

王子麟, 柳蒙蒙, 高彦瑾, 等. 宜昌市某园区难降解工业废水深度处理试验及改造工程设计[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 141-148, 182.
WANG Z L, LIU M M, GAO Y J, et al. Advanced treatment experiment and reconstruction project design for non-degradable industrial wastewater in an industrial zone of Yichang City[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 141-148, 182.

宜昌市某园区难降解工业废水深度处理试验及改造工程设计

王子麟¹, 柳蒙蒙¹, 高彦瑾¹, 陈亚松^{1,*}, 王浩², 余海涛²

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038; 2. 三峡基地发展有限公司, 湖北宜昌 443002)

摘 要 工业园区难降解工业废水的经济性达标一直是亟待解决的难题。宜昌市某工业园区污水处理厂主要处理造纸厂及食品加工厂预处理后的难降解工业废水, 长期存在出水不达标、运行成本高的难题。研究以现状污水处理厂难降解有机污染物为研究对象, 开展了活性炭静态吸附、混凝沉淀和类芬顿催化氧化对比试验研究, 比较了 3 种方法的处理效果。结果表明, 在 pH 值=5.0~5.5 时, 类芬顿催化氧化工艺对 COD_{Cr} 的总体去除率最高可达 73% 以上, 出水水质可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 排放标准, 新增运行成本为 0.905 元/m³。基于深度处理对比试验结果, 针对该污水处理厂用地紧张的现状, 结合现有土地及各构筑物单元布置情况, 提出了提标改造方案, 可为类似高比例工业污水厂升级改造提供参考借鉴。

关键词 污水处理厂 工业废水 升级改造 类芬顿催化氧化 活性炭 混凝沉淀 深度处理 难降解有机物

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)07-0141-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.07.017

Advanced Treatment Experiment and Reconstruction Project Design for Non-Degradable Industrial Wastewater in an Industrial Zone of Yichang City

WANG Zilin¹, LIU Mengmeng¹, GAO Yanjin¹, CHEN Yasong^{1,*}, WANG Hao², YU Haitao²

(1. Yangtze River Eco-Environmental Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

2. Three Gorges Base Development Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract Economical treatment of non-degradable industrial wastewater in industrial zones has been an urgent problem to be solved. The wastewater treatment plant (WWTP) of an industrial zone in Yichang City mainly accepts the refractory industrial wastewater after pretreatment from paper mills and food processing plants, which has been facing the problem of substandard effluent and high operation cost for a long time. In this study, the non-degradable organic pollutants in the current WWTP were taken as the research object, and the Fenton-like catalytic oxidation experiment was carried out. The results showed that when pH value was adjusted from 5.0 to 5.5, the overall removal rate of COD_{Cr} by Fenton-like advanced treatment process could reach more than 73%, the effluent quality could reach the first grade A discharge standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002) stably, and the additional pharmaceutical cost was 0.905 yuan/m³. Based on the test results, combined with the existing land and WWTP structures layout, the advanced treatment technology based on Fenton-like catalytic oxidation was proposed. It can provide reference for the upgrading of similar WWTPs with high proportion of industrial wastewater.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) industrial wastewater upgrading and reconstruction Fenton-like catalytic oxidation activated carbon coagulation and sedimentation advanced treatment non-degradable organics

[收稿日期] 2023-04-23

[作者简介] 王子麟(1996—), 男, 硕士, 主要从事污水处理工艺技术相关工作, E-mail: wangzilin96@qq.com。

[通信作者] 陈亚松(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水环境治理技术研究和应用, E-mail: chen_yasong@ctg.com.cn。

伴随着各地工业园区的不断发展, 工业废水排放量日益增加、成分日益复杂, 以造纸、食品加工为主的工业废水中常含有大量难降解有机物, 经传统污水处理工艺处理后仍难以实现达标排放^[1-2]。高级氧化工艺作为一种污水深度处理技术, 利用活性

宜昌市某工业园区污水处理厂设计总规模为 3.0 万 m^3/d , 一、二期工程各 1.5 万 m^3/d , 所接纳污水主要为周边居民生活污水及工业园区废水, 其中工业废水占比超过 80%。污水厂一、二期(在建)工艺流程如图 1 所示, 出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准, 提标改造前进出水水质如表 1 所示。

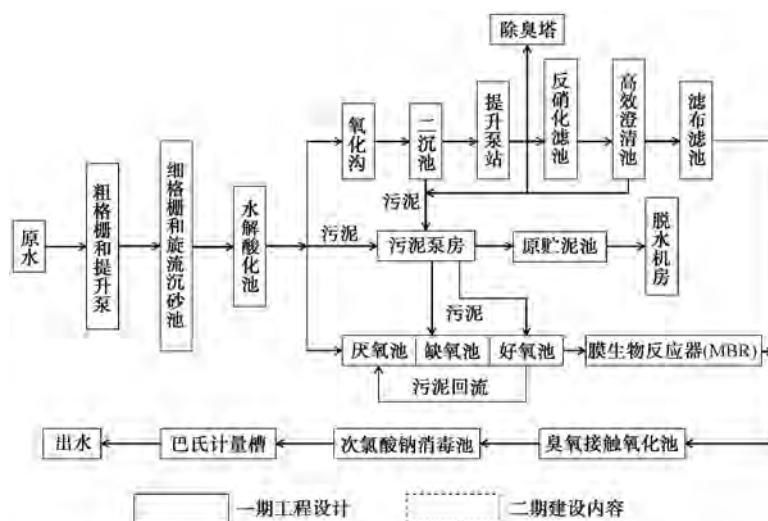


Fig. 1 Process Flow of First and Second Phase

水质指标	设计进水/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	进水平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	设计出水/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
COD _{Cr}	450	300	50	74
BOD	150.0	62.0	10.0	5.8
SS	250	20	10	9
氨氮	25	9.1	5(8)	0.1
TN	45.0	14.5	15.0	10.3
TP	5.00	0.27	0.50	0.45

值达到 $1.43 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,基本处于满负荷运行状态。因上游工业园区未实行一企一阀管理,加之当地监管能力不足,多家企业存在偷排超排现象,进水 COD_{Cr} 、SS 等指标波动较大,对污水处理厂运行造成冲击。此外,该污水厂原设计为常规生活污水处理工艺,而目前进水主要为造纸及食品加工废水,现有工艺无法满足出水达标排放要求。根据现场调查,上游造纸厂废水排放量占总进水量的 40.4%,食品加工废水占 27.9%,且溶解性易降解有机物已基本在厂区内预处理设施内消耗殆尽,污水厂进水 B/C 为 0.21,远低于原设计值;污水厂前端水解酸化池在工艺设计方面存在重大缺陷,内部结构不合理,导致其无法发挥水解酸化功能,仅能发挥沉淀作用,使该厂需持续投加碳源以

保证处理工艺正常运行,药剂成本显著增加。因污水厂一、二期建设未预留足够用地,在进水格栅附近已无空间布置预处理工艺。在附近其他区域布设则需增加提升泵站,投资运行费用较高,故不考虑采用预处理工艺。

为解决该污水处理厂进水溶解性难降解有机物占比高、处理难度大、无法实现经济性达标的问题,结合难降解工业废水深度处理经验,对生化出水的深度处理方式进一步研究,探究其低成本达标排放的可能性。同时结合该污水处理厂现状及用地紧张等情况,结合现有土地及各构筑物单元布置情况,提出提标改造工艺设计方案。

表 2 典型全流程 COD_{Cr} 浓度及去除率
Tab. 2 COD_{Cr} Concentration and Removal Rate of Typical Whole Process

取样位置	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	前置单元去除量/(mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} 去除率
细格栅前	150	/	/
水解酸化池出水	158	-8	-5.33%
氧化沟出水	115	43	28.67%
二沉池出水	115	0	0.00
高效澄清池出水	79	36[聚合氯化铝(PAC)去除量:12.7 活性炭去除量:23.3]	8.50% 15.50%
巴氏计量槽	59	20	13.30%

2.2 试验设计

根据现场投加活性炭位置、方式和用量,取二沉池出水在实验室模拟活性炭静态吸附试验,现场所用活性炭碘吸附值为 980 mg/g,目数为 325 目,水分 3%,强度为 97%,pH 值为 8.2。首先对活性炭对 COD_{Cr} 的去除效果进行定量分析,加入活性炭 130 mg/L, PAC 1.0 mg/L, 搅拌静置后取上清液测量 COD_{Cr};再取二沉池出水,分别投加 30、60、90、120、150 mg/L 活性炭,匀速搅拌 15 min,再加入 2.0 mg/L PAC 和 1.0 mg/L 的阴离子聚丙烯酰胺(PAM)助凝剂,匀速搅拌 10 min 至絮体沉降后静置 10 min,取上清液测量 COD_{Cr};最后针对相同原水,仅投加 30、60、90、120、150 mg/L 活性炭,匀速搅拌后静置 24 h,取上清液测量 COD_{Cr}。另进行一组空白试验,即将二沉出水只加 PAC 和 PAM 搅拌,静置后取上清液测量 COD_{Cr}^[8]。

选取厂内现有混凝药剂 PAC(有效成分为 Al₂O₃, ≥10.38%)开展混凝沉淀试验,分别向 3 组水样中加入 10、18、25 mg/L 的 PAC,匀速搅拌

2 材料与方法

2.1 试验水质及材料

试验期间,对污水处理厂一期工程开展全流程水质监测,检测方法遵循《水和废水监测分析方法》(第四版),典型全流程 COD_{Cr} 浓度及各单元去除率如表 2 所示。检测结果表明:目前厂内水解酸化池对 COD_{Cr} 分解效果不明显;氧化沟出水 COD_{Cr} 偏高,生物处理工艺对 COD_{Cr} 去除率仅为 28.67%,进一步说明该厂进水中溶解性难降解 COD_{Cr} 比重较大。针对二沉出水,分别采用活性炭静态吸附、混凝沉淀、类芬顿催化氧化工艺开展模拟试验,分析不同深度处理工艺对二沉出水 COD_{Cr} 的去除效果。

10 min,静置 30 min 后向每组样品中分别加入 0.00、0.25、0.50、1.00 mg/L 的阴离子 PAM 助凝剂,匀速搅拌 10 min 至絮体沉降,静置 30 min 后取上清液测量 COD_{Cr},重复测量 3 次取平均值。

取二沉池出水开展类芬顿催化氧化试验,将 pH 值调至 5.0~5.5,加入类芬顿复配药剂(FeSO₄ 与 H₂O₂ 质量比约为 10:1)约 1 mL/L,匀速搅拌 60 min 后分别加入 3 种 PAC 药剂:P1(聚合 AlCl₃, ≥28%,不含铁盐)、P2(聚合 AlCl₃, ≥28%,铁盐为 0.50%~0.65%)和 P3(有效成分为 Al₂O₃, ≥10.38%),加入量约为 1 mg/L。继续搅拌 15 min,再加 0.5~1.5 mg/L 阴离子 PAM 缓慢搅拌至絮体沉降,取上清液测量 COD_{Cr},重复测量 3 次取平均值。记录各组 pH 及加药量,对比不同条件下的 COD_{Cr} 去除效果。

3 结果与讨论

活性炭现场投加量模拟试验及烧杯试验结果如图 2 所示。活性炭静态吸附试验结果表明,现场投加活性炭对 COD_{Cr} 的平均去除率为 24.21%,活性炭+PAC/PAM 对 COD_{Cr} 的去除率最高为 28.84%,

仅投加活性炭并沉降 24 h 最高去除率为 25.22%, 各试验组出水 COD_{Cr} 质量浓度均高于 50 mg/L, 相较于同类别高碘值活性炭, 其净化效能较差^[9]。改造期间为保证出水 COD_{Cr} 达标, 水厂在二沉池出水处临时增加活性炭投加点, 受现场条件制约, 活性炭投加量难以精确把握, 投加时间缺乏灵活性, 持续大

量投加活性炭不仅显著提高了运维成本, 也影响了后续高效澄清池与滤布滤池工艺的正常运行; 如将现有处理方式改为动态吸附, 则需额外增加活性炭再生设备, 其经济性与稳定性仍有待论证。结合试验结果与现场应用效果, 不考虑采用活性炭静态吸附法作为该厂深度处理工艺。

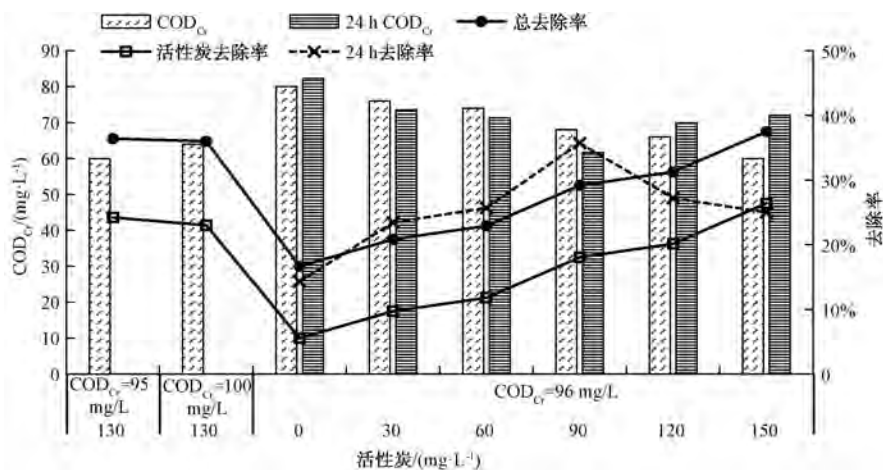


图2 活性炭、混凝剂对 COD_{Cr} 去除率

Fig. 2 Removal Rate of COD_{Cr} by Activated Carbon and Coagulant

混凝沉淀试验结果如图 3 所示, 当二沉出水 COD_{Cr} 质量浓度为 74 mg/L、PAC 投加量为 18 mg/L、

PAM 投加量为 1 mg/L 时, COD_{Cr} 去除率最高可达 46.59%。

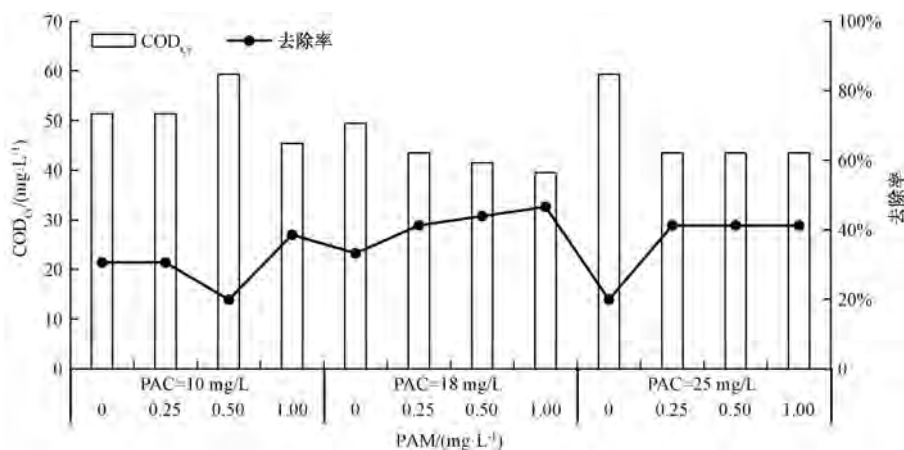


图3 Al_2O_3 +PAM 溶液在不同配比下的 COD_{Cr} 去除率

Fig. 3 COD_{Cr} Removal Rate of Al_2O_3 +PAM Solution in Different Proportions

类芬顿催化氧化试验药剂投加量如表 3 所示, 使用 PAC 药剂 P1 的试验结果如图 4 所示。试验期间二沉池出水 COD_{Cr} 偏高, 试验原水 COD_{Cr} 质量浓度均大于 100 mg/L, 各试验组出水 COD_{Cr} 质量浓度均稳定保持在 50 mg/L 以下, 其中使用药剂 P1 出水

COD_{Cr} 质量浓度最低为 30.74 mg/L, 最高为 47.80 mg/L, 平均去除率为 61.26%, 其中编号 3-2 条件下 COD_{Cr} 去除率最高, 达到 73.50%。

使用药剂 P2 和 P3 的试验结果如图 5 所示, 其中编号 1-1 ~ 2-3 所使用的混凝药剂为 P2, 3-1 ~

表 3 类芬顿试验药剂投加量
Tab. 3 Chemicals Dosage in Fenton-Like Test

编号	pH 值	FeSO ₄ +H ₂ O ₂ 复配 药剂/(mL·L ⁻¹)	PAC/ (mg·L ⁻¹)	PAM/ (mg·L ⁻¹)
1-1	5.3	1.0	1.0	1.0
1-2	5.4	1.2	1.0	1.0
1-3	5.3	1.4	1.0	1.0
2-1	5.5	1.0	1.0	1.0
2-2	5.2	1.0	1.0	1.0
2-3	5.0	1.0	1.0	1.0
3-1	5.3	1.0	0.3	1.0
3-2	5.3	1.0	0.5	1.0
3-3	5.3	1.0	0.8	1.0
4-1	5.3	1.0	1.0	0.5
4-2	5.3	1.0	1.0	1.0
4-3	5.3	1.0	1.0	1.5

4-3 所用药剂为 P3。除试验 2-3 外,使用 P2 出水 COD_{Cr} 质量浓度最低为 50.07 mg/L,最高为 55.25 mg/L,平均去除率为 53.64%。其中编号 2-3(该试验中 pH 值为 7.0)为补充试验,证明类芬顿催化氧化法在中性条件下不能正常发挥处理效果。使用 P3 出水 COD_{Cr} 质量浓度最低为 21.73 mg/L,最高为 42.53 mg/L,平均去除率为 64.29%,其中编号 4-2、4-3 条件下 COD_{Cr} 去除率最高,达到 70.63%。

COD_{Cr} 是目前该污水处理厂提标改造的主要关注指标,因此,本次试验聚焦不同深度处理工艺药剂投加量下 COD_{Cr} 的去除情况。活性炭静态吸附去除率最高为 26.39%,但在实际操作中具有以下弊端:实际投加量难以把握,投加时间缺乏灵活性;药剂投加大,吨水处理成本高昂;粉末活性炭粒径小,密度低,难沉淀,固液分离不易,投加量稍大便会堵塞后端滤布滤池工艺,且粉尘外溢会影响工作环

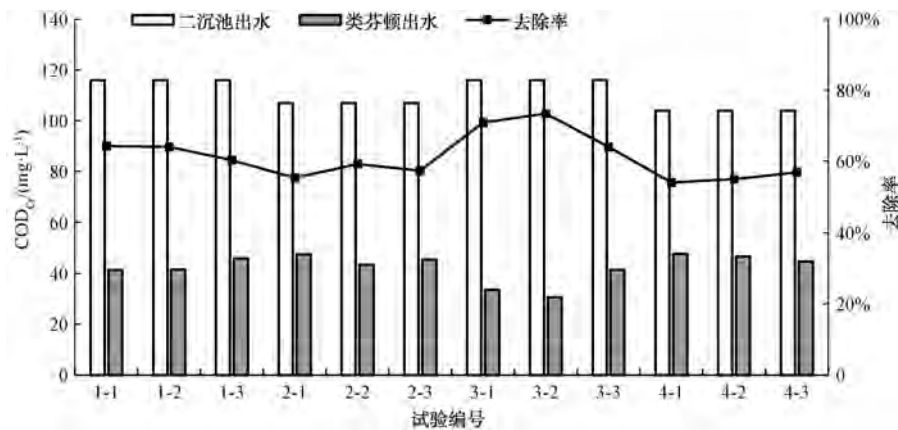


图 4 类芬顿催化氧化试验结果(P1)

Fig. 4 Results of Fenton-Like Catalytic Oxidation Test (P1)

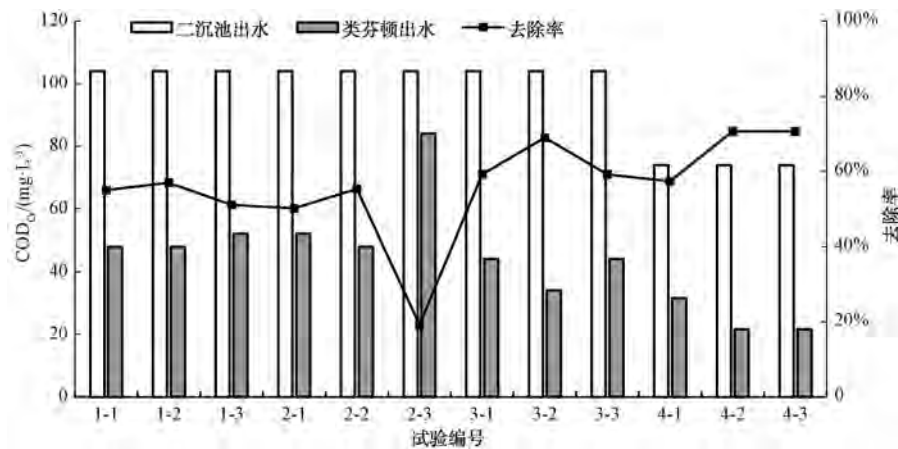


图 5 类芬顿催化氧化试验结果(P2,P3)

Fig. 5 Results of Fenton-Like Catalytic Oxidation Test (P2,P3)

境^[10]。故不考虑采用活性炭静态吸附作为深度处理工艺。混凝沉淀效果较好, COD_{Cr} 去除率最高可达 46.59%, 但考虑到上游企业来水水质不稳定, 当二沉池出水 COD_{Cr} 质量浓度达到 100 mg/L 以上时, 仅采用混凝沉淀作为深度处理工艺不能确保出水水质达标。类芬顿高级氧化效果最优, 且对比以上 3 组 COD_{Cr} 去除率发现, 使用不同种类 PAC 或仅添加少量 PAC 对 COD_{Cr} 处理效果无较大影响, 试验结果

充分表明类芬顿催化氧化工艺对此类工业废水中难降解有机物具有良好的去除效果, 可作为该污水厂深度处理工艺。

4 改造工程设计

4.1 设计进出水水质

结合污水厂近几年的运行实测数据, 原设计进水 COD_{Cr} 与实际偏差较大, 基于试验及现场运行结果, 确定深度处理进水及总出水水质如表 4 所示。

表 4 深度处理设计进出水水质

Tab. 4 Designed Influent and Effluent Quality of Advanced Treatment

项目	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{BOD}_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{SS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氨氮/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
生化池出水	≤ 100	≤ 20	≤ 30	≤ 5	≤ 15	≤ 1.0
总出水	≤ 50	≤ 10	≤ 10	$\leq 5(8)$	≤ 15	≤ 0.5

4.2 工艺方案

本次提标扩建重点与难点为溶解性难降解有机物的去除。针对该污水处理厂进水水质 B/C 极低、可生化性极差、现有深度处理工艺出水不达标等特征, 对深度处理工艺的选择进行了大量的试验, 最终选择类芬顿催化氧化作为该厂升级改造深度处理主体工艺。深度处理单元具体改造思路如下。

(1) 二期扩建工程以厌氧-缺氧-好氧法-膜生物反应器 (AAO-MBR) 为主体生化工艺, 与本污水处理厂的进水水质特征不匹配, 难以去除溶解性难降解有机物, 同时二期投产后, 会导致膜池严重堵塞, 运行维护成本高。一期现有二沉池设计处理水量为 1.5 万 m^3/d , 设计表面负荷为 0.47 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 表面负荷较小, 有较大提升空间。将二期 AAO 出水直接超越 MBR 池, 经配水井输送至一期二沉池, 提高

二沉池表面负荷。

(2) 考虑到该污水处理厂现状及用地紧张等情况, 结合现有土地及各构筑物单元布置情况, 采取以下方式设计类芬顿催化氧化工艺。

将现有污水提升泵房改造成调酸池。二沉池出水经调酸后进入到芬顿催化反应塔, 将废水中难以降解的污染物氧化降解, 反应后出水自流至中和脱气池, 在中和池投加液碱, 并通过鼓风搅拌将废水中和至中性, 同时脱除废水中的少量气泡; 中和脱气池出水自流至加载沉淀池, 池中投加絮凝剂 PAM 并进行充分反应, 使废水中铁泥絮凝、沉淀; 混凝反应后的废水自流至滤布滤池, 上清液达标排放。

4.3 工艺流程

升级改造后工艺流程如图 6 所示。

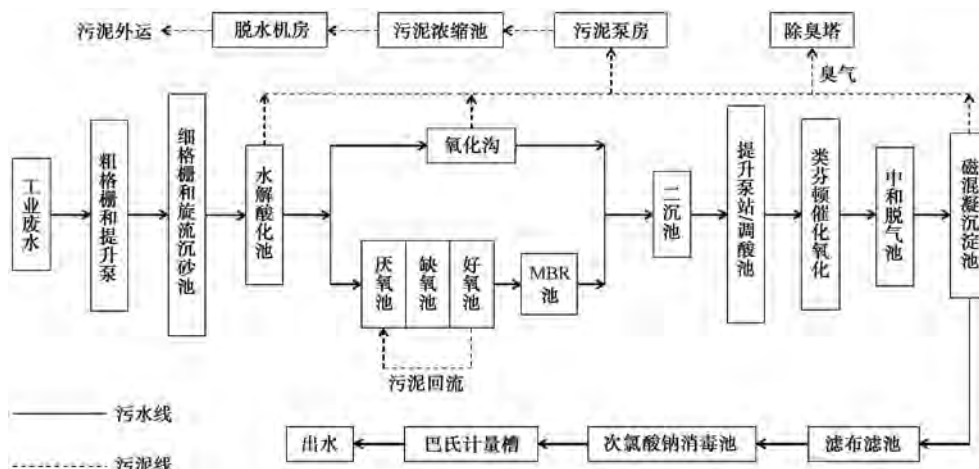


图 6 升级改造工艺流程

Fig. 6 Process Flow of Upgrading and Reconstruction

4.4 工程设计

4.4.1 一期二沉池改造

二期生物曝气池末端新增出水排水管自流至一期分配井,由分配井混合一期生物池出水合并进入二沉池,二沉池总进水管规格为 DN800。一期、二期生物池出水增设阀门井及闸阀。二沉池出水堰根据现场条件改造成双堰不锈钢出水槽出水。设计表面负荷为 $0.95 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,重置 1 台周边传动刮泥机,直径 $D=41 \text{ m}$,功率 $N=0.75 \text{ kW}$ 。

4.4.2 提升泵站改造

为满足深度处理高程及水质 pH 要求,将现有厂内二级污水提升泵房改造成调酸提升池,二沉池出水自流至调酸提升池,具有调酸和提升功能。池内投加浓硫酸充分搅拌混合后,将 pH 值调至 5.3 左右,经提升泵提升至非均相催化氧化塔内。设计停留时间为 10 min,新增 1 台双曲面搅拌机,叶轮 $D=2\,000 \text{ mm}$,电机 $N=2.2 \text{ kW}$ 。重置污水提升泵 4 台(3 用 1 备),单台性能参数: $Q=604 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=21 \text{ m}$, $N=55 \text{ kW}$ 。

4.4.3 新建类芬顿催化氧化单元

利用催化氧化技术去除废水中难降解有机物。设计规模为 $3.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,变化系数为 1.45,设置非均相催化氧化塔 3 座,单座尺寸为 $\varphi 3.9 \text{ m} \times 13.4 \text{ m}$,塔体材质为双相钢。设计参数:反应 pH 值为 5.0~5.3,复配型类芬顿药剂投加量为 400 mg/L ,硫酸加药量为 150 mg/L ,氢氧化钠加药量为 150 mg/L 。反应时间为 23 min,调碱中和时间为 22 min。设置循环泵 9 台(6 用 3 备),单台性能参数: $Q=330 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=18 \text{ m}$, $N=30 \text{ kW}$ 。

4.4.4 改造混凝澄清沉淀池

本单元用于快速去除类芬顿催化氧化反应产生的化学污泥及强化 TP 的去除。原混凝澄清池设计规模为 $1.5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,为了满足一期和二期深度处理水量的要求,受现场用地条件所限,新增构筑物困难,在现状混凝澄清池基础上改造成磁混凝沉淀池,采用钢筋混凝土结构,提高处理规模至 $3 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,提高沉淀池的表面负荷至 $18.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,实现深度处理的泥水分离。

其中,磁介质混合池停留时间为 56 s,尺寸为 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 4.05 \text{ m}$;反应池停留时间为 6.90 min,尺寸为 $3.6 \text{ m} \times 4.6 \text{ m} \times 7.05 \text{ m}$;沉淀池表面负荷为 $18.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。设置混凝单元潜水搅拌器 2

台,搅拌叶片长度 $L=0.8 \text{ m}$,变频, $N=2.2 \text{ kW}$;反应单元潜水搅拌器 2 台,变频, $N=1.5 \text{ kW}$;解絮机 2 台,单台性能参数为 $Q=15 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=1.5 \text{ kW}$;磁分离机 2 台,单台性能参数为 $Q=15 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=1.5 \text{ kW}$;刮泥机 2 台, $D=8 \text{ m}$, $N=0.37 \text{ kW}$;污泥泵 4 台,2 用 2 备,单台性能参数为 $Q=15 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=12 \text{ m}$, $N=5.5 \text{ kW}$ 。设计加药量:聚合氯化铝铁质量浓度为 100 mg/L ,PAM 投加量为 1 mg/L 。

4.4.5 利旧滤布滤池

进一步去除污水中残留 SS,确保出水水质达标。利用现有滤布滤池结构,重置滤布 2 套,设计参数为:公称孔径 $\leq 10 \mu\text{m}$,最高滤速为 11.05 m/h ,单盘 $D=3 \text{ m}$ 。

4.4.6 加药间

改建原加药间,砖混结构,尺寸为 $8.5 \text{ m} \times 15.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$ 。内含硫酸亚铁溶药池 1 座,钢筋混凝土结构,内做防腐,尺寸为 $4.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$;硫酸亚铁溶药池搅拌机 1 台,碳钢衬胶材质,叶轮 $D=1\,000 \text{ mm}$, $N=2.2 \text{ kW}$;硫酸亚铁投加泵 4 台,3 用 1 备,单台 $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=25 \text{ m}$, $N=1.5 \text{ kW}$ 。酸储罐 1 座,碳钢材质, $\varphi 4.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$;加酸泵 3 台,2 用 1 备,单台 $Q=68 \text{ L/h}$, $H=7.0 \text{ m}$, $N=0.37 \text{ kW}$ 。氧化剂储罐 2 座,玻璃钢材质,尺寸为 $\varphi 4.6 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$;氧化剂加药泵 4 台,3 用 1 备,单台 $Q=500 \text{ L/h}$, $P=0.5 \text{ MPa}$, $N=0.37 \text{ kW}$ 。碱储罐 1 座,碳钢防腐材质, $\varphi 4.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$;单台加碱泵 3 台,2 用 1 备, $Q=94 \text{ L/h}$, $H=7.0 \text{ m}$, $N=0.37 \text{ kW}$ 。PAC 储罐 1 座,玻璃钢材质,尺寸为 $\varphi 3.3 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$;PAC 投加泵 3 台,2 用 1 备,单台 $Q=62.5 \text{ L/h}$, $H=20 \text{ m}$, $N=0.37 \text{ kW}$ 。PAM 制备和投加系统 1 套,制备量为 60 kg/d ,制备周期为 24 h,制备质量分数为 0.3%,固体投加质量浓度为 1 mg/L 。

4.4.7 新建污泥浓缩池

根据化学品投加量及深度处理 SS 去除情况,类芬顿催化氧化工艺段产泥量不超过 2.10 t DS/d 。新增污泥浓缩池 1 座,钢筋混凝土结构,尺寸为 $\varphi 12.00 \text{ m} \times 6.60 \text{ m}$,污泥浓缩时间为 12 h。设置叠螺式脱水机 1 台,处理能力为 300 kg DS/h , $N=4.5 \text{ kW}$;污泥输送泵 1 台, $Q=20 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=5.5 \text{ kW}$;悬挂式中心传动刮泥机 1 台, $N=0.75 \text{ kW}$,周边线速度为 $0 \sim 1.2 \text{ m/min}$ 。

4.5 运行成本分析

按一、二期满负荷(3.0 万 m^3/d)运行测算新增运行成本。

(1) 新增电费

结合厂区容量电费、波峰波谷电价及光伏发电电价,综合单价为 0.70 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。基于新增设备功率情况,升级改造后新增电费 = $0.193 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3 \times 0.70 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h}) \approx 0.135 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

(2) 新增药剂费

改造方案新增药剂主要有浓硫酸、 H_2O_2 、氢氧化钠、硫酸亚铁等,减少 PAM、PAC、活性炭等药剂的投加。通过对比分析,改造方案新增药剂费用为 0.60 元/ m^3 。实际运行过程中,可根据二沉池出水水质情况,适时调整药剂投加量,进一步降低药剂成本。

(3) 污泥处置费用

通过对比一、二期运行情况,本改造方案预计每天新增 20 t 含水率为 80% 的污泥。按照污泥处置费为 260 元/t 计算,新增污泥处置费为 5 200 元/d,即 0.17 元/ m^3 。

综上,该改造方案实施运行后,新增运行成本为 0.905 元/ m^3 。

5 结论

(1) 针对宜昌市某园区污水厂难降解工业废水开展深度处理模拟试验,试验结果表明,类芬顿催化氧化工艺能有效去除来水中溶解性难降解有机物,在不同反应条件及非均相催化氧化试剂投加量条件下,出水 COD_{Cr} 稳定满足一级 A 排放标准,可作为该污水处理厂深度处理工艺。

(2) 基于试验结果,设计类芬顿催化氧化工艺反应 pH 值为 5.0~5.3,预计新增运行成本为 0.905 元/ m^3 ,与国内同类工业废水处理厂改造项目相比运行成本大幅降低。在运行过程中,类芬顿工艺需结合实际情况调节 pH,建议在选择类似难降解工业废水处理厂深度处理工艺时应同时考虑其他高级氧化方法。

(3) 针对污水厂用地紧张情况,改造现有二沉池、加药间、提升泵站和混凝澄清沉淀池,新建处理效果稳定、占地空间小、投资运行成本低的芬顿催化氧化单元,本方案可为类似高标准工业废水厂提标改造提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 谢怡俐,楚芳,张敏婷,等. 芬顿铁泥组分解析及其对造纸废水厌氧处理的影响[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3579-3586.
XIE Y L, CHU F, ZHANG M T, et al. Analysis of Fenton sludge fraction and its effect on anaerobic treatment of papermaking wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(11): 3579-3586.
- [2] 张磊,赵婷婷,何虎. 食品加工废水处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(12): 7-13.
ZHANG L, ZHAO T T, HE H. Research progress of food industry wastewater treatment technology[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(12): 7-13.
- [3] POYATOS J M, MUÑO M M, ALMECIJA M C, et al. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of the art[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2010, 205(1/2/3/4): 187-204. DOI: 10.1007/s11270-009-0065-1.
- [4] 杨鹤云,郑兴. 高级氧化法降解有机污染物的应用及研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(12): 13-18.
YANG H Y, ZHENG X. Application and research progress of advanced oxidation process for degradation of organic pollutants[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(12): 13-18.
- [5] 陈威,杨冠,程寒飞,等. 类芬顿法在含造纸中段水污水处理厂中的工程应用[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 35-38, 47.
CHEN W, YANG G, CHENG H F, et al. Engineering application of Fenton-like method in the sewage treatment plant containing grey water of papermaking industry[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 35-38, 47.
- [6] 李世文,王胜渊,于林静,等. 基于 MBBR 工艺的北方某污水厂运行效果及氮磷去除机理分析[J]. 净水技术, 2022, 41(9): 86-95.
LI S W, WANG S Y, YU L J, et al. Mechanism analysis of nitrogen and phosphorus removal in north WWTP based on MBBR process[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 86-95.
- [7] 常尧枫,谢嘉玮,谢军祥,等. 城镇污水处理厂提标改造技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 20-28.
CHANG Y F, XIE J W, XIE J X, et al. Research progress on upgrading and reconstruction technology of urban sewage treatment plants[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(6): 20-28.
- [8] 武珉辉,石焱,夏萍,等. 臭氧/双氧水/活性炭深度处理中试工艺效能评估[J]. 给水排水, 2023, 59(2): 1-7.
WU M H, SHI Y, XIA P, et al. Efficiency evaluation of pilot-scale $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ /activated carbon advanced treatment process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(2): 1-7.

(下转第 182 页)

效、3效、6效和10效则为 $-0.6\sim 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,造水比稳定在13.14~16.20。相较而言,1效传热温差变化量波动较大,而蒸汽热负荷波动是导致其传热温差波动的主要原因之一。

(2)从药剂性能评价结果来看,试验期间, ΔA 值介于 $-0.05\sim 0.12$,均低于 $\Delta A\leq 0.20$ 的控制指标要求。同时,效体内5052铝合金腐蚀监测试片的腐蚀速率值均 $\leq 0.015\text{ mm/a}$,未见明显腐蚀现象的出现。

(3)试验期间,产品水水质优良,优于GB 5749—2006所规定的水质指标要求。

(4)综上,SD210阻垢剂性能优良,能满足大型低温多效海水淡化装置使用要求。

参考文献

- [1] 阮国岭,冯厚军.国内外海水淡化技术的进展[J].中国给水排水,2008,24(20):86-90.
RUAN G L, FENG H J. Technical progress in seawater desalination technology at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(20): 86-90.
- [2] 高从堦,周勇,刘立芳.反渗透海水淡化技术现状和展望[J].海洋技术学报,2016,35(1):1-14.
GAO C J, ZHOU Y, LIU L F. Recent development and prospect of seawater reverse osmosis desalination technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(1): 1-14.
- [3] 艾钢,吴建平,朱忠信.海水淡化技术的现状和发展[J].净水技术,2004,23(3):24-28,40.
AI G, WU J P, ZHU Z X. Present situation and development of seawater desalination technology [J]. Water Purification Technology, 2004, 23(3): 24-28, 40.
- [4] LIU G Q, XUE M W, YANG H. Polyether copolymer as an environmentally friendly scale and corrosion inhibitor in seawater[J]. Desalination, 2017, 419: 133-140. DOI: 10.1016/J.DESAL.2017.06.017.
- [5] YANG L, YANG W Z, XU B, et al. Synthesis and scale inhibition performance of a novel environmental friendly and hydrophilic terpolymer inhibitor[J]. Desalination, 2017, 416: 166-174. DOI: 10.1016/j.desal.2017.05.010.
- [6] 贾利涛,李增朴,刘旭明,等.一种用于低温多效海水淡化的阻垢剂及其制备方法:CN201811625744.7[P].2018-12-28.
JIA L T, LI Z P, LIU X M, et al. Scale inhibitor for low-temperature multi-effect seawater desalination and preparation method thereof: CN201811625744.7[P]. 2018-12-28.
- [7] 林福成,王海江,丁涛.一种铝管热法海水淡化用缓蚀阻垢剂及其制备工艺:CN202110549443.6[P].2021-05-20.
LIN F C, WANG H J, DING T. A corrosion and scale inhibitor for thermal seawater desalination device using aluminum alloy tubes and its preparation process: CN202110549443.6[P]. 2021-05-20.
- [8] 张杰,张怀军.低温多效海水淡化阻垢剂动态模拟装置设计及试验方法[J].山东电力技术,2018,45(8):65-68.
ZHANG J, ZHANG H J. Designing of dynamic simulation device and test procedure for multi-effect seawater desalination inhibitor [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(8): 65-68.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.海水冷却水处理药剂性能评价方法第2部分:阻垢性能的测定:GB/T 34550.2—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Method for evaluation of cooling seawater treatment agents—Part 2: Determination of scale inhibition performance: GB/T 34550.2—2017[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.海水冷却水处理药剂性能评价方法第1部分:缓蚀性能的测定:GB/T 34550.1—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Method for evaluation of cooling seawater treatment agents—Part 1: Determination of corrosion inhibition performance GB/T 34550.1—2017[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [11] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会.生活饮用水卫生标准:GB 5749—2006[S].北京:中国标准出版社,2007.
Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Standard for drinking water: GB 5749—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

(上接第148页)

- [9] 曹振桦,笪跃武,刘成,等.碘值在水厂生物活性炭应用中的指示作用[J].净水技术,2022,41(12):19-25.
CAO Z H, DA Y W, LIU C, et al. Indicative effect of iodine value on application of BAC in WTPs[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(12): 19-25.
- [10] 江新瑜,吴苏炜,宣小军,等.国内粉末活性炭投加技术在

净水厂水处理中的应用[J].工业用水与废水,2020,51(6):8-11,17.
JIANG X Y, WU S W, XUAN X J, et al. Application of powder activated carbon addition technology in water treatment process of water purification plant in China [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(6): 8-11, 17.