

光电 Fenton 氧化法处理染料废水的试验

班福忱,戴美月

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究光电 Fenton 氧化法处理染料废水的脱色效果,确定处理染料废水的最佳工艺条件.方法 在自制的电化学反应器中,通过光电 Fenton 氧化法处理染料废水试验,确定初始 pH 值、槽电压、曝气量、 Fe^{2+} 投加量和支持电解质投加量对染料脱色效果的影响;通过 Design Expert 软件建立数学模型,最终拟合最优反应条件,应用响应曲面分析法模拟分析初始 pH 值、槽电压和曝气量 3 个因素在染料废水脱色过程中的显著性和交互性.结果 响应曲面分析法确定的最佳脱色工艺条件为:pH 值 4.25、槽电压 15.73 V、曝气量 0.25 L/min,在此条件下,脱色率为 97.186 9%;各因素对体系脱色效果影响大小为:pH 值 > 槽电压 > 曝气量;各因素交互作用对体系脱色效果影响大小为:槽电压 & pH 值 > pH 值 & 曝气量 > 槽电压 & 曝气量.结论 光电 Fenton 氧化法处理染料废水的脱色效果较好.

关键词 光电 Fenton 氧化;染料废水;脱色;响应曲面分析法

中图分类号 X703

文献标志码 A

The Experimental Study on the Treatment of Dye Wastewater by the Photoelectric Fenton Oxidation

BAN Fuchen, DAI Meiyue

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

Abstract: To study the decoloration effect of dye wastewater by the Photoelectric Fenton oxidation process, the optimum technological conditions were determined. In the self-made electrochemical reactor, the treatment of dye wastewater by photo Fenton oxidation process was used. The model was established by Expert Design software, and the optimal reaction conditions were fitted and the mathematical model was established. And the significance and interaction of the 3 factors in the process of decolorization of the dye wastewater by the factors of the response surface analysis method, the initial pH value, the tank voltage and the aeration rate. Response surface methodology was used to determine the optimal decolorization conditions: pH 4.25, cell voltage 15.73 V, aera-

收稿日期:2016-04-25

基金项目:国家水体污染重大专项治理项目(2014ZX07202-0114);辽宁省自然科学基金优秀人才培养项目(2014020073);沈阳建筑大学学科涵育项目(XKHY-35);沈阳建筑大学科技项目(2014043)

作者简介:班福忱(1976—),男,副教授,主要从事电化学水处理技术研究.

tion rate 0.25 L/min, and the decolorization rate was 97.1869%. Effect of various factors on decoloration system is: pH > slot voltage > air; Effect of the interaction between various factors on decolorizing is: bath voltage & pH > pH & air > cell voltage & air. The results showed that the decoloration effect of dye wastewater by the Photoelectric Fenton oxidation process was good.

Key words: pHotoelectric Fenton oxidation; dye wastewater; decoloration; response surface method

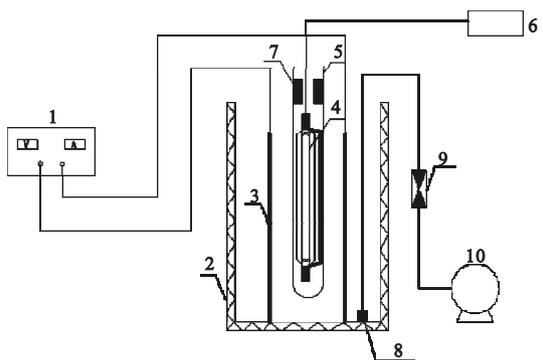
随着染料制备加工业的飞速发展,全球每年向自然界排放的染料污染物大约占其生产总量的15%,已经成为全球主要环境污染源之一^[1]。染料废水具有色度高、成分复杂、可生化性差等特点,大多数染料化学稳定性极强,对人类具有致癌性、致畸性和致基因突变特性,危害人类身体健康。染料废水还能严重污染水体、土壤,破坏生态环境。染料废水常规处理方法有物理法^[2-5]、化学法^[6-8]与生物法^[9-11],但是这些方法容易造成二次污染,废水处理费用较高,操作往往比较复杂^[12]。

光电 Fenton 技术是在电 Fenton 体系中引入紫外光或者可见光,协同催化有机物的降解。紫外光照射加速·OH 的产生,并且紫外光能够促进 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 的转化^[13],紫外光和 Fe^{2+} 对 H_2O_2 的催化分解存在协同效应, H_2O_2 的分解速率远大于 Fe^{2+} 或紫外光催化分解速率的简单加和。光电 Fenton 技术降解污染物具有设备简单、高效、低能耗、无二次污染等优点^[14-15],近年来受到国内外研究人员的广泛关注。笔者以酸性大红染料模拟废水为研究对象,采用光电 Fenton 氧化法进行处理,应用响应曲面分析法^[16-19]进行模拟分析,进而探讨其最佳工艺条件,为优化染料废水治理工艺技术提供参考。

1 试验装置

试验采用自制反应器,试验装置如图1所示。电解槽由有机玻璃粘合制成,长宽高为 10 cm × 14 cm × 14 cm,有效容积为 1 500 mL,极板间距为 5 cm,极板长宽为 10 cm × 12 cm。曝气系统主要由空气压缩

机、曝气头、橡胶管、转子流量计组成。通过调节转子流量计来控制曝气量的大小。反应器外加光源为 80 W 紫外线高压汞灯,波长为 365 nm,由铁架台及万能夹固定。



1.直流稳压电源;2.电解槽;3.电极;4.紫外线高压汞灯;5.石英灯管;6.汞灯电源;7.万能夹;8.曝气头;9.流量计;10.空气压缩机。

图1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of test device

2 光电 Fenton 氧化法处理染料废水的影响因素

2.1 试验方法

选取酸性大红染料废水溶液初始 pH 值、槽电压、曝气量、 Fe^{2+} 投加量和支持电解质投加量 5 个影响因素,每次选定一个因子变化,其他因子不变进行单因素试验,初步确定反应最佳值。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 pH 值对染料脱色效果的影响

试验反应条件:酸性大红染料进水质量浓度为 200 mg/L,槽电压为 20 V,曝气量为 0.25 L/min,支持电解质投加量为 2 000 mg/L, Fe^{2+} 投加量为 1 mmol/L。试验在 pH 值为 2.5、3、4、5、6 的条件下进行,pH 值对体系脱色率的影响如图 2 所示。

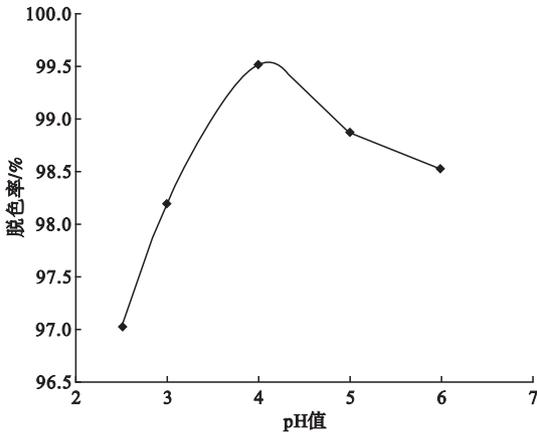


图2 pH值对体系脱色率的影响

Fig. 2 The influence of pH value on decolorization rate

从图2可以看出,pH值对体系脱色率的影响存在最佳值.当pH值低于4时,随着pH值的降低,染料废水的脱色率逐渐降低,过强的酸性加速了 H_2O_2 的分解,与 Fe^{2+} 生成Fenton试剂的 H_2O_2 减少,反应速率降低;当pH值大于4时,染料废水的脱色率随着pH值的增大而降低,过高的pH值既减少了阴极表面产生 H_2O_2 的活性点位,又形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀,使Fenton反应的铁离子催化剂减少,从而抑制了反应的进行.当pH值为4时,酸性大红染料废水的脱色率最大,达到99.48%.

2.2.2 槽电压对染料脱色效果的影响

试验反应条件:酸性大红染料进水质量浓度为200 mg/L,曝气量为0.25 L/min,pH值为4.0,支持电解质投加量为2 000 mg/L, Fe^{2+} 投加量为1 mmol/L.试验分别在5 V、10 V、15 V、20 V和25 V的条件下进行,槽电压对体系脱色率的影响如图3所示.

从图3可以看出,在一定槽电压范围内,随着槽电压的增大,染料废水的脱色率逐渐增大.槽电压从5 V到25 V,脱色率几乎呈直线上升,另外,随着槽电压的不断增加,能耗明显增大,反应器温度急速上升.在不同的槽电压下, O_2 在阴极还原产生 H_2O_2 的量不同,槽电压越大,产生的 H_2O_2 越多,因而生成

的 $\cdot\text{OH}$ 也越多,反应的降解效率相对提高.

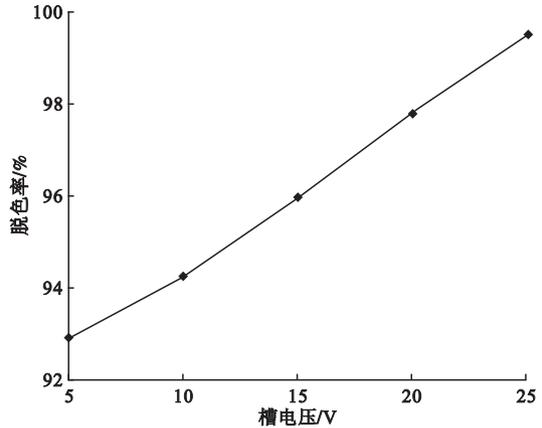


图3 槽电压对体系脱色率的影响

Fig. 3 The influence of the voltage on the decolorization rate

2.2.3 曝气量对染料脱色效果的影响

试验反应条件:酸性大红染料进水质量浓度为200 mg/L,槽电压为20V,pH值为4.0,支持电解质投加量为2 000 mg/L, Fe^{2+} 投加量为1 mmol/L.试验在曝气速度为0.25 L/min、0.5 L/min、1.0 L/min、2.0 L/min及2.5 L/min条件下进行,曝气量对体系脱色率的影响如图4所示.

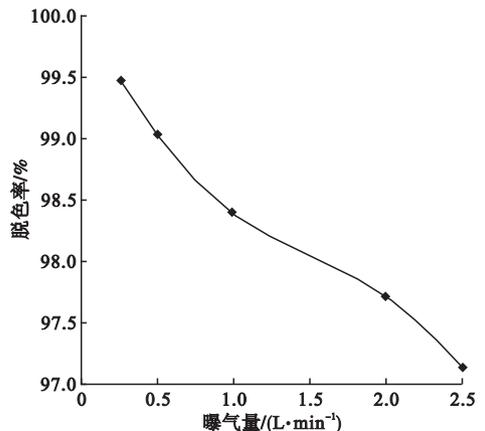


图4 曝气量对体系脱色率的影响

Fig. 4 The influence of aeration on the decolorization rate

从图4可以看出,随着曝气量的增大,染料废水的脱色率逐渐降低.在0.25 L/min曝气量时,酸性大红染料废水的脱色率最大,高达99.48%.曝气量过大,氧气在溶液中饱

和,过量的氧气会氧化 Fe^{2+} 生成 Fe^{3+} ,不利于 Fenton 反应的进行. 而若曝气量不足则无法提供反应所需的氧气,导致 H_2O_2 的生成量不足,抑制反应的进行,处理效率降低. 所以,综合考虑本试验的最佳曝气量为 0.25 L/min.

2.2.4 投加量对染料脱色效果的影响

试验反应条件:酸性大红染料进水质量浓度为 200 mg/L,槽电压为 20V,曝气量为 0.25 L/min, pH 值为 4.0,支持电解质投加量为 2 000 mg/L. 试验在 Fe^{2+} 浓度分别为 1 mmol/L、2 mmol/L、4 mmol/L、6 mmol/L 及 8 mmol/L 的条件下进行, Fe^{2+} 投加量对体系脱色率的影响如图 5 所示.

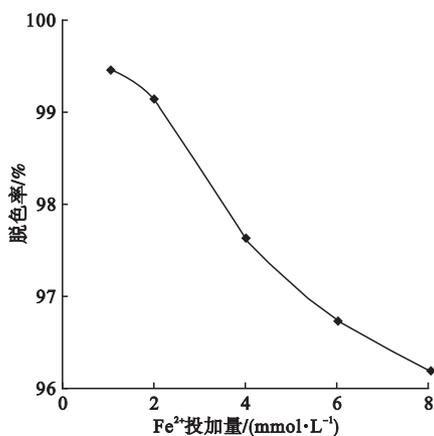


图 5 Fe^{2+} 投加量对体系脱色率的影响

Fig. 5 The influence of Fe^{2+} dosing quantity on decolorization rate

从图 5 可以看出,随着 Fe^{2+} 投加量的增加,染料废水的脱色率逐渐下降. 当 Fe^{2+} 投加量从 1 mmol/L 到 2 mmol/L 是,脱色率由 99.48% 下降到 99.13%,下降的比较缓慢,再增加 Fe^{2+} 投加量时,脱色率急剧下降. 由于 Fe^{2+} 浓度过高时,会与生成的 $\cdot\text{OH}$ 发生反应,消耗一部分 $\cdot\text{OH}$,导致降解速率降低.

2.2.5 支持电解质投加量对染料脱色效果的影响

试验反应条件:酸性大红染料进水质量浓度为 200 mg/L,槽电压为 20V,曝气量为

0.25L/min, pH 值为 4.0, Fe^{2+} 投加量为 1 mmol/L. 试验在支持电解质质量浓度分别为 1 000 mg/L、2 000 mg/L、4 000 mg/L、6 000 mg/L、8 000 mg/L 支持电解质的条件下进行,支持电解质投加量对体系脱色率的影响如图 6 所示.

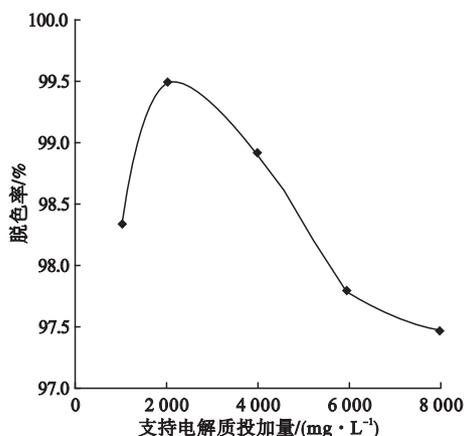


图 6 支持电解质投加量对体系脱色率的影响

Fig. 6 The influence of the concentration of supporting electrolyte on the decolorization rate

从图 6 可以看出,支持电解质投加量对体系脱色率的影响存在最佳值. 当支持电解质质量浓度为 2 000 mg/L 时,染料废水的脱色率最大,达到 99.48%. 当支持电解质质量浓度小于 2 000 mg/L 时,染料废水的脱色率随着支持电解质质量浓度的减小而降低,投加电解质浓度过低,溶液电导率低,不利于反应顺利进行;当支持电解质浓度大于 2 000 mg/L 时,染料废水的脱色率随支持电解质浓度的增大而降低.

3 响应曲面分析法对光电 Fenton 氧化法处理酸性大红模拟染料废水的优化

近几年对于电化学反应体系影响因素的研究中,多数都是通过单因素试验外加正交试验分析确定最佳反应条件,这些方法不能很好地反应各种影响因素之间的相互影响,得到的最佳反应条件也很模糊. 响应曲面分

析法是最近被运用较为广泛的一种数据处理手段,该方法主要通过数学和统计相结合的方法,应用软件分析^[20],确定显示最优区间,通过建立优化区间的模型,分析因素之间的相互作用结果,最终找到响应的优化值.通过单因素试验对光电 Fenton 氧化法处理酸性大红模拟染料废水的过程中起主要影响因素进行了初步摸索,分析研究单因素试验中脱色率随各因素的变化趋势,发现脱色率随槽电压、曝气量、pH 值 3 个的变化而变化的趋势比较明显,从而最终确定了槽电压、曝气量、pH 值 3 个关键因素为影响脱色率的主要要素.笔者应用响应曲面法处理这 3 个因素,并对该 3 个因素进行显著性分析,通过 Design Expert 软件建立模型,最终拟合最优反应条件.

3.1 试验方法

通过分析光电 Fenton 氧化法处理酸性大红模拟染料废水的几个单因素可知,酸性大红的脱色率主要因素取决于槽电压、曝气量、pH 值,分别记为变量 A 、 B 、 C . 各变量取值范围分别为槽电压 5 ~ 25V、曝气量 0.25 ~ 2.5 L/min、pH 值 2.5 ~ 6,脱色率设为响应值,以符号 R 表示. Design - Expert 软件中常用的试验设计方法有 Plackett - Burman (PB)、Central Composite Design (CCD)、Box - Behnken Design (BBD). 笔者采用 BBD 法优化试验设计. 根据 BBD 法,设计 3 个影响因素、一个因变量,共 17 个试验的试验方案. 设计因素编码与水平如表 1 所示. 响应曲向试验设计及结果如表 2 所示.

表 1 设计因素编码与水平

Table 1 Coding and level design factors

水平	因素		
	A/V	$B/(L \cdot \min^{-1})$	C
-1	5	0.25	2.5
0	15	1.38	4.25
1	25	2.5	6

表 2 响应曲面试验设计及结果

Table 2 Response surface experimental design and results

序号	A/V	$B/(L \cdot \min^{-1})$	C	$R/\%$
1	25	1.38	2.5	84.06
2	5	0.25	4.25	93.01
3	15	2.5	6	90.04
4	15	1.38	4.25	96.21
5	15	0.25	6	87.25
6	25	2.5	4.25	89.31
7	15	2.5	2.5	83.79
8	15	1.38	4.25	96.33
9	15	0.25	2.5	93.36
10	15	1.38	4.25	96.45
11	25	1.38	6	90.52
12	15	1.38	4.25	96.35
13	25	0.25	4.25	92.14
14	5	1.38	2.5	80.16
15	15	1.38	4.25	96.36
16	5	1.38	6	85.59
17	5	2.5	4.25	88.67

3.2 建立脱色率模型及显著性检验

运用 Design - Expert 软件,经过数据回归分析得到多元二次回归方程:

$$Y = f(A, B, C) = 96.34 + 1.08A - 1.74B + 1.50C + 0.38AB + 0.26AC + 3.09BC - 4.54A^2 - 1.01B^2 - 6.71C^2. \quad (1)$$

式中: Y 为酸性大红的脱色率.

对多元二次回归方程进行的方差分析如表 3 所示. F 值是描述每一个变量之间的交互显著性,也表示变量之间的交换关系. F 值越大,因素对响应值影响越显著. P 值如果大于 0.1,说明该因素对响应值影响不显著; P 值如果小于 0.05,说明该因素对响应值影响显著; P 值如果小于 0.01,说明对应的因素对响应值影响极为显著^[21].

模型检测报告显示该模型通过显著性检测,说明这种试验方法是可靠的, P 值为 $0.0022 < 0.05$ 表示回归方程描述各因子与响应值之间的非线性方程关系是显著的.

表 3 响应曲面二次模型方差分析表

Table 3 Analysis of variance for response surface quadratic model

项目	方差和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
常数项	393.15	9	43.68	11.09	0.002 2	显著
A	9.25	1	9.25	2.35	0.169 3	不显著
B	24.33	1	24.33	6.18	0.041 9	显著
C	18.09	1	18.09	4.59	0.069 3	不显著
AB	0.57	1	0.57	0.14	0.714 9	不显著
AC	0.27	1	0.27	0.067	0.802 7	不显著
BC	38.19	1	38.19	9.70	0.017 0	显著
A ²	86.88	1	86.88	22.06	0.002 2	显著
B ²	4.34	1	4.34	1.10	0.328 8	不显著
C ²	189.86	1	189.86	48.21	0.000 2	显著
残差	27.57	7	3.94			
失拟项	27.54	3	9.18	1 240.42	<0.000 1	显著
纯误差	0.030	4	7.4×10^{-3}			
总离差	420.72	16				

由表 3 可知, A、C、AB、AC、B² 5 项的 P 值的值均大于 0.05, 不显著, 所以剔除. 将编码自变量的二次多项回归方程转换成真实自变量的二次多项回归方程为

$$\text{脱色率} = 52.667 15 - 6.518 38 \times \text{曝气量} + 1.569 52 \times \text{曝气量} \times \text{pH 值} - 0.045 425 \times (\text{槽电压})^2 - 2.192 65 \times (\text{pH 值})^2. \quad (2)$$

3.3 双因子交互效应分析

二次模型描述了染料脱色率在整个试验空间内的变化规律, 为了更直观地反应各影响因素对响应值的影响, 根据二次模型可以画出三维响应面. 通过图形不仅可以预测各影响因素不同取值时的响应值, 而且还可以用来分析各影响因素及其交互作用对响应值的影响.

运用回归方程式: 脱色率 = $52.667 15 - 6.518 38 \times \text{曝气量} + 1.569 52 \times \text{曝气量} \times \text{pH 值} - 0.045 425 \times (\text{槽电压})^2 - 2.192 65 \times (\text{pH 值})^2$, 根据表 3 响应曲面二次模型方差分析数据, 绘制出三维响应面曲线图, 确定不同因素之间对脱色率的影响.

图 7 是 pH 为 4.25, 槽电压和曝气量之

间交互作用对酸性大红染料脱色率的影响.

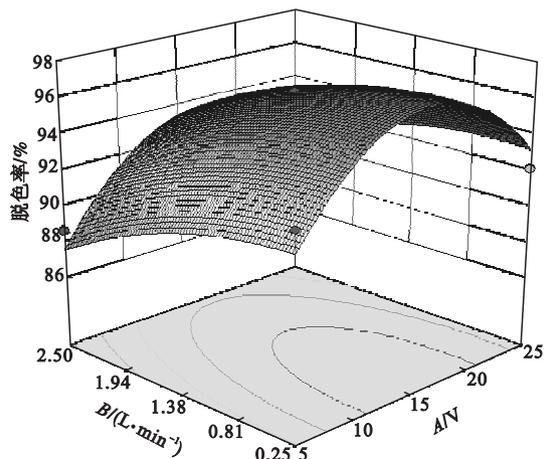


图 7 脱色率 $Y = f(A, B, 4.25)$ 的响应曲面和等高线

Fig. 7 The response surface and contour-line plots of decoloration rate $Y = f(A, B, 4.25)$

从图 7 中可以看出, 随着槽电压的逐渐增大, 脱色率呈现先逐渐增高后逐渐降低的趋势; 而曝气量与酸性大红脱色率呈现出负相关关系. 在一定的槽电压条件下, 曝气量在 0.25 ~ 2.50 L/min 变化, 酸性大红染料脱色率可从 92% 降低到 90% 以下; 在一定曝气量条件下, 槽电压由 5 ~ 25 V 变化, 酸性大红染

料脱色率先上升,从 90% 上升到 96% 以上,且波动明显,超过 16 V 以后,脱色率逐渐降低,所以,槽电压比曝气量对脱色率的影响更大. 两因素之间存在显著的协同效应,在某一区域内,两因素同时朝相反的方向均匀变化时,才能相对地提高降解效果,而且存在一个最佳染料脱色率区域,即图 7 中槽电压 12 ~ 20 V,曝气量在 0.25 ~ 1.38 L/min 的半椭圆形区域,这一区域内脱色率均达到 96% 以上.

图 8 是曝气量为 1.38 L/min,槽电压和 pH 值之间的交互作用对酸性大红染料脱色率的影响.

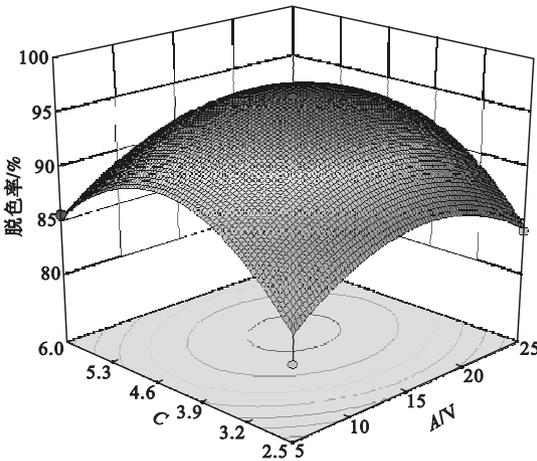


图 8 脱色率 $Y=f(A, 1.38, C)$ 的响应曲面和等高线

Fig. 8 The response surface and contour-line plots of decoloration rate $Y=f(A, 1.38, C)$

从图 8 中可以看出,脱色率随 pH 值的增大呈现先增大后降低的趋势;脱色率随槽电压的不断增大也呈现先增大后降低的趋势. 在一定槽电压条件下,pH 值 2.5 ~ 4.0 变化,脱色率先逐渐提高,脱色率波动明显,从 84% 到 96%,超过 4.0 时脱色率逐渐降低,从 96% 降低到 88% 以下;而在一定 pH 值条件下,槽电压由 5 ~ 15V 变化,脱色率先逐渐提高,从 84% 到 96%,超过 15V,脱色率逐渐降低,从 96% 到 86%. 因此,pH 值相对槽电压来讲,对染料脱色率显著. 在一定范围内槽电压和 pH 值同时向相同方向均匀变化时,

脱色率也会相应的提高,说明槽电压和 pH 值之间存在着协同效应,即在某一区域内,两者同时升高或降低时,降解效果相对提高. 最佳脱色率区域为图中槽电压 14 ~ 18V,pH 值 4.0 ~ 4.7 的椭圆形区域,这一区域内脱色率均在 96% 以上.

图 9 是电压为 15V,曝气量和 pH 值之间交互作用对酸性大红染料脱色率的影响.

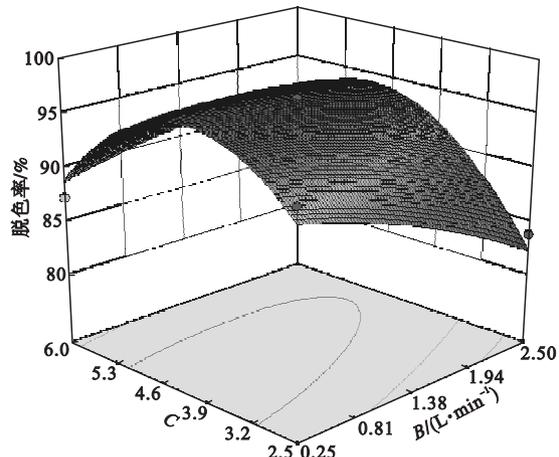


图 9 脱色率 $Y=f(15, B, C)$ 的响应曲面和等高线

Fig. 9 The response surface and contour-line plots of decoloration rate $Y=f(15, B, C)$

从图 9 可以看出,曝气量与染料脱色率呈现出负向相关关系,而脱色率随着 pH 值的增大呈现先增大后降低的趋势. 在一定 pH 值条件下,随着曝气量的增大,脱色率呈现下降趋势,脱色率由 95% 下降到 85% 以下;而在一定曝气量条件下,pH 值在 2.5 ~ 4.2 变化,脱色率逐渐增大,从 85% 到 95%,波动较明显,在 pH 值大于 4.2 时,脱色率逐渐下降. 因此,pH 值相对曝气量对脱色率的影响显著. 在一定曝气量和 pH 值范围内,两因素存在显著的协同效应,即存在最佳脱色率区域,pH 值为 3.8 ~ 4.6,曝气量为 0.25 ~ 1.2 L/min 的半椭圆形区域,这一区域内脱色率均在 95% 以上.

通过图 7、图 8、图 9 响应曲面分析得出,槽电压、曝气量和 pH 值 3 个自变量因素对

脱色率的影响:pH 值的影响最大,其次是槽电压,曝气量的影响较小;各因素交互作用对染料脱色率的影响大小:槽电压 & pH 值 > pH 值 & 曝气量 > 槽电压 & 曝气量。

3.4 最优结果分析

在 Design - Expert 软件中,高值项中输入 100%。由此得到经过分析的最优值,软件输出其最优响应值 R 为 97.186 9%,其中在槽电压为 15.73 V、曝气量为 0.25 L/min、pH 值为 4.25,说明在最佳操作条件下,酸性大红的脱色率为 97.186 9%。

4 结 论

(1) 根据 Design Expert 中 Box - Behnken Design 响应面优化分析,建立模型得到方程:

$$\text{脱色率} = 52.66715 - 6.51838 \times \text{曝气量} + 1.56952 \times \text{曝气量} \times \text{pH 值} - 0.045425 \times (\text{槽电压})^2 - 2.19265 \times (\text{pH 值})^2.$$

(2) 最佳操作条件为:槽电压 15.73 V、曝气量 0.25 L/min、pH 值 4.25,在最佳操作条件下,脱色率为 97.186 9%。

(3) 通过三维响应曲面图分析得出,各因素对脱色率的影响大小为 pH 值 > 槽电压 > 曝气量;各因素交互作用对染料脱色率的影响大小为槽电压 & pH 值 > pH 值 & 曝气量 > 槽电压 & 曝气量。

(4) 响应面法拟合得出的回归方程具有很好的拟合性,对优化光电 Fenton 氧化染料废水的脱色工艺具有现实指导意义。

参考文献

[1] 乔倩倩. 中国水资源污染与防治策略浅析[J]. 能源与节能, 2012, 81(6): 62 - 63.
(QIAO Qianqian. Natural resources of our country water pollution and control strategy[J]. Energy and energy conservation, 2012, 81(6): 62 - 63.)

[2] 仲维斌, 宋晓娟, 马玉琴. 活性炭吸附 - 气相色谱法测定空气和废气中的乙酸[J]. 污染防治技

术, 2013, 26(3): 73 - 79.

(ZHONG Weibin, SONG Xiaojuan, MA Yuqin. GC Determination of acetic acid in ambient air and exhaust gas by adsorption in activated carbon tube [J]. Pollution control technology, 2013, 26(3): 73 - 79.)

[3] 郭祥, 钟成华, 邓春光. KOH 活化法制备牛粪活性炭的研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2459 - 2465.

(GUO Xiang, ZHONG Chenghua, DENG Chunguang. Preparation of activated carbon from cow dung by chemical activation with potassium hydroxide [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2013, 33(9): 2459 - 2465.)

[4] 石泰山. 印染废水处理及其资源化利用[J]. 印染, 2013, 23: 49 - 53.

(SHI Taishan. Wastewater treatment of dyeing effluents and its resource utilization [J]. Dyeing & finishing, 2013, 23: 49 - 53.)

[5] NAGESWARA R N, ROHIT M. Efficient degradation of Reactive Blue 4 in carbon bed electrochemical reactor [J]. Chemical engineering journal, 2012, 184: 23 - 32.

[6] LIANG Qinghua, MA Wangjing, SHI Yao, et al. Easy synthesis of highly fluorescent carbon quantum dots from gelatin and their luminescent properties and applications [J]. Carbon, 2013, 60: 421 - 428.

[7] 卓琼芳, 邓述波, 许振成. 电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1810 - 1815.

(ZHUO Qiongfang, DENG Shubo, XU Zhencheng. Selection of electrochemical anodic materials for PFOA degradation and its mechanism [J]. Environmental science, 2014, 35(5): 1810 - 1815.)

[8] 曹春燕, 于冰, 赵莹莹. Fenton 法处理模拟偶氮染料废水的研究[J]. 化学与黏合, 2013, 35(2): 32 - 34.

(CAO Chunyan, YU Bing, Zhao Yingying. Treatment of simulative azo dyes wastewater by fenton reagent technique [J]. Chemistry and adhesion, 2013, 35(2): 32 - 34.)

[9] AZAM H, MAHMOUD S. Biodegradation of phenol in hypersaline conditions by Halomonas sp. strain pH2-2 isolated from saline soil [J].

- International biodeterioration & biodegradation, 2013, 85:29-34.
- [10] ZHANG Chao, JIANG Yonghai, LI Yunlin, et al. Three-dimensional electrochemical process for wastewater treatment; a general review[J]. Chemical engineering journal, 2013, 228:455-467.
- [11] 王现丽, 王世峰, 吴俊峰. 光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究[J]. 环境科学, 2014, 35(1):208-213.
(WANG Xianli, WANG Shifeng, WU Junfeng. Treatment of sludge liquor produced in deep dehydration by photoelectro-fenton process[J]. Environmental science, 2014, 35(1):208-213.)
- [12] MAHMOODI N M, SALCHI R, ARAMI M. Binary system dye removal from colored textile wastewater using activated carbon; kinetic and isotherm studies[J]. Desalination, 2011, 272(1/2/3):187-195.
- [13] 杨洁, 储海荣, 胡俊. 光/电 Fenton 耦合处理退浆废水中的聚乙烯醇[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(3):66-69.
(YANG Jie, CHU Hairong, HU Jun. Treatment of polyvinylalcohol by photo-electro-fenton oxidation in desizing wastewater[J]. Journal of Nanjing university of technology (natural science edition), 2013, 35(3):66-69.)
- [14] LIU Huan, YANG Jiakuan, SHI Yafei, et al. Conditioning of sewage sludge by Fenton's reagent combined with skeleton builders[J]. Chemosphere, 2012, 88(2):235-239.
- [15] CHU Y Y, QIAN Y, WANG W J, et al. A dual-cathode electro-fenton oxidation coupled with anodic oxidation system used for 4-nitrophenol degradation[J]. Hazard mater, 2012, 200(1):179-185.
- [16] 郑怀礼, 焦世珺, 邓晓莉, 等. 响应面法优化聚磷硫酸铁的制备及其应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1):9-14.
(ZHENG Huaili, JIAO Shijun, DENG Xiaoli, et al. Optimization of preparation and application of PPFS by response surface methodology[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2012, 6(1):9-14.)
- [17] WANG S Z, GUO Y, WANG L A, et al. Supercritical water oxidation of coal; investigation of operating parameters' effects, reaction kinetics and mechanism[J]. Fuel processing technology, 2011, 92(3):291-297.
- [18] 徐建平, 周润娟. 响应曲面法优化复合絮凝剂的制备工艺[J]. 环境工程学报, 2012, 6(9):3063-3067.
(XU Jianping, ZHOU Runjuan. Preparation technique optimization of composite flocculant by response surface methodology[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2012, 6(9):3063-3067.)
- [19] 梁深, 王树众, 公彦猛. 超临界水氧化处理垃圾渗滤液的响应面法优化[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12):3275-3284.
(LIANG Shen, WANG Shuzhong, GONG Yanmeng. Optimization of supercritical water oxidation for landfill leachate treatment by response surface methodology (RSM) [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2013, 33(12):3275-3284.)
- [20] RUQAYYAH I D, JAMAL P, ALAM M Z, et al. Application of response surface methodology for protein enrichment of cassava peel as animal feed by the white-rot fungus *Panus tigrinus* M609RQY [J]. Food hydrocolloids, 2014, 42(2):298-303.
- [21] 崔春兰, 郑虎哲, 顾立众. 响应曲面分析法优化苹果渣中多酚类物质的果胶酶辅助提取工艺[J]. 现代食品科技, 2013, 29(9):2235-2240.
(CUI Chunlan, ZHENG Huzhe, GU Lizhong. Optimization of pectinase aide polyphenol extraction from apple pomace by response surface methodology [J]. Modern food science and technology, 2013, 29(9):2235-2240.)