

臭氧催化氧化对固定床蒸氨脱酚废水 COD 去除效果研究

张超¹, 王吉坤², 王宏义¹, 李红伟¹, 王立国¹, 杜松³, 黄荣法⁴

(1. 山东环能环保科技有限公司, 山东 泰安 271000; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;

3. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039; 4. 萍乡煤科环保科技有限公司, 江西 萍乡 337022)

摘要:为了获得最佳的臭氧催化氧化工艺参数,采用 1 t/h 臭氧催化氧化装置利用单因素及正交试验法研究了臭氧通气量、臭氧浓度及催化剂投加量对 COD 去除效果的影响规律,确定了工艺条件的影响主次顺序及最佳工艺参数。最后在最佳工艺参数下进行连续试验 80 h,进一步考察了最佳工艺参数下 COD 的去除效果。结果表明:3 种工艺条件(即臭氧浓度、臭氧通气量、催化剂投加量)对 COD 去除率均有很大影响。通过单因素试验发现,随着臭氧通气量、臭氧、催化剂投加量增加,在同等条件下 COD 去除率越大,但相应的处理成本会增加,最终选择臭氧通气量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{h} \leq \text{臭氧通气量} \leq 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,臭氧浓度为 $150 \text{ mg/L} \leq \text{臭氧浓度} \leq 250 \text{ mg/L}$,催化剂投加量选择为 $20 \text{ kg/t} \leq \text{催化剂投加量} \leq 30 \text{ kg/t}$ 。通过正交试验发现,3 种臭氧氧化条件对 COD 去除率影响的主次顺序为臭氧浓度 > 通气量 > 催化剂投加量,验证了上述单因素试验结果,得到最佳工艺参数为:臭氧通气量 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$,臭氧浓度 250 mg/L ,催化剂投加量 30 kg/t 。最后采用 1 t/h 臭氧氧化装置,在最佳工艺参数下对脱酚蒸氨后废水进行连续臭氧氧化试验 80 h,COD 去除率稳定在 43.5% 左右,反应后可生化性(B/C)稳定至 0.4 以上,减轻了后续生化处理的负荷及难度。证明臭氧氧化工艺实际应用效果良好。

关键词:臭氧催化氧化;臭氧通气量;臭氧浓度;催化剂投加量;单因素试验;正交试验

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)06-0165-06

Study on the removal effect of ozone catalytic oxidation on COD from the steam ammonia dephenolic wastewater in fixed bed

ZHANG Chao¹, WANG Jikun², WANG Hongyi¹, LI Hongwei¹, WANG Ligu¹, DU Song³, HUANG Rongfa⁴

(1. Shandong Huanneng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Tai'an 271000, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013,

China; 3. General Prospecting Institute China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China; 4. Pingxiang Coal Science

Environmental Protection Technology Co., Ltd., Pingxiang 337022, China)

Abstract: In order to obtain the best process parameters of ozone catalytic oxidation, the impact of ozone ventilation, ozone concentration and catalyst dosage on COD removal was studied by using single factor and orthogonal test method in 1t/h ozone catalytic oxidation device and the primary and secondary order of process conditions and the best process parameters were determined. Finally, the best process parameters were tested continuously for 80 hours, and the removal effect of COD under the best process parameters was further investigated. It is concluded that the three process conditions (i.e. ozone concentration, ozone ventilation capacity and catalyst dosage) have a great influence on COD removal rate. Through single factor experiment, it is found that with the increase of ozone ventilation, ozone and catalyst dosage, the COD removal rate will increase under the same conditions, but the treatment cost will increase. Considering COD removal rate and ozone ventilation cost, the ozone ventilation rate is $1.5 \text{ m}^3/\text{h} \leq \text{ozone ventilation rate} \leq 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$; the ozone concentration is $150 \text{ mg/L} \leq \text{ozone concentration} \leq 250 \text{ mg/L}$; the catalyst dosage is selected as $20 \text{ kg/t} \leq \text{catalyst dosage} \leq 30 \text{ kg/t}$. Through the orthogonal experiment,

收稿日期:2019-11-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19110501

基金项目:山东环能环保科技有限公司科技发展项目(2019SDHN001)

作者简介:张超(1971—),男,山东泰安人,工程师,研究方向为煤矿矿井水处理。E-mail:zhang760248@163.com。通讯作者:王吉坤,助理研究员,研究方向为煤矿矿井水及煤化工废水处理。E-mail:304336835@qq.com

引用格式:张超,王吉坤,王宏义,等.臭氧催化氧化对固定床蒸氨脱酚废水 COD 去除效果研究[J].洁净煤技术,2019,25(6):165-170.

ZHANG Chao, WANG Jikun, WANG Hongyi, et al. Study on the removal effect of ozone catalytic oxidation on COD from the steam ammonia dephenolic wastewater in fixed bed[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 165-170.



移动阅读

it is found that the primary and secondary order of the influence of three ozone oxidation conditions on COD removal rate is ozone concentration > ventilation > catalyst dosage, which confirms the above single factor test results. The best process parameters are obtained: ozone ventilation 2.0 m³/h, ozone concentration 250 mg/L, catalyst dosage 30 kg/t. Finally, 1 t/h ozonation device was used to carry out continuous ozonation test on the wastewater after phenol removal and ammonia evaporation for 80 h under the optimal process parameters and the removal rate of COD was stable at about 43.5%, and the biodegradability (B/C) after reaction was stable above 0.4, which reduced the load and difficulty of subsequent biochemical treatment. It is proved that the ozone oxidation process has a good practical application effect.

Key words: ozone catalytic oxidation; ozone ventilation; ozone concentration; catalyst dosage; single factor test; orthogonal test

0 引言

固定床气化技术成熟、投资低且甲烷产量高,使其成为天然气制备的主要技术,但也产生了大量高浓度难降解有毒有害的废水^[1-3]。固定床气化产生的高浓度含酚有机废水水质成分复杂、污染物浓度高,单一工艺无法进行有效处理,一般采用预处理+生化处理+深度处理的三级处理工艺。目前经常规处理工艺^[4-6]后,固定床气化废水处理难达标,主要原因是蒸氨脱酚出水难降解有机物含量高,COD含量高,生化工艺无法有效降解,导致废水可生化性差。因此需采用有效方法提高蒸氨脱酚出水难降解有机物的脱除率及COD去除率。

目前国内外提高难降解有机废水去除率及COD去除率的方法主要有厌氧酸化法^[7-9]、电解法^[10-12]及臭氧氧化法^[13-16]等。厌氧酸化法中厌氧微生物对废水毒性敏感,尤其固定床气化废水中成分复杂,有毒物质种类多,毒性大,致使厌氧酸化法预处理效果不理想;电解法受电极功率及电解范围制约,一般处理规模较小,适合于量小的废水处理,难以适应固定床气化大量废水的处理;臭氧催化氧化法通过臭氧或生成的羟基自由基来提高氧化效率,易氧化难降解有机物且无二次污染,但目前多用于生化出水后的深度处理段,鲜见固定床气化后蒸氨脱酚出水直接采用臭氧氧化工艺的研究成果。因此针对现有项目运行过程中固定床气化蒸氨脱酚出水COD含量高,生化处理难度大等问题,开展蒸氨脱酚出水臭氧催化氧化工艺研究具有创新性。

考虑到臭氧催化氧化工艺易氧化难降解有机物,本文采用臭氧催化氧化工艺进行氧化试验,采用1 t/h臭氧催化氧化装置利用单因素及正交试验法研究了臭氧通气量、臭氧浓度及催化剂投加量对COD去除效果的影响规律,确定了工艺条件的影响主次顺序及最佳工艺参数。最后在最佳工艺参数下进行连续试验80 h,进一步考察了最佳工艺参数下COD的去除效果,以期为工程设计提供参考和借鉴。

1 材料与方 法

1.1 仪器与试剂

仪器:紫外可见分光光度计,BOD培养箱,溶解氧测定仪,精密pH计,电子天平等。

试剂:COD试剂、硫酸等。

1.2 试验装置

1 t/h臭氧催化氧化装置如图1所示。



图1 1 t/h臭氧催化氧化装置

Fig.1 1 t/h ozone catalytic oxidation device

臭氧催化氧化装置主要由反应塔、臭氧发生器、臭氧浓度检测器、气体流量计、氧气瓶、进水泵、电控柜组成。

臭氧催化氧化反应过程中,通过臭氧发生器将氧气瓶的氧气转换成臭氧,通过臭氧浓度检测器及气体流量计确定反应时臭氧的浓度及流量。原水通过进水泵由反应塔底部进入,臭氧也由反应塔底部进入,随后进水及臭氧分别通过反应塔内的催化剂,臭氧在催化剂下转化成羟基自由基,通过羟基自由基去除水中难降解有机物,降低水中COD,随后出水及未反应的臭氧从反应塔顶部排出。

1.3 试验水样水质

试验采用某气化厂脱酚蒸氨出水,废水有少许臭味。废水水质见表1。

表1 某气化厂脱酚蒸氨废水水质特征
Table 1 Wastewater quality characteristics of a gasification plant

pH	挥发酚/ (mg · L ⁻¹)	难挥发酚/ (mg · L ⁻¹)	总酚/ (mg · L ⁻¹)	COD 含量/ (mg · L ⁻¹)	BOD 含量/ (mg · L ⁻¹)
8.42	50	520	570	3 250	680

由表 1 可知,固定床气化蒸氨脱酚出水 COD 含量高达 3 250 mg/L, BOD 含量仅为 680 mg/L, 废水可生化性(BOD/COD)差,且仅为 0.21,增加了生化处理的负荷(B/C>0.3 时有利于生化),因此蒸氨脱酚出水在进生化之前有必要进行臭氧催化氧化脱除 COD 以提高可生化研究。

1.4 试验内容

1)采用单因素法研究不同的臭氧氧化工艺条件对 COD 去除效果的影响规律。

2)采用正交试验法确定工艺条件的影响主次顺序及最佳的工艺参数。

3)在最佳工艺参数下进行连续试验 80 h,考察 COD 的去除效果,优化最佳工艺参数。

2 结果与讨论

2.1 臭氧氧化工艺对 COD 去除效果的影响

臭氧氧化试验的进水为脱酚蒸氨出水,具体为出水通过管道进入装置集水箱,集水箱内设有泵机将废水按一定流速从反应塔底部进水口进入反应塔,与通过管道从反应塔底部进气口进入反应塔的臭氧接触,进行臭氧氧化反应。采用单因素试验按照制定的不同反应条件进行试验,分别在 0、30、60、90、120、150、180 min 取样,水样采用 0.45 μm 膜过滤后分析检测 COD 含量及去除率,确定主要影响因素即臭氧通气量、催化剂投加量及臭氧浓度。

2.1.1 臭氧通气量的影响

臭氧通气量是臭氧氧化过程的主要影响因素之一,一般臭氧通气量越大,COD 去除效果升高同时处理成本提高。试验考察了臭氧通气量在 1.0~3.5 m^3/h 对 COD 去除率的影响,试验条件为:臭氧浓度 200 mg/L,废水处理量 1 t/h,催化剂投加量 25 kg/t。试验运行稳定后取样分析 COD 含量,具体见表 2。不同臭氧通气量下 COD 去除率如图 2 所示。

表 2 不同臭氧通气量下出水 COD 含量

Table 2 COD content of effluent under different ozone ventilation

臭氧通气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	COD 含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
1.0	3 123	2 982	2 744	2 572	2 401	2 392	2 358
1.5	3 024	2 835	2 624	2 464	2 305	2 295	2 216
2.0	3 373	3 102	2 750	2 463	2 176	2 132	2 130
2.5	3 298	2 906	2 675	2 376	2 077	1 983	1 980
3.0	3 224	2 782	2 326	2 089	1 852	1 820	1 816
3.5	3 373	2 735	2 176	1 951	1 727	1 689	1 672

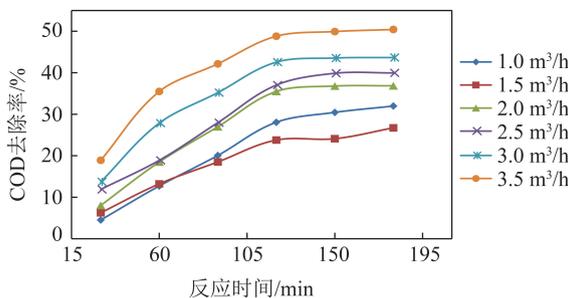


图 2 不同臭氧通气量下 COD 去除率

Fig.2 COD removal rate under different ozone ventilation

由表 2 及图 2 可知:①臭氧通气量对 COD 去除效果的影响较大。随着臭氧通气量的增加,同时时间下取样出水 COD 含量降低,COD 去除率升高。考虑原因为:臭氧通气量增加,臭氧及产生的羟基自由基与废水接触时间增加,反应效率提高,使得 COD 去除率增大及出水 COD 含量降低;②臭氧通气量为 1.0 m^3/h 时,反应 180 min 出水 COD 降至 2 358 mg/L,COD 去除率为 31.98%;臭氧通气量为 3.5 m^3/h 时,反应 180 min 出水 COD 降至 1 672 mg/L,COD 去除率为 50.43%;COD 去除率提高 18.15%。

综上 COD 去除效果与臭氧通气量密切相关。臭氧通气量越大,在同等条件下 COD 去除率越大,但会增加处理成本。因此考虑 COD 去除率及臭氧通气量成本,臭氧通气量选择为:1.5 $\text{m}^3/\text{h} \leq$ 臭氧通气量 \leq 2.5 m^3/h 。

2.1.2 臭氧浓度的影响

臭氧浓度是臭氧氧化过程的主要影响因素之一,一般臭氧浓度越大,COD 去除效果和处理成本均提高。试验考察了臭氧浓度 100~300 mg/L 对 COD 去除率的影响,试验条件为:催化剂投加量 25 kg/t,废水处理量 1 t/h,通气量 2.0 m^3/h 。试验运行稳定后取样分析 COD 含量,具体见表 3,不同臭氧浓度下 COD 去除率如图 3 所示。

表 3 不同臭氧浓度下出水 COD 含量

Table 3 COD content of effluent under different ozone concentration

臭氧浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD 含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
100	3 159	3 024	2 715	2 679	2 501	2 492	2 458
150	3 195	3 015	2 695	2 464	2 204	2 195	2 126
200	3 126	2 916	2 550	2 463	2 076	1 985	1 932
250	3 185	2 962	2 562	2 463	1 924	1 908	1 895
300	3 124	2 905	2 494	2 402	2 039	1 912	1 865
350	3 133	2 896	2 386	2 315	1 916	1 885	1 815

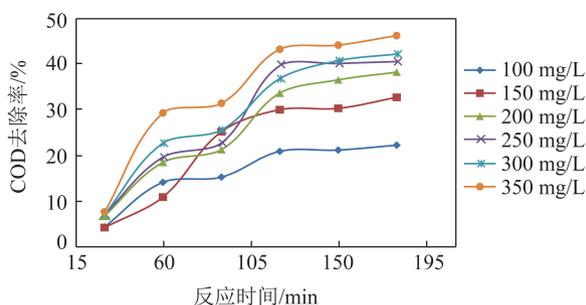


图3 不同臭氧浓度下COD去除率

Fig.3 COD removal rate under different ozone concentration

由表3及图3可知:①臭氧浓度对COD去除率影响较大。随着臭氧浓度的增加,同时间下取样出水COD含量降低,对应的COD去除率升高。考虑原因为:臭氧浓度增加,生产的羟基自由基及臭氧与废水中难降解有机物接触时间增长,氧化降解有机物的效率提高,使得COD去除率增大及出水COD含量降低。②臭氧浓度为100 mg/L时,反应180 min出水COD降至2 458 mg/L,COD去除率为22.19%;臭氧浓度为350 mg/L时,反应180 min出水COD降至1 815 mg/L,COD去除率为46.19%;COD去除率提高24%。

综上,COD去除效果与臭氧浓度密切相关。臭氧浓度越大,在同等条件下COD去除率越大,但相应的处理成本会增加。因此考虑COD去除率及臭氧浓度成本,臭氧浓度选择为:150 mg/L \leq 臭氧浓度 \leq 250 mg/L。

2.1.3 催化剂投加量的影响

催化剂投加量是臭氧氧化过程的主要影响因素之一,一般催化剂投加量越大,COD去除效果和成本均提高。试验考察了催化剂投加量10~35 kg/t对COD去除率的影响,试验条件为:臭氧浓度200 mg/L,废水处理量1t/h,通气量2.0 m³/h。试验运行稳定后取样分析COD含量,具体见表4,不同催化剂投加量下COD去除率如图4所示。

表4 不同催化剂投加量下水COD含量

Table 4 COD content of effluent under different catalyst dosage

催化剂投加量/(kg·t ⁻¹)	COD含量/(mg·L ⁻¹)						
	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
10	3 059	2 982	2 875	2 679	2 301	2 292	2 258
15	3 291	3 155	2 935	2 464	2 305	2 295	2 216
20	3 275	3 105	2 869	2 536	2 218	2 196	2 158
25	3 373	3 102	2 750	2 463	2 176	2 132	2 055
30	3 124	2 810	2 594	2 402	2 259	2 003	1 998
35	3 133	2 735	2 586	2 395	2 156	2 085	1 986

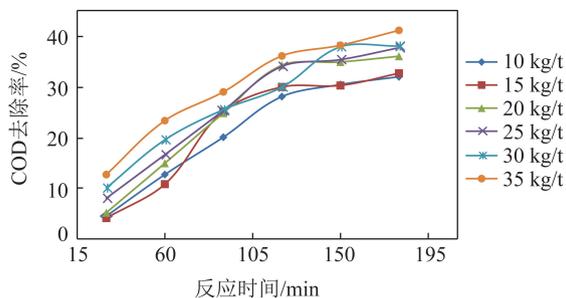


图4 不同催化剂投加量下COD去除率

Fig.4 COD removal rate under different catalyst dosage

由表4及图4可知:①催化剂投加量对COD去除效果的影响较大。随着催化剂投加量的增加,同时间下取样出水COD含量降低,对应的COD去除率升高。考虑原因为:催化剂投加量增加,催化活性位点增加,生产的羟基自由基增多,氧化降解有机物的效率提高,进而COD的去除率增大及出水COD含量降低。②催化剂投加量为10 kg/t时,反应180 min出水COD降至2 258 mg/L,COD去除率为37.74%;催化剂投加量为35 kg/t时,反应180 min出水COD降至1 986 mg/L,COD去除率为41.12%,COD去除率提高3.38%。

综上,COD去除效果与催化剂投加量密切相关。催化剂投加量越大,在同等条件下COD去除率越大,但相应的处理成本会增加。因此考虑COD去除率及催化剂成本,催化剂投加量选择为:20 kg/t \leq 催化剂投加量 \leq 30 kg/t。

2.2 臭氧氧化工艺参数优化

为获得最佳臭氧氧化工艺条件,采用正交试验法对3个因素进行优化分析。在单因素研究基础上,选择3因素3水平的正交试验设计L₉(3⁴),试验设计方案见表5。

表5 臭氧氧化的正交试验

Table 5 Orthogonal experiment of ozonation

因素	水平1	水平2	水平3
通气量/(m ³ ·h ⁻¹)	1.5	2.0	2.5
臭氧浓度/(mg·L ⁻¹)	150	200	250
催化剂投加量/(kg·t ⁻¹)	20	25	30

根据试验设计方案进行正交试验,并对试验结果进行分析,具体见表6。

由表6可知,3种臭氧氧化条件对COD去除率影响的主次顺序为臭氧浓度>通气量>催化剂投加量,验证了上述单因素试验结果,即臭氧浓度的改变对COD去除效果影响最大,其次是臭氧通气量,最后是催化剂投加量,考虑原因为:现场试验过程中臭

氧浓度的增加不仅使废水中难降解有机物与更多的臭氧接触,也会进一步促进羟基自由基的生产,从而更加提高 COD 去除率。得出最佳的反应条件为:臭氧通气量为 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$,臭氧浓度为 250 mg/L ,催化剂投加量为 30 kg/t 。

表 6 臭氧氧化正交试验结果

Table 6 Orthogonal experimental analysis of ozonation

试验号	通气量 A $/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	臭氧浓度 B $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	催化剂投加量 C $/(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	COD 去除率/%
1	1.5	150	20	24.72
2	1.5	200	25	32.41
3	1.5	250	30	38.85
4	2.0	150	25	35.50
5	2.0	200	30	40.04
6	2.0	250	20	43.90
7	2.5	150	30	32.33
8	2.5	200	20	34.74
9	2.5	250	25	39.02
K_1	95.98	92.55	103.36	
K_2	119.44	107.19	106.93	
K_3	106.09	121.77	111.22	
COD k_1	31.99	30.85	34.45	
去除 k_2	39.81	35.73	35.64	
率/% k_3	35.36	40.59	37.07	
R	23.46	29.22	7.86	
因素主→次	$B>A>C$			
最优组合条件	$A_2B_3C_3$			

注: K_i 为任意列上水平号为 i 时所对应的试验结果之和; k_i 为 $K_i/3$,即 K_i 的平均值; R 为极差,即每个因素下 K 的最大值减最小值。

3 最佳臭氧氧化效果

采用 1 t/h 臭氧氧化装置,在最佳工艺参数下(臭氧通气量 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$,臭氧浓度 250 mg/L ,催化剂投加量 30 kg/t ,废水处理量 1 t/h)对脱酚蒸氨后废水进行连续臭氧氧化试验考察,试验连续运行超过 80 h ,每隔 4 h 取样分析 COD。试验结果见表 7。连续反应时间下的 COD 去除率和可生化性(B/C)如图 5 所示。

由表 7 及图 5 可知,在最佳工艺参数下,采用 1 t/h 臭氧氧化装置进行试验且连续运行 80 h ,COD 去除率稳定在 43.5% 左右,反应后可生化性(B/C)稳定至 0.4 以上,减轻了后续生化处理的负荷及难度。由此证明臭氧氧化工艺实际应用效果良好。

表 7 连续反应时间下 COD 去除效果

Table 7 Removal effect of COD under continuous reaction time

反应时间/h	出水 COD 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	COD 去除率/%	反应时间/h	出水 COD 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	COD 去除率/%
4	1 757	43.9	44	1 788	42.9
8	1 748	44.2	48	1 713	45.3
12	1 798	42.6	52	1 788	42.9
16	1 760	43.8	56	1 770	43.5
20	1 713	45.3	60	1 829	41.6
24	1 788	42.9	64	1 854	40.8
28	1 820	41.9	68	1 760	43.8
32	1 719	45.1	72	1 779	43.2
36	1 685	46.2	76	1 763	43.7
40	1 832	41.5	80	1 770	43.5

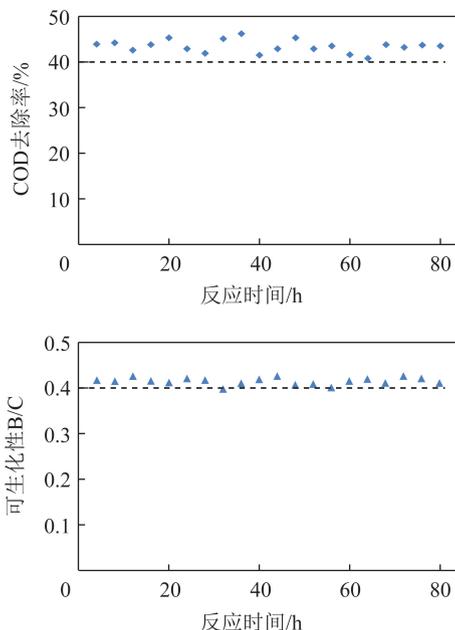


图 5 连续反应时间下的 COD 去除率和可生化性(B/C)
Fig.5 COD removal rate and biodegradability B/C under continuous reaction time

4 结 论

1)对臭氧氧化工艺条件进行单因素试验,得到臭氧氧化工艺条件对 COD 去除效果的影响规律,尽可能降低处理成本的前提下,保证较高 COD 去除效果。获得的臭氧氧化条件为: $1.5 \text{ m}^3/\text{h} \leq$ 臭氧通气量 $\leq 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $150 \text{ mg/L} \leq$ 臭氧浓度 $\leq 250 \text{ mg/L}$, $20 \text{ kg/t} \leq$ 催化剂投加量 $\leq 30 \text{ kg/t}$ 。

2)在单因素试验基础上采用正交试验法对臭氧氧化工艺条件进行优化,得到了最佳的臭氧氧化

工艺参数为:臭氧通气量 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 臭氧浓度 250 mg/L , 催化剂投加量 30 kg/t 。

3) 在最佳臭氧氧化工艺参数下, 采用 1 t/h 臭氧氧化装置连续运行 80 h , 出水 COD 去除率稳定在 43.5% 左右, 反应后可生化性 (B/C) 稳定至 0.4 以上。

参考文献 (References):

- [1] GHOSH S, DE S. Energy analysis of a cogeneration plant using coal gasification and solid oxide fuel cell [J]. Energy, 2006(2/3): 345-363.
- [2] 普煜, 陈樑, 宁平. 鲁奇炉渣在废水净化中的应用研究 [J]. 工业水处理, 2007, 27(5): 59-62.
PU Yu, CHEN Liang, NING Ping. Application of Lurgi slag to wastewater purification [J]. Industrial Wastewater Treatment, 2007, 27(5): 59-62.
- [3] GAI H J, JIANG Y B, QIAN Y, et al. Conceptual design and retrofitting of the coal-gasification wastewater treatment process [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 138: 84-94.
- [4] 何斌, 王亚娥. 蒸氨-脱酚-SBR 处理兰炭废水的研究 [J]. 广东化工, 2009, 36(12): 140-141.
HE Bin, WANG Yae. Research on coking waste water treatment by distillation ammonia nitrogen-elimination phenol-SBR [J]. Guangdong Chemical Industry, 2009, 36(12): 140-141.
- [5] 王伟, 韩洪军, 张静, 等. 煤制气废水处理技术研究进展 [J]. 化工进展, 2013, 32(3): 681-686.
WANG Wei, HAN Hongjun, ZHANG Jing, et al. Progress in treatment technologies of coal gasification wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(3): 681-686.
- [6] 王文豪, 高健磊, 高镜清. 预处理+A/O+臭氧氧化+BAF 深度处理煤化工废水 [J]. 工业水处理, 2019, 39(6): 98-103.
WANG Wenhao, GAO Jianlei, GAO Jingqing. Pretreatment +A/O+ozonation +BAF process for advanced treatment of coal chemical wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(6): 98-103.
- [7] 赵健良, 童昶, 沈耀良. 厌氧(水解酸化)-好氧生物处理工艺及其在我国难降解有机废水处理中的应用 [J]. 苏州大学学报, 2002, 22(2): 85-88.
ZHAO Jianliang, TONG Chang, SHEN Yaoliang. Anaerobic (hydrolysis-acidogenesis)-aerobic process and its study and applications in refractory organic wastewater treatment in china [J]. Journal of Soochow University, 2002, 22(2): 85-88.
- [8] 邱立伟, 向光伟, 邓贤文. 水解酸化-厌氧-缺氧-好氧法处理高浓度化工废水 [J]. 水处理技术, 2011, 39(12): 131-134.
QIU Liwei, XIANG Guangwei, DENG Xianwen. Treatment of high concentration chemical wastewater by hydrolysis acidification anaerobic anoxic aerobic process [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 39(12): 131-134.
- [9] 邵永康, 黄军. 水解酸化-厌氧-好氧法处理苯甲酸类化工废水研究 [J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 115-119.
SHAO Yongkang, HUANG Jun. Research on treatment of benzoic wastewater by hydrolysis-anaerobic-aerobic method [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(8): 115-119.
- [10] 张文博, 刘发强, 牛进龙. 铁碳内电解法处理化工废水的研究 [J]. 石化技术与应用, 2007, 25(1): 44-47.
ZHANG Wenbo, LIU Faqiang, NIU Jinlong. Chemical wastewater treatment by ferrum-carbon internal electrolysis [J]. Petrochemical Technology and Application, 2007, 25(1): 44-47.
- [11] 曾小勇, 王红武, 马鲁铭, 等. 微曝气催化铁内电解法预处理化工废水 [J]. 中国给水排水, 2005, 21(12): 1-4.
ZENG Xiaoyong, WANG Hongwu, MA Luming, et al. Pretreatment of chemical wastewater by micro-aeration catalyzed iron internal electrolysis process [J]. China Water and Wastewater, 2005, 21(12): 1-4.
- [12] 张俊琪, 樊金红, 马鲁铭, 等. 催化铁内电解法处理酸性化工废水后混合印染废水进行混凝处理的研究 [J]. 水处理技术, 2012, 38(9): 88-92.
ZHANG Junqi, FAN Jinhong, MA Luming, et al. Coagulation treatment of printing and dyeing wastewater mixed with acid chemical wastewater after catalyzed iron internal electrolysis treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(9): 88-92.
- [13] 任明, 孙淑英, 金艳, 等. 催化臭氧氧化法处理煤化工高盐废水 [J]. 环境工程, 2018, 36(8): 54-59.
REN Ming, SUN Shuying, JIN Yan, et al. Treatment of high-salt wastewater from coal chemical industry by catalytic ozone oxidation [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 54-59.
- [14] 高珊, 周集体, 孙丽颖, 等. 臭氧氧化法处理煤化工难降解废水实验研究 [J]. 辽宁化工, 2013, 42(10): 1179-1184.
GAO Shan, ZHOU Jiti, SUN Liying, et al. Research progress in controlling membrane biological fouling by quorum sensing system [J]. Liaoning Chemical Industry, 2013, 42(10): 1179-1184.
- [15] 胡洁, 王乔, 周珉, 等. 芬顿和臭氧氧化法深度处理化工废水的对比研究 [J]. 四川环境, 2015, 34(4): 23-26.
HU Jie, WANG Qiao, ZHOU Min, et al. Comparison study on the application of fenton and ozone oxidation in chemical wastewater treatment [J]. Sichuan Environment, 2015, 34(4): 23-26.
- [16] 陈媛媛, 陆祺, 潘爱萍. 臭氧氧化深度处理煤化工废水的应用 [J]. 化工管理, 2015(7): 121.
CHEN Yuanyuan, LU Qi, PAN Aiping. Application of advanced treatment of coal chemical wastewater by ozonation [J]. Chemical Management, 2015(7): 121.