

何东岳, 陈娟娟, 黄鸥, 等. 基于高标准环境控制的某地下净水厂通风除臭设计[J]. 净水技术, 2024, 43(5):188-197.
HE D Y, CHEN J J, HUANG O, et al. Ventilation and deodorization design of an underground WWTP based on environmental control with high standard [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5):188-197.

基于高标准环境控制的某地下净水厂通风除臭设计

何东岳^{1,*}, 陈娟娟¹, 黄 鸥², 罗蔚文³, 梁 攀¹, 袁成瑞³

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司广东分院, 广东广州 510075; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 3. 广州市京水水务有限公司, 广东广州 510385)

摘 要 传统地下污水处理厂以职业接触限值或污染物排放限值为设计标准, 难以满足人员对健康和舒适的基本诉求。某地下净水厂基于更严格、更高标准的环境控制目标, 采用了针对性的臭气密闭隔离和处理工艺, 一体化整合通风、除臭系统, 首次在南方地区将工艺设施操作层衔接下沉庭院等改进的技术措施与设计方法。实测结果表明, 多处区域未检出硫化氢, 臭气浓度低于 20; 与庭院衔接的区域自然风速稳定, 污染物浓度为厂内最低水平; 经处理后的尾气污染物排放值和厂界污染物浓度明显优于标准限值。项目实现了以人为本的环境质量效果, 为建设舒适运维、和谐共生的地下污水处理厂提供了技术参考。

关键词 地下污水处理厂 通风除臭 环境质量 下沉式庭院 自然通风 实测
中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2024)05-0188-10
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.05.022

Ventilation and Deodorization Design of an Underground WWTP Based on Environmental Control with High Standard

HE Dongyue^{1,*}, CHEN Juanjuan¹, HUANG Ou², LUO Weiwen³, LIANG Pan¹, YUAN Chengrui³

(1. Guangdong Branch, Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510075, China;
2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China;
3. Guangzhou City Peking Water Co., Ltd., Guangzhou 510385, China)

Abstract Traditional underground wastewater treatment plants are designed with occupational exposure limits or pollutant emission limits, which are difficult to meet the basic demands of personnel for health and comfort. Based on stricter and higher standards of environmental control objectives, an underground wastewater treatment plant (WWTP) adopted improved technical measures and design methods such as formulating targeted odor sealed isolation and treatment process, integrating ventilation and deodorization systems, and connecting the operation layer of process facilities to the sunken courtyard for the first time in the southern region. The results of measurements show that no hydrogen sulfide is detected and the odor concentration is below 20 in areas; The natural wind speed in the area connected to the courtyard is stable and the pollutant concentration is the lowest level in the WWTP; After deodorization, the emission values of exhaust pollutants and the concentrations of pollutants at the plant boundary are obviously better than the standard limit value. The project achieves the people-oriented environmental quality effect and provides a technical reference for building a comfortable operation and harmonious symbiotic underground WWTP.

Keywords underground wastewater treatment plant (WWTP) ventilation and deodorization environmental quality sinking style courtyard natural ventilation field measurement

随着城市化与工业化进程加快, 我国污水处理

厂的数量和规模呈逐年增长趋势, 数百座厂区位于城市的发展区域。地下污水处理厂因其用地集约、环境友好、景观协调等优点, 逐渐成为中大型污水处理设施建设的发展趋势和重要形式, 在全国范围内迅速推广^[1]。然而地下污水处理厂的污水、污泥处

[收稿日期] 2023-09-06
[通信作者] 何东岳(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为城镇污水处理设施的暖通除臭设计与集成可再生能源减碳技术应用, E-mail: 875735914@qq.com。

理设施密集,操作空间封闭,导致恶臭物质积聚、空气品质下降、热湿环境恶化等问题出现,对运营人员的身心健康和工作效率产生了不良影响^[2]。传统的以职业接触限值或污染物排放限值为依据的环境设计标准^[3],难以满足运营人员和周边居民对健康与舒适的基本诉求,使得内、外部投诉和邻避事件时有发生。随着人们对地下污水处理厂的环境质量日益重视,各地提出了更严格的环境设计标准^[4],尝试更先进的通风、除臭理念和技术^[5-6]。在此背景下,广州某地下净水厂基于更高标准的环境控制和提升目的,应用了一系列有针对性的改进措施与设计方法,改变传统地下污水处理厂“盖被子抽排”环境控制

方式,在进一步提升通风、除臭效果的前提下巧妙地将地下空间“打开”,以满足运营人员和周边居民的健康与舒适需求。本文通过分析环境控制与提升的重点,介绍了该项目的通风、除臭设计与运行情况。

1 工程概况

该地下净水厂的污水处理规模为 7 万 m³/d,采用“预处理+AAO-AO 生化池+斜板复合式平流沉淀池+高效沉淀池+反硝化深床滤池+紫外消毒”的污水处理工艺;污泥处理规模为 10.15 t DS/d,采用“叠螺压滤机+低温除湿热干化机”的污泥脱水、干化工艺,出泥含水率≤40%。详细工艺处理流程如图 1 所示。

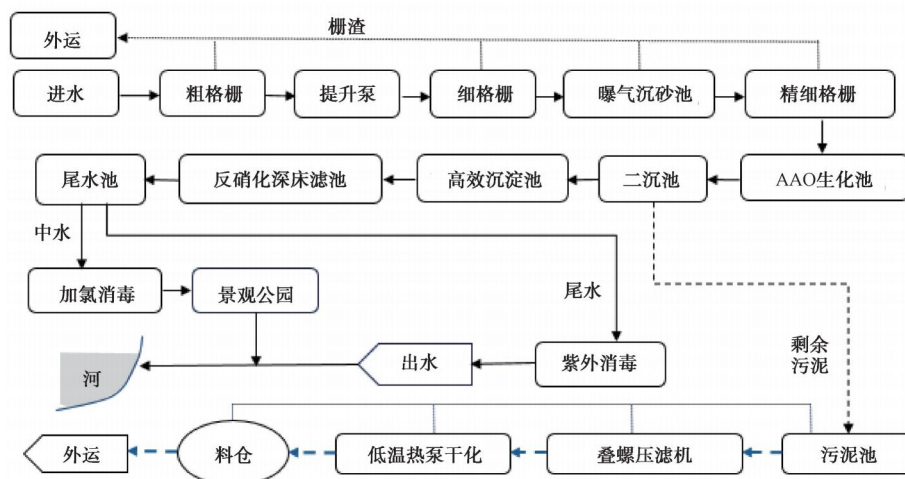


图 1 污水、污泥处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Wastewater and Sludge Treatment

项目为全地下箱体结构,占地面积约为 1.48 hm²,建筑面积约为 29 300 m²,埋深约为 16.5 m。竖向设计共分为 3 层,地面层为综合业务楼和对外开放的景观体育公园。地下一层为污水处理设施的操作层,并设有鼓风机房、装泥间、加药间等工艺车间,控制室、变配电室等电气用房,以及运泥车道、巡检通道(图 2)。其中预处理区操作层设有格栅、螺旋压榨机、刮泥机等污水处理设施。各工艺操作区域和车间均设有独立的防火分区,平时运营时通过防火卷帘与运泥车道、巡检通道局部连通。

地下二层设有污泥干化车间、紫外消毒设备间等工艺车间,沉砂池、生化池、二沉池、高效沉淀池、储泥池等各类污水处理池体及综合管廊(图 3)。污泥干化车间为地下两层连通的高大空间,层高 12 m,内部设有叠螺压滤机、热干化机、刮板输送机、料

仓等污泥处理工艺设施。污水处理池体为土建结构的密闭水池,设有土建盖板,将大部分的恶臭、有害物质封闭于池内。

考虑厂区对市民开放的特点和更高标准的环境质量要求,排放口与厂界处的污染物控制综合参照了当时各地区新执行的污染物排放标准;地下空间的环境空气质量则采用与地面厂界相同的污染物和异味控制标准,如表 1 所示,以达到厂区内、外人员对身心健康和基本舒适诉求的一致性。

2 环境控制的重点与改进策略

(1) 污水、污泥处理过程中由于发酵、厌氧消化反应,不断产生大量恶臭物质,包括硫化氢、甲硫醚、甲硫醇、二硫化碳等含硫化合物和氨、胺等含氮化合物。设计中虽然对散发臭气的工艺设施、池体构筑物、生产车间进行了密闭隔离,但在实际运营中,因

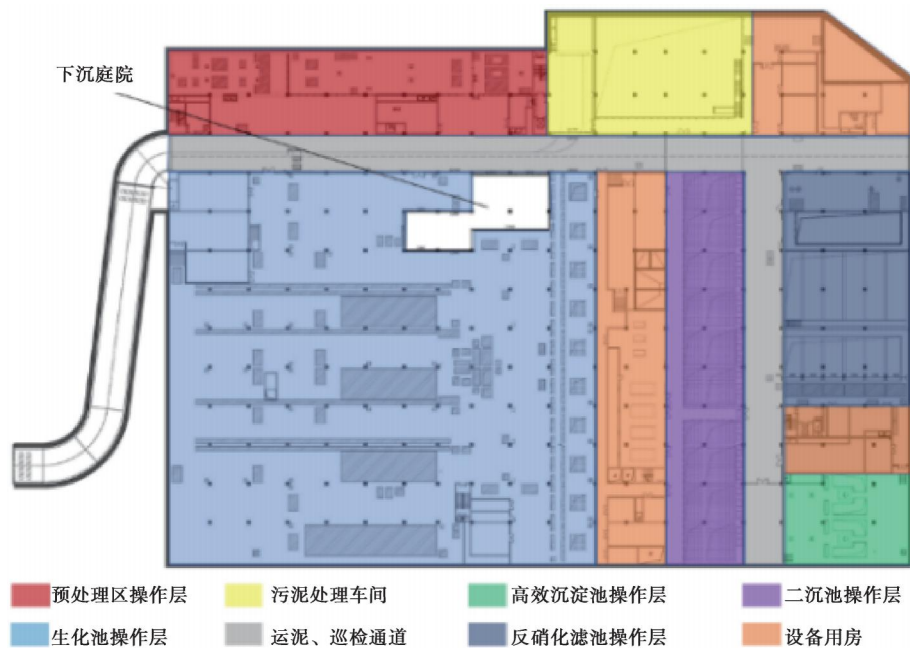


图2 地下一层功能分区

Fig. 2 Functional Partition on the First Basement

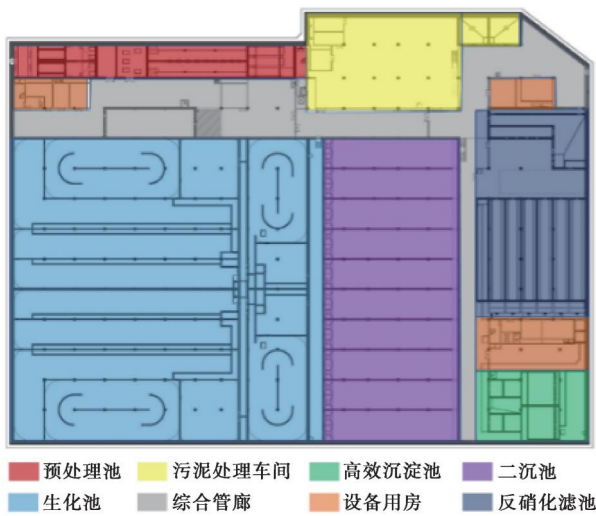


图3 地下二层功能分区

Fig. 3 Functional Partition on the Second Basement

表1 项目制定的空气质量控制目标值

Tab. 1 Air Quality Control Target of the Project

控制项目	高空排放口		厂界和地下空间控制目标
	控制目标	控制速率	
氨	5.0 mg/m ³	0.6 kg/h	1.0 mg/m ³
硫化氢	1.0 mg/m ³	0.06 kg/h	0.03 mg/m ³
臭气浓度(无量纲)	500		20

缝隙、孔洞密闭不严(如池面盖板咬合不平、土建施工误差所致的缝隙);因生产操作的需求导致车间

门洞、工艺设施罩体、池体检修盖板开启(如栅渣外运、料仓卸泥、水质取样、设备检修等情况);因设备或管道老化、腐蚀而出现泄漏点;因受限工艺设施本身的机械性能、运作特性无法密闭(如格栅、叠螺压滤机、刮泥机、栅渣口等),以上因素都造成密闭隔离效果减弱甚至失效,导致恶臭物质逸散至地下空间,环境空气质量大幅下降,增加了臭气治理的难度。因此,从源头上控制恶臭物质的逸散,对臭源进行全面的密闭隔离,是环境控制的首要重点和策略。

(2)在传统设计中,地下空间的环境质量标准一般依据职业接触限值执行,仅保证了运营人员职业健康的最低要求,难以满足人员长时间作业时的基本舒适性需求。由于恶臭物质的嗅觉阈值大幅低于其最高容许浓度值,即使环境中的部分臭气浓度极低,仍可被运营人员所察觉。同理,传统设计中的厂区排放尾气以国家标准限值和环境影响评价的最低要求为执行标准,造成周边的人员仍可能闻到较刺激的臭味,也是污水处理厂频发邻避事件的主要原因。近年来,运营单位对工作环境 and 臭气治理的要求日益严格,环境控制目标宜从传统的卫生安全要求提升至以人为本的基本舒适性要求,适当提高通风、除臭的设计标准。

(3)污水、污泥处理设施的臭气浓度与污水水

质、处理工艺、密闭方式、收集气量等因素密切相关,从高至低可分为3个等级。高浓度区主要是污泥处理工艺段,包括浓缩、脱水、干化等;中浓度区包括预处理工艺段、生化池的厌氧和缺氧段;低浓度区包括生化池好氧段、二沉池,以及设有密闭和臭气收集设施的预处理、污泥处理车间。某些地下污水处理厂把浓度或成分差异较大的臭气收集到一套除臭设施中处理,造成恶臭物质的去除率不足、排放尾气超标、大气环境受到污染;又或者除臭设施的服务范围过大,造成收集效果不佳、沿程泄漏增多等问题,以致地下空间环境恶化。因此,总体布局上应将处理构筑物按臭气源强分为高、中、低3个区域,以便除臭设备布置和管线排布。除臭系统应采用分区收集、就近处理的方式,针对不同臭气浓度制定臭气处理工艺和调整工艺参数,提高除臭系统的及时性和有效性。

(4)厂区地下空间封闭、进深大,基本与外界大气隔绝。工艺设施密集、工业气息浓厚、空气质量和热湿环境较差,上述因素都会引起人体视、听、嗅等感官的不适。即使增加空间的通风换气量,或利用天窗自然采光,人体不适感仍难以消除,反而过高的换气次数会造成空间噪声增大。南方地区设置天窗则容易导致环境温度上升,加剧了恶臭物质逸散和舒适性下降。归结原因是人员在地下封闭空间巡检、操作,缺少与自然环境的相互作用,产生了环境心理障碍。因此,因地制宜地挖掘自然环境潜力,加强地下厂区与外界自然的衔接,是控制环境空气质量、提升环境舒适性的重要策略和举措。

(5)在传统设计中,通风和除臭是分别独立的两套系统,容易导致风量失衡、压力梯度失控、气流组织紊乱等系统相互不协同的问题出现^[7],对地下空间的环境质量造成不利影响。为解决上述问题,应将通风、除臭整合为一体化的系统,根据臭源的浓度、特征、分布和各功能区域关系,统筹各车间、构筑物池体之间的压力梯度,使气流组织从清洁区逐级流向高浓度臭气区。新风应直接送至人员巡检路线或操作岗位,臭气收集口则贴近臭源布置,控制恶臭物质逸散。

3 通风、除臭系统设计

3.1 全臭源密闭隔离

该项目臭源主要来自预处理区(格栅、曝气沉

砂池、刮泥机、栅渣口)、污泥处理区(叠螺压滤机、低温热干化机、刮板输送机、料仓、储泥池、浓缩池、移动运泥车)、生化池及二沉池,根据其运行特性和排放特征的差异,对臭源设置全面的密闭隔离,并对部分臭源的密闭隔离措施进行了改进。

(1)对于格栅、栅渣口、叠螺压滤机、低温热干化机等经常需要人员就近操作的工艺设施,采用“透明耐力板+不锈钢骨架”的密闭加罩形式,将设施整体隔离在内,并预留必要的人员操作空间。

(2)在水分汽化与容积变化的共同作用下,污泥料仓、刮板输送机内部容易形成压力波动,导致臭气从不严密处泄漏。因此,对设施的出料连接方式进行了改进,在出料口与输送机之间增设密闭管道进行连接,并对料仓、输送机分别增设臭气的泄压、排放收集口(图4)。



图4 刮板输送机密闭隔离与臭气泄压口现场

Fig. 4 Site of Closed Isolation and Odor Relief Opening for the Scraper Conveyor

(3)运泥车在装泥、外运过程中,相当于一个移动臭源,难以对臭气进行收集处理。因此,选用封闭式装泥仓的运泥车辆,在出料口与装泥仓之间采用软性密闭管道进行连接,减少污泥臭气的逸散。考虑到仍有少部分的粉尘沉积在墙、地面和车辆、设备表面,装泥间出入口处设有电动卷帘,与运泥车进出连锁开闭,维持装泥间与其他区域隔离。

(4)对于进水渠道、沉砂池、生化池等污水池体构筑物,主要采用混凝土顶板的密闭加盖形式,对大面积的池面臭源进行隔离。预处理区的格栅前后设有升降式渠道闸门,设置改进的半密闭罩体将闸板、升降杆、池面吊孔隔离在内(图5),而转动手轮、电机则留在罩外,方便运营人员操作。

(5)生化池上方的混凝土顶板设有推流器、搅拌机吊装口、清池检修口、水质观察口和取样孔,是主要的臭气逸散点。吊装口、检修口采用改进的“钢盖板+橡胶黏垫”方式进行密闭隔离,观察口采



图5 格栅闸门密闭加罩现场
Fig. 5 Site of Airtight Cover for the Grille Gate

用改进的“钢化玻璃盖板+黏性封条”形式进行密闭隔离,黏垫、封条负责将盖板和混凝土顶板之间的缝隙密封。取样孔采用“钢化玻璃+不锈钢骨架”的密闭加罩形式,将测定仪、取样孔隔离在内。

表2 污水处理厂常用除臭工艺对比
Tab. 2 Comparison of Common Deodorization Processes in WWTPs

工艺方法	适用条件	运行成本	投资成本	应用场景	存在问题
化学洗涤法	中高浓度、中小风量	中	低	作为预处理与其他工艺结合使用	药耗量较大
离子氧化法	低浓度、任何风量	低	低	操作简单,用于低浓度臭气的空间环境净化	对进气及气流组织要求高
全过程除臭法	低浓度	低	较高	操作简单,用于难以加盖、密闭的污水池体	耐冲击负荷能力弱,回流管易堵
生物过滤法	中低浓度、任何风量	中	中	用于需连续、稳定除臭的场所,污水处理厂臭气治理中应用最多	占地、噪声较大

对于污泥处理工艺段的高浓度臭气,采用单级的生物除臭工艺处理,其排放尾气在不利工况下难以满足排放限值的要求,并严重影响厂区地面及周边的环境空气质量。该项目考虑化学法对特定成分的高浓度臭气具有较高的去除效率,采用了生物除臭法为主、化学法为辅的“水/碱化学洗涤+生物除臭”多级组合式除臭工艺(图6),碱洗涤停留时间为3 s,空塔气速不大于1.5 m/s,生物除臭参数与前述

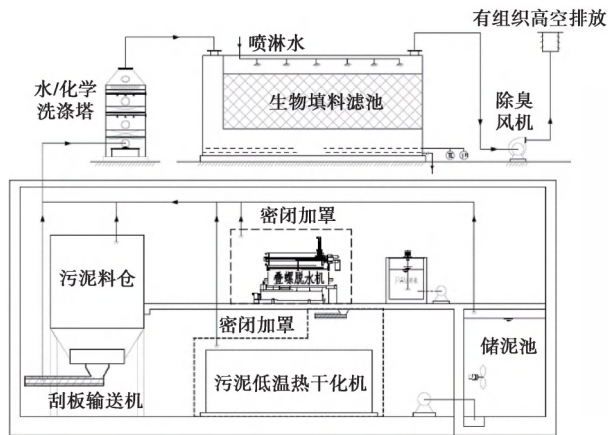


图6 组合式除臭工艺流程
Fig. 6 Process Flow of Combined Deodorization

3.2 臭气处理工艺

不同的污水、污泥处理工艺段所产生的臭气浓度、成分、排放特征存在较大的差异,其计算依据参照行业标准^[8]规定,预处理区为1 000~5 000,二级处理区为1 000~3 000,污泥处理区为5 000~100 000。因此,传统的单一除臭工艺无法适用于所有场合。如表2所示,根据运行效果和应用经验进行比选,生物除臭法具有运行成本低、除臭效果好、二次污染少、管理方便等优点,选用作为预处理池、生化池、二沉池等散发中/低浓度臭气的密闭、无人构筑物池体的臭气处理主工艺,停留时间取15 s,空塔气速不大于300 m/h。

一致,提高对高浓度臭气的整体去除效率。
预处理操作层、污泥处理车间、装泥间内工艺设施密集,人员需经常进入巡检操作,即使环境中的臭气浓度较低,仍会造成人员身心的不适。该项目采用离子氧化法除臭工艺,结合新风系统,如图7所示,室外新风流经离子发生装置,产生离子新风后送入车间,在车间内同时进行换气稀释和氧化分解,就地净化、去除环境中的中/低浓度臭气,迅速将车间内的臭气浓度处理至嗅觉阈值以下,控制与提升环境质量和人体舒适度。

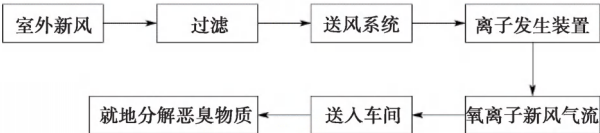


图7 车间离子新风除臭工艺流程
Fig. 7 Process Flow of Ion Fresh Air in WWTP

3.3 臭源区域的通风、除臭一体化设计

虽然已对臭源设置了全面的密闭隔离,但负责臭气收集处理的除臭系统,与负责人员操作层换气的通风系统,由于处理工艺的生产、运行特点,两者的气流组织随时连通,难以完全独立。该项目将臭

源区的通风、除臭整合为一个整体系统,通过风量、风压的分配与平衡,一方面维持适当的“清洁区→低浓度臭气区→中浓度臭气区→高浓度臭气区”压力梯度。另一方面,离子新风送入车间后,在压力梯度的推动下,一部分气流渗透进入臭源的密闭空间,另一部分气流在车间内对人员操作岗位和密闭罩外空间进行净化、除臭,两者再经过除臭系统进行收集、集中处理与排放。即所有送入车间的离子新风

都经过需要除臭的区域后,被除臭设备收集处理,最终排放到大气环境中,形成全直流的通风、除臭一体化系统。

臭源区域的空间离子新风量和臭气收集处理风量参照行业标准^[8]规定,根据污水、污泥处理的工艺类型、散发臭气的水面面积、臭气空间体积、密闭隔离程度等因素确定,未规定的区域则按环境控制目标综合考虑。具体参数如表3所示。

表3 臭源区域的通风、除臭一体化系统设计标准
Tab. 3 Design Standard for Integrated Ventilation and Deodorization System in Odor Source Areas

臭气区域	臭源类型	换气次数/ (次·h ⁻¹)	单位水面臭气风量指 标/(m ³ ·m ⁻¹ ·h ⁻¹)	臭气收集排风量	离子新风量
预处理区	曝气沉砂池内空间	2	10	1.1 倍曝气量+换气次数风量+水面 面积臭气风量	预处理区臭气收 集量的 80%
	进水渠道池内空间	2	10	换气次数风量+水面面积臭气风量	
	格栅、栅渣口等密闭罩内空间	8	/	换气次数风量	
	人员操作空间	4	/		
污泥处理区	叠螺压滤机密闭罩内空间	6	/		/
	低温热干化机密闭罩内空间	6	/		/
	污泥料仓、刮板输送机	8	/		/
	储泥池	6	/		/
	人员操作空间	4	/		污泥处理区臭气 收集量的 80%
	装泥间	8	/		装泥间臭气收集 量的 80%
生化池、二沉区	厌氧段、缺氧段及二沉池内 空间	2	3	换气次数风量+水面面积臭气风量	/
	好氧段池内空间	2	3	1.1 倍曝气量+换气次数风量+水面 面积臭气风量	/

注:各污水处理池体均按密闭加盖后的池内水面以上空间计算其换气次数;各处理设施按密闭加盖罩后的罩内空间计算其换气次数。

经计算地下厂区的总除臭风量为 126 400 m³/h,总离子新风量为 55 320 m³/h。根据不同区域的臭气浓度、成分及选用的除臭工艺,采用分区收集、就近处理的方式,共设置 4 套独立的通风、除臭一体化系统。

1#系统负责预处理区的除臭,包括该区域操作层的净化除臭,以及工艺设施臭源、池体臭源的收集除臭。前者由一台送风机、一套离子发生装置及不锈钢风管组成,往各个人员操作岗位定点送入含活性离子的新鲜空气,净化空间臭气,送风量为 24 320 m³/h。后者设置一套生物除臭滤池和两台除臭风机(1 用 1 备),除臭风量为 30 400 m³/h,通过有机玻璃钢风管对进水渠道、沉砂池、格栅、栅渣口等臭

源的密闭隔离空间,以及操作层空间进行负压抽吸,将臭气收集至生物除臭滤池中处理,最后经排放塔高空排放。

2#系统负责污泥处理车间、装泥间的除臭,包括车间环境的净化除臭,以及脱水、干化工艺段臭源的收集除臭。在车间新风机房内设置两套独立的离子新风系统,分别往车间、装泥间的人员操作岗位定点送入含活性离子的新鲜空气,净化空间臭气,风量为 19 400、11 350 m³/h。恶臭物质被离子氧化分解后,会转化成含有低分子化合物、水和二氧化碳的废气,一部分直接被车间的除臭风口收集;另一部分则在负压作用下,渗透进入臭源的密闭空间,与叠螺压滤机、低温热干化机、污泥料

仓、刮板输送机、浓缩池等臭源散发的臭气混合,然后被收集至两套水/碱液化学塔中进行臭气洗涤,如图 8 所示。洗涤后的臭气再与空间的废气

混合,送入生物除臭滤池中做进一步的深度处理,最后经排放塔高空排放。该系统除臭风机一用一备,总除臭风量为 $38\ 400\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

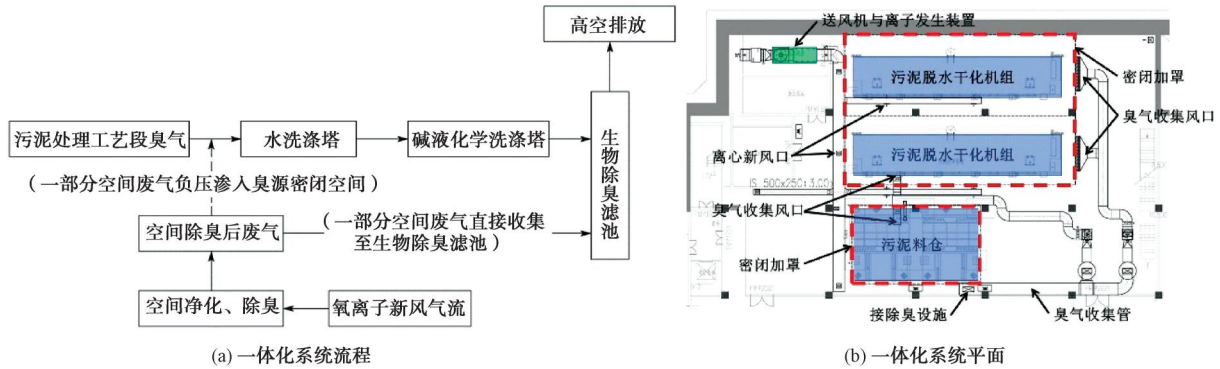


图 8 污泥处理区通风、除臭一体化系统流程与平面

Fig. 8 Flow and Plan of Integrated Ventilation and Deodorization System in Sludge Treatment Area

3#系统负责生化池厌氧段与缺氧段的除臭,4#系统负责生化池好氧段与二沉池的除臭,两系统分别设有一套生物除臭滤池和两台除臭风机(1用1备),除臭风量均为 $28\ 800\ \text{m}^3/\text{h}$ 。密闭池体的每个流道都设有除臭风口,使池内空间保持均匀负压。收集后的臭气送至生物除臭滤池中处理,最后经排放塔高空排放。

生物除臭滤池占地面积和土建荷载较大,统一布置在地下一层的生化区操作层,与排放塔邻近。其余的离子、洗涤除臭设备与臭源区就近布置,提高臭气处理的及时性。

3.4 非臭源区域的通风设计

生化池、二沉池等二级处理工艺池体的臭气浓度较低,且设有密闭隔离和负压收集措施控制臭气的逸散,因此,一般把该池体上方的操作层定义为无恶臭物质的清洁区。但地下厂区封闭昏暗、闷热潮湿的环境,使人员长时间作业时产生视、

听、嗅觉感官上的不适,即使增加空间的通风换气量仍难以完全消除。设计中针对“以人为本”的环境控制理念,考虑人员的基本舒适性需求,在地下一层的生化池操作层中设置了下沉庭院(图 9),通过四周的可开启侧窗,实现生化池人员操作层、运泥以及巡检通道空间与外界自然环境的连通,是南方地区首座将工艺设施操作层与下沉庭院衔接的地下污水处理厂。

在此基础上,生化池操作层、运泥车道和巡检通道的通风设计原则是优先利用车道出入口、下沉庭院的自然通风能力,辅以机械通风系统,通过两者的转换、协同,实现该区域的复合通风或多元通风方式,提高环境控制策略和运营调适手段的灵活性。对于其他不具备自然通风条件的区域,如二沉池、高效沉淀池的操作层、设备用房等,则采用全面机械通风方式。非臭源区域的通风量设计标准如表 4 所示。



图 9 下沉式庭院与地下厂区衔接

Fig. 9 Sinking Style Courtyard Connects with Underground WWTP

表 4 非臭源区域的通风量设计标准
Tab. 4 Design Standard for Ventilation Volume in Non-Odor Source Areas

区域	类型	室内设计温度/℃	送风换气次数	排风换气次数/(次·h ⁻¹)
地下一层	生化池操作层	/	自然进风	4
	二沉池、高效沉淀池、反硝化滤池等操作层	/	该区域排风量的 80%	4
	鼓风机房	≤40	房间排风量的 110%	6
	加药间	/	房间排风量的 80%	6
	电气设备用房	≤28	房间排风量的 110%	5
地下二层	罗茨风机房	≤40	房间排风量的 110%	6
	管廊	/	6 次/h	6
	泵房	/	6 次/h	6

注:鼓风机房、罗茨风机房的通风量按“换气次数”及“排除余热所需通风量”两者的最大值确定。

通风朝向、路径、面积是影响自然通风对环境控制效果的重要因素,参考相关规范^[9]进行设计。运泥、巡检通道的两侧分别与下沉庭院、车道出入口衔接,两端自然通风开口有效面积均约为 50 m²;生化池操作层与下沉庭院的东、西、南 3 个朝向衔接,自然通风开口有效面积约为 300 m²,窗地面积比超过 5%,满足规范中对利用自然通风控制环境、缩短通风设施使用时间的要求。考虑到操作层的进深较大,远离下沉庭院的区域可能存在气流死角,因此还设置了辅助的机械排风系统,排风量为 138 200 m³/h。排风口靠近地下空间进深处的外壁侧,即下沉庭院的对侧布置,形成良好的气流组织。

二沉池、高效沉淀池、反硝化深床滤池区域不具备自然通风的条件,分别设有全面的机械送、排风系统。其中,二沉池操作层的排风量为 28 200 m³/h,高效沉淀池与反硝化深床滤池操作层的排风量为 67 000 m³/h,送风量均为排风量的 80%,维持工艺池体操作层相对于巡检通道、清洁设备房间的负压。

鼓风机房内共设有 4 台鼓风机组,3 用 1 备,单台机组的散热量根据工艺专业提供的条件核算为 16.2 kW,机房排风量按消除总余热所需的通风量计算为 17 600 m³/h。罗茨风机的散热量较小,其机房排风量按表 4 所示的换气次数计算为 2 000 m³/h。两者的机械送风量均为排风量的 1.1 倍,维持机房相对于外部空间的正压。

电气设备用房根据电气专业提供的条件与要求的室内温度,对散热量进行核算,设置分体式空调进行降温。电气设备用房为气体灭火保护房间,平时通风系统与火灾后通风系统合用,机械送风量为排

风量的 1.1 倍,维持机房相对于外部空间的正压。

其余区域的机械送、排风系统按表 4 的标准值进行计算和设计,维持相应的压力梯度。

4 运行效果分析

该项目投入运营后,在工艺处理设施与除臭设施全部开启,而生化池操作层和运泥、巡检通道仅通过下沉庭院进行自然通风的工况下,对厂区内、外的环境控制与臭气处理效果进行测试。

4.1 地下空间环境测试结果

采用热敏式风速仪,对运泥与巡检通道、生化池操作层的风速进行实测,测量点具体布置如图 10 所示。

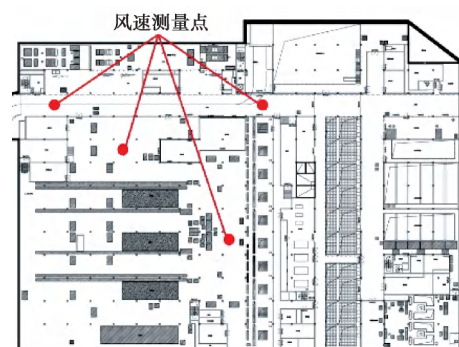


图 10 风速测量点布置

Fig. 10 Layout of Wind Speed Measuring Points

实测以单次记录时长为 90 min,连测 7 d 的方式进行,取单次测试的平均值作为该日的风速实测结果,如表 5 所示。结果表明,运泥与巡检通道、生化池操作层的气流组织可以形成较稳定的流场,风速在 0.11~0.84 m/s,符合南方地区的自然通风利用条件,实际应用效果良好。从前述可知,生化池操作层的自然通风开口面积大于运泥、巡检通道,但表

5 显示后者的风速普遍优于前者,表明对于大进深的地下厂区空间,增加自然通风对流的开口数量,比增加单个开口的面积更有利于加强自然风压作用。

该项目中下沉庭院和通道出入口的组合应用,加强了通道的风压作用,形成“穿堂风”效应,获得了更佳的通风效果。

表 5 风速实测结果
Tab. 5 Results of Wind Speed Measurement

区域	风速实测结果/(m·s ⁻¹)						
	第 1 d	第 2 d	第 3 d	第 4 d	第 5 d	第 6 d	第 7 d
运泥、巡检通道的出入口	0.38	0.67	0.84	0.69	0.72	0.78	0.83
运泥、巡检通道与下沉庭院的衔接处	0.26	0.46	0.42	0.26	0.44	0.67	0.50
下沉庭院西侧的生化池操作层中间	0.11	0.30	0.12	0.52	0.28	0.11	0.34
下沉庭院南侧的生化池操作层中间	0.16	0.20	0.37	0.17	0.34	0.22	0.25

对于厂区内有人员巡检、操作的主要区域,采用多通道恶臭检测仪对其空气环境进行实测,结果如表 6 所示。结果表明,在全面的密闭隔离措施和通风、除臭一体化系统的联合应用下,地下空间整体的环境空气质量良好。多处区域未检出硫化氢,所有区域氨浓度均低于感觉阈值,臭气浓度控制在 20 以下,满足制定的环境空气质量目标

值。运泥与巡检通道、生化池操作层的各项臭气浓度为地下厂区的最低水平,表明设计利用下沉庭院与地下空间进行衔接,加强区域的通风换气效果,是控制、提升地下污水处理厂环境的有效措施。经现场问询调查,运营人员表示长时间巡检时未感到不适,对地下空间的通风、除臭效果评价良好。

表 6 地下厂区空气环境实测结果
Tab. 6 Results of Air Environment Measurement in Underground WWTP

区域	氨/(mg·m ⁻³)	硫化氢/(mg·m ⁻³)	臭气(无量纲)
运泥、巡检通道	未检出	未检出	0(1)
预处理区操作层	0.083(0.178)	未检出	3(6)
装泥间	0.078(0.088)	0.021(0.241)	18(71)
地下一层污泥处理车间	0.260(0.331)	0.006(0.041)	9(29)
地下二层污泥处理车间	0.211(0.314)	0.007(0.054)	9(34)
生化池操作层	0.003(0.037)	未检出	1(2)
二沉池操作层	0.063(0.158)	未检出	2(3)
高效沉淀池操作层	0.057(0.110)	未检出	2(3)
反硝化深床滤池操作层	0.011(0.026)	未检出	1(2)

注:以上测试数值为多点、多时间段算术平均值,括号内为测试最大值。

4.2 地面环境测试结果

通过第三方对厂区地面的环境空气质量进行监测,高空排放口处的排放尾气监测结果如表 7 所示,

结果表明经除臭处理后的尾气污染物排放值满足制定的环境空气质量目标值,并明显优于国家标准和环评报告批复的限值。

表 7 排放尾气监测结果
Tab. 7 Monitoring Results of Exhaust Odor

控制项目	高空排放口		标准限值	
	排放质量浓度/(mg·m ⁻³)	排放速率/(kg·h ⁻¹)	排放质量浓度/(mg·m ⁻³)	排放速率/(kg·h ⁻¹)
氨	2.88(3.15)	0.10(0.11)	/	4.9
硫化氢	<0.2×10 ⁻³	<7.1×10 ⁻⁶	/	0.33
臭气浓度(无量纲)	390(417)		2 000	

注:以上测试数值为多时间段算术平均值,括号内为测试最大值。

综合考虑主导风向和该项目的地面布局,分别在厂界上风向设置 1 个监测点,厂界下风向设置 3 个监测点,对厂界处的环境空气质量进行监测。结果如表 8 所示,厂界处的污染物浓度满足

制定的环境空气质量目标值,并明显优于国家标准和环评报告批复的限值。对周边居民、游客进行问询调查,普遍表示没有不适或异味感,效果评价良好。

表 8 厂界环境监测结果
Tab. 8 Monitoring Results of Plant Boundary Environment

控制项目	厂界上风向 1#	厂界下风向 2#	厂界下风向 3#	厂界下风向 4#	标准限值
氨/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.035(0.040)	0.085(0.112)	0.085(0.112)	0.090(0.105)	1.5
硫化氢/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$<0.2\times 10^{-3}$	$<0.2\times 10^{-3}$	$<0.2\times 10^{-3}$	$<0.2\times 10^{-3}$	0.06
臭气浓度(无量纲)	<10	11(13)	12(15)	12(16)	20

注:以上测试数值为多时间段算术平均值,括号内为测试最大值。

5 结语

传统地下污水处理厂以满足职业卫生为标准的空间环境设计,和以满足国家标准限值的尾气排放设计,已无法满足人员的基本健康和舒适性诉求,也是频发邻避事件的主要原因。广州某地下净水厂基于完全对市民开放的理念和高标准的环境控制、提升目标,通过改进臭源的密闭隔离措施,维持合理的压力梯度,选用针对性的除臭工艺,设置全直流的通风、除臭一体化系统,采用自然通风与全面机械通风结合的多元通风方式,使各项污染物浓度明显优于标准限值,运营人员的健康和舒适诉求得到满足,良好的环境质量得以实现。将工艺设施操作层衔接下沉庭院,对自然通风能力挖潜的设计方式亦为南方地区污水处理厂建设提供了借鉴。运营期间,该项目成为附近居民群众的热门打卡地,实现了人与自然的和谐共生,首次将人文关怀和面向人体健康的舒适运维理念融合,得到了项目业主和运维单位的高度评价。

参考文献

[1] 杨一烽,杜炯,张欣. 国内地下式污水处理厂的发展现状和关键技术分析[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 101-106, 117.
YANG Y F, DU J, ZHANG X. Development status and key technology analysis of underground wastewater treatment plants (UWWTPs) at home [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 101-106, 117.

[2] 周波,顾凤. 地下式污水处理厂改造工程中除臭系统设计经验总结[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 303-311.
ZHOU B, GU F. Summary of experience in the design of deodorization system for underground WWTP reconstruction project [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 303-311.

[3] 鞠庆玲,董自强. 某地下污水处理厂通风除臭系统设计及运行调试[J]. 暖通空调, 2022, 52(9): 49-53.

JU Q L, DONG Z Q. Design and operation adjustment of ventilation and deodorization system in an underground sewage treatment plant [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(9): 49-53.

[4] 刘承东. 广东省《城镇地下污水处理设施通风与臭气处理技术标准》的编制思路[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 13-18.
LIU C D. Thoughts of compiling Guangdong Technical Standard for Underground Municipal Wastewater Treatment Plant Ventilating & Odor Controlling System [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 13-18.

[5] 李胜,何东岳. 通风系统衔接鼓风机曝气系统用于地下污水厂通风除臭[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 53-56.
LI S, HE D Y. Improvement of deodorization by connection of ventilation and aeration systems in underground wastewater treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 53-56.

[6] 周立,李桥龙,陈晓华,等. 北京槐房埋地式污水厂除臭通风一体化系统设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 55-60.
ZHOU L, LI Q L, CHEN X H, et al. Design of integrated system of deodorization ventilation for Beijing Huaifang underground WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 55-60.

[7] 阮辰旻,马艳. 张家港市金港地下污水处理厂运行情况评估与经验分析[J]. 净水技术, 2018, 37(1): 10-13.
RUAN C M, MA Y. Operation evaluation and experience analysis of Jingang underground wastewater treatment plant in Zhangjiagang City [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(1): 10-13.

[8] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 城镇污水处理厂臭气处理技术规程: CJJ/T 243—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd. Technical specification for odor control of municipal wastewater treatment plant: CJJ/T 243—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

[9] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
China Academy of Building Research. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.