

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.20.018

间歇运行一级强化工艺用于处理合流制溢流污水

楚鑫鹏, 刘 军, 苏进龙, 张诗雄, 陈广军, 张利娜, 张延军,
李 进, 周文俊, 邹 静, 屈天晓, 石稳民, 郭 涛
(中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘 要: 武汉市黄孝河机场河项目建有全国最大的合流制溢流污染调蓄及一级强化处理设施群。其中机场河合流制溢流污染调蓄及一级强化处理设施用于调蓄和处理雨季时机场河明渠起端的合流制溢流污水,调蓄规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,一级强化处理设施规模为 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。采用细格栅、曝气沉砂池、高效沉淀池、精密过滤设备、紫外消毒等处理工艺,具有占地面积小、间歇运行和启动快速的特点。运行结果显示,出水水质可稳定达到设计标准,出水COD、SS和TP的平均浓度分别为53.07、4.28、0.35 mg/L,去除率分别为28.9%、92.2%和72.8%;综合运营成本为0.363元/ m^3 。

关键词: 合流制溢流污染; 一级强化处理; 高效沉淀池; 间歇运行

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)20-0108-05

Application of Intermittent Primary Enhanced Process in Combined Sewer Overflow Wastewater Treatment

CHU Xin-peng, LIU Jun, SU Jin-long, ZHANG Shi-xiong, CHEN Guang-jun,
ZHANG Li-na, ZHANG Yan-jun, LI Jin, ZHOU Wen-jun, ZOU Jing,
QU Tian-xiao, SHI Wen-min, GUO Tao

(China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: The Huangxiao River and Jichang River Project in Wuhan has the largest combined sewer overflow (CSO) regulation and primary enhanced treatment facilities in China. Of which, the Jichang River CSO storage tank and primary enhanced treatment plant are used to treat the CSO that accumulates at the beginning of the Jichang River open channel during the rainy season. It has a storage capacity of $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ and a primary enhanced treatment capacity of $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Fine grid, aerated grit chamber, high efficient sedimentation tank, precision filtration equipment, and ultraviolet disinfection processes are employed in this facility. The system is characterized by a small footprint, intermittent operation and fast start-up. According to the operation results, the average effluent concentrations of COD, SS, and TP are 53.07 mg/L, 4.28 mg/L and 0.35 mg/L, and the removal rates are 28.9%, 92.2%, and 72.8%, respectively. The effluent quality consistently satisfies the design standards, and the comprehensive operating cost is 0.363 yuan/ m^3 .

Key words: combined sewer overflow pollution; primary enhanced treatment; high efficient sedimentation tank; intermittent operation

合流制排水系统在我国普遍存在,随着社会经
济发展和国内水环境治理工作的不断深入,合流制

溢流(CSO)污染问题日益突出,是公认的需要长期
应对的重大工程和技术问题^[1]。由于合流制溢流污

水具有短时暴发性和季节性特征,生物处理难以解决雨季的负荷冲击影响和旱季的微生物活性维持问题,存在投资高、占地面积大和旱季“晒太阳”的困扰^[2]。

武汉市黄孝河机场河项目采用一级强化处理工艺对合流制溢流污水进行处理,结果表明,该工艺具有占地面积小、启动快、耐冲击、运营维护成本低、处理效果较好的优势,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

机场河是武汉市汉口片区内的一条重要河道,末端汇入府河,并最终进入长江,全长11.4 km,其中地下箱涵段长5.6 km,明渠段长5.8 km。因历史原因,机场河流域目前仍属于雨污合流制排水系统,旱季污水通过在暗涵出口处设置钢坝闸拦截,经泵站提升至污水处理厂进行处理,但雨季时,暗涵来水量远超污水厂处理能力,存在严重的合流制溢流污染问题。由于机场河合流制排水系统庞大而复杂,很难在短时间内进行全面的雨污分流改造,因此采用“上游调蓄-中途转输-末端处理”的方式解决合流制溢流污染问题(见图1)。其中,中途合流制污水调蓄池(常青CSO调蓄池)削减一部分峰值流量,其余合流制溢流污水通过截污箱涵转输到末端机场河CSO调蓄池及一级强化处理设施调蓄并处理,在短期内实现水环境改善的目的,并为下一步片区雨污分流和提质增效创造条件。

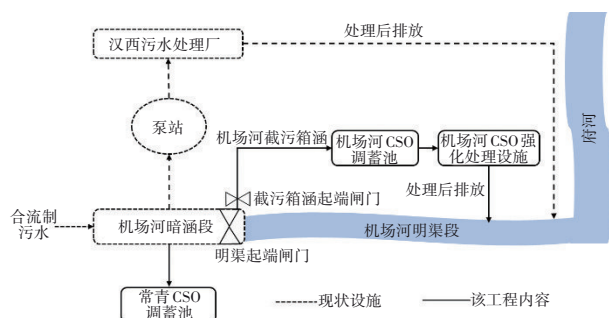


图1 机场河污染治理方案示意

Fig.1 Schematic diagram of Jichang River CSO pollution treatment scheme

2 溢流污染控制目标

目前国内尚未出台针对合流制溢流污染的控制标准和规范。美国从20世纪八九十年代开始进行合流制溢流污染治理,他们认为城市CSO溢流频次控制在4~6次/a较为合理。根据武汉溢流污染及面源污染治理系统建设规划,接纳水体为达标水体

时,年均溢流次数宜控制在10次以内;接纳水体为非达标水体时,年均溢流次数宜控制在4~6次。综合考虑现状条件对CSO调蓄池规模、截污箱涵尺寸的限制,结合该项目接纳水体水质需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类标准,通过选用代表年降雨对不同工况进行模拟,确定溢流频次控制在10次以内,基本可实现工程目标。

3 设计方案

3.1 设计规模

基于Infoworks ICM模型模拟和实测溢流水质,根据溢流控制目标(溢流频次10次/a)与设计降雨(以24.4 mm、65 min为临界降雨事件),综合考虑入管流量、污水量、施工降水及地下水入渗量、管网调蓄容量和污水泵站抽排能力等因素,结合区域现状用地布局、区域增量建设和项目建设、运行费用等,确定机场河CSO调蓄池及一级强化处理设施规模后,再进行代表年全年溢流污染模拟,对处理规模进行复核,最终确定机场河CSO调蓄池的设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,一级强化处理设施的设计规模为 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.2 一级强化处理设计进水水质

一级强化处理设施的处理对象为合流制排水系统产生的溢流污水,主要包括生活污水、工业废水、雨水和管道内沉积的底泥等,具有流量大、历时长和污染物含量较高等特点。参考国内外合流制排水系统溢流污水水质情况,以及武汉市汉西污水处理厂的设计进水水质,结合城市规划功能,确定机场河CSO一级强化处理设施的设计进水水质。

目前,我国雨天溢流污水处理排放标准存在空白,若采用较高的出水标准,则存在投资高、占地大、处理设施利用率不高和运维难度大等问题。根据合流制溢流污水来源分析,SS是污染物中的关键指标,直接影响水体感官及主要水质指标。相关研究表明,SS与COD、氨氮、TP等线性相关性及其指数相关性良好,因此在合流制溢流污水处理中控制住SS即可大幅削减污染物总量^[3]。结合武汉市污染物总量控制的具体要求和机场河的功能定位,将SS和TP作为机场河CSO一级强化处理设施的出水控制指标。

结合以上分析,确定该项目设计进、出水水质,如表1所示。

表1 一级强化处理设施进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of primary enhanced treatment facility $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

水质指标	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TP
设计进水	50~180	100~400	70~500	10~25	1.5~4
设计出水			10		1

3.3 工艺选择

基于该项目建设用地紧张及合流制溢流污水处理设施间歇运行的特征,结合设计进、出水水质控制指标,综合考虑投资、运营成本和环境效益,未采用生物处理工艺,而是通过以物化法为主的一级强化处理对污染物进行最大程度削减。一级强化处理可以在较少投资和运行成本的条件下,显著地提高污染物的去除率,且运行管理简单、运行启动快、处理效果较好、环境效益较好。机场河CSO调蓄及一级强化处理工艺流程如图2所示。

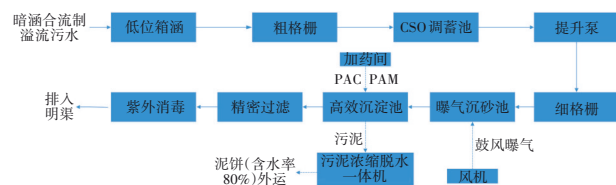


图2 污水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of wastewater treatment process

3.4 主要构筑物及设计参数

① 粗格栅、调蓄池和提升泵房。粗格栅与调蓄池合建,设计流量 $15 \text{ m}^3/\text{s}$;采用4台钢丝绳牵引格栅,渠道宽 3.0 m ,栅条间隙 30 mm , $N=2.2 \text{ kW}$ 。调蓄池容积 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,分2格。单格设19个廊道,每个廊道净宽 5 m ,设门式冲洗系统1套。提升泵房与调蓄池合建。设泵位6个,此次安装变频潜污泵4台,不设备用,单台潜污泵 $Q=3\,600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=160 \sim 230 \text{ kPa}$, $N=355 \text{ kW}$,其余2个泵位为扩建预留。

② 细格栅及曝气沉砂池。细格栅与曝气沉砂池合建,2座,设计流量 $4 \text{ m}^3/\text{s}$,单座平面尺寸 $61.00 \text{ m} \times 10.30 \text{ m}$ 。每座设3道过水渠,宽 1.4 m ,每道渠设置1台内进流孔板格栅,栅条间隙 5 mm , $N=2.6 \text{ kW}$ 。曝气沉砂池2座,单座平面尺寸 $63.05 \text{ m} \times 11.20 \text{ m}$,分2格,单格净宽 4.4 m ,有效水深 3.0 m 。设计流量 $4 \text{ m}^3/\text{s}$,水力停留时间 9.9 min ,水平流速 0.076 m/s ,总供气量 $23.37 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

③ 高效沉淀池。1座,平面尺寸 $74.75 \text{ m} \times 34.60 \text{ m}$,分4格,处理规模 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。混合区停留时间

2.13 min ;絮凝反应区停留时间 5.78 min ;沉淀区停留时间 30 min ,表面负荷 $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。每格设混凝池2座,合计有效容积 128 m^3 ;絮凝池1座,有效容积 347 m^3 ;沉淀池1座,直径 17 m ,斜管面积 180 m^2 ,污泥循环率为3%。

④ 精密过滤车间。1座,平面尺寸 $47.20 \text{ m} \times 14.70 \text{ m}$,处理规模 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。设精密过滤设备12台,单台 $Q=1\,250 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=4.75 \text{ kW}$ 。

⑤ 紫外消毒池。1座,平面尺寸 $12.82 \text{ m} \times 13.39 \text{ m}$,分3条廊道。每条廊道设紫外消毒装置1套,单套设24个模块,每个模块8支灯管, $N=144 \text{ kW}$ 。

⑥ 污泥浓缩脱水机房。1座,平面尺寸 $32.50 \text{ m} \times 12.60 \text{ m}$ 。设离心式浓缩脱水机4台,单台 $Q=50 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=60 \text{ kW}$;设2套污泥料仓系统,每套有效容积 100 m^3 。

⑦ 储泥池。1座,平面尺寸 $20.90 \text{ m} \times 5.60 \text{ m}$,有效容积 420 m^3 ,分2格。

⑧ 加药间。1座,平面尺寸 $29.50 \text{ m} \times 8.60 \text{ m}$,为高效沉淀池提供混凝剂(PAC)和絮凝剂(PAM)。PAC、PAM投加量分别为 $8 \sim 15$ 、 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 。

⑨ 除臭系统。离子除臭1套,设计除臭风量为 $23\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=33.35 \text{ kW}$ 。

⑩ 变配电间。设高压配电室、变配电间和控制值班室等,由2台 $1\,600 \text{ kVA}$ 干式变压器向全厂低压生产、生活用电设备供电。

4 运行效果及评价

4.1 实际运行状况

机场河CSO调蓄及一级强化处理设施自2022年8月1日逐步进入运行期,至2023年6月30日机场河流域内共发生降雨77场,一级强化处理设施投入使用19次,运行38 d,处理合流制溢流污水 $290.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,PAC实际投加量约 13 mg/L ,PAM实际投加量约 0.8 mg/L 。进水平均COD为 74.87 mg/L ,平均SS为 59.46 mg/L ,平均TP为 1.32 mg/L ,均低于设计指标;出水平均COD为 53.07 mg/L ,平均SS为 4.28 mg/L ,平均TP为 0.35 mg/L ,稳定达到设计出水标准,运行状态良好。

4.1.1 对COD的去除效果

机场河CSO调蓄及一级强化处理设施进、出水COD变化见图3。整体来看,进水COD为 $56.73 \sim$

107.5 mg/L,平均值为74.87 mg/L,可见进水COD偏低;出水COD为29.9~75.86 mg/L,平均为53.07 mg/L,平均COD去除率为28.9%,COD去除率较相关文献报道(40%~82%)偏低^[4]。一级强化处理主要去除悬浮态和胶体态有机物,由于该工程中一级强化处理设施前设置调蓄池,停留时间较长,发挥了沉淀池的作用,去除了一定比例的悬浮性有机物,导致一级强化处理对COD的去除率偏低。

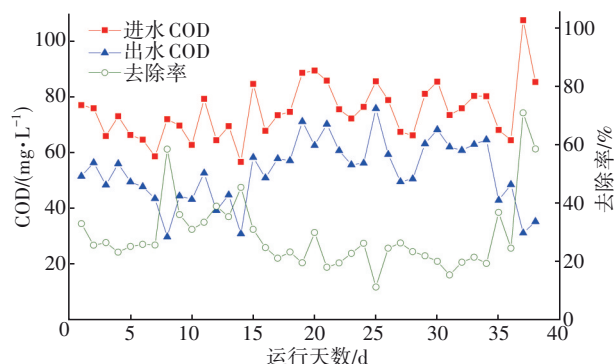


图3 调蓄及一级强化处理设施进、出水COD变化

Fig.3 Variation of COD in influent and effluent of regulation and storage and primary enhanced treatment facilities

4.1.2 对总磷的去除效果

机场河CSO调蓄及一级强化处理设施进、出水TP变化见图4。

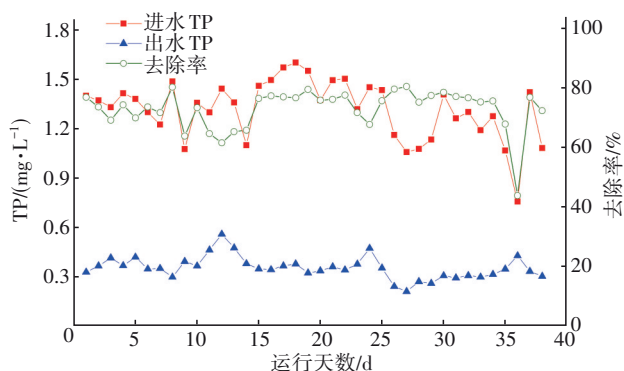


图4 调蓄及一级强化处理设施进、出水TP变化

Fig.4 Variation of TP in influent and effluent of regulation and storage and primary enhanced treatment facilities

由图4可知,进水TP为0.76~1.60 mg/L,平均值为1.32 mg/L,进水TP略低于设计进水浓度。经过处理后,出水TP为0.21~0.56 mg/L,平均值为0.35 mg/L,平均去除率为72.8%,满足设计出水标准(1 mg/L)。该工程采用化学除磷方式,除磷效果

较好。

4.1.3 对SS的去除效果

机场河CSO调蓄及一级强化处理设施进、出水SS变化见图5。进水SS为32.75~86.04 mg/L,平均值为59.46 mg/L。受降雨大小和调蓄池进出水流量不同影响,进水SS波动较大,但平均值低于设计值。出水SS为2.0~6.5 mg/L,平均值为4.28 mg/L,平均去除率为92.2%,稳定达到设计出水标准。

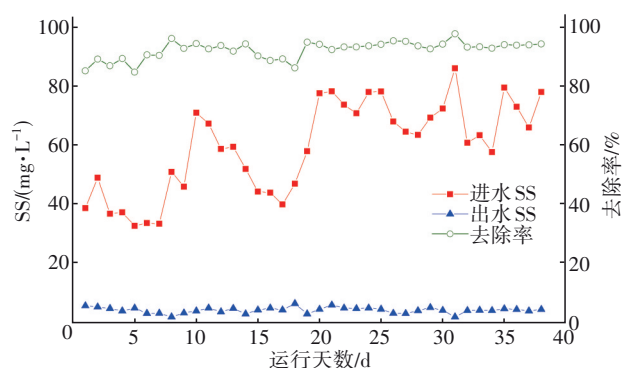


图5 调蓄及一级强化处理设施进、出水SS变化

Fig.5 Variation of SS in influent and effluent of regulation and storage and primary enhanced treatment facilities

4.2 运行管理要点

4.2.1 一级强化处理设施快速启动

合流制溢流污水由于混合了生活污水、雨水和从管道内冲刷出的沉积污染,颗粒物、悬浮物含量更高,水质水量波动更大,来水具有间歇性特征,因此一级强化处理设施必须具备在各工况下快速启动的能力,在短时间内满负荷运行且出水达到设计标准,其中高效沉淀池的快速启动是关键。在实际运行过程中,如雨季连续多轮降雨期间,可保留高效沉淀池部分污泥,使高效沉淀池运行初期即具备污泥回流功能,保证絮凝效果;其次,运行前期需结合进水水质适当加大药剂投加量,确保启动初期混凝沉淀的效果;最后,运行初期出水水质不达标时,可将不达标出水回流至起端自循环系统,直至出水指标合格后,再排水至下游处理设施。

4.2.2 一级强化处理设施间歇运行管理

该项目污水处理设施具有典型的间歇运行特点。根据运行数据,最长停机时间达到43 d,停机后易出现设备故障、管道堵塞等问题,严重影响一级强化处理设施的启用,尤其是高效沉淀池污泥回流泵、刮泥机和加药管路等易出现故障。为保证一级

强化处理设施稳定间歇运行,预防设备因长期不动作而出现腐蚀、功能缺陷等问题,需建立一级强化处理设施备机测试制度。结合天气预报和停运时间,定期开展备机测试工作,检查核心设备的运行情况,保障运行平稳。原则上一级强化处理设施每两周至少启动运行一次,设备开启后运行时间不低于2 h。

4.3 成本分析

该工程总投资为4.46亿元,其中调蓄池约2.76亿元,一级强化处理设施约1.70亿元。截至2023年6月30日,共调蓄处理合流制溢流污水 $290.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据运行统计数据,日均可变动成本为0.19元/ m^3 ,日均固定成本(人工费、设备维护费等)为0.173元/ m^3 ,总计污水处理成本为0.363元/ m^3 ,总体运行成本较低。

4.4 运行效果评价

① 调蓄池及一级强化处理设施采取全地下式+地上式的建设形式,其中调蓄池的地面为景观公园,与周边环境融为一体,降低了对周边的影响。

② 调蓄处理设施的应用提高了机场河流域合流制溢流污染削减率,显著减少了雨天溢流次数,自投入运行以来(截至2023年6月30日),机场河流域共发生降雨77场,仅发生6次合流制溢流污染,通过一级强化处理设施削减入河COD约63 t,SS约160 t、总磷约2.8 t,有效减少了入河污染物量,为机场河达到地表水V类标准水质目标发挥了重要作用。

5 结论

① 机场河CSO调蓄及一级强化处理设施,兼具合流制溢流污水调蓄和处理功能,其中调蓄池采用全地下式,一级强化处理设施采用地上式,具有布局紧凑、节地、运行灵活、高效等特点。调蓄池地上恢复为绿地,与地面景观公园及周边环境相融合,具有变“邻避”为“邻利”的效果。

② 该项目建成后,溢流次数控制在10次/a以内,一级强化处理工艺稳定运行后,出水指标满足设计标准,其中出水COD平均为53.07 mg/L、SS为4.28 mg/L、TP为0.35 mg/L,去除率分别达到28.9%、92.2%和72.8%。

③ 该工程总投资为4.46亿元,其中调蓄池约2.76亿元、一级强化处理设施约1.70亿元。根据运行统计数据,处理成本为0.363元/ m^3 。

参考文献:

- [1] 史秀芳,卢亚静,潘兴瑶,等.合流制溢流污染控制技术、管理与政策研究进展[J].给水排水,2020,46(S1):740-747.
SHI Xiufang, LU Yajing, PAN Xingyao, et al. Research progress of technology, management and policy on combined sewer system overflow control [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (S1): 740-747 (in Chinese).
- [2] 朱利民,王润,李洪浩,等.合流制溢流污染控制实践:以岳阳蛇皮套泵站为例[J].中国给水排水,2020,36(1):99-104.
ZHU Limin, WANG Run, LI Honghao, et al. Combined sewer overflow control engineering practice: a case study of Shepitao pumping station in Yueyang City [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (1): 99-104 (in Chinese).
- [3] 荆红卫,华蕾,陈圆圆,等.城市雨水管网降雨径流污染特征及对接纳水体水质的影响[J].环境化学,2012,31(2):208-215.
JING Hongwei, HUA Lei, CHEN Yuanyuan, et al. Pollution characteristics of runoff in urban storm sewer and its impact on receiving water [J]. Environmental Chemistry, 2012, 31 (2): 208-215 (in Chinese).
- [4] 张维,孙永利,李家驹,等.合流制溢流污染快速净化处理技术进展与思考[J].给水排水,2022,48(9):157-164.
ZHANG Wei, SUN Yongli, LI Jiaju, et al. Technical progress and thinking on high-rate treatment of combined sewer overflow [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48 (9): 157-164 (in Chinese).

作者简介:楚鑫鹏(1992-),男,湖北武汉人,硕士,工程师,注册环保工程师,主要从事水环境综合治理工作。

E-mail:872014869@qq.com

收稿日期:2023-07-10

修回日期:2023-08-05

(编辑:衣春敏)