

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.008

多级增强型 AAO 工艺在高标准集约化厂站的应用

申 杰

(北京通州投资发展有限公司, 北京 101118)

摘 要: 北京市某污水处理厂近期工程设计规模为 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 正式投运前, 该厂服务范围内的污水排至相邻区域已运行的再生水厂, 主要污染物指标符合城市污水水质特征。通过对现状再生水厂实际进水水质的数理分析, 采用“90% 涵盖值”确定了污水处理厂的设计进水水质。该厂为全地下式布设, 污水处理主体工艺采用“多级增强型 AAO+深床滤池”, 污泥处理采用“浓缩脱水+板框”工艺, 出泥含水率低于 60%; 设计出水水质执行北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012) 中 B 标准, 可以为类似污水处理厂的工艺设计提供参考。

关键词: 多级增强型 AAO 工艺; 地下式污水处理厂; 高排放标准; 集约化设计

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0053-05

Application of Multi-stage Enhanced AAO Process in a High-standard Intensive Wastewater Treatment Plant

SHEN Jie

(Beijing Tongzhou Investment Development Co. Ltd., Beijing 101118, China)

Abstract: The recent engineering design for a wastewater treatment plant in Beijing has a capacity scale of $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. Before formal operation, the wastewater within the plant's service area was discharged into an existing reclaimed water plant in the adjacent region, with primary pollutant indicators conforming to the characteristics of urban wastewater quality. Through the mathematical analysis of the actual influent quality of the existing reclaimed water plant, the design influent quality was determined by adopting the “90% coverage value”. The wastewater treatment plant adopted a fully underground layout. The primary wastewater treatment process utilized the “multi-stage enhanced AAO + deep bed filter” system, while the sludge treatment employed the “thickening and dewatering + plate and frame” process. The moisture content of the treated sludge was reduced to less than 60%. The design effluent quality shall conform to the B limit specified in a local standard of Beijing *Discharge Standard of Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (DB 11/890-2012), thereby serving as a reference for the process design of similar wastewater treatment plants.

Key words: multi-stage enhanced AAO process; underground wastewater treatment plant; high discharge standard; intensive design

在我国城市化水平和居民环境要求不断提高的背景下, 能够与周边环境协调、封闭性强的地下式污水处理厂成为城市污水治理工程建设的新选择, 但其投资较高, 如何结合当地经济情况选择适

宜的处理工艺, 减少用地, 降低建设及运营成本, 已成为地下式污水处理厂建设过程中的重要课题。北京市某地下式污水处理厂近期规模 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 远期规模 $14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 以其工艺设计为例, 介绍多

级增强型 AAO 处理工艺在地下式污水处理厂中的应用,可供其他类似工程参考。

1 设计进、出水水质

该新建污水处理厂正式投运前,其服务范围内的污水排至相邻区域的现状再生水厂,因此,现状再生水厂实际进水水质可用于确定该污水处理厂的设计进水水质参数。对现状再生水厂 2015 年—2021 年的日平均进水水质数据进行分析,结果如表 1 所示。

表 1 日平均进水水质统计

Tab.1 Statistics of daily average influent quality
mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
最大值	549.01	240	166	78.52	87.18	14.17
最小值	82.80	50	39	11.17	12.21	1.00
平均值	266.55	128.68	98.19	42.35	47.00	5.70
90%涵盖值	365.31	170	131	53.49	58.48	7.10

由表 1 统计的实际水质数据可知:

① 进水 BOD₅、COD、TN、TP 指标的日平均值基本符合城市污水水质情况,其 90% 涵盖值是平均值的 1.2 ~ 1.4 倍。

② 按 90% 涵盖值进行统计分析, COD:N:P=52:8:1, 有利于生物脱氮除磷; BOD₅:COD=0.47, 可生化性良好。根据污水处理厂服务区域规划, 近期综合生活人均用水量指标为 210 L/(人·d), 按《室外排水设计标准》(GB 50014—2021) 选取 BOD₅ 和 SS 污染定额均为 45 g/(人·d), 计算得出二者的污染物排放浓度均为 215 mg/L。综合分析以上数据, 并结合现状再生水厂设计进水水质指标, 确定该污水处理厂设计进水 BOD₅ 和 SS 均为 200 mg/L。

③ 该工程出水排至地表Ⅳ类水体, 出水执行北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012) 中 B 标准。最终确定设计进、出水水质及污染物去除率如表 2 所示。

表 2 设计进、出水水质及污染物去除率

Tab.2 Design influent and effluent quality and pollutant removal rates

项目	BOD ₅	COD	SS	TN	TP	NH ₃ -N
设计进水水质/(mg·L ⁻¹)	200	400	200	65	7.0	55
设计出水水质/(mg·L ⁻¹)	6	30	5	15	0.3	1.5(2.5)
污染物去除率/%	97.0	92.5	97.5	76.9	95.7	97.3(95.5)

2 工艺流程

2.1 多级增强型 AAO 工艺特点

多级增强型 AAO 工艺基于污水生物处理技术原理, 向生化池中投加载体, 使系统同时具有活性污泥法和 MBBR 工艺特点。在预缺氧池、厌氧池和缺氧池布置多个进水点^[1], 根据进水浓度调节各点进水量, 充分利用污水碳源^[2], 减少外部碳源投加量, 保证释磷反应和反硝化反应的进行, 有效提高除磷脱氮效率^[3], 降低运行成本^[4]。

在一级好氧/缺氧段后增设二级好氧/缺氧段, 回流污泥全部进入生物池前端的预缺氧池, 形成由高到低的污泥浓度梯度。在第一好氧池投加载体, 构建悬浮生长和附着生长的微生物系统, 生物池内平均污泥浓度高, 污泥负荷低, 聚磷菌、硝化细菌和反硝化细菌均具有生长优势, 强化了除磷脱氮效果, 提高了出水水质。同时缺氧、好氧交替进行, 有利于各类微生物保持高生物活性, 剩余污泥量相对较少。在污泥低负荷运行的同时, 辅以多点进水, 提高了系统抗冲击负荷能力^[5]。高容积负荷有利于缩小池容, 从而降低建设成本。多级增强型 AAO 工艺流程如图 1 所示。

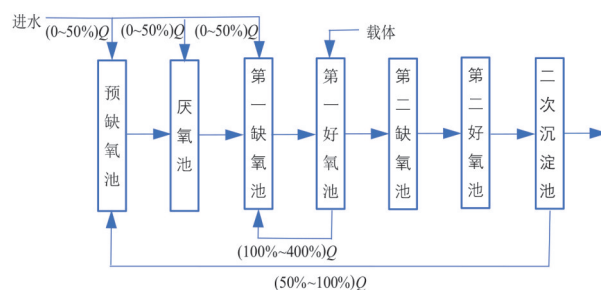


图 1 多级增强型 AAO 工艺流程

Fig.1 Flow chart of multi-stage enhanced AAO process

2.2 污水处理工艺流程

根据实际进水水质, 污水处理主工艺选择多级增强型 AAO 工艺, 在多级生物池内选择性培养优势菌种, 以确保生化处理工段可以高效去除 TN。假定生物池各段进水流量分配比例相同, 忽略剩余污泥排放去除的氮量, 从物料平衡角度考虑, 氮去除率的计算见下式:

$$\eta = 1 - 1/[n \times (1 + r + R)] \quad (1)$$

式中: η 为氮去除率, %; r 为污泥回流比, %; R 为混合液回流比, %; n 为生物池进水分段数。

采用二级增强型 AAO 工艺, 假设混合液回流比

为300%,污泥回流比为100%,则该方案的脱氮效率为90%,满足设计TN去除率76.9%的要求,同时可以高效去除 BOD_5 、COD、TP等污染物。此外,根据生物池出水水质选择性投加化学除磷药剂及碳源,从而确保TN、TP达标排放。

生化处理出水经平流沉淀池、高效沉淀池处理后,进入深度处理工段。在深度处理工段,硝化及碳化反应已基本完成,因此去除重点是SS和TP。深度处理工段采用深床滤池,通过反硝化作用进一步去除TN,通过微絮凝作用去除SS及TP。污水最终经消毒处理后,排放水体或进行回用。该污水处理厂的工艺流程如图2所示。

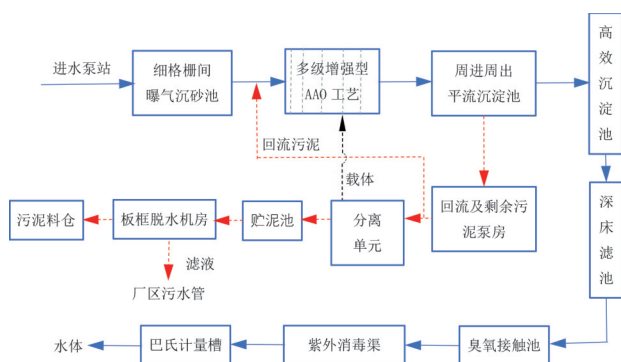


图2 污水处理厂工艺流程

Fig.2 Flow chart of WWTP process

3 主要处理构筑物设计

3.1 细格栅及曝气沉砂池

设置格栅渠道3条,每条渠道宽1.3 m,共安装3台孔径为3 mm的网板细格栅;栅渣经无轴螺旋输送机输送至栅渣车内;配备4台(3用1备)网板式细格栅中压冲洗水泵,单台 $Q=7\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=800\text{ kPa}$ 。

设置2格曝气沉砂池,每格尺寸为 $30.40\text{ m}\times 4.50\text{ m}\times 5.05\text{ m}$,雨季停留时间8.4 min,旱季停留时间10.92 min;配备链条式刮砂机2套;提砂泵3台(2用1备),单台 $Q=50\text{ L/s}$ 、 $H=100\text{ kPa}$;砂水分离器2台(1用1备),单台处理量 $150\text{ m}^3/\text{h}$;曝气风机3台,单台 $Q=20\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=400\text{ kPa}$ 。

3.2 多级增强型AAO生物池

作为生化处理的主要构筑物,多级增强型AAO生物池是该污水处理厂的核心部分。近期设计规模 $7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,生物池共2座,每座尺寸为 $100.08\text{ m}\times 44.00\text{ m}\times 7.05\text{ m}$,主要由预缺氧池、厌氧池、第一缺氧池、第一好氧池、第二缺氧池、第二好氧池组成(见图3)。生物池采用3点进水方式,污水既能从生

物池首端预缺氧池进入,又能通过进水管从厌氧池及第一缺氧池进入。在计算工况下3点进水比为1:2:2,设计时进水口尺寸均按照 $0.5Q$ 设置,3处进口均设有闸门,实际运行中可根据处理效果调整每处进水流量。内回流起点为第一好氧池末端,出水点设在第一缺氧池的首端,内回流比为100%~400%。每座生物池设内回流泵2台,单台 $Q=870\text{ L/s}$ 、 $H=8\text{ kPa}$ 、 $N=13\text{ kW}$,介质为增强型AAO生物池混合液,MLSS为 $4\,500\sim 8\,000\text{ mg/L}$ 。污泥回流起点为二沉池污泥回流渠道,出水点设在生物池预缺氧池首端,污泥回流比为50%~100%。每座生物池设污泥回流泵3台(2用1备),单台 $Q=300\text{ L/s}$ 、 $H=45.6\text{ kPa}$ 、 $N=20\text{ kW}$,介质为回流污泥。预缺氧池、厌氧池、第一缺氧池、第一好氧池、第二缺氧池、第二好氧池的水力停留时间分别为0.5、1.0、3.6、6.28、1.54、0.56 h,多级增强型AAO生物池污泥负荷为 $0.121\text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ 。

每组生物池的预缺氧池、厌氧池分别设叶轮直径580 mm、 $N=5.5\text{ kW}$ 的水下搅拌器1套、3套;第一缺氧池设叶轮直径2500 mm、 $N=5.7\text{ kW}$ 的潜水推流器4套;第一好氧池末端设叶轮直径580 mm、 $N=5.5\text{ kW}$ 的水下搅拌器2套;第二缺氧池设叶轮直径1800 mm、 $N=4.3\text{ kW}$ 的潜水推流器4套。第一好氧池及第二好氧池配置板条式曝气器252套,曝气器最佳通量为 $10\sim 15\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

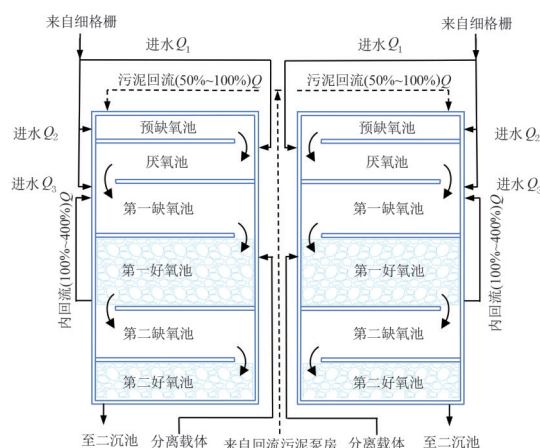


图3 多级增强型AAO生物池平面布置

Fig.3 Layout plan of multi-stage enhanced AAO biological tank

3.3 沉淀池

采用平流式二沉池10座,单座尺寸 $51.80\text{ m}\times 8.80\text{ m}\times 4.15\text{ m}$,平均流量表面负荷 $0.64\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,

平均流量沉淀时间 6.47 h。每座设置 1 套非金属链条刮泥机,尺寸为 52.00 m×5.65 m×4.15 m。

3.4 深床滤池

深床滤池共 8 格,每格可独立运行。单格尺寸为 22.80 m×3.50 m×4.65 m,正常工况下每次反冲洗 1 格。深床滤池与反冲洗风机房、反冲洗泵房合建,设反冲洗风机和反冲洗水泵各 3 台,2 用 1 备。反冲洗风机 $Q=60\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=80\text{ kPa}$ 、 $N=110\text{ kW}$;反冲洗水泵 $Q=600\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=100\text{ kPa}$ 、 $N=30\text{ kW}$ 。

3.5 臭氧接触池及紫外消毒渠

为降低沉淀池出水色度,采用臭氧脱色处理工艺。设置臭氧接触池 2 格,单格尺寸为 20.8 m×2.4 m×7.9 m。臭氧最大投加量 5 mg/L,臭氧投加浓度 10%,总停留时间 11 min。臭氧接触池出水进入紫外消毒渠,紫外消毒渠设置 1 格,尺寸为 16.1 m×3.6 m×7.5 m,采用 1 套低压高强度紫外灯管对大肠杆菌等微生物进行灭活,消毒剂量(有效剂量)≥30 mJ/cm²,UV 可变频输出范围 50%~100%。

3.6 鼓风机房

在生物池上设置鼓风机房,尺寸为 3.6 m×4.4 m×5.0 m,鼓风机房内设置鼓风机 5 台(4 用 1 备),单台 $Q=100\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=98\text{ kPa}$,向生物池供氧以保证生化反应顺利完成,达到最终出水水质要求。

3.7 碳源、PAC 加药间

碳源、PAC 加药间设于生物池上,尺寸为 14.4 m×8.8 m×5.0 m。为确保出水总氮达标,在生物池补充醋酸钠作为碳源,设置变频加药泵 3 台(2 用 1 备),单台 $Q=140\text{ L/h}$ 、 $H=300\text{ kPa}$ 、 $N=0.37\text{ kW}$ 。在水中添加 PAC 以增强 TP 去除效果,设置变频加药泵 3 台(2 用 1 备),单台 $Q=110\text{ L/h}$ 、 $H=300\text{ kPa}$ 、 $N=0.37\text{ kW}$ 。

3.8 臭气处理工艺

对粗格栅间及进水泵井、细格栅、曝气沉砂池、多级增强型 AAO 生物池、沉淀池、污泥脱水机房进行集中除臭。在多级增强型 AAO 生物池上设置 2 套生物滤池除臭系统,主要设备包括洗涤设备、生物滤床、风机。每套系统配备除臭风机 2 台,单台除臭设备基础尺寸为 21.6 m×13.4 m,单台风机基础尺寸为 3.3 m×2.7 m,单台风机 $Q=76\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $N=200\text{ kW}$ 。除臭后的气体经集气罩收集后,统一送至室外除臭塔,除臭塔高 15 m,占地面积 16 m²。

3.9 污泥处理

该污水处理厂产生含水率 99.2% 的剩余污泥约 1 750 m³/d,一期污泥量较少,规模效应不理想,因此一期污泥处理采取“浓缩脱水+板框”工艺,出泥含水率低于 60%;在建设远期工程时,污泥处理再考虑采用“厌氧消化+板框脱水”工艺。

脱水机房尺寸为 44 m×36 m×12 m,近期设污泥离心浓缩机 3 台,单台处理能力不小于 88 m³/h,出泥含水率 80%, $N=130\text{ kW}$;设 2 台板框压滤机,单台处理能力 3.2 tDS/批次,进泥含水率 96%~98%,出泥含水率低于 60%。压滤机每台每日工作 4 个周期,每个周期 4 h,每台压滤机配 1 套冲洗系统。

4 运行效果

该污水处理厂正式运行后,出水水质稳定,优于目标要求。实际进、出水水质如表 3 所示。

表 3 实际进、出水水质

Tab.3 Actual influent and effluent quality

项目	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水/(mg·L ⁻¹)	331.58	124.14	48.44	53.31	6.59
出水/(mg·L ⁻¹)	18.06	3.01	0.22	7.13	0.23
去除率/%	94.55	97.58	99.54	86.63	96.54

5 相关指标分析

该污水处理厂建设用地面积为 47 847 m²,工程费为 6.72 亿元。项目建成处理水量达到设计规模后,外购燃料动力费(含水电费、煤费及汽油费等)为 784 万元/a,外购药剂费为 1 436 万元/a,维修费为 885 万元/a,职工薪酬 432 万元/a。通过以上数据可知:

① 国内已建和在建的 113 座地下式污水处理厂的统计统计数据中 IV 类规模[(5~10)×10⁴ m³/d]污水处理厂用地指标的平均值为 0.57 m²/(m³·d⁻¹),最大值为 1.33 m²/(m³·d⁻¹)^[6],由于具体工艺、规模不同,用地指标变化较大。该工程建设用地指标为 0.683 5 m²/(m³·d⁻¹),在相应规模的地下式污水处理厂建议用地控制指标[0.6~0.8 m²/(m³·d⁻¹)]的下限附近^[6],实现了节约用地的设计目标。

② 以多级增强型 AAO+深床滤池为主的工艺方案的工程经济指标为 9 600 元/m³,与成都金牛区某地下式污水处理厂(8×10⁴ m³/d,出水标准接近)采用的改良 AAO+反硝化深床滤池工艺的经济指标(13 120 元/m³)^[7]相比,节省 26.83%,实现了节约投

资的设计目标。

③ 污水处理经营成本(含燃料动力、药剂、维修、人工等费用)为 1.384 3 元/m³,北京某采用多级 AO+MBR 工艺的污水处理厂同指标值为 1.54 元/m³,与之相比节省 10% 左右^[8]。

6 结语

① 该工程经济指标为 9 600 元/m³,建设用地指标为 0.683 5 m²/(m³·d⁻¹),与同类型污水处理厂相比,节省建设用地和工程投资,可以为建设高标准、集约化厂站提供指导。

② 多级增强型 AAO 工艺具有较高的去除有机物和脱氮除磷能力,辅以适当的三级处理工艺,可以使出水水质稳定达到北京市《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中 B 标准。

③ 多级增强型 AAO 工艺进水、混合液回流以及污泥外回流量可以根据水质变化情况进行相应调整,最大限度利用碳源,节省药剂投加成本和运行费用。

参考文献:

- [1] 沈超,任玉辉. 多点进水 AAO-A+MBR 工艺在低 C/N 污水处理厂的工程应用[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 168-173.
SHEN Chao, REN Yuhui. Engineering application of multi-point influent AAO-A+MBR process in low C/N ratio WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 168-173 (in Chinese).
- [2] 陈良,莫少德,周波,等. 多段 AO/高效沉淀/反硝化滤池用于准 IV 类标准污水厂[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 75-78.
CHEN Liang, MO Shaode, ZHOU Bo, et al. Application of multi-stage AO+high efficiency sedimentation+denitrification filter process in a WWTP with quasi class IV effluent standard[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 75-78 (in Chinese).
- [3] 刘敏,房阔,王凯军,等. AAO+流态化生物载体工艺的菌群结构分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(19): 11-18.
LIU Min, FANG Kuo, WANG Kaijun, et al. Analysis on microbial community composition of AAO+FBC/

MBBR system[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(19): 11-18 (in Chinese).

- [4] 谢益佳,戴仲怡,李树苑,等. 污水处理厂微氧曝气-多段 AO 工艺优化运行实践[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 45-48.
XIE Yijia, DAI Zhongyi, LI Shuyuan, et al. Application of micro oxygen aeration multi stage AO process in optimal operation mode of wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 45-48 (in Chinese).
- [5] 叶宁. 多点进水多级 AO 工艺在寒冷地区大型污水处理厂的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 161-168.
YE Ning. Application of step-feed multi-stage AO process in large WWTPs in cold region [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 161-168 (in Chinese).
- [6] 陈秀成. 地下式污水处理厂用地指标分析及节地设计方向[J]. 中国给水排水, 2023, 39(4): 53-58.
CHEN Xiucheng. Analysis of land quota and land conservation design direction of underground wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(4): 53-58 (in Chinese).
- [7] 沈丹,王艳华,陈志真,等. 地下污水处理厂造价指标分析[J]. 价值工程, 2023, 42(19): 68-70.
SHEN Dan, WANG Yanhua, CHEN Zhizhen, et al. Cost index analysis of underground sewage treatment plant[J]. Value Engineering, 2023, 42(19): 68-70 (in Chinese).
- [8] 高术波. 多级 AO+MBR 工艺在污水厂提标改造中的应用——以北京某污水厂为例[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 28-31.
GAO Shubo. Application of multilevel AO+MBR process in upgrading and reconstruction project—case study of a WWTP in Beijing [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 28-31 (in Chinese).

作者简介:申杰(1985—),男,内蒙古巴彦淖尔人,本科,注册给排水工程师,主要从事给水排水工程设计工作。

E-mail:394185348@qq.com

收稿日期:2023-11-22

修回日期:2024-12-12

(编辑:沈靖怡)