

阮燕霞, 杨文文, 李郭军, 等. 高效沉淀浓缩及叠螺/带式压滤脱水技术在水厂排泥水中的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 198-205.

RUAN Y X, YANG W W, LI G J, et al. Application of efficient sedimentation concentration and spiral/belt filter press dewatering technology to sludge discharge water treatment in WTP [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 198-205.

高效沉淀浓缩及叠螺/带式压滤脱水技术在水厂排泥水中的应用

阮燕霞^{1,*}, 杨文文¹, 李郭军², 魏宏斌³, 张 艳⁴, 唐秀华¹, 刘 霞¹

(1. 上海中耀环保实业有限公司, 上海 200092; 2. 上海申耀环保工程有限公司, 上海 200092; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 4. 上海城投水务<集团>有限公司制水分公司, 上海 200231)

摘要 【目的】水厂常用处理工艺中会产生大量的排泥水, 占总进水量的4%~7%, 产生的大量排泥水未经处理直接外排至河流, 会严重污染水体水质, 文中对上海市某水厂新增的排泥水应急装置进行介绍, 以及对实际运行效果进行对比, 为水厂的排泥水处理提供参考。【方法】本文通过排泥水处理工艺比选、排泥水浓缩技术比选、泥渣脱水技术比选, 确定了上海市某水厂新增改造工艺为“高效沉淀浓缩+压滤脱水”, 采用滤池反冲洗水和沉淀池排泥水合并处理方式, 通过高效沉淀浓缩装置处理可有效降低排泥水中悬浮物(SS)浓度, 浓缩后泥渣通过叠螺机和带式压滤机脱水减量后外运处置。【结果】改造后, 对水厂进行了1个月的运行监测, 经处理的浓缩池上清液SS质量浓度≤30 mg/L, SS去除率≥99%, 达到上海市地方污染物排放标准《污水综合排放标准》(DB31/199—2018)二级标准要求, 出水排入雨水管网后外排至河流, 高效沉淀浓缩后经压滤脱水的泥渣含水率降低至75%以下, 污泥减量率达85%以上。【结论】通过对上海市某水厂排泥水处理系统的升级改造, 通过“高效沉淀浓缩+叠螺/带式压滤脱水”工艺处理后, 可以有效地去除水体中的SS, 通过叠螺/带式压滤后污泥体积减少, 且带式压滤运行稳定性显著优于叠螺脱水。药剂费用为0.08万元/d, 消耗电费为0.11万元/d, 直接运行费用为0.17元/m³, 经济效益显著。

关键词 排泥水处理 高效沉淀浓缩 泥渣脱水 叠螺脱水 带式压滤

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)12-0198-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.023

Application of Efficient Sedimentation Concentration and Spiral/Belt Filter Press Dewatering Technology in Sludge Discharge Water Treatment in WTP

RUAN Yanxia^{1,*}, YANG Wenwen¹, LI Guojun², WEI Hongbin³, ZHANG Yan⁴, TANG Xiuhua¹, LIU Xia¹

(1. Shanghai Zhongyao Environmental Protection Industry Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Shenyao Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. Shanghai Chengtou Water <Group> Co., Ltd., Water Production Branch, Shanghai 200231, China)

Abstract 【Objective】In the common treatment process of water treatment plants (WTPs), a large amount of sludge water is generated, accounting for 4%~7% of the total inflow water, and a large amount of sludge water is directly discharged into rivers without treatment, which will seriously pollute the water quality. This paper introduces the renovation process design of a WTPs in Shanghai, and provides reference for the sludge water treatment of WTPs. 【Methods】Through the comparison and selection of sludge water treatment technology, sludge water concentration technology and sludge dewatering technology, the paper determined the renovation process of a WTP in Shanghai—"high efficiency sedimentation concentration + cascade/belt filter press dewatering", the filter backwashing water and sedimentation tank sludge water combined treatment, through the high efficiency sedimentation concentration device can effectively reduce the concentration of suspended solids in sludge discharge water, concentrated sludge through the cascade

[收稿日期] 2024-08-20

[通信作者] 阮燕霞(1990—), 女, 研究方向为水与废水处理技术, E-mail: ruanyanxia@tongizy.com。

machine and belt filter press dewatering and reducing volume after external disposal. [Results] After the reconstruction, the operation of the WTP was monitored for 1 month. The suspended solid(SS) of the treated supernatant of the mass concentration pool was ≤ 30 mg/L, and the SS removal rate was $\geq 99\%$, which met the requirements of the secondary standard of the *Intergated Wastewater Discharge Standard* (DB31/199—2018) of Shanghai local pollutant discharge standard. The outflow was discharged into the stormwater pipe network and then discharged to the river. After high efficiency precipitation and concentration, the moisture content of the sludge dehydrated by press filtration could be reduced to less than 75%, and the reduction rate of sludge could reach more than 85%. [Conclusion] After upgrading the sludge discharge water treatment system of a WTP in Shanghai, the suspended matter in the water body can be effectively removed by the process of "high efficiency sedimentation concentration + spiral/belt press filtration dehydration", and the sludge volume can be reduced by spiral/belt press filtration, and the operational stability of the belt press is significantly better than that of the spiral dewatering. The chemical cost is 0.08 million yuan/day, the electricity consumption is 0.11 million yuan/day, and the direct operating cost of water is 0.17 yuan/ton of water, with significant economic benefits.

Keywords sludge discharge water treatment efficient sedimentation concentration sludge dewatering spiral dewatering belt filter press

随着工业的不断发展,出现了人口高度集中以及城市不断膨胀的趋势,水厂的规模和数量也因此在不断地增加,其供水能力与日俱增,这导致了水厂产生大量的包括沉淀池排泥及砂滤反冲洗排水在内的排泥水,单个水厂的排泥水可占到其总净水量的4%~7%^[1-2]。大量的排泥水如果不进行有效的处理,会造成严重的环境问题。一方面,排泥水中含有大量泥沙、腐殖质、藻类等无机和有机杂质,如果不经过处理直接排放河流水体,将会对附近水体造成严重污染,其中的泥沙有可能会沉积下来抬高河床,甚至严重影响河流的航运能力及泄洪能力^[3-4];另一方面,排泥水亦含有大量宝贵的水资源,从节约水资源和节约长距离引水的基建投资及日常提升水的电耗等方面考虑,处理达标后的排泥水可作原水回用,不仅节约部分水资源,防止随意排放造成的二次污染,还符合可持续发展战略^[1]。

1 工程概况

上海市某水厂制水规模为20万m³/d,水厂沉淀池排泥水和滤池反冲洗水总共约为12 000 m³/d,沉淀池排泥水悬浮物(SS)质量浓度为500~1 600 mg/L,滤池反冲洗水SS质量浓度为122~189 mg/L,折合排放绝干泥量4.9 t/d。改造前排泥水无后续处理手段,直接排放至河流中。2020年2月—2020年8月,水厂增加排泥水临时应急处理设施进行改造。

改造期间,为保证排泥水减量化,进行了排泥水过渡性工程措施,临建工程内容包括新建排泥水处理系统,含沉淀池排泥水及滤池反冲洗水合并收集系统、浓缩及脱水系统,设计总处理排泥水量为12 000 m³/d,设计干泥处理量为3.8 t DS/d,最大干

泥处理量为4.9 t DS/d,最终排放出水SS质量浓度 ≤ 30 mg/L,排入雨污水管网,参考2020年上海市各水厂的泥渣外运含水率,确定本改造项目泥渣脱水后含水率 $\leq 75\%$ 。另外,为了进一步降低排泥水泥渣的外运处置成本,该水厂在2022年6月新增了高压带式泥渣深度处理系统,将泥渣含水率从75%降低至60%以下,但本文暂不对该深度处理系统进行讨论。

2 水厂排泥水处理工艺选择

2.1 水厂排泥水处理工艺

水厂排泥水包括滤池反冲洗水和沉淀池排泥水,沉淀池排泥水中的悬浮杂质含固率一般均高于0.3%,滤池反冲洗水的含泥浓度较低,一般含固率为0.02~0.05%。目前,排泥水的处理有合并处理和分类处理2种方式^[5]。

(1) 合并处理

合并处理的工艺流程如图1所示,滤池反冲洗水和沉淀池排泥水统一排入排泥池中,再进行后续的浓缩沉淀,浓缩污泥进入平衡池,浓缩污泥含水率达到98%左右,然后进行污泥脱水。浓缩池上清液用作源水进行回用。

(2) 分类处理

分类处理的工艺流程如图2所示,滤池反冲洗水先进入另设的沉淀池沉淀,其沉淀污泥与沉淀池排泥一起进入排泥池进行混合,混合液进入浓缩池进行浓缩,浓污泥的含水率达到98%左右,再进行脱水。另设沉淀池和浓缩池的上清液用作原水进行回用。

本项目水厂由于建设年代较早,可利用的空间

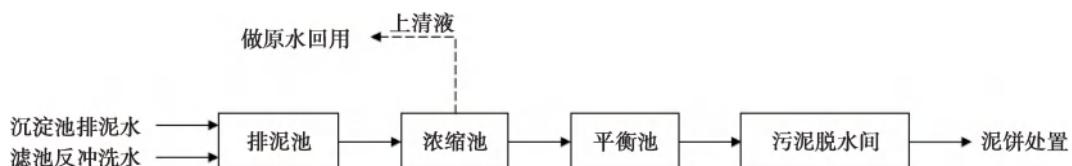


图 1 滤池反冲洗水和沉淀池排泥水合并处理工艺流程

Fig. 1 Combined Treatment Process Flow of Backwash Water from Filter and Sludge Discharge Water from Sedimentation Tank

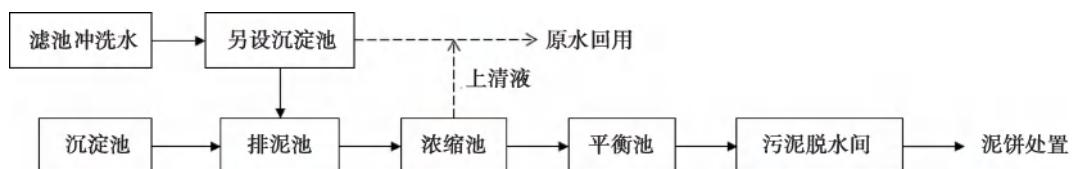


图 2 滤池反冲洗水和沉淀池排泥水分类处理工艺流程

Fig. 2 Classification Treatment Process Flow of Backwash Water from Filter and Sludge Discharge Water from Sedimentation Tank

有限,并考虑本项目排泥水改造工程为过渡性工程措施,采用滤池反冲洗水和沉淀池排泥水合并处理工艺,将水厂原空置的清水池改造为滤池反冲洗水和沉淀池排泥水的收集池。

2.2 排泥水浓缩技术比选

由于排泥水具有较高的含水率,体量大,需要先进行浓缩处理,浓缩后可以有效减少污泥体积,降低后续污泥脱水设备的负荷和运行成本。目前污泥处理中常采用的污泥浓缩技术:①利用污泥中固体颗粒与水之间的相对密度差来实现污泥浓缩的重力浓缩法;②利用带式压滤机、离心机等机械设备实现污泥脱水的机械浓缩^[5-6];③依靠大量微小气泡附着在污泥颗粒的周围,减小颗粒的密度而强制上浮的气浮浓缩;④依托污泥混凝、循环、斜管分离及浓缩等多种理论,集泥水分离与污泥浓缩功能于一体的高效沉淀浓缩。通过不同水厂的改造实例,汇总这几种技术的对比,如表 1^[6-8]所示。

由表 1 可知,重力浓缩的浓缩时间相对较长,处理效果较差,设备投资较高,主要为土建施工,占地较大,但后期运行费用较低,经过浓缩后污泥含水率可达到 96% 左右;机械浓缩的浓缩时间较短,通过加药的方式加速浓缩过程,运行管理简单,固体回收率为 95%~97%,浓缩效果较重力浓缩好,但需要耗电,运行费用较大;气浮浓缩工艺在浓缩时间上较短,处理时间仅为重力浓缩的 1/3,处理构筑物占地较小,处理后固体回收率可达 95% 以上,但设备投资和运行费用较高,经济性稍差,且运行管理也较为

表 1 污泥浓缩工艺比选^[6-8]Tab. 1 Comparison of Sludge Thickening Processes^[6-8]

项目	重力浓缩	机械浓缩	气浮浓缩	高效沉淀浓缩
浓缩时间	12 h 以上	1~2 min	4~24 h	40 min
环境卫生	较差	好	一般	好
运行管理	简单	简单	复杂	简单
占地面积	大	小	小	小
设备投资	较高	较低	较高	较低
运行费用	较低	较高	较高	较低
处理后含水率	96% 以上	95%~97%	94%~96%	85%
固体回收率/SS 去除率	80%~90%	90% 以上	95% 以上	85% 左右
出水 SS	≤200 mg/L	≤100 mg/L	≤100 mg/L	≤30 mg/L

复杂;高效沉淀浓缩装置浓缩时间相对较短,占地面积小,经济投资低。

经过以上比选,本项目污泥浓缩采用高效沉淀浓缩技术。

2.3 污泥脱水技术比选

排泥水经过浓缩后浓缩污泥的含水率仍较高,高效沉淀浓缩装置处理后泥渣含水率为 97% 左右,贮存运输和后端处理处置均极为不便,还需进一步污泥脱水。市场上常用的机械脱水设备有离心机、叠螺式压滤机、带式压滤机、板框压滤机,都是采用加药后通过机械手段进行污泥脱水,4 种机械脱水方式比较结果如表 2 所示。

考虑到泥渣脱水周围环境影响以及电能消耗,

表 2 污泥脱水设备比选
Tab. 2 Comparison and Selection of Sludge Dewatering Equipments

机械脱水设备	优点	缺点
离心机	基建投资少,占地少,设备结构紧凑;不投加或少加化学药剂;处理能力大且效果好;总处理费用较低,自动化程度高,操作简便、卫生	进口离心机价格昂贵;电力消耗大;污泥中含有砂砾,易磨损设备,噪声大
叠螺式压滤机	可连续运行,运行管理方便,周围环境干净卫生;耗电量低,无噪音污染	处理能力偏小,处理量较其他脱水设备小
带式压滤机	可连续运行,运行管理方便,脱水能力强;电耗低,运行费用较低	设备占地面积稍大;需要大量冲洗水对滤布进行冲洗;喷淋管喷头易堵塞,设备维护工作量较大
板框压滤机	能耗低,压力高,出泥泥饼含水率可降至 60%以下;药剂消耗量较少	占地面积大,自动化程度低,间歇运行,需要人工铲泥,工作量较大;冲洗水用量大,周围环境恶劣;滤布为易损件,消耗量大

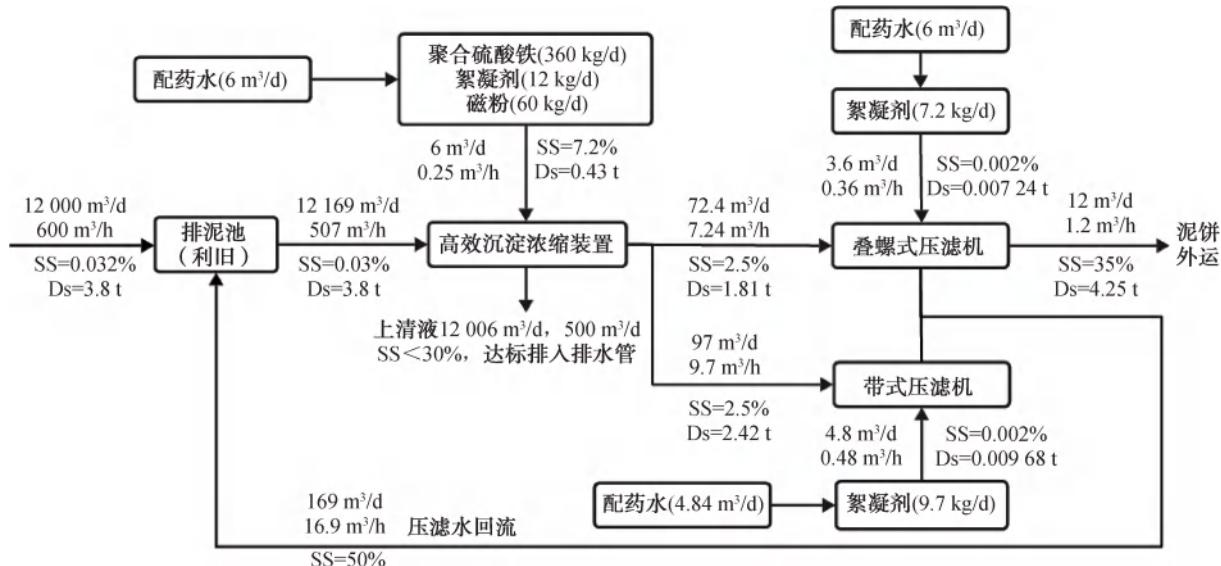
以及实际运行效果,本项目选择可连续运行,且均运行费用低的叠螺式压滤机和带式压滤机 2 种技术进行对比:一方面,比较两者的脱水效果;另一方面,考察 2 种技术的在水厂排泥水领域的适用性,为后期类似项目做好技术支撑。

3 排泥水处理升级改造工程设计

3.1 排泥水处理工艺流程

沉淀池排泥水和滤池反冲洗水排入排泥池中进

行混合,由于 2 种排泥水的浓度不同,底部增加搅拌机,将 2 种排泥水搅拌均匀后通过提升泵提升至高效沉淀浓缩装置中进行浓缩,浓缩后上清液达到 SS 质量浓度 $\leq 30 \text{ mg/L}$ 后送水厂前端进行回用,浓缩污泥后含固率达到 1%~5%,送至叠螺式压滤机和带式压滤机(各 1 套)进行压滤,脱水污泥含水率进一步降低至 75%以下后外运,处理系统工艺流程及物料平衡图如图 3 所示。



注: Ds—绝干污泥量,表示污泥在 105~110 °C 的温度下完全烘干至恒重后,所剩下固体物质的总质量。

图 3 上海某水厂排泥水处理工艺流程及物料平衡图

Fig. 3 Sludge Water Treatment Process and Material Balance Diagram of a WTP in Shanghai

3.2 排泥池

将原有的 2 座 20 m×20 m×4.05 m 清水池改造成排泥池,用于收集及调节排入排泥池的沉淀池排泥水和滤池反冲洗水。在每座排泥池内设置 4 台推流式潜水搅拌机,使排泥池内接纳的废水均匀混合、避免淤积。

3.3 排泥水高效沉淀浓缩装置

采用 2 套高效沉淀浓缩装置,单套最大处理能力为 6 000 m³/d。高效沉淀浓缩装置由快速混合池、磁介质混合池、絮凝反应室、斜管沉淀池、泥渣储池、磁力分离机、混凝剂加药系统、絮凝剂加药系统组成。

(1) 快速混合池

均匀混合后的排泥水通过管道输送至快速混合池中,同时投加聚合氯化铝(PAC)混凝剂,在搅拌机的搅拌作用下,排泥水和混凝剂混合均匀,混凝剂水解产生的带正电荷分子和排泥水中带负电荷的微小泥渣颗粒之间发生电中和,消除胶体间的排斥性,并进行混凝反应,形成较小的絮体。该反应池采用钢制池体,配1台功率为5.5 kW的搅拌机,转速为136 r/min。

(2) 磁介质混合池

排泥水通过上部过水孔流进入磁介质混合池,在磁介质混合池中投加磁粉和絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM),在搅拌机的搅拌作用下,磁粉、PAM和排泥水混合均匀,较小的絮体通过絮凝剂的吸附架桥作用相互聚集,絮体逐渐变大,同时将磁粉包裹在絮体中间,使得絮体的密度增加,有利于后续沉淀分离;后续沉淀池中沉泥的一部分通过泥渣泵回流至该池中,可大幅降低絮凝剂的投加量,节省药剂消耗。该反应池采用钢制池体,配1台功率为3.0 kW的搅拌机,转速为88 r/min。

(3) 絮凝反应室

磁介质混合池中的混合液通过底部过水孔进入絮凝反应室中继续进行絮凝,在搅拌机的搅拌作用下,混合液充分混合絮凝体继续聚集变大。该反应池采用钢制池体,配1台功率为5.5 kW搅拌机,转速为7.8 r/min。

(4) 斜管沉淀池

絮凝后的混合液从絮凝反应室池顶流入斜管沉淀池中,沉淀池采用上方下圆单泥斗形式,每组池内径为4.0 m,设置斜管约为15 m²,斜管长度为0.8 m,沉淀池表面负荷约为14.08 m³/h。混合液在斜管填料区域进行泥水分离,在没有横向水流扰动的情况下,大颗粒污泥絮体在斜管壁上堆积并沿斜管下滑落入下方池底区域,上清液通过斜管向上溢出,沉积在底部的污泥通过底部刮泥机收集进泥斗中,刮泥机采用4臂刮泥机,功率为0.55 kW。

(5) 泥渣储池

沉积在沉淀池泥斗中的泥渣通过泥渣螺杆泵将泥渣输送至磁力分离机,泥渣中磁粉在此得到回收,进行了磁粉回收后的泥渣通过管道输送至泥渣储池,泥渣储池底部安装泥渣混合器,使泥渣均匀,搅拌转速为980 r/min。设计泥渣质量浓度为30 g/L

左右。排泥水沉淀浓缩装置在实际运行时,未使用磁分离设备,便可达到了泥渣浓缩设计效果,可为后续水厂排泥水项目提供参考。

3.4 排泥水脱水设施

泥渣脱水设备采用叠螺式压滤机和带式压滤机,泥渣储池中的泥渣通过泥渣螺杆泵将泥渣分别输送至叠螺式压滤机和带式压滤机进行脱水,考察运行效果。

4 排泥水系统工程运行情况

4.1 运行效果

图4是2022年1月份的运行数据。待处理排泥水SS质量浓度一般为350~550 mg/L,通过高效沉淀浓缩装置处理后出水SS质量浓度均小于10 mg/L,SS去除率≥99%,符合上海市地方标准《污水综合排放标准》(DB31/199—2018)中规定的出水SS质量浓度≤30 mg/L的二级标准要求。

图5和图6分别是叠螺式压滤机和带式压滤机的运行数据。通过这些数据可看出,使用高效沉淀浓缩装置处理后泥渣含水率平均值为97.5%,再通过叠螺式压滤机进行脱水后,泥渣泥饼平均含水率≤75%,泥渣平均减量率≥90%;通过带式压滤机进行脱水后,泥渣平均泥饼含水率≤72%,泥渣平均减量率≥91%,通过上述2种脱水设备出泥含水率对比,表明带式压滤机的脱水效率更高。

由图7和图8可知,使用1年以后,叠螺机平均出泥含水率超过80%,而带式压滤机平均出泥含水率依然稳定保持≤72%。通过现场检修发现,叠螺机在运行1年后游动环、固定环以及螺旋轴均有较大幅度的磨损,设备间隙增大,造成出泥含水率高。通过分析,水厂的排泥水中的含砂量相对市政污水厂更高,造成设备磨损较快,性能下降,为了维持脱水性能需要每年更换叠螺机的易损件,后期的维护费用较高。而带式压滤机压滤时,采用滤布+泥渣+滤布的“三明治”结构,除重力浓缩段外,设备与泥渣不直接接触,从而不会造成机械磨损,故其性能稳定。

该厂污泥脱水车间经过改造后,产量为12 000 m³/d的排泥水经过处理后达到排放标准,废水处理效率为100%,处理过程产生的高浓度泥渣再经过叠螺式压滤机和带式压滤机脱水处理,出泥含水率≤75%,在后续高压带式泥渣深度脱水系统

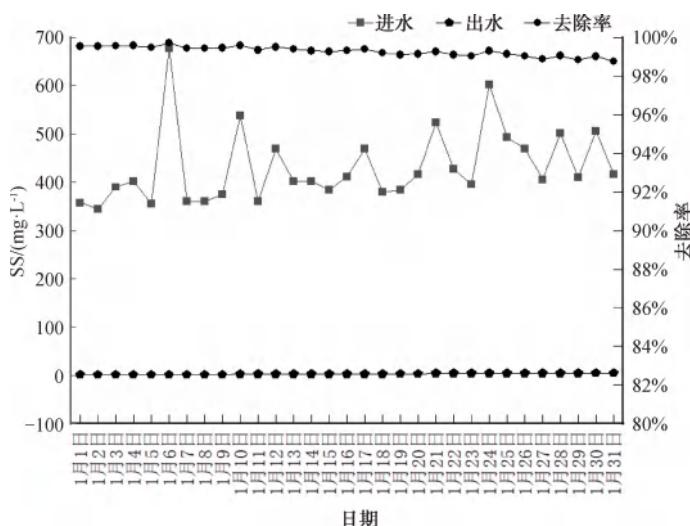


图4 进出水SS及去除率

Fig. 4 SS and Removal Rate of Inflow and Outflow

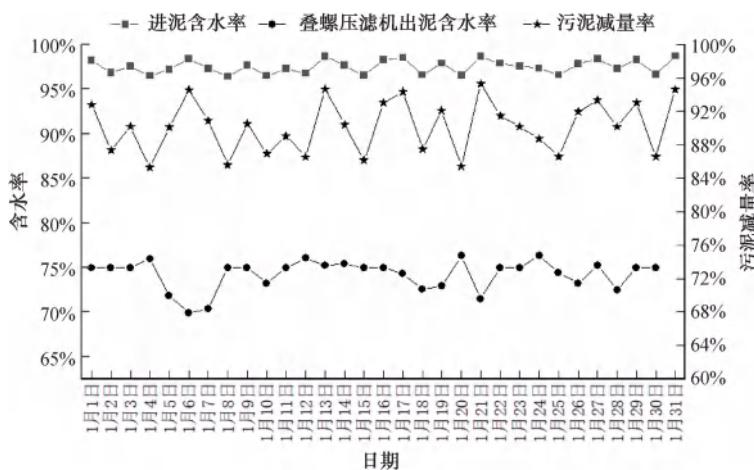


图5 叠螺式压滤机出泥含水率及减量率

Fig. 5 Water Content and the Reduction Rate of Sludge from Laminated Spiral Dewatering

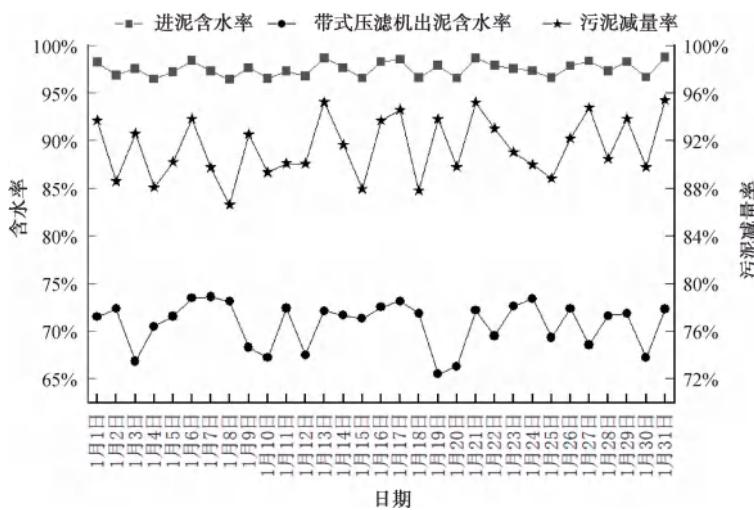


图6 带式压滤机出泥泥饼含水率及减量率

Fig. 6 Water Content and Reduction Rate of Sludge Cake from Belt Filter Press

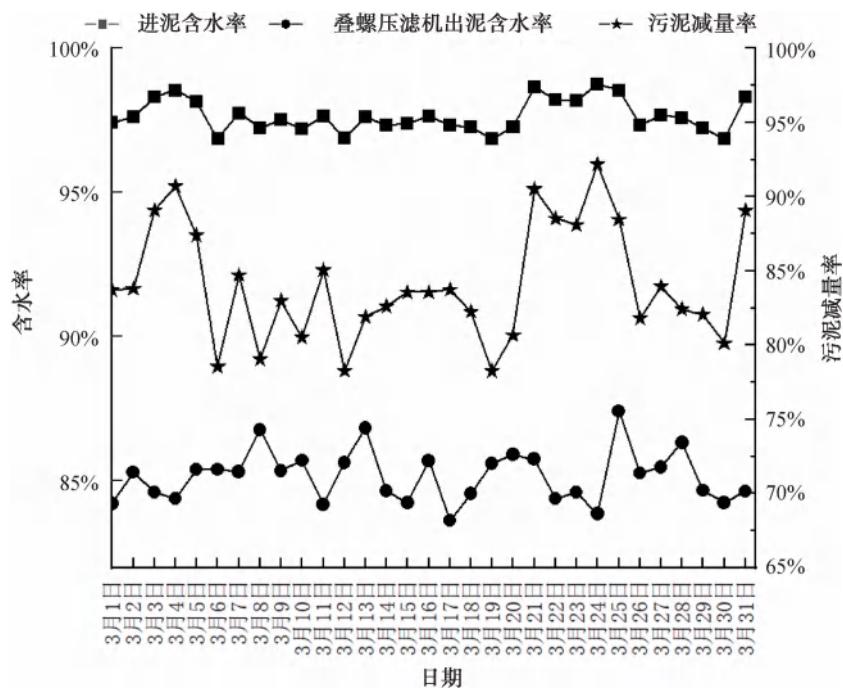


图 7 使用 1 年后叠螺脱水机出泥泥饼含水率及减量率

Fig. 7 Water Content and Reduction Rate of Sludge Cake from Spiral Dewatering after One Year

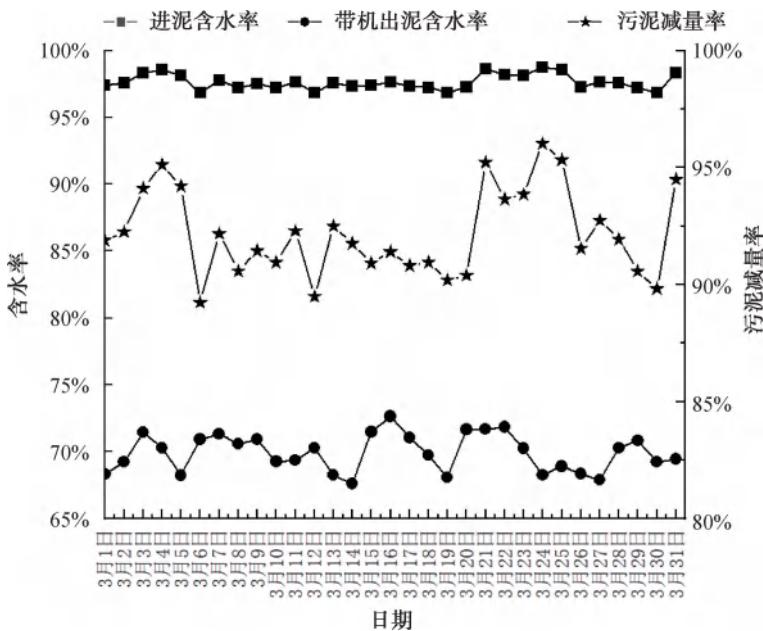


图 8 使用 1 年后带式压滤机出泥泥饼含水率及减量率

Fig. 8 Water Content and Reduction Rate of Sludge Cake from Belt Filter Press after One Year

处理后含水率降低至 60%, 最高产泥量 17 t/d(含水率为 75% 计)。将压滤液及冲洗水回流至高效浓缩沉淀池处理, 达标后排放, 环境效益非常显著。

4.2 运行经济指标

本项目主要直接运行费用为药剂消耗费和电费。表 3 为本项目的直接运行费用。

投加药剂为絮凝剂、聚合硫酸铁和磁粉, 药剂费用为 0.08 万元/d, 消耗电费为 0.11 万元/d, 直接运行费用为 0.17 元/m³。

5 结论

1) 通过对上海市某水厂排泥水处理系统的过渡性升级改造, 在现有构筑物的基础上将两清

表 3 直接运行费用
Tab. 3 Operation Cost

项目名称	基本数据
处理水量	12 000 m ³ /d
泥渣绝干量	3.8 t/d
总耗电量	1 354 kW·h/d
电费单价	0.85 元/(kW·h)
絮凝剂消耗量	0.027 t/d
絮凝剂单价	20 000 元/t
聚合硫酸铁消耗量	0.36 t/d
聚合硫酸铁单价	400 元/t
磁粉消耗量	0.06 t/d
磁粉单价	2 600 元/t
药剂费	0.08 万元/d
电费	0.11 万元/d
运行费用合计	0.20 万元/d
运行费用	0.17 元/m ³

水池改造为排泥池,沉淀池排泥水和滤池反冲洗水通过“高效沉淀浓缩+叠螺/带式压滤脱水”工艺处理后,有效地去除水体中的SS,最终出水SS质量浓度≤30 mg/L,SS去除率高达99%,达到水质净化的目的,浓缩后的泥渣含水率为97.5%左右。

2) 通过叠螺式压滤机脱水后含水率可降至75%以下,带式压滤机脱水后含水率降至72%以下,污泥减量率达85%以上,污泥体积减少,方便后续污泥处置。

3) 叠螺脱水机用于水厂排泥水泥渣脱水时,由于泥渣含砂量较高,设备磨损造成性能下降较快,而带式压滤机性能相对稳定。

参考文献

[1] 童祯恭, 奚志成, 陈文秀, 等. 净水厂沉淀池排泥水直接回用的可行性研究[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 646-650.
TONG Z G, XI Z C, CHEN W X, et al. Feasibility study on direct reuse of sludge water from sedimentation tank in water purification plant [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52 (2): 646-650.

[2] 吴伟, 季倩, 许晓毅, 等. 苏州某自来水厂排泥水处理系统运行优化试验研究[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 56-62.
WU W, JI Q, XU X Y, et al. Experimental study on operation optimization of sludge water treatment system in a waterworks in Suzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48 (1): 56-62.

[3] 李政伟, 高小涛, 马浩. 净水厂排泥水处理现状及展望[J]. 水处理技术, 2024, 50(6): 15-20.
LI Z W, GAO X T, MA H. Present situation and prospect of water treatment residuals in water purification plant [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(6): 15-20.

[4] 笪跃武, 陈焱, 缪绎, 等. 自来水厂排泥水处理浓缩工艺运行优化研究[J]. 给水排水, 2022, 48(s2): 137-142.
DA Y W, CHEN Y, MIAO Y, et al. Study on operation optimization of concentration process of sludge effluent treatment in waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48 (s2): 137-142.

[5] 徐蕾蕾. 自来水厂排泥水处理工艺的探讨[J]. 中华建设, 2024(6): 157-159.
XU L L. Discussion on sludge discharge water treatment technology of waterworks [J]. China Construction, 2024 (6): 157-159.

[6] 胡峰平. 低浓度剩余活性污泥凹气浮浓缩工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
HU F P. Study on the process of thickening low concentration excess activated sludge by cavitation air floatation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

[7] 吴雪茜, 郭中权, 毛维东. 生活污水处理厂污泥浓缩技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2017, 31(6): 5-8.
WU X Q, GUO Z Q, MAO W D. Research progress of sludge thickening technology in domestic sewage treatment plant [J]. Energy Environmental Protection, 2017, 31(6): 5-8.

[8] 王丽娜. 高密度沉淀技术在污水强化处理中的试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
WANG L N. Experimental study on densadeg technique in enhanced wastewater treatment [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011.

[20] WANG H J, ZENG J, DAI R B, et al. Understanding rejection mechanisms of trace organic contaminants by polyamide membranes via data-knowledge driven machine learning [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58 (13): 5878-5888.

[21] JIANG Z Y, LIAO E, LI Z, et al. Modeling the global ocean distribution of dissolved cadmium based on machine learning—SHAP algorithm [J]. Science of the Total Environment, 2025, 958: 177951. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177951.

(上接第 153 页)