

刘辉, 顾春平, 谈巍. 水厂排泥水系统优化的探讨[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 197-202.

LIU H, GU C P, TAN W. Exploration on optimization of sludge water system in WTP[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 197-202.

水厂排泥水系统优化的探讨

刘 辉*, 顾春平, 谈 巍

(上海南汇自来水有限公司北水厂, 上海 201316)

摘 要 【目的】为了解决水厂污泥脱水车间板框压滤机在处理经过浓缩池浓缩后的排泥水时,由于进入板框压滤机的泥水浓度偏低,从而造成产泥效率不佳的问题,并为具有类似工艺且需优化泥线生产环节的水厂提供有效建议和方法。【方法】文章分析了水厂泥线工艺段的主要环节,通过理论公式分析得出提高沉淀池排泥水浓度是解决问题的关键。结合实际工况,文章详细阐述了如何选择合适的仪表,在平流式沉淀池选择恰当的安装位置,以及在浓缩池安装线缆式污泥界面仪的过程。同时,将平流式沉淀池的排泥机从传统的单一往返运行模式调整为根据排泥水浓度动态运行模式,并对浓缩池的排泥频率和排泥时间做出调整。【结果】实践表明,经过上述的优化,进入板框压滤机的泥水含固率由 2% 稳定提升至 5%,单批次板框压滤机的出泥绝干量增加 40%,每月浓缩池上清液减量排放约为 20 000 m³。该系统优化对水线生产无不利影响,退水指标符合上海市《污水综合排放标准》二级标准(DB31/ 199—2018),具有较好的社会效益。【结论】综上所述,通过对水厂泥线的主要环节进行工艺调整,可以使得水厂泥线生产系统稳定高效,浓缩池上清液各项退水指标稳定达标,其减排也大幅降低了厂用水比例,成为水厂节能降耗的重要措施。

关键词 排泥机 浓缩池 脱水工艺 污泥浓度计 污泥界面仪

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)04-0197-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.024

Exploration on Optimization of Sludge Water System in WTP

LIU Hui*, GU Chunping, TAN Wei

(Shanghai Nanhui Water Supply Co., Ltd., North Water Plant, Shanghai 201316, China)

Abstract [Objective] To address the low sludge production efficiency of plate-and-frame filter presses in water treatment plants (WTPs) caused by low sludge concentration from concentration tanks, and to provide effective solutions for optimizing sludge line processes in similar WTPs. [Methods] This paper analyses key stages of the sludge line process, identifying increased sludge concentration from sedimentation tanks as a critical solution. Practical measures included selecting appropriate instruments, optimizing installation locations in horizontal flow sedimentation tanks, and installing cable-type sludge interface meters in concentration tanks. The operation mode of the sludge discharge machine in horizontal flow sedimentation tanks was adjusted from traditional reciprocating to dynamic based on sludge concentration, and discharge frequency and duration in concentration tanks were optimized. [Results] After optimization, the solid content of sludge entering the filter press increased from 2% to 5%, dry sludge output per batch rose by 40%, and monthly supernatant discharge decreased by approximately 20 000 m³. The system optimization had no adverse effects on water production, with effluent quality meeting *Integrated Wastewater Discharge Standard* (DB31/ 199—2018), demonstrating significant social and economic benefits. [Conclusion] By optimizing key processes in the sludge line of WTPs, the sludge production system has achieved stable and efficient operation. The effluent quality of the supernatant from the concentration tank consistently meets discharge standards, while the reduction in emissions significantly lowers the WTP's water usage ratio. These improvements serve as an important measure for energy conservation and consumption reduction in WTPs.

Keywords sludge discharge machine sludge thickener dewatering process sludge concentration meter sludge interface instrument

[收稿日期] 2023-09-04

[通信作者] 刘辉(1984—),男,主要从事给水厂污泥脱水生产工作,E-mail: 59598000@qq.com。

水厂在净水常规处理工艺中的絮凝沉淀和过滤环节,会产生大量生产废水,占总产水量的5%~7%。原水中的悬浮颗粒、胶体颗粒及相关有机物、色度物质在混凝剂(南方地区常用铝盐)的作用下被吸附沉淀,以及砂池过滤截留的絮体颗粒是生产废水的主要成分。这些大量泥水若不经处理,直接排至水体,除泥砂会抬高河床,造成河道淤塞以外,高铝污泥还会危害水中生物,破坏生态平衡^[1]。排泥水处理系统的使用可以有效降低周边水域环境污染已成共识,目前,国内新建水厂根据国家生态环境部门的要求都配套了排泥水处理系统。但在日常运维过程中,排泥水的收集、浓缩、处置等环节管理往往不够精细,造成最终进入脱水系统的泥水含固率偏低,给脱水设备稳定高效运行带来不便。文章经过研究实践,借助合适的在线仪表,改变原有排泥机和浓缩池的运行模式,对排泥水、出泥量等各项数据统计分析,获得相关应用启示。

1 工艺介绍

1.1 水线工艺

某南方市政水厂以青草沙水库为水源,远期设计供水规模为30万m³/d,一期实际规模为20万

m³/d,具有臭氧活性炭深度处理工艺。其水线工艺流程为,二氧化碳调pH→预臭氧→机械混合→折板絮凝→平流沉淀→砂池过滤→后臭氧→炭池过滤→消毒接触→清水库。该水厂沉淀形式为水力絮凝结合平流沉淀,分2座4组,沉淀池和絮凝池总长为135.95m,单座沉淀池宽为25.13m,每座沉淀池分单独2格,单格池宽为12m,池深约为3.65m。该形式池型结构简单,运行稳定,抗冲击负荷性能良好,出水水质稳定,管理难度低,药耗相对较少,沉淀池上布设4组虹吸式排泥机抽取沉淀池底泥。

1.2 泥线工艺

1.2.1 泥线流程

该水厂泥线工艺主要包括预浓缩池、浓缩池、排泥水调节池、反冲洗调节池、平衡池等构筑物。沉淀池排泥水通过虹吸式排泥机排出,进入排泥水调节池。砂滤池反冲洗水进入反冲洗调节池,上清液经紫外消毒后回用,底泥排放至排泥水调节池。排泥水调节池内的泥水通过潜污泵提升至浓缩池,池内底泥进入平衡池,最后泵入板框压滤机进行脱水处理^[2]。工艺流程如图1所示。

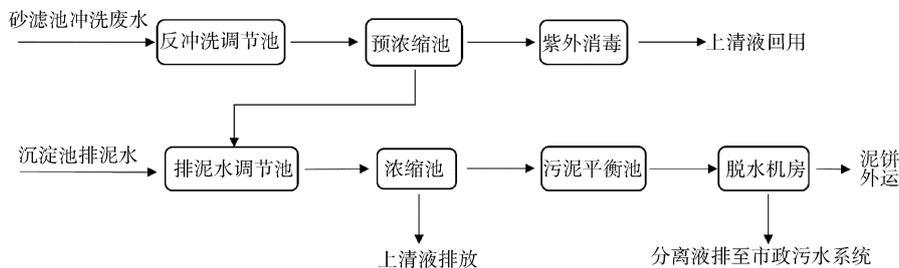


图1 泥线工艺流程

Fig. 1 Process Flow of sludge Line

1.2.2 脱水机械及工艺设计

该水厂脱水系统采用两台板框压滤机,属于两段式加压,是一种在正常进泥之后,还利用离心泵挤压橡胶隔膜的二次压榨脱水机械。该板框压滤机的滤布尺寸为1.5m×1.5m,单台滤板数量为46块,过滤面积为167m²,滤腔体积为2146L^[3]。

压滤机配有相应的加药系统,投加制备质量分数在2‰左右的聚丙烯酰胺(PAM)阳离子有机高分子絮凝剂。根据压滤机进泥流量和泥水含固率,动态调整加药量和在线混合器的搅拌速度,使得混凝效果达到最佳。

1.2.3 产能变化原因分析

为了解实际泥线生产负荷,对日产干泥量进行估算。干泥量是指原水中所携带的干固体总量,包括原水中的悬浮物、胶体、溶解物和投加的药剂,以及原水公司根据原水水质情况,不定期投加的粉末活性炭。根据《给水排水设计手册》(第三册)所提供的公式^[4]。

由于该水厂使用铝盐,所以计算如式(1)。

$$S = Q \times (TE + 0.2 \times C + 1.53 \times A + B) \times 10^{-6} \quad (1)$$

其中:S——干泥量,t/d;

- Q ——水厂日平均取水量, t;
- T ——原水浑浊度, NTU;
- E ——浑浊度单位与悬浮固体(SS)单位换算系数;
- C ——原水色度, 度;
- A ——铝盐投加量, mg/L;
- B ——水处理中其他添加剂的投加量, mg/L。

根据对水厂 2022 年 1 月—8 月生产数据汇总统计,原水日平均浑浊度为 6.41 NTU,色度为 6,其中浑浊度单位与 SS 单位的转换系数取 1, Q 为 13.06×10^4 t(这里为反算绝干量,用实际取水量),铝盐投加量为 31.75 mg/L,将上述数据代入式(1),经计算所得,日产干泥量为 7.335 t,按泥饼含水率 65%为目标,脱水车间平均每天应出泥 11.28 t。若板框压滤机进泥含固率为 2%,脱水车间需处理平衡池泥水合计 $7.335 \text{ (m}^3\text{)}/0.02 = 366.75 \text{ (m}^3\text{)}$ 。分 2 台板框压滤机平均处理,在滤布透水性正常的情况下,按固定进泥时间,单台单批次约处理 9 m^3 的泥水,那么 2 台板框机一共需处理 40 个批次。加上板框压滤机的日常维护保养,人力、时间成本较大。如若将平衡池中的进机泥水含固率提高至 5%,处理同样的干泥量,2 台板框压滤机只需要处理 $7.335 \text{ (m}^3\text{)}/0.05 = 146.7 \text{ (m}^3\text{)}$ 的泥水,合计运行 $146.7/9 = 16$ 批次,将在很大程度上提高产泥效率。由此看出,适当提高平衡池泥水含固率是关键所在。

2 提高平衡池的泥水含固率

平衡池中的泥水从源头来讲由 2 部分组成:一部分来自砂滤池反冲洗水静置后的底泥,砂滤池反冲洗水有水量大,含固率低的特点;另一部分来自沉淀池排泥水,相对砂滤池反冲洗水,这部分水量相对较少,但平均含固率高^[2]。本文主要从沉淀池排泥水、浓缩池运行这两方面分析,根据各自特点,借助于合适的在线仪表来优化生产工艺。

2.1 排泥机改造

该水厂在 4 组平流式沉淀池上各配有一台虹吸式排泥机。排泥机主要由不锈钢桁架、吸泥部件、驱动电机、减速箱、制虹系统以及可编程逻辑控制器(PLC)控制单元组成。初始设计排泥过程为:运行潜水泵,利用水射器形成管道真空,关闭潜水泵。吸泥管抽取池底泥渣汇总到出泥总管,经过水封箱后

进入排泥渠。排泥机在减速机的驱动下,通过沉淀池首尾两组限位开关,做完整的往复运动,并随之排泥。当排泥机回到出发点时,打开电磁阀破坏虹吸,排泥结束。

2.1.1 排泥机运行模式调整

研究表明,平流式沉淀池底部的积泥,从头部到尾部呈由多到少的堆积态势。一般划分为高泥位、中泥位、低泥位 3 个区域,根据取样检测沉淀池各个区段的泥水含固率,绘制平流式沉淀池积泥区如图 2 所示。

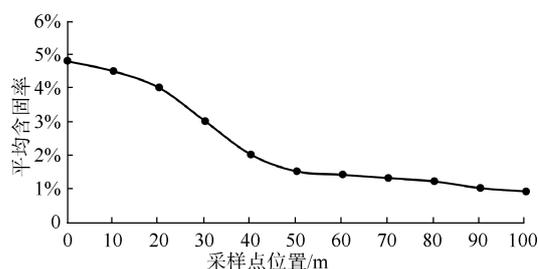


图 2 平流式沉淀池积泥分布

Fig. 2 Sludge Distribution of Horizontal Sedimentation Tank

排泥机按完整往返的模式运行,可能会导致沉淀池头部排泥不充分,而尾部的排泥水浓度极低,不但增加了脱水车间的生产负荷,还造成水资源的浪费。因此,有必要对当前的排泥机运行模式进行合理调整,实现“高泥位区多排,低泥位区少排”,达到污泥脱水系统高效处理的目的。

为了更为精准地掌握排泥管的泥水浓度,尝试利用在线仪表跟踪测量。最初,在排泥机桁架上安装超声波式污泥界面仪,利用导杆将传感探头固定在水面以下 2 m 左右的位置,跟随排泥机的同步行走,试图实时测量沉淀池各个区段的泥位堆积情况,用以指导排泥。但在测试过程中,此类污泥界面仪在排泥机静止状态,能够准确测量池底积泥高度。而在排泥机行进过程中,发现排泥机下部的刮泥板会对池底积泥造成扰动,严重影响了传感器的测量,无法指导排泥。而后,经过实践测试,直接从排泥管的泥水浓度着手,在水封箱附近安装污泥浓度计,经过对传感探头安装位置的调整(避免传感探头遭受水流冲击),实现对泥水浓度的准确监测,如图 3 所示,取得较好的效果。

为达到“高泥位区多排,低泥位区少排”的目的,实践表明在排泥机的驱动装置上增加变频器,通

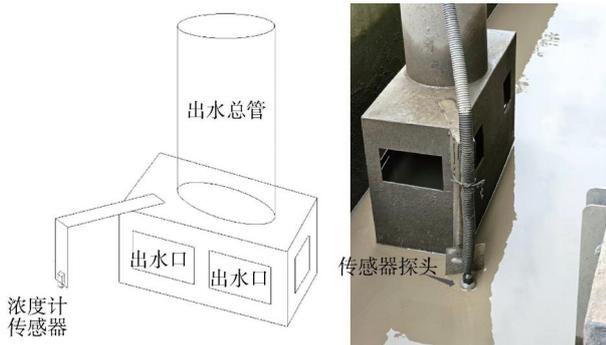


图3 污泥浓度计安装位置

Fig. 3 Installation Location of Sludge Concentration Meter

过变频器合理调整排泥机的行进速度,可充分实现以下逻辑:制虹成功后,排泥机以低速从头部高泥位处出发(频率为 30 Hz),遇到排泥水高浓度结束信号值 A,转而以中速度行走(频率为 40 Hz);遇到排泥水中浓度结束信号值 B,转而以高速度行走(频率为 50 Hz);遇到排泥水低浓度结束信号值 C,排泥机返回,返回过程中持续排泥,在触碰到沉淀池头部限位时,排泥机停止行走,破坏虹吸,排泥结束。上述频率值及浓度信号值 A、B、C 都可在上位机根据沉淀池的实际工况进行调整。

按照这套运行模式,沉淀池尾部区域可能会存在长期未排泥的情况,为此,运行逻辑设立了清理模式,即按上述逻辑行走 N 次后,第 N+1 次,排泥机会完整往返一次,其中 N 值可以动态调整。

2.1.2 排泥机制虹系统优化

此外,利用数字真空表替换之前的指针式真空表,优化了制虹方式。原有方式是让潜水泵运转预先设定时长来制造虹吸,为确保虹吸形成,往往预设时间值长于虹吸形成时间。达到预设时间后,关闭潜水泵,随后排泥机行走。以此方式制虹可能存在 2 个问题,一是时间到,虹吸尚未形成,排泥机就会以未排泥的状态行走;二是虹吸早已形成,但还未达到预设时间值,排泥机将处于长时间原地排泥状态,造成排泥水整体含固率偏低。使用数字真空表后,当排泥管真空度达到预设真空值(-0.4 MPa)时,排泥机即可做下一步动作。此外,真空表的数值实时传输至上位机,监控排泥机的出水状况,及时发现真空意外破坏的情况。

2.1.3 浓度计对预估泥饼产量的作用

安装在 4 台排泥机上的浓度计,会在排泥过程中监测泥水浓度。通过上位机,实时记录各台排泥

机的行走时间和相应浓度,形成记录存储在数据库中。并由此推算出每日的进泥量,将其和脱水车间的当日泥饼产量对比,作为一个评价当日生产状况的辅助参考指标。再结合日处理水量产生的干泥量值,指导调整排泥机的运行参数和板框机的运行批次,同样由此掌握浓缩池的运行情况。

2.2 浓缩池的运行调整

污泥浓缩分为重力浓缩和机械浓缩两大类。该水厂采用重力浓缩且有加药的工艺,分东、西两组,单组为长×宽=10 m×10 m 的正方形,积泥区为圆形,以确保刮泥机在行走过程中能够达到所有积泥区域。在潜污泵将排泥水调节池中泥水泵入浓缩池的同时,往管道中投加 PAM,由静态混合器充分混合,进入浓缩池的配水槽。上清液外排,经过重力压缩的底泥经人工排至平衡池。

2.2.1 浓缩池运行控制的不足

浓缩池调整之前运行工况为每日排泥一次,泥水放至平衡池供板框机压榨,每次排泥时间为 10 min 左右。浓缩池的泥斗结构如图 4 所示,底部坡度为 0.1°。

污泥斗容积公式如式(2)。

$$V = \frac{1}{3}\pi h(a^2 + ab + b^2) \quad (2)$$

其中:V——泥斗体积,m³;

h——泥斗高度,m;

a、b——泥斗上、下部半径,m。

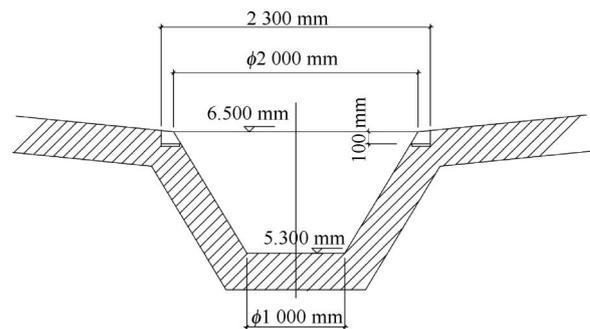


图4 泥斗剖面

Fig. 4 Profile of Sludge Hopper

由式(2)计算可知,泥斗容积为 2.2 m³。按这种排泥方式,排泥时间过长,流速过大,排泥后期可能穿透泥层与上清液形成通流,致使平衡池的含固率偏低,不利于板框机的泥饼成形,且板框单批次出泥量较少,生产效率不高。

2.2.2 浓缩池运行优化

为避免上述情况,在浓缩池上布置了1台线缆式污泥界面仪,通过其下探式传感器,可检测不同液位深度的泥水浓度值,从而可以更为直观地了解浓缩池的运行状况。根据实际情况,将其设置为区域追踪模式,监测固定液位的泥水浓度。

当水深为6.5 m处的泥水质量浓度达到20 g/L(此处参数根据实际情况调整),并且进入浓缩池的泥水浓缩时间为12~24 h(一方面让污泥充分沉降压缩,另一方面也避免底泥停留时间过长,发生厌氧导致其上浮)^[5]后,再根据平衡池液位,分多次(3次)、短时间(3 min)间隔排泥,间隔时间和刮泥机周边线速度相关[式(3)]。

$$t = \frac{\pi D}{v} \quad (3)$$

其中: t ——刮泥机行走时间,s;

D ——浓缩池直径,m;

v ——刮泥机周边线速度,m/s。

将实际数值代入式(3),计算得出刮泥机旋转一周需31 min,这里取排泥间隔时间为1 h。待上次排泥后,浓缩池底泥被刮泥机聚至泥斗压缩后,再进行下次排泥。确保放入平衡池的污泥含固率在5%左右,满足后续板框机高效运转的需求。

2.2.3 浓缩池退水指标

随着沉淀池排泥机运行模式的调整,进入排泥水调节池的泥水含固率整体提高,得益于2‰质量分数助凝剂PAM的投加,辅以安装在管道上的静态混合器,浓缩池上清液达标排放,执行上海市《污水综合排放标准》(DB31/199—2018)中的二级标准,不受工艺调整影响,具体指标如表1所示。

表1 上清液退水指标对比^[6]

Tab. 1 Comparison of Supernatant Water Quality Indices^[6]

检测项目	调整前	调整后	参考限制标准
悬浮物/(mg·L ⁻¹)	11.00	4.29	30.00
pH值	7.28	7.42	6.00~9.00
化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	7.31	31.80	≤60.00
总磷/(mg·L ⁻¹)	0.101	0.122	≤0.500
总氮/(mg·L ⁻¹)	2.58	5.58	≤10.00
氨氮(以N计)/(mg·L ⁻¹)	1.55	2.54	≤5.00

3 调整后收益与结语

3.1 收益

自2022年10月至今,通过上述排泥机运行模式的调整,沉淀池月度排水量大幅减少。表2为各月度排水量统计汇总。

表2 排水量统计

Tab. 2 Statistics of Sludge Water Discharge

旧模式	排水量/m ³	取水量/m ³	新模式	排水量/m ³	取水量/m ³
2022年10月	41 438	3.611 6×10 ⁶	2023年3月	28 611	4.746 6×10 ⁶
2022年11月	62 435	3.552 2×10 ⁶	2023年4月	22 212	3.191 9×10 ⁶
2022年12月	53 720	4.423 9×10 ⁶	2023年5月	20 613	2.918 7×10 ⁶
2023年1月	49 109	3.930 9×10 ⁶	2023年6月	21 861	4.183 7×10 ⁶
2023年2月	44 852	4.190 0×10 ⁶	2023年7月	21 368	4.442 9×10 ⁶

可以看出,在保证水厂正常运转,沉淀池出水浑浊度达标的情况下,排泥机以优化模式运行,可以减少近50%的沉淀池排泥水,按单月平均节省20 000 t水计算,全年可节约240 000 t,也大幅减少了浓缩池上清液的外排水量。此外,由于排泥水的减量,从排泥水调节池泵入浓缩池的水量和开泵时间也大大减少,全年约节省电能27 000 kW·h,实现了节能减排。

结合后续浓缩池排泥模式的优化,稳定提高了进入平衡池的泥水浓度,板框机的处理效率也有所提高。在去除脱水车间2022年11月份板框压滤机

扩板的影响因子,将2022年、2023年1月—6月的单批次出泥绝干量进行对比,如图5所示(扣除泥饼含水率不同的因素)。

板框压滤机单批出泥绝干量平均提升40%,减少了板框压滤机的运行时间和批次,降低了脱水车间员工的劳动强度,整体提高了泥线的生产效率。

3.2 结论

①合理利用污泥浓度计和线缆式污泥界面仪,参与排泥机、浓缩池的运行管理,较改造前的运行模式可节约50%的沉淀池排泥水,并且压滤机单批产

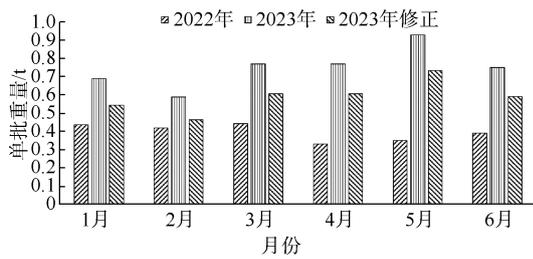


图 5 压滤机单批出泥

Fig. 5 Single Batch Output of Filter Press

量提高 40%,降低了人力运营成本。

②文章中的改造和运行模式调整,不影响浓缩池外排水水质,且能大幅减少外排水量,有力保护了周边生态水系。

③此次改造是对水厂脱水工艺精细化管理的实践,为其他水厂类似泥线运营管理提供借鉴。

参考文献

[1] 童祯恭,吴哲帅. 净水厂排泥水处置现状的若干分析[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(6): 88-95.
TONG Z G, WU Z S. Analysis on sludge water disposal in water purification plant[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(6): 88-95.

[2] 何纯提. 净水厂排泥水处理[M]. 第二版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
HE C T. Sludge Treatment in water purification plant[M]. 2nd Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

[3] 赵以刚,穆宏,马顺君. 自来水厂排泥水处理系统调试改进案例. 净水技术, 2019, 38(s1): 93-95, 172.
ZHAO Y G, MU H, MA S J. Case study of adjustment and improvement of sludge water treatment system in waterworks[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s1): 93-95, 172.

[4] 史春海,马小蕾,王海梅. 给水排水设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
SHI C H, MA X L, WANG H M. 给水排水设计手册[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[5] 黄孟斌,王长平,张毅,等. 中小型水厂排泥水处理系统的设计与运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(22): 104-107.
HUANG M B, WANG C P, ZHANG Y, et al. Design and operation of sludge water treatment system in small and medium sized waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(22): 104-107.

[6] 上海市环境保护局,上海市质量技术监督局. 污水综合排放标准: DB31/ 199—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Shanghai Municipal Bureau of Ecology and Environment, Shanghai Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Integrated wastewater discharge standard: DB31/ 199—2018[S]. Beijing: Standstard Press of China, 2007.

(上接第 188 页)

空间实现提标改建的要求,对同类型工程具有借鉴意义。

参考文献

[1] 杨磊,赵健,郭瑜,等. 高排放标准全地埋污水处理厂设计案例[J]. 能源与环境,2023(2): 92-94, 117.
YANG L, ZHAO J, GUO Y, et al. Design case of full ground sewage treatment plant with high discharge standard [J]. Energy and Environment, 2023(2): 92-94, 117.

[2] 王以尧,王雅璐,韩永旺,等. 地表水环境质量标准综述(二)——国外地表水环境质量标准、基准介绍及分析[J]. 四川环境, 2022, 41(2): 273-280.
WANG Y Y, WANG Y L, HAN Y W, et al. Review of surface water environmental quality standards (2): Introduction and analysis of foreign surface water environmental quality standards and benchmarks [J]. Sichuan Environment, 2022, 41(2): 273-280.

[3] 高晨晨,李思雨,穆莹,等. 地下式污水处理厂用地现状与节地分析[J]. 给水排水,2023,59(9): 20-23.
GAO C C, LI S Y, MU Y, et al. Current situation and land conservation analysis of underground sewage treatment plants

[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(9): 20-23.

[4] 曾令斌,邓军,张洋. 惠州市某地下式污水处理厂工艺设计案例[J]. 净水技术,2023,42(s2): 134-140.
ZENG L B, DENG J, ZHANG Y. Engineering design case of an underground WWTP in Huizhou City [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s2): 134-140.

[5] 杨墨,史航标,程瑞丰,等. 武汉市某污水处理厂地下式扩建设计案例[J]. 净水技术,2024,43(s1): 341-347, 360.
YANG M, SHI H B, CHENG R F, et al. Engineering design case of WWTP underground extension in Wuhan City [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(s1): 341-347, 360.

[6] 李晓莹. 半地下全封闭式污水处理厂应用实例[J]. 科学技术创新,2022(6): 151-154.
LI X Y. Application example of semi-underground fully enclosed sewage treatment plant [J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(6): 151-154.

[7] 吴廷奎,蒋能飞. 高层建筑前室机械加压送风系统旁通泄压阀超压控制措施分析[J]. 制冷,2021,40(2): 73-76.
WU Y K, JIANG N F. Analysis of overpressure control measures for bypass relief valve of mechanical pressurized air supply system in front room of high-rise building [J]. Refrigeration, 2021, 40(2): 73-76.