

田海成,王磊,沙涛,等. AAOA+MBR 工艺在高标准全地下污水处理厂中的设计应用[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 197-205.

TIAN H C, WANG L, SHA T, et al. Application of AAOA+MBR processes in design of high-standard underground WWTP[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 197-205.

AAOA+MBR 工艺在高标准全地下污水处理厂中的设计应用

田海成^{1,*}, 王磊¹, 沙涛², 梁瑜海³, 徐跃¹, 焦文海¹

(1. 济南市市政工程设计研究院<集团>有限责任公司, 山东济南 250001; 2. 济南市先行区首创水务发展有限公司, 山东济南 250000; 3. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642)

摘要 【目的】为了满足高标准的出水水质要求,【方法】山东某全地下污水处理厂采用了污泥浓度高、水力停留时间短、总氮去除率高的厌氧/缺氧/好氧/后置缺氧法+膜生物反应器(AAOA+MBR)工艺。文章对 AAOA+MBR 工艺的污泥回流方式及回流比、各池实际污泥浓度、各池实际流量及基质浓度等进行了模拟分析。【结果】结果表明,其好氧池、缺氧池的污泥浓度分别为厌氧/缺氧/好氧/后置缺氧/后置好氧法(AAOAO)+沉淀池工艺的 2.08 倍和 1.67 倍,其好氧池氨氮基质浓度和缺氧池硝态氮基质浓度分别为 AAOAO+沉淀池工艺的 0.54 倍和 0.73 倍。【结论】与常规 AAOAO+沉淀池相比,AAOA+MBR 工艺各池停留时间计算时需考虑各池污泥浓度的不同并考虑基质浓度降低对微生物降解速率的影响。经过近 1 年的运行,实际出水 BOD₅、COD、氨氮、TP 等指标均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类标准。针对全地下污水处理厂运营维护的难点,AAOA 反应池采用了集网络摄像、温度和湿度检测、有毒有害气体检测等功能于一体的智能巡检机器人,有效降低了生物池巡检难度并提高了智能化管理水平;MBR 膜池采用了单轨 S 型葫芦吊与电动平车接力的运输方式,克服了单轨 S 型葫芦吊存在的运行距离长以及电动葫芦故障频繁等问题,显著提高了膜箱安装与离线清洗的速度。针对污泥低含水率要求下全地下污水处理厂脱水机房的布置难题,采用了尺寸及高度较小,易于在地下箱体中布置的高压带式连续污泥深度脱水机工艺,同时通过强化防淹设计、除臭设计、消防与通风排烟的设计等实现全地下式污水处理厂的安全运行,可为其他全地下污水处理厂提供参考。

关键词 全地下式污水处理厂(WWTP) 厌氧/缺氧/好氧/后置缺氧法+膜生物反应器(AAOA+MBR) 高压带式污泥深度脱水机 智能巡检机器人

中图分类号: TU992 文献标志码: B 文章编号: 1009-0177(2025)05-0197-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.022

Application of AAOA+MBR Processes in Design of High-Standard Underground WWTP

TIAN Haicheng^{1,*}, WANG Lei¹, SHA Tao², LIANG Yuhai³, XU Yue¹, JIAO Wenhai¹

(1. Jinan Municipal Engineering Design & Research institute <Group> Co., Ltd., Jinan 250001, China;

2. Jinan Start-Up Area Capital Water Development Co., Ltd., Jinan 250000, China;

3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract [Objective] To meet high standard effluent quality requirements, [Methods] anaerobic/anoxic/aerobic/post-anoxic method combining membrane bioreactor (AAOA+MBR) process with high sludge concentration, short hydraulic residence time and high total nitrogen removal efficiency is adopted by an all-underground wastewater treatment plant (WWTP) in Shandong Province. In this paper, the sludge reflux mode and reflux ratio of AAOA+MBR process, the actual sludge concentration of each tank, the actual flow of each tank and the concentration of matrix are simulated and analyzed. [Results] The results show that the sludge concentration in aerobic zone and the anoxic zone is 2.08 times and 1.67 times of that in the anaerobic/anoxic/aerobic/post-anoxic/post-aerobic method (AAOAO)+settling tank process, respectively. The concentration of ammonia nitrogen matrix in aerobic tank and nitrate nitrogen matrix in anoxic tank are 0.54 times and 0.73 times respectively in AAOAO+sedimentation tank. [Conclusion] Compared with conventional AAOAO+settling tank, the residence time of each tank in AAOA+MBR process should consider the

[收稿日期] 2024-11-07

[通信作者] 田海成(1991—),男,高级工程师,主要从事城镇给排水设计、咨询的工作,E-mail:shjythe@jnszy.com。

difference of sludge concentration in each tank and the influence of reduced substrate concentration on microbial degradation rate. After nearly a year of operation, the actual effluent BOD₅, COD, ammonia nitrogen and TP are better than the Class IV standards of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). The AAOA system is equipped with an intelligent inspection robot that integrates the functions of network photography, temperature and humidity detection, toxic and harmful gas detection, etc., the inspection difficulty of the whole underground WWTP is effectively reduced and the intelligent management level is improved. The MBR membrane tank adopts the relay transportation mode of single rail S-type hoist and electric flat car, which overcomes the problems of long running distance of single rail S-type hoist and frequent faults of electric hoist, the speed of installation and off-line cleaning of the membrane box is greatly improved. In response to the layout challenge of the sludge dewatering room in the fully underground WWTP under the requirement of low sludge moisture content, the high-pressure belt continuous sludge deep dewatering machine process with smaller size and height is adopted which is easy to be arranged in the underground box. Meanwhile, the safe operation of the fully underground WWTP is achieved through the enhanced anti-flooding design, deodorization design, fire protection and ventilation smoke exhaust design. This design could provide guidance for other underground WWTPs.

Keywords underground wastewater treatment plant (WWTP) anaerobic/anoxic/aerobic/post-anoxic method combining membrane bioreactor (AAOA+MBR) high-pressure belt sludge deep dehydrator intelligent inspection robot

全地下式污水处理厂凭借用地面积小、对周边景观环境影响低等优点,广泛应用于用地面积不足、周边景观环境要求高等场合,但也同时存在土建投资高、提标改造难度大等缺点。全地下式污水厂设计的难点主要在于通过工艺优化实现集约化布置并降低土建投资,同时通过强化防淹设计、除臭设计、消防与通风排烟的设计实现安全运行。全地下式污水厂的工艺路线主要包括“厌氧/缺氧/好氧法(AAO)+沉淀池+深度处理”与“AAO+膜生物反应器(MBR)”2种,其中“AAO+MBR”工艺凭借其污泥截留能力强、容积负荷高的优势在地下式污水处理厂中得到了广泛应用。“AAO+MBR”工艺中由于污泥浓度高、污泥龄长,使得出水 BOD₅、COD、氨氮等指标可以达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类的高标准水质要求。面对全国各地日益高标准的出水 TN 要求以及全地下式污水处理厂提标改造难度大的特点,“厌氧/缺氧/好氧/后置缺氧/后置好氧法(AAOAO)+沉淀池+深度处理”与“厌氧/缺氧/好氧/后置缺氧法(AAOA)+MBR”工艺在地下式污水处理厂开始得到了推广应用^[1-4],但是对于“AAOA+MBR”工艺的原理以及设计计算缺少详细的论述,“AAOA+MBR”工艺的污泥回流方式及回流比、各池实际污泥浓度、各池实际流量及基质浓度等与“AAOAO+沉淀池+深度处理”工艺相比均有所不同^[5-6],本文将结合实际案例深入剖析“AAOA+MBR”工艺的设计要点,以期为其他类似工程设计提供参考。此外,针对全地下式污水处理厂沉砂池除臭密封效果不佳、生物反应池巡检难度大、

膜箱清洗吊装不便、高标准含水率要求下脱水机房布置困难等问题结合工程实践提供了经验做法。

1 项目概况

山东某污水处理厂位于城市重点新区,高标准的景观环境定位以及高标准的排放水质要求污水处理厂采用全地下式的建设形式,将臭气、噪声等全部封闭于地下,同时地面建设开放式景观公园供周边居民使用,设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,变化系数为 1.41,用地面积为 $4.04 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。设计进、出水水质如表 1 所示,根据设计进出水水质,该工程的设计难点在于设计进水水质浓度高且 TN 去除率要求高,因此,采用了以“AAOA+MBR”为核心的污水处理工艺,该工艺处理能力强,可实现深度脱氮并且采用了以“高压带式连续污泥深度脱水机”为核心的污泥处理工艺,污泥含水率降至 65% 以下后外运焚烧处置,工艺流程如图 1 所示,地上效果图如图 2 所示。

表 1 设计进、出水水质 (单位:mg/L)

Tab. 1 Water Quality of Designed Influent and Effluent (Unit: mg/L)

指标	BOD ₅	COD	SS	氨氮	TN	TP
设计进水水质	220	500	300	70.0	80	7.0
设计出水水质	6	30	10	1.5	15	0.3

2 工艺设计

2.1 地下箱体平面布置

地下箱体平面尺寸为 137.25 m×88.20 m。地上一层为疏散楼梯间、通风机房等,地下负一层车行道北侧为设备检修层,车行道南侧为鼓风机房、加药间、脱水机房等辅助建筑,地下负二层自东向西依次

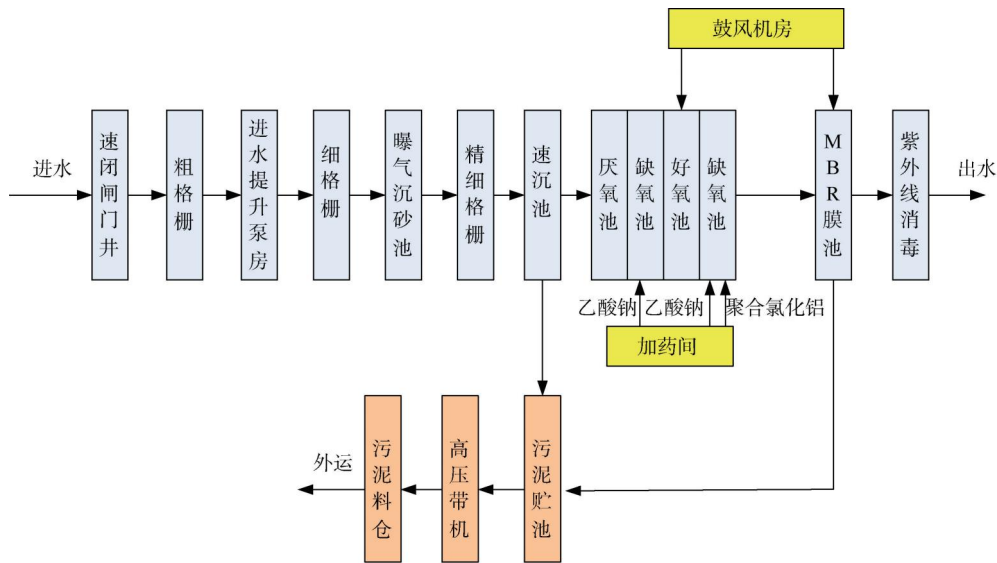


图 1 处理工艺流程

Fig. 1 Flow of Treatment Process



图 2 污水处理厂地上效果图

Fig. 2 Above-Ground Effect Drawing of WWTP

为预处理、AAOA 反应池和 MBR 膜池及设备间等。地下箱体平面图如图 3 和图 4 所示,地下箱体模型如图 5 和图 6 所示。

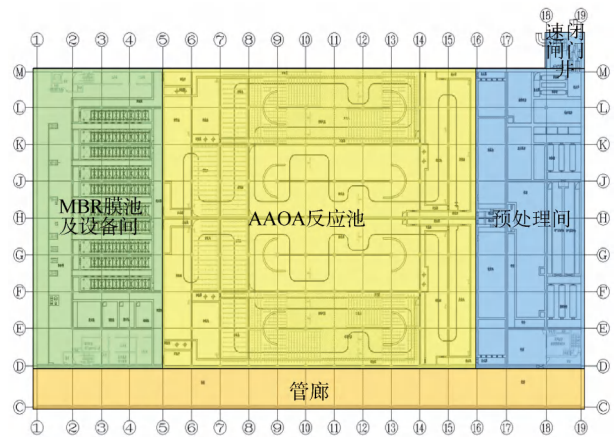


图 4 污水处理层平面

Fig. 4 Plan of Underground Structure

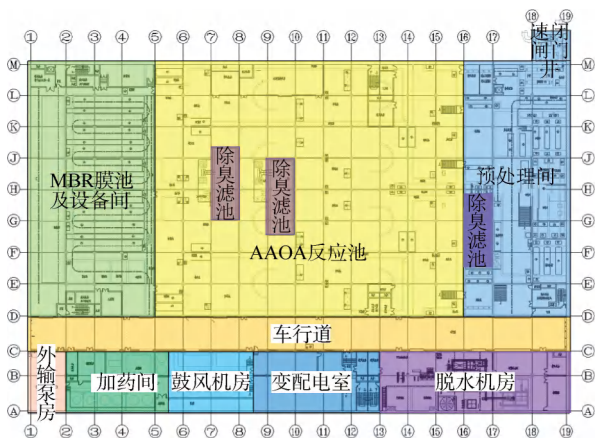


图 3 操作层平面

Fig. 3 Plan of Operation Layer

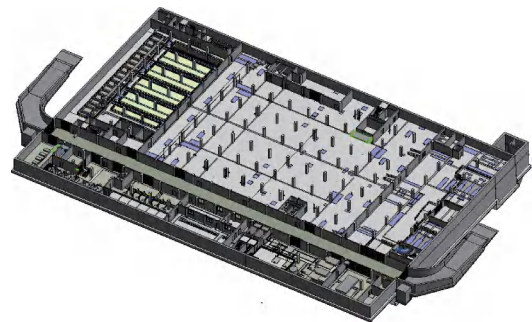


图 5 操作层模型

Fig. 5 Model of Operation Layer

2.2 污水处理工艺设计

2.2.1 速闭闸(阀)门井

为确保事故停电时污水淹没地下箱体而在箱体

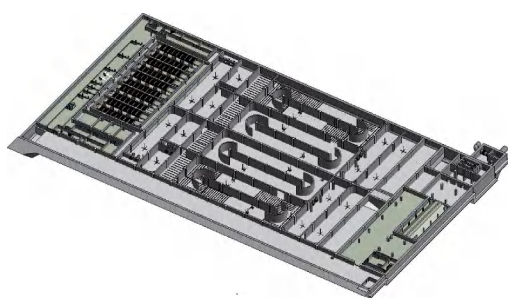


图6 污水处理层模型

Fig. 6 Model of Wastewater Treatment Level

外(与地下箱体合建)设置地面操作速闭闸(阀)门井,平面尺寸为 $7.8\text{ m} \times 7\text{ m}$,速闭闸门井内设置手电两用铸铁镶铜反向圆闸门 1 道和液压速闭铸铁镶铜正向闸门 1 道,速闭闸门井通过箱体内的除臭滤池进行除臭;速闭闸门井后设置速闭阀门井,阀门井既可以从地面进入也可以从箱体检修层快速进入,内设电动闸阀 1 道,速闭阀门井通过箱体内通风系统进行送风,确保人员下井操作安全,通过上述多道闸门联合使用确保地下箱体免于淹没风险,速闭闸门关闭时间 $< 35\text{ s}$ 。

2.2.2 预处理间

预处理间平面尺寸为 $64.05\text{ m} \times 26.25\text{ m}$,设置 DN800 手电两用反向闸门 2 台;钢丝绳牵引式粗格栅 2 台,栅条间隙为 15 mm ;进水提升泵房设置潜水泵 4 台(3 用 1 备),流量 $(Q) = 783.3\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $(H) = 7.5\text{ m}$,功率 $(N) = 22\text{ kW}$;内进流板式细格栅 3 台(2 用 1 备),栅条间隙为 3 mm ;共设置 2 组曝气沉砂池,水平流速为 0.045 m/s ,停留时间为 7.35 min ,采用非金属链板式刮砂机 2 台。曝气沉砂池是地下式污水处理厂除臭的重点,地下式污水处理厂的曝气沉砂池普遍采用桥式吸砂机^[7-8],其密封方式为大空间密封或拉锁式软密封,但存在着除臭风量大和密封效果差的问题,该工程采用的非金属链板式刮砂机不仅除臭风量小且密封效果好,尤其在地下式污水处理厂中具有显著优势。曝气沉砂池后设置内进流孔板超细格栅 3 台(2 用 1 备),栅条间隙为 1 mm ;共设置 2 组速沉池,水平流速为 9.2 mm/s ,表面负荷为 $8.17\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,停留时间为 1.55 h ,采用非金属链板式刮泥机 2 台,速沉池设置超越渠道,可根据实际水质情况超越运行。

2.2.3 AAO 反应池

当 AAO+MBR 工艺的设计 TN 去除率要求较高

时,常在 AAO 后增加后置缺氧段形成 AAOA+MBR 工艺,后置缺氧段用于继续去除好氧池出水中的硝酸盐从而实现深度脱氮。AAOA+MBR 工艺与常规 AAOAO+沉淀池工艺的污泥回流方式及回流比、各池实际污泥浓度、各池实际流量及基质浓度等均有所不同,而其他采用 AAOA+MBR 工艺的污水处理厂鲜有对其机理的深入分析,文章结合实际案例对 AAOA+MBR 工艺进行深入的剖析以期类似工程设计提供理论指导。

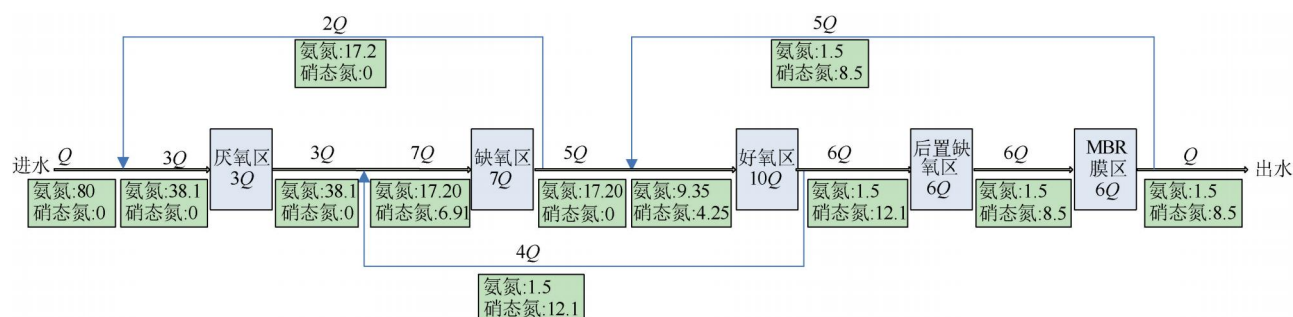
对于污泥回流方式,如参照 AAOAO+沉淀池工艺将富含溶解氧和硝酸盐的膜池污泥直接回流至厌氧区,将严重影响聚磷菌的厌氧释磷效果。因此,AAOA+MBR 工艺的污泥回流常采用三级循序回流方式,分别为缺氧池末段至厌氧池首端(第一级)、好氧池末段至缺氧池首端(第二级)和膜池至好氧池首端(第三级)。第三级回流可充分利用膜池吹扫过程过剩溶解氧同时尽可能提高好氧池的污泥浓度,回流比常采用 $400\% \sim 600\%$ 。第二级回流与 AAOAO+沉淀池工艺中的硝化液回流作用相同,AAOAO+沉淀池工艺的硝化液回流比常采用 $100\% \sim 400\%$,而 AAOA+MBR 工艺缺少了污泥外回流的硝化液回流作用,因此,回流比一般高于 AAOAO+沉淀池工艺,同时为了尽可能提高缺氧池的污泥浓度,回流比常采用 $300\% \sim 500\%$ 。第一级回流由于从缺氧池末端回流可降低进入厌氧池污泥中的硝酸盐含量,确保厌氧释磷效果的同时提高厌氧池的污泥浓度,AAOAO+沉淀池工艺的污泥回流比常采用 $50\% \sim 100\%$,AAOA+MBR 工艺中缺氧池的污泥浓度一般低于 AAOAO+沉淀池工艺中沉淀池的污泥浓度,因此其回流比常采用 $100\% \sim 200\%$ 。

为防止因膜池污泥浓度过高导致膜污染加剧以及曝气量的增加,该工程膜池内设计污泥质量浓度为 10 g/L ,设计三级回流比为 $500\% : 400\% : 200\%$,根据膜池内设计污泥浓度及三级回流比可依次推算好氧池及后置缺氧池的污泥质量浓度为 8.3 g/L ,缺氧池的污泥质量浓度为 6.7 g/L ,厌氧池的污泥质量浓度为 4.4 g/L 。如采用 AAOAO+沉淀池工艺,混合液回流比须为 300% ,污泥回流比为 100% ,沉淀池污泥质量浓度为 8 g/L ,则后置缺氧池、后置好氧池、好氧池、缺氧池及厌氧池的污泥质量浓度均为 4 g/L 。由此可见,AAOA+MBR 工艺中

好氧池及后置缺氧池、缺氧池的污泥浓度分别为 AAOAO+沉淀池工艺的 2.08 倍和 1.67 倍,根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),好氧区和缺氧区所需容积主要取决于进水水质浓度以及污泥浓度,因此,AAOA+MBR 工艺可极大降低生物反应池的池容继而减小地下箱体占地面积。

AAOA+MBR 工艺及 AAOAO+沉淀池工艺的各池实际流量及基质浓度模拟情况分别如图 7 和图 8 所示。该工程设计进水水质中氨氮质量浓度为 70 mg/L,TN 质量浓度为 80 mg/L,假设进入生物反应池时有机氮全部转化为氨氮且进水不存在硝态氮,出水 TN 质量浓度考虑未来提标可能按照 10 mg/L

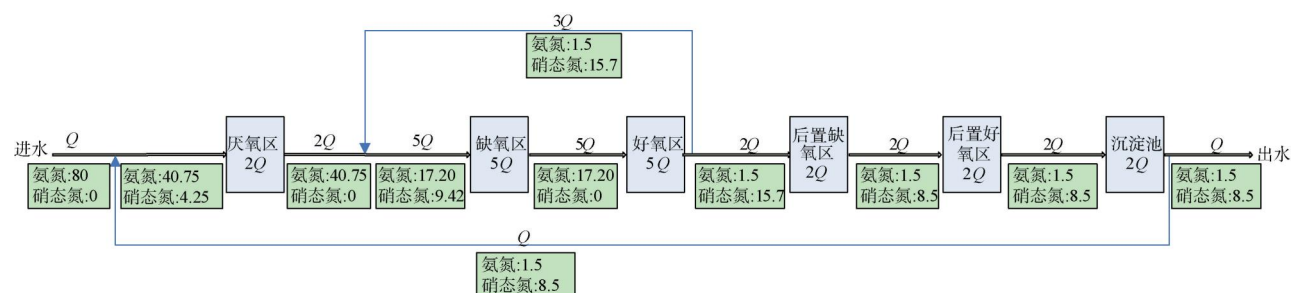
确定。AAOA+MBR 工艺中厌氧池、缺氧池、好氧池、后置缺氧池的实际流量分别为 $3Q$ 、 $7Q$ 、 $10Q$ 、 $6Q$,均高于 AAOAO+沉淀池工艺中厌氧池、缺氧池、好氧池、后置缺氧池的 $2Q$ 、 $5Q$ 、 $5Q$ 、 $2Q$ 。实际流量的增加导致各池实际基质浓度降低,AAOA+沉淀池工艺中好氧池氨氮质量浓度为 17.20 mg/L,缺氧池硝酸盐质量浓度为 9.42 mg/L;而 AAOA+MBR 工艺中好氧池氨氮质量浓度为 9.35 mg/L,缺氧池硝酸盐质量浓度为 6.91 mg/L,分别是 AAOAO+沉淀池工艺的 0.54 倍和 0.73 倍,因此,AAOA+MBR 工艺的缺氧池及好氧池停留时间计算时需考虑实际基质浓度的降低对于微生物反应速率的影响。



注:图中数值的单位为 mg/L。

图 7 AAOA+MBR 工艺各池实际流量及基质浓度模拟

Fig. 7 Actual Flow of AAOA+MBR Process and Simulation of Matrix Concentration



注:图中数值的单位为 mg/L。

图 8 AAOAO+沉淀池工艺各池实际流量及基质浓度模拟

Fig. 8 Actual Flow of AAOAO+Sedimentation Basin Process and Simulation of Matrix Concentration

AAOAO+沉淀池工艺中的厌氧池水力停留时间常采用 2 h,其原因在于沉淀池的回流污泥中含有硝酸盐(8.5 mg/L),厌氧池中的反硝化菌和聚磷菌存在碳源争夺现象,反硝化菌优先利用进水挥发性脂肪酸进行反硝化作用,待硝酸盐完全去除后聚磷菌再利用剩余碳源进行厌氧释磷作用,正常厌氧池内聚磷菌充分释磷所需时间仅为 1 h 左右。AAOA+MBR 工艺中厌氧池的回流污泥均来自缺氧池末端,

其硝酸盐含量接近于 0,因此厌氧池内用于反硝化作用的时间较短,聚磷菌可充分利用进水挥发性脂肪酸进行厌氧释磷,因此,AAOA+MBR 工艺中厌氧池停留时间可缩小为 1.5 h。

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),缺氧池停留时间根据设计进水 TN、好氧池出水硝态氮目标值以及缺氧池的污泥浓度等计算确定。AAOA+MBR 工艺中好氧池出水硝态氮质量浓度为

12.1 mg/L,略低于 AAOAO+沉淀池中的好氧池出水硝态氮的 15.7 mg/L,结合缺氧池污泥浓度计算缺氧池停留时间为 6.34 h。

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),好氧池停留时间采用泥龄法计算,结合好氧池污泥质量浓度(8.3 g/L),经计算 AAOA+MBR 工艺中好氧池停留时间为 7.14 h。后置缺氧池停留时间根据后置缺氧池的设计进出水 TN 以及污泥浓度计算为 0.6 h,考虑消氧区停留时间后取 2.29 h。

综上所述,AAOA 反应池总停留时间为 17.27 h,设计共计 2 座,平面尺寸为 64.05 m×79.20 m,有效水深为 6 m,设计总污泥龄为 30 d, BOD_5 污泥负荷为 0.09 kg/(kg MLSS)。好氧池设计标准需氧量为 773 kg O_2 /h,设计标准供气量为 166.6 m^3 /min,共设置鼓风机 4 台,其中大风机 2 台 [$Q=83.3 m^3$ /min,风压(P)=7 m, $N=150$ kW],小风机 2 台 ($Q=41.6 m^3$ /min, $P=7$ m, $N=150$ kW)。由于进水碳源不足,在缺氧区及后置缺氧区分别设置乙酸钠投加点,乙酸钠投加量为 100 mg/L;为实现深度除磷在好氧池出水设置混凝剂投加点,聚合氯化铝投加量为 20 mg/L。

全地下式污水处理厂的生物池普遍采用混凝土盖板永久密封,仅设置少量设备检修孔,相比于地上式污水处理厂其巡视难度大幅增加,为提高全地下式污水处理厂生物池的巡检质量和智能化管理水平,该工程采用了集成网络摄像头、温湿度探头、气体四合一探头(O_2 、 H_2S 、 CH_4 、 NH_3)等功能的智能巡检机器人,可通过水面水泡翻滚情况判断曝气器运行状况^[9-10],通过气体监测池内有毒有害气体含量,同时预留取样模块接口,可通过监控软件界面设置需日常取样的地点,由巡检机器人到达指定取样点自动获取不同深度的水样,巡检任务结束后由机器人携带水样返回操作层。为降低设备投资,通过优化运行轨道平面布置方式实现 1 套智能巡检机器人覆盖 2 组 AAOA 反应池,轨道布置于负二层顶板下,轨道穿越横梁处需在梁上预留洞口,直轨处洞口尺寸为 600 mm×300 mm,转弯处洞口尺寸为 750 mm×300 mm,运行轨道平面布置需充分避让推流器、搅拌器、检修孔等。

2.2.4 MBR 膜池及设备间

MBR 膜池及设备间平面尺寸为 64.05 m×31.80 m,有效水深为 3.0 m,共计 10 格,每格设置

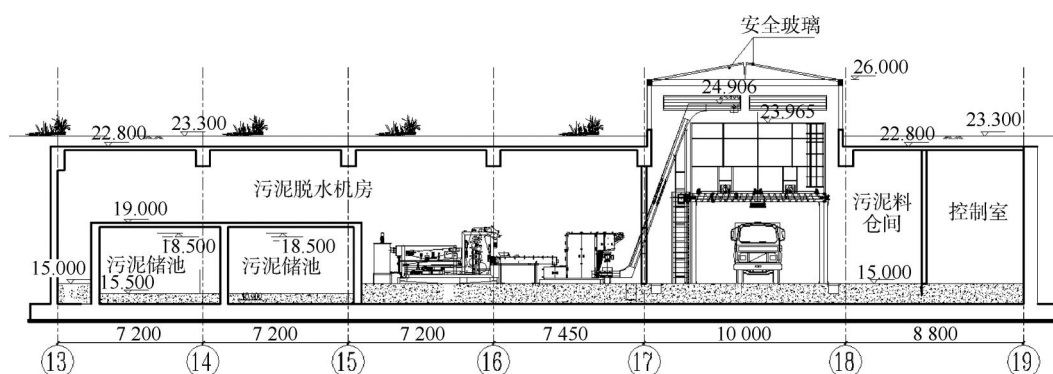
8 个膜组件(同时预留 1 组安装位置),膜材质为聚偏氟乙烯(PVDF),膜孔径为 0.01 μm ,单组膜面积为 1 500 m^2 ,平均膜通量为 13.88 L/($m^2 \cdot h$),总变化系数为 1.41,峰值膜通量为 21.75 L/($m^2 \cdot h$),膜池设计污泥质量浓度为 8 g/L。通过持续的曝气吹扫和定期的膜清洗来减缓膜污染,吹扫气水比为 8.6,膜清洗包括维护性和恢复性清洗,维护性清洗采用次氯酸钠,质量浓度为 200 mg/L,每 3 d 进行 1 次,每次 30 min;恢复性清洗采用次氯酸钠(质量浓度为 1 000 mg/L)和柠檬酸(质量浓度为 5 000 mg/L),每半年 1 次或跨膜压差大于 30 kPa,每次 8 h。通过将相邻 2 格膜池连通、共用产水系统及吹扫系统的方式减少产水泵、阀门等台套数,共设置 5 台产水泵, $Q=530 m^3$ /h, $H=18.5$ m, $N=37$ kW。由于全地下式污水厂柱间距限制,MBR 膜池普遍采用单轨 S 型葫芦吊方式吊装膜箱,其问题在于膜箱吊装后运行距离较长,尤其当膜箱数量较多时,操作运行不便,同时电动葫芦在转弯处常发生电机损伤现象^[11-12]。为此,该工程采用顶部单轨 S 型葫芦吊与底部电动平车接力运输方式,在膜池进水端渠道上设置电动平车,单轨 S 型葫芦吊只需将膜箱直线运输至电动平车上,同时轨道上设置 2 个电动葫芦显著提高了膜箱安装与离线清洗的速度。

2.2.5 紫外线消毒及出水计量渠

设置 14 个消毒模块,每个模块 8 个灯管,合计 112 支灯管,每支功率为 320 W。出水计量渠设置喉宽为 600 mm 的巴歇尔量水槽 1 套。

2.3 污泥处理工艺设计

常规离心浓缩脱水一体机或带式浓缩脱水一体机等脱水后污泥含水率仅为 80%左右,脱水后污泥含水率 $\leq 65\%$ 情况下普遍采用高压隔膜压滤机,但是其平面尺寸及高度较大,不便于在全地下污水处理厂中布置。因此,该工程选择了尺寸及高度较小,易于在地下箱体中布置的高压带式连续污泥深度脱水机^[13-15]。设计污泥量为 8 t DS/d,其中 MBR 剩余污泥量为 4.8 t DS/d,污泥含水率为 99.2%;速沉池污泥量为 3.2 t DS/d,污泥含水率为 97%。该工程采用带式浓缩脱水一体机与高压带式连续污泥深度脱水机组合工艺,设置带式浓缩脱水机与高压带式深度脱水机各 2 台,单台处理能力为 400 kg DS/h,设置污泥料仓 1 套,容积(V)=85 m^3 ,脱水车间竖向布置如图 9 所示。



注:图中数值单位为 mm。

图 9 污泥脱水车间竖向布置

Fig. 9 Vertical Layout of Sludge Dewatering Workshop

3 安全设计

与地上式污水处理厂相比全地下式污水处理厂的设计重点在于防止超量污水和雨水淹没箱体以及除臭、消防、通风等专业设计^[16-19]。

3.1 防淹设计

该工程共设置 4 道进水闸门,速闭闸门井内设置手电两用镶铜铸铁反向总闸门 1 道,速闭闸门井与地下箱体预处理间采用双管连通、管道上依次设置液压速闭镶铜铸铁正向闸门 1 道、电动闸阀 1 道以及手电两用反向闸门 1 道,通过多道闸门联合使用避免超量污水淹没地下箱体。速闭闸用于断电时及时切断箱体进水,防止箱体被淹。在进水泵房、细格栅进水渠和 AAOA 反应池均设置溢流接至事故检修泵房。当进水提升泵流量大于膜池产水泵流量时,AAOA 反应池水位会不断升高,为防止溢流此时应减少进水泵运行台数或降低频率方式降低进水量;当实际进水流量大于进水提升泵提升能力时,进水泵房水位会不断升高,为防止进水泵房溢流应减小进水电动闸门的开度。当膜池产水泵故障时进水提升泵站应自动关闭,并关闭进水电动闸门。

该工程设计地坪高于周边道路标高约 1 m 以防止客水倒灌,地下箱体通道入口处设置倒坡防止厂区地面雨水进入地下箱体,通道末端设置截水沟并截流至车行道末端的排涝泵房,排涝泵出水管接入地面雨水管道系统,通过上述措施确保地下箱体免于洪涝影响。同时地下箱体负二层膜池设备间的产水管道、清洗管道、放空管道等存在着氯离子腐蚀风险,除做好管道材质选择及防腐设计外,安装过程中应对焊口 100% 进行探伤,同时该工程在地下箱体

负二层设置排涝泵房 1 座,以防止膜池设备间内的设备被淹。

3.2 除臭设计

为尽可能改善地下箱体内的操作环境,根据环评批复要求对预处理间、AAOA 反应池、MBR 膜池、污泥脱水间等进行全部除臭。速闭闸门井、格栅渠道、进水泵房、沉砂池等除臭风量按照 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 取值并增加 2 次/h 的空间换气量;速沉池、厌氧池、缺氧池、污泥储池等除臭风量按照 $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 取值并增加 2 次/h 的空间换气量;好氧池和 MBR 膜池除臭风量按照曝气量为 110% 取值;脱水机、砂水分离器、格栅等设备采用不锈钢骨架+钢化玻璃单独密封收集,除臭风量按照 12 次/h 空间换气量取值,除臭总风量为 $65\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。臭气采用玻璃钢矩形风管输送以减少对检修层净空的影响,共设置 3 套生物除臭滤池对臭气进行分散式处理达标后有组织集中排放。

3.3 消防设计

根据《城镇地下式污水处理厂技术规程》(T/CECS 729—2020)中的消防设计要求以及生产工艺火灾危险性小的特点,参考国内其他全地下污水处理厂设计情况^[16-17],地下箱体负一层共设 7 个防火分区,2 个大于 5 m 宽的车辆出入口。AAOA 池顶为操作层检修空间,装饰采用不燃材料,防火分区面积扩大至 $5\,144.75 \text{ m}^2$,其他防火分区面积均小于 $2\,000 \text{ m}^2$ 。每个防火分区设有 1 个独立直通室外出口,防火分区之间采用防火墙分隔,防火墙上开设门的洞口均采用特级防火卷帘及甲级防火门、防火窗,相邻防火分区设有甲级防火门作为第二疏散口。

地下箱体同时设置室内消火栓系统、自动喷水灭火系统、建筑灭火器,高、低压变配电室设置七氟丙烷灭火装置。

3.4 通风排烟设计

该工程共划分 7 个防火分区,防火分区 1~6 为戊类场所,只做通风设计;地下行车通道安全区为疏散通道,做通风排烟设计。防火分区 1(预处理检修层)通风换气次数为 8 次/h、防火分区 2~3(AAOA 检修层、MBR 检修层及设备间)通风换气次数为 5 次/h、防火分区 4(加药间、鼓风机房、变配电室)通风换气次数为 10~11 次/h、防火分区 5(污泥脱水机房)通风换气次数为 11 次/h、防火分区 6(管廊)

按照平时通风换气 3 次/h,事故后排烟 6 次/h,管廊风机平时通风低速运行,事故后排烟或者检测气体超出标准时高速运行;地下行车通道风机平时及发生火灾均可低速运行,低速运行时如检测气体还是超出标准则风机高速运行。车道利用两端进行自然补风,其余设补风机补风,补风量大于排风量的 80%。

4 运行效果

2023 年 9 月 1 日—2024 年 9 月 1 日运行时,实际运行水量为 10 435~16 709 m³/d,采用单组运行方式,实际出水水质中 BOD₅、COD、氨氮、TP 等指标均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 IV 类标准(表 2)。

表 2 实际进、出水水质 (单位:mg/L)
Tab. 2 Water Quality of Actual Influent and Effluent (Unit: mg/L)

指标	BOD ₅	COD	氨氮	TP	TN
实际进水水质	22.10~42.83	97.80~229.00	12.00~42.30	1.33~6.77	20.90~50.20
实际出水水质	0~3.00	10.10~16.70	0.01~0.15	0.13~0.22	6.72~13.90

5 投资与成本

项目总投资金额为 3.39 亿元,其中工程投资金额为 2.94 亿元,经营成本为 1.68 元/m³。项目采用政府和社会资本合作(PPP)模式建设,合作期限为 30 年,其中建设期 1 年,运营期 29 年,水价为 3.738 元/m³。

6 结论

(1)在设计 TN 去除率要求较高的情况下,该工程采用了 AAOA+MBR 工艺,经过近 1 年运行,实际出水 BOD₅、COD、氨氮、TP 等指标均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的 IV 类标准。

(2)经模拟 AAOA+MBR 工艺中好氧池、缺氧池的污泥浓度分别为 AAOAO+沉淀池工艺的 2.08 倍和 1.67 倍,但其好氧池氨氮基质浓度和缺氧池硝态氮基质浓度分别为 AAOAO+沉淀池工艺的 0.54 倍和 0.73 倍,AAOA+MBR 工艺设计计算时需考虑各池污泥浓度的不同并考虑基质浓度降低对微生物降解速率的影响。

参考文献

[1] 田海成,杨曦凯,焦文海,等. AAOA+MBR 工艺用于济南东客站地下污水处理厂[J]. 中国给水排水,2023,39(22):78-83.
TIAN H C, YANG X K, JIAO W H, et al. Application of AAOA-MBR process in Jinan Dongkezhan underground wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,

2023,39(22):78-83.
[2] 陈昱霖,姚枝良,张欣. AAOA+MBR 工艺在长沙某半地下式污水处理厂的应用案例[J]. 净水技术,2024,43(9):158-164.
CHEN Y L, YAO Z L, ZHANG X, et al. Application case of AAOA+MBR process in a semi-underground WWTP in Changsha[J]. Water Purification Technology,2024,43(9):158-164.
[3] 朱榕鑫,王胤,王涛,等. SSgo-AAOA-MBR 短流程工艺在全地埋式污水厂中的应用[J]. 水处理技术,2024,50(12):146-150.
ZHU R X, WANG Y, WANG T, et al. Application of the SSgo-AAOA-MBR short process technology in fully buried sewage treatment plant[J]. Technology of Water Treatment,2024,50(12):146-150.
[4] 夏云峰,周艳,王涛,等. 地下式污水处理厂 AAO+MBR 工艺的应用[J]. 净水技术,2022,41(8):140-145, 162.
XIA Y F, ZHOU Y, WANG T, et al. Application of AAO+MBR processes in underground wastewater treatment plant[J]. Water Purification Technology,2022,41(8):140-145, 162.
[5] 田海成,杨红红,焦文海,等. AAO+MBR 组合工艺各工段设计要点[J]. 中国给水排水,2023,39(6):71-77.
TIAN H C, YANG H H, JIAO W H, et al. Key points for each section design of AAO and MBR combined process[J]. China Water & Wastewater,2023,39(6):71-77.
[6] 柳岩,刘建军,牛和昕,等. 污水处理厂 AAOA-MBR 工艺硝态氮浓度计算及对设计的影响分析[J]. 净水技术,2022,41(8):75-80.
LIU Y, LIU J J, NIU H X, et al. Calculation of nitrate nitrogen concentration in AAOA-MBR process of WWTP and its impact on

- design[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(8): 75–80.
- [7] 楚小龙. 天津市某半地下式污水处理厂工程设计案例[J]. 净水技术, 2020, 39(1): 34–37.
- CHU X L. Engineering design case of a semi-underground WWTP project in Tianjin[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(1): 34–37.
- [8] 王雪, 戴仲怡, 张晓临, 等. $A^2/O+MBR$ 工艺用于集约化高排放标准半地下式污水厂[J]. 中国给水排水, 2020, 36(4): 53–56.
- WANG X, DAI Z Y, ZHANG X L, et al. Application of $A^2/O+MBR$ process in intensive high discharge standard semi-underground wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(4): 53–56.
- [9] 许鲁亮, 张羽. 智能巡检机器人在地理式污水处理厂中的应用[J]. 今日制造与升级, 2021(11): 53–54.
- XU L L, ZHANG Y. Intelligent inspection robots for underground sewage treatment[J]. Made and Upgraded Today, 2021(11): 53–54.
- [10] 李滨. 智能巡检机器人系统在地下式污水处理厂的运用[J]. 自动化应用, 2020(4): 77–79.
- LI B. Intelligent inspection robots for underground sewage treatment[J]. Automation applications, 2020(4): 77–79.
- [11] 吴念鹏, 贾芳芳, 王国华, 等. 高出水标准地下式再生水厂运行难点探讨[J]. 给水排水, 2019, 55(10): 42–46.
- WU N P, JIA F F, WANG G H, et al. Discussion on difficulties in operation of underground reclaimed water treatment plant with high discharge standard[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(10): 42–46.
- [12] 柳岩, 高海英, 刘建军, 等. 半地下箱体式 MBR 生化组合工艺工程设计案例分析[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 139–146.
- LIU Y, GAO H Y, LIU J J, et al. Analysis of engineering design case for semi-underground box type MBR biochemical combined process[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 139–146.
- [13] 陈志真, 邱明, 魏斌, 等. 两段式污泥深度脱水工艺在全地下污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(24): 119–123.
- CHEN Z Z, QIU M, WEI B, et al. Application of two-stage sludge deep dewatering process in an underground WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(24): 119–123.
- [14] 王娜娜, 王静, 路远, 等. 高压带式连续污泥深度脱水技术的应用实例[J]. 工业水处理, 2021, 41(5): 143–146.
- WANG N N, WANG J, LU Y, et al. Example application of high-pressure belt continuous sludge deep dewatering technology[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(5): 143–146.
- [15] 李建, 阮燕霞, 陈良才, 等. 粉煤灰改性——高压带式连续脱水设备用于污泥减量[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 105–109.
- LI J, RUAN Y X, CHEN L C, et al. Application of high pressure belt filter dewatering equipment modified by fly ash in municipal sludge reduction[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(14): 105–109.
- [16] 肖艳. 上海首座全地下式污水处理厂消防设计研究[J]. 给水排水, 2020, 56(12): 30–35.
- XIAO Y. Study of fire protection design for the first underground wastewater treatment plant in Shanghai[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(12): 30–35.
- [17] 杨涛, 吴志高, 谢小龙, 等. 地理式污水处理厂地下箱体防火设计研究及案例剖析[J]. 给水排水, 2022, 48(2): 33–39.
- YANG T, WU Z G, XIE X L, et al. Research on the fire protection design of the underground box in buried wastewater treatment plant and case analysis[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(2): 33–39.
- [18] 陈秀成. 全地下污水处理厂防淹设计要点及工程案例[J]. 给水排水, 2022, 58(5): 50–54.
- CHEN X C. Key points of flood prevention design and engineering examples of underground municipal wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(5): 50–54, 59.
- [19] 高伟, 尹兴蕾, 刘世德, 等. 地下式污水处理厂防烟排烟设计探讨[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 65–68.
- GAO W, YIN X L, LIU S D, et al. Design of smoke protection and smoke exhaust in underground wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(6): 65–68.