

响应面法优化TiO₂/ACF光催化连续处理ARB废水研究

唐 维¹, 王全红², 刘永红², 王 宁², 贺 超³

(1. 烟台市城市排水服务中心, 山东烟台 264013;

2. 西安工程大学环境与化学工程学院, 陕西西安 710048;

3. 陕西科技大学环境科学与工程学院, 陕西西安 710016)

[摘要] 为解决印染废水连续化脱色处理问题, 采用自制TiO₂/ACF反应器(13.8 L)辅以Box-Behnken响应面法对酸性红B(ARB)染料废水的连续处理过程进行了研究。研究结果表明: 连续循环实验中, 当单次循环时间为103 min, 催化剂投加量为100 cm×100 cm时, ARB废水(质量浓度21 mg/L, 对应色度128倍)3组平行实验脱色率平均值为86.43%; 优化条件下连续进出水实验, ARB废水前2 h脱色率快速上升至86.29%, 连续处理12 h脱色率始终维持在86%左右, 出水基本无色。紫外-可见吸收光谱分析显示, ARB废水在515 nm处最大吸收峰随处理过程的进行明显减小直至消失, 说明TiO₂/ACF光催化技术在印染废水连续脱色应用中具有显著的效果。

[关键词] 反应器; 染料废水; 光催化; 活性碳纤维; 响应面法

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)09-0079-08

Optimization TiO₂/ACF photocatalytic continuous treatment of ARB wastewater by Response Surface Method

TANG Wei¹, WANG Quanhong², LIU Yonghong², WANG Ning², HE Chao³

(1. Yantai City Drainage Service Center, Yantai 264013, China; 2. College of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710016, China)

Abstract: To solve the problem of continuous decolorization treatment of printing and dyeing wastewater, the continuous treatment process of acid red B (ARB) dye wastewater was studied by a self-made TiO₂/ACF reactor (13.8 L) combined with the Box-Behnken response surface method. The results showed that, for the continuous-cycle experiment, under the condition of single-cycle time 103 min and the catalyst dosage 100 cm×100 cm, the average decolorization efficiency of ARB wastewater (concentration 21 mg/L, corresponding to 128 times chroma) was 86.43%. Under the optimal conditions, for the experiment with continuous inflow and outflow, the decolorization efficiency of ARB wastewater (concentration 21 mg/L, corresponding to 128 times chroma) increases rapidly to 86.29% in the first 2 h and maintained at around 86% in the following 12 h, and the effluent was basically colorless. UV-vis spectroscopy analysis showed that the maximum absorption of the ARB wastewater reached its peak at 515 nm and decreases dramatically and disappears eventually with the extended treatment time. It showed that TiO₂/ACF photocatalytic technology had a remarkable effect in the application of continuous decolorization of printing and dyeing wastewater.

Key words: reactors; dye wastewater; photocatalytic; activated carbon fiber; response surface method

随着经济的快速发展和社会的不断进步,大量染料废水的排放对水环境造成了严重危害,如何对其进行有效处理引起了人们的广泛重视^[1-3]。做为染料废水

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(22008188);陕西省重点研发项目(2018ZDXM-SF-023);陕西省科技厅重点研发项目(2020SF-413);西安工程大学(柯桥)研究生创新学院产学研协同创新项目(19KQZD06)

处理领域的研究热点之一, TiO_2 光催化技术具有无二次污染、无毒害和稳定性高等优点^[4-6], 近年来该技术取得了较多的理论和实验成果。如盖军等^[7]制备 PVDF/ TiO_2 电纺纤维膜分别光催化处理甲基橙、罗丹明 B、亚甲基蓝废水, 120 min 后降解效率分别为 64.3%、92.1%、77.3%; 李丹丹等^[8]制备 GO/ TiO_2 复合光催化剂处理 ARB 废水, 150 min 后脱色率可达 93.1%。

然而截至目前为止, 尚未见该技术实际工程应用报道^[9-10]。这是由于该技术还存在以下亟待解决的问题^[11-13]: 目前绝大多数光催化废水处理技术研究处于间歇或小规模实验室研究阶段, 需要尽快开展连续、放大规模实验研究, 在此基础上开发适合工业应用的反应器形式; 需要有效解决实际应用中光催化反应器中 TiO_2 的分离、回收和再利用等技术难题。

相关研究发现^[14-16], 活性炭纤维(activated carbon fiber, ACF)是一种具有多孔结构和大比表面积的水处理材料, 将 ACF 作为 TiO_2 基底, 可有效解决催化剂回收问题并强化光催化作用。如贾国正等^[17]使用 TiO_2 /ACF 光催化反应器连续降解苯酚废水, 苯酚去除率高达 91%。

此外, 响应面法(response surface methodology, RSM)能够准确反映实验条件与实验结果之间的关系以及不同影响因素之间的相互作用^[18-20], 近年来该方法在污染物降解研究方面得到了广泛应用。如通过 RSM

优化, M. ZULFIQAR 等^[21]使用 TiO_2 -P25 降解甲基橙染料废水, 脱色率达到 94.9%; R. MAHDAVI 等^[22]通过 ZnO/GO 复合材料对混合染料废水降解, 在优化后的操作条件下, ARB/MO 和 ARB/RhB 混合废水的去除率分别达到 95.41% 和 88.12%。

笔者通过 RSM 优化研究了 TiO_2 /ACF 反应器对 ARB 废水的连续处理过程。首先, 在连续循环实验中通过 Box-Behnken RSM 优化探索该反应器运行参数, 考察其连续循环处理效果; 其次, 在连续循环实验基础上对 ARB 废水进行连续进出水实验, 以期为相关理论与工程应用研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试剂

试剂: ARB 由福建某印染厂提供, 染料强度为 100%。

TiO_2 /ACF 催化剂: 采用低温成型法将纳米 TiO_2 负载到活性炭纤维布上自制出实验应用的 TiO_2 /ACF 催化剂^[23]。每 10 cm×10 cm 活性炭纤维布负载 TiO_2 为 171 mg, 直径为 6~10 nm 的纳米 TiO_2 颗粒为 32.1% 金红石和 67.9% 锐钛矿的混合物, TiO_2 /ACF Langmuir 比表面积为 1 445.71 m^2/g 、平均孔径为 0.67 nm。催化剂投加量按负载 TiO_2 的活性炭纤维布面积计算。

1.2 实验流程

TiO_2 /ACF 反应器降解 ARB 废水的实验流程见图 1。

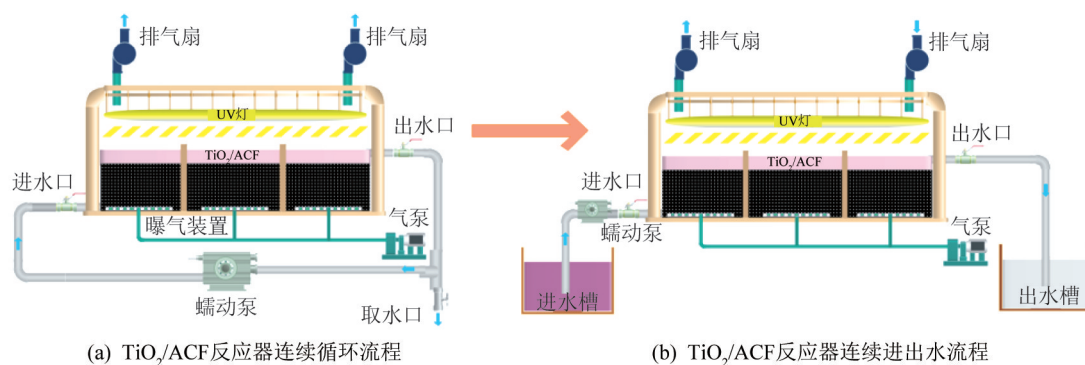


图 1 TiO_2 /ACF 反应器降解 ARB 废水实验流程

Fig. 1 Experimental process of degradation of ARB wastewater by TiO_2 /ACF reactor

图 1(a) 为连续循环实验流程, 单因素实验与 RSM 优化实验均以该流程开展。图 1 中的 TiO_2 /ACF

反应器体积为 13.8 L, 主要包括进出水系统、反应区和光源。进水与出水方式为下进上出, TiO_2 /ACF 以

折叠立式状态均匀布置于反应区,整个反应区被两块挡板分为3个反应槽,挡板与催化剂形态使ARB废水在反应区内折流流动,反应槽底部分别设置曝气系统。光源采用无极紫外灯,波长为254 nm,光强为1 200 W/cm²。

1.3 实验方法

连续循环实验:单因素实验与RSM优化实验均按连续循环光催化反应流程进行。通过分别改变单次循环时间(30~150 min)、ARB废水质量浓度[10~50 mg/L(对应色度倍数为100~300倍)]、TiO₂/ACF投加量(40 cm×40 cm~100 cm×100 cm),研究单次循环时间、ARB废水浓度与TiO₂/ACF投加量对ARB废水脱色效果的影响,采用RSM优化后的运行参数进行3组平行实验。

连续进出水实验:依据连续循环实验优化结果,考察该反应器连续进出水运行对ARB废水的处理效果。

1.4 表征与分析方法

水样吸光度通过752N紫外-可见分光光度计测定。紫外-可见分光光度计测得ARB废水的最大吸收波长为515 nm。水样吸光度与浓度在515 nm处呈线性关系,根据式(1)计算ARB废水脱色率。

$$\eta = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 、 C_t ——分别表示水样初始质量浓度和降解后质量浓度,mg/L;

A_0 、 A_t ——分别为水样初始吸光度和降解后吸光度

η ——ARB废水脱色率,%。

2 结果与讨论

2.1 TiO₂/ACF 反应器运行过程单因素实验结果分析

为探索实验各参数适宜范围,将单次循环时间设置变量1~5分别为30、60、90、120、150 min,ARB废水浓度设置变量1~5分别为10、20、30、40、50 mg/L, TiO₂/ACF总投加量设置变量1~4分别为40 cm×40 cm、60 cm×60 cm、80 cm×80 cm和100 cm×100 cm分别进行单因素实验,结果见图2。

由图2可知,随着单次循环时间增加,ARB废水

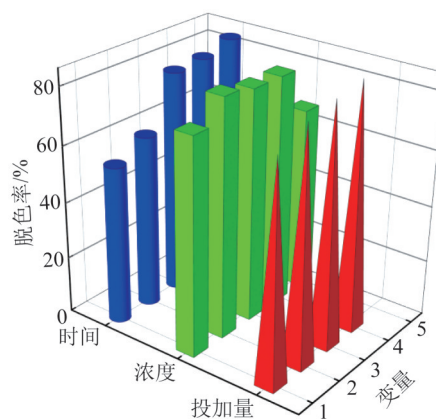


图2 不同运行条件下ARB废水脱色率对比

Fig. 2 Comparison of decolorization rate of ARB wastewater under different operating conditions

的脱色率也逐渐增加,单次循环时间在90~150 min范围内ARB废水脱色率较高,循环处理150 min后ARB废水脱色率最大达到82.8%。随着ARB废水初始浓度的提高,ARB废水脱色率整体呈缓慢下降的趋势,其中染料废水质量浓度在20~40 mg/L时脱色率均达到77%以上,质量浓度为20 mg/L时脱色率最大达到83.8%。随着反应器内催化剂总投加量的增加,ARB废水脱色率逐渐增大,投加量为60 cm×60 cm~100 cm×100 cm时废水脱色率均达到80%以上。

综上,当单次循环时间为90~150 min,ARB废水质量浓度为20~40 mg/L, TiO₂/ACF催化剂投加量为60 cm×60 cm~100 cm×100 cm时ARB废水脱色率较高。

2.2 Box-Behnken 响应面优化分析与验证

2.2.1 Box-Behnken 实验设计

在单因素实验基础上,以单次循环时间(X_1)、ARB废水浓度(X_2)、催化剂投加量(X_3)为自变量,脱色率为响应值,设计三因素三水平Box-Behnken模型进行响应面法优化实验,实验设计见表1。

表1 响应面因素水平编码

Table 1 Response surface factor level coding

因素	代码	编码水平		
		-1	0	1
运行时间/min	X_1	90	120	150
质量浓度/(mg·L ⁻¹)	X_2	20	30	40
投加量/(cm×cm)	X_3	60×60	80×80	100×100

2.2.2 响应面回归模型可信度分析

模型所需的因变量及其响应值见表2,用 Design-Expert Software 8.0.6 对表2中实验数据进行拟合得出脱色率预测值以及单次循环时间(X_1)、ARB废水浓度(X_2)、催化剂投加量(X_3)与脱色率(Y)之间的二次多项回归方程为:

$$Y=16.273\ 17+0.791\ 64X_1-0.459\ 20X_2+0.317\ 36X_3-1.996\times 10^{-3}X_1X_2-4.709\ 96\times 10^{-3}X_1X_3+2.149X_2X_3-1.360\ 24\times 10^{-3}X_1^2-0.011\ 393X_2^2+1.913\ 97\times 10^{-3}X_3^2\ (R^2=0.978\ 5)$$

表2 脱色率响应面分析实验结果

Table 2 Experimental results of decolorization rate response surface analysis

序号	编码水平			去除率/%	
	X_1	X_2	X_3	实验值	预测值
1	-1	-1	0	84.67	84.70
2	1	-1	0	88.01	87.61
3	-1	1	0	79.66	80.06
4	1	1	0	80.61	80.57
5	-1	0	-1	79.06	79.00
6	1	0	-1	85.98	86.36
7	-1	0	1	89.95	89.57
8	1	0	1	85.57	85.63
9	0	-1	-1	86.10	86.12
10	0	1	-1	79.76	79.42
11	0	-1	1	89.83	80.17
12	0	1	1	85.21	85.19
13	0	0	0	85.00	85.60
14	0	0	0	85.53	85.60
15	0	0	0	84.56	85.60
16	0	0	0	86.42	85.60
17	0	0	0	86.49	85.60

采用方差分析(ANOVA)评估二次多项式回归方程模型见表3。

由表3可知,线性系数 X_2 和 X_3 极显著, X_1 高度显著,二次项系数 X_1X_3 极显著, X_1^2 和 X_2^2 高度显著,而 X_1X_2 、 X_2X_3 和 X_3^2 无显著影响^[24]。此外, $P_{失拟项}=0.762\ 3>0.05$, $F=35.32$, $P_{模拟}<0.000\ 1$,表明所建立的回归模型极显著。3个影响因素中,单次循环时间(X_1)、ARB废水浓度(X_2)、催化剂投加量(X_3)的 F 值分别为10.90、127.09、90.01,表明该三因素对脱色率的影响力大小为^[25]:ARB废水浓度>催化剂投加量>单次循环时间。

此外, $R^2(0.978\ 5)$ 和 $R_{adj}^2(0.950\ 8)$ 值表明所建立的模型代表了响应值与自变量之间的实际关系, $R_{adj}^2-R_{pred}^2=0.950\ 8-0.894\ 8=0.056<0.2$,变异系数值

表3 脱色率方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis of decolorization efficiency

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值 (Prob> F)
模型	170.62	9	18.96	35.32	<0.000 1
X_1	5.85	1	5.85	10.90	0.013 1
X_2	68.21	1	68.21	127.09	<0.000 1
X_3	48.31	1	48.31	90.01	<0.000 1
X_1X_2	1.43	1	1.43	2.67	0.146 1
X_1X_3	31.94	1	31.94	59.52	0.000 1
X_2X_3	0.74	1	0.74	1.38	0.279 0
X_1^2	6.31	1	6.31	11.76	0.011 0
X_2^2	5.47	1	5.47	10.18	0.015 3
X_3^2	2.47	1	5.47	4.60	0.069 2
残差	3.76	7	0.54		
失拟项	0.86	3	0.29	0.40	0.762 3
纯误差	2.89	4	0.72		
总离差	174.38	16			

注: $P<0.001$ 为极显著, $P<0.01$ 为高度显著, $P<0.05$ 为显著。

为0.86%,小于10%,信噪比为19.88,远高于最低信噪比4,这表明模型可信度满足研究要求^[26]。

2.2.3 响应曲面分析

根据单次循环时间(X_1)、ARB废水浓度(X_2)、催化剂投加量(X_3)与脱色率(Y)之间的二次多项回归方程,利用 Design Expert Software 8.0.6 软件得出响应面和等高线,结果见图3。

由图3(a)可知,ARB废水初始质量浓度从20 mg/L提升到40 mg/L,ARB废水脱色率明显降低,单次循环时间从90 min增加到120 min,ARB废水脱色率增加。两者同时增加时,ARB废水脱色率缓慢增加。由图3(b)可知,随着催化剂投加量从70 cm×70 cm增加到100 cm×100 cm,ARB废水脱色率明显增加,催化剂投加量与单次循环时间同时增加时ARB废水脱色率显著提高。由图3(c)可知,ARB废水浓度与催化剂投加量对ARB废水脱色率都具有显著影响,催化剂投加量增加与ARB废水浓度增加时ARB废水脱色率缓慢降低。

根据所建立模型对各实验因子进行优化分析发现,当单次循环时间为103 min,ARB废水初始质量浓度为21 mg/L(对应色度128倍),催化剂投加量为100 cm×100 cm时ARB废水脱色率最高,模型预测值达到90.56%。

2.2.4 响应面优化条件下的验证实验

根据以上分析结果,将单次循环时间设定为103 min,

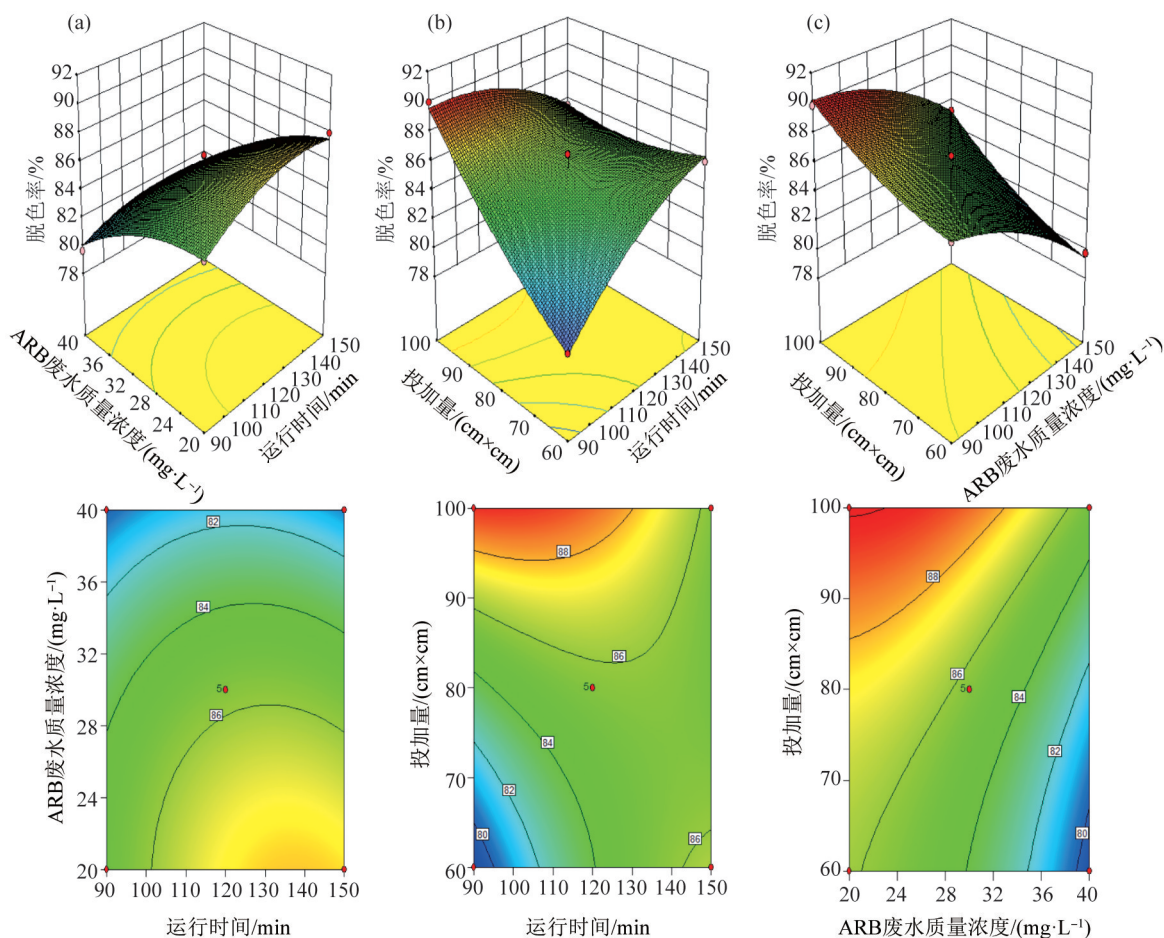


图3 单次循环时间、ARB废水浓度、催化剂投加量对ARB废水脱色率影响的响应面和等高线

Fig. 3 Response surface and contour plots of single-cycle time, ARB wastewater concentration, and catalyst dosage on decolorization efficiency of ARB wastewater

催化剂投加量为100 cm×100 cm, ARB废水初始质量浓度为21 mg/L, 共进行3次连续循环平行实验。3组平行实验脱色率分别达到84.27%、87.94%、87.07%, 平均值高达86.43%, 与崔玉民等^[27]采用WO₃/TiO₂薄膜光催化间歇处理ARB废水5 h脱色率为94.8%的结果相比, 虽然脱色率略低但处理时间优势明显, 且实验为连续运行。此外, 本次实验脱色率实验值(86.43%)与最优脱色率预测值(90.56%)吻合度为95.4%, 在预测区间带的95%范围内, 说明通过响应面法优化光催化反应器运行参数是成功的^[28]。

2.3 ARB废水TiO₂/ACF反应器连续进出水脱色过程

为探究本反应器对ARB废水脱色的持久性以及实用性, 以单次循环时间(103 min)为光催化反应器水力停留时间(HRT), ARB废水初始质量浓度(21 mg/L)和催化剂投加量(100 cm×100 cm)不变,

进行12 h的连续进出水实验。同时与空白光照(仅高压汞灯光照+曝气)和暗态吸附(仅催化剂吸附+曝气)进行对比, 结果见图4。

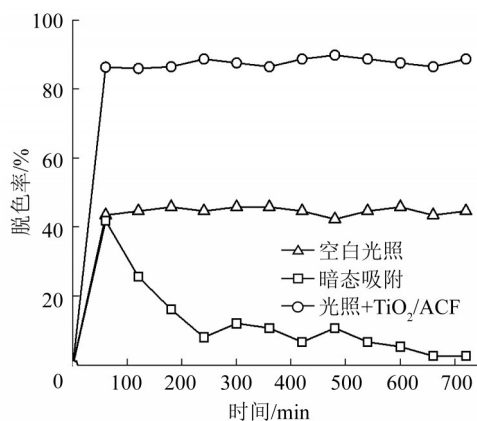


图4 连续进出水实验3种条件下对ARB废水的脱色效果

Fig. 4 Decolorization effect of ARB dye wastewater under three conditions of continuous inflow and outflow experiment

由图4可知, TiO_2/ACF 反应器对 ARB 废水处理可快速达到稳定状态, 处理 2 h 脱色率达到 86.29%, 持续连续运行 10 h 后光照+ TiO_2/ACF 条件下对 ARB 废水脱色率始终稳定在 86% 左右, 色度低于 8 倍。另外, 光照+ TiO_2/ACF 条件下对 ARB 废水脱色率远大于单一空白光照与暗态吸附条件, 空白光照与暗态吸附条件下对 ARB 废水的脱色率基本在 40% 以下。这说明 TiO_2/ACF 的吸附-光催化协同作用对 ARB 废水连续化处理具有明显技术优势。

TiO_2/ACF 光催化技术与其他处理方法相比具有自身优势, 如与张环等^[29]采用 Fe^0 -PDADMAC/PAA 复合膜对 ARB 废水还原的降解效果(85%)相比, 其处理结果基本一致且不存在膜污染问题, 刘群等^[30]采用玉米秸秆/聚苯胺通过间歇、小规模(处理废水 0.1 L)吸附处理酸性红 B 废水, 脱色率达到 93.4%, 虽然脱色效果优于本次实验, 但本次研究具有处理规模大(处理废水 96 L)且连续运行等优势。此外, 同已有光催化连续运行研究结果相比同样具有优势, 与 Huabing JIANG 等^[31]采用光催化反应器(处理废水 3.5 L)对 ARB 废水连续处理脱色率逐渐降低(结束时<80%)相比, 本次研究具有规模大、稳定性高和可持续性强的优势。因此, TiO_2/ACF 光催化技术在染料废水连续化脱色处理方面具有明显的潜在应用前景。

2.4 降解机理分析

ARB 废水进入光催化反应器后, 通过 TiO_2/ACF 的吸附-光催化协同作用被脱色降解, 降解机理与紫外-可见光光谱图分析见图5。

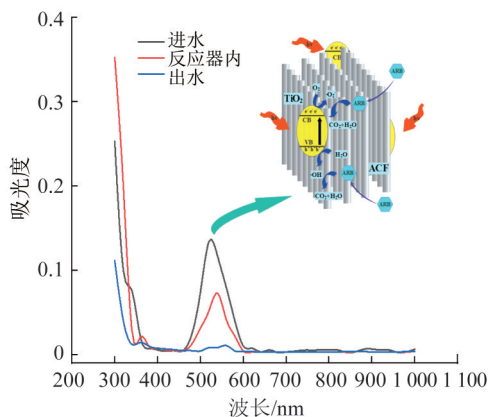


图5 ARB降解紫外-可见光光谱图和ARB降解机理图

Fig. 5 UV-Vis spectra and mechanism of ARB degradation

由图5可知, ARB 废水进入反应器后, ACF 将水中游离的 ARB 染料分子快速吸附富集到 TiO_2 周围, 在高压汞灯照射下, TiO_2 表面导带上的电子吸收光能, 当光的照射能量大于 TiO_2 粒子的带隙跃迁能时, 可以激发一个电子从导带跃迁至价带, 生成光生空穴和光生电子并迁移至催化剂表面^[32]。具有强氧化力的光生空穴将 TiO_2 表面上吸附的 OH^- 和 H_2O 氧化为 $\cdot\text{OH}$, 光生电子与 O_2 反应形成超氧自由基 ($\cdot\text{O}_2^-$), 在反应介质中形成 $\cdot\text{OH}$ 。空穴、 $\cdot\text{O}_2^-$ 与 $\cdot\text{OH}$ 同 ARB 染料分子相互作用并使之分解。

由图5还可知, 随着反应的进行, 酸性红 ARB 废水在 515 nm 处吸收峰显著降低且出水吸收峰发生红移, 说明 ARB 染料分子的偶氮键 ($-\text{N}=\text{N}-$) 共轭发色体系在反应器内被攻击破坏, 形成萘环与羟基共轭体系, 导致反应器内 ARB 废水在 300~350 nm 处吸光度高于进水, 随着反应的进行, 出水吸光度逐渐降低, 萘环与羟基共轭体系被破坏。因此, 经过 TiO_2/ACF 光催化反应器处理后, ARB 分子中发色基团与芳香结构已被破坏, 进一步被降解为小分子中间体甚至被完全矿化为 CO_2 和 H_2O ^[33]。通过这一系列反应过程将富集在 TiO_2 周围的 ARB 染料分子降解, 使光催化反应器中 TiO_2/ACF 原位再生, 从而将 ARB 废水连续化脱色处理。此外, 实验从开始到结束未更换 TiO_2/ACF 光催化剂且没进行清洁处理, 而 TiO_2/ACF 反应器始终稳定高效地运行, 进一步证明该催化剂在反应器内发生原位再生效应。

3 结论

与近年来相关研究报道相比, 本研究所采用的 TiO_2/ACF 反应器体积大且为连续运行模式, 研究结果表明 TiO_2/ACF 光催化技术在染料废水的连续化脱色处理中具有潜在应用价值, 主要研究结论如下:

(1) 连续循环实验中, 单次循环时间 103 min, 催化剂投加量 100 cm×100 cm 的操作条件下, 21 mg/L ARB 废水的脱色率达到 86.43%。

(2) 12 h 连续进出水实验中, 21 mg/L ARB 废水 2 h 时脱色率即达到 86.29%, 之后始终稳定在 86% 左右。

参考文献

[1] 贾艳萍, 姜成, 郭泽辉, 等. 印染废水深度处理及回用研究进展[J].

- 纺织学报, 2017, 38(8): 172-180.
- JIA Yanping, JIANG Cheng, GUO Zehui, et al. Research progress on deep treatment and recycling of dye wastewater[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(8): 172-180.
- [2] 薛罡. 印染废水治理技术进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(9): 10-17.
- XUE Gang. Technology progress of dyeing wastewater treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(9): 10-17.
- [3] 张庆云, 谢学辉, 柳建设. 微生物共代谢处理印染废水研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(9): 3492-3501.
- ZHANG Qingyun, XIE Xuehui, LIU Jianshe. Research overview of microbial co-metabolism on printing and dyeing wastewater treatment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(9): 3492-3501.
- [4] 李宁, 张伟, 李贵贤, 等. TiO₂光催化剂的研究进展[J]. 精细化工, 2021, 38(11): 2181-2188.
- LI Ning, ZHANG Wei, LI Guixian, et al. Research progress of TiO₂ photocatalysts[J]. Fine Chemicals, 2021, 38(11): 2181-2188.
- [5] NABI I, BACHA A U R, AHMAD F, et al. Application of titanium dioxide for the photocatalytic degradation of macro- and micro-plastics: A review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 105964.
- [6] SINGH L P, DHAKA R K, ALI D, et al. Remediation of noxious pollutants using nano-titania-based photocatalytic construction materials: A review[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(26): 34087-34107.
- [7] 盖军, 冯阳阳, 柴鹏, 等. PVDF/TiO₂电纺纤维膜在光降解和油水分离方面的应用[J]. 功能高分子学报, 2021, 34(5): 483-489.
- GAI Jun, FENG Yangyang, CHAI Peng, et al. Application of PVDF/TiO₂ electrospun fiber membrane in photodegradation and oil-water separation[J]. Journal of Functional Polymers, 2021, 34(5): 483-489.
- [8] 李丹丹, 姚广铮, 梁桂琰, 等. 氧化石墨烯复合二氧化钛光催化剂的制备及模拟染料废水处理[J]. 材料工程, 2019, 47(12): 104-110.
- LI Dandan, YAO Guangzheng, LIANG Guiyan, et al. Preparation of GO/TiO₂ composite photocatalyst and treatment of synthetic dye wastewater[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(12): 104-110.
- [9] RAY A K. Photocatalytic reactor configurations for water purification: Experimentation and modeling[J]. Advances in Chemical Engineering, 2009, 36: 145-184.
- [10] FARID M, MIRVET A, NACERA Y M. Degradation of atenolol in a rectangular staircase photocatalytic reactor with immobilized ZnO[J]. Chemical Engineering & Technology, 2021, 44(1): 140-147.
- [11] CATES E L. Photocatalytic water treatment: So where are we going with this?[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(2): 757-758.
- [12] SACCO O, VAIANO V, SANNINO D. Main parameters influencing the design of photocatalytic reactors for wastewater treatment: A mini review[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2020, 95(10): 2608-2618.
- [13] IRSHAD M A, NAWAZ R, REHMAN M Z U, et al. Synthesis, characterization and advanced sustainable applications of titanium dioxide nanoparticles: A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 212: 111978.
- [14] 刘明浩, 宋武林, 卢照, 等. 纳米二氧化钛固相载体研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9108-9114.
- LIU Minghao, SONG Wulin, LU Zhao, et al. Research progress of the nano titanium dioxide solid support[J]. Materials Reports, 2021, 35(9): 9108-9114.
- [15] 李晓良, 路思佳, 郑兴, 等. 活性碳纤维修饰PbO₂电极的制备及其对阿莫西林的降解解毒研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 3985-3992.
- LI Xiaoliang, LU Sijia, ZHENG Xing, et al. Fabrication of PbO₂ electrode modified by activated carbon fiber and its degradation and detoxification of amoxicillin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10): 3985-3992.
- [16] YAN Shuhan, YU Junwei, ZHU Bo, et al. Photocatalytic application of TiO₂-loaded viscose-based activated carbon fibers composite catalyst: Degradation of low concentration formaldehyde and simultaneous anti-microbe[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2021, 10(1): 011002.
- [17] 贾国正, 王志良, 张勇, 等. TiO₂/ACF光催化反应器的设计及降解苯酚的研究[J]. 环境工程, 2009, 27(6): 46-49.
- JIA Guozheng, WANG Zhiliang, ZHANG Yong, et al. Research on photocatalytic degradation of phenol in waste water using TiO₂/ACF and designing photocatalytic reactor[J]. Environmental Engineering, 2009, 27(6): 46-49.
- [18] ANFAR Z, AIT AHSAINE H, ZBAIR M, et al. Recent trends on numerical investigations of response surface methodology for pollutants adsorption onto activated carbon materials: A review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020, 50(10): 1043-1084.
- [19] 吴智君, 罗洁, 欧安琪, 等. 响应面法优化Fe/TiO₂纳米管阵列的制备及其光催化性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(8): 8199-8205.
- WU Zhijun, LUO Jie, OU Anqi, et al. Optimization of the photocatalytic performance for the Fe/TiO₂ nanotube arrays by response surface methodology[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(8): 8199-8205.
- [20] CHAKER H, ATTAR A E, DJENNAS M, et al. A statistical modeling-optimization approach for efficiency photocatalytic degradation of textile azo dye using cerium-doped mesoporous ZnO: A

- central composite design in response surface methodology [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 171: 198-212.
- [21] ZULFIQAR M, CHOWDHURY S, OMAR A A, et al. Response surface methodology and artificial neural network for remediation of acid orange 7 using TiO_2 -P25: Optimization and modeling approach [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(27): 34018-34036.
- [22] MAHDAVI R, ASHRAF TALESH S S. Enhanced selective photocatalytic and sonocatalytic degradation in mixed dye aqueous solution by ZnO/GO nanocomposites: Response surface methodology [J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 267: 124581.
- [23] LIU Zongkuan, HE Yanling, LI Feng, et al. Photocatalytic treatment of RDX wastewater with nano-sized titanium dioxide [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2006, 13(5): 328-332.
- [24] AHMADI M, SEYED DORRAJI M S, HAJIMIRI I, et al. The main role of CuO loading against electron-hole recombination of SrTiO_3 : Improvement and investigation of photocatalytic activity, modeling and optimization by response surface methodology [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2021, 404: 112886.
- [25] 王鹏辰, 莫娟, 谢汝桢, 等. 响应曲面优化柏木屑微波活性炭的制备及其吸附 AR88 性能 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 6109-6116.
- WANG Pengchen, MO Juan, XIE Ruzhen, et al. Cypress sawdust based activated carbon preparation and its adsorptive capacity towards macromolecule dye (AR88): Optimization by surface methodology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(11): 6109-6116.
- [26] HASSAN T M, HOSSAIN M S, KASSIM M H M, et al. Optimizing the acid hydrolysis process for the isolation of microcrystalline cellulose from oil palm empty fruit bunches using response surface methods [J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(6): 2755-2770.
- [27] 崔玉民, 张文保. WO_3/TiO_2 薄膜光催化降解 ARB 性能研究 [J]. 稀有金属, 2008(4): 489-492.
- CUI Yumin, ZHANG Wenbao. Photocatalytic activity of WO_3/TiO_2 thin film on photocatalytic degradation of ARB [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008(4): 489-492.
- [28] MOHSENZADEH M, MIRBAGHERI S A, SABBAGHI S. Degradation of 1, 2-dichloroethane by photocatalysis using immobilized PAni-TiO_2 nano-photocatalyst [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(30): 31328-31343.
- [29] 张环, 王一冰, 魏俊富, 等. Fe^0 -PDADMAC/PAA 复合膜还原降解酸性红 B [J]. 天津工业大学学报, 2017, 36(6): 33-38.
- ZHANG Huan, WANG Yibing, WEI Junfu, et al. Reductive degradation of ARB by Fe^0 -PDADMAC/PAA composite membrane [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2017, 36(6): 33-38.
- [30] 刘群, 李亚萍, 宋伟广, 等. 玉米秸秆/聚苯胺复合吸附剂对弱酸性红 B 染料废水的处理 [J]. 毛纺科技, 2018, 46(12): 38-41.
- LIU Qun, LI Yaping, SONG Weiguang, et al. The study on the adsorption treatment of tracid brilliant red B dye wastewater using polyaniline/maize straw compound adsorbent [J]. Wool Textile Journal, 2018, 46(12): 38-41.
- [31] JIANG Huabing, ZHANG Guoliang, HUANG Tao, et al. Photocatalytic membrane reactor for degradation of acid red B wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(3): 571-577.
- [32] JIN Huan, WANG Juan, JI Yun, et al. Synthesis of $\text{Ta/Al-Fe}_2\text{O}_3$ film electrode and its photoelectrocatalytic performance in methylene blue degradation [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2015, 31(5): 955-964.
- [33] LI Linbo, LEI Wei, HONG Tao. Persulfuric acid oxidation mechanism of acid red B wastewater [J]. Advanced Materials Research, 2011, 233/234/235: 399-402.
-
- [作者简介] 唐维(1975—)。E-mail: 2522117456@qq.com。通讯作者: 刘永红, 博士, 教授。E-mail: liuyhxa@hotmail.com。
- [收稿日期] 2022-07-03(修改稿)