

张彪, 赵健, 周昕怡. 某多效能全地下式污水厂集约化设计方案[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 160-167.

ZHANG B, ZHAO J, ZHOU X Y. Integrated design scheme of a multifunctional full-underground WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 160-167.

某多效能全地下式污水厂集约化设计方案

张彪*, 赵健, 周昕怡

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司天津分公司, 天津 300000)

摘要 由于对周边环境影响小及土地利用价值高,近年来国内建设了一批地下式污水处理厂。保定某污水厂处理规模为8万 m^3/d ,现已满负荷运行,2022年启动二期扩建工程。二期工程污水处理设计规模为10万 m^3/d ,污泥处理设计规模按照18万 m^3/d 的污水处理需求考虑,再生水规模为10万 m^3/d ,并建设一座4万 m^3 的初雨调蓄池。二期工程地处市区,用地分散且不规则,设计方案共设置全地下箱体两座。1#箱体内设置预处理区、污泥处理区、初雨调蓄池,污泥处理选取“高压板框+低温干化”工艺;2#箱体内设置生化处理区、深度处理区,深度处理选取“气浮池+超滤/中间提升+臭氧及加氯接触+紫外消毒”工艺。2个箱体功能分区,构(建)筑物集约化布置,实现了污水处理、再生水回用、污泥集中处理、初雨调蓄、文娱休闲等多方面功能需求。

关键词 全地下污水厂 用地分散 集约化设计 多效能 初雨调蓄

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)01-0160-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.01.021

Integrated Design Scheme of a Multifunctional Full-Underground WWTP

ZHANG Biao*, ZHAO Jian, ZHOU Xinyi

(Tianjin Branch, Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract Due to the low impact on the surroundings and high land use value, a number of underground wastewater treatment plants (WWTPs) have been built at home in recent years. Treatment capacity of a municipal WWTP in Baoding is 80 000 m^3/d , which is running at full capacity, and the second phase of the expansion project launched in 2022. The wastewater treatment capacity of Phase II Project is 100 000 m^3/d , the sludge treatment capacity is considered according to the treatment demand of 180 000 m^3/d , the reuse water treatment capacity is 100 000 m^3/d , the capacity of a storm water storage tank constructed along with Phase II Project is 40 000 m^3 . Phase II Project located in the downtown with scattered and irregular land use. In this design, two underground structural boxes were set, 1# box included pretreatment area, sludge treatment area, initial rainwater detention tank, the sludge treatment process was "high pressure frame filter + low temperature drying dehydration"; 2# box included biochemical treatment area, advanced treatment area, the advanced treatment process was "air flotation + ultrafiltration/secondary lift + ozone and chlorine contact + ultraviolet disinfection". These two boxes functions are partitioned, structures and buildings layout integrated, achieve the multi-function requirements of wastewater treatment, reuse water treatment, concentrated sludge treatment, initial rainwater detention, leisure and entertainment.

Keywords full-underground wastewater treatment plant (WWTP) scattered land use integrated design multifunction initial rainwater detention storage

近三十年,我国建设了大批污水处理厂,其中大多采用地上式的布置形式。随着城市发展,部分污水处理厂周边已经演变为环境敏感区或人员聚集

区,地上式污水处理厂与区域周边敏感环境存在不适应、不协调情况,在一定程度上制约了周边地区的经济及社会发展。

受此影响,近年来在公众敏感区中,一批地下式污水处理厂相继建设并投产运行,如深圳布吉污水处理厂、青岛高新区污水处理厂、昆明市

[收稿日期] 2022-03-26

[通信作者] 张彪(1991—),男,硕士,主要从事水环境治理及市政排水研究设计工作,E-mail:zhangbiao5@smedi.com。

第九污水处理厂、上海嘉定南翔污水处理厂、萧山钱江污水处理厂四期工程、北京市槐房再生水厂等。这些地下污水处理厂将各构(建)筑物在地下空间内组团式布置,并利用顶盖建设景观公园、休闲场地或体育运动场所等,可节省占地、提高周边环境品质,易于获得周边居民的接受和支持,缓解“邻避效应”。保定某污水处理厂地处市区,用地分散,在二期扩建工程中亦采取地下式

集约化布置,实现了多方效能,可为类似工程提供一定的参考。

1 工程建设形式及特点分析

1.1 水厂现状及二期扩建功能需求

保定某污水厂地处市区,现状处理规模为 8 万 m³/d,自 1995 年投产运行后进行多次改造。目前,设计进出水水质如表 1 所示^[1]。

表 1 污水厂当前设计进出水水质^[1]

Tab. 1 Current Designed Water Quality of Influent and Effluent in WWTP^[1]

| 项目 | BOD ₅ /(mg·L ⁻¹) | COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹) | SS/(mg·L ⁻¹) | 氨氮/(mg·L ⁻¹) | TN/(mg·L ⁻¹) | TP/(mg·L ⁻¹) |
|------|---|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 进水水质 | 265 | 500 | 465 | 50 | 65 | 12 |
| 出水水质 | ≤6 | ≤30 | ≤5 | ≤1.5(2.5) | ≤10 | ≤0.3 |

注:括号内数值为水温≤12℃时的控制指标;括号外数值为水温>12℃时的控制指标

污水处理工艺为“预处理+五段 Bardenpho+二沉池+超细格栅+磁混凝沉淀+反硝化深床滤池+高级氧化池”^[1],运行良好,出水经府河(大清河水系)最终进入白洋淀。

污水厂现需进行二期工程的建设,并满足以下功能需求。

(1)补充污水处理缺口。当前污水厂进水量超过 9 万 m³/d,管网长期高水位运行,污水外溢现象时有发生,影响府河河道及下游白洋淀水质。采用城市综合用水量指标法、综合生活用水量及工业用水量法对污水处理厂规划年限的污水量进行预测分析,二期工程需扩建 10 万 m³/d 的污水处理规模。

(2)初期雨水调蓄功能。根据排水规划,二期工程建设用地内需设置初期雨水调蓄池,调蓄池服务地块面积约为 1 094 hm²(1 hm² = 10⁴ m²),调蓄量取 6 mm,综合径流系数取 0.55,安全系数取 1.1,设计规模为 40 000 m³。

(3)再生水回用。现状污水处理厂出水(8 万 m³/d)全部回用,二期工程出水亦须考虑全部回用,水质满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)中杂用水水质标准和《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)中观赏性景观用水水质标准。

(4)污泥处理需求。现状污水厂产泥含水率较高,外运处置成本高。根据规划,需将现状污水厂所产污泥打入二期工程,在二期工程中将 18 万 m³/d 污水所产污泥全部脱水至 40% 含水率,外运协同

焚烧。

(5)文娱科教需求。二期工程用地地处市区,周边居民稠密,民众及各相关部门对二期工程用地的使用极为关注,提出了用作科教场所、景观绿地、运动场所等建议及要求。

1.2 污水厂二期建设形式分析

污水厂二期可采用全地下式、半地下、地上式 3 种形式。相较地上式污水厂,全地下式及半地下式污水厂具有以下优点:(1)臭气污染小;(2)噪声污染小;(3)结构紧凑,节省土地资源;(4)水温恒定,有利于污水处理厂稳定运行;(5)上部空间利用方式灵活,土地利用价值高。就本工程而言,现状污水厂为全地上式,1995 年投产时,其所在区域尚为郊区。经二十余年,其周边区域发展为繁华市区。目前,污水厂东侧紧邻市政主干道路,西侧为厂房或住宅,北侧为工业用地,东南侧为加油站。可用于二期建设用地的范围局限于现状污水厂的南侧及西南侧的农田与树林被分隔为 2 块独立且不规则的地块,并受到周边商铺、居住区、市政道路、加油站、高压电力塔、工厂、居民祠堂等多因素制约。经实地踏勘,结合相关政府部门建议及民众诉求,本着少拆迁、少占地的原则,污水厂二期扩建工程共设置 2 个厂区,涉及 2 个不规则地块。地块一现状主要为农田与树林,占地面积共 41 550 m²;地块二现状主要为农田,占地面积共 35 761 m²。

考虑二期工程用地紧张,周边环境敏感因素多,土地功能要求较多,不适合采用地上式污水厂建设

形式。若采用半地下式建设形式,由于箱体二层高出地面 7~8 m,现状地面需要较大放坡才能过渡至箱体顶部,不便于对箱体顶部面积的开发利用,且二期工程需建设埋深较大的初雨调蓄池,半地下形式的基坑开挖深度较大。

因此,二期工程采取全地下形式,将污水处理构(建)筑物整体下沉,操作层位于地面以下,环境友好,上部空间利用方式灵活,景观布局美观实用^[2]。针对用地分散且不规则的特点,二期工程

统筹各构(建)筑物特点及占地,设置两座功能独立的地下箱体。二期工程用地条件及基本布局如图 1 所示。西侧厂区设置全地下 1#箱体,承担污水处理功能,地表建有文体绿地公园、环保科普教育基地及部分工艺构筑物。1#箱体用地避开了东侧高压线及西侧现状商铺区域,减弱了对周边环境的影响。东侧厂区设置全地下 2#箱体,承担预处理、污泥处理及雨水调蓄池功能,地表建有综合楼、厂前区等。

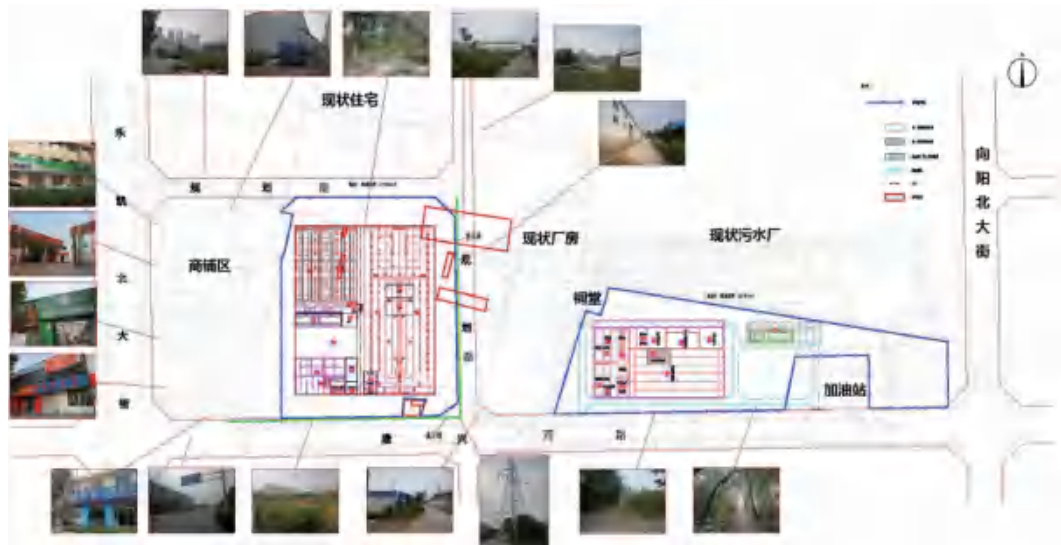


图 1 二期工程用地条件

Fig. 1 Land Conditions of Phase II Project

2 二期工程设计方案

针对用地限制因素多、功能需求多样化特点,二期工程因地制宜,采取全地下式污水厂形式,设置 2

座功能独立的地下箱体。

2.1 设计水质

设计进出水水质如表 2 所示。

表 2 二期工程污水厂设计进出水质

Tab. 2 Designed Water Quality of Influent and Effluent of Phase II Project

| 指标 | BOD ₅ / (mg·L ⁻¹) | COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹) | SS/ (mg·L ⁻¹) | 氨氮/ (mg·L ⁻¹) | TN/ (mg·L ⁻¹) | TP/ (mg·L ⁻¹) | 粪大肠菌群数/ (个·L ⁻¹) |
|------|---|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 进水水质 | 240 | 500 | 350 | 45 | 65 | 8 | |
| 出水水质 | ≤6 | ≤30 | ≤5 | ≤1.5(2.5) | ≤15 | ≤0.3 | ≤1 000 |

注:括号内数值为水温≤12℃时的控制指标;括号外数值为水温>12℃时的控制指标

2.2 工艺路线

二期工程工艺流程如图 2 所示。二期工程中,超滤膜车间与中间提升泵房并行设置,超滤膜单元抽吸泵可将污水抽滤提升至臭氧及加氯接触池单元,当超滤膜单元故障时,可由中间提升泵房将污水提升至下一单元。此外,初雨调蓄池的排空出水接至二期工程的细格栅前端。

2.3 1#箱体厂区布局及竖向设计

1#箱体面积约为 26 155 m²,箱体内布置有生物反应池、二沉池、气浮池、中间提升泵房、超滤池、臭氧加氯接触池、放空泵房、出水及回水泵房、鼓风机房、加药间、污水源热泵间等构(建)筑物。地表设置有文体绿地公园、环保科普教育基地、臭氧及加氯接触池、紫外消毒池及出水泵房。1#箱体内布局如图 3 所示。

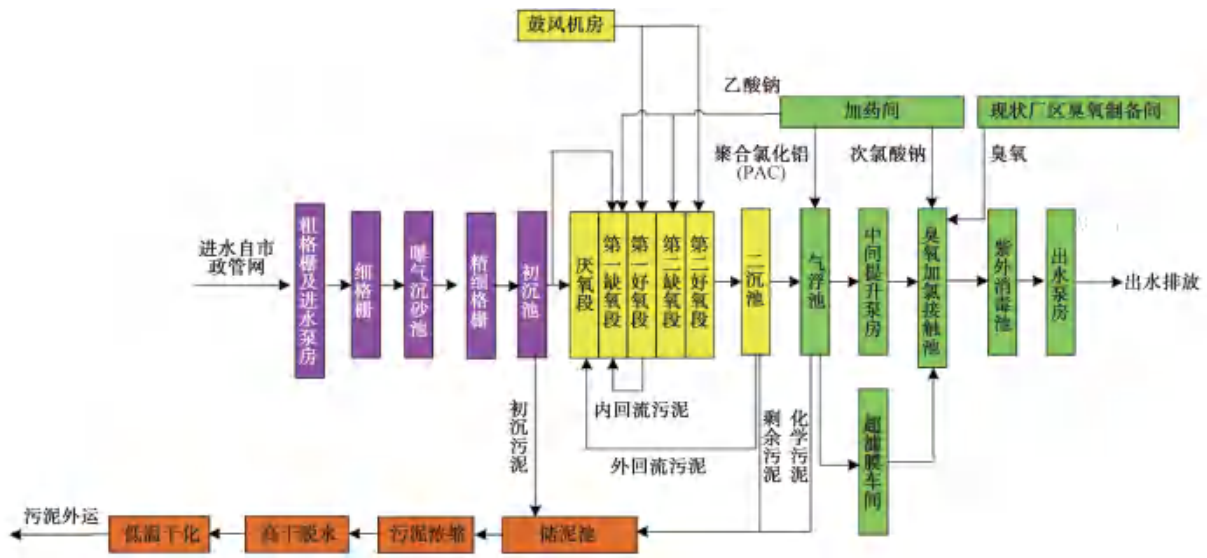
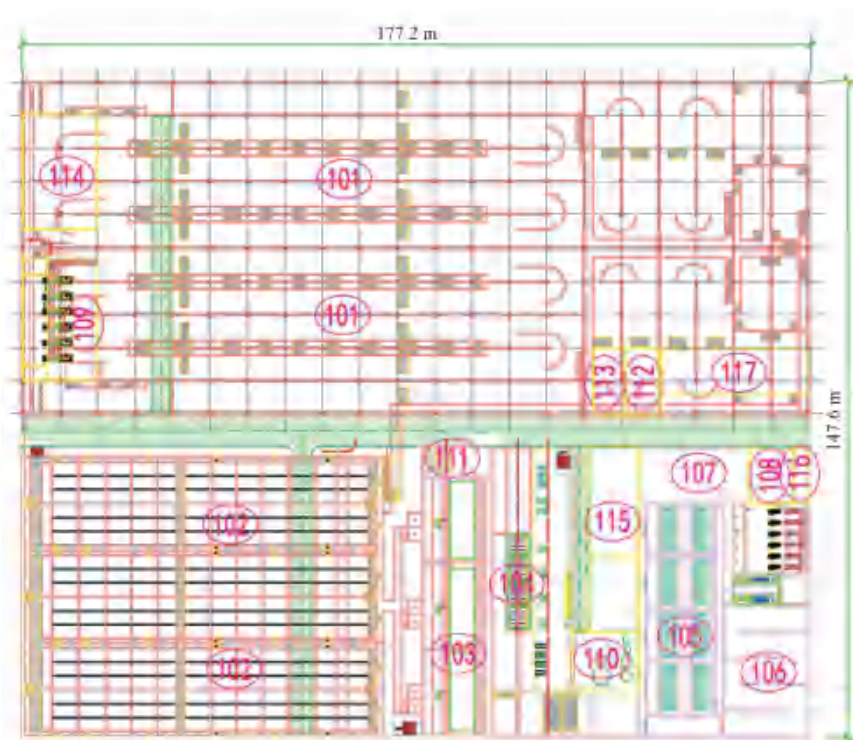


图2 二期工程工艺流程

Fig. 2 Wastewater Treatment Process of Phase II Project



注:101—生物反应池;102—二沉池;103—高效离子气浮池;104—浸没式超滤系统及中间提升泵房;105—臭氧接触池;106—加氯接触池、紫外消毒渠及出水泵房;107—消防及回用水池;108—消防及回用水泵房;109—鼓风机房;110—加药间;111—放空泵房;112—污水源热泵间;113—仓库及机修车间;114—1#变配电间;115—2#变配电间;116—出水仪表间;117—1#除臭生物滤池

图3 1#箱体内部区域布置

Fig. 3 Regional Arrangement in 1# Box

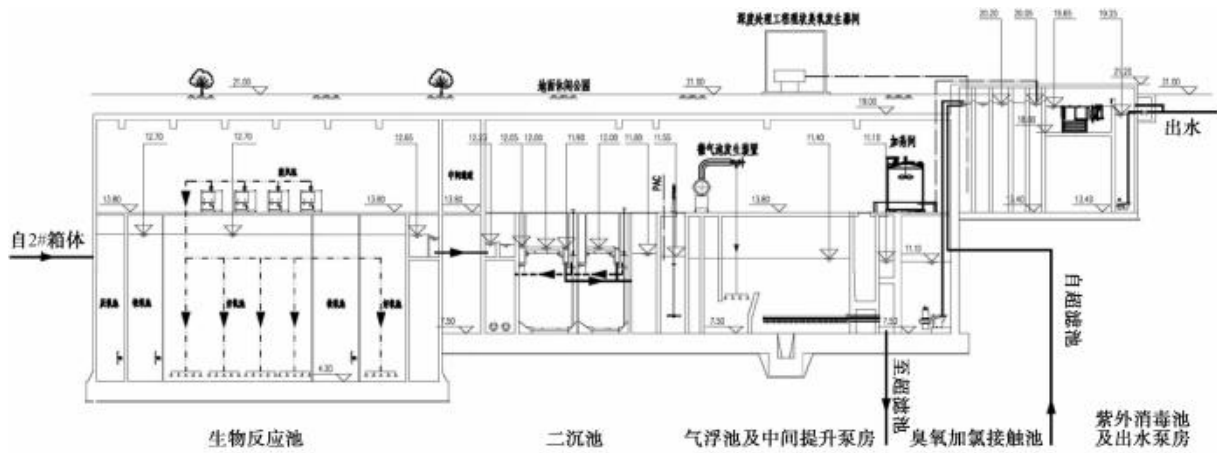
1#箱体进水接自2#箱体初沉池出水,考虑到臭氧在地下空间内的安全性,1#箱体将臭氧及加氯接

触池设置在高位,露出地表,与全地下箱体内其他构筑物隔绝,可避免臭氧散逸在地下空间的风险,并可

使出水在常态下自流至水体。极端工况下打开出水提升泵进行强排,节省能耗。1#箱体内高程布置如图4所示。

图4所示。

1#箱体地表将海绵技术与公园科普有机结合,



注:标高单位为 m

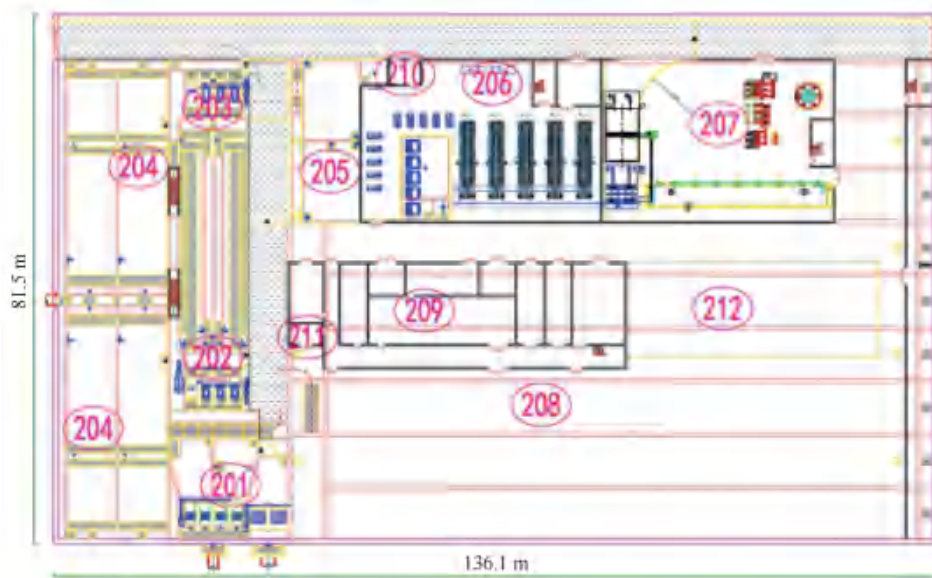
图4 1#箱体高程布置

Fig. 4 Elevation Layout of 1# Box

设置生态海绵示范绿地。水景利用污水处理厂再生水做为补水水源,使游客在参观行进过程中,先后经过跌水增氧、物理过滤净化、生物沉淀净化、植物吸附净化等自然净化过程展示区,体验生态净化功能。此外,在公园中北部环保科普教育基地南侧设置体育场、部分水处理构筑物或附属构筑物。

2.4 2#箱体厂区布局及竖向设计

2#箱体占地面积约为 11 092 m²,箱体内布置有粗格栅及进水泵房、细格栅及曝气沉砂池、初沉池、储泥池、污泥脱水及干化车间、雨水调蓄池这些构筑物,地表设置有综合楼、厂前区等。2#箱体内布局如图5所示。



注:201—粗格栅及进水泵房;202—细格栅及曝气沉砂池;203—膜格栅系统;204—初次沉淀池;205—储泥池;206—污泥浓缩脱水车间;207—污泥干化车间;208—初期雨水调蓄池;209—3#变配电间;210—垃圾房;211—进水仪表间;212—2#除臭生物滤池

图5 2#箱体内部区域布置

Fig. 5 Regional Arrangement in 2# Box

2#箱体将预处理区、污泥处理区这些臭味较浓的构筑物集中在一处,方便集中处理臭气。另将污水处理粗格栅与初期雨水调蓄池粗格栅并列布置,方便管理。同时,初期雨水调蓄池放空时,可就近提升至污水处理细格栅前端,运行方便。此外,初期雨水调蓄池可兼作污水厂的应急事故池,当细格栅后端构筑物故障且无法超越时,可将污水就近排入初

期雨水调蓄池内储存应急,当故障排除后再排空至水厂细格栅前端。2#箱体内的污泥处理区域按照18万 m^3/d 的污水处理规模设置,现状污水厂的污泥(含水率为80%)泵送至2#箱体的储泥池,与二期工程的污泥混合后,经浓缩、低温风冷干化后,外运处置。低温风冷干化工艺可根据处置要求,灵活调节出泥含固率。2#箱体内高程布置如图6所示。

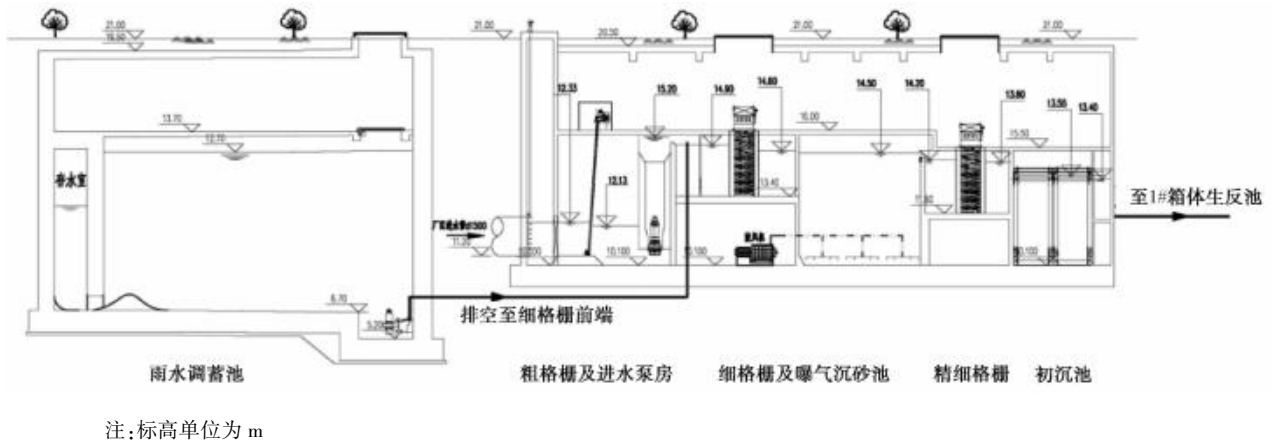


图6 2#箱体高程布置

Fig. 6 Elevation Layout of 2# Box

2#箱体地表设置二期工程的综合楼及厂前区,并设置绿地及体育场,市民可在园路中进行观光、休憩、运动。

2.5 厂区除臭及通风设计

本工程对部分构(建)筑物加盖,在平面布局中考虑将臭气较为集中的预处理区和污泥处理区置于东侧地块的2#箱体内,需处理的恶臭气体散发点为粗格栅、细格栅及曝气沉砂池、初沉池、污泥处理区域、雨水调蓄池。1#箱体需将生物反应池加盖。

根据本工程不同构筑物及设备产生臭气的特点,本工程拟采用全过程除臭+生物滤池除臭+离子送风的组合除臭工艺。其中,生化处理系统采用全过程除臭,从根源上降解臭气成分;臭气较为集中的2#箱体预处理区域、1#箱体的生物反应池区域、污泥处理区域及调蓄池采用生物滤池除臭工艺,臭气通过风机及除臭风管系统收集处理,15 m高空排放;污泥脱水车间及污泥干化车间辅以离子新风系统。

此外,本工程设置机械送、排风风机,预处理区、污泥处理区、加药间区域等按照12次/h的换风量设置,对生物反应池、二沉池及深度处理区上方的大空间区域按照6次/h的换风量设置。

3 主要构筑物工艺设计

3.1 预处理区

预处理区位于2#箱体内。进水端设置粗格栅及进水泵房1座,平面尺寸为23.5 m×15.3 m。其中,污水4条格栅渠道,初期雨水2条格栅渠道,栅条间隙为20 mm。

粗格栅及进水泵房后设置细格栅及曝气沉砂池1座,平面尺寸为42.0 m×15.3 m。其中,细格栅4条渠道,栅条间隙为3 mm;曝气沉砂池2条廊道,设计水力停留时间为5.97 min。

曝气沉砂池后设置精细格栅1座,平面尺寸为9.5 m×15.3 m,4条渠道,栅条间隙为1 mm。

精细格栅出水均匀配水至2座初沉池,每座2格,单座尺寸为36.9 m×17.6 m,有效水深为3.3 m,表面负荷为6.5 $m^3/(m^2 \cdot h)$ 。考虑后端可能存在碳源不足情况,二期工程采用了较高的表面负荷。

预处理区充分考虑利用细格栅及超细格栅渠道下的空间,布置罗茨风机、初沉污泥泵、吸砂泵、洗砂机等,对减小噪声、优化参观层(负一层)外观、节省占地较为有利^[3]。

3.2 二级处理区

二级处理区位于1#箱体内。2#箱体初沉池出

水通过管道流至1#箱体生物反应池前端。

1#箱体内设置生物反应池1座2池,平面尺寸为175 m×74 m,有效水深为8.5 m。设计最低水温为13℃,总泥龄SRT=26.4 d,污泥负荷 $F/M=0.056$ kg BOD/(kg MLSS),产泥率 $Y=0.68$ kg SS/(kg BOD),混合液悬浮固体浓度MLSS=3.5 g/L。内回流比为300%,外回流比为100%。平均流量下停留时间为22.0 h,其中,厌氧段为1.5 h,第一缺氧段为5.0 h,第一好氧段为11.5 h,第二缺氧段为3.0 h,第二好氧段为1.0 h。曝气池供气量为474.5 m³/min,气水比为6.83:1。

生物反应池后设置二沉池1座,6条廊道,单条平面尺寸为76 m×10 m,有效水深为3.5 m。表面负荷为1.37 m³/(m²·h),设计沉淀池固体负荷为8 kg SS/(m²·h),沉淀时间为2.55 h。

3.3 深度处理区

深度处理区位于1#箱体内。二沉池出水进入高效离子气浮池,高效离子气浮池设置1座3格,单格尺寸为22.0 m×19.8 m×5.7 m,有效水深为3.9 m,表面负荷均值为18 m³/(m²·h),峰值为27 m³/(m²·h)。

高效离子气浮池出水进入浸没式超滤池或中间提升泵房,设置浸没式超滤池及中间提升泵房1座,平面尺寸为32.6 m×65.6 m。浸没式超滤池设置10套超滤设备单元,单套处理能力为1万 m³/d,采用浸没式中空纤维超滤膜元件,膜丝公称孔径为0.03 μm,通过抽吸泵产生的压差将污水滤过超滤膜并提升至下一工艺单元。与浸没式超滤池并行设置中间提升泵房,配泵能力为10万 m³/d,当浸没式超滤池不全开时,其余污水可通过中间提升泵房提升至下一单元。

超滤池出水进入臭氧接触池,臭氧接触池露出地表,平面尺寸为52.5 m×19.4 m,有效水深为7 m,水力停留时间为50 min。

臭氧接触池后设置加氯接触池、紫外消毒池及出水泵房1座,平面尺寸为52.5 m×19.6 m。加氯接触池有效水深为7 m,水力停留时间为30 min。受新冠病毒影响,加氯接触池后设置紫外线消毒系统2套,有效紫外剂量 ≥ 25 W·s/cm²。紫外消毒池出水进入出水泵房,在常态下可自流至一亩泉河,极端工况下开提升泵进行强排。

3.4 污泥处理区

污泥处理区位于2#箱体内,污泥处理量为240 t/d(以18万 m³/d污水规模计,80%含水率)。

污泥处理区设置储泥池2座,单座平面尺寸为16.9 m×10.9 m,有效水深为2.7 m,单座配备潜水搅拌机2台。储泥池用以存储并混合以下3部分污泥:1#箱体泵送的化学污泥、剩余污泥;2#箱体泵送的初沉污泥;现状污水处理厂泵送的污泥。

储泥池出泥经浓缩机浓缩后,进入污泥脱水车间。污泥脱水车间平面尺寸为35.0 m×22.7 m,共配备板框压滤机5台(4用1备),单台能力 $Q=12$ t DS/d,脱水后污泥含水率为60%,单台工作时间为24 h,分三班次。

板框脱水污泥进入污泥干化车间,污泥干化车间平面尺寸为22.7 m×27.7 m,配备污泥低温风冷干化机1套,单台脱水量 $Q=1800$ kg/h(进泥60%含水率,出泥40%含水率)。低温风冷干化设备可随污泥外运处置地对含水率的要求,进行灵活调整。

3.5 初雨调蓄池

污泥处理区位于2#箱体内,设计规模为4万 m³,共设置1座6廊道,平面尺寸为100.0 m×51.6 m,有效水深为8.5 m,采用真空冲洗方式。调蓄池排空直接进入预处理区细格栅前端,同时调蓄池可兼作二期污水厂的应急事故池。初雨调蓄池的顶板上布置有真空冲洗设备、变配电间、水厂进水仪表间、除臭系统等功能区,充分利用了空间。

4 结论

(1)本工程是保定市除雄安新区外的第一座地下污水处理厂,地处市区,用地分散且不规则,周边限制因素较多。本设计设置了2座独立的功能各异的全地下箱体及厂区,布置集约紧凑,生产构筑物(含初雨调蓄、污水处理、再生水处理、污泥处置功能)用地指标为0.3725 m²/(m³·d⁻¹),用地节约,减少了拆迁及对周边居民环境的不利影响。实现了10万 m³/d污水处理增容、18万 m³/d规模污泥优化处理、10万 m³/d再生水回用、4万 m³初雨调蓄及民众文娱科教的场所功能,实现了生态效益、社会效益双赢。

(2)本设计将产臭较多的预处理区、污泥处理区、初雨调蓄池集中布置在2#箱体,方便臭气的集中处理,使水厂整体保持了洁净的操作环境,并结合

除臭技术措施,减少了臭气对周边环境的影响,可为分散用地条件的地下污水厂项目提供参考。

(3)本设计将污水厂预处理区与初期雨水调蓄池相邻布置在 2#箱体,优化高程及平面布置,方便初雨调蓄池就近排空至污水厂前端。此外,初雨调蓄池也可作为污水厂的应急事故池,为类似功能需求(建设初雨调蓄池)的全地下污水厂项目提供参考。

(4)本设计优化高程布置及工艺流程,中间提升泵房与超滤膜构筑物并联设置,当超滤工艺装置全开时,中间提升泵房可以停泵,减少二级提升能耗,可为地下式污水处理厂站项目提供一定的参考。

(5)由于防燃防爆要求较高,臭氧接触工艺在全地下污水厂中受到一定限制。本设计中,臭氧接触池抬高至地表,接触池顶板、尾气消除装置结合地表景观设置,防止臭氧在地下空间的散逸,为地下式污水厂深度处理区域设计提供一定参考。

参考文献

- [1] 贾力铭, 胡晓蕾, 李钢. 保定市鲁岗污水处理厂深度处理工程设计及运行效果分析[J]. 科技资讯, 2021, 19(32): 62-64.
JIA L M, HU X L, LI G. Design and operation effect analysis of advanced treatment project of baoding lugang sewage treatment plant[J]. Science & Technology Information, 2021, 19(32): 62-64.
- [2] 王雅楠. 钱江地下式集约化污水处理厂设计方案[J]. 净水技术, 2020, 39(6): 38-42.
WANG Y N. Design scheme of Qianjiang underground intensive sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(6): 38-42.
- [3] 郭小春, 施祖辉, 王锡清, 等. 大型污水处理厂格栅及沉砂池集约化设计案例[J]. 给水排水, 2021, 57(11): 27-29, 36.
GUO X C, SHI Z H, WANG X Q, et al. Intensive design of grille and grit chamber in a large WWTPs [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(11): 27-29, 36.
- [36] HE Q L, ZHOU J, WANG H Y, et al. Microbial population dynamics during sludge granulation in an A/O/A sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 1-8. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.04.088.
- [37] NAUFAL M, WU J H. Stability of microbial functionality in anammox sludge adaptation to various salt concentrations and different salt-adding steps[J]. Environmental Pollution, 2020, 264: 114713. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114713.
- [38] LI D, YANG J W, LI Y, et al. Research on rapid cultivation of aerobic granular sludge (AGS) with different feast-famine strategies in continuous flow reactor and achieving high-level denitrification via utilization of soluble microbial product (SMP) [J]. Science of the Total Environment, 2021, 786: 147237. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147237.
- [39] GOU M, WANG H H, LI J, et al. Different inhibitory mechanisms of chlortetracycline and enrofloxacin on mesophilic anaerobic degradation of propionate[J]. Environmental Science and Pollution Research. 2020, 27: 1406-1416. DOI: 10.1007/s11356-019-06705-7.
- [40] FAN F L, YU B, WANG B R, et al. Microbial mechanisms of the contrast residue decomposition and priming effect in soils with different organic and chemical fertilization histories [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 135: 213-221. DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.05.001.
- [41] HUBER K J, GEPPERT A M, GROB U, et al. *Aridibacter nitratireducens* sp. nov., a member of the family *Blastocatellaceae*, class *Blastocatellia*, isolated from an African soil[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2017, 67(11): 4487-4493.
- [42] PANG H L, CHEN Y W, HE J G, et al. Cation exchange resin-induced hydrolysis for improving biodegradability of waste activated sludge: Characterization of dissolved organic matters and microbial community [J]. Bioresource Technology, 2020, 302: 122870. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122870.
- [43] QIN R H, SU C Y, MO T H, et al. Effect of excess sludge and food waste feeding ratio on the nutrient fractions, and bacterial and fungal community during aerobic co-composting [J]. Bioresource Technology, 2021, 320: 124339. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124339.
- [44] ZHANG B C, LONG B, CHENG Y Y. Preservation of autotrophic nitrifying granular sludge and its rapid recovery[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5): 104046. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104046.

(上接第 93 页)