

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.019

南通某化工园区污水处理厂降本增效分阶段改造

周 呈, 周宇翔, 叶阳阳, 孙慧频
(江苏省环保集团南通有限公司, 江苏 南通 226001)

摘 要: 南通某化工园区污水处理厂进水水质复杂,主要处理园区内农药、医药、精细化工等企业预处理后的废水,而现有处理系统存在原始设计缺陷且设备老化严重,出水水质已无法满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A排放标准,同时高昂的运行成本极大增加了企业负担,因此决定进行分阶段提标改造。通过增设物化预处理、优化生化处理工段、新增末端深度处理工段的方式完成整改,最终形成臭氧氧化池+水解酸化池+A/O池+二沉池+芬顿氧化池+高密度澄清池+V型滤池的污水处理组合工艺,对物化污泥采用调理+板框压滤+低温干化组合工艺,改造完成后出水水质稳定达到排放标准,综合运行成本降低2.5元/m³。面对后期可能执行的江苏新地标,可通过改造现有V型滤池为反硝化生物滤池实现深度脱氮,并在整个工艺的最末段增设活性炭吸附罐作为保障措施实现对COD与残留有机氮的去除。

关键词: 化工园区; 臭氧射流曝气; 高密度澄清池; 污泥低温干化; 提标改造

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)12-0114-06

Phased Upgrading and Reconstruction of a Chemical Industry Park WWTP in Nantong to Reduce Cost and Increase Efficiency

ZHOU Cheng, ZHOU Yu-xiang, YE Yang-yang, SUN Hui-pin

(Jiangsu Environmental Protection Group Nantong Co. Ltd., Nantong 226001, China)

Abstract: The influent quality of a wastewater treatment plant (WWTP) in a chemical industrial park in Nantong is complex, which mainly treats the pre-treated sewage of pesticides, pharmaceuticals, fine chemicals and other enterprises in the park. However, the existing treatment system had the original design defects and the equipment was seriously aged, thus the effluent was unable to meet the level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002), while the high operating cost greatly increased the enterprise's burden. Therefore, the WWTP adopted a phased upgrading and reconstruction, by adding physical and chemical pre-treatment, optimizing biochemical treatment section and adding terminal advanced treatment section. Finally, the combined treatment process of ozone oxidation tank, hydrolysis acidification tank, A/O tank, secondary sedimentation tank, Fenton oxidation tank, high-density clarifier, V-type filter was formed. The combined process of sludge conditioning, plate and frame pressure filtration and low temperature drying was adopted for physicochemical sludge treatment. After the completion of the transformation, the effluent quality met the standard requirements stably, and the comprehensive operation cost was reduced by 2.5 yuan/m³. In

基金项目: 江苏省环保集团南通有限公司科研支撑项目(JSEPNT-KY-2023-002)

通信作者: 周呈 E-mail: 853407833@qq.com

the face of the new standard of Jiangsu Province that may be implemented in the later period, the existing V-type filter could be transformed into a denitrification biofilter to achieve advanced nitrogen removal, and an activated carbon adsorption tank could be added at the end of the whole process as a safeguard measure to achieve the removal of COD and residual organic nitrogen.

Key words: chemical industry park; ozone jet flow aeration; high-density clarifier; low temperature sludge drying; upgrading and reconstruction

1 项目概述

南通某化工园区污水处理厂于2007年4月建成投产运行,设计处理水量为 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,主要处理园区内农药、医药、精细化工等企业预处理后的废水,以及石油仓储企业的冲洗废水和部分镇区生活污水,主体采用混凝沉淀+生化(A/O)工艺,处理后的尾水执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的三级标准。随着环保要求趋严,原始设计的尾水排放标准不能满足要求,园区于2015年对该污水处理厂进行技术改造,使其出水水质达到江苏省《化学工业主要水污染物排放标准》(DB 32/939—2006)的一级标准,其改造内容为在前端增设水解酸化工艺提升进水可生化性,在末端增设芬顿氧化/沉淀一体池作为深度处理工艺。该污水处理厂运行一段时间后,水质、水量发生较大变化,化工废水量增加了近50%,生活污水量大幅下降,总处理规模仍维持在 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 不变。此外,为满足节能减排的政策要求,生态环境主管部门要求出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。该污水处理厂设计水质及改造前实际进水水质如表1所示。

表1 设计进、出水水质和改造前实际进水水质
Tab.1 Design influent and effluent quality and actual influent quality before reconstruction $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	SS	TP
设计进水	500	250	45	70	400	8
改造前进水	298~462	18~39	26~38	46~87	298~524	2.7~9.5
“一企一管”改造后进水	212~247	10~19	22~39	52~66	98~189	2.8~5.8
改造前出水	46~68	8~13	0.6~3.1	14.5~18.8	6~18	0.19~0.29
设计出水	50	10	5(8)	15	10	0.5

鉴于现有水解池、生化池等存在原始设计缺陷且设备老化严重,出水水质无法满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A

排放标准,该污水处理厂于2019年5月启动提标改造。整改分为两个阶段:第一阶段改造满足达标排放要求,第二阶段改造满足节能降耗及深度减排要求。改造前污水处理工艺流程为水解酸化池+水解沉淀池+混凝沉淀池+A/O池+二沉池+芬顿氧化/沉淀一体池。

2 改造思路

要实现该污水处理厂稳定运行和达标排放,必须从源头控制污染物的产生和排放,按照规范执行废水的收集、监控和预处理,强化污水处理厂的处理效果,并设计应急处理机制。为实现源头控制的目标,在污水处理厂内部提标改造的同时,同步实施了园区“一企一管、明管输送”监控系统工程,对企业来水水质、水量进行监管,同时在厂外约3 km处的“一企一管”监控中心配套建设容积10 000 m^3 的调节池对企业来水进行初步缓冲混合,实现对来水的均质均量。

在源头控制的同时,针对园区污水处理厂内部存在的原始设计缺陷与运行不稳定的工段进行改造,并新增处理工段。重点设计思路如下:

① 针对进水可生化性较差以及出水COD偏高的问题,在工艺前端新增臭氧氧化并改造现有水解酸化池以提高来水的可生化性,降低后续工段处理负荷;

② 针对现有A/O系统总氮去除率低的问题,通过深挖现有池体潜力、改造现有曝气系统、调整混合液回流比、优化回流方式等措施提升生化处理效果与总氮去除能力;

③ 针对出水SS与总磷偏高等问题,通过末端新增高密度沉淀池+V型滤池实现对SS与总磷的高效截留;

④ 通过增加臭氧氧化预处理减少后续系统药剂投加量并削减污泥产生量,通过新增低温干化工艺实现物化污泥的深度减量,大幅减少污泥处置

费用。

根据设计改造思路,第一阶段主要对厂内的原始设计缺陷进行改造,并深挖已有工段的潜能,提升处理能力,确保出水达标排放;第二阶段通过新增臭氧氧化与污泥低温干化系统满足节能降耗及深度减排的要求。改造后的工艺流程见图1。

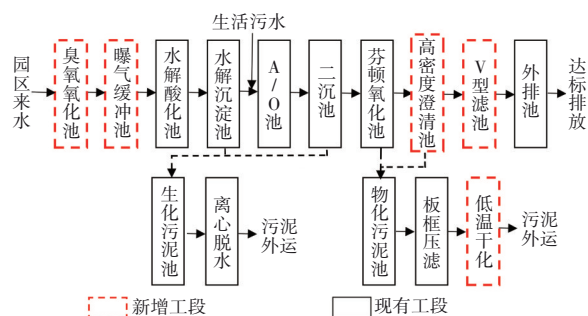


图1 污水处理厂改造后工艺流程

Fig.1 Process flow chart of wastewater treatment plant after upgrading and reconstruction

2.1 水解酸化池优化提升

本次提标改造前,水解酸化池由于推流器选型不合理,功率偏小,同时由于池体跨度较大,造成水解酸化池四周较大区域污泥沉积严重、泥水混合不充分、存在短流现象,水解酸化池污染物去除率较低,潜能未得到充分利用。本次改造对水解酸化池内部导流隔墙进行优化,将有效缓解短流情况,同时新增悬挂式推流器,实现泥水充分混合。

2.2 A/O池优化提升

本次提标改造前,污水处理厂出水COD、TN浓度偏高且不能满足一级A标准,经分析发现,A/O池TN去除率较低,反硝化效果较差。此外,A/O池缺氧段泥水混合不均匀、污泥沉积严重、中后段溶解氧偏低(≤ 0.25 mg/L),同时好氧段存在曝气不均匀、局部损坏现象,内置混合液回流系统故障,回流比仅为120%,严重影响生化系统的去除效果。本次改造在缺氧段新增潜水搅拌机、更换混合液回流系统并采用多点回流与分段投加碳源方式,保证溶解氧充足与较好的总氮去除效果;对好氧段的曝气系统,采用可提升式微孔曝气装置进行不停产整体更换,实现曝气系统的优化与后期维护的便利化。

2.3 增设高密度沉淀池与V型滤池系统

芬顿氧化/沉淀一体池的沉淀工段表面负荷较高,达到 $1.24 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,但采用的平流式沉淀工艺效果不佳,在“一企一管”系统投入使用前间歇存在

进水SS与总磷浓度超过设计值情况,造成后端深度处理药剂投加量较高,并出现出水SS及总磷浓度偏高现象,同时出水中存在少量胶体状物质。为实现对SS、总磷的高效截留与胶体状COD的有效去除,本次整改拟在现有工艺末端增设高密度沉淀池+V型滤池工段。

第一阶段改造完成后,各出水指标虽能实现达标排放,但出水COD浓度仍然偏高,维持在 43 mg/L 左右,同时整套系统运行能耗较高,特别是药剂使用量与危废处置量较大,日常运行经济负担较重。与此同时,2020年12月园区“一企一管、明管输送”监控系统工程已建设完成,“一企一管”监控中心改由园区污水处理厂统一运行管理,园区污水处理厂进水水质与稳定性均有所改善。为实现降本增效,在降低运行成本的同时,完成深度减排这一目标,启动了第二阶段改造工程。

2.4 增设臭氧氧化预处理池,停用混凝沉淀池

为减少预处理药剂使用量与污泥产生量,同时进一步提高进水的可生化性,本阶段整改将水解酸化池的一部分池体改造为臭氧氧化池。目前,臭氧(催化)氧化技术广泛应用于尾水深度处理^[1-2]或生化工艺中段提升废水可生化性^[3],但臭氧氧化法作为预处理工艺提高进水可生化性时,由于受进水杂质(SS)的影响,其臭氧消耗量较大,臭氧投加运行费用较高^[4],故目前作为前端预处理的应用案例并不多。此外,本项目在现场小试期间采用臭氧催化氧化工艺处理原水20余天后,发现氧化效率相比初始情况有明显下降,初步判断为杂质附着在催化剂表面,造成系统污染物去除率下降,故本次改造舍弃催化工艺。考虑到“一企一管、明管输送”监控系统工程使来水水质有一定改善,SS浓度下降幅度较大,这为使用臭氧工艺提供了可能。为强化臭氧的传质速率,本次改造采用臭氧射流曝气工艺^[5]。射流曝气具有很强的混合与氧化能力,在基于文丘里管的射流曝气过程中,水流紊动能形成更小的气泡,增大气液两相的接触面积进而强化臭氧传质,并且能够有效防范采用传统的钛材微孔曝气盘的堵塞问题,同时为避免废水中残留的臭氧对后续水解酸化池内厌氧菌种的生物毒性及厌氧环境的破坏,设计了水力停留时间为 0.5 h 的缓冲池消耗来水中残留臭氧。

在“一企一管、明管输送”监控系统工程已有效

控制来水水质和臭氧氧化实现对来水色度的高效去除及可生化性提升的基础上,停用原有的混凝沉淀预处理工艺,实现药剂投加费用与污泥处置费用的节省。

2.5 增设污泥低温干化系统

为进一步压缩运行成本,委托有资质单位对厂区污泥进行鉴定,生化污泥为一般固废,物化污泥为危险废物。考虑到危废委托处置费用较高,决定对物化污泥采取污泥减量措施。传统污泥减量普遍采用转鼓式干化机等进行干燥加热,干燥介质一般为蒸汽、热油等,干燥温度设置较高,导致能耗高及产生二次污染。相比之下,低温污泥热干燥技术^[6]的能耗显著低于传统蒸汽干燥技术,故采用污泥低温干化工艺实现对物化污泥的深度减量,将污泥的含水率由约70%降至约35%,进而大幅降低危废处置费用。

3 主要构筑物及工艺参数

3.1 臭氧氧化及缓冲池

1座,将原水解酸化池的部分池体改造为臭氧氧化池,布置射流曝气系统。设计尺寸32 m×18 m×5.5 m,总水力停留时间4.32 h,根据进水水质、水量的变化,臭氧变频投加以节约能源,臭氧投加量为40~70 mg/L。

主要设备:射流泵6台(4用2备), $Q=90\text{ m}^3/\text{h}$, $H=400\text{ kPa}$, $N=30\text{ kW}$;射流器4台,液气比1:1.5,316L不锈钢材质;臭氧发生器3台(2用1备),发生量20 kg/h, $N=195\text{ kW}$;尾气破坏器3台, $N=9\text{ kW}$;内循环冷却水系统3套(含板式换热器、循环泵等), $Q=40\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=3\text{ kW}$;液氧站1套(含配套汽化器及减压阀组), $V=30\text{ m}^3$,压力0.8 MPa。

3.2 水解酸化池

1座,对原有水解酸化池进行改造,增设悬挂式推流器与污泥回流系统,设计尺寸38 m×18 m×5.5 m,水力停留时间5.13 h,对池体进行反吊膜加盖并引风收集。

主要设备:悬挂式推流器2台, $N=10\text{ kW}$;污泥回流泵2台, $Q=100\text{ m}^3/\text{h}$, $H=250\text{ kPa}$, $N=11\text{ kW}$;污泥浓度仪1台。

3.3 A/O池

2座,原有池体结构不变,增设混合液回流系统、潜水搅拌系统及碳源投加系统,更换曝气系统,

改造混合液回流管网,设计尺寸:缺氧段80 m×9 m×5 m(2座),好氧段80 m×18 m×5 m(2座),有效水深4.5 m,水力停留时间:缺氧段9 h、好氧段18 h,设计污泥浓度3 g/L,混合液回流比300%。

主要设备:混合液回流泵4台(2用2备), $Q=1\,200\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=55\text{ kW}$;潜水搅拌机16台, $N=2.5\text{ kW}$;可提升式微孔曝气器1200套;碳源投加系统1套,碳源储罐 $V=30\text{ m}^3$,药剂泵3台(2用1备), $Q=500\text{ L/h}$, $P=0.3\text{ MPa}$, $N=0.75\text{ kW}$ 。

3.4 高密度澄清池

1座,新建,钢混结构,设计尺寸:混凝区4.5 m×4.5 m×6.5 m,澄清区10 m×8.5 m×6.5 m,表面负荷 $9.8\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

主要设备:中心传动刮泥机1台, $\theta=8\text{ m}$;搅拌机1台, $N=7.5\text{ kW}$;絮凝筒1个, $\theta=1.2\text{ m}$;污泥循环螺杆泵3台(2用1备), $Q=25\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $N=7.5\text{ kW}$;PAC加药系统1套(含溶药筒、搅拌机与药剂泵), $N=2.75\text{ kW}$;PAM加药系统1套(含溶药筒、搅拌机与药剂泵), $N=2.75\text{ kW}$ 。

3.5 V型滤池

1座,新建,钢混结构,设计尺寸:滤池(3格)22.4 m×10.2 m×4.6 m,清水池8 m×8 m×4.5 m,废水池8 m×8 m×3.45 m,滤速6 m/h。

主要设备:长柄滤头9000套;承托层填料14 m^3 ,滤料213 m^3 ;反冲洗水泵2台(1用1备), $Q=907\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=45\text{ kW}$ 。

3.6 污泥干化间

1座,新建,钢结构厂房,设计尺寸:21.7 m×9 m。新建的污泥干化系统将现有板框压滤机出料含水率70%左右的脱水泥饼由下部皮带输送至湿泥料仓,随后输送至低温干化机(按绝干污泥算处理能力9 t/d,设计24 h运行),污泥含水率降至35%及以下,干化后的污泥输送至干泥料仓。

主要设备:污泥低温密闭干燥机1套, $N=99\text{ kW}$;螺旋输送机2台, $N=2.2\text{ kW}$;双轴破碎螺旋输送机1台, $N=3\text{ kW}$;进料刮板输送机1台, $N=3.3\text{ kW}$;垂直刮板输送机1台, $N=3\text{ kW}$;中间湿料仓1套, $V=20\text{ m}^3$,干化污泥料仓1套, $V=40\text{ m}^3$ 。

4 运行效果分析

该项目分两个阶段进行改造,2019年7月完成第一阶段改造,2021年3月完成第二阶段改造。改

造前(2019年4月)出水水质,第一阶段改造完成后(2019年8月)出水水质及第二阶段改造完成后(2021年4月)出水水质如表2所示。

表2 改造前后系统出水水质

Tab.2 Effluent quality before and after upgrading and reconstruction $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP
改造前出水水质	46~68	8~13	0.44~3.1	14.5~18.8	0.19~0.29
第一阶段改造后出水水质	38~47	6~10	0.08~0.28	8.8~12.4	0.03~0.11
第二阶段改造后出水水质	22~34	4~8	0.06~0.29	7.9~12.6	0.04~0.09

由表2可知,第一阶段改造完成后,出水总磷浓度下降明显,说明高密度澄清池+V型滤池工艺能够实现总磷的高效去除;氨氮浓度降幅较大且维持在较低数值,说明生化池曝气系统的改善强化了硝化菌的生存环境。此外,出水各指标浓度虽能达到一级A排放标准,但是COD、BOD₅、TN浓度依然偏高,存在一定超标风险;第二阶段改造完成后,出水COD浓度下降较为明显。

第二阶段改造完成后(2021年4月)臭氧氧化预处理进、出水水质如表3所示。其中,臭氧氧化处理水量为12 428~14 189 m³/d,臭氧投加量为45~63 mg/L。

表3 改造后臭氧氧化进、出水水质

Tab.3 Influent and effluent quality of ozone oxidation after upgrading and reconstruction

项目	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	色度/倍	B/C
臭氧氧化进水	212~247	94~128	0.05~0.08
臭氧氧化出水	176~188	16~28	0.14~0.22

由表3可知,进水经臭氧氧化后,色度去除明显,平均去除率达到80%左右,B/C值也有较大程度改善,有效提升了进水的可生化性。根据进水水质、水量的变化,臭氧变频投加以节约能源,在臭氧投加量为45~63 mg/L时,COD去除量达到36~59 mg/L,臭氧消耗量与COD去除量比值低于生化尾水的比值^[7],初步判断为臭氧射流曝气利用率较高的同时会造成一定“吹脱”效果,使废水中的部分有机物转移至废气中。此外,臭氧氧化预处理后生化池表面解体的污泥泥渣显著减少,镜检显示生化池末

端原生动物比改造前显著增加,污泥活性改善较明显。

5 经济分析

该项目第二阶段改造完成后,药剂投加量及污泥处置量大幅减少。此外,由于预处理到位,生化池负荷较低,排泥量减少20%,芬顿氧化池药剂投加量也同比下降40%以上,同时由于污泥低温干化工艺的使用,节约了大量危废处置费用。第二阶段改造前污水处理厂综合运行成本为12.3元/m³,改造后为9.8元/m³(其中药剂费5.6元/m³、电费1.7元/m³、危废及一般固废污泥处置费1.5元/m³、人工费0.8元/m³、其他费用0.2元/m³),运行成本降低了2.5元/m³。

6 后续提升

2023年3月28日开始,江苏省《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440—2022)正式实施。该标准在管控上更加严格、精准,明确实行分区管控,对于现有城镇污水处理厂排污口位于重点保护区域的,常规污染物排放限值执行B标准,即COD≤40 mg/L, BOD₅≤10 mg/L, NH₃-N≤3(5) mg/L, TN≤10(12) mg/L, TP≤0.3 mg/L。此外,2023年5月,江苏省生态环境厅与住房和城乡建设厅印发了《江苏省工业废水与生活污水分质处理工作推进方案》,该方案要求加快推进工业废水与生活污水分类收集、分质处理,宁镇扬泰通等沿江地区于2025年实现应分尽分,届时园区污水处理厂的进水将全部转成园区工业废水,加之可能提高的出水水质标准,给污水处理厂的稳定达标运行带来一定的挑战。

对比园区污水处理厂现状出水水质和后续可能执行的出水水质标准,发现除总氮不能实现稳定达标外,其余指标都能满足标准要求,考虑到后续进水转为纯工业废水可能带来的冲击,可通过增加臭氧预处理的投加量以及后端芬顿氧化池药剂投加量进行应对,此外,可通过改造现有V型滤池为反硝化生物滤池实现深度脱氮,同时在整个工艺的最末段增设活性炭吸附罐作为保障措施,实现对COD与残留有机氮的去除,进而保障出水COD与总氮的稳定达标排放。

7 结论

南通某化工园区污水处理厂提标改造工程分两个阶段进行整改,通过增设物化预处理、优化生

化处理与新增末端深度处理的方式,最终形成“臭氧氧化池+水解酸化池+A/O池+二沉池+芬顿氧化池+高密度澄清池+V型滤池”组合工艺,实现了出水稳定达标排放。此外,进水采用臭氧射流曝气方式运行良好,色度去除率达到80%左右,进水可生化性提升明显,显著降低了对后续生化系统的抑制。整个改造完成后,运行成本降低2.5元/m³,总运行成本为9.8元/m³。

参考文献:

- [1] 张方方,刘骁智,张波. A²O+MBR+臭氧催化氧化用于化工园区污水厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2020, 38(20): 61-64.
ZHANG Fangfang, LIU Xiaozhi, ZHANG Bo. Application of A²O/MBR/catalytic ozonation in upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant in chemical industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2020, 38 (20): 61-64 (in Chinese).
- [2] 何锐,张猛. 江苏省某化工园区污水处理厂技术改造工程[J]. 中国给水排水, 2016, 32 (22): 82-84, 88.
HE Rui, ZHANG Meng. Design of technical transformation project of wastewater treatment plant in a chemical industrial park in Jiangsu Province [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (22): 82-84, 88 (in Chinese).
- [3] 张泳真,杨明生,冯斐. 某化工园区污水处理厂的提标改造及其运行分析[J]. 水处理技术, 2021, 47 (3): 129-132.
ZHANG Yongzhen, YANG Mingsheng, FENG Fei. Upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant in a chemical industrial park and its operational analysis [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47 (3): 129-132 (in Chinese).
- [4] 高伟楠,程树辉,纪海霞,等. 河南省某工业污水处理厂工艺设计探讨[J]. 工业水处理, 2022, 42 (11): 189-193.
GAO Weinan, CHENG Shuhui, JI Haixia, *et al.* Discussion on process design of an industrial wastewater treatment plant in Henan Province [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42 (11): 189-193 (in Chinese).
- [5] GUO L, LIU W, TANG X, *et al.* Reaction kinetics of non-catalyzed jet aeration oxidation of magnesium sulfite [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 330: 870-879.
- [6] 唐续龙,石珊珊,彭孝容. 城市污泥蒸汽干燥和低温热干化技术比较研究[J]. 给水排水, 2020, 46 (S1): 192-196.
TANG Xulong, SHI Shanshan, PENG Xiaorong. Comparative study between steam drying technology and low temperature thermal drying technology of sewage sludge [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (S1): 192-196 (in Chinese).
- [7] 刘春,周洪政,张静,等. 微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水[J]. 环境科学, 2017, 38 (8): 3362-3368.
LIU Chun, ZHOU Hongzheng, ZHANG Jing, *et al.* Combination of microbubble catalytic ozonation and biological process for advanced treatment of biotreated coal chemical wastewater [J]. Environmental Science, 2017, 38 (8): 3362-3368 (in Chinese).

作者简介:周呈(1988-),男,江苏南通人,硕士,高级工程师,注册环保工程师,注册环评工程师,主要从事工业废水、废气治理的咨询、设计和研究工作。

E-mail:853407833@qq.com

收稿日期:2023-08-28

修回日期:2023-09-27

(编辑:衣春敏)