

齐超元, 原效凯, 李晓春, 等. 基于复杂用地条件的地下式污水处理厂精细化设计[J]. 净水技术, 2024, 43(6):186-195.

QI C Y, YUAN X K, LI X C, et al. Fine design of underground WWTP based on complex land use conditions[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6):186-195.

基于复杂用地条件的地下式污水处理厂精细化设计

齐超元, 原效凯*, 李晓春, 宋鹏飞

(广东省建筑设计研究院有限公司, 广东广州 510010)

摘要 广州市黄埔区某水质净化厂二期工程需要在不规则的用地形状、复杂的场地周边环境、较低的建设用地指标及地上高水平建设开发的预期下, 实现规模为 5 万 m^3/d 地下式污水处理厂的设计工作。工艺设计上通过采用“厌氧-缺氧-好氧+膜生物反应器(AAO+MBR)”工艺提升节地效率; 结构设计上通过处理单元构筑物的共壁、错层实现“地尽其用”; 平面设计上通过优化池体上部建(构)筑物布局、设施设备设置、交通物流规划、管线综合排布来提高操作空间的使用率。本工程项目用地负荷率比同类项目提高了 36%, 工程直接费用的建设单位成本低于广州市同等规模同类型项目 8.5% 的情况下, 实现了工程设计目标, 为同类项目的设计提供了良好示范。

关键词 复杂用地条件 地下式污水处理厂 厌氧-缺氧-好氧+膜生物反应器(AAO+MBR) 精细化设计 用地负荷率 建设成本

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2024)06-0186-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.022

Fine Design of Underground WWTP Based on Complex Land Use Conditions

QI Chaoyuan, YUAN Xiaokai*, LI Xiaochun, SONG Pengfei

(Guangdong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract The second phase of a water purification plant in Huangpu District, Guangzhou City needs to realize the design of an underground wastewater treatment plant (WWTP) with a scale of 50 000 m^3/d under the expectation of irregular land shape, complex surrounding environment, low construction land index and high-level above-ground construction and development. In the process design, the "anaerobic-anoxic-oxic+membrane bio-reactor (AAO+MBR)" is adopted to improve the efficiency of land saving. In structural design, the common wall and staggered floor of the unit structures are treated to make the best use of the land. In the graphic design, the utilization rate of the operation space is improved by optimizing the layout of the upper buildings, facilities and equipment, transportation and logistics planning. The land load rate of this project is increased by 36% compared with similar projects, and the cost of direct project construction is lower than 8.5% of the same scale and projects of the similar type in Guangzhou City, which achieves the engineering design target and provides a good demonstration for the design of similar projects.

Keywords complex land use conditions underground wastewater treatment plant (WWTP) anaerobic-anoxic-oxic+membrane bioreactor (AAO+MBR) fine design land load rate construction cost

广州市黄埔区某水质净化厂二期工程污水采用

[收稿日期] 2024-01-03

[作者简介] 齐超元(1990—), 男, 硕士, 主要从事市政给排水、城市固废处置、危险废物处理处置、环境卫生管理等市政环保项目的规划、咨询、设计工作, E-mail: 308199794@qq.com。

[通信作者] 原效凯(1973—), 男, 正高级工程师, 主要从事市政给排水、城市固废处置、危险废物处理处置、环境卫生管理等市政环保项目的规划、咨询、设计和技术研究管理工作, E-mail: yxkcom@163.com。

“厌氧-缺氧-好氧+膜生物反应器(AAO+MBR)”工艺^[1-2], 污泥处理采用“机械脱水+低温干化”技术, 其处理建(构)筑物均为全地下式设计。项目设计规模为 5 万 m^3/d , 位于乌涌与广汕公路交汇处西北角, 如图 1 所示。地块呈“Z”字型, 且北侧区域面积远小于南侧区域, 形状极不规则, 东西两侧紧靠市政道路。该地块占地面积约为 1.1 hm^2 , 考虑退让及退界后基坑占地面面积仅为 9 686.42 m^2 ; 单位水量用



图1 该工程选址卫星图

Fig. 1 Satellite Map of Site Selection for the Project

地指标仅为 $0.20 \text{ m}^2 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 远远低于国内同类型地下污水处理厂用地指标 $[0.3 \sim 0.5 \text{ m}^2 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})]$ ^[3]。此外, 地块周边环境复杂, 紧邻地块东北角为南方电网黄陂片区变电站; 北侧为天鹿花园小区, 西侧为新建人为峰大厦, 均为毗邻本项目地块的高层建筑; 南

侧为运行中的一期工程。同时, 拟用地范围在控制性详细规划上有 $8\,888 \text{ m}^2$ 公园绿地的“占补平衡”要求。该工程在低于同类型工程 35.3% 用地指标的情况下, 通过选择合理的工艺、极致规划平面布局、设计组团式的结构共壁、上抬部分地下箱体等方式, 有效实现了项目的工程设计。

1 项目概况

该项目二期工程扩建规模为 $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 综合变化系数为 1.58。其中, 土建工程一次性建成, 规模为 $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$; 设备分期安装, 近期主要设备安装规模为 $3 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 远期主要设备安装规模为 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

该工程以现状污水水质资料为基础, 参考本项目同类城市污水处理厂, 特别是广州同时期实施的污水处理厂工程的进水水质变化情况。此外, 随着城市建设的发展, 排水系统将逐步实现完全分流制, 进水浓度将进一步提高。出水水质根据排放水体水环境功能区的地表水环境质量标准, 水质净化厂排口位于乌涌干流段, 水质要求为地表 IV 类水。该项目出水水质部分指标化学需氧量 (COD_{Cr})、五日生化需氧量 (BOD_5)、氨氮、总磷 (TP) 执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准, 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, 如表 1 所示。

表 1 设计进出水质

Tab. 1 Designed Water Quality of Influent and Effluent

| 项目 | $\text{COD}_{\text{Cr}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | $\text{BOD}_5 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 氨氮 / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | $\text{TP} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | $\text{TN} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | $\text{SS} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 粪大肠杆菌 / L^{-1} |
|-------|--|--|--|---|---|---|-------------------------|
| 实测进水 | 233 | 118 | 24.5 | 2.88 | 30.7 | 146 | 1.0×10^{10} |
| 设计进水 | 330 | 180 | 30.0 | 4.50 | 36.0 | 300 | / |
| 设计出水 | ≤ 30 | ≤ 6 | ≤ 1.5 | ≤ 0.3 | ≤ 15 | ≤ 10.00 | $\leq 1\,000$ |
| 目标去除率 | 90.91% | 96.67% | 95.0% | 93.33% | 52.78% | 96.67% | / |

该工程工艺路线应灵活、稳定、适应强。考虑到本工程用地指标少, 需要在约 1.1 hm^2 用地内布置 $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 规模的污水处理设施。

该工程服务范围内雨污分流措施较为完善, 根据一期实际运行进水水质及该工程设计进水水质分析得知, 其进水 $\text{BOD}_5 / \text{COD}_{\text{Cr}} \approx 0.55$ 、 $\text{BOD}_5 / \text{TN} = 5.0$, 可生化性较好, 依靠生物脱氮除磷处理工艺即可实现处理目标。在该工程现有紧张用地条件下, 若采用传统二沉池, 势必要占用更大的用地。综合上述原因, 该工程采用“预处理+AAO+MBR”处理工艺。选用 MBR 膜分离深度处理工艺, 一方面是可以

实现污水处理效果达标, 另一方面是同等条件占地面积更省。

2 工程设计分析

2.1 工艺比选与确定

根据相关统计数据^[3], 国内已建逾 113 座万 t 级地下污水处理厂, 地下式污水处理厂用地面积受用地情况、处理工艺和出水标准等因素影响, 用地指标为 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^2 / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。

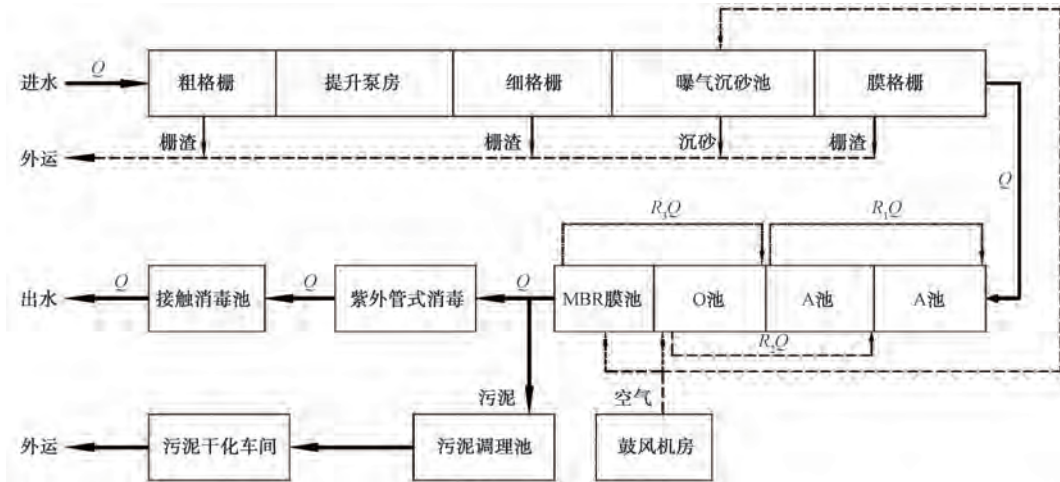
考虑到该工程用地指标少, 需要在约 1.1 hm^2 用地内布置 $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 规模的污水处理设施设备及污泥处理设施设备, 用地指标仅为 $0.20 \text{ m}^2 / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$, 因

此,该工程在工艺路线上必须优先选择具有节地特性的工艺。

结合该工程进水水质情况,二级生物处理推荐采用“AAO+MBR”工艺。MBR 工艺在国内外已经成功地应用于城市污水与工业污水的处理^[4-5],具有模块化占地面积小、处理效果好、抗水质冲击负荷

能力强、自动化程度高等优点和特点。

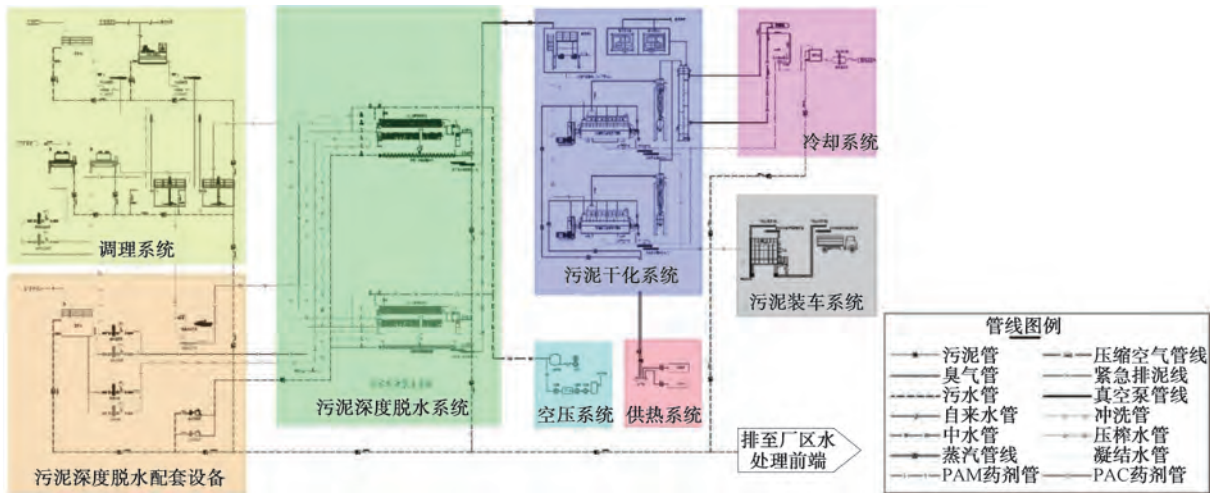
该工程处理工艺流程如图 2 所示。污水经提升井提升后由粗格栅、提升泵房、细格栅、曝气沉砂池、膜格栅等预处理后进入 AAO 生化池、MBR 膜池进行生化处理,然后进行接触消毒,最后达标排放。污泥处理工艺流程如图 3 所示。



注:Q 为流量, R_1 、 R_2 、 R_3 为各段回流比。

图 2 污水处理工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Wastewater Treatment



注:PAM 为聚丙烯酰胺,PAC 为聚合氯化铝。

图 3 污泥处理工艺流程

Fig. 3 Flowchart of Sludge Treatment Process

2.2 设计要点分析

2.2.1 工艺设计要点

1) 集约化预处理多联体设计

为最大限度集约用地,本工程预处理段各个工艺单元采用串联共壁。相较于传统“AAO+二沉

池”工艺,MBR 膜组件对水中的杂质去除深度较高。因此,预处理段增设膜格栅,以保障膜系统的稳定运行。整个多联体由进水井、粗格栅、污水提升井、内进流网板式细格栅、曝气沉砂池、膜格栅组成。

2)精细化 AAO 池设计

本项目根据建设规模、时序以及地块条件,将“AAO+MBR”工艺段分成两组布局形式。

传统的“AAO+二沉池”工艺一般采用两级回流,好氧池出水端回流至缺氧池进水端(内回流),二沉池污泥池回流至厌氧池进水端(外回流)^[6]。由于“AAO+MBR”工艺中 MBR 膜池具有高曝气量及高污泥浓度(MLSS),为避免厌氧区释磷过程受到过高溶解氧外回流污泥的影响,采用分级回流方式。该回流方式不仅能够补充 AAO 生化工艺段的污泥浓度,也能解决传统外回流导致的厌氧池溶解氧升高问题。

“AAO+MBR”工艺逐级回流方式中,生物反应池各个工艺段的 MLSS 差异较大。为准确计算生物反应池的水力停留时间(HRT)^[6],设计过程中一般根据膜池 MLSS 设计值和设计回流比来推算生物反应池各个工艺段的 MLSS。其计算如式(1)~式(3)。

$$A_1 = \frac{A_2 \times R_1}{1 + R_1} \quad (1)$$

$$A_2 = \frac{A_3 \times R_2}{1 + R_2} \quad (2)$$

$$A_3 = \frac{X \times R_3}{1 + R_3} \quad (3)$$

其中: A_1 ——厌氧池的 MLSS, g/L;
 A_2 ——缺氧池的 MLSS, g/L;
 A_3 ——好氧池的 MLSS, g/L;
 X ——膜池的 MLSS,规范推荐值为 8~10 g/L,本工程取 10 g/L;
 R_1 ——缺氧池出水端至厌氧池进水端的回流比,一般为 100%~200%,本工程取 150%;
 R_2 ——好氧池出水端至缺氧池进水端的回流比,一般为 300%~500%,本工程取 300%;
 R_3 ——膜池出水端至好氧池进水端的回流比,一般为 400%~600%,本工程取 400%。

同时,生化池总污泥负荷取值为 0.063 kg BOD₅/(kg MLSS·d),反硝化速率为 0.045 kg NO₃⁻-N/(kg MLSS·d)。利用式(1)~式(3)计算 AAO 各区的 MLSS 计算结果如表 2 所示。

表 2 AAO 各反应池设计 MLSS
 Tab. 2 Design MLSS of AAO Reaction Tanks

| 反应池 | 设计值 |
|--------------------------------|-----------------|
| 膜池设计 MLSS/(g·L ⁻¹) | 10.0 |
| 三级回流比 | 4.0 : 3.0 : 1.5 |
| 好氧池 MLSS/(g·L ⁻¹) | 8.0 |
| 缺氧池 MLSS/(g·L ⁻¹) | 6.0 |
| 厌氧池 MLSS/(g·L ⁻¹) | 3.6 |

逐级回流方式中生物反应池各工艺段实际流量也因回流比差异而不尽相同,各工艺段实际流量较传统 AAO 工艺大。准确计算出各工艺段的真实流量对于设计参数的选取具有重要的意义。结合图 2 工艺流程,流量计算如式(4)~式(7)。

$$Q_1 = (1 + R_1) \times Q \quad (4)$$

$$Q_2 = (1 + R_1 + R_2) \times Q \quad (5)$$

$$Q_3 = (1 + R_2 + R_3) \times Q \quad (6)$$

$$Q_4 = (1 + R_3) \times Q \quad (7)$$

其中: Q ——进水实际流量, m³/h;

Q_1 ——厌氧池实际流量, m³/h;

Q_2 ——缺氧池实际流量, m³/h;

Q_3 ——好氧池实际流量, m³/h;

Q_4 ——膜池实际流量, m³/h。

表 3 AAO+MBR 各反应池真实流量
 Tab. 3 Practical Flow Rate of AAO+MBR Reaction Tanks

| 反应池 | 真实流量 |
|----------------------------|-----------------|
| 三级回流比($R_1 : R_2 : R_3$) | 1.5 : 3.0 : 4.0 |
| 膜池流量(Q_4) | 5Q |
| 好氧池流量(Q_3) | 8Q |
| 缺氧池流量(Q_2) | 5.5Q |
| 厌氧池流量(Q_1) | 2.5Q |

综上,在明确 AAO 各工艺单元回流比及实际流量后,主要设计参数如下(以近期 30 000 m³/d 生物反应池计算为例)。整个 30 000 m³/d 生物反应池分为两组,每组处理规模为 15 000 m³/d。设计厌氧池 HRT 为 1.2 h,有效水深为 7.0 m,单位推流功率为 7.0 W/m³,推流器功率为 4.0 kW,MLSS 为 3 600 mg/L。设计缺氧池 HRT 为 1.8 h,有效水深为 7.0 m,单位推流功率为 7.0 W/m³,其中 1#缺氧池推流器功率为 3.0 kW,2#缺氧池推流器功率为 4.0 kW,MLSS 为 6 000 mg/L。设计好氧池 HRT 为 9.3 h,有效水深为 7.0 m,曝气强度为 5 623.16 m³ O₂/h,

MLSS 为 8 000 mg/L。

3) MBR 膜池

MBR 膜在污水及废水处理领域应用广泛,目前市场上的 MBR 膜组件主要可以分为无机膜和

有机膜两大类。无机膜的主要是陶瓷膜,而有机膜又根据膜形态的不同分为 MBR 中空纤维膜和 MBR 板式膜。

表 4 MBR 中空纤维膜与板式膜对比

Tab. 4 Comparison of MBR Hollow Fiber Membrane and Plate Membrane

| 膜类型 | 优点 | 缺点 |
|-------|--|--------------------------|
| 中空纤维膜 | 比表面积大;价格相对低廉;产水水质好;抗拉伸性强,机械强度高,有效避免断丝的发生;使用寿命长 | 易吸附污泥,抗污染能力差 |
| 板式膜 | 相对轻巧,单个膜组件安装更换较简单 | 价格相对高昂;同等处理规模条件下,膜面积使用量大 |

膜通量是跨膜压差与实际过滤阻力之间动态平衡的结果,受膜材料性质、混合液特征、操作条件等因素影响^[6]。根据《膜生物反应器城镇污水处理工艺设计规程》(T/CECS 152—2017),膜通量取值为 15~25 L/(m²·h)。同类型工程案例的设计平均膜通量如表 5 所示。

表 5 国内同类型工程案例膜通量设计值

Tab. 5 Designed Value of Membrane Flux for Similar Engineering Cases at Home

| 工程名称 | 设计规模/ (m ³ ·d ⁻¹) | 设计平均膜通量/ (L·m ⁻² ·h ⁻¹) |
|-----------------------------|---|---|
| 广州市京溪污水处理厂工程 ^[7] | 10 万 | 14.5 |
| 北京市门头沟第二再生水厂 ^[8] | 8 万 | 15.5 |
| 上海市某污水处理厂 ^[9] | 20 万 | 16.04 |
| 长沙市湘湖污水处理厂 ^[10] | 14 万 | 17.81 |
| 昆明市第十污水处理厂 ^[11] | 15 万 | 19.61 |
| 山东某污水处理厂 ^[12] | 10 万 | 24.1 |
| 张家港金港污水处理厂 ^[13] | 5 万 | 25.0 |

本设计拟采用浸没式聚偏二氟乙烯(PVDF)中空纤维膜,平均流量膜通量设计值为 15.50 L/(m²·h),高峰流量膜通量设计值为 24.49 L/(m²·h)。

运行过程中,膜污染的产生受到多重条件的影响,大体可分为 3 类:膜的性质、操作条件和污泥混合液性质^[14]。在 MBR 实际运行过程中,膜污染导致跨膜压差增大,进而造成产水量下降。为解决膜通量下降的问题,通常采取膜吹扫、在线清洗、离线清洗等方式消除膜污染。

已有案例表明,膜吹扫过程中会存在膜摩擦破皮现象。为避免这一问题的产生,本工程膜吹扫曝气强度根据膜通量的大小实现精准调控,30 000 m³/d 膜处理系统吹扫曝气强度设计值为 188.16 m³/min。

2.2.2 空间布局及结构设计特点

1) 空间布局

根据地块形状大小以及片区内未来污水产生预测量,将总规模 50 000 m³/d 精细化地分为近期 30 000 m³/d 与远期 20 000 m³/d 两个阶段,以匹配地块形状。其中,地块北侧面积偏小,约为 3 094 m²,南侧地块约为 6 445 m²。北侧地块主要布设远期 20 000 m³/d 生化池及膜池对应配套附属设施,南侧地块则布置 50 000 m³/d 的预处理池组,30 000 m³/d 的生化池及膜池对应配套附属设施。本工程操作层平面布置如图 4 所示。

2) 结构设计特点

本工程采用全地下式,并有效利用池体上部空间,用地指标极低。结构设计过程中,除按照工艺要求分布式设计外,还对各个构筑物进行串联共壁设计。主体生化池及膜池均采用框架结构,避免空腔的出现,进而提高土地利用效率。

本工程采用常用且成熟的“钻孔咬合桩+内支撑”的支护结构形式,该方式较适用于本项目周边环境复杂,变形控制要求高的情形。由于本工程岩层较浅,结合施工难易程度、造价等综合考虑后。推荐采用抗浮锚杆+配重(景观覆土)的抗浮措施。

3) 池体上部空间利用

本项目为全地下式污水处理厂,其相关配套附属设施设备均布设于水池上部。根据总体规划布局设计,池体上部附属设施设备包含鼓风机房、加药间、除臭设施、消防水池等。项目地块两个区域配套的附属设施设备采用分散式布设,使配套功能区紧邻对应区域池体上部的主要生产区,有效节约管线、电缆的使用。同时,两个区域生产需求与配套供给相对集中。本工程各典型剖面如图 5 所示。

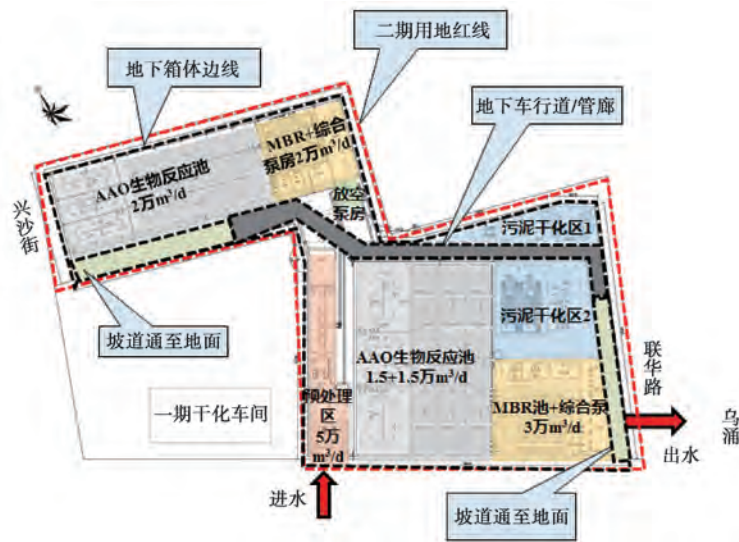


图 4 操作层布置

Fig. 4 Layout Plan of Operation Floor

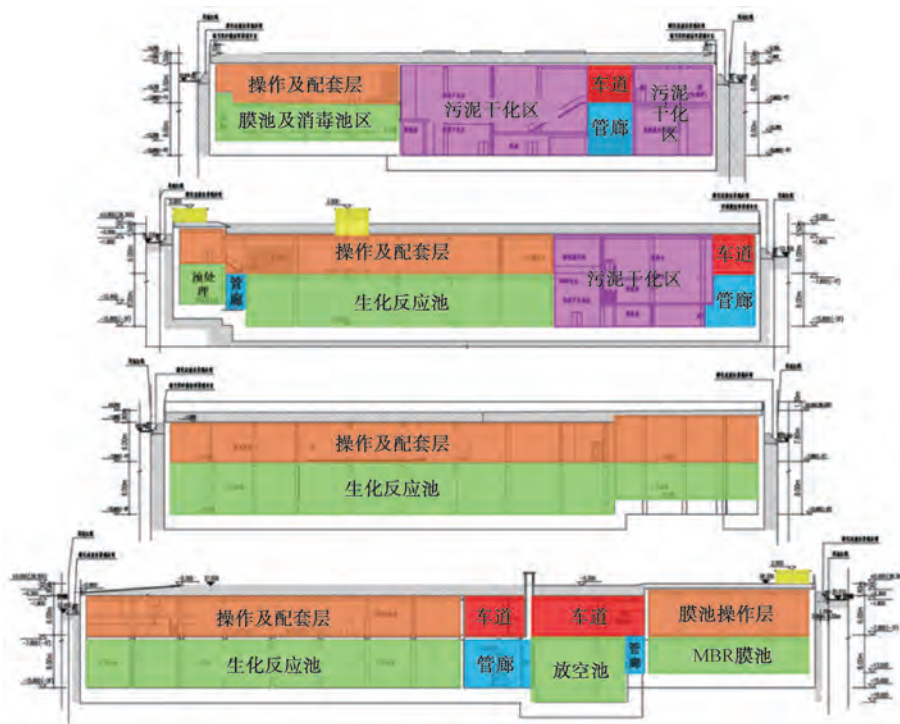


图 5 该工程典型剖面

Fig. 5 Typical Cross-Section of the Project

4) 顶部空间利用

该工程拟用地范围在规划上需满足 8 888 m² 公共绿地的占补平衡要求。因此,地面结合景观设计作为开放式水质净化休闲基地,利用场地高差结合植物种植,通过生物处理达到水净化的效果,将雨水花园打造成有生命的水净化系统。此外,通过游

步道、城市家具结合小品等设施打造一个生态、休闲的特色景观。

2.2.3 通风除臭设计

1) 通风设计要点

全地下式污水处理厂处于封闭空间,常规的自然通风已无法满足换气要求。污水处理箱体构筑物

包括泵房、鼓风机房、加药间等散发有害气体或热量的场所,需采用有组织的机械通风。

同时,考虑到该工程的特殊性,需合理控制臭气扩散,在不同功能区域合理采用正压通风或负压通

风。负压通风区域利用车道自然补风,车道自然补风、总补风风速不大于 2 m/s。污水处理厂各建(构)筑物空间换气标准如表 6 所示。

表 6 各建(构)筑物空间换气标准
Tab. 6 Air Exchange Standards for Each Structure Space

| 建(构)筑物 | 排风换气次数/(次·h ⁻¹) | 送风换气次数/(次·h ⁻¹) | 备注 |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| 低压配电房 | 10 | 排风的 80% | / |
| 高压配电房 | 10 | 排风的 80% | / |
| 变压器室 | / | 排风的 80% | / |
| 消防水泵房 | 6 | 排风的 80% | / |
| 鼓风机房 | 12 | 排风的 80% | 按发热量复核取大值 |
| 泥处理区上部空间 | 2 | 排风的 80% | / |
| 预处理区上部空间 | 2 | 排风的 80% | / |
| 污水处理箱体操作区 | 2 | 排风的 80% | 不足部分由车道补风 |
| 车道 | 2 | / | 车道自然补风 |
| 加药间 | 8(正常)、12(事故) | 排风的 80% | / |

2) 除臭设计要点

该工程根据臭气产生源头,各个工艺单元空间分布等因素,整个项目设置 5 套除臭系统。其中高浓度臭气区域采用“水洗+碱洗+生物滤池+活性炭”组合除臭工艺系统,其余区域均采用生物滤池进行除臭。

1#除臭系统:处理预处理区臭气,单套设备收集处理能力为 10 500 m³/h,共 1 套。2#除臭系统:处理 3 万 m³/d 生物反应池及 MBR 膜池污水区臭气,单套设备收集处理能力为 3.4 万 m³/h。3#除臭系统:处理 2 万 m³/d 生物反应池及 MBR 膜池污水区臭气,单套设备收集处理能力为 2.5 万 m³/h。4#除

臭系统:处理污泥处理车间低浓度臭气区域的臭气,单套设备收集处理能力为 4.0 万 m³/h。5#除臭系统:用于处理污泥处理车间高浓度臭气区域的臭气,单套设备收集处理能力为 1.5 万 m³/h。

2.2.4 污泥处置

污泥处理采用“机械浓缩+化学调质+板框脱水+圆盘干化”工艺路线。本工程要求污泥经减量处置后其含水率降至 40%以下,然后运至热电厂进行掺烧发电。

2.3 主要建(构)筑物及设计参数

工程设计主要建(构)筑物如表 7 所示。

表 7 主要建(构)筑物
Tab. 7 Main Buildings and Structures

| 建(构)筑物名称 | 尺寸/m | 备注 |
|----------|------------------|-----------------------------------|
| 预处理多联体 | 10.90×60.65×7.85 | 含粗/细格栅、曝气沉砂池和膜格栅 |
| 1#生物反应池 | 56.6×46.2×8.0 | 处理量为 3 万 m ³ /d,安装设备 |
| 2#生物反应池 | 65.8×24.9×8.0 | 处理量为 2 万 m ³ /d,设备远期安装 |
| 1#MBR 膜池 | 36.0×28.0×5.7 | 处理量为 3 万 m ³ /d,安装设备 |
| 2#MBR 膜池 | 22.49×24.9×5.7 | 处理量为 2 万 m ³ /d,设备远期安装 |
| 放空泵房 | 14.0×6.0×10.2 | / |
| 污泥干化区 | 28.8×31.0×14.5 | / |

2.4 设计特点小结

工艺选择:地下式污水处理厂在工艺组合选择上,除满足基本的处理要求外,还需要优先考虑工艺

的节地属性。一方面,地下基坑支护和地下主体结构费用能大为降低,另一方面,更有利于提高用地负荷率。

集约设计:地下式污水处理厂各个处理单元建(构)筑物需要进行合理的串联组合共壁设计,以最大限度地利用地下空间。同时,共壁设计能够减少管材的使用。

通风除臭:有效的空间排烟、通风、除臭措施是

保障工程项目安全、稳定运行的必要条件。

生产运维:科学地设计地下空间的生产运行管理通道,是便捷安全生产的前提。本工程操作层通过车行道、电梯、楼梯有效的联通,方便运维人员到达各个生产区域(图6)。

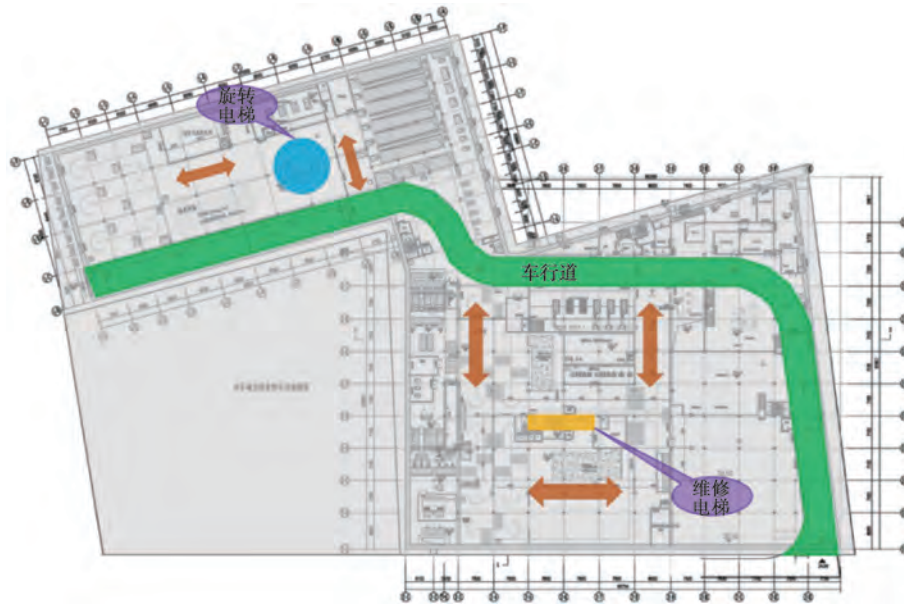


图6 操作层交通组织平面布置

Fig. 6 Layout Plan of Traffic Organization for Operation Level

景观设计:精致的地面景观设计除了满足该地块的绿地补偿要求外,也是提升整个污水处理厂品质的强有力保障。将地面打造为融入城市的花园绿地,起到良好的环保宣传教育作用。

3 工程效益分析

3.1 项目效益分析

3.1.1 造价成本分析

通过以下技术措施,该工程建设成本大幅缩减:

(1)通过地下箱体的上抬,降低基坑深度;(2)优化

工艺单元的水头损失,尽可能采用重力流,降低动力提升比例;(3)通过箱体提升侧壁的开窗设计,加强自然采光,减少补光措施占比。

该工程概算总投资为 35 359.58 万元,工程总投资技术经济指标为 7 072.0 元/(m³·d⁻¹)。相较于广州市同类型项目其造价水平具有一定的优势(表8)。工程直接费建设单位成本低于广州市同等规模类型项目(广州案例2)8.5%。

表8 同类项目投资比较

Tab. 8 Comparison of Investments in Similar Projects

| 项目 | 本工程(5万 m ³ /d) | 广州案例1(3万 m ³ /d) | 广州案例2(5万 m ³ /d) | 广州案例3(8万 m ³ /d) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 主体工艺 | AAO+MBR | CAST+深度处理 | CAST+深度处理 | AAO+MBR |
| 第一部分工程费用/(元·m ⁻³) | 5 322 | 7 765 | 5 816 | 10 279 |
| 工程建设其他费用/(元·m ⁻³) | 532 | 643 | 609 | 980 |
| 预备费/(元·m ⁻³) | 293 | 25 | 193 | 559 |
| 土地开发费用/(元·m ⁻³) | 925 | 5 760 | 6 138 | 0 |
| 总投资/(元·m ⁻³) | 7 072 | 14 194 | 12 755 | 11 817 |

注:CAST为循环式活性污泥法。

3.1.2 运行成本分析

在 100% 生产负荷下,本工程生产运行成本为 0.74 元/m³ 污水(电费+药剂费)。相较于同类型工程项目其运行费用水平具有明显的优势(表 9)。

表 9 同类项目生产成本比较

Tab. 9 Comparison of Production Costs for Similar Projects

| 项目 | 生产成本 |
|------------------------------|---|
| 本工程(5 万 m ³ /d) | 0.74 元/m ³ 污水 |
| 案例 1(8 万 m ³ /d) | 0.985 元/m ³ 污水 ^[15] |
| 案例 2(15 万 m ³ /d) | 0.900 元/m ³ 污水 ^[16] |
| 案例 3(10 万 m ³ /d) | 0.843 元/m ³ 污水 ^[7] |

3.2 潜在开发收益

该项目污水处理厂地面目前设计为生态共享的休闲园地,除了良好环境效益外,也可以作为环保教育基地、市民公共休闲公园,社会效益十分显著。结合建设单位的规划建设需求,未来项目地块如进行综合开发,污水处理厂顶部空间可与周边地块统筹考虑,综合衔接。实现地块价值的正向增值,存在潜在的开发收益。

4 结论

地下式污水处理厂正成为国内当下城市污水处理厂的主推建设形式。本项目在不规则用地形状、复杂的场地周边环境、极低的建设用地指标及地上高水平建设开发的预期之下实现工程设计。为今后同类项目的设计提供良好示范。

(1) 采用“AAO+MBR”工艺,在同等进出水要求下,具有更加集约用地的属性,单位水量用地指标仅为 0.20 m²/(m³·d⁻¹)。

(2) 通过合理的技术措施,有效降低了本项目的单位建设成本,使其低于同地区同类型项目,其单位建设成本为 7 072 元/m³。

(3) 本工程项目用地负荷率比同类项目提高了 36%,工程直接费建设单位成本低于广州市同等规模类型项目 8.5%。

参考文献

[1] STEPHENSON T, JUDD S, JEFFERSON B, et al. Bioreactors membrane for wastewater treatment [M]. London: IWA Publishing, 2000.

[2] 黄霞,曹斌,文湘华,等.膜-生物反应器在我国的研究与应用新进展[J].环境科学学报,2008,28(3):416-432.

HUANG X, CAO B, WEN X H, et al. State-of-the-art of membrane bioreactors: Research and application in China[J].

Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 416-432.

[3] 李庆桂.全地下式污水处理厂设计要点分析[J].净水技术,2022,41(9):156-161.

LI Q G. Analysis of key design points of underground wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2022, 41 (9): 156-161.

[4] 张丹红.试析 A²/O+MBR 工艺在城市污水处理中的应用 [J]. 工程技术, 2016(7): 196-196.

ZHANG D H. Analysis of the application of A²/O+MBR process in urban wastewater treatment [J]. Engineering Technology, 2016(7): 196-196.

[5] 李淑花,仲奔腾,李涛,等.MBR 膜处理工艺在大型污水处理厂中的应用[J].绿色环保建材,2017(1):168-168.

LI S H, ZHONG B T, LI T, et al. Application of MBR membrane treatment process in large-scale sewage treatment plants [J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2017(1): 168-168.

[6] 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.

[7] 陈贻龙.地下式 MBR 工艺在广州京溪污水处理厂的应用 [J]. 给水排水, 2010, 36(7): 51-54.

CHEN Y L. Application of underground MBR in Guangzhou Jingxi wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7): 51-54.

[8] 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,2019,45(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, 45(10): 42-46.

[9] 高原.AAO-MBR 工艺提标改造小型城市污水处理厂[J].水处理技术,2018,44(8):126-128.

GAO Y. Upgrading and reconstruction of small urban wastewater treatment plant by AAO-MBR technology [J]. Technology of Watertreatment, 2018, 44(8): 126-128.

[10] 潘兆宇,张文,吴未红,等.AAO-MBR 工艺在湘湖污水厂提标改造工程中的应用[J].净水技术,2019,38(8):26-31.

PAN Z Y, ZHANG W, WU W H, et al. Application of AAO-MBR process in upgrading and reconstruction project of Xianghu WWTP [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(8): 26-31.

[11] 邱维.昆明市第九、第十地下污水处理厂设计实例分析 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 22-27.

QIU W. Design principle of the ninth and the tenth underground wastewater treatment plants in Kunming City [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10): 22-27.

- [12] 郑枫, 慕杨, 孙逊. MBR 工艺用于山东省某污水处理厂扩建工程[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 81-84.
ZHENG F, MU Y, SUN X. MBR process used in expansion project of a sewage treatment plant in shandong province [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 81-84.
- [13] 杨曦凯, 田海成, 王冠, 等. 济南华山全地下水水质净化厂 AAO+MBR 工艺设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 81-83.
YANG X K, TIAN H C, WANG G, et al. Design of AAO and MBR process of Huashan underground wastewater purification plant in Jinan [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 81-83.
- [14] 胡松, 阜崑, 姜若菡, 等. 地下式污水处理厂 MBR 膜污染分析及应对策略[J]. 给水排水, 2021, 47(5): 48-49.
HU S, FU W, JIANG R H, et al. Analysis and countermeasures of MBR membrane pollution in underground wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 48-49.
- [15] 陈志真, 邱明. 西北地区某全地下式 MBR 工艺污水处理厂的设计与运行[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 154-161.
CHEN Z Z, QIU M. Design and operation of a full underground MBR process WWTP in northwest China [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 154-161.
- [16] 朱圆圆, 杜平, 徐百龙, 等. AAO-MBR 工艺在大型地下式污水处理厂中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 274-278.
ZHU Y Y, DU P, XU B L, et al. Application of AAO-MBR process in large underground WWTP [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 274-278.

(上接第 134 页)

- [10] GAUSMANN M, GÖSSI A, BERTRAM F, et al. Electrochemical membrane-assisted pH-swing extraction and back-extraction of lactic acid [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 289: 120702. DOI: 10.2139/ssrn.3990532.
- [11] SONG P, WANG M, ZHANG B, et al. Fabrication of proton permselective composite membrane for electro dialysis-based waste acid reclamation [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 592: 117366. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117366.
- [12] SUN M, HUANG J, XIA Z X, et al. Investigation of phosphoric acid and water transport in the high temperature proton exchange membrane fuel cells using a multiphase model [J]. AIChE Journal, 2022(8): 68. DOI:10.1002/aic.17708.
- [13] HUANG H, XU S, ZHOU J, et al. Mitigation of chemical degradation in perfluorosulfonic acid proton exchange membrane using regenerable hindered amine functionalized carbon quantum dots [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 636: 119614. DOI:10.1016/j.memsci.2021.119614.
- [14] HALALI M A, LAROCQUE M, LANNON C F D. Investigating the stability of electrically conductive membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 627: 119181. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119181.
- [15] 米青. 阳离子交换膜等离子体改性强化离子选择性能实验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
MI Q. Experimental study on plasma modification of cation exchange membrane to enhance ion selectivity [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [16] 雷雪玲. 水合金属离子簇 $[M(H_2O)_n]^{2+}$ ($M=Ca, Fe, Pb$) 结构与性质的理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
LEI L X. Theoretical investigation of structures and properties of the hydrated metal ion clusters $[M(H_2O)_n]^{2+}$ ($M=Ca, Fe, Pb$) [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [17] 王绍州. 单价选择性阳离子交换膜的制备及其处理重金属废水研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
WANG S Z. Preparation of monovalent selective cation exchange membrane and its treatment of heavy metal wastewater [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [18] DAI F S, HUANG H, CHEN B, et al. Recovery of high purity lead from spent lead paste via direct electrolysis and process evaluation [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 224: 237-246. DOI: 10.1016/J.SEPUR.2019.05.023.