

城镇给排水工程设计案例专栏

张超, 刘成军, 陈力子, 等. 西安某地下式污水处理厂的设计特点与应用[J]. 净水技术, 2024, 43(4):161-168.

ZHANG C, LIU C J, CHEN L Z, et al. Design characteristics and application of an underground WWTP in Xi'an[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4):161-168.

西安某地下式污水处理厂的设计特点与应用

张超¹, 刘成军^{1,2,*}, 陈力子¹, 周思廷¹, 谭潇¹, 周欣², 马鑫欣¹

(1. 北京智宇天成设计咨询有限公司, 北京 101100; 2. 四川蓉信开工程设计有限公司, 四川成都 610100)

摘要 近年来, 随着生态文明建设的大力推进, 城市生态环境品质愈发重要, 为减少污水处理厂对生态环境的影响, 促进污水处理厂建设与城市生态公园建设和谐发展。西安市某污水处理厂采用兼具全地下式和半地下式优势的建设形式, 应用多模式生化与新型反硝化的核心污水处理技术, 在地下空间实现污水净化, 在地上空间实现环境融合。文章分析生态公园内地下式污水处理厂的厂址特点、总体方案, 详细阐述了污水处理厂高程、平面、工艺、消防、资源利用等方面的工程设计特点, 为污水处理厂建设与城市生态公园建设相结合的模式提供借鉴。项目建成后稳定运行, 出水水质指标 TN 达到《西安市城镇污水处理厂再生水化提标改造和加盖除臭工程三年行动方案(2018—2020年)》水质标准, 其余水质指标达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》A 标准。

关键词 地下式污水处理厂 生态公园 总体方案 工程设计 工艺 消防

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2024)04-0161-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.04.020

Design Characteristics and Application of an Underground WWTP in Xi'an

ZHANG Chao¹, LIU Chengjun^{1,2,*}, CHEN Lizi¹, ZHOU Siting¹, TAN Xiao¹, ZHOU Xin², MA Xinxin¹

(1. Beijing Zhiyutiancheng Design Consulting Co., Ltd., Beijing 101100, China;

2. Sichuan Rongxinkai Engineering Design Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract In recent years, with the vigorous promotion of the construction of ecological civilization, the quality of urban ecological environment has become more and more important. In order to reduce the impact of WWTPs on the ecological environment, and promote the harmonious development of the construction of WWTPs and urban ecological parks, the construction form with the advantages of underground and semi-underground is adopted by the WWTPs in Xi'an. Multi-mode biochemical process and new denitrification is used as the core process, which can purify wastewater in underground space and intergrate the environment in above-ground space. The site characteristics and overall plan of underground type WWTPs in the ecological park are analyzed, and the engineering design characteristics of WWTPs are detailedly elaborated in terms of elevation, layout, process, fire protection, resource utilization, etc., so as to provide reference for the combination model of underground type WWTPs construction and urban ecological park construction. After the project completed, the production operation is stable, and the effluent TN can meet the criteria specified in Xi'an Urban Wastewater Treatment Plant Regeneration Hydration Upgrading and Deodorization Project Three-Year Action Plan (2018—2020), and the other effluent indices can meet the criteria A specified in the Shaanxi Province Yellow River Basin Wastewater Comprehensive Discharge Standard.

Keywords underground WWTP ecological park master scheme engineering design process fire protection

[收稿日期] 2023-07-19

[作者简介] 张超(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事市政污水处理方向相关工作, E-mail: zhangchaoscu@163.com。

[通信作者] 刘成军(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事污水处理设计、咨询及工艺研究, E-mail: lcj0313@qq.com。

近年来,我国城市化和更新进程飞速,市政基础设施等城市服务体系略显缺失。党的十八大以来,城市生态文明建设愈发重要,公园绿地作为优质的公共绿色空间是市民对美好生活的迫切需求。因此,市政基础设施建设与公园绿地需求协调关系严峻,呈现相互制约的发展态势,如何平衡好城市市政基础设施建设和公园绿地建设是一个亟待解决的问题^[1]。那么,地下式污水处理厂作为市政基础设施的重要组成部分,以其集约化布置、资源化利用、生态化融合的特色^[2-3],在地下空间实现污水净化,在地上空间系统打造生态景观、科普教育、水景绿化等元素,对城市公园绿地的增加是一项重要措施。

本文以西安某地下式污水处理厂为案例,从空间利用、平面布置、生态环境品质提升等方面分析生态公园内地下式污水处理厂的厂址特点、总体方案,重点阐述平面、高程、工艺、消防、资源利用等方面的工程设计特点,为类似工程建设提供参考。

1 项目概况

1.1 项目规模

西安某地下式污水处理厂设计规模为 50 000 m³/d,位于生态公园内,占地面积约为 40 亩(1 亩≈666.67 m²)。

1.2 污水处理标准

本项目主要处理服务范围内的生活污水、餐厨排水等,出水水质主要指标执行《陕西省黄河流域污水综合排放标准》表 1 中 A 标准,TN 执行《西安

市城镇污水处理厂再生水化提标改造和加盖除臭工程三年行动方案(2018—2020 年)》中要求标准(表 1)。污水经处理达标后就近排放至皂河,补充皂河水资源,提升皂河水环境质量。

表 1 设计进、出水水质
Tab. 1 Designed Influent and Effluent Quality

| 项目 | 进水指标 | 出水指标 | 去除效率 |
|-------------------|----------|-----------|--------|
| BOD ₅ | 250 mg/L | ≤6 mg/L | 97.60% |
| COD _{Cr} | 500 mg/L | ≤30 mg/L | 94.00% |
| SS | 290 mg/L | ≤10 mg/L | 96.55% |
| 氨氮 | 50 mg/L | ≤1.5 mg/L | 97.00% |
| TN | 65 mg/L | ≤12 mg/L | 81.54% |
| TP | 8 mg/L | ≤0.3 mg/L | 96.25% |
| pH 值 | 6~9 | 6~9 | - |

1.3 污泥处理标准

本项目污泥脱水干化至含水率为 40% 以下外运,充分实现污泥的减量化。

2 厂址特点和总体方案

2.1 厂址特点

本项目选址位于城市生态公园内,北侧为市政快速路,南侧、西侧与生态公园接壤,东侧为人员密集的住宅小区。厂址范围为高低起伏的微地形,地形标高为 418.0~431.5 m,由东南向西北降低,场地出入口设置于北侧,如图 1 所示。

该厂址具有如下特点。

(1) 厂址地块为异形,总面积约为 40 亩,在建

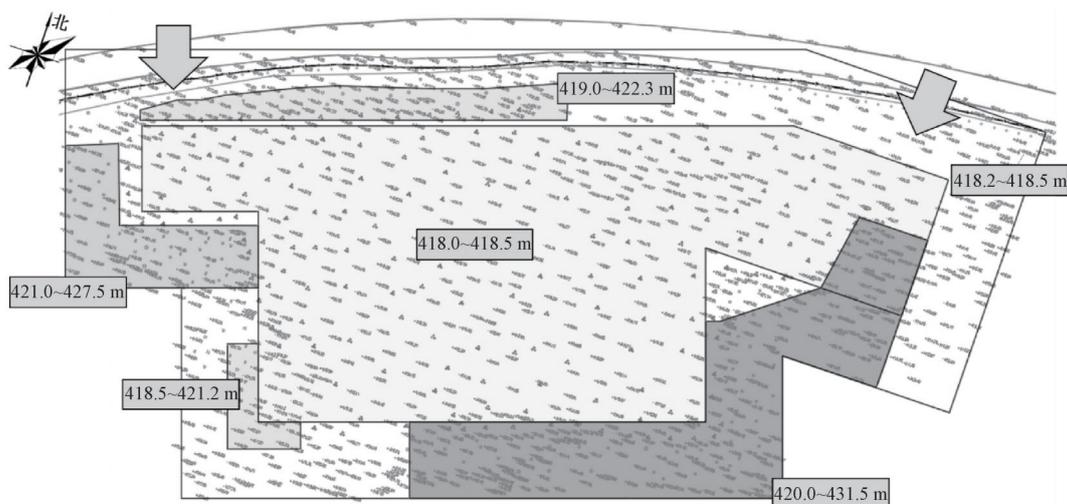


图 1 厂区现状地面标高

Fig. 1 Ground Elevation of Existing WWTP

设规模、进水浓度、出水标准的多重限定条件下,可充分利用的土地面积有限。

(2)厂址地块为公园绿地,海绵城市建设年径流总量控制率 $\geq 80\%$,仅全地下式污水处理厂建设形式满足规划各项指标要求。

(3)厂址南侧生态公园地块标高为 420.0~431.5 m,北侧市政公园地块标高为 419.0~422.3 m,市政道路标高为 416.2~418.0 m,本项目既要与南侧生态公园有效融合,又要与北侧市政道路便捷衔接。

综合上述特点,本项目有必要建设为土地集约型、环境友好型的全地下式污水处理厂,以满足用地面积、规划、周边环境等各方面的需求。但由于全地下式污水处理厂的结构形式,基坑深度大、消防设施要求高、工程投资高,特别是运营期生产运输较为复杂、汛期水淹风险高^[4-6]。因此,结合本项目地块生

态公园的微地形特点,拟将污水处理厂箱体整体抬高,合理确定竖向空间布局、优化平面布置、简化消防设计,建设一座兼具全地下式和半地下式优势的污水处理厂。

2.2 总体方案

2.2.1 总平面布置

根据规划限定、厂址地形条件及周边环境要求,总体布置分布如下:南侧为污水处理厂箱体(以下简称“箱体”),依生态公园微地形修建,箱体顶层进行覆土绿化和景观打造,结合现状生态公园步道,延伸覆土绿化至箱体顶层,形成连贯的场地空间;北侧为消防车道,与市政道路顺接,既满足厂区生产运维和生活办公通行,又满足消防安全疏散,消防车道结合北侧微地形设置成坡形车道,对箱体起到遮挡和消隐的作用;东侧为综合用房和场前广场。各元素平面关系如图 2 所示。



图 2 厂区总平面布置图

Fig. 2 General Layout of WWTP

2.2.2 高程布置

根据地下式污水处理厂功能要求,箱体竖向结构分为 3 层(池体层、操作层、顶层):池体层为污水处理构筑物和管廊,污水处理构筑物层高根据各处理单元工艺需求确定,管廊层标高为 411.8~414.1 m,层高约为 6.2 m;操作层为敞开空间,大多布置工艺设备、管线、功能房间等,操作层标高为 418.5 m,操作层层高为 4.0~5.5 m;顶层为生态景观公园,覆土为 0.6~1.5 m,设置植草沟、透水铺装、绿色屋顶、下沉式绿地

等措施,顶层标高为 423.5~425.0 m。

箱体北侧近市政道路,利用现状微地形特点设置消防车道,箱体北侧车道标高为 420.0 m,坡向厂区东、西两侧出入口,作为整个厂区及箱体操作层和管廊层消防疏散通道,使箱体管廊层和操作层埋深均小于 10 m;箱体东侧广场和西侧道路标高为 418.0~419.0 m,基本与箱体操作层平接,形成环形道路,提高生产运输便捷性;箱体西、南侧顶层与现状公园直接连接,形成微地形景观绿化,使箱体顶层

作为生态公园的功能补充和景观延伸,提升城市生态公园整体效果。厂区南北方向高程关系如图3所示。

本项目接纳水体50年1遇洪水位为417.0 m,箱体操作层及厂区道路均设计高于洪水位,有效降低了污水处理厂的水淹风险。



图3 厂区高程关系示意图

Fig. 3 Elevation Relation Diagram of WWTP

3 工程设计要点

3.1 箱体平面设计要点

本项目箱体总平面设计充分考虑水流、人流、物流,对各个处理系统进行合理分区、紧凑布置,如图4所示。箱体进水自西南侧接入,至北侧接出,各个构筑物分南、北两侧布置,南侧由西向东依次布置预

处理系统、二级生物处理系统,北侧由东向西依次布置深度处理系统、尾水系统、污泥处理系统。变配电间、鼓风机房、药剂投加间、除臭塔等生产用房集中于各系统操作层板上。箱体中上部设置东西方向贯穿的室内车行道,与厂区消防车道顺接,可满足污泥外运、生产药剂输入、设备运维通行。

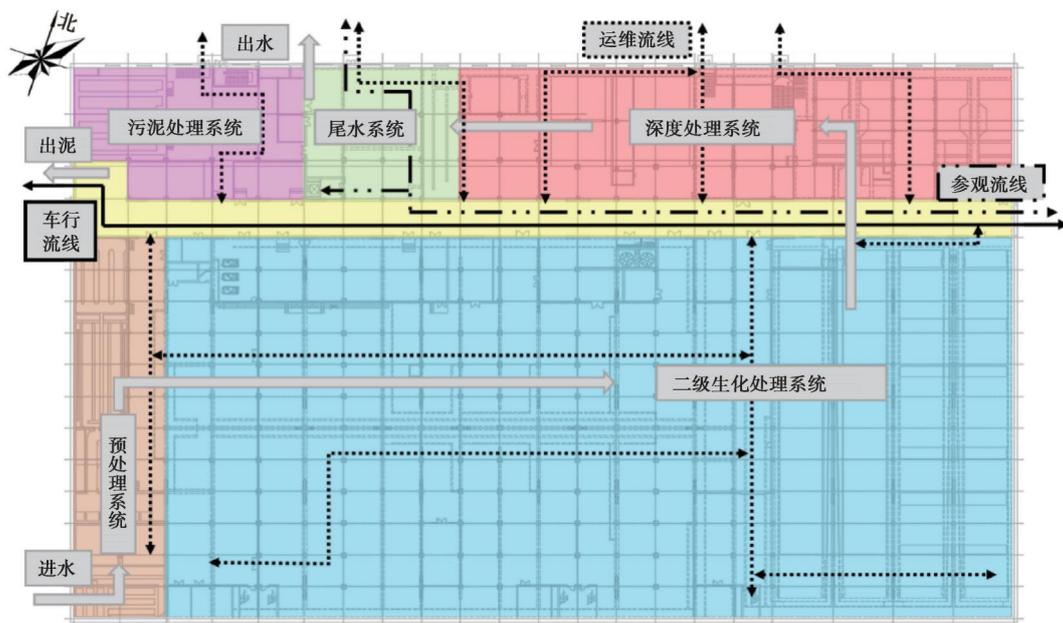


图4 箱体总平面布置图

Fig. 4 General Layout of the Box

箱体平面设计特点如下。

(1)箱体布置方正,呈非对称式布局,各工艺处理区按功能合理划分,产生臭气、泥渣的区域集中于箱体南侧,便于密封、收集;产生污泥的区域布置于箱体西侧车行道出入口,便于外运,减少对箱体环境影响;敞开水池区域布置于箱体北侧,近综合用

房、厂区消防车道,便于参观、巡检。

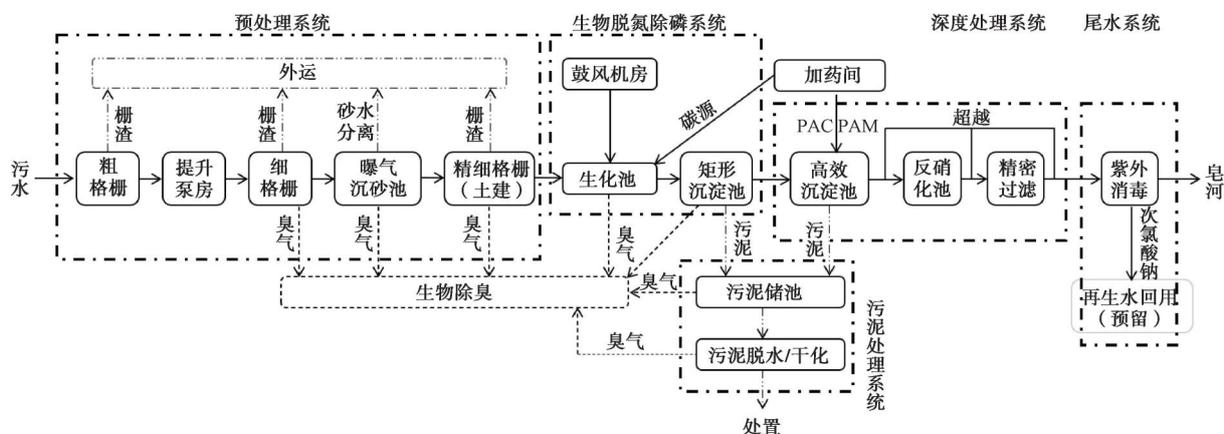
(2)各工艺构筑物顺水流布置,有序衔接,流程简短、清晰,水头损失小。

3.2 工艺设计要点

根据本项目进水水质特点,污水采用“粗、细格栅+曝气沉砂池+多模式可切换生化池+矩形沉淀

池+高效沉淀池+新型反硝化池+精密过滤器+紫外线消毒”,污泥采用带式浓缩脱水与低温风冷干化

组合工艺,臭气采用高效生物除臭技术,工艺流程如图5所示。



注:PAM—聚丙烯酰胺;PAC—聚合氯化铝。

图5 工艺流程图

Fig. 5 Flow Chart of Process

本项目采用多模式生化与新型反硝化的污水处理工艺是二级处理、深度处理工艺新的尝试,可实现生化处理工艺的灵活控制和污染物各项指标的深度强化处理,为地下式污水处理厂的工艺选择和设计提供借鉴。

(1) 二级处理工艺

本项目二级处理工艺为多模式可切换运行生化池+矩形沉淀池的组合工艺,主要是考虑灵活应对污水处理厂进水水质的周期性和季节性波动。虽然一定程度上增加了工程投资,但是在出水稳定运行和运行成本节约方面的优势是较为显著的。具体设计如下。

多模式可切换的生化池,是以改良 AAO 模式为

基础设计,平均水力停留时间为 18.7 h,其中:预脱硝区为 0.5 h、厌氧区为 1.0 h、缺氧区为 5.7 h、好氧区为 11.5 h。拟好氧区池容 2.5 h,作为兼性区使用,既可作为缺氧区运行,也可作为好氧区运行,从而实现多模式的切换运行功能。矩形沉淀池设计表面负荷为 $1.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,采用矩形折流式周进周出形式,通过特殊的布水形式和排泥形式,提高表面水力负荷和固体负荷。生化工艺布置如图6所示。

(2) 深度处理工艺

本项目深度处理工艺为高效沉淀池、反硝化池、精密过滤。高效沉淀池设两座,设计混合区、絮凝区平均水力停留时间分别是 2.9、10.5 min,沉淀区表面负荷为 $9.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。反硝化池设 8 组,设计

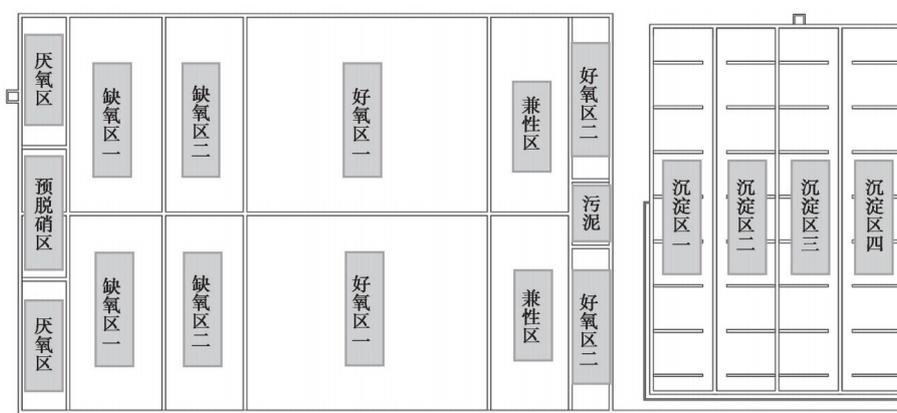


图6 生化工艺布置图

Fig. 6 Layout Plan of Biological Process

反硝化负荷为 $0.43 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、平均滤速为 8.0 m/h 。精密过滤设 2 组。

(3) 工艺设计特点

1) 生化池、二沉池、高效沉淀池均采用矩形构筑物形式,反硝化池、精密过滤采用模块化设备组,布置紧凑、集约,空间利用率高,节约箱体占地。

2) 可切换生化池设计,可实现改良 AAO 工艺与 Bardenpho 工艺的灵活切换,适用于不同水质工况下污染物的强化处理,具有较好的脱氮除磷效果和应对进水水质波动的能力。

3) 反硝化池设计耦合了生物滤池和生物膜工艺的技术优势,通过采用新型轻质滤料和高填充率的固定床构型,实现深度脱氮功能,保障出水稳定达标。

3.3 消防设计要点

箱体的消防设计一般是按照《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)(2018 年版)对地下厂房的相关要求执行,目前存在两个问题:一是严格按照规范执行,会使箱体划分复杂、消防疏散措施繁多,箱体有效运维空间和箱体顶层利用空间严重减少;二是突破规范要求,采用专项评估和评审消防的方式,将直接导致设计周期变长、建设成本增加,特别是小规模的项目问题更加凸显^[7]。因此,本项目在设计时,考虑设计周期紧张的因素,严格按照《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)(2018 年版)执行,并在规范允许的前提下,最大限度地优化、简化设计。

(1) 消防分区及人员疏散设计

本项目箱体地下建筑面积为 $30\,438 \text{ m}^2$,竖向分 2 层,定义为戊类厂房、一级耐火等级。

本项目共划分防火分区 10 个,每个防火分区扣除水池、检修通道等区域后,采用自动喷淋灭火系统,面积均控制在 $2\,000 \text{ m}^2$ 以内。每个防火分区通过防火墙或防火卷帘分隔,均设置至少 2 个安全出口,安全出口采用封闭楼梯间或防火门直通室外和借用防火门通向相邻防火分区的组合方式,防火分区内任意一点的安全疏散距离均小于 60 m 。

整个箱体所有防火分区的划分思路是,将直通室外的安全出口布设在箱体南、北两侧,使箱体北侧防火分区利用厂区消防车道进行安全疏散,箱体南侧防火分区利用箱体顶层公园进行安全疏散。以此划分,一方面,可以取消消防电梯、减少楼梯间等配置;另一方面,可以集中布置楼梯间,为箱体顶层整

体打造创造条件。

(2) 通风系统与防排烟系统

在前述防火分区划分的基础上,进行通风系统和防排烟系统设计。本项目对整个箱体进行通风设计,以消除箱体内部余热、余湿和进行运维空间内污染物浓度控制。整个箱体的排风均采用机械排风方式,各区域排风量根据现行通风设计规范要求及区域功能需求确定,其中:设备用房及配电间按照设备发热量,药剂投加间换气次数为 12 次/h ,预处理及污泥处理区域等环境质量差的操作层空间换气次数为 6 次/h ,操作层大空间及池体层管廊区域换气次数为 4 次/h 以下;整个箱体的送风采用机械或自然送风方式,各区域送风量均按照排风量的 80% 确定,其中:防火分区 1~7 为机械送风,防火分区 8~10 在箱体北侧设置百叶窗实现自然送风。

本项目对封闭楼梯间进行防烟设计,整个箱体共设置 7 个封闭楼梯间,其中,箱体北侧 2 个楼梯间由管廊层至厂区消防车道,箱体南侧 5 个楼梯间由操作层至箱体顶层,均为地下一层且直通室外,采用自然送风系统。

本项目仅对管廊层、操作层车行道和参观通道可能有人员经常停留的区域进行排烟设计,水池、设备房间、设备检修区等无可燃物和无人员经常停留的区域不考虑设计。排烟风道、补风风道与通风系统合用,平时通风用,火灾发生时兼作排烟系统。其中,管廊层采用机械通风兼排烟系统,操作层车行道和参观通道利用箱体顶层开设排烟窗实现自然排烟。

(3) 消防设施设计

本项目箱体内分为不同的工艺处理区域,消防设施应在安全、经济的前提下合理区分设置。高、低压配电室设置二氧化碳灭火器,箱体操作层大空间、管廊及生产功能房间均设置磷酸铵盐干粉灭火器。整个箱体(除配电间、操作层敞开水池、池体层构筑物)均按照防火分区设置自动喷淋系统。另外,本项目还按照相关防火规范的要求设计火灾报警系统、消防水池、消防水泵房等。

(4) 消防设计特点

1) 通过设置厂区消防车道作为箱体疏散通道,节省消防电梯 2 台、机械加压送风机房 2 个,减少封闭楼梯间 3 个、送风机房 3 个,提高箱体操

作层运维空间和增加顶层公园绿地面积,节约了工程投资。

2) 楼梯间集中布置在箱体南侧,避免了箱体顶层生产用房分散布置对公园景观整体性的破坏,大大提升顶层公园景观效果。

3) 相邻防火分区送排风机房合建,各防火分区送排风机房交错布设,减少风管交叉占用操作层净高,同时保证区域通风全方位、无死角。

4) 根据人员停留情况和可燃物类别划分箱体,并对各区域进行差异性排烟设计,简化了箱体的防排烟系统;同时,利用箱体顶层布置自动采光排烟天窗,实现排烟和天然采光的三重功能,既是环保节能的体现,又能提升地下空间人员工作环境条件。

3.4 资源节约与利用

本项目节能设计体现在工艺系统、照明、建设形式等方面,在节能降耗的前提下确保污水、污泥达标排放。工艺系统采用可切换运行的生化池、可灵活超越的工况、高效低耗的设备;在生化池、二沉池顶板设置光导照明系统,充分利用室外自然光,节约照明电力;箱体北侧及顶板开设建筑门窗,利用自然采光、通风,降低能耗同时提升运维环境。

本项目采用污水源热泵系统,为综合用房、箱体参观空间提供制冷供暖。系统设计总冷负荷约为 255 kW,设计总热负荷约为 260 kW。

4 运行效果

本项目已于 2022 年 1 月正式投产并进入运营初期,各污水处理构筑物及设备均高效、安全、稳定运转,进水水质各项指标暂未达到设计值,出水主要指标已达到并优于设计要求值。2022 年 6 月—2023 年 5 月实际进出水水质指标如表 2 所示,达标率均为 100%。

5 工程经济指标

本项目总投资约为 4.5 亿元,第一部分工程费用约为 4.0 亿元。污水处理运行成本约为 1.50 元/m³。

6 结语

(1) 城市生态公园地下式污水处理厂总体设计需结合规划限定条件、地形特点和道路交通情况,确定平面和高程布置,选择工程投资少、设计难度小、运维风险低的污水处理厂建设形式。本工程是地下

表 2 实际进出水水质指标

Tab. 2 Actual Influent and Effluent Water Quality Indices

| 项目 | | 进水 | 出水 |
|--|-----|--------|-------|
| BOD ₅ /(mg·L ⁻¹) | 最大值 | 155.00 | 2.00 |
| | 平均值 | 83.2 | 1.41 |
| | 最小值 | 16.20 | 0.20 |
| COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹) | 最大值 | 857.00 | 20.00 |
| | 平均值 | 259.00 | 16.69 |
| | 最小值 | 164.00 | 15.00 |
| SS/(mg·L ⁻¹) | 最大值 | 578.00 | 5.00 |
| | 平均值 | 268.17 | 4.35 |
| | 最小值 | 95.00 | 4.00 |
| 氨氮/(mg·L ⁻¹) | 最大值 | 71.60 | 0.35 |
| | 平均值 | 41.61 | 0.26 |
| | 最小值 | 24.30 | 0.26 |
| TN/(mg·L ⁻¹) | 最大值 | 73.80 | 6.84 |
| | 平均值 | 49.43 | 6.46 |
| | 最小值 | 25.20 | 5.19 |
| TP/(mg·L ⁻¹) | 最大值 | 16.60 | 0.10 |
| | 平均值 | 6.92 | 0.09 |
| | 最小值 | 2.76 | 0.08 |

式污水处理厂合理运用地形条件的典型案例,箱体顶层与现状公园协同打造微地形生态景观公园,补充并拓展了城市公园的功能和空间,最大限度减少污水厂建设对生态环境的影响,是城市生态文明建设的重要体现。

(2) 箱体内各污水处理系统采用模块化设计,分区布局紧凑、集约,运维检修流线、参观检查流线和生产运输流线顺畅、不迂回,有效提高污水处理厂运营管理效率和空间环境质量,为同类污水厂的集约化、模块化布置提供参考。

(3) 污水处理工艺的多模式切换、灵活超越工况,可有效应对水质波动,进一步确保污水处理系统的稳定运行和出水达标。该组合工艺较适用于水质周期性或季节性变化的污水处理项目,特别是 TN 指标变化显著的项目更为适用。

(4) 利用生态公园微地形设计厂区消防车道,降低箱体的消防疏散深度,减少消防电梯、疏散楼梯间、送风机房的设置,提高箱体空间利用率和顶层公园绿化率。该思路严格参考《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)(2018 年版)的防火要求,实现

了消防系统设计的优化、简化,是城市公园地下式污水处理厂消防设计思路的新选择。

(5)充分利用污水热能、太阳能等绿色能源,年标准煤节约达到 83.47 t,年 CO₂ 排放量减少 218.69 t。

参考文献

[1] 房阔,王凯军. 我国地下式污水处理厂的发展与生态文明建设[J]. 给水排水, 2021, 57(8): 49-55.
FANG K, WANG K J. Development of underground wastewater treatment plant and eco-civilization in China [J]. Water Wastewater Engineering, 2021, 57(8): 49-55.

[2] 罗穆喜,朱宇峰. 山坡半地下式污水处理厂总体设计方案[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 34-38.
LUO M X, ZHU Y F. Overall design scheme of semi-underground WWTP at hillside [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(11): 34-38.

[3] 何国钢,侯锋,邵彦青,等. 贵阳青山下沉式污水处理厂设计[J]. 中国给水排水, 2016, 32(4): 51-54.
HE G G, HOU F, SHAO Y Q, et al. Design of Qingshan underground treatment plant in Guiyang City[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(4): 51-54.

[4] 张毅,刘永代,万玉生. 全地下式污水处理厂埋置深度设计优化[J]. 中国给水排水, 2016, 32(18): 49-52.
ZHANG Y, LIU Y D, WAN Y S. Buried depth design optimization of whole underground sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(18): 49-52.

[5] 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.

[6] 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, 59.
CHEN X C. Key points of flood prevention design and engineering examples of underground municipal wastewater treatment plant [J]. Water Wastewater Engineering, 2022, 58(5): 50-54, 59.

[7] 李亮,胡文慧,刘武平. 某地下式污水厂地下空间消防设计与探究[J]. 净水技术, 2019, 38(5): 34-40.
LI L, HU W H, LIU W P. Design and exploration of underground space fire protection for an underground type WWTP [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(5): 34-40.

(上接第 94 页)

SHI Y L, BAO H P, LI W, et al. Systematically analyzing variation of influent pollutant load for municipal wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(10): 64-71.

[7] DAIGGER G T, SICZKA J S, SMITH T F, et al. Marrying step feed with secondary clarifier improvements to significantly increase peak wet weather treatment capacity: An integrated methodology[J]. Water Environment Research, 2017, 89(8): 724-731.

[8] 沈磊, YANG Chester. 新一代多单元 MSBR 在梅村污水厂四期扩建工程中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(4): 46-53.
SHEN L, YANG C. Application of multi-unit MSBR processes in phase IV expansion project of Meicun WWTP [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(4): 46-53.

[9] 刘建明. 多点进水倒置 A²/O + 浸没式超滤用于某半地下污水厂[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 111-115.
LIU J M. Application of multi-point influent reversed A²/O and submerged ultrafiltration process in a semi-underground WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 111-115.

[10] 吕利平,李航,张欣,等. 多点进水对前置预缺氧 A²/O 工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 8-13.

LÜ L P, LI H, ZHANG X, et al. Effect of step-feed on nitrogen and phosphorus removal of pre-anoxic A²/O process[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 8-13.

[11] 许谦,贝德光,陈程程,等. MSBR 工艺除磷——以武鸣污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 71-76.
XU Q, BEI D G, CHEN C C, et al. Phosphorus removal by MSBR process——A case of Wuming WWTP [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 71-76.

[12] 关永年,刘洪波,秦松,等. 污水处理厂总氮提标多模式切换运行[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 73-78.
GUAN Y N, LIU H B, QIN S, et al. Multi-mode switching operation of upgrading standard for total nitrogen removal in WWTP[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 73-78.

[13] 杨正,赵杨,车伍,等. 典型发达国家合流制溢流控制的分析与比较[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 29-36.
YANG Z, ZHAO Y, CHE W, et al. Analysis and comparison of combined sewer overflow (CSO) control in representative developed countries[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 29-36.