

三维电极电-Fenton 法处理硝基苯废水试验

李亚峰,郭鹏成

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究三维电极电-Fenton 法处理硝基苯废水的工艺条件及各因素的影响规律,为电-Fenton 法在硝基苯废水处理领域的应用提供技术支撑。方法 通过单因素试验,分析 pH 值、电流强度、极板间距及曝气强度等对处理废水效果的影响;通过正交试验确定最优反应条件。结果 Fe-C 电极的处理效果优于 C-C 电极,活性炭和纳米铁混合三维粒子电极的处理效果优于其他两种单一粒子三维电极。初始 pH 值、极板间距、电流强度、曝气强度对三维电极电-Fenton 法处理硝基苯废水的效果有影响,当初始 pH 值为 3.5、极板间距为 8 cm、电流为 1.5 A、曝气强度 $0.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时,COD 平均去除率可达到 83.01%。结论 三维电极电-Fenton 法的氧化能力高于传统电-Fenton 法,对硝基苯废水具有较理想的处理效果。

关键词 三维电极;活性炭;硝基苯废水;电-Fenton

中图分类号 TU99;X703

文献标志码 A

Experiment on Treatment of Nitrobenzene Wastewater by Three-dimensional Electrode Electro-Fenton Method

LI Yafeng, GUO Pengcheng

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

Abstract: To the application of electrofenton process in the field of nitrobenzene wastewater treatment, the operation conditions and effects of various factors in the treatment of nitrobenzene wastewater by three-dimensional electrode-electro-fenton process were studied. The effects of pH value, current intensity, plate spacing and aeration intensity on wastewater treatment were studied and analyzed by single factor test. The optimum reaction conditions were determined by orthogonal test. The treatment effect of Fe-C electrode is better than that of C-C electrode, and the treatment effect of the three-dimensional particle electrode mixed with activated carbon and nano-iron is better than that of the other two single particle three-dimensional electrodes. The initial pH value, plate spacing, current intensity and aeration intensity have an effect on the treatment of nitrobenzene wastewater by three-dimensional electrode-electro-Fenton process. When the initial pH value is 3.5, plate spacing is 8 cm, current intensity is 1.5 A and aeration intensity is

收稿日期:2021-10-14

基金项目:“十三五”国家计划水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-001)

作者简介:李亚峰(1960—),男,教授,主要从事水污染控制理论与技术等方面研究。

0.8 m³/h,the average COD removal rate can reach 83.01%. The oxidation capacity of three-dimensional electrofenton process is higher than that of traditional electrofenton process,and has a better treatment effect on nitrobenzene wastewater.

Key words:three-dimensional electrode;activated carbon;nitrobenzene wastewater;electric fenton

硝基苯(NB)作为一种芳烃类的化合物,是具代表性的有机难降解物质^[1],严重危害生态环境。对动植物危害很大,会引起人体血红蛋白变性^[2]。这类有机污染物若直接排放对生物会造成极强的毒害,因此国家已将其列为重点管控的污染物质^[3]。但因是化工生产中的重要原材料与中间体,在很多的领域都拥有广泛的应用^[4],近些年化工产业快速发展,对硝基苯的需求量随之增加^[5],导致相应的废水排放量也在与日俱增^[6-8]。笔者拟采用三维电极电-Fenton 高级氧化法处理硝基苯废水,使之达到国家标准的排放要求。

1 试 验

1.1 材料与仪器

试验所用材料:硝基苯、邻苯二甲酸氢钾、钼酸铵、无水 Na₂SO₄、AgSO₄、FeSO₄·7H₂O、H₂O₂、NaOH 均为分析纯;H₂SO₄、K₂Cr₂O₇ 均为优级纯。

试验检验仪器:UV759 紫外可见分光光度计、JJ—4A 电动搅拌器、LZB-3WB 转子流量计(气)、X—6500 空气压缩机、80—2B 离心机、DHG—9246A 鼓风干燥箱、电流表、电压表。

1.2 试验装置及方法

1.2.1 试验装置

试验装置由电极搅拌机、阳极和阴极电极板、气体流量计、电流表、空气压缩装置等组成,如图 1 所示。

电解槽采用透明有机玻璃制成,长宽高为 20 cm×8 cm×20 cm。阳极采用铁电极板,阴极采用石墨电极板,长宽厚均为 20 cm×6 cm×3 mm,满足电极板与电解槽

充分利用,使得电极板间的电流有效地由阴极传递到阳极。在反应器壁一侧装有二分之一球阀,用以改变反应器内部的曝气,并利用转子流量计确定曝气量。在电解槽中安装搅拌机,对整个电解槽中的废水进行充分搅拌,使得三维电极对硝基苯废水的处理更加充分。

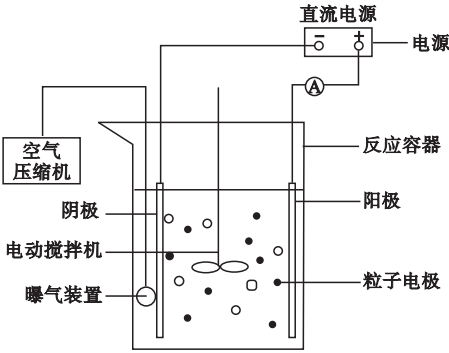


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 ketch map of test device

1.2.2 试验方法

试验使用自行配制的模拟废水,在反应器中,将 0.5 g 的硝基苯与 1.0 mL 的 C₂H₅OH 混合,加入蒸馏水将其稀释至 2 L,放置于无光条件下 24 h 之后进行试验,在此条件下,废水中 COD 的质量浓度为 675 mg/L。

选取最佳的电极材料和粒子填充物^[9-10],包括极板材料、三维粒子材料的半径、投加量及投加比例。在最佳电极材料条件下,进行 pH 值、电流强度、极板间距及曝气强度等单因素试验。设置四因素三水平的正交试验,确定各因素对废水降解影响的顺序,确定并验证在最佳反应条件下,三维电极电-Fenton 法处理硝基苯废水的降解效果。

1.3 分析方法

硝基苯测定采用还原-偶氮光度法,通

过测定溶液在波长为 545 nm 处的吸光度值, 代入标准曲线计算得到其质量浓度。标准曲线为 $y = 0.012\ 97x + 0.000\ 6$, $R^2 = 0.999\ 9$ 。硝基苯降解率为

$$\alpha = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \tag{1}$$

式中: α 为 t 时刻硝基苯废水的降解率, %; c_0 为硝基苯的初始质量浓度, $\mu\text{g/L}$; c_t 为 t 时刻溶液中硝基苯的质量浓度, $\mu\text{g/L}$ 。

COD 的测定采用快速密闭催化消解法。将波长为 600 nm 处的吸光度值, 代入水样的 COD 质量浓度。标准曲线为

$$y = 2.083 \times 10^{-4}x + 4.147 \times 10^{-5}, R^2 = 0.998\ 97. \tag{2}$$

COD 去除率为

$$\beta = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \tag{3}$$

式中: β 为电解后废水的 COD 去除率, %; c_0 为原水中 COD 的质量浓度, mg/L ; c_t 为电解后溶液中 COD 的质量浓度, mg/L 。

2 结果与分析

2.1 电极材料

设置固定条件如下: 进水 COD 的质量浓度为 675 mg/L , 极板间距为 9 cm, 调节 pH 值为 3, 电流为 1.4 A, 电解质 Na_2SO_4 投加量为 4.0 g/L , 曝气强度为 0.8 m^3/h 。

2.1.1 极板材料选取

在不添加粒子电极的固定条件下, 分别使用 Fe-C 电极和 C-C 电极进行试验, 两种极板装置处理硝基苯废水的对比如图 2 所示。

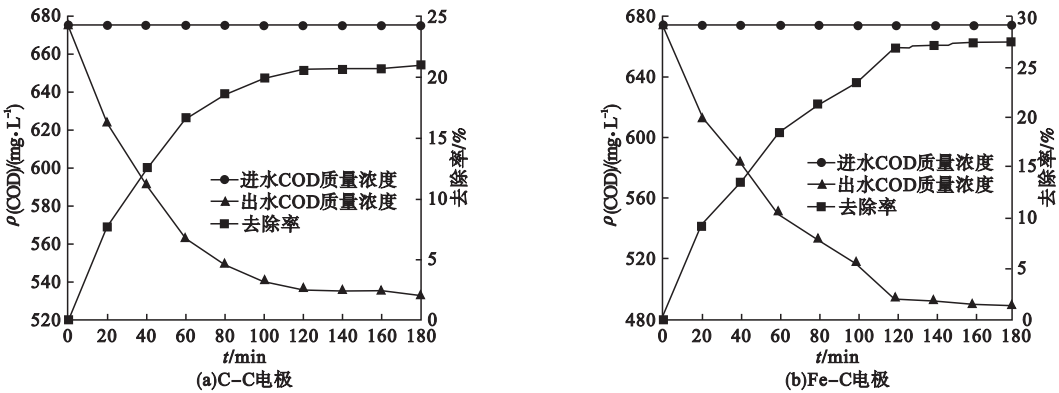


图 2 两种电极装置对硝基苯废水的处理效果

Fig. 2 Treatment effect of nitrobenzene wastewater with two kinds of electrodes

C-C 电极的加入形成了电化学反应, 硝基苯废水的降解效果不断地增强。当反应时间为 20 min 时, 出水中 COD 的去除率仅达到 7.65%; 随着反应时间的增加, 降解效果还在不断增强, 但降解效率有所下滑。

Fe-C 电极随反应时间的增加, 硝基苯废水的降解效果在不断地增加。当反应时间为 20 min 时, 出水 COD 的去除率为 9.32%; 当反应时间由 40 min 到 120 min 时, 对于有机废水的降解速率较快, 出水中的 COD 质量浓度由 583.61 mg/L 减少至 492.95 mg/L , 随着反应时间的增加, 硝基苯废水的降解效

果还在不断增强, 只是降解效率有所下滑。这是由于 Fe-C 的阳极 Fe 在电化学反应的过程中会产生并释放出大量的 Fe^{2+} , 为后续的 Fenton 反应提供了所需的原料。因此, 最终选择了 Fe-C 电极作为试验电极。

2.1.2 三维电极活性炭粒径对处理效果的影响

在固定条件下, 分别向反应器内投加粒径为 0.5、1、3、5、7 mm 的活性炭 30 g, 其粒径与废水处理效果的变化趋势如图 3 所示。

随着活性炭粒径的增大, 硝基苯废水的去除率呈现出先升高后下降的趋势, 当活性

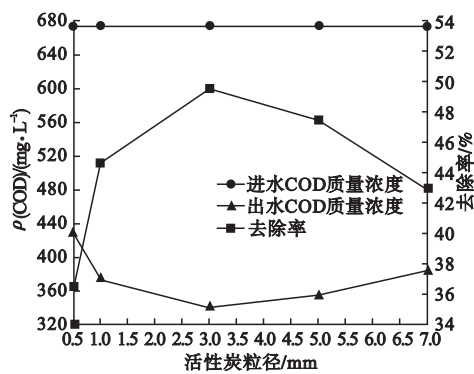


图3 活性炭粒径对硝基苯废水去除效果影响
Fig. 3 Effect of activated carbon particle size on treatment of nitrobenzene wastewater

炭的粒径增加到3.0 mm时,硝基苯废水的去除效果达到峰值为49.54%,出水中COD的质量浓度为340.61 mg/L;粒径继续变大,则硝基苯的去除效果开始下降。因此,粒径选为3.0 mm。

2.1.3 纳米铁粒子对处理效果的影响

在固定条件下,分别向反应器投加质量浓度为0、2、4、6、8、10、12 g/L的纳米铁粒子,不同质量浓度的纳米铁对废水处理的影响的变化趋势如图4所示。

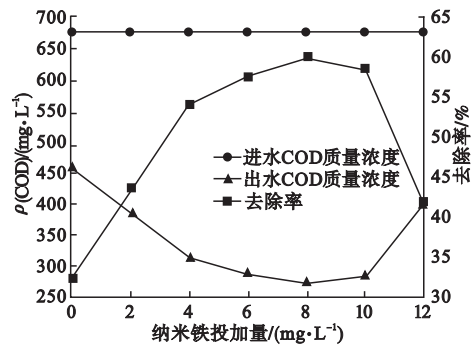


图4 纳米铁投加量对硝基苯废水去除效果影响
Fig. 4 The influence of the dosage of nanometer iron on the treatment effect of nitrobenzene wastewater

当投入纳米铁的质量浓度增加时,硝基苯废水的降解效果呈现先升高后下降的趋势,当质量浓度为8 g/L时,出水COD的质量浓度降至270.74 mg/L,COD去除率到达最大值为59.89%。然后呈下降趋势,原因是过多的Fe²⁺会与H₂O₂发生副反应,降低

氧化能力^[11-12]。因此,选取质量浓度为8 g/L纳米铁作为最佳投放量。

2.1.4 活性炭与纳米铁比例对处理效果的影响

在固定条件下,向反应器中投加活性炭与纳米铁,质量比分别为1:2、1:1、2:1、3:1、4:1、5:1的不同投加质量比对废水处理的影响的变化趋势如图5所示。

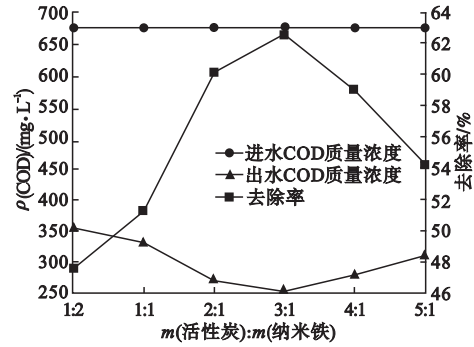


图5 活性炭与纳米铁投加质量比对硝基苯废水去除效果影响
Fig. 5 The influence of the mass ratio of nano-iron and activated carbon on the treatment effect of nitrobenzene wastewater

从图5可知,按比例投加活性炭与纳米铁的废水处理效果明显好于单独投加活性炭或纳米铁^[13]。当活性炭与纳米铁两者质量比为3:1时,出水COD的质量浓度降低至252.59 mg/L,COD去除率高达62.58%。因此,选取活性炭与纳米铁质量比3:1为最佳投加比例。

2.2 硝基苯废水去除效果的影响因素

使用Fe-C电极,以水温为25℃、进水中COD的质量浓度为675 mg/L,活性炭与纳米铁质量比为3:1、Fe²⁺投加量为0.5 mmol/L、电解质Na₂SO₄投加量为2.0 g/L、反应时间为120 min为固定条件进行。

2.2.1 pH值对去除效果的影响

在固定条件下,设定极板间距为8 cm、电流为1.4 A、曝气强度为0.8 m³/h。用1 mol/L的H₂SO₄调节pH值为1、2、3、4、5、6、7,pH值对硝基苯废水去除效果的影响如图6所示。

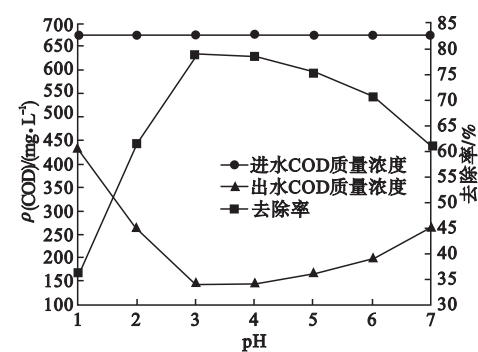


图 6 pH 对 COD 去除效果的影响

Fig. 6 The influence of pH on the removal rate of COD

随着 pH 值的增加,COD 的去除率先升高后降低。pH = 3 时,出水 COD 的质量浓度为 186.57 mg/L,COD 去除率为 78.87%,同比 pH 值为 1 和 2 时的 COD 去除率分别大幅度增加了 43.15% 和 17.49%;当 pH 大于 3 时,去除率逐渐下降,硝基苯的降解效果也逐渐变差。因为 pH 较小时,溶液中的 H^+ 过量,会发生 H^+ 被还原成 H_2 的副反应,从而影响硝基苯的去除;pH 较大时, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 易水解形成氢氧化物沉淀, $\cdot\text{OH}$ 的产生量大幅度减小,从而影响废水处理效果^[14]。因此,选取最佳 pH 为 3。

2.2.2 电流对去除效果的影响

在固定条件下,设定 pH 值为 3、曝气强度为 0.8 m³/h。调节电流为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 A,电流对硝基苯废水去除效果的影响如图 7 所示。

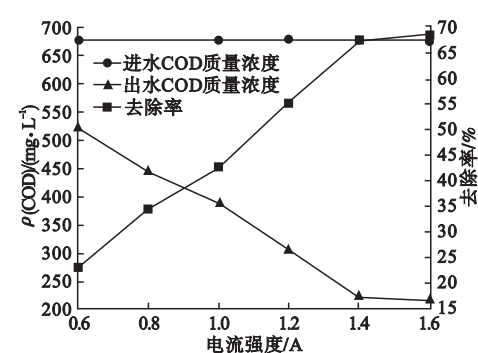


图 7 电流对 COD 去除效果的影响

Fig. 7 The influence of current intensity on the removal rate of COD

硝基苯去除率随电流的增加而升高。当电流为 0.6 A 时,出水 COD 质量浓度为 519.08 mg/L,COD 去除率仅为 23.10%;当电流继续增加为 0.8 A、1.0 A、1.2 A 时,整个反应的完整性不断加强,相比于电流为 0.6 A 时,COD 的去除率分别增长了 11.25%、19.66%、32.06%;当电流为 1.4 A 时,出水 COD 的质量浓度为 220.59 mg/L,COD 的去除率升至 67.32%;当电流升至 1.6 A 时,相比于 1.4 A 时,COD 的去除率仅提高了 1.02%。因为过大的电流使能耗增大,降低反应效率。电流过低不仅会延长反应时间,也无法达到理想的处理效果。因此,选取最佳电流为 1.4 A。

2.2.3 极板间距对去除效果的影响

在固定条件下,设定 pH 值为 3、电流为 1.4 A、曝气强度为 0.8 m³/h。分别调节阴阳两极板间距分别为 4、6、8、10、12 cm,极板间距对硝基苯废水去除效果的影响如图 8 所示。

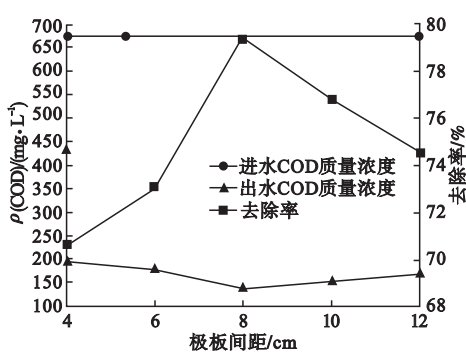


图 8 极板间距对 COD 去除效果的影响

Fig. 8 The influence of plate spacing on the removal rate of COD

当极板间距为 4 cm 时,COD 的去除率相对较低,为 70.69%;当极板间距为 6 cm 时,去除率仅仅提高了 2.33%;当极板间距为 8 cm 时,出水 COD 的质量浓度为 139.59 mg/L,COD 去除率升至最高,为 79.32%;当极板间距大于 8 cm 后,去除率开始明显下降,当极板间距为 10 cm 和 12 cm 时,COD 的去除率分别为 76.78% 和 74.52%。

因为极板间距的改变,导致电阻发生变化,当极板间距变小时,电阻变小,从而影响 COD 和硝基苯的去除效果^[15];当其距离过大时,系统电阻变大,电场作用变小,同时较大的电阻将会产生较大的热效应,降低电极的利用效率。因此,选取最佳极板间距为 8 cm。

2.2.4 曝气强度对去除效果的影响

在固定条件下,设定 pH 值为 3,极板间距为 8 cm,电流为 1.4 A。调节曝气强度值分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 m³/h,曝气强度对硝基苯废水去除效果的影响如图 9 所示。无曝气的条件时,硝基苯废水的去除率很低,为 38.42%,进行曝气时,曝气强度的增加使去除率明显提升,当曝气强度为 0.8 m³/h 时,COD 的去除率达到最大值 79.69%,出水 COD 的质量浓度降至 137.09 mg/L,随着曝气强度的增加,去除率开始下降。因为不进行曝气时,反应中的 O₂ 含量不足,电极与 Fenton 试剂无法发生反应,粒子失去原有活性,大量堆积于反应器底部;当进行曝气后,气体的进入对于整个反应器起到了搅拌作用,粒子在气体的作用下悬浮于反应器溶液中^[16],促进了电极间反应生成 H₂O₂ 和·OH;当通入曝气量过饱和时,提升了粒子相互碰撞的几率,短路电流增大,导致溶液中 Fe²⁺ 被氧化,生成 Fe³⁺ 的含量提高,生成的 Fe(OH)₃ 絮凝物覆盖在电极表面,阻碍了 Fenton 反应的发生。因此,选取

最佳曝气强度为 0.8 m³/h。

2.3 正交试验及最优反应条件的验证

2.3.1 正交试验设计及分析

选取 pH 值、电流强度、极板间距、曝气强度为正交试验的影响因素,进行四因素三水平的正交试验,计算 COD 的去除率,根据计算所得的极差大小得出主要影响因素与次要影响因素,正交试验的因素水平如表 1 所示,试验结果如表 2 所示,各因素水平的平均值和极差如表 3 所示。

表 1 正交试验的因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal test				
水平	电流/ A	极板间距/ cm	曝气强度/ (m ³ ·h ⁻¹)	pH
1	1.3	7.0	0.7	2.5
2	1.4	8.0	0.8	3.0
3	1.5	9.0	0.9	3.5

表 2 L₉(3⁴) 正交试验设计与结果

Table 2 L ₉ (3 ⁴) Orthogonal experimental design and results					
编号	电流/A	极板间距/cm	曝气强度/ (m ³ ·h ⁻¹)	pH	去除率/ %
1	1.3	7	0.7	2.5	62.54
2	1.3	8	0.8	3.0	78.69
3	1.3	9	0.9	3.5	75.38
4	1.4	7	0.8	3.5	78.98
5	1.4	8	0.9	2.5	74.68
6	1.4	9	0.7	3.0	73.45
7	1.5	7	0.9	3.0	77.12
8	1.5	8	0.7	3.5	79.56
9	1.5	9	0.8	2.5	79.87

表 3 各因素水平平均值和极差

Table 3 Average value and extremely poor levels of various factors				
因素	各因素在每个水平平均值			极差 R
	K1	K2	K3	
电极强度	72.203 3	75.703 3	78.850 0	6.646 7
极板间距	71.850 0	77.643 3	76.233 3	5.793 3
曝气强度	71.850 0	79.180 0	75.726 7	7.330 0
pH	72.363 3	76.420 0	77.973 3	5.610 0

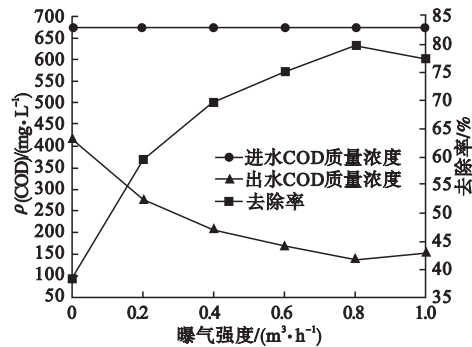


图 9 曝气强度对 COD 去除效果的影响

Fig. 9 The influence of aeration volume on the removal rate of COD

通过极差分析可以判别各影响因素不同水平对硝基苯降解率的影响大小,根据表 2 正交试验结果以及极差分析可知, $R(\text{曝气强度}) > R(\text{电流强度}) > R(\text{极板间距}) > R(\text{pH})$,即曝气强度对硝基苯废水的降解率影响最大,其次为电流强度、极板间距,pH 值的影响性最小,属次要因素,对比各因素水平的平均值大小,可得降解硝基苯废水理论最佳运行组合:电流为 1.5 A,极板间距为 8.0 cm,曝气强度为 0.8 m³/h,pH=3.5。

2.3.2 最佳条件下的处理效果

在室温 25 ℃ 条件下,向容量为 500 mL 的烧杯中加入 COD 的质量浓度为 674.9 mg/L 的试验废水 150 mL,废水中的 pH 值控制为 3.5,极板间距控制在 8 cm,曝气强度控制在 0.8 m³/h,电流为 1.5 A,并向溶液中投加 0.5 mmol/L 的 Fe²⁺ 和 2.0 g/L 电解质,对其进行充分搅拌,控制反应时间分别为 10 min、20 min、30 min、40 min、60 min、90 min、120 min 时,待反应结束之后,等待溶液静置,从距离烧杯液面 1 cm 左右的位置提取上清液,测定出水 COD 的质量浓度,进行 3 次平行试验,试验的结果如图 10 所示。

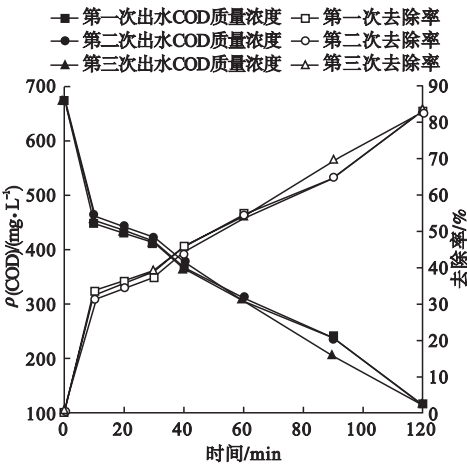


图 10 最佳条件下对 COD 去除效果的影响

Fig. 10 COD removal effect under optimum conditions

从图 10 可以看出,伴随着反应时间的增长,三维电极电-Fenton 法处理硝基苯废水的

去除率也在一直攀升,当反应时间在 30 min 内,出水中 COD 的平均去除率为 38.25%,降解的效果开始明显;当反应时间大于 30 min 后,可以清楚地看出,对废水的去除率还在继续增长;当反应时间为 120 min 时,出水中 COD 的去除率达到了最大值,COD 的平均去除率为 83.01%。

3 结 论

(1) 选用 Fe-C 电极作为二维电极极板的处理效果要优于 C-C 电极,同时利用活性炭与纳米铁粒子混合进行投加,投加质量比为 3:1 形成二元三维电极电-Fenton 反应,且活性炭粒子粒径为 3.0 mm,对废水的处理效果最佳,COD 去除率为 62.58%。

(2) 单因素试验控制 pH 值为 3,极板间距为 8 cm、电流为 1.4 A、曝气强度为 0.8 m³/h,进行三维电极电-Fenton 法处理硝基苯废水,处理 120 min,溶液的 COD 的去除率可达 79.69%。

(3) 四因素三水平的正交试验中,曝气强度对于 COD 去除率的影响最大。在调节 pH 值为 3.5,极板间距为 8 cm,电解质投加量为 2.0 g/L,电流为 1.5 A 的最佳运行条件下,取进水 COD 的质量浓度为 674.9 mg/L 的废水 150 mL,Fe²⁺ 投加量为 0.5 mmol/L,反应 120 min,共进行 3 次平行试验,COD 的平均去除率可达到 83.01%。

参考文献

[1] 李亚峰,赵小菲,朱爱霞. 非均相 UV/Fe-Cu-Y/H₂O₂ 体系处理含酚废水的试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(3): 546-554.
(LI Yafeng, ZHAO Xiaofei, ZHU Aixia. Experimental study on the treatment of phenol waste water by heterogeneous UV/Fe-Cu-Y/H₂O₂ system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(3): 546-554.)

[2] 程云,严红燕,冯志力,等. 电 Fenton 法处理硝基苯废水的实验研究[J]. 辽宁城乡环境科技,2004,24(3):38-40.
(CHENG Yun, YAN Hongyan, FENG Zhili, et al. Experimental study on the treatment of

- nitrobenzene wastewater by electro-Fenton method [J]. Liaoning urban and rural environmental science & technology, 2004, 24 (3): 38 - 40.)
- [3] 张文兵, 傅家谟, 肖贤明, 等. 均相和非均相高级氧化技术处理水中有机污染的研究[J]. 中国科学院大学学报, 2005, 22(1): 122 - 127.
(ZHANG Wenbing, FU Jiamo, XIAO Xianming, et al. Treatment of organic pollutants in aqueous solution by homogenous and heterogeneous advanced oxidation processes [J]. Journal of the graduate school of the Chinese academy of sciences, 2005, 22 (1): 122 - 127.)
- [4] 唐萍, 周集体, 王竞, 等. 硝基苯废水治理的研究进展[J]. 工业水处理, 2003, 23(3): 16 - 19.
(TANG Ping, ZHOU Jiti, WANG Jing, et al. Advances in nitrobenzene wastewater treatment [J]. Industrial water treatment, 2003, 23 (3): 16 - 19.)
- [5] 李章良, 崔芳芳, 杨茜麟. 含硝基苯废水处理技术的研究进展[J]. 环境工程, 2015(4): 4 - 8.
(LI Zhangliang, CUI Fangfang, YANG Xilin. Research progress on treatment technologies of wastewater containing nitrobenzene [J]. Environmental engineering, 2015(4): 4 - 8.)
- [6] 王彤凝, 祖格, 杨林, 等. 国内外印染废水研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2015, 35(4): 28 - 31.
(WANG Tongning, ZU Ge, YANG Lin, et al. Research progress of printing and dyeing wastewater at home and abroad [J]. Environmental protection and circular economy, 2015, 35(4): 28 - 31.)
- [7] 刘路. 纺织印染废水处理技术研究现状及进展[J]. 上海工程技术大学学报, 2017, 31(2): 174 - 177.
(LIU Lu. Research state and progress of textile printing and dyeing wastewater treatment technologies [J]. Journal of Shanghai university of engineering science, 2017, 31(2): 174 - 177.)
- [8] 任南琪, 周显娇, 郭婉茜, 等. 染料废水处理技术研究进展[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 84 - 94.
(REN Nanqi, ZHOU Xianjiao, GUO Wanxi, et al. A review on treatment methods of dye wastewater [J]. CIESC journal, 2013, 64 (1): 84 - 94.)
- [9] 于晓明子, 陈巍. 三维电极电 Fenton 法处理硝基苯废水的试验研究[J]. 建筑与预算, 2018(7): 46 - 49.
(YU Xiaomingzi, CHEN Wei. Experimental study on treatment of nitrobenzene wastewater by three-dimensional electrode electro Fenton method [J]. Construction and budget, 2018(7): 46 - 49.)
- [10] 郭威, 袁放, 张佳, 等. 高盐强酸性地下水中复合苯系污染物原位芬顿氧化实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 182 - 189.
(GUO Wei, YUAN Fang, ZHANG Jia, et al. In-situ Fenton oxidation experiment of compound benzene pollutants in high salt and strong acid ground water [J]. Hydrogeology & engineering geology, 2021, 48 (2): 182 - 189.)
- [11] Lü Huizhen, PAN Qing, SONG Yu, et al. A review on Nano-/Microstructured materials constructed by electrochemical technologies for supercapacitors [J]. Nano-micro letters, 2020, 12(1): 118 - 174.
- [12] 刘亚琦, 袁鹏飞, 张寒旭, 等. 高效催化电芬顿法处理老龄垃圾渗滤液[J]. 水处理术, 2021, 47(3): 57 - 62.
(LIU Yaqi, YUAN Pengfei, ZHANG Hanxu, et al. High-efficiency catalytic electro-Fenton method for aged landfill leachate treatment [J]. Technology of water treatment, 2021, 47 (3): 57 - 62.)
- [13] BOUSNOUBRA I, FASSI S, DJEBBAR K. Decolorization and mineralization of diazo dye under artificial and solar light assisted Fenton and photo-Fenton conditions [J]. International journal of chemical reactor engineering, 2021, 19(5): 527 - 532.
- [14] 陈于梁, 成先雄, 连军锋, 等. 基于响应面法的电芬顿降解活性黑 5 性能研究[J]. 应用化工, 2020, 49(11): 2756 - 2764.
(CHEN Yuliang, CHENG Xianxiong, LIAN Junfeng, et al. Performance study of electron Fenton degrading active Black 5 based on response surface methodology [J]. Applied chemical industry, 2020, 49 (11): 2756 - 2764.)
- [15] LIU Qian, ALEKS D. A, SHI Zhiming, et al. Determination of the hydrogen fugacity during electrolytic charging of steel [J]. Corrosion science, 2014, 87(5): 239 - 258.
- [16] 张硕. 微污染水源水处理集成技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
(ZHANG Shuo. Study on integrated process in polluted water treatment [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)