



DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.02.009

多级AO用于高排放标准下低碳高氮生活污水处理

刘增军¹, 张开海¹, 孙序营², 邱林勇³

(1. 山东省城建设计院, 山东 济南 250021; 2. 山东省调水工程运行维护中心 棘洪滩水库管理站, 山东 青岛 266111; 3. 诸城市市政公用事业服务中心, 山东 潍坊 262200)

摘要: 山东省北部沿海地级市经济技术开发区生活污水处理厂设计规模为5 000 m³/d, 进水水质特点为TN高、BOD₅低, 出水COD、氨氮、TP需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV类标准, 要求出水TN≤12 mg/L。本工程采用多级AO+磁混凝+反硝化深床滤池+臭氧催化氧化处理工艺, 总投资为5 055万元。自2021年8月正式运行后, 污水厂处理效果良好, 日均运行成本约4.2元/m³, 出水水质稳定达标。

关键词: 多级AO; 高排放标准; 低碳高氮; 生活污水; 准IV类标准

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)02-0055-05

Application of Multi-stage AO in the Treatment of Low Carbon and High Nitrogen Domestic Sewage with High Discharge Standard

LIU Zeng-jun¹, ZHANG Kai-hai¹, SUN Xu-ying², QIU Lin-yong³

(1. Shandong Urban Construction Design Institute, Jinan 250021, China; 2. Jihongtan Reservoir Management Station, Shandong Water Diversion Project Operation and Maintenance Center, Qingdao 266111, China; 3. Zhucheng Municipal Public Utilities Service Center, Weifang 262200, China)

Abstract: The design scale of a domestic sewage treatment plant in the economic development zone of a coastal prefecture-level city in northern Shandong Province is 5 000 m³/d. The influent quality of the sewage treatment plant is characterized by high TN and low BOD₅. The COD, ammonia nitrogen and TP in effluent is required to meet the class IV limits specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), and the effluent TN should be less than 12 mg/L. The treatment process of the project consists of multi-stage AO, magnetic coagulation, denitrification deep bed filter and ozone catalytic oxidation, and the total investment is 50.55 million yuan. Since the official operation in August 2021, the sewage treatment plant has showed good operational performance. The average daily operating cost is approximately 4.2 yuan/m³, and the effluent quality stably meets the discharge standard.

Key words: multi-stage AO; high discharge standard; low carbon and high nitrogen; domestic sewage; quasi class IV discharge standard

1 工程概况

山东省北部某沿海地级市经济技术开发区现状生活污水主要通过泵站输送至开发区工业污水

处理厂, 该地区近年来进行了污水管网改造, 生活污水收集量逐年增加, 原工业污水处理厂的处理规模无法满足要求, 因此开发区决定专门建设1座生

活污水处理厂。该污水厂设计规模远期为 1×10^4 m^3/d , 近期为 0.5×10^4 m^3/d , 变化系数 $K_z=1.58$, 占地约 2.29 hm^2 , 总投资约 5 055 万元。污水厂效果图见图 1。



图 1 污水厂效果图

Fig.1 Effect drawing of sewage treatment plant

2 进、出水水质及工艺选择

本工程主要收集开发区生活污水, 为准确预测进水水质, 选取该片区内几个典型小区与生活污水泵站的水样进行测定, 通过取样分析以及《污水排入城镇下水道标准》(GB/T 31962—2015) 综合确定本次设计进水水质, 同时根据当地环保要求, 出水主要指标 COD、TP、氨氮需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准, $TN \leq 12 \text{ mg/L}$, 其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准。本次工程设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₃ -N/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH
进水	300	120	200	105	110	9	6.0 ~ 9.0
出水	≤ 30	≤ 10	≤ 10	≤ 1.5	≤ 12	≤ 0.3	6.0 ~ 9.0

由表 1 可知, 本地区水质的典型特征是低碳高氮, TN 较高, BOD₅ 相对较低。经分析可能是由于该地区沿海, 饮食中海鲜类食物较多, 生活污水中 TN 及氨氮较高; 同时地处工业园区, 可能会有部分工业废水混入, 导致 TN 较高; 另外本片区雨污分流改造尚未全部完成, 管网中地下水入渗及雨水混入导致进水 BOD₅ 较低。由于 COD、TP 的出水标准较为严格, 故 COD 和 TP 也是本次设计的重点和难点。

结合上述水质分析, 本次工艺选择如下:

① 对 COD 和 BOD₅ 的去除。本工程进水 B/C=0.4, 可生化性较好。常规市政污水采用各类改良 A²O 工艺配合深度处理, 出水 COD 能达到 30~40 mg/L 左右。由于污水厂尾水的受纳水体属于当地的重点监控河流, 需增设高级氧化处理工艺进一步去除 COD^[1], 保障最终出水 COD 及 BOD₅ 稳定达标。

② 对 TN 的去除。本工程设计进水 TN 为 110 mg/L, 出水 $TN \leq 12 \text{ mg/L}$, 去除率要求大于 89%。进水 C/N=1.09, 碳源明显不足。生化处理主工艺段需选择脱氮能力强、节省碳源的处理工艺, 而根据 Bardenpho 工艺原理, 多级 AO 的理论 TN 去除率可达 90%~95%^[2]。研究表明, 北京等地污水处理厂采用多级 AO 工艺, TN 去除率为 85%~88%^[1]; 西安某污水厂单独应用多级 AO, TN 去除率约为 80%^[3]。因此, 本次生化主处理工艺选择多级 AO, 同时考虑进水 TN 波动, 深度处理采用反硝化深床滤池作为 TN 达标的保障措施。

③ 对氨氮的去除。本工程氨氮去除率要求大于 98.6%, 在保证曝气量和好氧停留时间的情况下可以稳定达标。考虑冬季时生化池出水氨氮波动, 在二沉池后增设接触氧化池进一步保障氨氮达标。

④ 由于生化池去除 TP 有限, 后续深度处理采用除磷效果较好的磁混凝沉淀池。

⑤ 因为 BOD₅ 浓度低导致进水碳氮比较低, 难以进行反硝化去除总氮^[4], 需额外投加碳源, 本次选择 25% 的乙酸钠溶液作为外加碳源。

⑥ 因进水水量及水质有一定波动, 污水厂工艺流程中需设置多段超越管线, 根据进水水质及实际运行情况进行灵活调整, 从而降低污水厂的运行成本^[5]。

3 工艺设计

3.1 工艺流程

污水处理工艺流程见图 2。

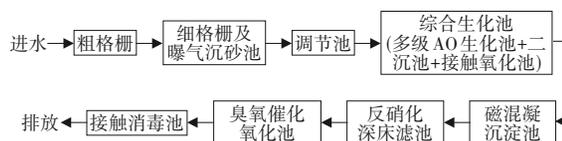


图 2 污水厂工艺流程

Fig.2 Flow chart of sewage treatment plant

3.2 主要构筑物及设备设计参数

3.2.1 预处理构筑物(规模为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

① 粗格栅:去除污水中的较大漂杂物以保证后续处理构筑物的正常运行。池数1座,设计流量 $Q_{\max}=658.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。主要设备为渠宽700 mm、栅缝25 mm的回转式粗格栅2台,互为备用。

② 提升泵站:提升污水以满足后续污水处理流程竖向衔接的要求,实现重力流动顺序处理污水。池数1座,设计流量 $Q_{\max}=658.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。近期设置3台水泵,2用1备, $Q=220 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=18.5 \text{ kW}$,远期增加2台。

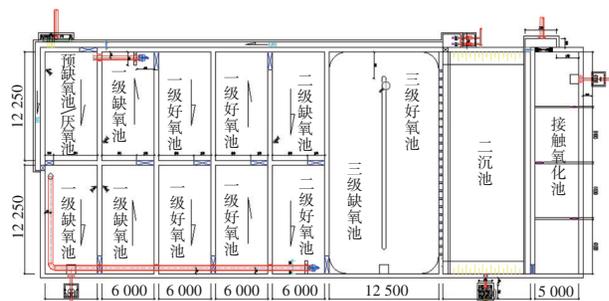
③ 细格栅及曝气沉砂池:进一步去除污水中细小悬浮物,降低生物处理负荷,以保证后续处理流程的正常进行。池数1座,设计流量 $Q_{\max}=658.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。旋转细格栅渠宽1000 mm、栅缝5 mm,共两条;曝气沉砂池1座,分两格,停留时间4.5 min,配备桁车式吸泥机1台(单格宽2 m)。

3.2.2 调节构筑物(规模为 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

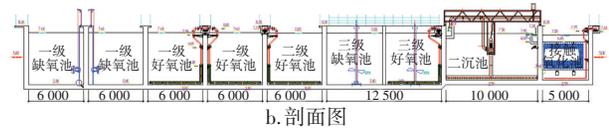
因污水厂服务区域雨污分流改造未全部完成,管网中可能混入部分工业废水,影响运行,且污水厂排放水体标准较高,故增加调节事故水池,提高安全系数。池数为近期、远期各1座,总尺寸为 $38 \text{ m} \times 22 \text{ m} \times 6.9 \text{ m}$ 。其中事故水池(与调节池合建)分两格,停留时间16 h,设置排水泵2台, $Q=70 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=5.5 \text{ kW}$ 。调节池的停留时间为8 h,设置排水泵3台, $Q=70 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=5.5 \text{ kW}$ 。

3.2.3 二级生化处理构筑物(规模为 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

① 综合生化池:集厌氧、多级AO+二沉池+后置生物接触氧化池于一体,利用生化池内各类微生物降解污水中的有机物、氮和磷。池数为近期、远期各1座。单座设计流量 $Q_{\text{ave}}=210 \text{ m}^3/\text{h}$,总尺寸为 $66 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 6.3 \text{ m}$ 。综合生化池示意图见图3,工艺参数见表2。



a. 平面图



b. 剖面图

图3 综合生化池示意

Fig.3 Schematic diagram of comprehensive biochemical tank

生化池内回流设计如下:为提高释磷效率,设从一级缺氧池至预缺氧池/厌氧池的回流,采用PP泵(1台),回流比为100%;为提高脱氮效果,设从一级好氧池至一级缺氧池的回流,采用PP泵(1台),回流比为400%。

表2 生化池工艺参数

Tab.2 Biochemical tank process parameters

项目	主要工艺参数	主要设备及数量
预缺氧池/ 厌氧池	HRT=2 h, MLSS=5 000 mg/L	搅拌器 $N=2.2 \text{ kW}$, 1台
一级缺氧池	HRT=6 h, MLSS=5 000 mg/L	搅拌器 $N=2.2 \text{ kW}$, 3台
一级好氧池	HRT=9.9 h, MLSS=5 000 mg/L	管式曝气器,128套
二级缺氧池	HRT=2 h, MLSS=5 000 mg/L	搅拌器 $N=2.2 \text{ kW}$, 1台
二级好氧池	HRT=2 h, MLSS=5 000 mg/L	管式曝气器,32套
三级缺氧池	HRT=4.1 h, MLSS=5 000 mg/L	推流器 $N=4.0 \text{ kW}$, 1台
三级好氧池	HRT=4.1 h, MLSS=5 000 mg/L	推流器 $N=4.0 \text{ kW}$,1台; 管式曝气器,64套

注: 三级缺氧池和三级好氧池采用循环池型,好氧池可通过曝气器的开关数量调节好氧池、缺氧池的曝气时间。

二沉池设计如下:尺寸为 $10 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 5.8 \text{ m}$, $\text{HRT}=5.6 \text{ h}$,表面负荷为 $0.875 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,配备刮吸泥机1台,污泥泵1台, $Q=105 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=3.0 \text{ kW}$ 。

接触氧化池设计如下: $\text{HRT}=2.8 \text{ h}$,配备组合生化填料 $V=366 \text{ m}^3$,穿孔曝气管1套。其进水渠前设置超越渠道,当前段氨氮出水达标时可进行超越。

② 乙酸钠投加系统:平均进水量约为 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$,平均进水COD为 300 mg/L 、 BOD_5 为 120 mg/L 。进水TN为 110 mg/L ,未加碳源时平均去除 40 mg/L ,出水按照 11 mg/L 计算,则外加碳源去除TN约为 59 mg/L ,要实现完全反硝化,需满足 $\text{BOD}_5/\text{TN} \geq 3$,而 1 mg 乙酸钠产生 0.52 mg BOD_5 ,因此乙酸钠投加量

约为340 mg/L。反硝化滤池设计投加量为30 mg/L,多级AO池根据理论计算及污水厂运行实践,确定三级缺氧池的碳源投配比为2:1:1。因此,需纯乙酸钠约1.70 t/d,需25%的乙酸钠溶液6.81 t/d。

③ 鼓风机房:因污水厂水量及水质存在波动,磁悬浮鼓风机采用大小机型搭配设计。鼓风机1数量1台, $Q=30\text{ m}^3/\text{min}$, $P=65\text{ kPa}$, $N=50\text{ kW}$;鼓风机2数量2台,1用1备, $Q=58\text{ m}^3/\text{min}$, $P=65\text{ kPa}$, $N=75\text{ kW}$ 。根据生化池中溶解氧浓度调节鼓风机的运行台数和送风量。当进水流量低或TN浓度较低时,启动鼓风机1,变频控制;当进水流量高或TN浓度较高时,启动鼓风机2,变频控制。

3.2.4 深度处理构筑物(规模为 $0.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)

① 磁混凝沉淀池:利用可循环的磁种,增强絮凝反应,沉淀去除水中悬浮物和总磷。土建按照 $1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 建设,设备按照近期 $0.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 实施。总尺寸为 $16.4\text{ m}\times 8.1\text{ m}\times 6.30\text{ m}$,1座2格,由T1池、T2池、T3池、高效澄清池组成。表面负荷 $q_{\text{ave}}=8.33\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。配套搅拌机、刮吸泥机、高剪机、磁分离器等设备。

② 反硝化深床滤池:通过滤池的反硝化及过滤作用,进一步去除SS和TN。设计流量 $Q_{\text{ave}}=208.3\text{ m}^3/\text{h}$,总尺寸为 $15.9\text{ m}\times 14.9\text{ m}\times 6.70\text{ m}$,1座3格,单格尺寸为 $5.8\text{ m}\times 2.9\text{ m}\times 6.70\text{ m}$ 。滤池清水池、废水池与远期滤池合用。有效滤料总体积 92 m^3 ,单格过

滤面积 16.82 m^2 ,总过滤面积 50.46 m^2 ,设计滤速 4.13 m/h ,强制滤速 6.20 m/h ,硝态氮去除负荷为 $0.81\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

③ 臭氧催化氧化池+循环泵房:本工艺段内臭氧与污水充分混合,利用池内催化剂作用在混合污水中产生羟基自由基,进一步去除水中难降解有机物,设计最高去除COD为 10 mg/L 。总尺寸为 $16.8\text{ m}\times 4.35\text{ m}\times 7.4\text{ m}$,停留时间 2.0 h ,臭氧池内配备均相催化反应器1台,循环泵房配备 $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $N=7.5\text{ kW}$ 、 $H=240\text{ kPa}$ 的卧式离心泵3台(2用1备)。臭氧设计投加量为 $14\sim 28\text{ mg/L}$ 。

④ 臭氧发生间:总平面尺寸为 $19.8\text{ m}\times 7\text{ m}$,房高 5.50 m 。采用臭氧发生器2台(1用1备),臭氧产生量为 3 kg/h , $N=25.5\text{ kW}$ 。

⑤ 接触消毒池+巴氏计量槽:存储中水及消毒,并进行出水计量。设计规模为 $1.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,消毒剂采用次氯酸钠。总尺寸为 $18.0\text{ m}\times 6.5\text{ m}\times 4.4\text{ m}$,停留时间 0.7 h 。

4 运行效果及技术经济分析

4.1 运行效果及分析

该工程于2019年7月1日开工,2021年6月18日完成竣工验收,2021年8月开始系统的试运行和调试,采用24 h连续运行。2021年—2022年,本工程平均进水量为 $4\ 200\text{ m}^3/\text{d}$ 。2021年8月—2022年7月平均进、出水水质监测数据见表3。

表3 月平均进、出水水质

Tab.3 Monthly average influent and effluent quality

项目	水量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\text{COD}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
2021年8月	3 026	67.99	0.64	78.43	10.49	176.08	28.18	7.95	0.26
2021年9月	3 888	42.88	0.56	49.51	5.43	112.29	26.15	5.11	0.07
2021年10月	4 144	55.87	0.48	60.59	6.43	173.31	27.77	6.52	0.25
2021年11月	4 201	66.45	0.48	73.74	11.32	205.77	27.88	8.04	0.10
2021年12月	3 730	58.77	0.56	66.55	9.12	191.47	27.67	6.91	0.10
2022年1月	4 817	64.13	1.35	72.19	5.64	236.78	28.83	7.14	0.12
2022年2月	5 738	64.99	0.77	81.03	4.53	261.30	27.84	8.51	0.10
2022年3月	5 686	54.53	0.66	73.62	5.42	223.55	27.08	7.74	0.16
2022年4月	4 753	89.18	0.68	102.31	5.55	274.40	28.47	15.81	0.27
2022年5月	3 011	112.50	0.58	137.17	6.82	324.52	28.40	12.12	0.28
2022年6月	3 703	71.81	0.54	84.34	5.66	197.80	29.30	7.72	0.12
2022年7月	4 006	46.00	0.31	52.12	5.78	106.24	25.16	4.16	0.11
最大值	5 738	112.50	1.35	137.17	11.32	324.52	29.30	15.81	0.28
最小值	3 011	42.88	0.31	49.51	4.53	106.24	25.16	4.16	0.07
平均值	4 225	66.26	0.63	77.63	6.85	206.96	27.73	8.14	0.16

① 由表3可知,污水厂现状出水水质良好,COD、NH₃-N、TP已经稳定达到地表水Ⅳ类标准,TN稳定在12 mg/L以下。目前污水厂已经通过相关部门验收,获得了良好的社会效益和环境效益。

② 进水水质的最大特点是低碳高氮,进水TN高达110 mg/L,而BOD₅较低。选择脱氮效率较高的多级AO工艺,能保证在生化段最大程度进行反硝化脱氮。从运行反馈来看,生化池出水TN基本降至12 mg/L以下,减轻了后续深度处理脱氮负荷,降低了生产成本。

③ 深度除磷采用磁混凝沉淀池,从运行效果来看,出水水质良好。在部分时段进水TP超过设计指标的情况下,通过增加投药量等措施可以保证出水TP达标。

④ 进水虽然为生活污水,但是出水指标较严格。从近一年污水厂运行数据来看,磁混凝沉淀出水COD约30 mg/L,不能稳定达标,需通过臭氧催化氧化作用进一步降解COD,在投加设计臭氧量的情况下,可以保证出水COD稳定达标。

⑤ 鉴于污水厂水质、水量存在一定波动,因此在设计过程中,深度处理各单体均设置了超越管线,可根据运行情况灵活选择。从实际运行情况来看,这些措施对降低污水厂能耗、节约生产成本效果显著。

4.2 工程投资及运行费用

工程总投资5 055万元,单位总成本8.7元/m³,单位经营成本7.08元/m³(按照最不利设计水质计算),其中药剂费3.78元/m³,电费1.3元/m³,污泥处理费0.1元/m³,管理维修费1.9元/m³。自正式运行以来,根据进水水质、水量变化,及时调整工艺参数,合理超越某些深度处理单体,运行成本得到有效降低。根据该污水厂近一年的运行数据统计,现平均运行成本约4.2元/m³。

5 结论

① 对于低碳高氮污水的处理,应尽量选用脱氮效率高的生化处理工艺(多级AO、Bardenpho等),使TN在生化池尽可能达标,后续反硝化深度处理可作为保障措施,降低运行成本。

② 磁混凝沉淀池对TP去除效果显著,在高排放标准下,可作为污水厂TP达标排放的深度处理措施。

③ 一年的运行实践表明,本工艺技术成熟、处理效果稳定,而且操作灵活、运行可靠,对相关类型的污水处理有很好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李一龙,包宇,邱文正,等. 高排放标准下分段进水多级AO+MBR工艺的设计[J]. 中国给水排水,2022,38(4): 76-81.
LI Yilong, BAO Yu, QIU Wenzheng, et al. Design of step-feed multi-stage AO+MBR process under high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2022,38(4): 76-81(in Chinese).
- [2] 张自杰. 排水工程 下册[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2014: 304.
ZHANG Zijie. Drainage Engineering (vol. II) [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 304(in Chinese).
- [3] 贾建伟,党晓宏,李建洋,等. AMAO(多级AO)工艺在污水厂扩建工程中的应用及运行[J]. 中国给水排水,2019,35(4):63-66.
JIA Jianwei, DANG Xiaohong, LI Jianyang, et al. Application and operation of AMAO technology (multi-stage AO) for expansion project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 63-66(in Chinese).
- [4] 周丹,周雹. 反硝化最小碳氮比值的推求和应用[J]. 中国给水排水,2012,28(2):46-48.
ZHOU Dan, ZHOU Bao. Calculation and application of minimum carbon and nitrogen ratio for denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(2): 46-48 (in Chinese).
- [5] 杨祝平. 长流程四级处理工艺用于准Ⅳ类排放标准大型污水厂[J]. 中国给水排水,2022,38(24):58-63.
YANG Zhuping. Application of four-stage treatment long process in a large-scale municipal wastewater treatment plant to meet quasi class IV discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(24): 58-63 (in Chinese).

作者简介:刘增军(1989-),男,山东日照人,硕士,高级工程师,国家注册公用设备工程师(给水排水),主要从事市政给排水设计及咨询工作。

E-mail:66940630@qq.com

收稿日期:2023-02-01

修回日期:2023-03-05

(编辑:沈靖怡)