著, 利用此模型可预测出处理后 COD 去除率为 96.19%。

(3) 对 COD 去除率影响较为明显的为 H_2O_2 质量浓度与 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度两因素, 响应曲面试验模型具有较高的可信度和精研度, 能比较真实地反映各因素对 COD 去除率的影响。

参考文献

- [1] 袁茂彪, 马雄风, 王书萍, 等. 絮凝—微波辐射—Fenton 试剂氧化法深度处理焦化废水 [J]. 化工环保, 2013, 33(6): 513-517. (YUAN Maobiao, MA Xiongfeng, WANG Shuping, et al. Advanced treatment of coking wastewater by flocculation-microwave irradiation-Fenton reagent oxidation [J]. Environmental protection of chemical industry, 2013, 33(6): 513-517.)
- [2] 陈晓燕, 曾森, 武小鹰. 铁炭微电解/Fenton/臭氧用于印染废水处理的研究 [J]. 工业水处

- 理,2016,36(11):82-84.
(CHEN Xiaoyan,ZENG Miao,WU Xiaoying. Study on the Fe-C micro-electrolysis/Fenton/ozone processes used for the treatment of printing & dyeing wastewater [J]. *Industrial water treatment*,2016,36(11):82-84.)
- [3] 王纯,王文龙,刘鑫,等. 印染废水处理过程中有机污染物及急性毒性变化规律研究[J]. *环境科学学报*,2019,39(10):3434-3441.
(WANG Chun,WANG Wenlong,LIU Xin, et al. Study on the removal of organic pollutants and acute toxicity variation in the process of dyeing wastewater treatment [J]. *Acta scientiae circumstantiae*,2019,39(10):3434-3441.)
- [4] KHAN S,MALIK A. Toxicity evaluation of textile effluents and role of native soil bacterium in biodegradation of a textile dye [J]. *Environmental science and pollution research*,2018,25(5):1-13.
- [5] TABRIZI M T F,GLASSER D,HILDEBRANDT D. Wastewater treatment of reactive dyestuffs by ozonation in a semi-batch reactor [J]. *Chemical engineering journal*,2011,166(2):662-668.
- [6] 杜梅梅. 印染废水及其处理技术应用现状概述[J]. *广东化工*,2022,49(15):155-157.
(DU Meimei. Overview of printing and dyeing wastewater and its treatment technology application status [J]. *Guangdong chemical industry*,2022,49(15):155-157.)
- [7] 张宇峰,滕洁,张雪英,等. 印染废水处理技术的研究进展[J]. *工业水处理*,2003,23(4):23-27.
(ZHANG Yufeng,TENG Jie,ZHANG Xueying, et al. Progress of the researches on dyeing wastewater treatment techniques [J]. *Industrial water treatment*,2003,23(4):23-27.)
- [8] 卢徐节,孙芮,柳林,等. 水解酸化/接触氧化/生物滤池工艺处理针织印染废水[J]. *中国给水排水*,2008,24(22):60-62.
(LU Xujie,SUN Rui,LIU Lin, et al. Hydrolysis acidification/contact oxidation/biofilter process for treatment of knitting printing and dyeing wastewater [J]. *China water & wastewater*,2008,24(22):60-62.)
- [9] 王利平,蔡华,陈毅忠,等. Fenton 试剂深度处理印染废水的研究[J]. *中国给水排水*,2010,26(7):90-92.
(WANG Liping,CAI Hua,CHEN Yizhong, et al. Advanced treatment of printing and dyeing wastewater by Fenton reagent [J]. *China water & wastewater*,2010,26(7):90-92.)
- [10] 龚小芝,邱小云,赵辉,等. 缺氧—好氧—催化臭氧氧化工艺处理石化厂含盐废水[J]. *化工环保*,2015,35(3):284-287.
(GONG Xiaozhi,QIU Xiaoyun,ZHAO Hui, et al. Treatment of salty wastewater in petrochemical plant by A/O-catalytic ozone oxidation process [J]. *Environmental protection of chemical industry*,2015,35(3):284-287.)
- [11] 张晓东,李乐,赵磊,等. Fenton 试剂-混凝法处理印染废水研究[J]. *工业用水与废水*,2019,50(2):23-27.
(ZHANG Xiaodong,LI Le,ZHAO Lei, et al. Treatment of printing and dyeing wastewater by Fenton reagent-coagulation [J]. *Industrial water & wastewater*,2019,50(2):23-27.)
- [12] SHEHAB A,MAHA A,AGHAREED M. Photocatalytic performance and photodegradation kinetics of Fenton-like process based on haematite nanocrystals for basic dye removal [J]. *SN applied sciences*,2019,1(3):606-612.
- [13] 李文军,胡翔,康灵玲,等. Fenton 试剂催化氧化法处理模拟酸性红 B 染料废水[J]. *化工环保*,2012,32(5):393-396.
(LI Wenjun,HU Xiang,KANG Lingling, et al. Treatment of simulated dye wastewater containing acid red B by catalytic oxidation with Fenton reagent [J]. *Environmental protection of chemical industry*,2012,32(5):393-396.)
- [14] BHATTACHARJEEY S,SHAH T. Mechanisms for advanced photo oxidation of aqueous organic waste compounds [J]. *Reviews in chemical engineering*,1998,14(1):1-46.
- [15] YE Zhilong,CHEN Shaohua,WANG Shumei, et al. Phosphorus recovery from synthetic swine wastewater by chemical precipitation using response surface methodology [J]. *Journal of hazardous materials*,2010,176(1/2/3):1083-1088.
- [16] KANAN Y,SEVGI D,ROBERT J. Response surface modeling of Pb(II) removal from aqueous solution by Pistacia vera L: Box-Behnken experimental design [J]. *Journal of hazardous materials*,2009,171(1/2/3):551-562.
- [17] 魏炜,孙泊洋,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.)
- [18] BOKARE A D,CHOI W. Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes [J]. *Journal of hazardous materials*,2014,275(30):121-135.
- [19] 陈南雄. 芬顿法脱除锰电解液中残余有机物的研究[D]. 南宁:广西大学,2016.
(CHEN Nanxiong. Study on the residual organics removal from manganese electrochemical solution by Fenton process [D]. Nanning: Guangxi University,2016.)
(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)