

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.06.007

高炉粉尘电极对印染废水的电絮凝降解

王越^{1,2,3}, 赵蓉^{1,2,3}, 郭佳然⁴, 孙苏洋², 杨洁^{1,2,3}, 王捷^{1,2,3,5}

(1. 天津工业大学 先进分离膜材料全国重点实验室, 天津 300387; 2. 天津工业大学 环境科学与工程学院, 天津 300387; 3. 天津工业大学 沧州研究院, 河北 沧州 061000; 4. 惠生工程(中国)有限公司, 北京 100032; 5. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 为了提高电絮凝处理印染废水效果, 以高炉粉尘为基材制备新型电极材料, 以靛蓝废水作为印染模拟废水, 探究电流密度、极板间距和初始 pH 值对 COD 去除率和脱色率的影响, 并在此基础上采取 3 因素 3 水平的响应面法探究电絮凝降解靛蓝废水的最优降解工艺条件。结果表明: 最佳工艺条件为电流密度 37.3 mA/cm²、极板间距 22.6 mm、初始 pH = 8.1, COD 去除率和脱色率分别达 99.48% 和 20.67%; 与极板间距和初始 pH 值相比, 电流密度对 COD 去除率和对脱色率的影响最显著, 且 3 个因素之间两两交互作用显著; 高炉粉尘制备的新型电絮凝阳极材料因其具有多孔结构, 可有效抑制阳极钝化层的形成, 减少沉淀物附着, 从而缓解极板结垢堵塞问题, 还能实现高炉粉尘的资源化回收再利用, 具有重要的工程意义。

关键词: 电絮凝; 印染废水; 铁碳微电解; 高炉粉尘

中图分类号: X781

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)06-0048-07

Electrocoagulation degradation of dyeing wastewater using blast furnace dust electrodes

WANG Yue^{1,2,3}, ZHAO Rong^{1,2,3}, GUO Jiaran⁴, SUN Suyang², YANG Jie^{1,2,3}, WANG Jie^{1,2,3,5}

(1. State Key Laboratory of Advanced Separation Membrane Materials, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Cangzhou Institute of Tiangong University, Tiangong University, Cangzhou 061000, Hebei Province, China; 4. Wison Engineering Ltd, Beijing 100032, China; 5. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to improve the flocculation effect of electro flocculation in the treatment of dyeing wastewater, a new type of electrode material was prepared based on blast furnace dust. The effects of current density, plate spacing and initial pH value on COD removal and decolorization rate were investigated by applied Indigo wastewater as the simulated dyeing wastewater. The optimal degradation conditions for electro flocculation degradation of indigo wastewater were investigated with a three factor, three level response surface model based on a one-way experiment. The results indicated that the optimum conditions were current density 37.3 mA/cm², plate spacing 22.6 mm, initial pH = 8.1. Under the optimum condition, COD removal and decolorization rate could reach 99.48% and 20.67%, respectively. Compared with plate spacing and initial pH, current density exhibited the most significant effect on COD removal and decolorization rate. Moreover, the pairwise interaction effects among the three factors are significant. The preparation of electrocoagulation anode material using blast furnace dust can not only alleviate the problem of agglomeration and blockage in the electrocoagulation process due to its porous structure. Additionally, it can realize the resource recovery and reuse of blast furnace dust, which has important engineering significance.

Key words: electro flocculation; dye wastewater; Fe-C micro-electrolysis; blast furnace dust

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3207000、2023YFC3207003); 国家自然科学基金项目(42307529); 河北省自然科学基金项目(E2023110001、C2023110006); 天津工业大学沧州研究院项目(TGCYY-F-0103)

第一作者: 王越(1990—), 女, 副教授, 主要研究方向为污水资源化利用。E-mail: wangyue@tiangong.edu.cn

通信作者: 王捷(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为膜法水处理技术与污水资源化利用。E-mail: wangjiemailbox@163.com

据不完全统计,我国每天排放印染废水量高达400万^[1]。印染废水毒性大、可生化性差、色度高及组分复杂^[2],含有多种具有生物毒性和“三致”性能的污染物,若未经达标处理直接排放,将对生态环境和人类健康产生不堪设想的后果。印染废水的处理方法包括吸附、生物处理、氧化、混凝等,然而如何绿色环保、高效经济地处理印染废水成为亟需解决的问题。电絮凝技术因具有脱色效率高、絮凝沉淀易于过滤、污泥产量低等优点而被广泛应用于印染废水处理^[3]。在电絮凝过程中,通过外加电源,牺牲金属阳极(通常采用Fe/Al电极)产生金属阳离子,与阴极生成的OH⁻形成氢氧化物和多羟基络合物絮凝剂,利用压缩双电层、吸附架桥、电荷中和等作用与印染废水中的污染物发生絮凝沉淀,从而实现了对污染物的去除^[4-6]。此外,体系中产生的H₂和O₂可以作为气体载体,与絮凝物一起上浮达到去除絮凝污染物的目的。然而,工业化电絮凝过程比较复杂,絮凝效果受电极材料、电流密度、pH值、极板间距等因素的影响^[7]。在长期处理过程中,电极表面会形成一层氧化膜,阻碍电极反应,影响絮凝胶体的产生,并且增加能耗,因此,电极钝化已成为制约电絮凝技术在实际水处理中应用的重要因素^[8]。

传统的铁碳微电解材料大多采用尺度较大的块状铁碳,容易出现电极钝化、处理效率低下的问题^[9]。已有研究表明,降低铁碳原料的尺度可以提高污染物的脱除率^[10]。高炉粉尘(blast furnace dust, BFD)是钢铁行业中的一种固体废物,由于其成分主要为铁(20%~28%)和碳(25%~35%)等,若将其制备成电极材料能够在一定程度上缓解电极板结、堵塞问题,有望成为良好的微电解材料。铁碳微电解技术与传统的电解技术原理相似^[11-14],同时炭粒还能够有效发挥其吸附性和还原性,帮助絮凝体快速沉淀。

本研究以高炉粉尘为基材,开发新型印染废水处理电极材料,考察电流密度、极板间距和初始pH值等因素对电絮凝降解靛蓝废水化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、色度的影响,在此基础上,通过响应面法优化工艺条件,分析各影响因素间的交互作用,并验证模型的准确性,为电絮凝高效处理靛蓝印染废水的实践应用提供参考。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

主要材料:NaOH、98% H₂SO₄、Na₂SO₄、NaCl、聚偏氟乙烯、N-甲基吡咯烷酮,均为分析纯,天津市科密欧

化学试剂有限公司;高炉粉尘,唐山钢铁集团有限责任公司;实验原水,临邑奥泰纺织有限公司,基本水质指标如表1所示。

表1 靛蓝印染废水水质指标

Tab.1 Raw water quality of indigo dyeing wastewater

水质指标	指标值
COD/(mg·L ⁻¹)	3 730
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	3.5
总氮/(mg·L ⁻¹)	1 897
总磷/(mg·L ⁻¹)	16.48
pH 值	12.45
电导率/(μS·cm ⁻¹)	2812
色度(Hazen)	403.6
浊度/NTU	28 668

主要仪器:T400型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;RCT digital型磁力搅拌器,艾卡(广州)仪器设备有限公司;5B-1型COD消解仪,北京连华永兴科技发展有限公司。

1.2 高炉粉尘电极的制备

本实验所用的自制电极制备步骤如下:

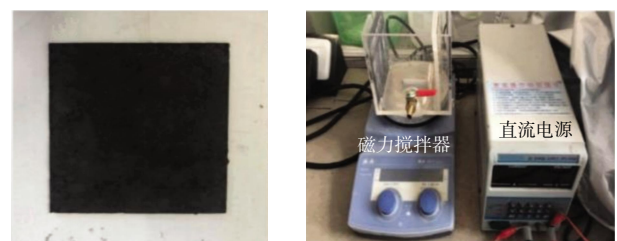
(1) 泡沫镍基体预处理:使用前分别用粗、细砂纸打磨,将电极浸泡于NaOH和稀H₂SO₄溶液中反应,当观察到有大量气泡冒出时立即取出,用去离子水反复冲洗干净,烘干待用。

(2) 高炉粉尘预处理:高炉粉尘分别用酸洗、水洗除去可溶性灰分,烘干后称取一定量的高炉粉末放入球磨机中粉碎,用标准筛筛分,取45目粒度等级的高炉粉尘备用。

(3) 制备高炉粉尘电极:将一定量的聚偏氟乙烯溶解到N-甲基吡咯烷酮溶液中成胶状后,加入经预处理的高炉粉尘粉末并搅拌均匀成膏状,均匀地涂刷至泡沫镍和铁板上,经80℃烘干后再次涂刷,重复3次,最后经200℃焙烧2h,成功制得高炉粉尘电极。

1.3 实验装置与方法

图1为本实验装置。



(a) 高炉粉尘电极

(b) 实验装置

图1 实验装置

Fig.1 Diagram of experimental set-up

电絮凝反应器为有机玻璃材质,总有效容积为 2 L。阳极为自制的高炉粉尘电极,阴极为石墨电极,垂直放置于电解池中,底部设置有磁力搅拌器以维持反应器的搅拌速率。阴阳极间加载稳压直流电源,电源提供 0~30 V 的可调节电压。在电解池中加入 500 mL 靛蓝印染废水,分别考察电流密度(10、15、20、25 mA/cm²)、极板间距(10、20、30 mm)和初始 pH 值(6.5、8.0、9.5)对电絮凝降解靛蓝印染废水的影响,同时接通电源开始放电,间隔 10 min 在同一位置取样,采用重铬酸钾法测定 COD,采用铂钴比色法测定色度。

1.4 响应面实验设计

在单因素实验的基础上,以电流密度(A)、极板间距(B)、pH 值(C)作为影响因素,通过 Design-Expert 软件以 COD 去除率、脱色率为响应值,设计 3 因素 3 水平响应面实验^[15]。其因素水平表如表 2 所示。

表 2 响应面实验因素与水平

Tab.2 Factors and levels in response surface experimental

因素	水平		
	-1	0	1
电流密度(A)/(mA·cm ⁻²)	10	25	40
极板间距(B)/mm	10	20	30
溶液 pH 值(C)	6	8.5	11

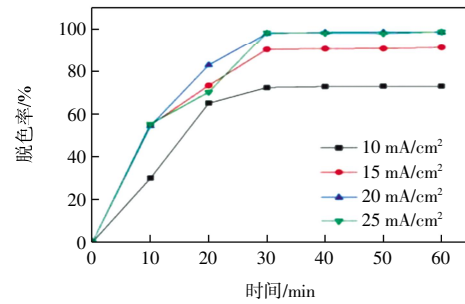
2 结果与分析

2.1 不同处理条件对电絮凝效果的影响

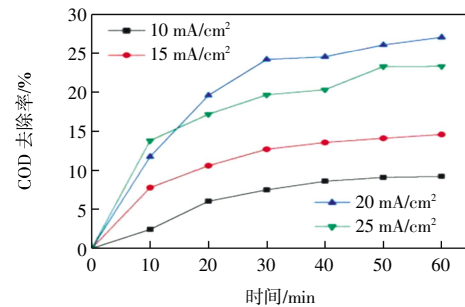
2.1.1 电流密度对电絮凝效率的影响

在电絮凝处理过程中,电流密度对金属极板溶出量有最直接的影响,随着电流密度的增大,金属的溶解速率加快,单位时间内阳极产生金属阳离子和阴极产生的气体增多,从而显著提高目标污染物的去除效果^[16]。因此,电流密度增大通常会使得去除率显著提高,同时不可避免地造成电流效率的下降和能量的损失。极板间距为 20 mm、初始 pH 值为 8.5 时,不同电流密度对靛蓝废水脱色和 COD 去除效果的影响如图 2 所示。

由图 2 可知,在电流密度为 25 mA/cm² 时,脱色效果达到最佳状态(98.99%),而 COD 的去除率(27.13%)较电流密度 20 mA/cm² 时有所下降。当电流密度较小时,随着电流密度的增大,电絮凝效率明显增加;当电流密度增大到一定值时,随着电流密度的继续增大,电絮凝效率变化不显著,体系中 COD 去除效果逐渐趋于平稳:这是由于电流密度过高时会导致溶液气浮现象的加剧且加快极板钝化,反而不利于电絮凝效率的提升^[17]。因此,应根据实际情况,选择合适的电流密度,不仅保证降解效果,还在一定程度上减少极板消耗。



(a) 脱色率的变化



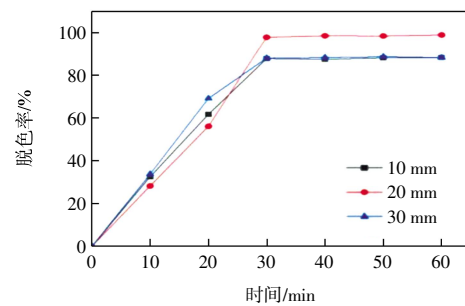
(b) COD 去除率的变化

图 2 电流密度对电絮凝效率的影响

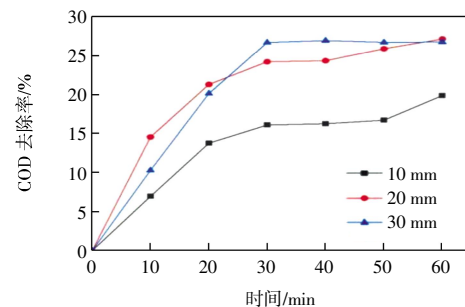
Fig.2 Influence of current densities on efficiency of electro flocculation

2.1.2 极板间距对电絮凝的影响

电流密度为 25 mA/cm²、初始 pH 值为 8.5 时,极板间距对靛蓝废水脱色和 COD 去除效果的影响如图 3 所示。



(a) 脱色率的变化



(b) COD 去除率的变化

图 3 极板间距对电絮凝效率的影响

Fig.3 Influence of plate spacing values on efficiency of electro flocculation

极板间距从空间上影响着电絮凝剂的生长和絮凝效果。适当的极板间距有利于提高电絮凝的效率和降低能耗。间距过大会导致两电极间的电子传递距离增大,同时增加运行过程中的能耗。相反,间距过小易影响电极间溶液的流通性,造成极板堵塞现象^[18]。由图 3 可得,当初始 pH 值和电流密度一定时,改变极板间距对脱色率和 COD 去除率的影响较小。当极板间距为 20 mm 时,靛蓝废水的脱色率和 COD 去除率达到最佳,分别为 99.14%和 27.18%。此时,阴阳两电极之间的传质作用最优,电絮凝反应速率和去除率最高。一方面,金属离子在电絮凝体系中的浓度随极板间距变化而发生变化;另一方面,极板间距的变化会改变金属离子的价态^[19]。极板间距为 20 mm 时能够促进电极溶解,阳极可以溶出更多的金属离子,进而生成更多的电絮凝剂;若极板间距增加到 30 mm,电极溶解速率显著降低,阴阳极板间电压增大将不利于金属离子析出。另外,COD 和色度的去除速率随系统的运行逐渐降低,这是由于阳极表面的钝化层阻碍了体系对污染物的去除。

2.1.3 溶液初始 pH 值对电絮凝的影响

电流密度为 25 mA/cm²、极板间距为 20 mm 时,不同初始 pH 值对靛蓝废水脱色和 COD 去除效果的影响如图 4 所示。

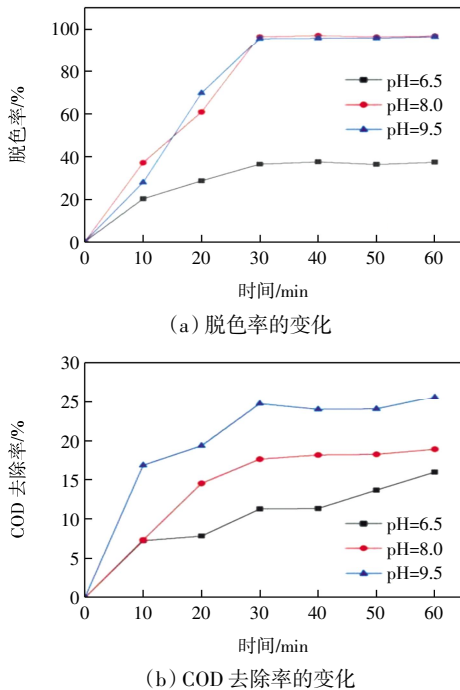


图 4 不同 pH 值下优化目标的响应变化

Fig.4 Influence of initial pH values on efficiency of electro flocculation

在不同 pH 值环境中,金属阳离子水解程度和水

解产物种类不同,体系中产生絮凝剂的吸附絮凝能力也不相同,因此影响电絮凝的絮凝沉淀效果。由图 4 可知,在电流密度和极板间距不变的情况下,靛蓝印染废水的脱色率和 COD 去除率随初始 pH 值的增加而增加,初始 pH 值为 9.5 时处理效果最佳,脱色率和 COD 去除率分别达 98.90%和 25.62%。在偏碱性条件下,体系中含有更多的 OH⁻,容易和 Fe³⁺结合产生氢氧化铁絮凝剂。酸性条件下,Fe 元素以水合离子的形式存在,难以生成多核氢氧化物絮凝剂^[20]。然而在强碱性条件下,铁氢氧化物会溶解,抑制其聚合生成絮凝剂,因此,通常适宜电絮凝剂生长的 pH 值为中性或弱碱性(pH 值为 6~10)^[21]。

2.2 响应面工艺优化分析

2.2.1 Design-Expert 的结果输出与分析

由单因素结果分析可知,电流密度、极板间距和初始 pH 值均影响电絮凝处理靛蓝废水的效果。电流密度和 pH 值均与废水处理效果成正比,且电流密度对脱色率以及 COD 去除率的影响最明显,而极板间距对废水的处理效果影响不大。在单因素实验的基础上,通过 Design-Expert 软件对电絮凝处理靛蓝废水工艺进行了优化,结果如表 3 所示。

表 3 实验条件及处理效果

Tab.3 Experimental conditions and treatment effect

电流密度(A)	极板间距(B)	pH 值(C)	COD 去除率/%	脱色率/%
40	10	8.5	79.84	31.43
40	20	11	97.84	18.13
25	30	6	56.10	20.06
25	20	8.5	95.09	11.98
10	20	11	79.97	30.64
25	20	8.5	91.24	12.35
25	20	8.5	95.60	13.11
25	10	11	47.78	21.11
10	10	8.5	80.65	33.80
25	10	6	83.62	38.56
25	30	11	99.18	27.91
10	20	6	86.82	25.65
40	30	8.5	99.81	28.31
25	20	8.5	94.94	11.85
40	20	6	83.76	37.71
10	30	11	86.12	28.31
25	20	8.5	96.08	12.73

由响应面软件对实验结果进行拟合分析,得到模型回归方程^[22]:

$$Y_1 = 85.19 - 2.31A - 1.96B + 10.85C + 0.32AB + 0.15AC + 0.78BC + 0.14A^2 - 0.12B^2 - 1.73C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 181.79 - A - 5.68B - 21.35C + 0.03AB -$$

$$0.14AC + 0.22BC + 0.03A^2 + 0.07B^2 + 1.12C^2 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: Y_1 、 Y_2 分别为 COD 去除率和脱色率; A 、 B 、 C 分别为电流密度、极板间距和初始 pH 值。响应面模型的确定系数和分辨精度如表 4 所示。

表 4 模型确定系数及分辨精度

Tab.4 Determination coefficients and resolution accuracy of Model

响应值	R^2	R^2_{adj}	精度
COD 去除率	0.994 6	0.987 7	41.997 3
脱色率	0.995 3	0.989 3	45.659 9

由表 4 可知, 2 个模型经过多重拟合确定系数 R^2 分别为 0.994 6、0.995 3, 均接近于 1, 修正确定系数 R^2_{adj} 分别为 0.987 7、0.989 3, 两者差值分别为 0.006 9、0.006 0 (< 0.2), 说明该模型的拟合度与精确度较高, 且模型得到的预测值与真实值间相关性高^[23]。此外, 模型可为脱色率、COD 去除率进行初步分析和预测: 模型分辨精度大于 4, 说明模型可取。2 个响应值模型分辨率分别为 41.997 3、45.659 9, 远大于 4。表明 2 个模型有足够的分辨力, 适用于该设计。响应面模型的 F 值和 P 值如表 5 所示。

表 5 响应面模型 F 值和 P 值

Tab.5 Response surface model F -values and P -values

项目	COD 去除率		脱色率	
	F 值	P 值	F 值	P 值
回归方程	143.49	$< 0.000 1$	21.01	0.000 3
A	46.38	0.000 3	2.13	0.188 0
B	85.93	$< 0.000 1$	19.22	0.003 2
C	9.19	0.019 1	13.94	0.007 3
AB	29.94	0.000 9	8.14	0.024 6
AC	49.29	0.000 2	17.02	0.004 4
BC	629.03	$< 0.000 1$	18.21	0.003 7
A^2	14.81	0.006 3	34.35	0.000 6
B^2	230.98	$< 0.000 1$	25.22	0.001 5
C^2	156.20	$< 0.000 1$	24.21	0.001 7

由表 5 的方差分析可知, 2 个模型的 P 值均小于 0.001, 表明该模型极显著。各因素对 2 个响应值的影响显著性顺序均为电流密度(A) $>$ pH 值(C) $>$ 极板间距(B)。因素 AB 、 AC 、 BC 的 P 值均小于 0.05, 说明各因素间的交互作用对 COD 去除率和脱色率影响均显著。

2.2.2 响应曲面分析

为进一步分析不同因素间交互作用对 COD 去除率和脱色率的影响, 绘制了响应曲面图, 如图 5、图 6 所示。

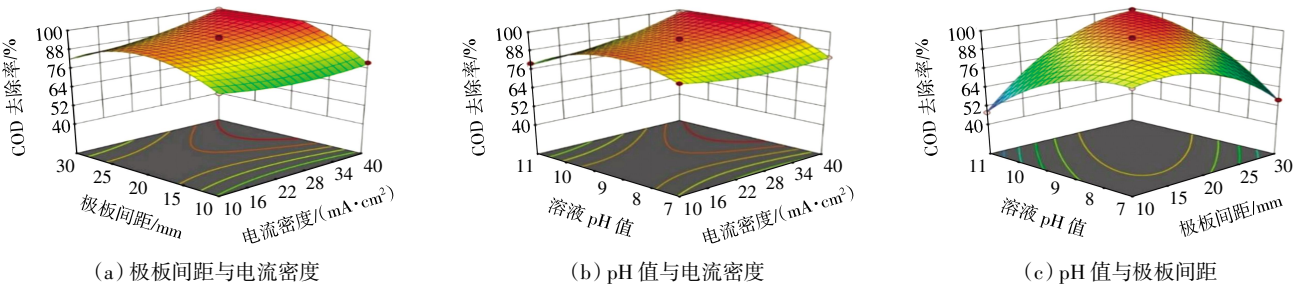


图 5 不同因素交互对 COD 去除率的影响

Fig.5 Effect of interaction of different factors on COD removal rate

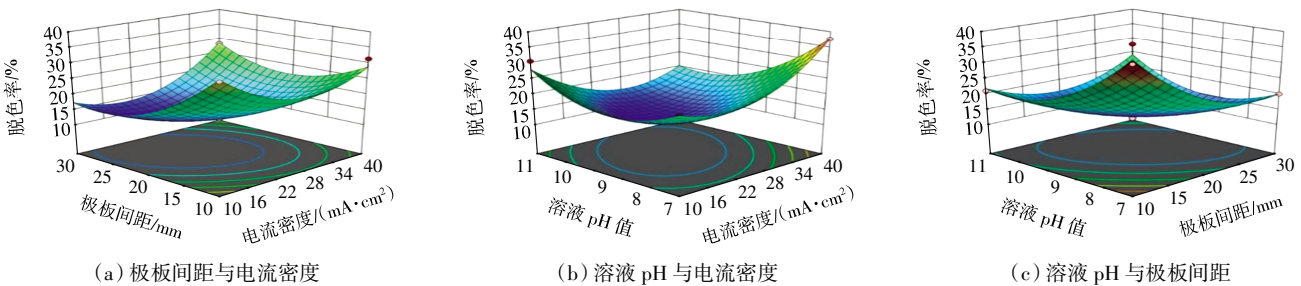


图 6 不同因素交互对脱色率的影响

Fig.6 Effect of interaction of different factors on decolorization rate

由图 5 和图 6 可知, 无论是以电流密度、极板间距还是溶液 pH 值作为中心值, 响应曲面均较为陡峭, 等高线均为椭圆形而非圆形, 表明 3 个因素之间两两交互作用明显。通过对模型最优解求解, 最佳工艺处

理条件为: 电流密度 37.3 mA/cm^2 、极板间距 22.6 mm 、初始 $\text{pH} = 8.1$, 此时脱色率和 COD 去除率分别为 20.67% 和 99.48% 。对比电絮凝实际性能和预期效果发现, 实验值和真实值很接近, 从而验证了实验的有效性。

2.3 机理分析

靛蓝印染废水降解机理包括铁离子絮凝、自由基氧化和铁碳微电解的强化作用,如图7所示。

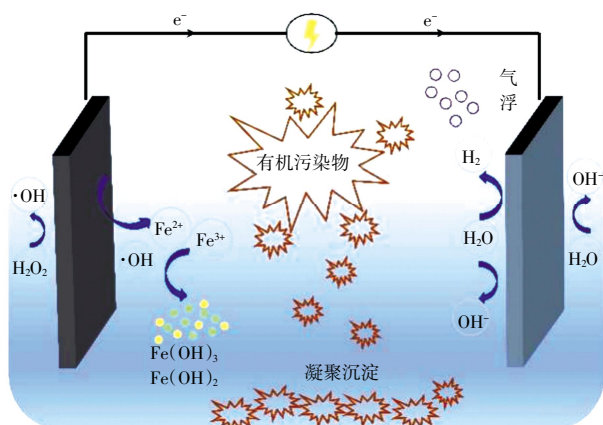


图7 靛蓝印染废水降解机理

Fig.7 Degradation mechanism of indigo dyeing wastewater

电絮凝工艺通过外部电场驱动牺牲阳极产生具有絮凝性质的阳离子,在水中水解聚合成一系列多核羟基络合物,并通过吸附、凝聚和沉淀等方式去除染料中的大分子有机污染物。阴极发生还原反应,产生具有微观结构的氢气泡,通过气浮作用将悬浮物带到水面,从而去除污染物。同时,Fe²⁺还原O₂会产生一系列反应性氧化物,这些氧化物会产生羟基自由基进行氧化,导致靛蓝染料分子的苯环和氨基结构被破坏和断裂,从而实现染料的脱色。此外,铁碳微电解促进了电解过程中Fe²⁺向Fe³⁺的转化,产生了更多的羟基自由基来促进有机污染物的降解。

电絮凝-铁碳微电解复合工艺作为预处理技术在处理印染废水中具有显著的优势,但也存在一定的不足。由于该反应体系极易发生板结钝化,并且印染废水中含盐量较高,加重了电极钝化^[24],进而影响铁碳间的传质作用,使微观原电池的作用减弱,影响实际印染废水的降解效果。此外,阳极材料中铁碳含量比会影响铁碳微电解的电化学性能,因此可以通过调节铁碳比或引入改性材料激活铁碳微电解的反应活性,促进印染废水的高效降解^[25]。

3 结论

本研究以高炉粉尘为原材料,制备电絮凝阳极材料用于靛蓝废水的降解,不仅实现了粉尘的无害化处理,还达到了对靛蓝印染废水高效降解的目标。实验针对性地探究了靛蓝废水电絮凝处理中电流密度、极板间距和初始pH值对降解效率的影响,并通过响应

面法分析优化了工艺条件。得出下述结论:

(1) 在单因素电絮凝降解靛蓝废水过程中,电流密度、极板间距、初始pH值对靛蓝印染废水的降解效果均有影响,其中电流密度和初始pH值与废水处理效果成正比,且电流密度对脱色率和COD去除率的影响最明显,而极板间距对废水的处理效果影响较小。

(2) 最佳工艺条件为:电流密度37.3 mA/cm²、极板间距22.6 mm、初始pH=8.1,此时脱色率和COD去除率分别为20.67%和99.48%。

(3) 通过响应面模型分析,该模型反映的预测值与真实值间的相关性高,电流密度对COD去除率和脱色率的影响最显著,且3个因素之间两两交互作用明显。

参考文献:

- [1] 洪雪丽,焦芬,刘维. 印染废水处理技术综述[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(4): 1219-1229.
HONG X L, JIAO F, LIU W. Review on dyeing wastewater treatment technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54 (4): 1219-1229 (in Chinese).
- [2] LI W, MU B N, YANG Y Q. Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology[J]. Bioresource Technology, 2019, 277: 157-170.
- [3] 戴常超,陈大宏,刘峻峰,等. 强化电絮凝技术的基础、现状和未来展望[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 1-14
DAI C C, CHEN D H, LIU J F, et al. Foundations, present situations and future expectations of enhanced electrocoagulation[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 1-14 (in Chinese).
- [4] 张亮,周姝岑,李攀,等. 电絮凝-微纳米气泡臭氧氧化工艺处理高盐印染废水的研究[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13: 639-647.
ZHANG L, ZHOU S C, LI P, et al. Study on treatment of high-salt printing and dyeing wastewater by electroflocculation-micro-nano-bubble ozone oxidation process[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 639-647 (in Chinese).
- [5] DIMOGLO A, SEVIM-ELIBOL P, DINÇ Ö, et al. Electrocoagulation/electroflotation as a combined process for the laundry wastewater purification and reuse[J]. Journal of Water Process Engineering, 2019, 31: 100877.
- [6] 祝海涛. 电絮凝集成技术及应用研究进展[J]. 水处理技术, 2023, 49(9): 7-10.
ZHU H T. Research Progress of electrocoagulation integration technology and application[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(9): 7-10 (in Chinese).
- [7] ASFAHA Y G, TEKILE A K, ZEWGE F. Hybrid process of

- electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: A review[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, 4: 100261.
- [8] 申屠含澹, 吴淑琰, 吴雨倩, 等. 电絮凝电极钝化的影响因素及消除技术研究进展[J]. *广东化工*, 2022, 49: 78-80.
SHENTU H D, WU S Y, WU Y Q, et al. Research progress on the factors influencing electrode passivation in electrocoagulation and its Elimination Techniques[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(15): 78-80(in Chinese).
- [9] 曾祥平, 杨占强, 丁文川, 等. 新型铁碳微电解填料制备及其脱氮除磷研究[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(8): 209-218.
ZENG X P, YANG Z Q, DING W C, et al. Optimized preparation of new iron-carbon micro-electrolysis filler and study on its nitrogen and phosphorus removal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(8): 209-218(in Chinese).
- [10] KHALIL A M E, ELJAMAL O, AMEN T W M, et al. Optimized nano-scale zero-valent iron supported on treated activated carbon for enhanced nitrate and phosphate removal from water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309: 349-365.
- [11] 杨本涛, 刘源森, 诸葛雷, 等. 铁碳微电解耦合碱沉淀技术处理含氟废水的机理研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(S2): 185-188, 194.
YANG B T, LIU Y S, ZHUGE L, et al. Mechanism study on the treatment of fluorinated wastewater by iron-carbon micro-electrolysis coupled with alkali precipitation[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S2): 185-188, 194(in Chinese).
- [12] 王文荟, 季闻翔, 赵杰, 等. 铁碳微电解基质在人工湿地中的作用机理及研究现状[J]. *环境化学*, 2023, 42(4): 1196-1208.
WANG W H, JI W X, ZHAO J, et al. Iron-carbon micro-electrolysis substrate for constructed wetland: Interaction mechanisms, performance and ecological effects [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(4): 1196-1208(in Chinese).
- [13] 余帅奇, 陈红, 薛罡, 等. 铁碳微电解处理印染废水的作用机制[J]. *化工环保*, 2021, 41(6): 699-704.
SHE S Q, CHEN H, XUE G, et al. Mechanism for treatment of dyeing wastewater by Fe-C micro-electrolysis[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2021, 41(6): 699-704(in Chinese).
- [14] 付舒. 电絮凝-铁碳微电解协同处理垃圾渗滤液及其机理研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
FU S. Study on the treatment of landfill leachate by electrocoagulation coupled with iron-carbon micro-electrolysis and its mechanism[D]. Tianjin: Tiangong University, 2022 (in Chinese).
- [15] NÚÑEZ J, YEBER M, CISTERNAS N, et al. Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 371: 705-711.
- [16] ABDULRAZZAQ NN, AL-SABBAGHBH, SHANSHOOLH A. Coupling of electrocoagulation and microflotation for the removal of textile dyes from aqueous solutions[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40: 101906.
- [17] 钱光磊, 谢陈鑫, 陆彩霞, 等. 基于电絮凝法处理矿区高浓度含氟地下水动力学分析[J]. *环境工程学报*, 2023, 17: 3525-3533.
QIAN G L, XIE C X, LU C X, et al. Kinetic analysis of treating high fluorine groundwater in mining area by electrocoagulation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(11): 3525-3533(in Chinese).
- [18] DONG W J, GU X R, SHU Y, et al. Pulse electrocoagulation combined with a coagulant to remove antimony in wastewater[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 47: 102749.
- [19] 王铎, 董佳甜, 吴权佳, 等. 电絮凝处理酸性矿山废水及响应面优化[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2023, 12(10): 69.
WANG D, DONG J T, WU Q J, et al. Treatment of Acid Draine by Electrocoagulation and Response Surface Optimization[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2023, 12(10): 69(in Chinese).
- [20] 边朝阳, 凌新, 吴凯霖, 等. 电絮凝降解含铬黑 T 印染废水的研究[J]. *山东化工*, 2022, 51(4): 207-209.
BIAN C Y, LING X, WU K L, et al. Study on the degradation of dyeing wastewater containing chrome black T by electro-flocculation[J]. *Shandong Chemical Industry*. 2022, 51(4): 207-209(in Chinese).
- [21] 张梦迪, 张维, 姚继明. 靛蓝废水无机盐环境下铝极板溶解与电化学行为分析[J]. *精细化工*, 2023, 40(5): 1123-1129, 1148.
ZHANG M D, ZHANG W, YAO J M. Analysis of aluminum electrode dissolution and electrochemical behavior in inorganic salt environment of indigo wastewater[J]. *Fine Chemicals*, 2023, 40(5): 1123-1129, 1148(in Chinese).
- [22] 林继辉, 谢冰冰, 周梦婷, 等. 响应面优化电芬顿法降解印染废水工艺研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(2): 139-146.
LIN J H, XIE B B, ZHOU M T, et al. Optimization of electro-fenton process for degradation of printing and dyeing wastewater by response surface methodology[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2023, 41(2): 139-146(in Chinese).
- [23] YU C B, ZHE Z, WANG Q X, et al. Efficient complex extraction of Telon yellow 4R from dye wastewater and its optimization using the response surface methodology[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 300: 121887.
- [24] 张宇峰, 陈冰倩, 张健. 乙酰乙酸纤维素酯疏松纳滤膜的 (下转第 63 页)