



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202103199

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

王瑞霖, 张洪良, 张功良, 等. 基于污水处理厂提标改造需求的难降解工业废水处理工艺改进—以湖南省某城镇污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3781-3788.

WANG Ruilin, ZHANG Hongliang, ZHANG Gongliang, et al. Improved process for refractory industrial wastewater treatment to fulfill the upgrading and reconstruction requirements of municipal wastewater treatment plants (WWTPs): A case study of a municipal WWTP in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(11): 3781-3788.

基于污水处理厂提标改造需求的难降解工业废水处理工艺改进—以湖南省某城镇污水处理厂为例

王瑞霖^{1,2,✉}, 张洪良^{1,3}, 张功良^{1,3}, 刘芮杉^{1,3}, 张闯¹

1. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044

2. 首创爱华(天津)市政环境工程有限公司, 天津 300060

3. 北京水星环境有限公司, 北京 101599

第一作者: 王瑞霖(1988—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 污水处理设计与技术。E-mail: wz912076@qq.com
✉通信作者

摘要 以湖南省某城镇污水处理厂一期 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 提标改造工程项目为案例, 针对其进水中工业废水占比高(达 80%)、污染物浓度波动大、难降解有机物含量高等特点, 在原“水解酸化池+AAO+高效沉淀池+纤维转盘滤池”工艺的基础上, 通过现场中试实验, 分析了以“臭氧催化氧化+生物活性炭滤池”(O₃-BAC)作为提标改造主要工艺的可行性, 并设计了工程案例的主要构筑物参数。该项目的实施能够补齐原工艺对难降解有机物削减能力不足的短板, 执行排放标准由原一级 A 提高至《湖南省城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 43/T 1546-2018)二级标准。项目的建设投资为 $1051.4 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, 直接运行成本 $0.67 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, 每年较原工艺可多削减以 COD 计的有机物 $36.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 每年多削减 NH₃-N 排放量 $7.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。该工程案例可为接纳高比例工业废水的城镇污水处理厂的提标改造项目提供参考。

关键词 难降解工业废水; 污水处理厂; 提标改造; 臭氧-生物活性炭

随着污水排放总量不断增加, 污水处理设施的建设和升级改造已成为推动城市经济发展、改善水生态环境、居民安全健康生活的重要保障^[1]。2019年, 住房和城乡建设部等三部委联合印发了《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》, 污水排放标准整体提高。为紧跟国家整体要求, 区域性的污水处理提质增效实施方案相继印发。针对 COD、TN、NH₃-N、TP 等主要污染物, 越来越多的地区制定了与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 IV 类或 III 类指标值相配套的排放标准^[2]。为提高污水处理的系统效能, 实现主要污染物排放量持续减少, 众多二级污水处理厂面临着提标改造的问题, 尤其是接纳高比例工业废水的城镇污水处理厂。新的排放标准出台后, 对工业废水处理工艺的升级改良提出了新的要求^[3]。

工业废水的特点主要有毒性大、可生化性较差、难降解、污水冲击负荷较高、有机污染物复杂多变等^[4-6]。因此, 如何在二级生化出水后, 通过升级改造来提升工业废水中难降解有机物的可

生化性, 实现对其高效去除, 现已成为行业一直关注的重大课题^[7-8]。针对湖南省某城镇污水处理厂工业废水比例高、水质水量变化大、可生化性差的特点, 通过工艺比选及可行性分析, 提出以“臭氧催化氧化-生物活性炭滤池(O₃-BAC)”工艺作为难降解有机物去除技术的升级改造设计方案。O₃-BAC工艺早期在微污染水源的给水处理中已有大规模的工程应用^[9-10], 目前已逐渐将该工艺引入污废水的深度处理领域, 但相关研究多集中在机理探讨及中试研究阶段^[11-12], 涉及工程设计及应用案例的研究较少。本提标改造工程的顺利实施, 可为O₃-BAC工艺应用于接纳难生物降解工业废水为主的污水处理厂的提标改造提供参考。

1 工程概况

本研究以湖南省某城镇污水处理厂为工程案例。该污水处理厂始建于2015年7月, 一期工程处理规模为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 占地约合 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^2$, 主要处理附近的工业园区废水及所在片区生活污水。污水处理采用“水解酸化池+AAO+高效沉淀池+纤维转盘滤布滤池”工艺, 原设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级A标准。产出的污泥采用“污泥浓缩+板框压滤机脱水”工艺处理, 设计出泥含水率 $\leq 80\%$ 。

该污水处理厂进水中, 工业废水所占比例高达80%, 生活污水仅占20%。工业园区内以纺织企业、中药制造企业、塑料制造企业居多, 其中印染废水量约占废水总量的60%。目前, 污水处理厂接近满负荷运行, 2019年日平均污水处理量约 $8\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。由于园区内企业尚未完全进驻, 污水管网还在持续建设中, 预期今后污水量还将进一步增加。随着城镇污水处理提质增效行动方案的颁布实施, 湖南省于2019年施行《湖南省城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 43/T 1546-2018), 主要污染物(COD、TN、NH₃-N、TP)排放限值要求提高, 导致原处理工艺对难降解COD去除能力不足, 出水难以满足新的排放标准, 故存在升级改造的迫切需求。

2 污水处理厂运行现状及存在的问题

2.1 原设计进、出水水质及工艺流程

污水处理厂原设计的出水排放标准执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级A标准, 具体进、出水水质见表1。

污水处理厂原来采用“水解酸化+AAO”工艺(流程见图1)。对于污泥处理, 将污泥浓缩后, 采用板框压滤机脱水工艺进一步处理。

2.2 现有工艺运行情况

污水厂2019年全年的运行数据情况见表2。

表1 原设计进、出水水质
Table 1 Influent and effluent of the original design $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

设计 取样口	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
进水口	≤ 400	≤ 180	≤ 200	≤ 30	≤ 20	≤ 5
出水口	≤ 50	≤ 10	≤ 10	≤ 15	$\leq 5(8)$	≤ 0.5

注: 括号外数值为水温大于12℃时控制指标, 括号内数值为水温 $\leq 12\text{℃}$ 时的控制指标。

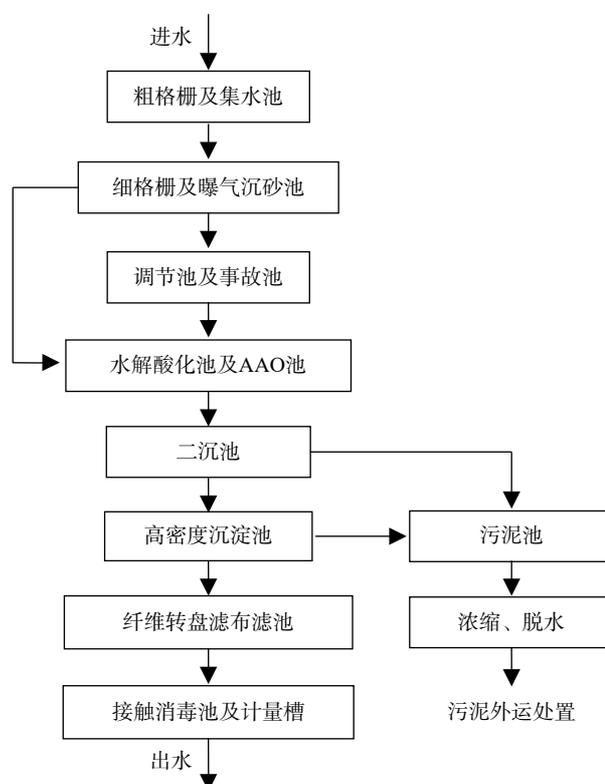


图1 现状工艺流程图

Fig. 1 Scheme of the current treatment process

表 2 2019 年实际进、出水水质

Table 2 Actual characteristics of the influent and effluent in 2019

日期	COD		BOD ₅		NH ₃ -N		TN		TP		SS	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
2019年1月	471.89	45.58	136.85	4.35	16.84	1.18	21.15	8.19	0.68	0.13	33.90	2.61
2019年2月	273.70	37.11	76.64	4.68	16.43	1.06	22.64	8.56	0.95	0.08	43.43	3.75
2019年3月	402.19	41.92	120.66	5.52	13.91	2.58	20.90	9.29	0.87	0.27	40.84	4.16
2019年4月	519.88	45.92	141.83	5.27	11.76	2.33	20.21	9.35	0.86	0.31	37.87	2.97
2019年5月	176.96	26.35	60.17	3.86	5.79	1.19	11.12	6.78	0.62	0.16	38.90	3.68
2019年6月	210.27	34.11	67.29	3.55	3.65	0.35	7.47	7.40	0.28	0.16	37.53	3.10
2019年7月	192.91	28.03	63.66	4.13	3.26	0.28	5.92	4.97	0.56	0.14	62.42	3.52
2019年8月	184.44	32.05	55.33	4.82	3.14	0.29	5.82	5.41	0.38	0.25	63.97	3.74
2019年9月	445.49	42.11	129.26	4.56	13.05	0.20	19.58	4.46	0.36	0.09	71.93	2.15
2019年10月	469.89	44.01	132.25	3.47	13.21	0.13	20.06	3.46	0.39	0.16	89.44	4.74
2019年11月	297.29	31.82	89.19	3.68	9.45	0.59	14.17	7.60	0.30	0.09	63.86	4.53
2019年12月	384.18	40.44	111.41	3.85	15.06	0.76	21.13	7.24	0.31	0.11	76.86	3.83
平均值	335.76	37.45	98.71	4.31	10.46	0.91	15.85	6.89	0.55	0.16	67.58	3.57
实际95%概率浓度	582.47	47.28	158.16	5.89	18.12	1.93	24.67	10.36	1.03	0.35	95.24	4.55
GB 18918-2002一级A标准	≤50		≤10		≤5(8)		≤15		≤0.5		≤10	

注：95%概率浓度指95%的测定结果小于等于的临界值。

在未满负荷运行的前提下，出水 COD 约为 37 mg·L⁻¹，TN 基本小于 10 mg·L⁻¹。其中，NH₃-N、TP、SS 进水浓度较低，处理难度相对较低，出水水质均较好，均维持在较低水平，NH₃-N 约为 1 mg·L⁻¹，TP 基本小于 0.2 mg·L⁻¹，SS 小于 5 mg·L⁻¹。污水处理厂现状运行出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级 A 标准。

2.3 现工艺存在的主要问题

1) 进水工业废水比例高，传统生化工艺在未满负荷运行时 COD 出水已接近标准临界，不达标风险高。

该厂受工业企业排污影响较大，水质和水量波动较大，[BOD₅]/[COD]<0.3，污水生化性差。根据表 2 数据，虽然进水 TN、NH₃-N、TP、SS 处在较低水平，出水浓度优于一级 A 标准，但进水 COD 指标超标频率较高。2019 年实际进水 95% 概率浓度为 582.47 mg·L⁻¹，其中 5 个月的平均进水浓度超标 (>400 mg·L⁻¹)，尤其是 4 月份超标较严重，平均进水浓度达 519.88 mg·L⁻¹，超标近 30%。工业废水中，对 COD 指标贡献较大的多为含不饱和键、难生物降解的大分子有机物，在进水 COD 严重且频繁超标的情形下，由于污水处理厂尚未满负荷水量运行 (<1.0×10⁴ m³·d⁻¹)，HRT 较长，调控空间较大，但实际 95% 概率出水浓度已达 47.28 mg·L⁻¹，已接近一级 A 排放标准的临界浓度 (50 mg·L⁻¹)。可见，传统生化处理工艺很难进一步处理水中有机物。随着工业园区企业的入驻，进水水量达满负荷后，难降解有机物的处理难度会随之增大，出水 COD 不达标风险较高。

2) 新的地方标准施行后，原工艺设计对难降解有机物的去除能力已无法满足新的排放标准。2019 年 3 月，湖南省施行《湖南省城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 43/T 1546-2018)，主要水污染物中的 COD、NH₃-N 排放浓度限值均较《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-

2002)中的一级A排放标准有所提高(该厂位于非生态环境敏感区,执行二级排放标准)(如表3所示)。结合污水处理厂目前运行中出水95%概率浓度, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的出水浓度可以满足提标后的要求。结合表2和表3进行分析,现在的出水COD仅能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级A排放标准,虽然部分月份出水浓度 $<40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但实际出水COD的95%概率浓度为 $47.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 已超出新的地方标准规定的 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见,原工艺对难降解有机物的处理能力不足,无法实现100%稳定达标。

综上所述,在进水难降解有机物质量浓度(以COD计)较高和出水标准要求提高的情况下,原工艺流程对难降解有机物的去除能力已无法实现出水COD指标的100%稳定达标,需要对污水处理厂原有生化工艺进行升级改造设计。因此,考虑增加合适的高级氧化工艺对难降解有机物进行深度处理,以确保出水COD指标能够满足提标要求。

3 提标改造工艺的选择及可行性分析

本案例的污水处理厂进水中,工业废水比例较高,难降解有机物浓度高,原工艺难以处理。在进行工程设计前,需要增加针对难降解COD高效去除的高级氧化工艺,并通过现场试验分析工艺的可行性,使二级出水COD浓度进一步降低,以满足新的排放标准。

3.1 提标改造工艺的选择

目前,常用的难降解有机物高级氧化工艺主要为电化学氧化^[13]、芬顿氧化^[14]、臭氧(O_3)催化氧化工艺等^[15]。电化学氧化的缺点是反应过程较复杂、电耗较高,相关的研究大多停留在推理和小试阶段,效率难以提高^[16];芬顿试剂仅在酸性条件下发生作用,操作难度大,其深度矿化有机物的能力有限且药剂成本高,而且产生污泥较多^[17]。相对于电化学氧化法和芬顿氧化法,臭氧催化氧化工艺设备少、适用pH宽泛、投资省、运行费用低,且不会产生大量污泥,是良好的化学氧化法^[18]。此外,经过臭氧催化氧化后有机物的性质发生了变化,可生化性增强,更易于被分解去除。

针对本项目含有高比例难降解有机物的工业废水,臭氧催化氧化可将长链有机物转化为短链有机物,但不能进一步矿化使其完全分解,必须加大投加量才能有效降低COD,这导致水处理成本增加。因此,为了节约投资和运营成本,臭氧更适宜与生化处理技术配合联用。相对于BAF、MBR等传统生化深度处理工艺,生物活性炭滤池(biological activated carbon filter, BAC)在发挥吸附功能的同时兼具生物降解的作用,且活性炭对有机物的吸附具有普遍性,将其吸附后更容易被表面附着的微生物群利用分解,污染物去除效果明显、自动化程度高、操作简单^[19]。

因此,本提标改造工程拟采用臭氧催化氧化与生物活性炭滤池(O_3 -BAC)结合的高级氧化工艺。在利用臭氧提高难生物降解废水的可生化性后,再通过生物活性炭滤池,将微生物降解和活性炭物理化学吸附作用进行联合,实现生物降解和吸附废水中的残存有机物,进一步降低污水中的COD^[20]。

3.2 工艺可行性分析

为充分评估臭氧催化氧化-生物活性炭滤池组合工艺实现出水达标的可行性,优化臭氧对有机物氧化去除的投配比,取高密度沉淀池出水作为原水水样进行了中试实验分析,中试装置示意如图2所示。水样经进水泵提升进入臭氧氧化柱,臭氧氧化柱出水流入生物活性炭滤池。臭氧氧化

表3 主要污染物排放值及限值对比
Table 3 Comparison of discharge limits of the main pollutants in effluent

项目	COD	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
实际95%概率出水	47.28	10.36	1.93	0.35
GB 18918-2002一级A标准	≤ 50	≤ 15	$\leq 5(8)$	≤ 0.5
DB 43/T 1546-2018二级标准	≤ 40	≤ 15	$\leq 3(5)$	≤ 0.5

注:括号外数值为水温大于 $12\text{ }^\circ\text{C}$ 时控制指标,括号内数值为水温 $\leq 12\text{ }^\circ\text{C}$ 时的控制指标。

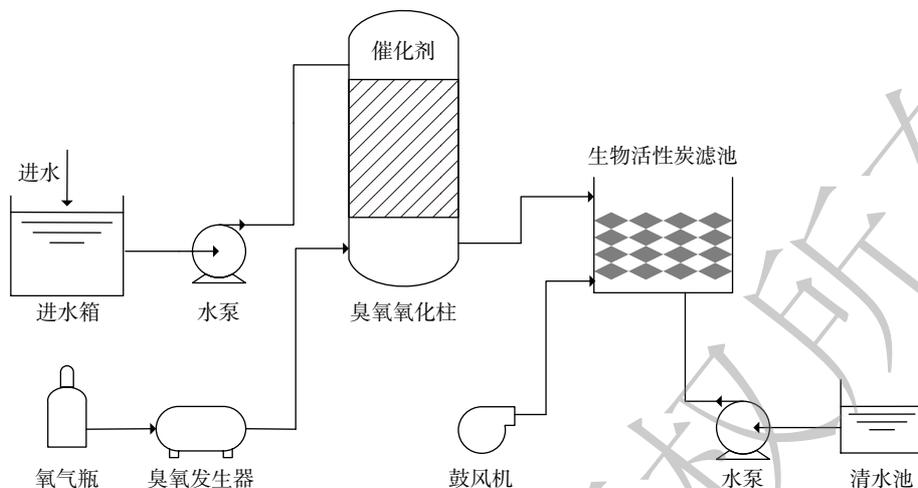


图 2 臭氧-生物活性炭滤池组合工艺流程

Fig. 2 Schematic diagram of O₃/BAC process

柱和生物活性炭滤池都采用下向流，臭氧和鼓风曝气采用上向流，气水逆向（臭氧氧化柱尾气经集中收集，经破坏分解后排放）。臭氧氧化柱内填装负载催化剂的直径为 2~4 mm 的陶粒填料，生物活性炭滤池填装直径为 6~8 mm 的活性炭滤料。臭氧催化氧化和生物活性炭滤池反应 HRT 均约 1 h，该工艺系统在生物活性炭滤池挂膜完成后进行臭氧投加量优化调试。

由于高密度沉淀池出水 COD 为 35~47 mg·L⁻¹，为确定本系统的最佳臭氧投加量，设定 O₃-BAC 工艺系统的臭氧投加量依次为 10~30 mg·L⁻¹，各种条件下稳定运行 3 d，每天监测中试系统进出水的 COD 并计算去除率（结果如图 3 所示），COD 的平均去除率对应为 9.50%~40.97%。COD 的平均去除率随着臭氧投加量增加而递增，出水 COD 整体小于 40 mg·L⁻¹。当臭氧投加量由 20 mg·L⁻¹ 增至 25 mg·L⁻¹ 时，出水平均 COD 由 31.60 mg·L⁻¹ 降至 27.35 mg·L⁻¹，平均去除率增加 6.84%；但当臭氧投加量由 25 mg·L⁻¹ 增至 40 mg·L⁻¹ 时，出水 COD 仅下降 2.94 mg·L⁻¹，去除率仅增加 6.76%。当臭氧投加量超过 25 mg·L⁻¹ 后，出水 COD 基本趋于稳定，约为 27 mg·L⁻¹。此时的臭氧投加量对 COD 去除率的影响很小，因此，当臭氧投加过量时，无法使有机物完全矿化使后续生物降解，反而会增加运营成本，这与文献报道一致^[21-22]。

本项目臭氧投加量与二级出水 COD 的去除量平均比值为 2.0~2.5，故臭氧投加量控制在 25 mg·L⁻¹ 以下较合理。已有多项工程实践表明，应用负载型臭氧催化工艺时，臭氧和 COD 反应的药剂质量比约为 1~3^[23]，这与本项目获得的结论基本吻合。本项目的提标要求为：COD 由 GB 18918-2002 一级 A 标准的 50 mg·L⁻¹ 降至 40 mg·L⁻¹，故需要至少去除 10 mg·L⁻¹，去除率需达到 20% 以上。结合实验结果分析，同时考虑降低将来的实际运营成本，考虑将本项目的设计臭氧投加量最大为 25 mg·L⁻¹。因此，原二级出水通过“臭氧催化氧化-生物活性炭滤池”(O₃-BAC) 工艺进一步处理后可实现在较低运行成本下满足出水水质的要求。

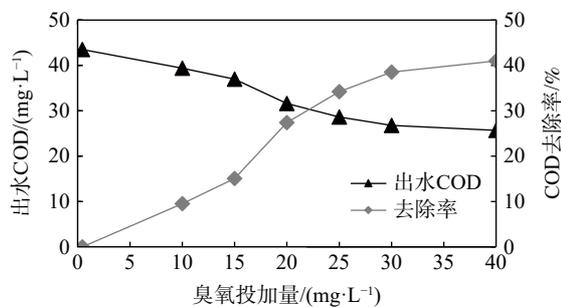


图 3 O₃-BAC 工艺对 COD 的去除情况

Fig. 3 COD removal by O₃-BAC

4 提标改造工程设计及应用

4.1 提标改造工艺流程

结合高级氧化工艺选择和可行性分析的结果,以及现有工艺情况,确定改造后深度工艺处理流程为“高密度沉淀池+臭氧催化氧化池+生物活性炭滤池+纤维转盘滤池”,具体工艺流程见图4。改造后增加的主要构筑物为臭氧催化氧化池及配套臭氧制备间、生物活性炭滤池及配套鼓风机。改造后的工艺较原工艺将进一步提升对COD和NH₃-N的去除效果,使其满足新的出水标准。

4.2 主要构筑物设计参数

臭氧催化氧化-生物活性炭滤池构筑物的工程设计结合中试分析O₃氧化的最佳投配比,以及臭氧催化氧化柱和生物活性炭滤池的运行情况,并依据《室外排水设计规范》(GB 50014-2006, 2016版)和《生物滤池法污水处理工程技术规范》(HJ 2014-2012),确定工艺参数如下。

1) 臭氧催化氧化-生物活性炭滤池。为节省土地,臭氧催化氧化池和生物活性炭滤池采用合建式,新建构筑物1座,整体尺寸为36.0 m×23.0 m×7.5 m,分为2组,每组处理水量5 000 m³·d⁻¹。

臭氧催化氧化池池体为钢筋混凝土结构,每组分为2格,共计4格,每格面积36 m²(8.0 m×4.5 m),总池高7.5 m,设计臭氧投加量为25 mg·L⁻¹,接触反应时间约为0.95 h。池内共填充432 m³陶粒催化剂,填充高度为3.0 m,催化剂下层敷设300 mm厚的鹅卵石承托层。催化剂以一种或多种过渡稀有金属(主要为镧、铈、镨、钕等稀土金属)氧化物为活性金属组分,负载于直径为3~4 mm的陶粒上,经掺杂、挤压高温焙烧等多种工艺工序精制而成,催化剂池底布设直径为150 mm的钛板臭氧曝气盘。臭氧催化氧化池顶设置2套尾气破坏器,以防止臭氧溢出。

生物活性炭滤池池体与臭氧催化氧化池合建,每组分为2格,共计4格,每格面积36 m²(8.0 m×4.5 m),总池高7.5 m,有效水深为3.0 m,空床停留时间为0.95 h,水力负荷为2.9 m³·(m²·h)⁻¹,气水比约为4:1。滤池冲洗采用气水联合反冲洗模式,气洗强度为15 L·(m²·s)⁻¹;气水联合冲洗时,气洗强度为15 L·(m²·s)⁻¹,水洗强度为4 L·(m²·s)⁻¹;单独水洗强度为5 L·(m²·s)⁻¹。

滤池滤料深度为3.0 m,分2层敷设,上层敷设深度2.5 m、直径6~8 mm的活性炭滤料,下层敷设深度0.5 m、直径2~4 mm的石英砂滤料。滤料底层敷设300 mm厚鹅卵石承托层。主要设备配置为曝气鼓风机3台(2用1备),体积流量7 m³·min⁻¹,风压为0.07 MPa;反冲洗系统设配套反冲洗水泵2台(1用1备),流量为650 m³·h⁻¹,扬程为13 m;反洗风机2台(1用1备),流量为32.5 m³·min⁻¹,风压为0.07 MPa。

2) 臭氧发生间。新建臭氧发生间1座,采用氧气源,为池体提供臭氧,采用框架结构,整体尺寸13.5 m×13.5 m×8.0 m。臭氧发生器配备2台(1用1备),设计臭氧投加量为12 kg·h⁻¹。发生间附属配套循环冷却水系统和液氧站1座(10.0 m×8.5 m)。液氧站配备液氧储罐(5.0 m³)2台,配套汽化器、调压阀、卸料泵等。

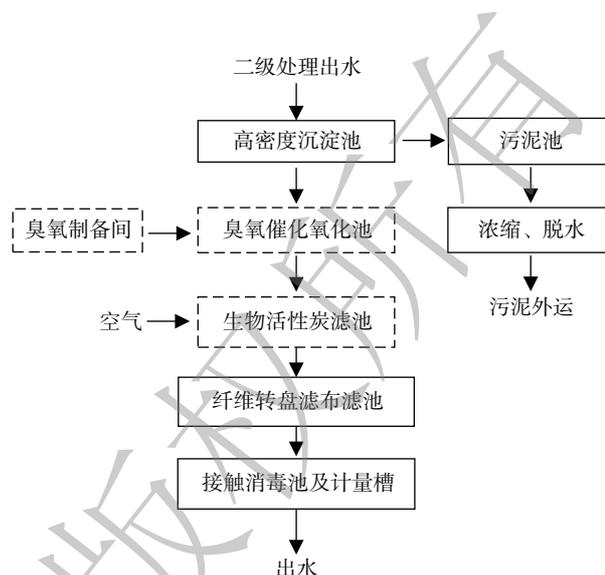


图4 提标改造工艺流程

Fig. 4 Flow chart of process after upgrading and reconstruction

5 工程投资及预期效果

臭氧催化氧化-生物活性炭滤池系统(臭氧催化氧化-生物活性炭滤池、臭氧制备间、液氧站等)工程总投资 $1\ 051.4 \times 10^4$ 元, 其中工程直接费用(含建筑工程费、设备购置费、安装费)为 821.0×10^4 元, 工程其他费用(含设计费、咨询费、监理费、环评费、工程管理费、调试费等)为 131.4×10^4 元, 建设期利息为 51.4×10^4 元, 预备费为 47.6×10^4 元, 折合建设吨水投资 $1\ 051.4$ 元· m^{-3} 。

新增臭氧催化氧化-生物活性炭滤池系统的单位生产成本为 0.67 元· m^{-3} (不含人工、折旧、维修等费用), 其中电费为 0.39 元· m^{-3} , 液氧费用为 0.28 元· m^{-3} 。经理论和中试分析, 项目建成投运后, 出水指标可以满足《湖南省城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 43/T 1546-2018)的要求, 预计该污水处理厂改造后的各项出水指标的达标率为 100%, 相对原工艺流程和排放标准, 每年可多削减 COD 排放量 36.5 t, NH_3-N 排放量 7.3 t, 将进一步减少污染物的排放, 切实改善和提升周围生态环境。

参考文献

- [1] 张璐怡. 新形势下我国污水处理行业发展现状分析[J]. 环境保护, 2021, 49(2): 32-36.
- [2] 唐建国, 张悦, 梅晓洁. 城镇排水系统提质增效的方法与措施[J]. 给水排水, 2019, 45(4): 30-38.
- [3] 孙永利. 城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 1-6.
- [4] SIERRA J D M, OOSTERKAMP M J, WANG W, et al. Impact of long-term salinity exposure in anaerobic membrane bioreactors treating phenolic wastewater: Performance robustness and endured microbial community[J]. *Water Research*, 2018, 141: 172-184.
- [5] CETECIOGLU Z, INCE B, GROS M, et al. Biodegradation and reversible inhibitory impact of sulfamethoxazole on the utilization of volatile fatty acids during anaerobic treatment of pharmaceutical industry wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 667-674.
- [6] BALAPURE K, BHATT N, MADAMWAR D. Mineralization of reactive azo dyes present in simulated textile waste water using down flow microaerophilic fixed film bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 1-7.
- [7] KONG Z, LI L, XUE Y, et al. Challenges and prospects for the anaerobic treatment of chemical-industrial organic wastewater: A review[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 231: 913-927.
- [8] 苗文凭, 刘青岩. 工业园区污水处理厂的设计特点[J]. 中国给水排水, 2016, 32(8): 44-46.
- [9] 常颖, 贺涛, 漆文光, 等. 臭氧/生物活性炭工艺的运行优化研究与工程示范[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(13): 1-5.
- [10] 李世峰. 臭氧-生物活性炭工艺设计中工程方案的选择[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(20): 35-38.
- [11] 张超, 单明皓, 许丹宁, 等. O_3 -BAC深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(10): 4628-4635.
- [12] 刘宇. 高级氧化-生物活性炭-膜滤优化组合除有机物中试研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [13] 吴晓迪, 陈志强. 电化学法处理工业废水的现状与发展研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(8): 30-33.
- [14] 赵昌爽, 张建昆. 芬顿氧化技术在废水处理中的进展研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(5): 83-87.
- [15] 赵洪军. ZnO-MgO/Al₂O₃臭氧催化氧化处理难降解有机废水[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [16] 肖丹. 采用 Ti/SnO₂-Sb-Ni 阳极和空气阴极电化学氧化技术处理实际工业废水[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [17] 马龙, 王雅洁, 杨成. 废水高级氧化技术研究现状与发展[J]. *环境工程*, 2016, 34(6): 52-55.
- [18] 何才昌. 混凝+A/O+臭氧-曝气生物滤池深度处理印染废水工程[J]. *水处理技术*, 2017, 43(3): 136-138.
- [19] 杨少斌, 刘志轩. A²O₂/高压脉冲电絮凝/ O_3 -BAC/膜法处理焦化废水[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(6): 60-64.
- [20] 单明皓, 张超, 古明哲, 等. DNF- O_3 -BAC工艺深度处理石化废水的效能和机理[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(11): 2646-2653.
- [21] 刘锐, 程家迪, 余彬, 等. O_3 /BAC工艺深度处理某工业园区废水的效果[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(8): 16-20.
- [22] 张磊. 臭氧+BAF组合工艺处理印染类工业园区废水的试验研究及工程设计[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [23] 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, 45(5): 90-93.

(责任编辑: 靳炜)

Improved process for refractory industrial wastewater treatment to fulfill the upgrading and reconstruction requirements of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) : A case study of a municipal WWTP in Hunan Province

WANG Ruilin^{1,2,*}, ZHANG Hongliang^{1,3}, ZHANG Gongliang^{1,3}, LIU Ruishan^{1,3}, ZHANG Chuang¹

1. Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co., Ltd., Beijing 100044, China

2. Capital Aihua (Tianjin) Municipal and Environmental Engineering Co., Ltd., Tianjin 300060, China

3. Beijing Mercury Environment Co., Ltd., Beijing 101599, China

*Corresponding author, E-mail: wz912076@qq.com

Abstract The first-phase scale of upgrading project in a municipal wastewater treatment plant (WWTP) in Hunan is $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ and the case study was based on this project. Considering the high proportion of industrial wastewater in the influent (up to 80%), fluctuation in pollutants concentration and high contents of refractory organic matters, feasibility of the advanced treatment process with O_3 -BAC was evaluated by the filed test based on the process of "hydrolysis-acidification tank + two-stage A/O + high-efficiency sedimentation tank + cloth-media filtration". With implementation of the upgrading project, it could address the drawback of insufficient reduction capacity of refractory organic matter in the original process, and raise the effluent discharge standard from the class A to secondary standard of Discharge Standard of Major Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant in Hunan (DB 43/T 1546-2018). The capital cost of the upgrading project was 1 051.4 yuan per m^3 of water, and the direct operation cost was 0.67 yuan per m^3 of water, it could reduce $36.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ COD and $7.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ $\text{NH}_3\text{-N}$ more than the original process annually. The upgrading of this WWTP would effectively improve the surrounding ecological environment and provide design reference in the related projects which contained refractory COD.

Keywords hardly-degradable wastewater; wastewater treatment plant; upgrading project; O_3 -BAC