

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.017

诸城银河污水厂深度处理改造及工艺调试

梁 硕, 负丹丹, 王艳芝, 谢瑞瑞, 周晓杨
(北京沃尔德斯水务科技有限公司, 北京 102308)

摘 要: 诸城银河污水处理厂原水为生活污水+工业废水,规模为 $10.6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,深度处理采用反硝化深床滤池+臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池联合工艺,最终经过联动调试,出水主要指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准,其中 $\text{COD}\leq 30\text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}\leq 1.5\text{ mg/L}$ 、 $\text{TN}\leq 10\text{ mg/L}$ 、 $\text{TP}\leq 0.2\text{ mg/L}$ 、 $\text{SS}\leq 5\text{ mg/L}$ 。在项目调试过程中,反硝化深床滤池的反硝化生物膜挂膜良好,TN去除率可达68%,滤池出水COD浓度不增加。臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池对COD去除量达 10 mg/L 。该深度处理工艺适用于混入工业废水的生活污水处理厂提标至地表水标准,对改善周围水体环境、保护当地流域水质和生态平衡具有十分重要的作用。

关键词: 反硝化深床滤池; 臭氧接触氧化; 活性炭吸附

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0101-06

Advanced Treatment Renovation and Process Commissioning of Zhucheng Yinhe WWTP

LIANG Shuo, YUN Dan-dan, WANG Yan-zhi, XIE Rui-rui, ZHOU Xiao-yang
(Beijing World's Water Technology Co. Ltd., Beijing 102308, China)

Abstract: The combined process of denitrification deep bed filter, ozone contact oxidation tank and activated carbon adsorption filter is adopted for advanced treatment of domestic sewage and industrial wastewater in Zhucheng Yinhe wastewater treatment plant (WWTP) with a treatment capacity of $10.6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$. The main effluent indicators have reached level IV criteria in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002), where $\text{COD}\leq 30\text{ mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N}\leq 1.5\text{ mg/L}$, $\text{TN}\leq 10\text{ mg/L}$, $\text{TP}\leq 0.2\text{ mg/L}$, $\text{SS}\leq 5\text{ mg/L}$ respectively. The TN removal rate was up to 68% without the increase of effluent COD concentration due to the successful cultivation of biofilm during commissioning in denitrification deep bed filter. COD was removed by 10 mg/L by ozone contact oxidation tank and activated carbon adsorption filter. The advanced treatment process is suitable for upgrading wastewater treatment plants mixed industrial wastewater to meet surface water standards, which plays a very important role in improving the surrounding water environment, protecting water quality and ecological balance of local river basins.

Key words: denitrification deep bed filter; ozone contact oxidation; activated carbon adsorption

1 项目简介

诸城银河污水处理厂于2018年首次提标改造,

规模为 $10.6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,变化系数1.3,提标改造后出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—

通信作者: 负丹丹 E-mail: 1042443743@qq.com

2002)的Ⅴ类标准。后续为提高海河流域水环境质量,潍河干流及主要支流市控以上断面水质须达到地表水Ⅲ类标准,全面推进辖区内污水处理厂出水水质提升工作,对诸城银河污水处理厂进行提标改造势在必行。2021年继续提标改造,提标改造后设计进、出水主要指标需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准,其中 $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N} \leq 1.5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.2 \text{ mg/L}$ 、 $\text{SS} \leq 5 \text{ mg/L}$,见表1。工程内容分改造和新建两部分,其中改造部分是将连续砂滤池改造为活性炭吸附滤池,新建部分包括反硝化深床滤池及三次提升泵站、臭氧设备间及臭氧接触氧化池、变配电室等。

表1 提标改造工程设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of the upgrading project $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	设计 进水水质	本次提标改造 进水水质	本次提标改造 出水水质
COD	≤ 800	≤ 40	≤ 30
BOD_5	≤ 380	≤ 10	≤ 10
SS	≤ 800	≤ 10	≤ 5
TN	≤ 70	≤ 15	≤ 10
$\text{NH}_3\text{-N}$	≤ 60	≤ 2.0	≤ 1.5
TP	≤ 8	≤ 0.4	≤ 0.2

工艺流程见图1。原水经过预处理、生化处理、磁混凝沉淀处理后进入Ⅳ类水提标工艺段,经过反硝化深床滤池深度脱氮、去除悬浮物,再经三级提升泵提升到臭氧接触氧化池后进入活性炭吸附滤池,进一步降解有机污染物,保证出水COD稳定达标,最终消毒后排放,出水水质满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水标准。

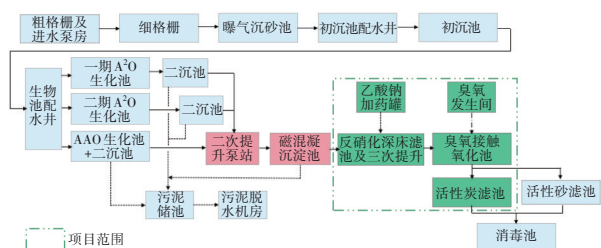


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

2 工程设计参数

2.1 反硝化深床滤池

现有污水处理设施出水不能稳定达标,其中TN是制约因素之一^[1-4]。首次提标改造将原有一期百

乐克生化池和二期倒置 A^2O 改造为改良 A^2O 生化池,处理水量已达到满负荷,原水为生活污水和工业废水混合污水,经过前期预处理、 A^2O 生化池、磁混凝沉淀后消毒排放,TN去除主要依靠改造后的生化池,出水水质能够达到一级A标准。但污水处理厂出水TN超过 12 mg/L 的超标率仍为15.85%,虽可通过在缺氧池投加复合碳源的方式进一步降低TN指标,但容易投加过量进而影响出水COD,并且出水水质不稳定,如需满足出水 $\text{TN} \leq 12 \text{ mg/L}$,只能增加深度脱氮单元,因此本次提标改造采用运行灵活、除氮效果好,并且能同步去除悬浮物的反硝化深床滤池,冬季低温也能稳定控制出水TN,同时满足后续臭氧接触池对进水SS的要求。设计硝酸盐氮负荷为 $0.395 \text{ kgNO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,滤池采用6格并联设计,单池过滤面积为 122.265 m^2 ,滤池尺寸为 $22.23 \text{ m} \times 5.5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$,平均滤速 6.02 m/h ,滤料深度 1.83 m ,滤料规格 $1.7 \sim 3.35 \text{ mm}$,承托层厚度 0.38 m ,规格为 $3 \sim 20 \text{ mm}$ 。水反洗强度为 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,气反洗强度为 $90 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,反洗周期为 $24 \sim 72 \text{ h}$ 。

2.2 臭氧接触氧化池

现状污水处理厂出水水质执行一级A标准, $\text{COD} \leq 40 \text{ mg/L}$,但出水COD最高会超标达到 50 mg/L 。现提标至地表Ⅳ类水标准,需要出水 $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$,COD去除率要求提高25%。经现状分析可知,原水中含工业废水,废水中含一定可溶性难降解物质,沉淀过滤难以去除,深度生化处理效率不高,一般采用高级氧化或活性炭吸附去除。目前常用的高级氧化技术主要为芬顿氧化和臭氧氧化,由于芬顿氧化需调节酸碱性,增加成本,同时产生大量疑似危废污泥,不适用本项目,故采用臭氧接触氧化进行处理,同时将原有活性砂滤池一半改造为活性炭吸附滤池来强化处理,并增大臭氧投加量,将难降解的COD直接降解为 CO_2 ,同时臭氧分解后将污水中的溶解氧提高,污水携带残余的溶解氧进入活性炭滤池,使活性炭变为生物活性炭(BAC),延长了再生周期,对于低温进水氨氮的进一步硝化也有较好保障作用。臭氧接触氧化池利用臭氧直接氧化或生成羟基自由基^[5]强氧化去除有机物,或将大分子有机物破碎成小分子有机物。池体采用最大流量设计,尺寸为 $18.4 \text{ m} \times 44.6 \text{ m} \times 7.8 \text{ m}$,并列分为2组。水力停留时间约 60 min ,臭氧投加量平均为 20 mg/L 。设置4台纯氧气源臭氧发生器,单台臭

氧发生器产能为 30 kg/h,臭氧额定浓度为 150 mg/L。

2.3 活性炭吸附滤池

活性炭吸附滤池利用活性炭强大的吸附能力,将进水中残留的有机物吸附和降解,作为保障性工艺,当水质较差时全部或部分污水经过此工艺段。由原活性砂滤池改造,尺寸为 21.8 m×48 m×6.5 m,最大滤速为 17.7 m/h,共 54 套吸附单元,活性炭填充 405 t,填充高度为 3 m。采用煤质破碎颗粒活性炭,碘值为 600~800。活性炭吸附饱和后经提炭器提出,送至微滤机脱水后运输到厂外再生,再生后及新补充的炭经由泵提升并输送至池体内。

3 调试运行说明

该项目具备工艺调试条件后,开始启动各工艺调试。各工艺段的调试水质处理目标见表 2。

表 2 各工艺段的调试水质处理目标

Tab.2 Targets undertaken by each process

mg·L⁻¹

工艺段	水质指标	设计进水水质	要求出水水质
反硝化深床滤池	COD	≤40	≤40
	SS	≤10	≤5
	TN	≤15	≤10
	TP	≤0.4	≤0.2
臭氧接触氧化池	COD	≤40	≤40
	NH ₃ -N	≤2.0	≤1.5
活性炭吸附滤池	COD	≤40	≤30
	SS	≤10	≤5

分别进行反硝化深床滤池、臭氧接触氧化池和活性炭吸附滤池的工艺调试。反硝化深床滤池运行中涉及生物反硝化过程、培养微生物膜,需要外加有机碳源提高硝酸盐氮的还原效率^[6~8],耗时长,需重点调试。同时分别对另外两个工艺段进行独立调试。臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池的组合工艺共同保障有机污染物的去除效率。

3.1 反硝化深床滤池调试

反硝化深床滤池系统设备具备条件后带负荷联动运行,首先进入自控调试阶段,滤池自控系统自动运行后转入反硝化功能调试阶段。

自控调试阶段自 2021 年 5 月 27 日开始,共 10 d,主要完成滤池自动过滤运行和自动反冲洗流程,同时设置滤池恒液位运行。在调试自动反冲洗系统时将石英砂滤料清洗干净,水反洗强度为 15 m³/

(m²·h),气反洗强度为 90 m³/(m²·h),气洗 7 min,气水联合清洗 8 min,水洗 7 min,连续进水运行,进水量为 8×10⁴ m³/d。同时利用原水中部分可生化 COD,预激活微生物反硝化功能。

反硝化功能调试包括微生物挂膜、提高总氮去除率、稳定运行三个阶段。

① 微生物挂膜阶段:6 月 5 日起,共 28 d。进水量为 8×10⁴ m³/d,进水总氮负荷为 0.12 kg/(m³·d),开始投加碳源进行滤池生物膜培养。对比甲醇、乙醇、乙酸钠药剂作为外加碳源时的反硝化速率,其中乙酸钠作为碳源时反硝化速率最大^[9],采用液体乙酸钠,有效浓度为 20%,按小流量(200 L/h)连续加药,碳源投加浓度平均为 12 mg/L,并对进、出水水质进行监测。进水 COD 浓度不大于 40 mg/L,进水溶解氧平均浓度为 5.03 mg/L。因滤池进水渠道配水跌落会引起 DO 值上升 2.19 mg/L^[10],并且实测分析滤池表面 DO 约为 6.8 mg/L,上升约 1.8 mg/L,因此调试初期先调整为淹没式恒液位运行,避免进水跌氧,提高碳源的利用率。生物膜具有生长周期,调试初期反洗周期设置为 72 h,或运行液位达到设置最高液位时触发反洗模式。增加驱氮周期 1 次/8 h,每次 2 min。6 月 10 日—15 日臭氧工艺调试时出水出现黄色泡沫现象,为查清原因,反硝化深床滤池间歇加药,此时滤池具有初步去除总氮效果,初步挂膜。17 日中断加药,30 日恢复连续加药。7 月 3 日起,反硝化深床滤池进、出水 TN 有明显去除效果,证明滤池挂膜已完成。反硝化深床滤池进、出水 TN 浓度监测结果见图 2。

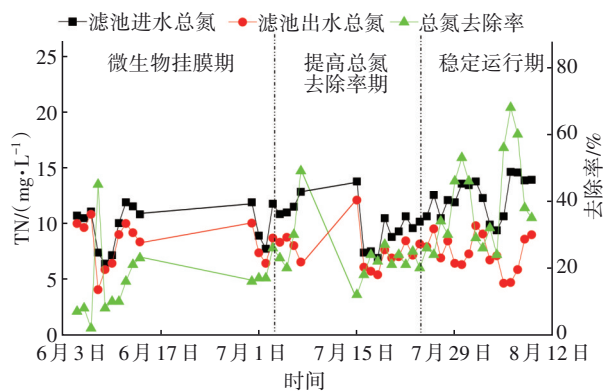


图 2 反硝化深床滤池进、出水总氮浓度监测值

Fig.2 Total nitrogen concentration in influent and effluent of denitrification deep bed filter

从图 2 可以看出,挂膜阶段投加碳源后即出现

对硝酸盐氮的去除效果,说明调试初期原水经过石英砂滤层截留的部分有机物为反硝化生物膜培养提供了前提基础,之后连续投加碳源促进反硝化生物菌种生长。但由于中途臭氧系统调试出现问题,以及后续加药管路故障,使挂膜期延长,导致反硝化功能调试缓慢。

② 提高总氮去除率阶段:7月5日起,共20 d。生物膜培养成功后,提高进水量至 $10.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水总氮负荷为 $0.39 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,碳源投加量提至 25 mg/L ,同时调整自动反冲洗周期为48 h、驱氮间隔为4 h。9日滤池前段磁混凝沉淀池出现故障,停止运行,导致大量SS($\text{SS} \geq 50 \text{ mg/L}$)直接进入滤池而无法进行反洗。磁混凝沉淀池运行不稳定,滤池进水水质较差,导致滤料负荷较高、滤料层SS截留超负荷,需高频率反冲洗。同时加药系统管路故障,停止加药。7月15日后实现连续稳定加药。总体而言,反硝化深床滤池对TN的去除效果得到增强。

③ 稳定运行阶段:7月25日起,共15 d。总体稳定加药量为 25 mg/L ,流量平均为 550 L/h ,连续加药,反冲洗周期为24 h,反洗流程为气洗6 min、气水联合清洗8 min、水洗5 min。驱氮间隔为2 h,时间为2 min,监测出水 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 。反硝化深床滤池反硝化功能调试完成。在稳定运行期反硝化生物膜挂膜良好,进水TN浓度不大于 15 mg/L 时,出水TN浓度稳定在 10 mg/L 以下,去除率最高达68%,去除的TN平均为 5 mg/L 。反硝化深床滤池稳定运行期碳源投加趋势见图3。

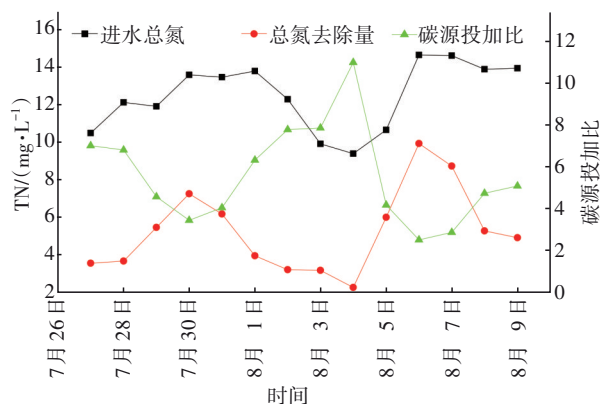


图3 反硝化深床滤池稳定运行期碳源投加比变化趋势

Fig.3 Sodium acetate dosing proportion during stable operation of denitrification deep bed filter

稳定运行阶段碳源投加比即乙酸钠投加量:总氮去除量平均为5.7:1,进水TN浓度越低,去除难

度越大,分析其原因可能是进水浓度越低,可有效利用的硝酸盐浓度越低,导致生物反应中有效碰撞几率降低,碳源利用率降低,反硝化速率降低,TN去除效果减弱。

总体调试期虽有所延长,但可证实在中断连续投加碳源后,重新启动碳源投加,滤池的反硝化菌种仍然存在,容易被激活,可较快恢复反硝化功能。反硝化深床滤池出水COD浓度监测结果见图4。

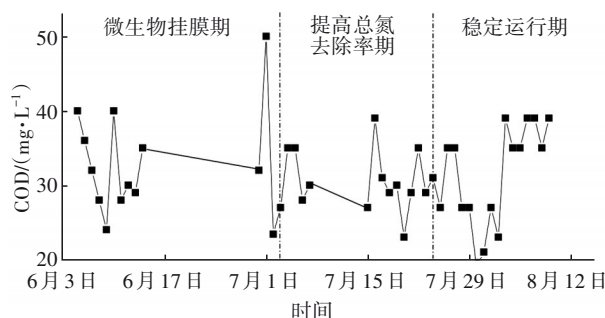


图4 反硝化深床滤池出水COD浓度监测值

Fig.4 COD concentration in effluent of denitrification deep bed filter

稳定运行期滤池出水COD未超过 40 mg/L ,乙酸钠的投加量也未造成滤池出水COD浓度增加。

调试验收阶段自8月3日起,共7 d。连续7 d设备无故障,系统稳定运行,加药系统计入自动控制运行,碳源投加与实际进、出水水质联动运行,碳源投加比设置为5.7:1,处理性能满足进水 $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ 的要求下,出水 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$,达标率为100%,出水 $\text{COD} \leq 40 \text{ mg/L}$,达到了设计要求予以系统性能验收通过。

3.2 臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池调试

臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池段调试分为设备调试和联动调试。将臭氧系统进行氮气吹扫,各辅助系统单机试车,对臭氧发生器开机测试。接着进行活性炭吸附滤池工艺提砂反洗调试。之后进入联动调试,逐步间断开启3台臭氧发生器制备臭氧,通入臭氧接触氧化池,联合活性炭吸附滤池组合联调,使工艺连续稳定运行。连续监测工艺进、出水COD和去除率。

设备调试自6月5日起,共5 d。整体臭氧系统进行氮气吹扫完成,氧气源到位后,臭氧发生器进行设备调试,设备联动顺利。

负荷联调自6月10日起,共5 d。逐步开启1~3台臭氧发生器制备臭氧,通入臭氧接触氧化池中,

达到设计投加量 20 mg/L。活性炭吸附滤池后续投入,其间正常运行,自动反洗频率为 1 次/72 h,每次 4 h。实际进水水质低于设计进水水质。在调试过程中,臭氧制备量稳定、设备正常运行,但总出水出现大量黄色泡沫囤积现象。排查对比臭氧投加药量和外加药剂质量因素过程中发现,这是碳源质量差引起的异常现象,更换碳源药剂后恢复正常。臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池的进、出水 COD 浓度监测结果见图 5,臭氧投加量监测结果见图 6。

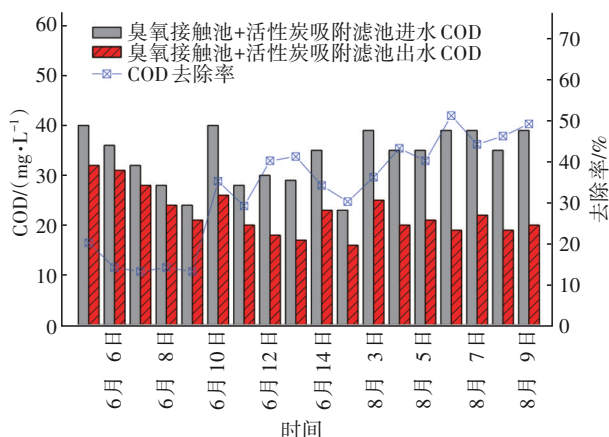


图5 臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池进、出水 COD 监测值

Fig.5 COD concentration in influent and effluent of ozone contact oxidation tank and activated carbon filter

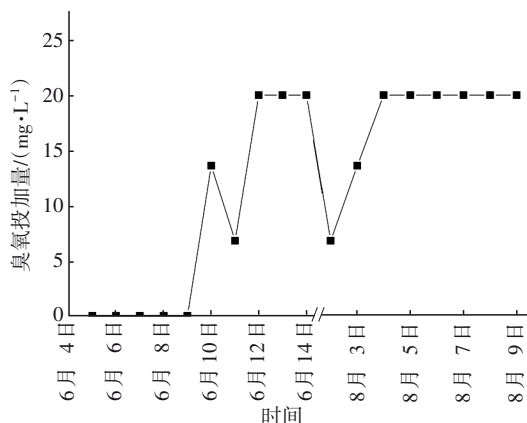


图6 臭氧投加量监测值

Fig.6 Monitoring dosage of ozone

从图 5、6 可以看出,进水 COD 为 23~40 mg/L,最终总体出水 COD 为 16~31 mg/L,去除率为 13%~51%,平均为 32.8%;当不投加臭氧时,单独活性炭吸附滤池对 COD 去除率约 13%;随着臭氧投加量的增大,组合工艺对 COD 去除效果增强。最终臭氧稳定投加量为 20 mg/L,臭氧接触氧化池+活性炭吸附

滤池组合对 COD 的去除量稳定在 10 mg/L 以上。这表明调试运行稳定,出水水质良好。

调试验收阶段自 8 月 2 日起,共 7 d。其间 3 台臭氧设备稳定运行,投加量为 20 mg/L,配合活性炭吸附滤池使用。连续 7 d 设备无故障,系统稳定运行,处理性能满足设计出水水质指标,达到了设计要求予以系统性能验收通过。

4 调试运行过程的问题分析

① 反硝化深床滤池脱氮功能的实现不仅需要提供碳源,更需要系统稳定运行,反冲洗运行效果尤为重要。在调试过程中,前段磁混凝沉淀池发生跑泥现象,滤池高负荷运行,造成滤料堵塞。此时先停止加药,滤池转换为过滤模式;等故障解除后,先对滤池进行反冲洗,再恢复加药,转换为反硝化运行模式正常调试。

② 反硝化深床滤池调试运行中,由于碳源没有连续投加,同时受联动调试的影响,导致反硝化脱氮功能调试时间延长。建议增加加药系统备用泵数量,并完善自控运行。调试时要随时监测加药系统的设备运行情况,保证加药设备的稳定性。

③ 调试过程中发现臭氧设备投入运行后,消毒池的出水含有大量黄色泡沫,致使水厂无法顺利进行整体系统调试。当出水出现异常情况时,根据工艺流程逐单元观察进、出水情况,排查首次发现出水异常的工艺单元,首选排查分析系统外加药剂情况。排查出原因是乙酸钠药剂中存在的杂质经过臭氧氧化后产生了黄色物质,最终囤积到总出水所致,当更换乙酸钠药剂后调试恢复正常。同时建议污水厂在采购药剂时应对不同厂家的药剂进行小试,综合对比后再采购。

5 经济分析

该提标改造项目总投资为 6 120.16 万元,其中建设投资 5 836.04 万元,分为工程费用 4 959.68 万元、工程建设其他费用 444.06 万元、预备费用 432.30 万元。单位平均处理成本为 0.96 元/m³,单位平均经营总成本为 0.86 元/m³。

反硝化深床滤池运行电耗为 0.012 kW·h/m³,碳源投加费用为 0.125 元/m³,臭氧接触氧化池运行电耗为 0.166 kW·h/m³,液氧费用为 0.428 元/m³,活性炭吸附滤池运行电耗为 0.005 kW·h/m³,活性炭再生及补充费用为 0.032 元/m³。人工费约 0.001 5

元/m³。最终总计直接运行费用约0.722元/m³。

6 结论

诸城银河污水处理厂经过反硝化深床滤池+臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池工艺提标改造后,历时两个半月工艺调试完成,主要出水指标达到地表水Ⅳ类标准。在工艺选择上,深度处理组合磁混凝沉淀池用于深度化学除磷,反硝化深床滤池用于脱除TN,反硝化深床滤池无需投加除磷药剂,增大滤池污染物纳污能力,同时磁混凝沉淀池发生故障时,滤池可截留悬浮物。臭氧接触氧化池+活性炭吸附滤池进一步降解有机污染物,作为去除有机污染物的保障系统,可保证出水COD稳定达标。

参考文献:

- [1] 张双,陈贵生,杨仁凯,等.深度处理工艺在城镇生活污水处理厂中的应用评价[J].市政技术,2021,39(2):125-129.
ZHANG Shuang, CHEN Guisheng, YANG Renkai, *et al.* Application evaluation of advanced treatment process in urban domestic sewage treatment plant[J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(2): 125-129 (in Chinese).
- [2] 杨晨宵,盛铭军,黄继会,等.“准Ⅳ类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J].工业水处理,2020,40(11):15-21.
YANG Chenxiao, SHENG Mingjun, HUANG Jihui, *et al.* Difficulties and measures for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants under quasi-Ⅳ standard [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(11): 15-21(in Chinese).
- [3] 蒋悦,花春文.反硝化深床滤池工艺在污水深度处理中的脱氮研究[J].云南化工,2020,47(12):58-60.
JIANG Yue, HUA Chunwen. Denitrification of advanced wastewater treatment in deep-bed filter [J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(12): 58-60 (in Chinese).
- [4] 高自豪.污水处理厂尾水深度脱氮技术研究进展[J].山东化工,2022,51(6):231-233.
GAO Zihao. Technical analysis of deep nitrogen removal from tail water of municipal sewage treatment plant [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(6): 231-233 (in Chinese).
- [5] 邹展.臭氧催化氧化和活性炭吸附在化工园区难降解污水深度处理中的试验研究[D].北京:北京化工大学,2016.
ZOU Zhan. Catalytic Oxidation of Ozone and Activated Carbon Adsorption Process Deeply Treating Refractory Wastewater from Chemical Industrial Park [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016 (in Chinese).
- [6] FU C, LI J, LÜ X, *et al.* Operation performance and microbial community of sulfur-based autotrophic denitrification sludge with different sulfur sources [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42: 1009-1020.
- [7] TIAN T, YU H Q. Denitrification with non-organic electron donor for treating low C/N ratio waste waters [J]. Bioresource Technology, 2020, 299: 1226886.
- [8] 郑伟波,单伊娜,胡如意,等.高效沉淀池+反硝化深床滤池用于污水厂提标改造[J].中国给水排水,2021,37(16):124-129,136.
ZHENG Weibo, SHAN Yina, HU Ruyi, *et al.* Application of high efficiency sedimentation tank and DDBF in upgrading and reconstruction of a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(16): 124-129, 136(in Chinese).
- [9] 马勇,彭永臻,王淑莹.不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J].北京工业大学学报,2009,35(6):820-824.
MA Yong, PENG Yongzhen, WANG Shuying. Sludge denitrification characteristics with different external carbon source [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6): 820-824(in Chinese).
- [10] 严国奇,张丽丽.七格三期污水处理厂反硝化深床滤池的调试与运行[J].中国给水排水,2017,33(16):127-132.
YAN Guoqi, ZHANG Lili. Commissioning and operation of deep-bed denitrification filter in Qige phase III wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 127-132(in Chinese).

作者简介:梁硕(1990-),男,河北廊坊人,硕士,工程师,主要从事城镇污水处理设施设计与研究工作。

E-mail:815008931@qq.com

收稿日期:2023-04-17

修回日期:2023-06-06

(编辑:衣春敏)