

徐锦涛, 张葆华, 林亮, 等. 一体化多效澄清系统在水厂排泥水处理中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(9): 188-194.

XU J T, ZHANG B H, LIN L, et al. Application of integrated multi-effect clarification system in sludge wastewater treatment in WTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 188-194.

## 一体化多效澄清系统在水厂排泥水处理中的应用

徐锦涛, 张葆华\*, 林亮, 黄智敏, 曾珏醒

(佛山市顺德区水业控股有限公司, 广东佛山 528000)

**摘要** 老旧水厂新建排泥水设施大多面临用地紧张问题。针对南方某水厂排泥水浑浊度大、混凝程度高、分离性好的水质特点,以及污泥含水率低于80%、上清液SS质量浓度不高于50 mg/L的处理目标,某水厂采用了集成化设备处理工艺“一体化多效澄清系统+带式浓缩脱水”。该系统针对排泥水特点优化了混凝反应区和沉淀区以提高运行效率,项目运行稳定可靠,污泥含水率低于65%,上清液SS质量浓度低于15 mg/L,在同类型项目中具有投资低、占地小、处理效果好的优势。

**关键词** 排泥水 高密度沉淀池 一体化 浓缩脱水 澄清系统

中图分类号: TU991 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2024)09-0188-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.09.024

## Application of Integrated Multi-Effect Clarification System in Sludge Wastewater Treatment in WTP

XU Jintao, ZHANG Baohua\*, LIN Liang, HUANG Zhimin, ZENG Juexing

(Foshan Shunde Water Industry Holding Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract** Most of the newly built sludge discharge facilities in old WTPs face land scarcity issues. In view of the water quality characteristics of large turbidity, high degree of coagulation and good separation, as well as the treatment goals of sludge wastewater content less than 80% and supernatant suspension not higher than 50 mg/L in a WTP in southern China, a WTP adopts an integrated equipment treatment process "integrated multi-effect clarification system + belt concentration dewatering". The system optimizes the coagulation reaction zone and sedimentation zone based on the characteristics of sludge wastewater to improve operational efficiency, the project operates stably and reliably, the sludge moisture content is less than 65%, and the supernatant suspension is less than 15 mg/L, which has the advantages of low investment, small land occupation and good treatment effect in the same type of project.

**Keywords** sludge wastewater high-density sedimentation tank integration thickening and dehydration clarification system

随着城市的发展变迁,水厂周边土地被逐步开发,使水厂的建设用地从郊区逐渐演变成成为市区,老旧水厂普遍面临用地难的问题。为更好解决水厂用地限制和老旧水厂改造之间的矛盾问题,研究发展适用于用地紧张的集约化工艺技术已经成为行业热点,其在水厂扩建和深度处理方面研究较多,但对于水厂排泥水工艺的集约化设计则报道较少<sup>[1-2]</sup>。早期水厂普遍缺少排泥水处理设施,大多数老旧水厂

在改扩建中均需要考虑新增排泥水处理设施,传统工艺“调节+重力浓缩+机械脱水”占地和投资成本大<sup>[3]</sup>,进一步制约了水厂改扩建项目的发展。因此,有必要对排泥水工艺进行集约化设计。

### 1 工程概况

某水厂设计生产规模为40万m<sup>3</sup>/d,分别于1993年、1997年建设,每期为20万m<sup>3</sup>/d,根据水厂的规划,远期扩建后生产规模达到88万m<sup>3</sup>/d。该水厂制水过程中产生的生产废水(反冲洗水和排泥水)占总取水量的2%~3%,随着城市人口增加及供水整合,其供水量逐年增加,年取水量已经接近最大取水许可量。为了降低超许可取水风险,满足环保部门“废水零排放”的政策要求和水利部门水资源

[收稿日期] 2023-08-21

[作者简介] 徐锦涛(1995—),男,研究方向为水厂运营管理及水处理技术,E-mail:jtxu163@163.com。

[通信作者] 张葆华(1972—),女,高级工程师,研究方向为供水生产及电气自动化,E-mail:zhangbh@shunde.gov.cn。

论证的工作要求,水厂规划建设生产废水处理设施。

## 2 工程技术路线

### 2.1 制水水质情况

原水取自北江流域顺德水道,水源水铁、粪大肠菌群偏高,溶解氧、高锰酸盐指数基本符合地表水 II 类水质《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),其他指标符合地表水 I 类水质,水温为 15~29℃,具有夏季洪水期高浊、夏秋季藻类繁殖、冬季低温低

浊的特点,原水年均浊度约为 20 NTU,出水满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求。

### 2.2 制水工艺流程

水厂一期、二期工程均采用管道静态混合+网格反应+平流沉淀+V 型滤池的常规生产工艺,通过次氯酸钠发生器在线制备有效氯质量分数为 0.8% 的次氯酸钠溶液进行投加消毒。工艺流程如图 1 所示。

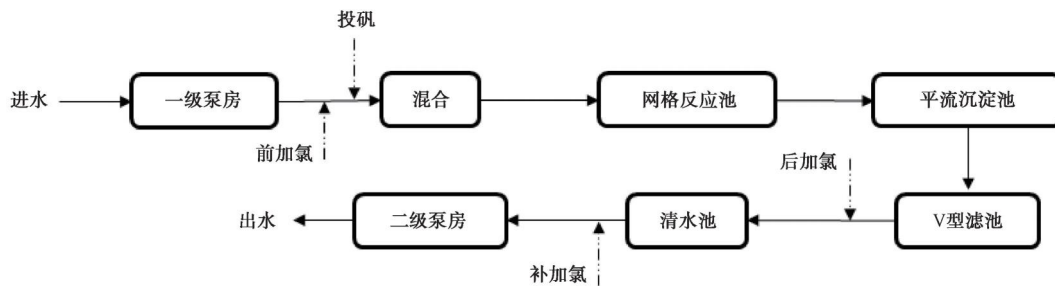


图 1 水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow Chart of WTP

### 2.3 排泥水处理要求

本工程处理废水主要为水厂排泥水,设计排泥水量为 3 200 m<sup>3</sup>/d,设计绝干泥总量为 19 200 kg/d,设计进出水水质及污泥含水率要求如表 1 所示。

表 1 设计进出水质及污泥要求

Tab. 1 Designed Influent and Effluent Quality and Sludge Requirements

项目	进水	出水要求
SS	最大值<10 000 mg/L 平均值<6 000 mg/L	<50 mg/L
污泥脱水能力	≥2 000 kg DS/h	脱水污泥含水率<80%

### 2.4 排泥水处理工艺流程

水厂生产废水主要包含反应、沉淀池排泥水和滤池反冲洗水。其中滤池反冲洗水量占总废水量的 50% 以上,但含固率一般为 0.02%~0.03%,仅为排泥水含固率的 10%~20%。长期的运行数据表明,控制回用水比例的情况下,滤池反冲洗水可以直接回用,不会对后续工艺段出水水质指标造成负面影响<sup>[4]</sup>。虽然也有研究表明排泥水直接回用有利于改善混凝、节约药耗,但研究仅针对低浊度原水,且需要控制混合水浊度范围,在排泥水高回用比下,出水小鼠精子畸形、小鼠骨髓噬多染红细胞(PCE)和饮用水中 DNA 损伤效应(SOS/umu)等试验均呈阳性,存在一定的水质安全风险<sup>[5]</sup>。

该水厂在建设初期没有对生产废水系统进行规

划,目前厂区仅预留三期扩建用地,随着城市化的扩张,征地难度越来越大。因此,生产废水处理系统仅能利用厂区东北角占地约 40.5 m×30.6 m 的边角地带进行建设。

因此,基于水厂实际用地限制及经济技术比选,综合考虑采用排泥水多效澄清工艺(图 2)+反冲洗水直接回用的工艺方案。

## 3 工程设计

### 3.1 总体布置

本项目新建一套生产尾水处理系统,建设地点位于厂区东北角靠近网格反应池的绿地上,便于收集反应池和沉淀池的排泥水。其中包括尾水调节和提升系统、回用水调节及输送系统、一体化高效澄清系统、污泥调节及污泥脱水系统、配套加药系统以及电气自控系统等,具体如图 3 所示。

### 3.2 反冲洗水处理

反冲洗直接回用工艺的核心是严格控制回流比,以避免对工艺系统造成冲击负荷。根据《室外给水设计标准》(GB 50013—2018),回用水量不应超过设计规模的 5%。因此,通过新建调蓄池并配套潜水泵和相应回用管道即可实现反冲洗水直接回用。

### 3.3 排泥水调节系统

排泥水自流进入原有集水池,经集水池提升泵

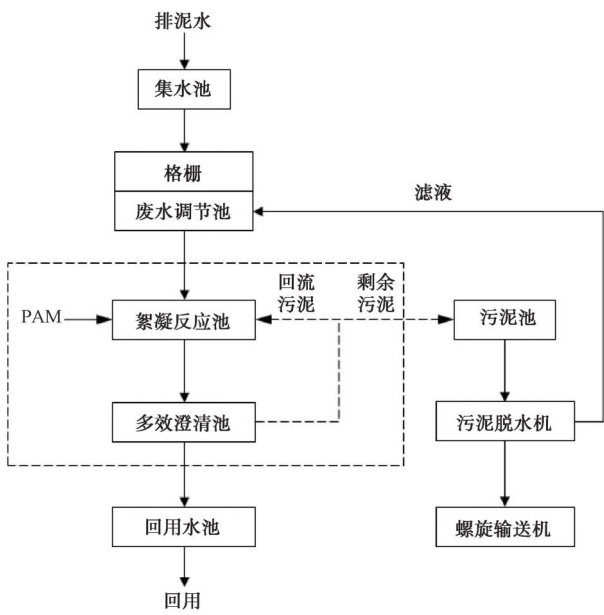


图 2 排泥水处理工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Sludge Wastewater Treatment

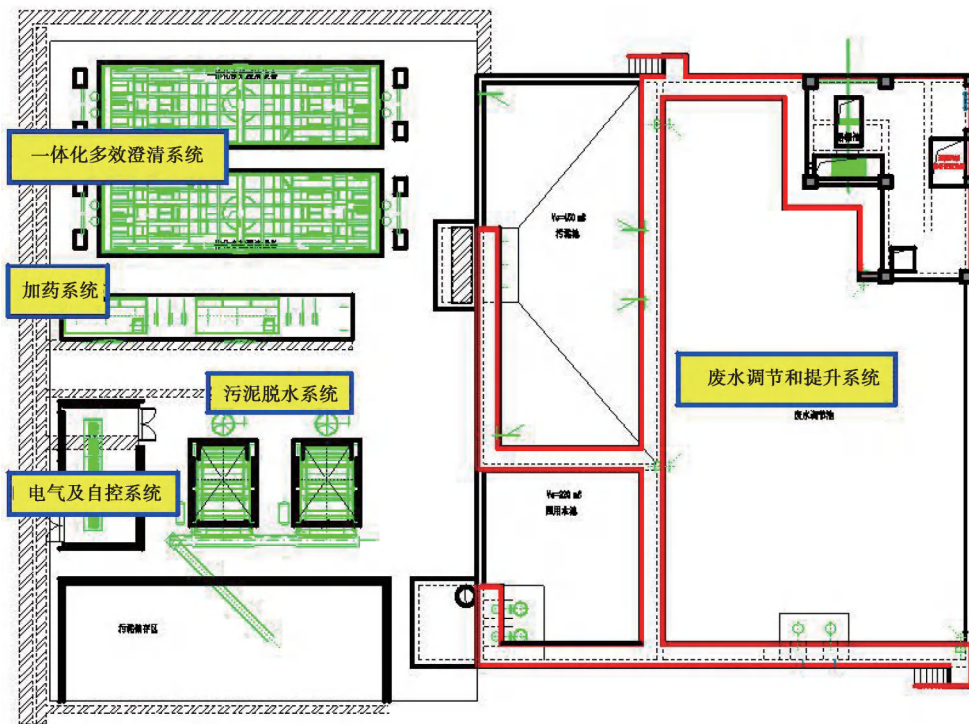


图 3 排泥水处理系统总体布置

Fig. 3 General Layout of Sludge Wastewater Treatment System

### 3.4 排泥水一体化多效澄清系统

排泥水一体化多效澄清系统是基于当前高效沉淀池的基础上进行的改良和创新。传统高效沉淀池最先用于自来水生产,将混合混凝、搅拌絮凝、污泥回流、污泥浓缩、斜管分离等各种有利于固液分离的

提升进入调节池,调节池进水处设提笼格栅和平板格栅拦截大块垃圾,废水经调节池提升泵进入一体化多效澄清系统。

#### 3.3.1 进水格栅渠

格栅渠设置粗格栅和细格栅各一组,粗格栅为手动平板格栅,格栅宽为 1 m,有效水深为 1.5 m,栅条间隙为 10 mm,安装角度为 90°;细格栅为手动提篮格栅,宽度为 1 m,栅条间隙为 5 mm,辅以电动葫芦提升格栅。格栅渠拦截了大颗粒垃圾及纤维,确保后续设备稳定运行。

#### 3.3.2 废水调节及回用水池

设置一个调节池以调节水量和水质,池体结构为钢筋砼,尺寸(长×宽×深)为 25.0 m×13.1 m×4.0 m(有效水深为 3.7 m),有效容积为 1 150 m<sup>3</sup>,池底坡度  $i=4\%$ ,左右间隔交错布设 4 台潜水搅拌机,配置潜水离心泵 3 台(2 用 1 冷备,变频),单泵  $Q=300\text{ m}^3/\text{h}, H=15\text{ m}$ ,同时配套 1 台污泥浓度计。

用效果<sup>[6-9]</sup>。

水厂排泥水主要成分是脱稳形成的絮体及残余混凝剂,本身已经具备一定的沉降性能和进一步絮凝的基础,且浓度较高,容易成核,对再混凝的要求较低,但相对而言对沉淀效果的要求较高。针对水

厂排泥水混凝程度高的特点,本工程对传统的高密度沉淀池进行改良,结合了中置式高密度沉淀池和一体化集约设计的优点,形成了排泥水一体化多效澄清系统,其取消了混凝反应区并强化了沉淀区,工艺流程如图4所示。

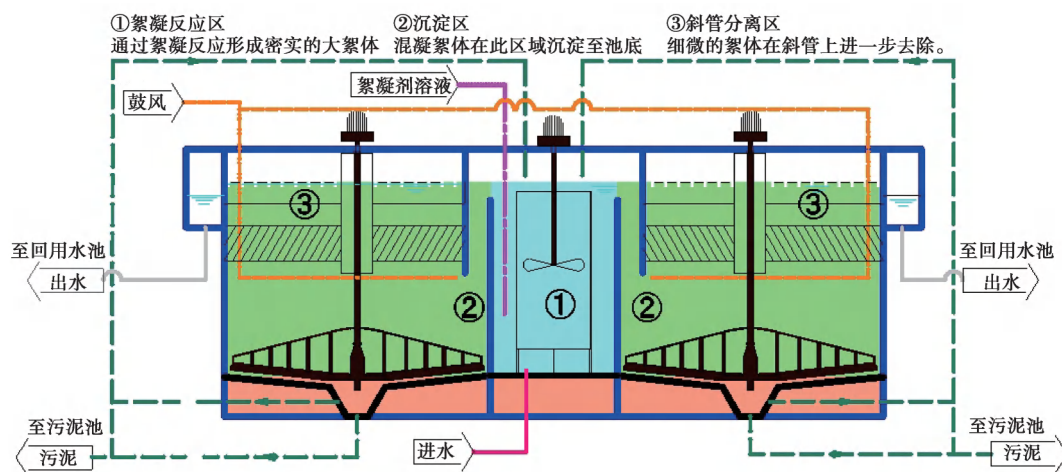


图4 改良的高密度沉淀池技术结构

Fig. 4 Technical Structure of Improved High-Density Sedimentation Tank

一体化多效澄清系统采用一体化撬装式布置于地面上,为钢制结构的一体化集成系统,材质为碳钢防腐,包括絮凝反应、污泥浓缩、斜管分离、污泥回流等几个主要功能单元。本项目采用2套并联的系统设备,单体处理能力为300 m<sup>3</sup>/h,单套系统规格如下。

### 3.4.1 絮凝反应区

絮凝反应区采用大流量低转速的搅拌机,配套中心导流循环系统,将投加的絮凝剂、回流污泥和排泥水进行充分地搅拌混合,不断循环流动,慢速搅拌下小的排泥水絮体逐渐形成大絮体。絮凝反应区尺寸(长×宽×深)为3.5 m×3.0 m×2.74 m(有效水深为2.54 m),有效容积约为26.67 m<sup>3</sup>,实际的停留时间为5.33 min。

### 3.4.2 沉淀区及斜管分离区

絮凝反应区的出水通过两侧的淹没堰消能后进入沉淀区进行沉淀和浓缩,沉淀区共有2个,单个尺寸(长×宽×深)为4.2 m×3.3 m×2.8 m(有效水深为2.54 m),实际的停留时间为14.08 min,斜管液面负荷为10.82 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),斜管直径为50 mm,含曝气清洗系统和刮吸泥装置。

一体化高效澄清系统设计总水力停留时间>

19 min,每套系统配套4台污泥回流泵,单泵Q=45 m<sup>3</sup>/h,H=20 m。整个系统采用全自动化控制,对沉淀池出水浑浊度进行实施在线监测,对污泥回流及污泥排放的实时流量进行监测,并能根据进水浓度自动调节回流及排放流量。

普通一体化高密度沉淀池和改良的一体化多效澄清系统设计参数对比如表2所示。

由表2可知,经过改进后,一体化多效澄清系统占地提高5%,但斜管液面负荷降低54.77%,排泥水停留时间提高80.73%,系统水质净化能力大大提升。

## 3.5 其他功能区设计

### 3.5.1 污泥池

池体结构为钢筋砼,尺寸(长×宽×深)为16.5 m×7.5 m×4.0 m(有效水深为3.7 m),总有效容积V=450 m<sup>3</sup>,池底坡度i=4%,在对角位置布设4台潜水搅拌机,配置潜水离心泵3台(2用1备,变频),单泵Q=40 m<sup>3</sup>/h,H=10 m。

### 3.5.2 聚丙烯酰胺(PAM)自动配制和投加系统

PAM自动配制和投加系统包括尾水处理加药系统和污泥脱水加药系统,投加药剂均为PAM,药液配比为0.1%~0.3%。每套系统包括1套自动配制系统和2台投加泵,实现PAM的自动配制和投

表 2 一体化高效澄清系统设计参数变化  
Tab. 2 Design Parameter Change of Integrated High-Efficiency Clarification System

类型		普通一体化高密度沉淀池	一体化多效澄清系统
混凝反应区	尺寸(长×宽×深)	1.6 m×1.6 m×2.6 m	/
	容积/m <sup>3</sup>	6.1	/
	停留时间/h	1.23	/
絮凝反应区	尺寸(长×宽×深)	2.8 m×2.6 m×2.6 m	3.5 m×3.0 m×2.74 m
	容积/m <sup>3</sup>	17.47	26.67
	停留时间/h	3.49	5.33
沉淀区及斜管分离区	尺寸(长×宽×深)	3.8 m×3.3 m×2.8 m	4.2 m×3.3 m×2.8 m(2个)
	容积/m <sup>3</sup>	30.01	70.41
	停留时间/h	6.02	14.08
	斜管液面负荷/[m <sup>3</sup> ·(m <sup>2</sup> ·h) <sup>-1</sup> ]	23.92	10.82
	总占地面积/m <sup>2</sup>	39.9(11.4 m×3.5 m)	42(12.0 m×3.5 m)
	总停留时间/min	10.74	19.41

加。一体化的配制投加成套装置,除主体设备外,还应成套地配备就地控制箱、安装支架、动力及信号电缆、紧固件等有效和安全运行所必需的附件。

### 3.5.3 污泥脱水系统

污泥脱水系统采用 2 台一体化滤带式重力过滤式浓缩脱水机,为带式浓缩机与带式脱水机的组合,采用回用水进行滤带冲洗。两部分分装在两个机架上,分别由两台电机驱动。因压滤段采用立式结构,与卧式结构衔接紧密、结构紧凑、占地面积小、操作维护方便。

该项目绝干泥量为 19.2 t/d,单台脱水机处理能力>1 000 kg·DS/h,则每天工作约为 10 h,脱水后含水率<80%,全套污泥脱水系统包括带式浓缩脱水机、螺旋输送机、反冲洗水泵、空压机和专用电气控制系统。

### 3.5.4 污泥储存区

脱水后的泥饼经螺旋机输送送至污泥储料间,定期外运处置。该项目采用泥饼堆置的方式暂存污泥,通过自然风干的作用,使脱水后的泥饼含水率进一步降低,储存区尺寸为 15.9 m×5.5 m,与地面持平,系统加设顶棚,顶棚尺寸为 28.6 m×19.5 m×8.0 m。

### 3.5.5 回用水池

回用水池用于接收一体化多效澄清系统的上清液,调节回用水的水量,池体结构为钢筋砼,尺寸(长×宽×深)为 8.2 m×7.5 m×4.0 m(有效水深 3.7 m),总有效容积为 220 m<sup>3</sup>,配置潜水离心泵

2 台(1 用 1 备,变频),单泵  $Q=600\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=20\text{ m}$ 。

## 3.6 工程特点

(1)通过设计专业化、生产工业化、装配流程化、质量标准化体系制造完成一体化集成系统成套设备,节约土建成本和占地,紧凑的结构设计,合理的水力设计,使得一体化多效澄清系统的水头损失可以控制在 0.3 m 左右。本项目总投资约为 1 340 万元,占地约为 1 250 m<sup>2</sup>,相比对同等规模的传统排泥水处理工艺,投资减少约 46%,占地面积减少约 43%,经济效益显著。

(2)针对水厂排泥水的水质特点,对普通高密度沉淀池进行改良和优化,创新地提出取消混凝反应区,扩大沉淀及斜管分离区,充分发挥排泥水的自混凝特性,提高污泥浓缩和泥水分离效果,一般无需投加混凝剂,只需投加 PAM 助凝,药剂反应效率大大提高,降低了药耗。

(3)自动化程度高,配套了智慧物联网管理、信号报警、远程监控、自动配药、斜管和脱水机自动清洗等功能,整个系统全自动化控制运行,对沉淀池出水浑浊度进行实时在线监测,对污泥回流及余泥排放的实时流量进行监测,并能根据进水浓度自动调节回流及排放流量;脱水机从泵出污泥,加入药液,排出泥饼均采用设备联动进行自动控制。

## 4 运行效果

该项目于 2022 年完成设备安装,2023 年 1 月投入试运行,同年 4 月份顺利通过工程验收,系统 5

月—8月均连续稳定运行。对7月的生产运行数据进行统计分析,各项指标均优于预期,达到了较为理想的运行效果。

#### 4.1 运行参数分析

系统各项运行数据整理如表3所示,在设计的生产负荷以内,出水SS质量浓度能够稳定达到15 mg/L以下,且出泥含水率低于65%,运行指标远优于设计标准要求。在实际运行中亦对设计参数进行了优化,原设计考虑采用污泥回流提高絮凝效果,但实践中发现,在满足进水SS浓度要求的情况下,取消污泥回流不会影响处理效果。另外,取消混凝反应区并强化了沉淀区后,系统的处理效果得到了优化,一般传统浓缩工艺浓缩泥的含水率约为97%,而该澄清系统污泥浓缩后含水率仅为94.7%~96.2%,浓缩效果更好。此外,对上清液进行检测,结果显示,高锰酸盐指数质量浓度为8.8 mg/L,溶解氧为7.8 mg/L,其余指标均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类标准限值。

表3 排泥水处理系统运行参数分析  
Tab. 3 Analysis of Operation Parameters of Sludge Wastewater Treatment System

项目	澄清系统	污泥脱水系统
进水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	350~500	-
进泥量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	-	23~24
运行时间/(h·d <sup>-1</sup> )	10~11	10~11
进水SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	2 409~5 267	-
进泥SS/(g·L <sup>-1</sup> )	-	42~58(含水率为94.7%~96.2%)
出水SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	6~15	-
出泥含水率	-	62.4%~64.1%
污泥回流比	0	-
滤液SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	-	8~13

#### 4.2 经济效益分析

稳定运行期间,水厂平均取水量为36.9万m<sup>3</sup>/d,原水浑浊度平均值为10 NTU,按照0.8元/(kW·h)的电价和22元/kg的PAM单价计算,系统各项经济指标在运行期间的平均值如表4所示。各项运行成本依次为电费>澄清系统药剂费>脱水系统药剂费,年运行成本费用约为54.1万元,相当于吨水制水成本增加0.0040元。稳定运行期间,进水浑浊度从30 NTU下降至10 NTU,系统处理药耗均有所

上涨。

表4 排泥水处理系统经济指标分析

Tab. 4 Analysis of Economic Indices of Sludge Wastewater Treatment System

项目	数值
单位废水电耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> )	0.27
单位澄清系统PAM消耗量/(mg·L <sup>-1</sup> )	6.23
脱水系统PAM消耗量/[kg·(t DS) <sup>-1</sup> ]	2.38
每日排泥水处理量/m <sup>3</sup>	3 492
每日绝干泥处理量/t	4.76
每日电费/元	754
每日澄清系统药剂费/元	479
每日脱水系统药剂费/元	249

## 5 结论

(1)本工程采用基于高密度沉淀理论的“絮凝反应+沉淀浓缩+斜管分离+带式浓缩脱水”工艺处理自来水厂排泥水,并将核心工艺段设计成一体化集成系统成套设备,节约用地和投资成本,提高了系统的运行效率。

(2)针对排泥水的特点,可以通过取消混凝反应区并强化沉淀区来优化设计,提高运行效率。项目建成后,脱水泥饼含水率低于65%,上清液SS质量浓度低于15 mg/L,运行管理方便,处理效果显著,满足水厂排泥水处理要求。

## 参考文献

- [1] 蒋才芳. 用地紧张给水厂深度处理工艺改造案例[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 176-180, 196.  
JIANG C F. Reconstruction case of advanced treatment for a WTP with limited land use[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 176-180, 196.
- [2] 刘巨波, 狄剑英, 连宝良, 等. 用地紧张水厂不停产改扩建工程设计与实践[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 32-36.  
LIU J B, DI J Y, LIAN B L, et al. Continuous reconstruction and expansion project design and practice of waterworks with land tension [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 32-36.
- [3] 李亮, 刘波, 郭韵. 长江下游水源厂排泥水处理系统设计[J]. 净水技术, 2019, 38(5): 25-29, 40.  
LI L, LIU B, GUO Y. Design of sludge water treatment system for raw water plants in the lower reaches of the Yangtze River [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(5): 25-29, 40.
- [4] 何嘉莉, 胡小芳, 张晓娜, 等. 给水厂滤池反冲洗水直接回

- 用的长期运行效果分析[J]. 给水排水, 2017, 53(12): 48-52.
- HE J L, HU X F, ZHANG X N, et al. Effects of long-term direct reuse of filter backwashing water in water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(12): 48-52.
- [ 5 ] 陈停, 崔福义, 徐叶琴, 等. 净水厂生产废水回用强化混凝处理低浊水及安全性[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 21-25.
- CHEN T, CUI F Y, XU Y Q, et al. Drinking water treatment plant streams recycle for strengthening coagulation efficiency of low turbidity water and its water quality safety evaluation [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(5): 21-25.
- [ 6 ] 郑心愿, 华英豪. 磁加载多效澄清技术在城市黑臭水体治理和城市生活污水处理中的应用案例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 3136-3142.
- ZHENG X Y, HUA Y H. Application of magnetic ballasted clarification technology in black and smelly water treatment and domestic sewage treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(9): 3136-3142.
- [ 7 ] 张念琦. 上海市某水厂排泥水处理应急工程设计[J]. 净水技术, 2022, 41(1): 140-146, 179.
- ZHANG N Q. Emergency engineering design of sludge wastewater treatment project for WTP in Shanghai City [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(1): 140-146, 179.
- [ 8 ] 胡坤, 李龙伟, 车爱伟, 等. 高效澄清池及V型滤池在孟加拉国大型水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 72-75.
- HU K, LI L W, CHE A W, et al. Application of high efficiency clarifier and V-type filter in a large-scale water supply plant in Bangladesh [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6): 72-75.
- [ 9 ] 朱海涛, 周晓龙, 刘宏远, 等. 中置式高密度沉淀池的改造与优化运行[J]. 中国给水排水, 2014, 30(4): 95-99.
- ZHU H T, ZHOU X L, LIU H Y, et al. Modification and optimization operation of intermediate high-density sedimentation tank [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(4): 95-99.
- 
- (上接第 187 页)
- [ 12 ] 余琴芳, 章诗璐, 杜敬, 等. 反硝化生物滤池碳源选择与运行方式优化研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(9): 113-117, 122.
- YU Q F, ZHANG S L, DU J, et al. Study on carbon source selection and operation mode optimization of denitrification biological filter [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(9): 113-117, 122.
- [ 13 ] 杨雄, 霍明昕, 王淑莹, 等. 碳源类型对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3471-3477.
- YANG X, HUO M X, WANG S Y, et al. Effects of carbon source type on sludge sedimentation performance and filamentous bacteria growth [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(12): 3471-3477.
- [ 14 ] LI W M, LIAO X W, GUO J S, et al. New insights into filamentous sludge bulking: The potential role of extracellular polymeric substances in sludge bulking in the activated sludge process [J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 126012. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126012.
- [ 15 ] RURANGWA E, SIPKEMA D, KALS J, et al. Impact of a novel protein meal on the gastrointestinal microbiota and the host transcriptome of larval zebrafish *Danio rerio* [J]. *Frontiers in Physiology*, 2015, 6: 133-143. DOI: 10.3389/fphys.2015.00133.
- [ 16 ] 王宇. 基于拓展 DLVO 与絮体结构特征的化学调理对污泥脱水影响规律的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- WANG Y. Study on the effects of chemical conditioning on sludge dewatering performance based on extended DLVO theory and floc structure characteristics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [ 17 ] PANG Y M, WANG J L. Various electron donors for biological nitrate removal: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148699. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148699.
- [ 18 ] WEI Q, ZHANG J S, LUO F Z, et al. Molecular mechanisms through which different carbon sources affect denitrification by *Thauera linaloolentis*: Electron generation, transfer, and competition [J]. *Environment International*, 2022, 170: 107598. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107598.
- [ 19 ] XU L, YANG J P, XUE B, et al. Molecular insights for the biological interactions between polyethylene glycol and cells [J]. *Biomaterials*, 2017, 147: 1-13. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2017.09.002.
- [ 20 ] YANG R, YUAN L J, WANG R. Enzymatic regulation of N<sub>2</sub>O production by denitrifying bacteria in the sludge of biological nitrogen removal process [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157513. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157513.
- [ 21 ] 马勇, 彭永臻, 王淑莹. 不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 820-824.
- MA Y, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Sludge denitrification characteristics with different external carbon source [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(6): 820-824.