

刘琪, 余琴芳, 许江军, 等. Fenton-臭氧组合工艺深度处理工业园区废水试验[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 95-102, 167.

LIU Q, YU Q F, XU J J, et al. Experiment on advanced wastewater treatment in industrial park by combined process of Fenton-ozone [J].

Water Purification Technology, 2022, 41(2): 95-102, 167.



扫我试试?

Fenton-臭氧组合工艺深度处理工业园区废水试验

刘琪¹, 余琴芳¹, 许江军², 王洋江², 奚浩¹, 万年红¹

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430000; 2. 绍兴市上虞区水务集团有限公司, 浙江绍兴 312300)

摘要 工业园区产生的废水通常需要在生化处理后接深度处理过程使之达标排放。随着排放标准中对 COD_{Cr} 排放限值要求的升高, 已有深度处理设施往往需要提标升级改造。本研究将 Fenton 和臭氧两种深度处理方法进行组合, 探究 Fenton-臭氧及臭氧-Fenton 组合工艺对某工业园区污水处理厂生化出水的 COD_{Cr} 降解效果。发现 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 H_2O_2 、臭氧的最优投加量分别为 200、200、45 mg/L, Fenton-臭氧组合工艺能将生化出水的 COD_{Cr} 质量浓度从 150.00 mg/L 降至 40.00~50.00 mg/L, 满足 GB 18918—2002 一级 A 排放标准, 优于臭氧-Fenton 组合工艺的 50.00~60.00 mg/L, 且出水可生化性升高。Fenton-臭氧组合工艺下废水的运行成本为 1.09 元/t, 处理工业园区生化出水的环境效应显著, 有规模化应用的潜力。

关键词 工业园区 废水 深度处理 Fenton 臭氧 COD_{Cr}

中图分类号: X703; TQ09 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)-02-0095-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.02.015

Experiment on Advanced Wastewater Treatment in Industrial Park by Combined Process of Fenton-Ozone

LIU Qi¹, YU Qinfang¹, XU Jiangjun², WANG Yanghong², XI Hao¹, WAN Nianhong¹

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. Shangyu District Shaoxing Municipal Water Group Co., Ltd., Shaoxing 312300, China)

Abstract Wastewater produced in industrial parks is usually necessary to add an advanced treatment process after biochemical treatment to make it meet discharge standards. With the increasing requirements of COD_{Cr} in emission standards, existing advanced treatment facilities often need to be upgraded. In this study, two advanced oxidation methods, Fenton and ozone, were combined to explore the COD_{Cr} degradation effect of Fenton-ozone and ozone-Fenton combined processes on the biochemical effluent of a wastewater treatment plant (WWTP) in an industrial park. It was found that the optimal dosages of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_2O_2 , and ozone were 200, 200, 45 mg/L, respectively. Fenton-ozone combined process could reduce the COD_{Cr} of biochemical effluent from 150.00 mg/L to 40.00~50.00 mg/L, which meets the GB 18918—2002 class A criteria, it was better than the 50.00~60.00 mg/L of ozone-Fenton combined process, and the biodegradability of effluent was increased. The cost of Fenton-ozone combined process was 1.09 yuan/t. The environmental effect of this process treating biochemical effluent in industrial park was significant, and it had the potential for large-scale application.

Keywords industrial park wastewater advanced treatment Fenton ozone COD_{Cr}

工业园区是我国重要的经济载体, 近年来由于我国工业化进程的加速, 各类工业园区应运而生。

据不完全统计, 我国市、县级工业园区达到了 40 000 多家, 单个园区的企业类型也呈现出多产业并存的现象。而另一方面, 由于对工业园区污水处理缺乏系统设计及有效管理, 各地污染事件屡见报端, 对流域环境、饮用水水源地等造成严重的威胁^[1]。相比

[收稿日期] 2021-04-25

[作者简介] 刘琪(1990—), 男, 博士, 研究方向为环保新材料及工业废水的深度处理, E-mail: amuliuiqi@qq.com。

市政污水,工业园区污水具有水质成分复杂、波动较大、水质差异大等特点,并且常含有重金属、高盐、难降解有机物等有毒有害的成分,使得当前工业园区污水处理面临巨大挑战^[2]。

2015年发布的《水污染防治行动计划》提出集中治理工业聚集区水污染,并提出了相应治理措施。但工业园区污水成分相对复杂,工业园区污水处理厂运营具有一定的难度,尤其是在标准提升后,如何高效、稳定地达标运营,是工业园区污水集中处理所面临的主要问题。

浙江省某工业园区污水处理厂接纳化工、制药、印染类企业废水,工业废水处理能力为10万m³/d,其中化工废水占47.5%、印染废水占43.6%,其水质成分复杂,处理极为困难。目前该厂处理流程为:进水→调节池→折板絮凝沉淀池→厌氧水解池→AO生物池→二沉池→调节池→三相催化Fenton→活性焦吸附池→高效澄清池→排水,现执行排放标准为COD_{Cr}≤80 mg/L,日常监测Fenton出水COD_{Cr}质量浓度为80~100 mg/L,厂区出水为50~60 mg/L。为了满足日益增长的水量和排放标准要求,适当降低活性焦吸附池运行负荷,必须对已有污水处理设施进行扩建及提标升级改造,使出水COD_{Cr}满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准限值(50 mg/L)。

目前,在工业上常用的深度处理技术为臭氧氧化法^[3-4]及Fenton氧化法^[5-6]。其中,臭氧氧化在废水处理中主要有两种作用机理:其一为臭氧分子与有机污染物分子的直接氧化反应;其二为臭氧分子在化学作用下生成羟基自由基(·OH),通过具有

强氧化性的·OH实现对有机污染物分子的间接氧化降解,间接氧化通常需要在有催化剂的存在下才占主导作用^[7-8]。臭氧氧化法有较强的选择性,反应速率较低,难以彻底去除废水中的COD_{Cr}^[9]。Fenton氧化法的原理是通过H₂O₂与Fe²⁺反应生成的·OH与污水中的有机污染物反应,从而达到降解有机污染物的目的。但是Fenton技术在实际应用中还存在明显的不足:首先,该反应需要消耗大量的H₂O₂与Fe²⁺,其运行成本过高;此外,该反应的反应时间长,通常以小时计算,难以满足实际工程上的需求^[6,10]。在实际应用中,Fenton常需要与其他工艺进行组合,才能满足一定的去除要求^[11]。

本研究拟采用南京神克隆科技有限公司提供的Fenton氧化装置和自研发的臭氧氧化装置进行中试试验,对比研究“Fenton-臭氧-BAF(曝气生物滤池)”及“臭氧-Fenton-BAF”对上述污水厂生化出水中COD_{Cr}的降解效果,探索最佳运行模式与运行参数,为该厂的新建/扩建工程及提标工程工艺设计提供指导,同时为今后类似高标准工业废水处理工程提供借鉴。

1 试验部分

1.1 材料与仪器

试验所用废水取自上述污水厂的二沉池出水,呈暗红色,其COD_{Cr}质量浓度为100.00~150.00 mg/L,pH值为6.50~7.30。

试验所用中试装置采用自行设计的臭氧反应器,结合环保公司已有的三相催化Fenton中试机,流程为“二沉池-Fenton-砂滤-臭氧-活性炭/活性焦BAF”及“二沉池-砂滤-臭氧-Fenton-活性炭/活性焦BAF”,试验流程如图1所示。

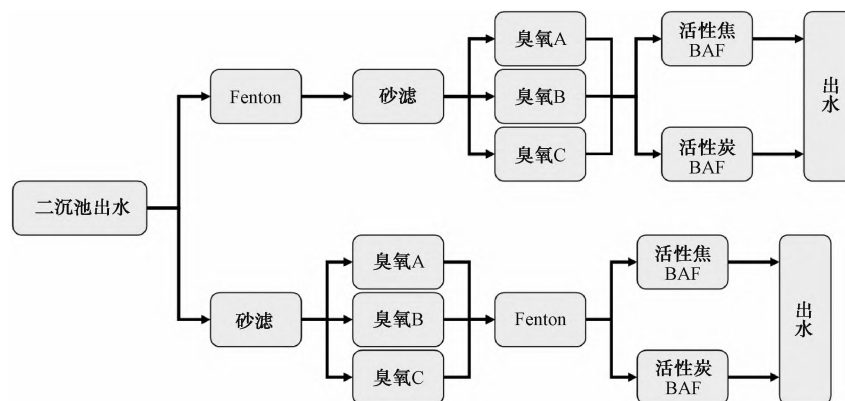


图1 试验流程图

Fig.1 Experiment Flow Diagram

其中,Fenton 反应器与“砂滤-臭氧反应柱”的先后顺序可以调换,氧化段后接 BAF,模拟厂区已

有 BAF 池,主要起兜底作用。中试装置中各反应装置/设备的参数如表 1 所示。

表 1 装置与设备的型号、参数
Tab.1 Models and Parameters of Devices and Equipments

装置/设备	型号/参数	生产厂家
Fenton 反应器	处理能力为 0.50 m ³ /h	南京神克隆科技有限公司
砂滤	有效高度为 1.5 m,处理能力为 0.50 m ³ /h	-
臭氧反应柱	有效高度为 3.5 m,处理能力为 0.20 m ³ /h,停留时间为 30~60 min,共 3 座	-
BAF 柱	有效高度为 2 m,处理能力为 0.50 m ³ /h,停留时间为 30~90 min,共两座,分别填充活性炭和活性焦	-
臭氧发生器	FKL-YB-32G,臭氧产量为 32 g/h,臭氧质量浓度为 50~60 mg/L	武汉富康隆环保设备有限公司
氧气发生器	F0-4TB,氧气流量为 3~5 L/min	武汉富康隆环保设备有限公司

此外,将中试反应器等比例缩小成特制小试装置,装置有效容积为 4 L,用于测定最佳反应参数。

1.2 试验方法

进行“二沉池-Fenton-砂滤-臭氧-活性炭/活性焦 BAF”试验流程,Fenton 反应柱的废水最大流量为 0.50 m³/h,各臭氧反应柱的废水最大流量为 0.20 m³/h,试验过程中废水的流量分别为 0.45 m³/h 和 0.15 m³/h,观测试验结果。然后进行“二沉池-砂滤-臭氧-Fenton-活性炭/活性焦 BAF”试验流程,控制各臭氧柱的废水流量为 0.15 m³/h,Fenton 反应柱的废水流量为 0.45 m³/h。将两种工艺流程在最佳参数条件运行下的出水 COD_{Cr}进行对比。

1.3 分析方法

COD_{Cr}的测试方法遵循《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)。TOC 使用岛津 TOC-L CPH 型总有机碳分析仪测定。臭氧浓度使用朗科电子科技有限公司 LT-200D 型高浓度臭氧分析仪检测,常规量程为 0~200 g/Nm³。

2 结果与讨论

2.1 O₃ 氧化反应参数的优化

本节试验使用特制反应柱作为反应器,取 2 L 水样置于反应器中,按照试验条件进行不同臭氧投加量的试验。臭氧由氧气发生器及臭氧发生器制备,混合气体通过曝气盘从反应器底部进入液相。臭氧投加量通过调节气体流量和反应时间进行控制,通过比较反应前后 COD_{Cr}的变化情况确定最佳投加量。本试验于 2020 年 11 月在厂区内进行,试验期间厂区生化出水 COD_{Cr}质量浓度约 106.70

mg/L,pH 值为 6.93,经砂滤去除部分 SS 后,COD_{Cr}质量浓度为 109.00 mg/L,pH 未发生明显变化。

对砂滤后出水进行臭氧接触氧化处理,不同的臭氧投加量都表现出一定的 COD_{Cr}去除能力。在臭氧投加量分别为 15、30、45、60 mg/L 时,30 min 后的 COD_{Cr}质量浓度分别为 70.82、69.72、61.37、62.76 mg/L。可见,臭氧对 COD_{Cr}的去除率在臭氧投加量为 45 mg/L 时最高,可达 43.7%。在此基础上进一步提高臭氧投加量,COD_{Cr}的去除率未见明显提升,且臭氧投加量的提升意味着更高的建设成本及后期运行成本,故根据本节试验的结论,推荐的臭氧投加量为 45 mg/L。

然而本试验中未添加臭氧催化剂,臭氧的降解作用主要为直接氧化,其降解效率较低,COD_{Cr}的去除率有限。在最优条件下,出水 COD_{Cr}仍未能满足 GB 18918—2002 中的一级 A 标准。为保证出水 COD_{Cr}能达标排放,需要与其他工艺联用。

2.2 臭氧-Fenton 组合工艺试验研究

2.2.1 Fenton 氧化反应参数的验证

本阶段试验在固定臭氧投加量的条件下,通过在不同 FeSO₄·7H₂O 和 H₂O₂ 投加量下观察臭氧-Fenton 组合工艺对该厂生化出水 COD_{Cr}、TOC 的去除效果,选取较优投加量作为推荐值。该厂的工程实践表明,FeSO₄·7H₂O 和 H₂O₂ 投加量均为 200 mg/L,且 Fenton 反应的 pH 值为 3.00 时,对生化出水的 COD_{Cr}降解效果最优。本试验以 200 mg/L 为基准,增加 H₂O₂ 投加量或/和减少 FeSO₄·7H₂O 投加量,将臭氧投加量固定为约 45 mg/L,臭氧和 Fenton 的反应时间分别控制在 30 min 和 120 min,

观察组合工艺小试系统对生化出水 COD_{Cr} 的去除效果。试验阶段生化出水 COD_{Cr} 质量浓度约为 150.00 mg/L, TOC 质量浓度约 65 mg/L。试验结果如表 2 和图 2 所示。

由图 2 可知 臭氧-Fenton 组合工艺下 臭氧反应段将废水的 COD_{Cr} 质量浓度从 150.00 mg/L 降至 82.80 mg/L, TOC 质量浓度从 65.0 mg/L 降至 37.2 mg/L。说明在臭氧反应段中 易降解有机物得以矿化。

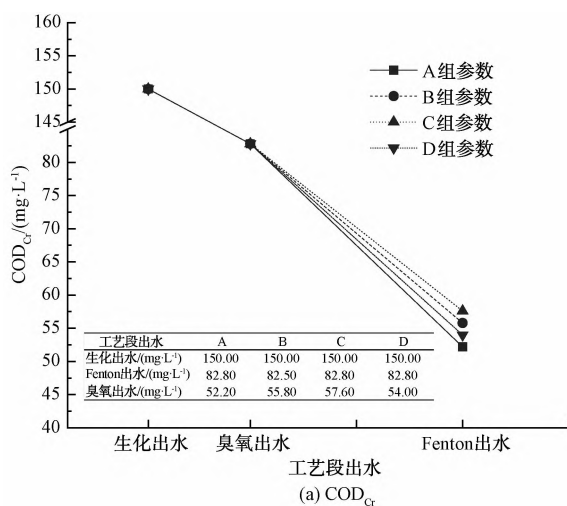


表 2 臭氧-Fenton 组合工艺的不同参数试验
Tab.2 Experiments on Different Parameters of O₃-Fenton Combined Process

参数组	FeSO ₄ ·7H ₂ O 投加量 (mg·L ⁻¹)	H ₂ O ₂ 投加量 (mg·L ⁻¹)
A	200	200
B	200	300
C	100	200
D	100	300

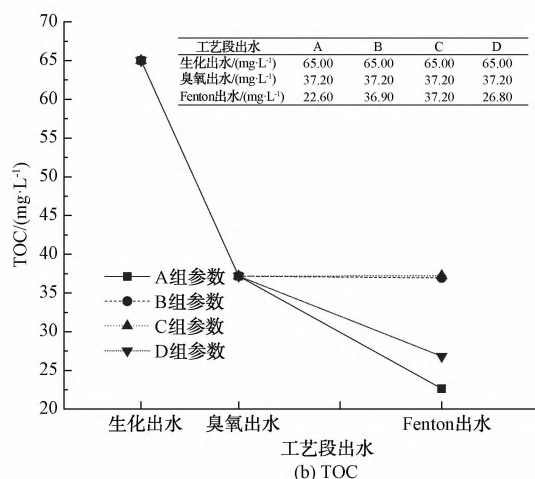


图 2 不同参数条件下污染物在不同阶段的浓度

Fig.2 Concentration of Pollutants in Different Stages under Different Parameters

再经 4 组不同药剂投加量的 Fenton 处理后, 出水的 COD_{Cr} 和 TOC 质量浓度在 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 H_2O_2 投加量均为 200 mg/L 时达到最低值, 分别为 52.20 mg/L 和 22.6 mg/L。Fenton 药剂投加量的提高并不能提升 COD_{Cr} 和 TOC 的去除率。说明 Fenton 过程虽然在一定程度上能去除臭氧反应过程中未能矿化的有机污染物, 但在两次氧化反应后, 仍然残留部分难降解有机污染物。根据参数验证试验结果, 在臭氧-Fenton 组合工艺中, 最适宜的臭氧、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 H_2O_2 投加量分别为 45、200 mg/L 和 200 mg/L。然而, 出水 COD_{Cr} 质量浓度为 52.20 mg/L, 依旧难以满足 GB 18918—2002 中一级 A 排放标准 (50 mg/L), 仍需要在组合工艺后接厂区原有活性炭吸附池。

2.2.2 臭氧-Fenton 组合工艺对 COD_{Cr} 的去除效果

在保持进水流量为 0.5 m³/h、pH 值为 6.50~7.10 的条件下将中试装置连续运行 5 d。其中 Fenton 药剂 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 H_2O_2 投加量约 200

mg/L, 臭氧投加量约 45 mg/L。根据各阶段停留时间在不同时间点取样, 分别考察各阶段出水的 COD_{Cr} 含量, 结果如图 3 所示。

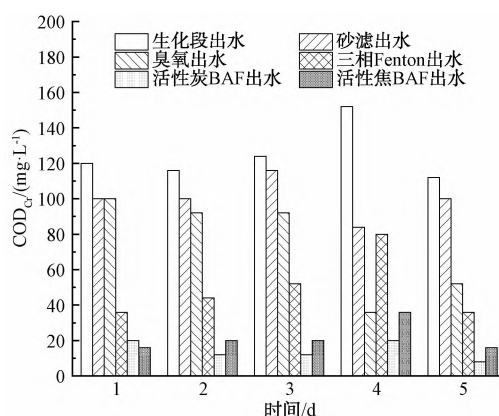


图 3 “二沉池-砂滤-臭氧催化-Fenton-活性炭/活性焦 BAF”各阶段出水 COD_{Cr}

Fig.3 COD_{Cr} of Each Stage of "Secondary Sedimentation Tank-Sand Filter-Ozone-Fenton-Activated Carbon/Activated Coke BAF"

二沉池出水 COD_{Cr} 质量浓度均值为 113.00 mg/L, 臭氧出水均值为 99.00 mg/L, Fenton 出水均值为 57.00 mg/L。其中, 第 4 d 生化段出水、臭氧出水、Fenton 出水趋势异常, 可能原因在于当天厂区生化段检修, 导致废水中成分发生变化。活性炭出水

COD_{Cr} 质量浓度均值为 20.00 mg/L, 活性焦出水均值为 27.00 mg/L。增加臭氧段后, COD_{Cr} 均值依然不满足 GB 18918—2002 中一级 A 排放标准。对中试装置正常运行时的各阶段出水进行了 EEM 分析, 结果如图 4 所示。

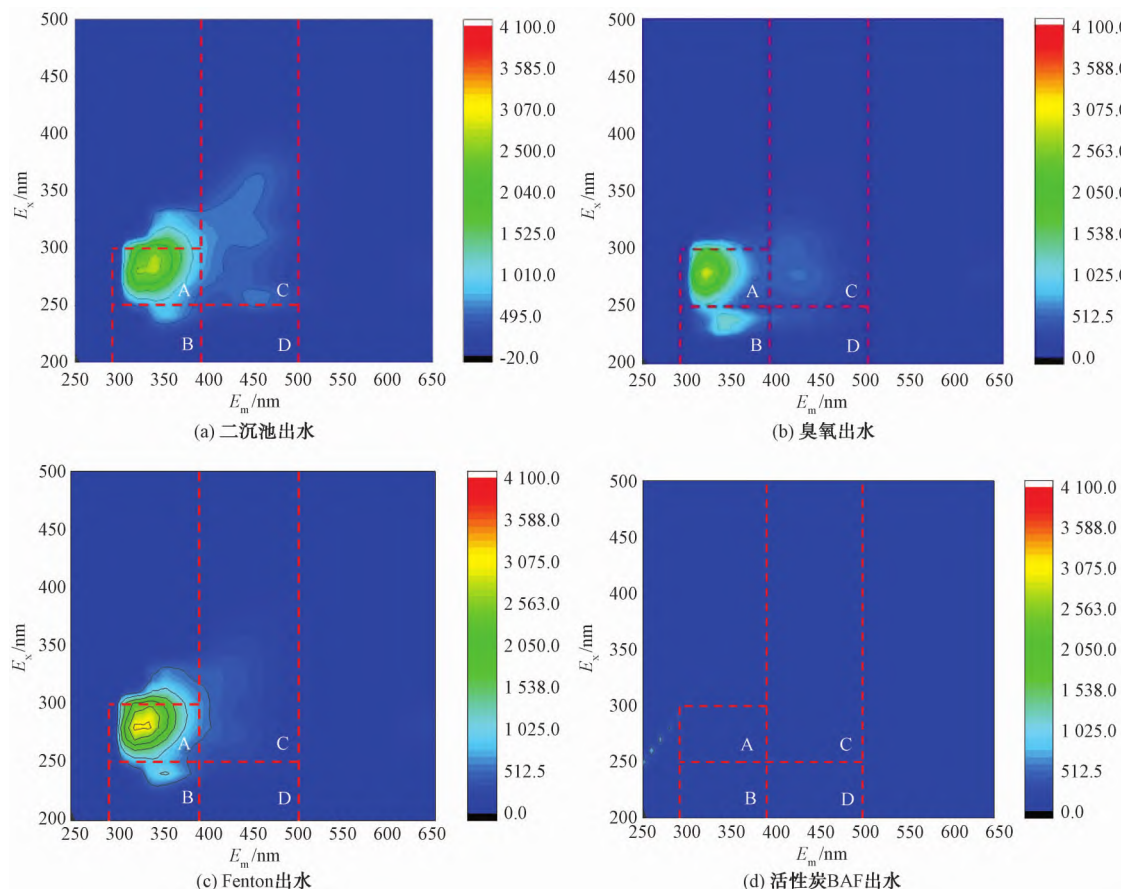


图 4 臭氧-Fenton 组合工艺出水 EEM 图

Fig.4 EEM Diagram of Effluent with Ozone-Fenton Combined Process

根据已有文献,对激发波长 (E_x) 和发射波长 (E_m) 所形成的荧光区域进行分区, A~D 各区域代表性物质依次为微生物代谢产物、芳香性蛋白类物质、类腐植酸和类富里酸类物质^[12-14]。

由图 4 可知,生化出水中 COD_{Cr} 的主要组成成分为微生物代谢产物及类腐植酸物质。臭氧过程对类腐植酸有很好的降解效果,对微生物代谢产物也有一定的降解能力,并产生了芳香性蛋白类物质。在经过 Fenton 处理后,各类物质进一步降解。经过活性炭 BAF 后,几乎所有污染物均被吸附或降解。

2.3 Fenton-臭氧组合工艺试验研究

2.3.1 最优投加量的验证

参考 2.1.2 的试验方法,本试验同样以 200

mg/L 为基准,增加 H_2O_2 投加量或/和减少 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投加量,二者的投加量与表 2 相同,将 Fenton 反应的 pH 值固定为 3.00,臭氧投加量固定为约 45 mg/L,臭氧和 Fenton 的反应时间分别控制在 30 min 和 120 min,观察组合工艺小试系统对生化出水 COD_{Cr} 的去除效果。试验阶段生化出水 COD_{Cr} 质量浓度约为 150.00 mg/L, TOC 质量浓度约为 65.0 mg/L。试验结果如图 5 所示。

根据参数优化试验结果, Fenton 药剂投加量的提升并不能提高 COD_{Cr} 的去除率,但根据 TOC 的测试结果,发现投加量的提升对 COD_{Cr} 的组成造成了一定的影响。在经过臭氧处理后,废水的 COD_{Cr} 和 TOC 得到了进一步去除,可以认为 Fenton 过程一定

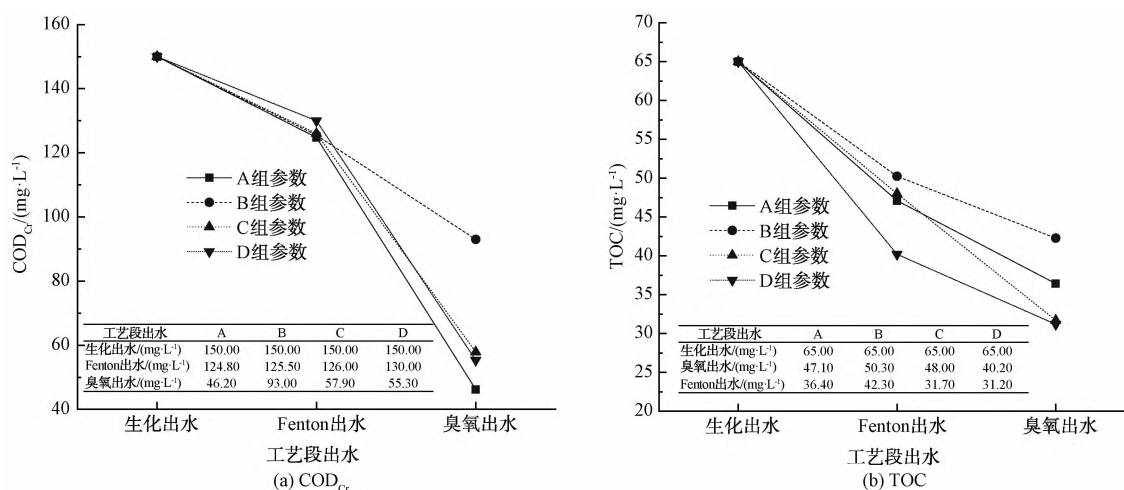


图5 Fenton-臭氧组合工艺小试试验结果

Fig.5 Test Results of Fenton-Ozone Combined Process

程度上将大分子有机物降解为小分子有机物,臭氧过程则能有效地将其去除。

H₂O₂、FeSO₄·7H₂O、臭氧的投加量分别为 200、200、45 mg/L 时,Fenton-臭氧组合工艺的出水 COD_{Cr} 质量浓度最低,达到了 46.20 mg/L,满足 GB 18918—2002 中一级 A 排放标准,此时出水 TOC 质量浓度为 36.4 mg/L。在降低 H₂O₂ 投加量后,出水 COD_{Cr} 质量浓度高于 50 mg/L,不满足排放要求。故 Fenton-臭氧组合工艺中最适宜的 H₂O₂、FeSO₄·7H₂O 和臭氧投加量分别为 200、200 mg/L 和 45 mg/L。

此外,发现 Fenton-臭氧组合工艺最优投加量下 TOC 要高于臭氧-Fenton 组合工艺的测试结果,其可能原因在于本试验中 TOC 的测试方法为 NPOC,两组试验中的两次氧化反应过程使大分子有机物被降解为小分子有机物,产生部分可吹扫有机碳(POC),该部分物质在酸化曝气过程中被去除。

2.3.2 Fenton-臭氧组合工艺对 COD_{Cr} 的去除效果

在保持进水流量为 0.5 m³/h、pH 值为 6.50~7.10 的条件下将中试装置连续运行 5 d。其中 Fenton 药剂 FeSO₄·7H₂O 和 H₂O₂ 投加量均约为 200 mg/L,臭氧投加量约为 45 mg/L。根据各阶段停留时间在不同时间点取样,分别考察各阶段出水的 COD_{Cr} 结果如图 6 所示。

二沉池出水 COD_{Cr} 质量浓度均值为 106.00 mg/L, Fenton 出水均值为 52.00 mg/L,臭氧出水均值 40.00 mg/L,活性炭出水均值为 37.00 mg/L,活性

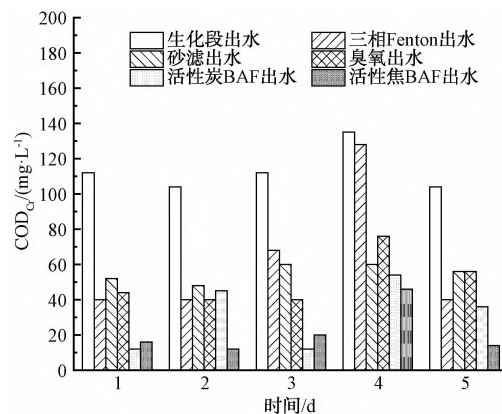


图6 “二沉池-Fenton-砂滤-臭氧催化-活性炭/活性焦 BAF”各阶段出水 COD_{Cr}

Fig.6 COD_{Cr} of Each Stage of "Secondary Sedimentation Tank-Fenton-Sand Filter-Ozone-Activated Carbon/Activated Coke BAF"

焦出水均值为 21.00 mg/L。增加臭氧段后,COD_{Cr} 质量浓度均值即低于 GB 18918—2002 中一级 A 排放标准(50 mg/L)。对各阶段出水进行了 EEM 分析,分析结果如图 7 所示。

在经过 Fenton 处理后,区域 B 和区域 C 的荧光强度增大,代表芳香族蛋白类物质、类腐植酸物质增多。微生物代谢产物的荧光峰 E_x 和 E_m 降低,即发生了紫移。荧光峰红移通常意味着有机物中羰基、羟基、烷氧基、氨基和羧基等含氧或含氮基团的增加,紫移则代表羰基、羟基、胺基等基团的减少、电子云密度的降低、芳香环和共轭结构的破坏等。废水生化出水中的不饱和程度很高,芳香类结构多,Fenton 氧化会破坏芳香类结构,虽然也会生成醛、酮

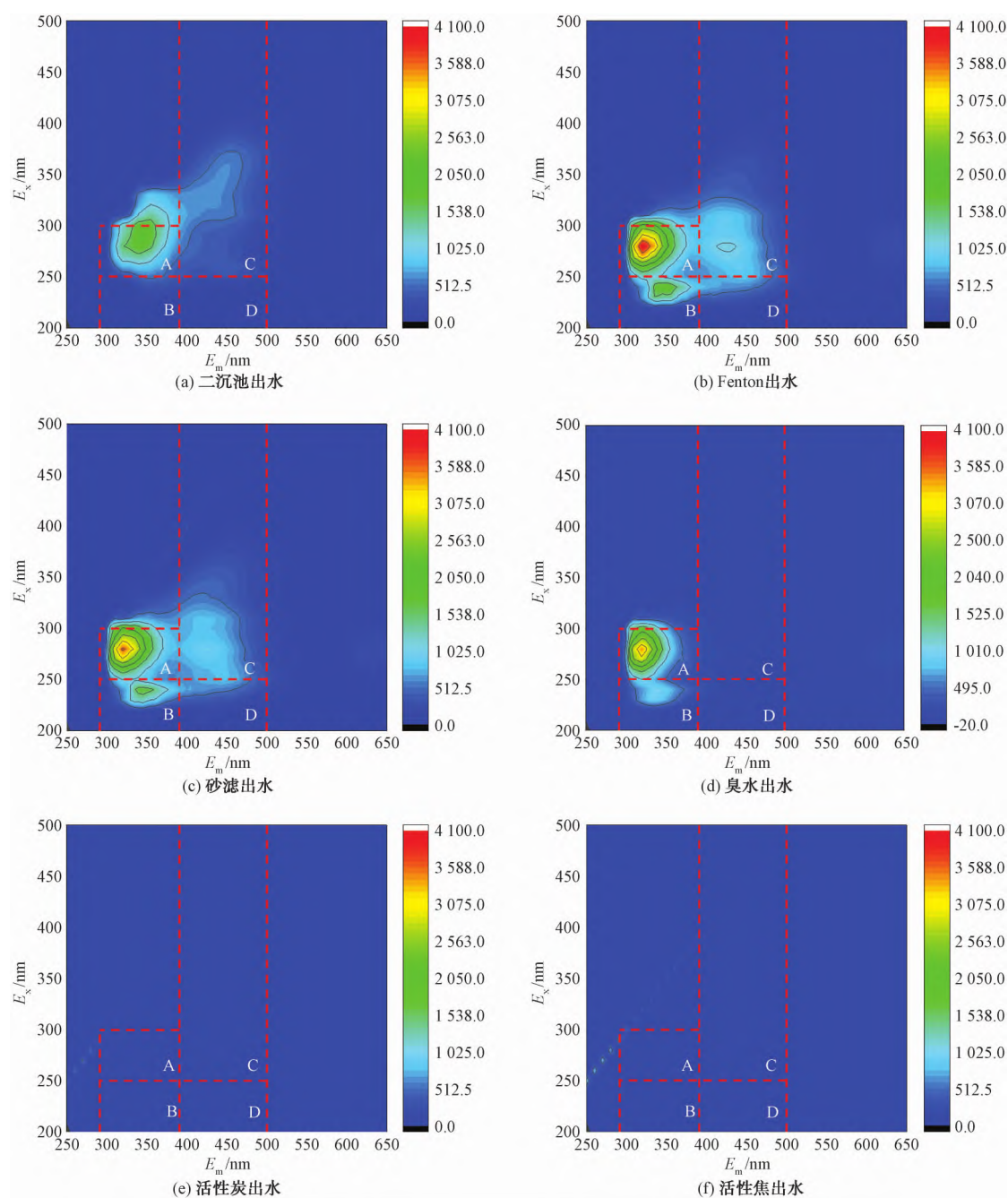


图7 Fenton-臭氧组合工艺出水 EEM 图

Fig.7 EEM Diagram of Effluent with Fenton-Ozone Combined Process

和羧酸等小分子产物,但前者造成的紫移趋势更大。此外,砂滤主要功能为过滤水体中的SS,理论上对 COD_{Cr} 组成并无影响,实际测试也印证了这一理论的成立。在经过臭氧处理后,类腐植酸物质基本被分解或矿化,该过程对Fenton过程产生的芳香性蛋白类物质也有较好的去除效果。臭氧氧化对微生物代谢产物也有一定的去除效果,但是仍有较高的浓

度。经过臭氧氧化后,类腐植酸和类富里酸类物质基本都被降解,臭氧出水 COD_{Cr} 为微生物代谢产物和芳香性蛋白类物质。最后,经过活性炭或活性炭焦吸附后,有机污染物基本得以去除,出水 COD_{Cr} 达标。

2.4 成本核算

根据试验结果:在Fenton阶段的最优反应条件

为 pH 值 = 3.00, H_2O_2 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的投加量均为 200 mg/L, 废水处理药剂成本共 0.67 元/t; 在臭氧阶段的臭氧投加量以 45 mg/L 计, 气源为空气源, 主要为电耗成本, 系统总运行耗电量大约 385.5 kW·h/(mg O_3) [包含制氧机电耗 142.5 kW·h/(mg O_3)], 因为水耗与电耗相比很小, 可以忽略不计, 工业用电价格按 0.6 元/(kW·h) 计, 废水的运行成本为 0.42 元/t。使用 Fenton+ O_3 组合工艺时废水合计药剂成本为 1.09 元/t。

2.5 试验结果

组合工艺试验结果表明, 针对该工业园区污水处理厂生化出水, 在相同投加量及反应时间的条件下, 臭氧-Fenton 组合工艺能将生化出水的 COD_{Cr} 质量浓度降至 50.00~60.00 mg/L; Fenton-臭氧组合工艺能将 COD_{Cr} 质量浓度降至 40.00~50.00 mg/L。在组合工艺后接活性炭或活性焦曝气生物滤池保证出水 COD_{Cr} 能稳定满足 GB 18918—2002 中一级 A 排放标准(50 mg/L)。

3 结论

试验结果表明, 相比于厂区 Fenton 出水 COD_{Cr} 质量浓度为 80.00~100.00 mg/L, 在添加臭氧段后, 两种深度处理工艺的联用有效地进一步降低了尾水的 COD_{Cr} , 在试验条件下联用工艺的出水 COD_{Cr} 质量浓度均不高于 60.00 mg/L。其中, Fenton-臭氧联用工艺的出水 COD_{Cr} 质量浓度低于 50.00 mg/L。而为了保证出水在极端条件下的达标排放, 需要在联用工艺后接 BAF 作为保障措施。添加臭氧反应单元则有效降低了后续 BAF 段的 COD_{Cr} 负荷, 延长了 BAF 段的反冲洗、填料更换的周期, 一定程度上可以降低运行成本。综上所述, 本文结论如下。

(1) 生化出水 COD_{Cr} 质量浓度约 150.00 mg/L, 在相同投加量及反应时间的条件下, Fenton-臭氧组合工艺能将 COD_{Cr} 质量浓度降至 40.00~50.00 mg/L, 优于臭氧-Fenton 组合工艺的 50.00~60.00 mg/L。经 Fenton-臭氧组合作为深度处理工艺后, 尾水满足 GB 18918—2002 中一级 A 排放标准中对 COD_{Cr} 的排放要求。

(2) Fenton-臭氧组合工艺中, Fenton 反应单元主要将微生物代谢产物、类腐植酸等大分子有机物降解为芳香族蛋白类物质和部分小分子类腐植酸, 臭氧反应单元则将类腐植酸类物质完全降解为芳香

族蛋白类物质, 且出水为无色。

(3) Fenton-臭氧组合工艺下, 废水的运行成本为 1.09 元/t, 处理工业园区生化出水的环境效应显著, 有规模化应用的潜力。

(4) 由于时间限制, 本文的试验周期为 10 d, 需要在后续研究中延长试验周期, 覆盖污水厂在不同负荷下的运行时间。此外, 可以考虑将类 Fenton、臭氧催化氧化等改进型工艺加以组合优化, 以期在达到更优处理效果的前提下, 降低 BAF 等兜底工艺段的运行负荷, 进一步降低建设及运行成本。

参考文献

- [1] 刘红磊, 李艳英, 于丹, 等. 工业园区典型行业废水的理化性质及急性毒性[J]. 环境化学, 2016, 35(12): 2582-2591.
- [2] 王乃丽, 王金梅, 田杰, 等. 工业园区污水厂水质特征及提标改造前景探析[J]. 水处理技术, 2019, 45(7): 110-113.
- [3] 郑晓英, 王靖宇, 李魁晓, 等. 臭氧及臭氧/双氧水对污水厂二级出水中有机污染物的去除试验[J]. 净水技术, 2018, 37(1): 70-76.
- [4] 栗文明, 白永刚, 周军, 等. 臭氧催化氧化应用于工业园区污水处理厂深度处理工艺的选择及设计[J]. 给水排水, 2019, 55(5): 90-93.
- [5] 陈存, 袁昂, 赵亮, 等. Fenton 流化床工艺深度处理印染废水的研究及其应用[J]. 染整技术, 2020, 42(7): 46-49.
- [6] GHASEMI H, AGHABARARI B, ALIZADEH M, et al. High efficiency decolorization of wastewater by Fenton catalyst: Magnetic iron-copper hybrid oxides[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 101540. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101540.
- [7] 景江, 肖秀婵, 周笋, 等. 印染废水深度处理技术研究进展[J]. 印染助剂, 2018, 35(6): 8-12.
- [8] HOLKAR C R, JADHAV A J, PINJARI D V, et al. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182: 351-366. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.090.
- [9] 杨文玲, 吴超, 鄒子兴. 臭氧高级氧化技术在工业废水中的研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(5): 1030-1032.
- [10] 赵丽红, 聂飞. 水处理高级氧化技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(10): 1-9.
- [11] 王玉番, 鞠甜甜, 王永, 等. US/UV-Fenton 体系处理不同工段的印染废水[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2754-2761.
- [12] 黄振荣, 程澄, 汤久凯, 等. 印染废水处理厂排水中有机物的荧光方法表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(10): 3118-3121.

(下转第 167 页)

表 1 液控双速闸阀维修情况
Tab.1 Maintenance of Hydraulic Double-Speed Gate Valve

序号	时间	设备名称	维修内容
1	2015 年 11 月	2 号双速闸阀	更换阀板
2	2015 年 11 月	3 号双速闸阀	更换阀板
3	2017 年 9 月	2 号双速闸阀	更换线圈
4	2018 年 9 月	1 号双速闸阀	更换线圈
5	2019 年 5 月	4 号双速闸阀	更换电磁换向阀
6	2020 年 11 月	4 号双速闸阀	更换活塞密封圈

在驱动介质,最终导致阀门无法关严出现漏水的情况、阀门开启也无法开到最大限位,需对液压缸内活塞进行更换;阀体底部凹槽与闸板限位,在长时间振荡后,会发生位移,情况严重时需对阀板进行更换;阀体底部凹槽易累积颗粒物,加速密封副磨损,发生电磁换向阀故障频率高等问题,均增加阀门以维护工作量。

对比液控双速闸阀维修情况可知,全通径偏心半球阀基于偏心结构、软硬双密封、双向浮动阀座和智能化液控驱动等结构优势,使其在使用过程中维护工作量极少,相较于液控双速闸阀应用于泵后止回时更安全、更可靠。

4 结论

虽然全通径偏心半球阀应用于水厂送水泵房时存在造价高、占地大等不足,但针对送水泵房现普遍

采用止回阀存在的结构与实际运行中的问题,结合全通径偏心半球阀水损小、密封性能好、防水锤功能稳定等优势,其应用于送水泵房送水泵机组仍具有较好的实践效果,具体如下。

(1) 送水泵房泵机组止回阀需具有快开、缓闭功能,阀门整体运行情况需安全、经济、可靠、智能,以有效保护管道及水泵安全。多功能水泵控制阀、液控双速闸阀因其启闭方式、结构组成等不足,在送水泵机组应用中存在诸多问题。

(2) 相较于多功能水泵控制阀与液控双速闸阀,全通径偏心半球阀基于其偏心结构、软硬双密封、双向浮动阀座和智能化液控驱动等结构优势,使其在应用于泵后止回时具有水损小、磨损小、易操作、易维护等优势,阀门整体运行更加安全、经济、可靠、智能。

(3) 送水泵机组使用全通径偏心半球阀后,可使阀前压力降低 4.33%,水头损失降低 90.8%,可减少水泵机组额外能耗 312.8 kW·h/d,预计每年单台水泵机组节约电耗近 8.79 万元/组。

参考文献

- [1] 钟炎辉,邹海明,周强,等. 水厂水泵止回阀的选型与应用[J]. 净水技术, 2013(1): 81-85.
- [2] 桂继欢,刘灿生. 单向注水水锤消除罐系统性能[J]. 净水技术, 2017, 36(s2): 118-122.

【编辑推荐】水厂运营的核心在于安全、达标和节能。文中介绍了某水厂通过更换全通径偏心半球阀,实现了生产安全系数的提高,并降低了水头损失,达到了节能的目的。介绍的经验具有一定的亮点,同时具有可借鉴价值,可以对同行水厂运行水平的提升带来参考。

(上接第 102 页)

- [13] 吴梦霞,孙梅香,兰天翔,等. 新型光电-Fenton 法处理印染废水的研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(12): 86-90.
- [14] ZHOU X, HOU Z L, LÜ L, et al. Electro-Fenton with peroxi-coagulation as a feasible pre-treatment for high-strength refractory

coke plant wastewater: Parameters optimization, removal behavior and kinetics analysis [J]. Chemosphere, 2020, 238: 124649. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124649.

本刊为黑白印刷,文中图 4、图 7 的彩图可扫描右侧二维码查看电子版。

