



电催化氧化处理脱硫废水 COD 的试验研究

武宇鹏, 房 慧, 刘潇冉, 张玉蕾

(太原科技大学环境与资源学院, 山西太原 030024)

[摘要] 燃煤电厂脱硫废水成分复杂, COD 来源主要为亚硫酸盐和连二硫酸盐等还原性无机物。此外, 脱硫废水中的 Cl^- 浓度很高, 在降解 COD 时会形成较大干扰。电催化氧化法在工业废水处理中的应用较多, 但较少应用于脱硫废水。尝试采用钌铱、铂金、掺硼金刚石(BDD)这 3 种不同材料作为阳极极板, 电催化氧化处理脱硫废水 COD。首先筛选出最佳极板材料, 再用单因素实验方法确定响应面分析实验条件, 采用 BBD(Box-Behnken Design)法设计实验并分析极板间距、电压、反应时间的交互影响作用, 最后研究 SO_4^{2-} 和 Cl^- 对电催化氧化处理脱硫废水 COD 的影响。结果表明, BDD 极板对于脱硫废水的电催化氧化性最强, 最佳反应条件: 极板间距为 1.52 cm, 电压为 25 V, 反应时间为 40 min。此时 COD 去除率最高, 为 87.1%。适当质量浓度的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 在溶液中可起到促进氧化的作用, 但当 SO_4^{2-} 和 Cl^- 分别超过 8 000 mg/L 和 5 000 mg/L 时会抑制 COD 的去除效果。

[关键词] 脱硫废水; 化学需氧量; 电催化氧化

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)05-0122-07

Experimental study on COD treatment of desulphurization wastewater by electrocatalytic oxidation

WU Yupeng, FANG Hui, LIU Xiaoran, ZHANG Yulei

(College of Environment and Resources, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Desulphurization wastewater from coal-fired power plants is complicated in composition. The main chemical oxygen demand(COD) are from reductive inorganic substances such as sulfites and dithionate. In addition, the content of chloride ions in desulfurization wastewater is very high, which can affect COD removal of desulfurization wastewater, so it is difficult to degrade the COD of desulfurization wastewater. Electrocatalytic oxidation is widely used in industrial wastewater treatment, but rarely used in desulfurization wastewater. In this study, three different materials including ruthenium-iridium, platinum and boron-doped diamond(BDD) were used as anode plates to treat COD from desulphurization wastewater by electrocatalytic oxidation. Firstly, the optimal plate material was selected, and then the response surface analysis experimental conditions were determined by single factor experiment method. BBD(Box-Behnken Design) method was used to design experiments and analyze the interaction between plate spacing, voltage and reaction time. Finally, the influence of sulfate radical and chloride ion on electrocatalytic oxidation treatment of COD in desulfurization wastewater was experimentally studied. The results showed that BDD electrode had the strongest electrocatalytic oxidation for desulfurization wastewater, and the best reaction conditions were as follows: plate spacing 1.52 cm, voltage 25 V, reaction time 40 min. Under these conditions, the COD removal rate was the highest, which was 87.1%. Appropriate concentration of sulfate and chloride ions can promote oxidation in the solution, but when the concentration of sulfate and chloride ions exceed 8 000 mg/L and 5 000 mg/L, respectively, the removal effect of COD was inhibited.

Key words: desulfurization wastewater; COD; electrocatalytic oxidation

我国当前电源结构仍以燃煤火力发电为主^[1], 大多数燃煤电厂均采用湿法脱硫工艺去除 SO_2 , 由此排

出的脱硫废水成分复杂, 水质恶劣, 直接排放到环境中危害巨大^[2]。近年来, 我国对工业废水排放的要求日

[基金项目] 山西省重点研发计划(201903D321058)

益严格,提出最大限度减少废水外排量,脱硫废水单独处理后回用,鼓励实现脱硫废水零排放^[3]。脱硫废水除Cl⁻浓度很高以外,COD一般为300~500 mg/L,超过《火电厂石灰石-石膏湿法脱硫废水水质控制指标》DL/T 997—2006要求的排放标准(COD<150 mg/L)。因此,需要对火电厂脱硫废水COD进行处理。

不同于有机废水,脱硫废水COD的来源主要为亚硫酸盐和连二硫酸盐等还原性无机物^[4],且脱硫废水Cl⁻浓度很高,不宜采用生物降解法^[5]。电催化氧化法做为“环境友好技术”,近年来受到广泛关注。电催化氧化法是结合化学氧化及电化学原理,通过电极的作用氧化水中还原性污染物的方法。氧化方式有两种,包括直接氧化和间接氧化^[6]。直接氧化是污染物吸附在阳极板表面,直接失去电子被氧化;间接氧化是通过阳极产生·OH、H₂O₂等具有强氧化性的中间产物,扩散到水中将污染物氧化为无害的物质,尤其当废水中含有Cl⁻时,还会生成ClO⁻等强氧化物,促进污染物的被氧化。目前利用电催化氧化法处理有机污染物的研究较多,对还原性无机物的应用研究较少。本研究尝试利用间接氧化方式处理脱硫废水COD,考察钉铍、铂金、掺硼金刚石(BDD)这3种不同阳极极板材料的处理效果,探讨极板间距、电压、反应时间等因素对COD去除率的交互影响作用以及SO₄²⁻和Cl⁻对电催化氧化处理脱硫废水COD的影响。以期对相关技术的应用提供参考,为实现脱硫废水达标排放或零排放提供技术支撑。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

1.1.1 试剂与仪器

试剂:Na₂SO₃、H₂SO₄、Ag₂SO₄、K₂Cr₂O₇、HgSO₄、Na₂SO₄、NaCl、AgNO₃,以上试剂均为分析纯,太原市利恒商贸有限公司。

仪器:紫外/可见分光光度计,安捷伦科技有限公司;电子分析天平,上海舜宇恒平有限公司;抽滤装置,奥淇科化医疗供应链管理服务有限公司;电催化氧化装置,山东森洋技术有限公司;直流稳压电源,山东沃森电源设备有限公司;雷磁COD消解仪,北京普盛阳科贸有限公司。

1.1.2 实验用水

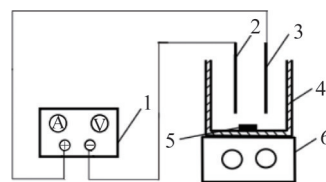
极板材料筛选、单因素实验和响应面分析实验所用水样为山西省晋中市榆次区某热电公司脱硫废水,测得其原水水质指标:pH为4.6,COD为350 mg/L,

Cl⁻为15 000 mg/L,SO₄²⁻为5 000 mg/L,悬浮物为1 371 mg/L。在进行单因素和响应面分析实验之前,需要对原水进行悬浮物混凝沉淀处理,取上清液进行实验。

SO₄²⁻和Cl⁻影响实验所用水样为模拟脱硫废水,采用亚硫酸钠药剂配制,每500 mL水中药剂投加量为1.378 g,配得的模拟脱硫废水COD为350 mg/L。

1.1.3 实验装置

实验所用催化池装置采用有机玻璃材料制作,尺寸为2.7 cm×5.2 cm×12.4 cm,有效容积为154 mL,阳极采用带不同涂层材料(钉铍、铂金、BDD)的钛网,阴极均采用纯钛网,尺寸均为5 cm×10 cm×0.1 cm。该装置两侧设有等距的凹槽,便于放置和调节极板间距,催化池外接稳压电源。



1—直流稳压电源;2—阴极极板;3—阳极极板;
4—电催化池;5—转子;6—磁力搅拌器。

图1 实验装置

Fig. 1 Diagram of experimental setup

1.2 实验方法

1.2.1 极板材料选择

分别采用钉铍、铂金、BDD这3种极板作为阳极,钛板作为阴极,在极板间距为1.5 cm,电压为15 V,反应时间为40 min的条件下测定脱硫废水COD去除率,筛选氧化效果最佳的极板材料。

1.2.2 单因素及响应面分析实验

以极板间距(0.3、0.9、1.5、2.1、2.7 cm)、电压(5、10、15、20、25 V)、反应时间(10、20、30、40、50、60 min)作为变量,对脱硫废水进行电催化氧化单因素实验,根据单因素实验结果,采用Design-expert软件中BBD(Box-Behnken Design)实验设计法进行三因素三水平实验方案设计,响应面分析实验水平如表1所示。

表1 响应面分析实验水平设置

Table 1 Response surface analysis experimental level setting table

因素	水平		
	-1	0	+1
A:极板间距/cm	0.9	1.5	2.1
B:电压/V	15	20	25
C:反应时间/min	20	30	40

1.2.3 SO_4^{2-} 影响实验

实际生产中脱硫废水的 SO_4^{2-} 为 5 000~10 000 mg/L, 故本实验设置 5 个 SO_4^{2-} 浓度梯度, 分别加入不同质量的 Na_2SO_4 , 配成不同 SO_4^{2-} 浓度的 500 mL 模拟脱硫废水, 配制方法如表 2 所示。

表 2 SO_4^{2-} 影响实验模拟脱硫废水配制

Table 2 Configuration table of desulfurization wastewater simulated by SO_4^{2-} influence experiment

$\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000
Na_2SO_4 质量/g	1.479 2	2.958 4	4.437 6	5.916 8	7.396
Na_2SO_3 质量/g	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375
NaCl 质量/g	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

在极板间距为 1.5 cm, 电压为 20 V, 反应时间为 30 min 的条件下采集不同反应时间下的水样检测 COD, 对比不同 SO_4^{2-} 浓度下的电催化氧化效率。

1.2.4 Cl^- 影响实验

实际生产中脱硫废水的 Cl^- 为 10 000~25 000 mg/L, 故本实验设置 5 个 Cl^- 浓度梯度, 加入不同质量的 NaCl, 配成不同 Cl^- 浓度的 500 mL 模拟脱硫废水, 配制方法如表 3 所示。

表 3 Cl^- 影响实验模拟脱硫废水配制方法

Table 3 Configuration table of desulfurization wastewater simulated by Cl^- influence experiment

$\text{Cl}^-/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	5 000	10 000	15 000	20 000	25 000
NaCl 质量/g	4.121 3	8.242 6	12.363 9	16.485 2	20.606 5
Na_2SO_3 质量/g	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375
Na_2SO_4 质量/g	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

极板间距为 1.5 cm, 电压为 20 V, 在反应 30 min 内采集不同反应时间下的水样检测 COD, 采用银盐沉淀法测定 COD 并进行对比。

2 结果与讨论

2.1 极板材料选择

在极板间距为 1.5 cm, 电压为 15 V, 反应时间为 40 min 的条件下, 测得 3 种极板对 COD 的去除效果, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, BDD 极板的 COD 去除效果最好, 故选择 BDD 极板作为电催化的阳极材料。

2.2 单因素实验

2.2.1 极板间距单因素实验

在电压为 15 V, 反应时间为 30 min 的条件下, 考察极板间距分别为 0.3、0.9、1.5、2.1、2.7 cm 时对 COD 的去除效果, 结果如图 3 所示。

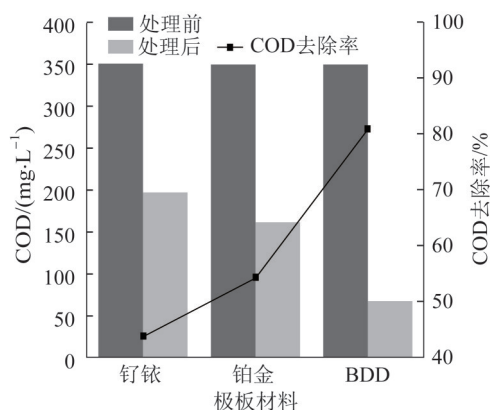


图 2 极板材料对 COD 去除效果的影响

Fig. 2 Influence of plate materials on COD removal effect

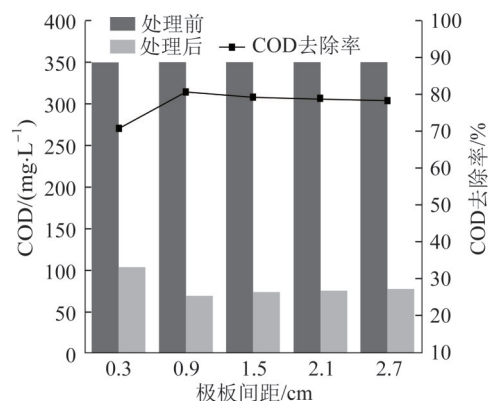


图 3 极板间距对 COD 去除效果的影响

Fig. 3 Influence of plate spacing on COD removal effect

由图 3 可知, 极板间距对 COD 去除效果的影响不大。但极板间距过近时, 极板间的溶液很难与极板两侧溶液发生流动交换, 阳极产生的具有氧化性的中间产物还未与污染物发生反应就在阴极被还原, 还会增加短路风险^[7], 影响极板使用寿命; 极板间距过大时, 电阻增大, 电流密度减小, 能耗增加, 因此选择极板间距分别为 0.9、1.5、2.1 cm 作为响应面分析实验条件。

2.2.2 电压单因素实验

在极板间距为 2.1 cm, 反应时间为 30 min 的条件下, 考察电压分别为 5、10、15、20、25 V 时对 COD 的去除效果, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 电压在 0~15 V 范围内, COD 去除率增加明显。但电压超过 15 V 后, COD 去除率仅从 78% 增至 84%, 增长速度变缓。有研究表明电压不断增大会发生水解析氢副反应, 该反应与污染物的氧化反应是竞争关系, 会消耗溶液中阳离子, 使电流效率降低^[8-9], 因此选择电压分别 15、20、25 V 作为

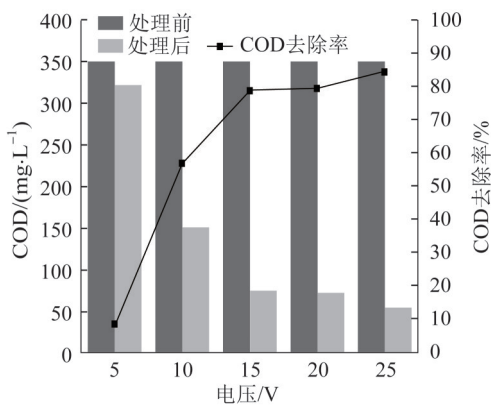


图4 电压对COD去除效果的影响

Fig. 4 Influence of voltage on COD removal effect

响应面分析实验条件。

2.2.3 反应时间单因素实验

在电压为20 V,极板间距为2.1 cm的条件下,考察反应时间分别为10、20、30、40、50、60 min时对COD的去除效果,结果如图5所示。

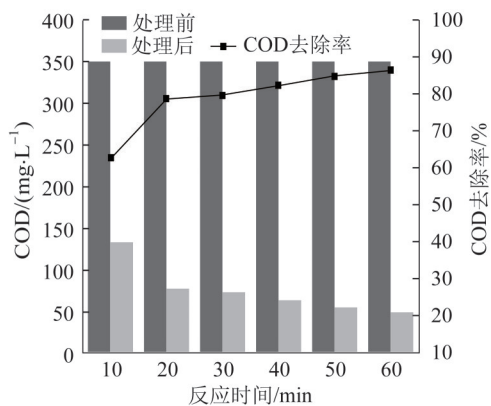


图5 反应时间对COD去除效果的影响

Fig. 5 Effect of reaction time on COD removal effect

由图5可知,反应20 min后,COD去除率呈逐渐稳定的趋势。在反应前期,污染物浓度高,电流效率高,随着反应持续,废水中污染物浓度降低,电流效率降低,因此COD去除率增长速度减慢^[10],因此选择反应时间分别为20、30、40 min作为响应面分析实验条件。

2.3 响应面分析实验

2.3.1 实验结果及方差分析

响应面分析结果如表4所示。

对实验结果进行模型方差分析,结果如表5所示。

由表5可知,模型的F值为116.61,P值小于0.000 1,表明该模型是显著的,在研究区域内拟合较好。 R^2 为0.993 4,预测 R^2 与调整后的 R^2 之差小于

表4 响应面分析实验结果

Table 4 Experimental results of response surface analysis				
实验序号	A:极板间距/cm	B:电压/V	C:反应时间/min	COD去除率/%
1	1.5	20	30	82.16
2	2.1	20	40	82.19
3	0.9	15	30	80.63
4	1.5	20	30	82.16
5	2.1	15	30	78.89
6	2.1	25	30	84.60
7	1.5	25	40	87.50
8	1.5	20	30	82.16
9	0.9	20	40	83.20
10	2.1	20	20	78.40
11	1.5	20	30	82.16
12	1.5	15	40	81.80
13	1.5	15	20	76.76
14	0.9	20	20	77.50
15	1.5	25	20	81.10
16	0.9	25	30	83.70
17	1.5	20	30	82.16

表5 模型方差分析结果

Table 5 Results of model variance analysis					
因素	平方和	自由度	均方根	F值	P值
模型	111.01	9	12.33	116.61	<0.000 1
A	0.112 8	1	0.112 8	1.07	0.336 1
B	44.27	1	44.27	418.60	<0.000 1
C	54.76	1	54.76	517.72	<0.000 1
AB	1.74	1	1.74	16.47	0.004 8
AC	0.912 0	1	0.912 0	8.62	0.021 8
BC	0.462 4	1	0.462 4	4.37	0.074 9
A ²	2.94	1	2.94	27.84	0.001 2
B ²	1.68	1	1.68	15.86	0.005 3
C ²	4.22	1	4.22	39.91	0.000 4
残差	0.740 4	7	0.105 8		
R ²			0.993 4		
调整后R ²			0.984 9		
预测R ²			0.894 0		
变异系数%			0.398 6		
信噪比			39.840 5		

注:A表示极板间距,B表示电压,C表示反应时间。

0.2,变异系数为0.398 6<10,信噪比为39.840 5>4,这些指标都表明该模型能够有效地对BDD极板的响应值进行预测和分析。B、C的P值均小于0.000 1,说明电压和反应时间对COD的去除效果影响较大。根据因素A、B、C、AB、AC、BC所对应的F值大小可知,影响因素对响应值的影响程度:反应时间>电压,两者影响程度相近,是主要因素,远远大于极板间距影响,也大于任意两者交互作用影响。

2.3.2 响应曲面分析

在极板间距为 1.5 cm 的条件下, BDD 极板的电压和反应时间的响应曲面及等高线如图 6 所示。

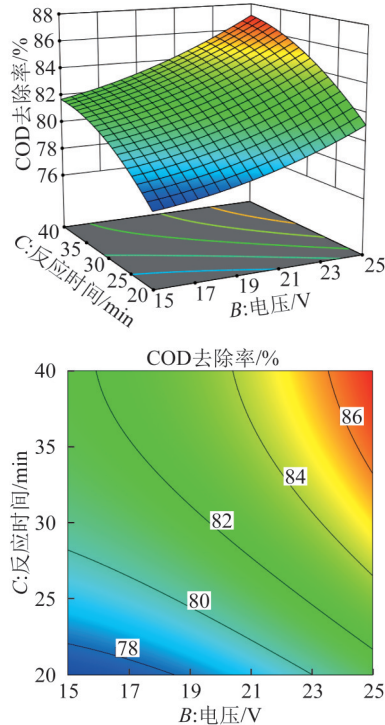


图 6 电压和反应时间的响应曲面和等高线

Fig. 6 Response surface plot and contour plot of voltage and reaction time

由图 6 可知, COD 去除率与电压和时间都呈正相关。等高线较接近于平行的直线, 表明电压和反应时间的交互作用较弱。COD 去除率最高的条件是等高线的椭圆圆心所在处, 即电压为 25 V, 时间为 40 min。

在电压为 20 V 的条件下, BDD 极板的极板间距和反应时间的响应曲面及等高线如图 7 所示。

由图 7 可知, COD 去除率随极板间距变化的幅度较小, 随反应时间变化的幅度较大, 表明反应时间比极板间距对 COD 去除率的影响更为显著。相对于电压和反应时间的响应曲面, 极板间距和反应时间的响应曲面坡度更大, 表明极板间距和反应时间之间的交互作用更强。椭圆形的等高线也说明反应时间和极板间距的交互作用较强。COD 去除率最高的反应条件即椭圆的圆心范围, 此时极板间距为 1.5 cm 左右, 反应时间为 40 min 左右。

在反应时间为 40 min 的条件下, 电催化氧化实验中 BDD 极板的极板间距和电压的响应曲面及等高线如图 8 所示。

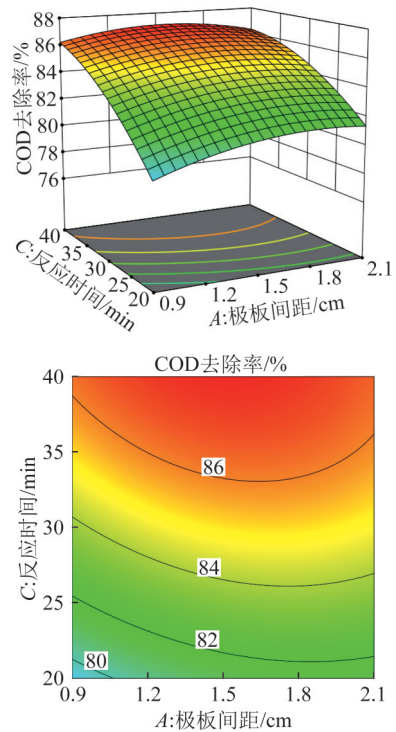


图 7 极板间距和反应时间的响应曲面和等高线

Fig. 7 Response surface plot and contour plot of plate spacing and reaction time

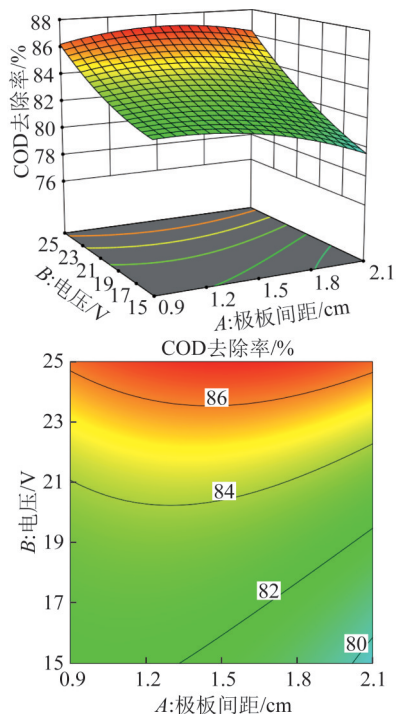


图 8 极板间距和电压的响应曲面和等高线

Fig. 8 Response surface plot and contour plot of plate spacing and voltage

由图8可知,与图6、图7的响应曲面相比,该响应曲面坡度最大,说明BDD极板的极板间距和电压之间的交互影响作用最大。由等高线可知,COD去除率最高的反应条件是极板间距为1.5 cm左右,电压为25 V左右。

最终分析得出,以BDD极板做阳极,COD去除率最佳的实验条件:极板间距为1.52 cm,电压为25 V,反应时间为40 min,此时COD去除率最高为87.1%。

2.4 SO_4^{2-} 和 Cl^- 质量浓度对COD去除效果的影响

2.4.1 SO_4^{2-} 质量浓度对COD去除效果的影响

考察不同 SO_4^{2-} 质量浓度的模拟脱硫废水反应5、10、20、30 min时的COD去除效果,结果如图9所示。

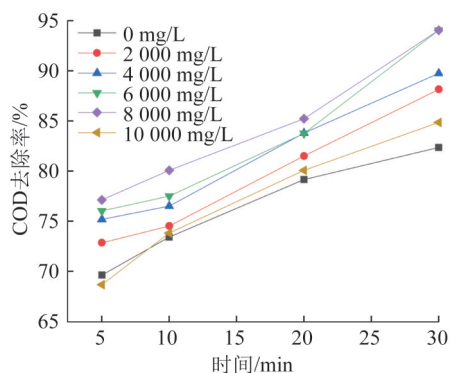


图9 SO_4^{2-} 质量浓度对COD去除效果的影响

Fig. 9 Effect of SO_4^{2-} mass concentration on COD removal

由图9可知,COD去除率随着 SO_4^{2-} 质量浓度的增加而增加, SO_4^{2-} 质量浓度为0时,反应20 min后COD去除率为78.97%, SO_4^{2-} 质量浓度分别为2 000、4 000、6 000、8 000 mg/L时,反应20 min后,COD去除率分别为81.32%、83.61%、83.56%、85.03%,相对于无 SO_4^{2-} 的条件下,COD去除率最高时提高了6.06%。然而当 SO_4^{2-} 质量浓度继续增加至10 000 mg/L时,COD去除率明显下降,反应20 min后,COD去除率为79.88%。说明适当浓度的 SO_4^{2-} 在溶液中可起到电解质的作用,增加溶液电导率,提高氧化反应度^[11]。并且 SO_4^{2-} 会在阳极被氧化生成具有氧化性的 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 也可与水中污染物发生反应,因此COD去除率随 SO_4^{2-} 浓度的增大而增大^[12]。但 SO_4^{2-} 质量浓度超过8 000 mg/L以上时,过多的 SO_4^{2-} 会吸附在阳极极板表面,阻碍污染物与极板的接触,从而降低污染物被直接氧化的速率,同时也阻碍了极板产生 $\cdot\text{OH}$ 等中间产物,因此COD去除率显著降低^[13]。

2.4.2 Cl^- 质量浓度对COD去除效果的影响

考察不同 Cl^- 质量浓度的模拟脱硫废水在反应5、10、20、30 min时的COD去除效果,结果如图10所示。

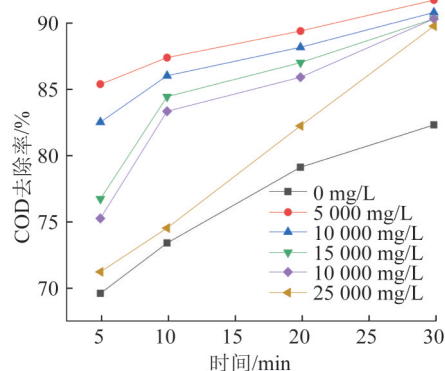


图10 Cl^- 质量浓度对COD去除效果的影响

Fig. 10 Effect of Cl^- mass concentration on COD removal

由图10可知, Cl^- 由0增加至5 000 mg/L时,COD去除率明显增加,反应20 min时的COD去除率从78.97%增至89.26%。但随着 Cl^- 持续增加,COD去除率持续降低。随着 Cl^- 逐渐增至25 000 mg/L时,反应20 min时的COD去除率分别为88.03%、86.87%、85.77%、82.09%。说明适当浓度的 Cl^- 在溶液中可起到电解质的作用,增加溶液电导率,提高氧化反应度。另外,在电催化过程中, Cl^- 可被氧化为 ClO^- 、 HClO 、 ClO_2^- 、 ClO_3^- 、 ClO_4^- 等,这些游离氯氧化物也能起到氧化去除COD的作用^[14-15]。但 Cl^- 与 ClO_4^- 等离子不能大量共存,高浓度的 ClO^- 也有可能在阴极被还原为 Cl^- ^[16],失去氧化性,因此 Cl^- 升高至5 000 mg/L以上后,COD去除率随浓度的增加而出现逐渐降低的现象。

3 工程应用前景分析

电催化氧化法无二次污染、占地面积小、操作简单,基于能耗考虑,适用于排量较小的废水处理。根据实验结果,电催化氧化对脱硫废水COD有一定的处理效果,但仍有一些问题和不足之处。如脱硫废水 Cl^- 及钙镁含量较高,在实验过程中没有预先进行脱除结垢性离子处理,所以极板腐蚀和结垢均较为严重。电耗较高,根据电压、极板面积、电流密度和反应时间,可计算得出电催化氧化电耗为30~35 kW·h/t。且本实验仅限于处理COD,如果能对制约脱硫废水回用的主要污染物 Cl^- 进行协同去除,将会

提高其应用价值。所以要大范围应用推广,仍需要进一步深入研究。

4 结论

(1) BDD极板对脱硫废水COD的电催化氧化效率高于钨铌极板和铂金极板。

(2) 极板间距、电压、反应时间对COD去除率的影响程度不同,反应时间>电压,两者影响程度相近,远大于极板间距影响;交互作用最强的2个因素是电压和极板间距,选择适当的电压大小和极板间距更有利于提高电催化效率。本实验中BDD极板的最佳参数:极板间距为1.52 cm,电压为25 V,反应时间为40 min。

(3) 适当浓度的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 在溶液中可起到电解质的作用,增加溶液电导率,提高氧化反应度。但 SO_4^{2-} 和 Cl^- 质量浓度分别超过8 000 mg/L和5 000 mg/L时会降低COD的去除率。

参考文献

- [1] 贾亚雷,马凯,李璐.区域电力行业绿色转型现状和发展趋势分析[J].应用能源技术,2021(7):23-26.
- JIA Yalei, MA Kai, LI Lu. Analysis on the status quo and development trend of green transformation in regional power industry [J]. Applied Energy Technology, 2021(7): 23-26.
- [2] 施云芬,王旭晖.湿法烟气脱硫废水处理研究进展[J].工业水处理,2015,35(12):14-17.
- SHI Yunfen, WANG Xuhui. Research progress in the wastewater treatment of wet flue gas desulfurization [J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(12): 14-17.
- [3] 李飞.旋转雾化蒸发技术对脱硫废水和烟气的适应性研究[J].中国电力,2021,54(4):213-220.
- LI Fei. Study on the adaptability of rotary atomization evaporation technology to desulfurization wastewater and flue gas [J]. Electric Power, 2021, 54(4): 213-220.
- [4] 应春华,杨宝红,刘柏辉,等.火电厂脱硫废水处理试验研究[J].热力发电,2005,34(6):45-47.
- YING Chunhua, YANG Baohong, LIU Baihui, et al. Test study on wastewater treatment for desulfuration in thermal power plant [J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(6): 45-47.
- [5] 王雅丽.石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理工艺进展[J].中国战略新兴产业,2018(28):4-5.
- WANG Yali. Progress of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization wastewater treatment process [J]. China Strategic Emerging Industry, 2018(28): 4-5.
- [6] DUAN Xiaoyue, ZHAO Yuanyuan, LIU Wei, et al. Investigation on electro-catalytic oxidation properties of carbon nanotube-Ce-modified PbO_2 electrode and its application for degradation of *m*-nitrophenol [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(5): 709-717.
- [7] 张玮.改性钛基二氧化铅电极的制备及其电催化氧化苯酚的应用研究[D].长春:吉林大学,2019.
- ZHANG Wei. Study on the preparation and application on electrochemical oxidation of phenol by modified titanium base lead dioxide electrode [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [8] MOUSSET E, PECHAUD Y, OTURAN N, et al. Charge transfer/mass transport competition in advanced hybrid electrocatalytic wastewater treatment: Development of a new current efficiency relation [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 240: 102-111.
- [9] MA Li, ZHANG Mingquan, ZHU Chengwu, et al. Electrochemical oxidation of reactive brilliant orange X-GN dye on boron-doped diamond anode [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(8): 1825-1835.
- [10] 李春娥. BDD薄膜电极电催化氧化处理DDNP生产废水的实验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011.
- LI Chune. Experimental research on the electro-catalytic oxidation treatment for DDNP production wastewater using BDD film electrode [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.
- [11] WANG Ying, SHEN Zhenyao, CHEN Xiaochun. Effects of experimental parameters on 2, 4-dichlorophenol degradation over Er-chitosan- PbO_2 electrode [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/2/3): 867-874.
- [12] WANG Ying, SHEN Zhenyao, CHEN Xiaochun. Effects of experimental parameters on 2, 4-dichlorophenol degradation over Er-chitosan- PbO_2 electrode [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/2/3): 867-874.
- [13] 文焱,齐晶瑶,李欣. O-NiCoP/ Ni_2P 电催化还原2,4-二氯苯酚性能研究[J].环境科学学报,2021,41(10):3969-3975.
- WEN Yan, QI Jingyao, LI Xin. Electrocatalytic reduction of 2, 4-dichlorophenol by O-NiCoP/ Ni_2P [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10): 3969-3975.
- [14] DING Jing, ZHAO Qingliang, ZHANG Yunshu, et al. The eAND process: Enabling simultaneous nitrogen-removal and disinfection for WWTP effluent [J]. Water Research, 2015, 74: 122-131.
- [15] RAJKUMAR K, MUTHUKUMAR M. Optimization of electro-oxidation process for the treatment of Reactive Orange 107 using response surface methodology [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, 19(1): 148-160.
- [16] BRILLAS E, MARTÍNEZ-HUITILE C A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2015, 166: 603-643.
- [作者简介] 武宇鹏(1978—),博士,教授。电话:13703515311, E-mail: wuyupeng007@163.com。
- [收稿日期] 2023-03-13(修改稿)