

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.003

新型气浮设备去除污水厂二沉池出水TP和SS中试

赵志太^{1,2}, 李 建³, 孔晓光¹, 赵志能⁴, 李雪凝⁵, 苗志全¹,
宋 欣⁵, 张文博¹, 乔海兵^{1,2}, 孙士权⁵

(1. 河南省城乡规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450044; 2. 河南省水质保障
与水环境修复工程技术研究中心, 河南 郑州 450044; 3. 上海大众嘉定污水处理有限
公司, 上海 201800; 4. 河南梁隆置业有限公司, 河南 焦作 454150; 5. 长沙理工大学
水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 采用自主设计研发的新型气浮设备对北方某市污水厂二沉池出水进行深度处理, 考察了混凝剂种类、水温、回流比、表面负荷等对去除TP和SS的影响。结果表明, 在一定的表面负荷和回流比下, 二沉池出水经新型气浮设备处理后TP浓度低于0.3 mg/L, 且不受温度影响。在仅投加PAC时, 该设备即可维持出水SS低于20 mg/L。相较于高效沉淀池, 采用气浮处理二沉池出水的运行费用低, 经济效益好, 可作为城市污水厂深度处理工艺。

关键词: 气浮; 二沉池出水; 深度处理; TP; SS

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0018-07

Removal of TP and SS from Effluent of Secondary Sedimentation Tank with Novel Air Flotation Equipment

ZHAO Zhi-tai^{1,2}, LI Jian³, KONG Xiao-guang¹, ZHAO Zhi-neng⁴, LI Xue-ning⁵,
MIAO Zhi-quan¹, SONG Xin⁵, ZHANG Wen-bo¹, QIAO Hai-bing^{1,2}, SUN Shi-quan⁵

(1. Henan Urban and Rural Planning and Design Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450044, China; 2. Henan Water Quality Guarantee and Water Environment Restoration Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450044, China; 3. Shanghai Dazhong Jiading Sewage Treatment Co. Ltd., Shanghai 201800, China; 4. Henan Lianglong Real Estate Co. Ltd., Jiaozuo 454150, China; 5. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: A novel air flotation process was developed and used for advanced treatment of the effluent from the secondary sedimentation tank of the municipal wastewater treatment plant. The effects of coagulant type, water temperature, reflux ratio and surface load on the removal of TP and SS in the novel air flotation equipment were investigated. The results showed that the effluent concentration of TP was lower than 0.3 mg/L after the advanced treatment, and the TP concentration in effluent was stable and was not affected by the temperature. The novel air flotation equipment could reduce SS and maintain the effluent SS below 20 mg/L by only adding PAC. Moreover, compared with high-efficiency sedimentation tanks, the novel air flotation process had low operating costs and good economic benefits.

通信作者: 孙士权 E-mail: shiquan_sun@csust.edu.cn

Key words: air flotation; effluent of secondary sedimentation tank; advanced treatment; TP; SS

人口增加和生活水平的提高使得生活用水量不断增加,随之而来的污水处理问题日益严峻^[1]。若不能严格控制污水厂出水氮、磷等含量,将导致受纳水体富营养化等严重的水环境问题^[2]。运行超过5年的城镇污水处理厂,大部分处理量已超过当初建设时的设计规模,且外界因子变化时出水TP和SS浓度随之改变,难以满足日益严格的排放标准,需改造升级。而改扩建污水厂为了满足更加严格的出水TP要求,不得不选择三级处理工艺,但常规三级处理工艺面对不断严格的出水水质标准,逐渐捉襟见肘^[3]。气浮法具有较好的去除SS效果,且发展时间较长,技术成熟,但对TP的去除效果需要进一步提升。因此开发具有去除TP且高效降低SS的新型气浮设备,是污水厂三级处理工艺发展的方向之一^[4]。

钟希冰等^[5]采用HYDRONET气浮技术代替市政污水厂二沉池,不仅使出水SS降低至2 mg/L以下,且可减少PAM的投加量和加药泵启动频率,提高了经济效益。镇祥华等^[6]采用气浮工艺对曝气生物滤池出水进行固液分离,有效降低了出水SS及TP浓度,并且可以保证TP浓度降低至0.05 mg/L(一级A排放标准为0.5 mg/L),保证了污水处理达标率。潘国强等^[7]采用气浮-陶瓷膜耦合工艺处理炼油厂含油废水,总COD去除率高达96%以上,体现了该工艺对污染物的高效去除能力。可见,开发新型气浮工艺一直是污水深度处理领域的研究热点之一。

笔者结合气浮工作原理,开发了一种新型气浮设备,其分离段采用上流式构造并布置斜板,可强化浮渣与水的分离作用,提高气浮除污效率。采用该新型气浮设备对污水厂二沉池出水进行深度处理中试研究,考察了对TP和SS的去除效果,以期对新型设备的开发与应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验用水水质

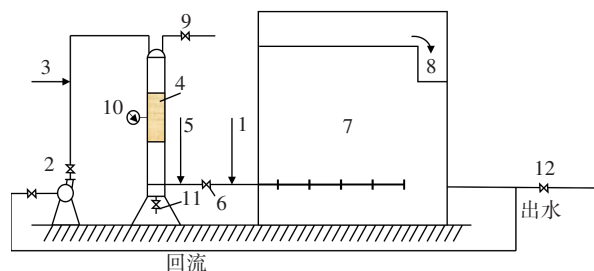
试验用水取自北方某城市污水处理厂二沉池出水,其冬季SS浓度为400~800 mg/L,水样经静沉30 min的上清液中TP浓度高达1.0~2.0 mg/L;在夏

季二沉池出水SS浓度处于200~400 mg/L之间,TP浓度为0.5~1.0 mg/L。

1.2 试验装置及特点

1.2.1 试验装置

研发的新型气浮设备如图1所示。该气浮设备由钢板焊接而成,整体长3.8 m,宽1.6 m,高2.5 m。采用平流式气浮池,长1.8 m,宽1 m,有效水深为2.2 m,超高取0.3 m。排渣槽设在气浮池的一侧,其宽与槽深均为0.2 m。气浮设备出水集水管中心线距池底0.3 m,池底设有排泥管,将池底的少量淤泥排出。



1. 原水 2. 回流泵 3. 空气 4. 压力溶气罐 5. 加药(PAC、PAM)
6. 减压释放器 7. 气浮池 8. 排渣槽 9. 溶气罐放气阀
10. 压力表 11. 溶气罐排空阀 12. 电动出水阀

图1 新型气浮装置示意

Fig.1 Schematic diagram of a novel air flotation equipment

新型气浮装置稳定运行时进水流量为15 m³/h,水力停留时间为10 min,表面负荷为8 m³/(m²·h)。压力溶气罐高为1.55 m,外径为0.2 m。溶气罐的压力在0.3~0.42 MPa之间,回流泵流量为1.5~2.0 m³/h,回流比为10%~13.3%。

新型气浮设备未设桥式刮渣机,通过控制水位去除水面的浮渣,电动出水阀安装在出水管上,通过定时器来控制电动出水阀的开闭。当电动出水阀关闭时,气浮机停止出水,气浮池内水位上升,将水面上的浮渣排入排渣槽,实现固液分离。

1.2.2 装置主要特点

与传统的气浮工艺相比,该新型气浮工艺的主要特点是:采用上向流气浮,水流上升与浮渣上浮同方向,表面负荷高。

主流的气浮反应器分离段构造是水从上向下

流动,在水向下流动的过程中浮渣向上分离,由于水流方向与浮渣的分离方向相反,因此可称为异向流气浮。异向流气浮向下的水流速度不能过快,否则容易造成出水带浮渣,影响处理效果。异向流气浮反应器的表面负荷一般在 $5.4\sim 9\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 之间。

该新型气浮的分离段采用下进水上向流结构,絮凝后的水与溶气水在进入分离段之前混合并在分离段下部布水,在底部接触区微气泡与微絮体进一步接触,形成絮体与气泡结合体,然后水继续上升到分离区。分离区设独特结构的分离器,该分离器是一种斜板结构,在斜板上端设集水槽。水进入分离区后,首先在斜板的作用下产生浮渣分离效果,在两层斜板之间形成浮渣和清水分层,浮渣将贴着上斜板下部在水流推动和浮力的作用下向上流动形成浮渣层,清水层向上推动,在分离器上端通过集水槽收集,通过各集水槽上的支管与汇水管连接,最终进入清水池。气浮包括絮凝、絮体与微气泡结合、絮体/气泡结合体与水分离三个主要过程。

1.3 试验设计

试验药剂共两种,分别是聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM),试验期间PAC投加量为15.1、27.5、32、36.7 mg/L, PAM投加量为0.5、0.6、0.6~0.7、0.77 mg/L。

试验周期跨越了春、夏、秋、冬四季,其水温在 $17\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动。经前期试验摸索适当的进水量、混凝剂投加量、回流比之后,进行分段试验研究。分段试验一:只投加PAC试验和PAC、PAM同时投加试验;分段试验二:考察不同季节时温度对气浮效果的影响,同时将新型气浮池出水与污水处理厂高效沉淀池出水进行对比。

2 结果与讨论

2.1 除磷效果

2.1.1 与污水厂高效沉淀池的对比

新型气浮设备所在污水处理厂采用“高效沉淀池+V型滤池”三级处理工艺,因气浮设备未设置滤池,将其出水TP浓度与该厂高效沉淀池出水TP浓度进行对比,结果见图2。气浮设备出水TP最低为 0.09 mg/L ,最高为 0.35 mg/L ,平均为 0.24 mg/L ;污水厂出水TP最低为 0.16 mg/L ,最高为 0.63 mg/L ,平均值为 0.38 mg/L 。由此可见,二沉池出水经气浮

处理后比污水厂高效沉淀池出水TP浓度更低且稳定,说明气浮工艺用于污水厂深度除磷是可行的,且除磷效果较高效沉淀池好,经出水平均值对比,气浮工艺的除磷效率较高效沉淀池高36.8%。另外,从整个运行过程来看,污水厂出水TP浓度受季节影响较大,而新型气浮设备受季节影响小,且可维持出水TP浓度处于较低水平,为污水厂出水TP达标提供了保障,并且该气浮装置的处理量可以达到 $360\text{ m}^3/\text{d}$,占地面积只有 6.08 m^2 ,相较于一般的气浮设备,占地面积要小。

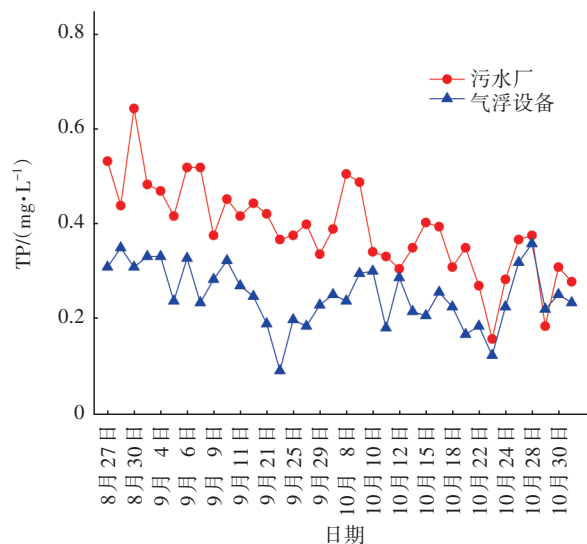


图2 中试气浮设备与污水厂出水总磷浓度对比

Fig.2 Variation of total phosphorus in effluent from air flotation equipment and sewage treatment plant

将检测的出水TP浓度划分为4个阶段,统计各个阶段所包含的天数并计算其占比。结果显示,气浮池出水TP为 $0\sim 0.2$ 、 $0.2\sim 0.3$ 、 $0.3\sim 0.5$ 、 $>0.5\text{ mg/L}$ 的天数分别为9、17、10、0 d,相应占比分别为25%、47.2%、27.8%、0,而污水厂高效沉淀池的相应值分别为2、3、27、4 d和5.6%、8.3%、75%、11.1%。可见新型气浮池出水TP大部分在 $0.2\sim 0.3\text{ mg/L}$ 之间,污水厂高效沉淀池的出水TP大部分在 $0.3\sim 0.5\text{ mg/L}$ 之间,表明新型气浮池的除磷效果远优于污水厂的高效沉淀池,即便在二沉池的出水SS过高时中试设备也能取得较好的除磷效果,出水水质达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

2.1.2 药剂对除磷效果的影响

为有效去除水中的悬浮物,考察了PAC和PAM

对气浮效果的影响,结果如图3所示。投加PAC和PAC+PAM的气浮出水TP浓度变化趋势一致,总体上PAC+PAM的出水水质略优于PAC。试验期间,两种投药方式下的出水TP浓度均低于0.3 mg/L,且均远低于同时期污水厂出水磷浓度,表明两种投药方式都可作为二沉池出水深度除磷的备选。

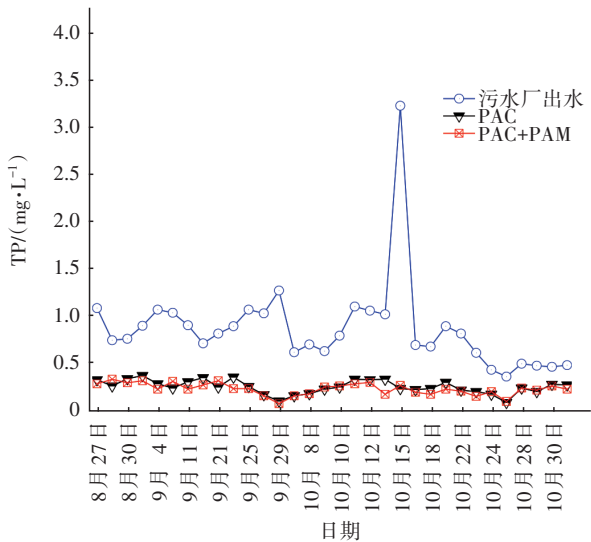


图3 投加不同混凝药剂时出水总磷浓度变化
Fig.3 Changes of total phosphorus concentration in effluent with different coagulants

将投加PAC与PAC+PAM的出水总磷浓度数据划分为5个区域,并将其在各个区域的天数进行汇总,结果如表1所示。同时加入PAC和PAM与仅投加PAC的除磷效果差异较小,当仅投加PAC时TP平均去除率为68.8%,同时加入PAC和PAM时,总磷平均去除率为69.2%。由于二者的TP去除率差异较小,且均能满足出水水质标准,故在实际工程中可以只投加PAC。

表1 不同药剂时出水总磷各阶段天数
Tab.1 Days of each stage for effluent total phosphorus when adding different chemicals d

药剂	出水总磷/(mg·L ⁻¹)				
	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5
PAC	1(3.1%)	5(15.6%)	16(50%)	10(31.3%)	0(0)
PAC+PAM	1(3.1%)	9(28.2%)	17(53.1%)	5(15.6%)	0(0)

注: 括号内数值为各阶段天数的占比,下同。

2.1.3 季节变化对除磷效果的影响

此气浮设备运行的周期较长,其间跨越了多个季节,由于各个季节的温度不同,导致原水水温存

在差异。为探究水温对气浮设备去除TP的影响,选取夏季、秋季、冬季的数据进行比较,结果见图4。

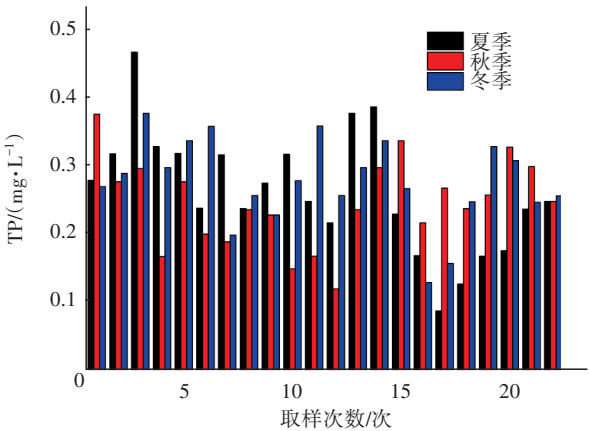


图4 各季节出水总磷浓度变化
Fig.4 Variation of total phosphorus concentration of effluent in each season

在进水流量为15 m³/h时,选取夏、秋、冬季各连续22 d数据进行比较,其中夏季出水TP最大值为0.47 mg/L,最小值为0.09 mg/L,平均值为0.26 mg/L;秋季出水TP最大值为0.39 mg/L,最小值为0.12 mg/L,平均值为0.24 mg/L;冬季出水TP最大值为0.39 mg/L,最小值为0.13 mg/L,平均值为0.28 mg/L。可见,三者的平均值都在0.3 mg/L以下且相差并不大,即气浮池对TP的去除效果并没有太大波动。将各个季节的出水总磷浓度的数据分为5个区域,对其出水总磷在各个区域的天数进行汇总比较,结果见表2。

表2 各季节出水总磷各阶段天数
Tab.2 Days of each stage for effluent total phosphorus during various seasons d

项目	出水总磷/(mg·L ⁻¹)				
	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5
夏季	1(4.5%)	4(18.2%)	9(41%)	7(31.8%)	1(4.5%)
秋季	0(0)	5(22.7%)	13(59.1%)	4(18.2%)	0(0)
冬季	0(0)	3(13.6%)	11(50.0%)	8(36.4%)	0(0)

夏季的水温基本上在28℃左右,最高能达到29℃以上,而冬季的水温都在18℃左右,两者相差10℃,然而夏季和冬季的出水TP浓度差异较小,并没有因温度降低而使出水TP浓度大幅度上升^[8],即水温对气浮池去除TP的影响并不大,三个季节都能保证出水总磷浓度在0.5 mg/L以下,并且大部分时间出水TP浓度都保持在0.3 mg/L以下。

2.1.4 高SS浓度时的除磷效果

试验前期正值冬季,该污水处理厂二沉池出水悬浮物浓度较高,其SS为400~800 mg/L,出水浑浊,相关指标无法达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。气浮设备处理水量为15 m³/h,回流比为15%,PAC的投加量为30 mg/L,不投加PAM,考察气浮设备对二沉池出水总磷的去除效果。二沉池出水悬浮物浓度高,TP大部分黏附于悬浮物上,经测试TP浓度超过2.0 mg/L。实际测试气浮设备进水TP浓度时,将水样静沉30 min,取上清液测量,气浮设备出水水样不静沉。进行了5 d的取样测试,每天上午和下午各取一次样,气浮设备对TP的去除效果如图5所示。

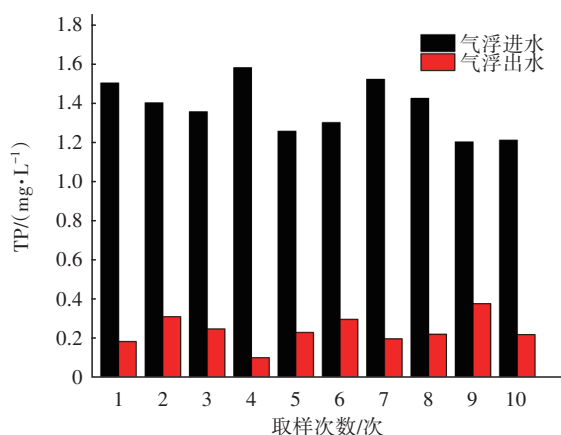


图5 气浮设备对总磷的去除效果

Fig.5 Changes of removal effect of total phosphorus by air flotation equipment

在二沉池出水悬浮物浓度高达400~800 mg/L时,出水中大量的磷以颗粒磷的形式存在,同时溶解性的磷可与混凝剂(PAC)结合并析出,然而都可通过气浮被良好地去除。将进水水样静沉30 min后上清液中TP浓度为1.2~1.5 mg/L,经气浮处理后降至0.4 mg/L以下,由此可见混凝、气浮除了去除颗粒态磷外,对溶解性磷也有良好的去除效果。新型气浮工艺通过微气泡与水中的溶解性磷发生化学反应而形成悬浮态磷,同颗粒态磷一起被去除。

2.2 新型气浮设备对SS的去除

2.2.1 投加PAM对出水SS的影响

稳定进水流量为12 m³/h,表面负荷为6.7 m³/(m²·h),回流比为15%,PAC投加量为20 mg/L,PAM投加量为0.6 mg/L,每天上午投加PAC、下午同时投加PAC和PAM,结果如图6所示。可见,新型气浮

系统只加PAC即可将SS浓度降到20 mg/L以下,PAM的加入对处理效果影响不大。目前,应用较多的加磁混凝沉淀池和加砂混凝沉淀池等需引入密度大的细小颗粒物质,颗粒物质与悬浮物结合方可加快悬浮物的沉降,缩短沉降时间,提高沉降效果,因此这两种工艺都需要投加PAM^[9-10]。而气浮工艺采用微小气泡代替颗粒物,微小气泡不需PAM即可与悬浮物产生良好的结合,达到去除SS效果,降低了运行成本。

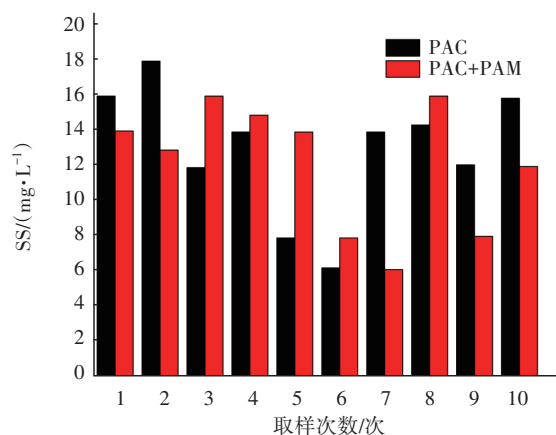


图6 投加不同药剂时气浮设备出水SS浓度变化

Fig.6 Variation of SS concentration in effluent of air flotation equipment when dosing different agents

2.2.2 表面负荷对出水SS的影响

稳定PAC投加量为20 mg/L,不加PAM,回流比为15%。试验前10 d分离池的表面负荷上午为4.5 m³/(m²·h)、下午为6.0 m³/(m²·h),后10 d上午为7.5 m³/(m²·h)、下午为9.0 m³/(m²·h)。新型气浮设备出水SS浓度随分离池表面负荷的变化见图7。

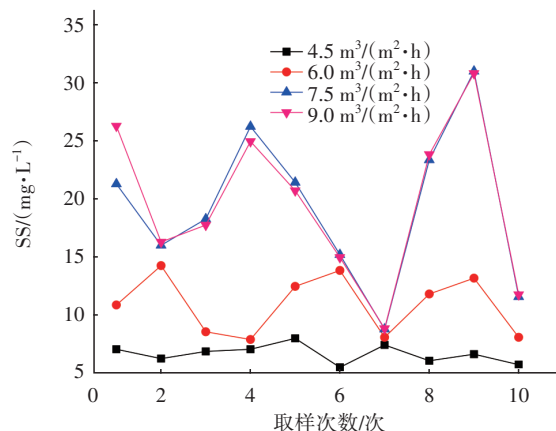


图7 表面负荷对气浮设备出水SS浓度的影响

Fig.7 Influence of surface load on effluent SS concentration of air flotation equipment

由图7可知,新型气浮设备分离池表面负荷 $\leq 6.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,出水SS浓度维持在 20 mg/L 以下,并且保持相对稳定;当表面负荷 $\geq 7.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,出水SS浓度波动大,部分时段出水SS超过 20 mg/L ,表明气浮工艺应选择适宜的进水负荷,否则会影响后续出水水质。负荷较高时,气浮设备所产生的微气泡不能有效与污水中悬浮物接触,难以去除水中过量的悬浮物,导致出水水质变差^[11]。

2.2.3 回流比对出水SS的影响

稳定进水流量为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$,表面负荷为 $6.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,PAC投加量为 20 mg/L ,不投加PAM,调整回流比为8%、12%、16%,气浮设备出水SS浓度随回流比的变化如图8所示。当回流比为8%时,出水SS浓度高、波动大,可达到 80 mg/L 以上;当回流比为12%时,出水SS仍波动较大,平均为 25.31 mg/L ;当回流比为16%时,气浮出水SS浓度 $<20 \text{ mg/L}$,说明提高回流比可提高对SS的去除率。

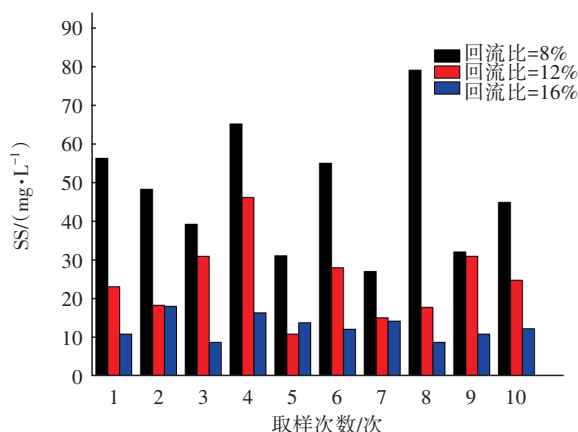


图8 回流比对气浮设备出水SS浓度的影响

Fig.8 Influence of reflux ratio on effluent SS concentration of air flotation equipment

3 经济效益分析

污水处理运行成本主要包括:人工费、电费和药剂费^[12]。其中,新型气浮装置的主要用电设备包括回流泵及空压机,高效沉淀池的用电设备包括回流污泥泵及剩余污泥泵等;高效沉淀池的药剂费包括PAC与PAM的费用,而新型气浮设备所需药剂只有PAC。

在相同的进水流量($15 \text{ m}^3/\text{h}$)、回流比(15%),以及同等的处理效果下,该新型气浮设备的电费成本为 $0.019 \text{ 元}/\text{m}^3$,高效沉淀池的电费成本为 $0.026 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。新型气浮设备所加药剂是有效成分为30%

的PAC,投加量为 20 mg/L ,则药剂费为 $0.048 \text{ 元}/\text{m}^3$;高效沉淀池需同时加入PAC及PAM,药剂费为 $0.059 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

根据上述分析,同时考虑到两种工艺人工成本基本相当的情况,新型气浮设备和高效沉淀池的运行成本分别为 0.067 、 $0.085 \text{ 元}/\text{m}^3$ (不考虑人工费),即新型气浮池的运行费用更低。

4 结论

① 二沉池出水中不仅含有颗粒态磷还含有溶解性磷,采用新型气浮池,只需投加PAC即可使出水TP浓度满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,且处理效果不受温度影响。

② 当新型气浮设备的表面负荷为 $6.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和回流比不小于15%时,其对二沉池出水SS的去除效果较好,出水SS维持在 20 mg/L 以下。

③ 新型气浮设备处理二沉池出水的电费及药剂费成本为 $0.067 \text{ 元}/\text{m}^3$,相对高效沉淀池工艺更经济。

参考文献:

- [1] MIRANDA R, LATOUR I, BLANCO A. Understanding the efficiency of aluminum coagulants used in dissolved air flotation (DAF) [J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 27(8):1-14.
- [2] 程燕丽,王宏. “混凝+气浮+AO”工艺处理芝麻生产废水[J]. *安徽化工*, 2016, 42(4): 92-93.
CHENG Yanli, WANG Hong. Treatment of sesame wastewater by coagulation + air flotation + AO process [J]. *Anhui Chemical Industry*, 2016, 42(4): 92-93 (in Chinese).
- [3] LEE K H, KIM H, KUK J W, et al. Micro-bubble flow simulation of dissolved air flotation process for water treatment using computational fluid dynamics technique [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 112-120.
- [4] 郑定成,邱元凯. 化学气浮在水处理的研究和应用进展[J]. *科技信息*, 2013(3):288,310.
ZHENG Dingcheng, QIU Yuankai. Study and apply chemical flotation in water treatment [J]. *Science and Technology Information*, 2013 (3): 288, 310 (in Chinese).
- [5] 钟希冰,魏霄霞,袁挺. 用HYDRONET高效气浮技术替代市政污水厂二沉池的试验研究[J]. *广东化工*,

- 2012,39(3):123-124.
- ZHONG Xibing, WEI Xiaoxia, YUAN Ting. The study using high-efficient air-floating technical HYDRONET replacing the secondary sedimentation tanks in municipal wastewater treatment plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39 (3) : 123-124 (in Chinese).
- [6] 镇祥华,余琴芳,万年红,等. 污水处理厂二级出水深床滤池超深度脱氮研究[J]. 中国给水排水,2020,36(11):91-96.
- ZHEN Xianghua, YU Qinfang, WAN Nianhong, *et al.* Advanced denitrification of secondary effluent of a wastewater treatment plant in deep bed filter [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (11) : 91-96 (in Chinese).
- [7] 潘国强,邓亮. 气浮-陶瓷膜耦合工艺处理炼油厂含油废水[J]. 中国给水排水,2020,36(18):118-121.
- PAN Guoqiang, DENG Liang. Oily wastewater treatment by a coupling process of air flotation and ceramic membrane [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 118-121(in Chinese).
- [8] 崔朋,章诗璐,万年红,等. 高效气浮工艺深度除磷试验研究[J]. 住宅产业,2019(11):31-36.
- CUI Peng, ZHANG Shilu, WAN Nianhong, *et al.* Full-scale study on the deeply phosphorus removal by high efficiency air floatation technology [J]. Residential Industry,2019 (11): 31-36(in Chinese).
- [9] 郑志佳,连来喜,刘彦华,等. MBBR+磁混凝用于CAST工艺升级改造的效果分析[J]. 中国给水排水,2020,36(1):7-12,17.
- ZHENG Zhijia, LIAN Laixi, LIU Yanhua, *et al.* Upgrading and reconstruction of CAST process by MBBR and magnetic coagulation process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 7-12, 17(in Chinese).
- [10] 朱洁,张东,陈洪斌,等. ACTIVFLO高效澄清池的运行优化研究[J]. 中国给水排水,2010,26(21):47-51.
- ZHU Jie, ZHANG Dong, CHEN Hongbin, *et al.* Operation optimization of ACTIVFLO clarifier [J]. China Water & Wastewater, 2010,26(21):47-51(in Chinese).
- [11] 荆王松,梅荣武,王泉源. 气浮/UASB/芬顿/AO工艺处理含油废水[J]. 中国给水排水,2018,34(8):103-109.
- JING Wangsong, MEI Rongwu, WANG Quanyuan. Application of air flotation/UASB/Fenton/AO process in oily wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 103-109(in Chinese).
- [12] 王松,刘振. 智慧污水处理厂的内涵与思路[J]. 中国给水排水,2021,37(12):14-18.
- WANG Song, LIU Zhen. Connotation and way of smart sewage treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 14-18(in Chinese).

作者简介:赵志太(1980-),男,河南焦作人,硕士,高级工程师,研究方向为供水及污水处理理论与技术。

E-mail:41498991@qq.com

收稿日期:2021-12-11

修回日期:2022-01-27

(编辑:李德强)

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力