

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.22.008

水质净化厂改扩建工程新理念探索与实践

张俊¹, 雷轰¹, 陈翔¹, 王硕¹, 王保龙¹, 胡甲兴²,
冯硕², 冯凯²

(1. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要: 六安市凤凰桥水质净化厂一期工程建设规模 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,二期工程将建设规模提升至 $9\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准和《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)的共同要求。通过对一期工程的挖潜和局部改造,在保证出水达到新考核指标的前提下,将处理能力提升至 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。二期工程采用改进型Bardenpho生物池+平流式沉淀池,并采用深床滤池/硫自养滤池深度脱氮,采用高级氧化技术去除新污染物。通过运行工况的调整,凤凰桥水质净化厂雨季处理能力可提升至 $13\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。运行结果显示,出水水质可稳定达标。

关键词: 硫自养反硝化; 新污染物; 旱季; 雨季; 挖潜

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)22-0053-05

Exploration and Practice of New Concepts in Wastewater Purification Plant Reconstruction and Expansion Project

ZHANG Jun¹, LEI Hong¹, CHEN Xiang¹, WANG Shuo¹, WANG Bao-long¹,
HU Jia-xing², FENG Shuo², FENG Kai²

(1. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, China; 2. Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: The construction scale of the first phase of Fenghuangqiao wastewater purification plant in Lu'an is $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, and the second phase of the project will increase the construction scale to $9\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$. The effluent quality should comply with the combined requirements of the class A standard of the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) and the *Discharge Limits of Major Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants & Industries in the Chaohu Basin* (DB 34/2710-2016). By exploring the potential of the first phase project and making partial transformations, the treatment capacity was enhanced to $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ while ensuring that the effluent met the new standard. Improved Bardenpho biological tanks and horizontal flow sedimentation tanks were adopted in the second phase project, and deep-bed filters/sulfur autotrophic denitrification filters were adopted to remove nitrogen, while advanced oxidation was adopted to remove emerging contaminants. The treatment capacity could be increased to $13\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ during the rainy season through the adjustment of operation. The operation results indicated that the effluent quality could meet the

基金项目: 长江大保护小城镇污水处理厂站设计标准化研究科研项目(HB/2B2021106)

standards steadily.

Key words: sulfur autotrophic denitrification; emerging contaminants; dry season; rainy season; potential excavation

凤凰桥水质净化厂(简称“净化厂”)一期工程设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,于2014年底建成,处理工艺为预处理+微曝氧化沟+辐流式二沉池+活性砂滤池+紫外消毒,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。2021年二期工程实施前,净化厂处于满负荷运行状态,每年雨季运行压力大。随着城区黑臭水体整治工程的推进,净化厂的进水量逐步增加,且出水考核指标将进一步提升,因此净化厂实施了二期工程,一方面满足了提升处理水量和处理水质的需求,缓解了雨季运行压力,另一方面建设了硫自养反硝化深度脱氮和高级氧化去除新污染物的示范工程,研究新技术的运行特性,积累工程经验。

1 设计概况

1.1 建设规模

净化厂的总建设规模为 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。一期工程在预处理和深度处理工艺段的土建按 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 建设,设备按 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 安装,二级处理的土建和设备按 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 建设。通过二期工程的建设,净化厂的处理能力将达到 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.2 设计进、出水水质

2017年1月1日—2020年8月31日,净化厂平均日处理能力为 $41\,299 \text{ m}^3/\text{d}$,雨季最大日处理量为 $59\,629 \text{ m}^3/\text{d}$ 。进水在线监测数据统计见表1。

表1 2017年1月1日—2020年8月31日净化厂进水水质

Tab.1 Influent quality of the wastewater purification plant from January 1, 2017 to August 31, 2020 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	TN
一期设计进水	320	160	200	35	4.0	40
实际进水最大值	425	205	345	50	9.5	45
实际进水最小值	32	31	13	2	1.0	2
实际进水均值	179	93	114	22	2.8	29
进水水质90%涵盖率	272	141	150	28	3.8	38

旱季和雨季净化厂存在明显的水量和水质波动,故将运行模式分为旱季和雨季,分别对应不同的处理能力和设计进水水质。

运行水质与一期设计进水水质存在一定差距,但是考虑管网提质增效的实施和净化厂处理能力的冗余性,旱季设计进水水质维持一期设计进水水质,雨季设计进水水质参考表1中的90%涵盖率确定。由于进水TP和TN的监测数据量较少,且高值多发生在旱季,因此TP和TN的雨季设计进水水质参考表1中进水均值确定。出水水质需满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准和《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)标准的共同要求。净化厂的设计进水和出水水质见表2。

表2 设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	TN
旱季设计进水水质	320	160	200	35	4.0	40
雨季设计进水水质	270	140	150	28	3	30
设计出水水质	40	10	10	2.0(3.0)	0.3	10(12)
注: 括号外数值为水温 $>12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标,括号内的数值为水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标。						

1.3 设计思路

① 处理规模

结合设计进水水质、一期各现况构筑物的设计参数、实际运行数据以及复核计算,确定可通过对现况设施的简单改造,在确保出水水质稳定达到新考核指标的前提下,将处理能力从现况 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,总变化系数(K_z)沿用原设计的1.3。二期扩建工程建设规模可缩减至 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, K_z 采用1.625。净化厂在旱季的峰值处理能力为 $5\,417 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

为减轻雨季城市道路污水冒溢、减少排河污染物,净化厂在雨季通常需要增加处理量,运行压力较大。虽然进水量增加,但是进水污染物浓度降低,且雨季水温较高,生化反应速率快,因此二级处理设施具备雨季提高处理能力的条件。通过复核计算,雨季净化厂可长期保持峰值处理能力 $5\,417 \text{ m}^3/\text{h}$,即雨季处理能力可达到 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

② 处理工艺

由于出水考核指标高,且进水存在水质和水量的季节波动,因此二级处理应选择处理效果好、运行稳定、抗冲击负荷能力强的工艺。生物池可采用氧化沟工艺、AAO及各种变形工艺、MBR工艺等,综合考虑项目占地、投资等因素,确定采用改进型Bardenpho工艺。为集约占地,选择矩形周进周出二沉池,与生物池合建。

国内现状污水处理厂进水普遍存在低C/N的情况,为了实现出水TN达标,通常需要外加碳源,增加运行成本。硫自养反硝化技术可在不投加化学药剂的条件下,利用自养菌和无机碳(CO_2 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-})进行深度脱氮,处理方式更为低碳,在“双碳”背景下有着明显的技术优势。目前,该技术仅在个别城镇污水处理厂的深度处理段有应用^[1-2],尚缺少工程经验。工程设计采用深床滤池的池型,同步对比异养反硝化和硫自养反硝化的运行特性。

参考欧洲经验^[3],确定采用高级氧化技术去除新污染物。同时,采用BiowinTM模拟验证,在旱季水温12℃或雨季水温18℃下,通过投加碳源和除磷药剂,出水均可稳定达到考核指标。

1.4 建设内容

二期工程的建设内容包括一期挖潜工程、二期扩建工程和新技术示范工程三部分,一期挖潜工程包括改造氧化沟和优化水力流程等,二期扩建工程包括新建二级处理、补齐预处理和深度处理设施的设备处理能力等,新技术示范工程包括建设深度脱氮和新污染物去除单元。净化厂在建设期间的航拍图见图1。



图1 净化厂建设期间航拍图

Fig.1 Aerial photograph during construction of the wastewater purification plant

1.5 工艺流程及水量分配

近期净化厂约 $(5.5\sim6)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 尾水送至凤凰桥中水厂(在建)进行深度净化后再利用,约 $(3\sim3.5)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 尾水排河;远期全厂 $9\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 尾水根据需求可全部输送至中水厂。

污水经格栅和沉砂池预处理后进入二级处理,其中一期工程(规模 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)采用微曝氧化沟和辐流式沉淀池,二期工程(规模 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)采用改进型Bardenpho生化池和平流式沉淀池。经过二级处理的出水,供给中水厂的部分($6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)采用活性砂滤池进一步去除固体悬浮物,并进行紫外消毒;直接排河部分($3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$),经过深床滤池/硫自养滤池深度脱氮、高级氧化去除新污染物,再进行紫外消毒。剩余污泥送至城市污泥处理厂集中处理。污水处理工艺流程见图2。

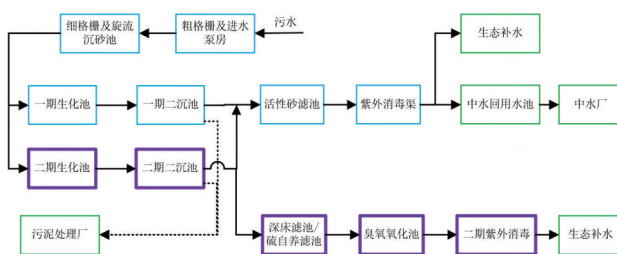


图2 污水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of wastewater treatment process

2 主要构筑物设计

2.1 一期挖潜工程

现况氧化沟的HRT约18h,其中厌氧池约1.5h,缺氧池约3.5h,好氧池约13h;二沉池表面负荷为 $0.74\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,峰值表面负荷为 $0.96\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。污水处理量提升至 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 后,氧化沟HRT减少至14.4h,其中厌氧池约1.2h,缺氧池约2.8h,好氧池约10.4h;二沉池的表面负荷为 $0.93\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,峰值表面负荷为 $1.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。处理量提升后氧化沟和二沉池的参数均符合设计规范要求。

对于新的出水考核指标,一期工程的难点主要是对TN的去除需要从现况15mg/L的排水标准提升至10(12)mg/L的排水标准。整个工艺流程仅微曝氧化沟可去除TN,处理规模的提升会进一步增加TN达标的难度,因此挖潜工程的重点之一是提升微曝氧化沟对TN的去除。具体改造措施包括:①新增内回流泵,内回流比为250%;②调整池底曝气头分布,减少内回流前的曝气量。

优化水力流程是为了确保稳定通过峰值水量,具体措施包括提高氧化沟出水堰板高程、调整部分水头损失较大的池间连接管等。

2.2 二期扩建工程

设置2组生物池,每组处理规模 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,有效水深6.1 m,污水按水流方向依次通过厌氧区、第一缺氧区、第一好氧区、消氧区、第二缺氧区和第二好氧区,总HRT为15.2 h,其中厌氧区为0.68 h,缺氧区1为2.95 h,好氧区1为6.62 h,消氧区为0.64 h,缺氧区2为2.31 h,好氧区2为2.04 h。设置消氧区,混合液从消氧区末端回流至缺氧区。第一好氧区末端同时设置曝气头和搅拌器,可以在运行过程中根据需求调整。生物池MLSS为4 500 mg/L,内回流比为100%~400%,外回流比为50%~100%。

设置4组二沉池,每组处理规模 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用周进周出矩形二沉池,有效水深4.5 m,每组设1套非金属链板刮泥机。二沉池表面负荷平均为 $0.81 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,峰值表面负荷为 $1.31 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.3 新技术示范工程

硫自养深度脱氮技术在城镇污水处理厂的应用还处于初级阶段,硫自养滤料没有统一标准,硫自养脱氮受水温影响较大,故设计时将 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的滤池分为5格,其中3格为深床滤池,2格为硫自养滤池。滤床厚2.44 m,均值滤速4.1 m/h,峰值滤速6.7 m/h。硫自养滤池的设计出水TN为5 mg/L,通过精细化运行,月均值可达到3 mg/L。反洗过程先进行气冲洗3~5 min,之后气水联合冲洗15~20 min,最后水冲洗5 min,其中气冲洗强度为 $110 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水冲洗强度为 $14.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。驱氮过程为水冲洗1~2 min,4~6 h进行一次,水冲洗强度为 $14.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

净化厂采用高级氧化技术去除新污染物。臭氧氧化池分2组,单组处理能力为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。接触池分三段,前两段主要去除水中色度物质及易氧化物质,第三段为高级氧化段,主要去除新污染物,总HRT为1 h,有效水深7.3 m。根据臭氧投加浓度为10 mg/L进行设备选型。

示范工程设置了两种工况以满足不同的运营和技术研究需求:工况1采用“深度脱氮+高级氧化”模式,实现深度脱氮,并去除新污染物;工况2采用“高级氧化+生物滤池”模式,将深床滤池/硫自养滤池转变为生物滤池运行,通过生物作用进一步去除

高级氧化生成的可降解新污染物,探索对新污染物的极限去除能力。两种运行工况的调整可以通过泵组和闸门的切换实现。

3 运行效果

3.1 整体运行情况

2022年5月底,二期扩建工程及新技术示范工程开始调试运行,2022年9月底实现满负荷运行。此后,在满足流域污水处理需求的前提下,逐步开展一期挖潜工程的实施。二期工程出水水质优于一期工程,且运行成本低(高级氧化暂未运行),在来水量达不到建设规模时,二期工程保持满负荷运行,一期工程适当减产。2023年进入雨季后,净化厂基本满负荷运行,最高日处理能力超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,可处理全部来水。月均处理水量见图3。

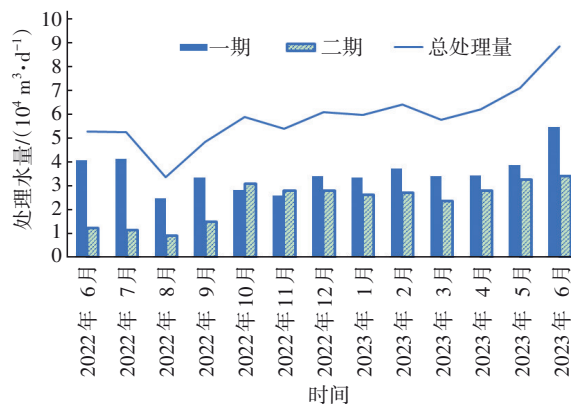


图3 净化厂月均处理量

Fig.3 Monthly average treatment capacity of the wastewater purification plant

一期和二期工程出水水质均明显优于出水考核指标,二期工程在SS和TN的去除方面明显优于一期工程。污水厂稳定运行后旱季和雨季的运行情况见表3。

表3 旱季和雨季进、出水水质均值

Tab.3 Average influent and effluent quality during dry season and rainy season $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	SS	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	TN
旱季进水水质	134.6	95.3	30.5		
一期旱季出水水质	11.6	7.4	0.24	0.12	4.67
二期旱季出水水质	11.9	0.1	0.15	0.10	3.48
雨季进水水质	110.52	104.5	28.92		
一期雨季出水水质	9.20	7.1	0.15	0.10	2.85
二期雨季出水水质	9.34	0.1	0.05	0.07	2.32

3.2 硫自养滤池运行情况

2022年6月—12月,硫自养滤池出水TN平均

为2.97 mg/L,深床滤池/硫自养滤池混合出水TN平均为3.89 mg/L,在此期间一期工程出水TN平均为5.68 mg/L。

2022年6月—2023年6月,一期和二期工程出水在线监测TN均值见表4。

硫自养滤池虽无需投加碳源,但在运行中会逐渐消耗填料,因此需定期补充填料。硫自养菌受低温的影响较大,冬季应根据运行需求适当补充填

料,保证脱氮效果。自2022年5月底试运行至2023年6月,系统出水水质稳定达到设计预期,冬季出水TN浓度虽有升高的趋势,但满足运行要求,尚未补充填料。

除节省药剂外,硫自养滤池运行周期较长也是相对于深床滤池的优势。在相同的冲洗方式下,硫自养滤池每周冲洗一次,深床滤池每2天冲洗一次,硫自养滤池的自用水率更低,电耗更少。

表4 净化厂出水TN月均值对比

Tab.4 Monthly average comparison of effluent TN of the wastewater purification plant $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

时间	2022年							2023年					
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
一期出水TN	7.94	6.93	5.39	4.01	4.24	5.17	5.02	4.04	5.70	4.56	3.61	2.52	3.19
二期出水TN	5.92	4.03	3.99	3.55	3.73	1.29	4.73	3.77	3.86	3.94	3.24	2.04	2.61

4 技术经济指标

二期工程估算的工程费用为11 913.38万元,其中一期挖潜工程的工程费用为228万元,二期扩建工程的工程费用为9 020.14万元,新技术示范工程的工程费用为2 665.24万元。

净化厂在项目运营期内估算的年均处理总成本为3 381.62万元,单位水处理总成本为1.03元/ m^3 。

5 结论

凤凰桥水质净化厂运行水质可稳定达到考核指标,其优先挖潜现况设施,在此基础上新建处理单元的建设模式,可为其他改扩建项目提供参考。

该污水处理厂按冬季最不利工况设计,在雨季可利用冗余处理能力提高处理水量,改善水环境。服务流域内有合流制溢流污染控制或分流制处理初期雨水需求的污水处理厂可参考该理念。

硫自养反硝化脱氮无需投加药剂,且运行电耗低,符合低碳发展理念。该工程的设计和运行参数可为其他深度脱氮项目提供借鉴。

参考文献:

- [1] 刘宝峰,郭宇平.硫自养反硝化技术用于市政污水深度处理[J].中国给水排水,2022,38(22):91-95.

LIU Baofeng, GUO Yuping. Application of sulfur autotrophic denitrification technology in advanced treatment of municipal sewage [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(22): 91-95 (in Chinese).

- [2] 宋庆原,林峰,余国富,等.硫自养反硝化滤池对二级出水脱氮效果研究[J].给水排水,2023,49(3):21-25,32.

SONG Qingyuan, LIN Feng, YU Guofu, et al. Pilot study on deep denitrification effect of sulfur autotrophic denitrification filter on secondary effluent [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(3): 21-25, 32 (in Chinese).

- [3] 文湘华,申博.新兴污染物水环境保护标准及其实用型去除技术[J].环境科学学报,2018,38(3):847-857.

WEN Xianghua, SHEN Bo. Standards of water environmental protection and practical removal technologies of emerging contaminants[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 847-857 (in Chinese).

作者简介:张俊(1981-),男,江苏姜堰人,硕士,高级工程师,主要研究方向为排水系统高效能与低碳化治理。

E-mail:lei_hong3@ctg.com.cn

收稿日期:2023-11-16

修回日期:2023-11-18

(编辑:丁彩娟)