

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.10.023

曝气沉砂池臭气闭路循环“趋零排放”升级改造

劳红标¹, 周俭², 孙挺军², 杨立峰², 刘银海¹, 宋华龙¹,
陈伟¹, 陈红³, 王晓暖³, 薛罡³

(1. 绍兴水处理发展有限公司, 浙江 绍兴 312074; 2. 绍兴柯桥水务集团有限公司,
浙江 绍兴 312074; 3. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 污水处理厂曝气沉砂池是污水处理厂恶臭气体主要来源之一。基于铁氧化除硫化氢、生物除臭强化工艺,并将处理后气体循环至曝气沉砂池,提出恶臭气体闭路循环“趋零排放”工艺改造设计方案。调试结果表明,铁氧化除硫化氢单元对硫化氢与氨气的去除率分别稳定在92%~95%、40%~50%,生物除臭系统经过调试和挂膜后,对硫化氢与氨气的去除率都稳定在98%左右。在实现恶臭气体闭路循环“趋零排放”的基础上,相比于常规碱吸收工艺,可大幅节省药剂运行成本,并进一步提升污水处理厂区及周边区域空气环境质量。

关键词: 污水处理厂; 恶臭气体; 闭路循环; 趋零排放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0134-07

Upgrading of Aerated Grit Chamber for Near-zero Emission of Malodorous Gas Closed Cycle

LAO Hong-biao¹, ZHOU Jian², SUN Ting-jun², YANG Li-feng², LIU Yin-hai¹,
SONG Hua-long¹, CHEN Wei¹, CHEN Hong³, WANG Xiao-nuan³, XUE Gang³

(1. Shaoxing Water Treatment Development Co. Ltd., Shaoxing 312074, China; 2. Shaoxing
Keqiao Water Group Co. Ltd., Shaoxing 312074, China; 3. College of Environmental Science and
Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The aeration grit chamber is one of the main sources of malodorous gas in wastewater treatment plant. The upgrading scheme for near-zero emission process of malodorous gas was proposed, including the combination of hydrogen sulfide removal by ferrate oxidation, biological deodorization and closed cycle of treated malodorous gas to aerated grit chamber. The commissioning result showed that the removal efficiencies of hydrogen sulfide and ammonia by ferric iron oxidation achieved 92%~95% and 40%~50%, respectively. The removal rates of hydrogen sulfide and ammonia by biological deodorization unit were both about 98% after commissioning and biofilm forming. On the basis of near-zero emission of malodorous gas in closed cycle, compared with conventional alkali absorption, the operation cost of chemicals can be saved greatly, and the air environment quality in wastewater treatment plant and surrounding area are further improved.

Key words: wastewater treatment plant; malodorous gas; closed cycle; near-zero emission

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878135、51878136、52070040)

通信作者: 薛罡 E-mail: xuegang@dhu.edu.cn

城市污水处理厂主要发挥削减水污染物、保护水环境质量的功其能,其主要处理构筑物包括一级处理(格栅、沉砂池、初沉池等)、二级处理(生物处理、二沉池等)及污泥处理处置单元。各处理单元构筑物在削减水污染物的同时,由于厌氧生化反应、好氧曝气、污泥发酵等过程,不可避免会产生氨气(NH_3)、硫化氢(H_2S)、甲硫醇等恶臭污染物,并逸散至空气中,刺激人的感官并对人体健康造成一定危害^[1-3]。

控制污水处理单元构筑物逸散的恶臭污染物的方法主要有物理吸附法、化学吸收法、化学氧化法、生物除臭法等^[4-7]。在工程实践中,首先需对恶臭气体进行集中收集,然后通过各类方法的组合使气体中恶臭组分得以去除,达到恶臭污染物排放标准后排放^[5,8-9]。城镇污水处理厂的恶臭组分包括硫化氢、氨气等,污水处理厂的进水格栅间、曝气沉砂池、初沉池等上游构筑物的氨气和硫化氢含量相对较高,而下游构筑物中相对较少,故恶臭气体收集与处理的重点应置于上游构筑物^[4]。目前城镇污水处理厂恶臭治理均采用处理后达标排放的模式,在恶臭削减方面获得较好效果^[5];但由于恶臭气体处理后依然存在排放问题,难以完全消除恶臭排放对厂区及周边环境的影响。

为进一步削减污水处理单元构筑物恶臭气体的排放量,以绍兴污水处理发展有限公司的曝气沉砂池为研究对象,在原有除臭工艺的基础上,提出恶臭气体封闭循环处理的“趋零排放”工艺方案,并对除臭工艺进行增强改造,以进一步降低恶臭气体及组分排放。该思路对于其他处理单元构筑物及同类污水处理厂亦有较大推广应用价值。

1 工程背景

绍兴水处理发展有限公司的生活污水处理量为 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用曝气沉砂、 A^2O 、中间沉淀、 AO 、二次沉淀、气浮、纤维转盘过滤组合工艺,出水执行《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。

该污水处理厂曝气沉砂池长23 m,单格宽3.5 m,有效水深2.92 m,水平流速0.85 m/s,停留时间4 min,曝气量3 800 m^3/h 。该单元是污水处理厂恶臭的主要来源。经过原有常规生物洗涤、过滤除臭系统处理后,依然存在恶臭气体外排问题。为提升

厂区和周围大气环境质量,消除生活污水处理工艺散发恶臭的问题,基于恶臭气体循环处理的“趋零排放”思路,将现有常规生物洗涤、过滤组合除臭系统改造成“趋零排放”除臭系统。在获得相应改造及运行经验的基础上,未来可进一步将其余涉及恶臭气体排放单元逐步实现“趋零排放”模式改造升级,在不大幅增加工程投资的基础上,改善厂区及周边区域大气环境质量。

2 “趋零排放”改造思路的提出

2.1 原有恶臭气体处理工艺

该污水处理厂现有多套生物除臭装置,其中位于生活污水处理系统的曝气沉砂池除臭系统采用生物除臭工艺,工艺流程如图1所示。

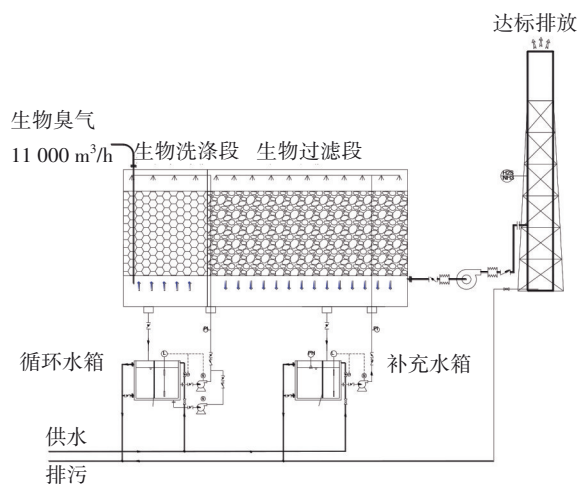


图1 曝气沉砂池原有除臭系统工艺

Fig.1 Original deodorization system of aerated grit chamber

曝气沉砂池产生的恶臭气体经收集后由主管输送至生物洗涤过滤除臭系统上部的进气口,通过雾化喷嘴将水充分雾化后与气流混合,迅速使待处理的气体湿度达到饱和状态,在气体由下而上运动时,气体中的异味分子穿过填料层,与填料表面形成的生物膜充分接触并氧化、分解,从而达到除臭目的。由于恶臭气体经现有除臭工艺处理后仍需外排,难以彻底消除恶臭气体排放对厂区及周边环境的影响,因此,需对曝气沉砂池的除臭系统工艺进行改进。

2.2 改造工艺思路

为实现曝气沉砂池恶臭气体“趋零排放”,将曝气沉砂池排放的恶臭气体经喷淋、生物洗涤、生物

过滤组合工艺处理后,再循环至曝气沉砂池,与曝气沉砂池排放的恶臭气体混合后再进一步经除臭工艺处理。恶臭气体经闭路循环处理后,使系统内 H_2S 、氨气不发生积累并可实现持续循环,大幅降低了外排气体总量,最终实现“趋零排放”。改造工艺方案见图2。

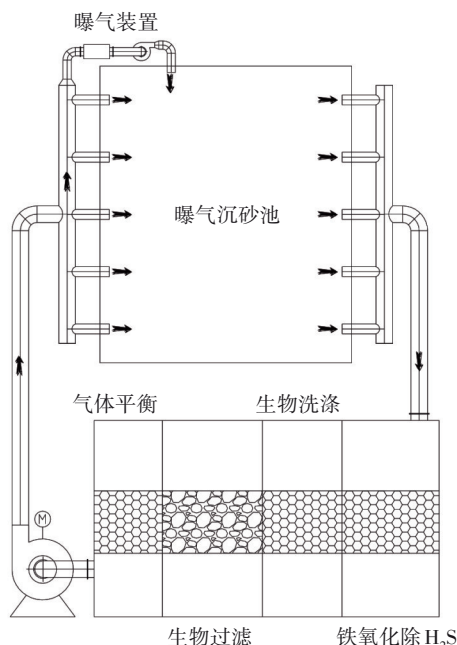


图2 恶臭气体“趋零排放”工艺方案

Fig.2 Near-zero emission system for odor gas

根据现场实际情况,将曝气沉砂池除臭系统升级改造为“趋零排放”系统,主要工程内容包括:循环抽风系统(利旧)、提高池体密闭性能、增设送风回路系统、增设铁氧化 H_2S 喷淋吸收装置、生物除臭主体设备(更换填料)、气体平衡装置(氧气补给和二氧化碳吸收系统)等。

该系统的核心在于:

① 铁氧化 H_2S 喷淋吸收装置与生物洗涤、过滤组合强化除臭。为强化循环恶臭气体的处理及实现“趋零排放”,在原系统中生物洗涤、生物过滤组合工艺之前,增加了铁氧化 H_2S 喷淋装置,对 H_2S 、 NH_3 的去除率较高,在闭环系统中不发生积累。

② 系统内 O_2 平衡。由于曝气沉砂池进水中有机物的存在,随着运行时间增加,闭环系统中会发生有机物氧化而使 O_2 含量降低,不仅影响曝气沉砂池的预曝气作用,而且对生物滤池的除臭效果也会产生影响。因此,依据 O_2 浓度增设了 O_2 补充平衡

装置。

③ CO_2 吸收装置。由于曝气沉砂池进水中有机物的存在,闭环系统内的 O_2 会将有机物氧化为 CO_2 ,从而造成 CO_2 在系统内的积累。为解决“趋零排放”系统中 CO_2 的积累问题,采用 CO_2 吸收填料塔,以 NaOH 为吸收剂将系统中产生的 CO_2 去除。

“趋零排放”系统正常运行应满足如下3个条件:a. 回用气体以系统进、出气流量相等为前提;b. 排气条件满足循环使用要求;c. 排气不影响系统内各部件寿命。系统内部非金属材料均为玻璃钢,系统中仅有鼓风机对气体成分较敏感。鼓风机为304材质,根据API571规范,304材质基本不受 H_2S 腐蚀影响,因此只需保证系统进出气流量吻合即可满足循环使用条件。另外,只需通过处理设施保证进入的 H_2S 和 NH_3 被大部分去除,即可满足系统趋零排放及气体循环回用条件。

3 “趋零排放”工艺方案及设计

3.1 池体密闭性能改进

改造原有曝气沉砂池密封系统,严密封闭盖板和池面的接触缝隙,使其形成封闭空间,确保整个覆盖密封系统的密闭性,使恶臭气体不外逸。同时,对密闭空间里产生的臭气进行统一收集,通过风机抽吸,将臭气吸入输送管道,经管道输送至除臭系统集中处理。改造后的密封系统使用盖板进行加盖,同时达到臭气封闭不泄漏、景观性强的视觉效果。

3.2 增设送风回路系统

3.2.1 设计说明

整套除臭系统处理风量为 $8\,000\text{ m}^3/\text{h}$,其中鼓风机曝气风量为 $3\,000\text{ m}^3/\text{h}$,空间置换为 $5\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。通过生物除臭系统处理的气体经过气体平衡装置、送风回路系统,共分成两路,重新送入曝气沉砂池,其中一路(风量 $5\,000\text{ m}^3/\text{h}$)通过管道直接送回曝气沉砂池,另一路经由过滤装置后以鼓风曝气形式送入曝气沉砂池,曝气沉砂池气体运行路径形成闭合循环系统,达到“趋零排放”目的。

3.2.2 管道设计

除臭风管选用流体阻力小、机械强度高、耐腐蚀、抗老化性能优越的玻璃钢。除臭风管风量及管径分布参照《简明通风设计手册》,支管设计流速宜为 $4\sim 6\text{ m/s}$,次主管设计流速宜为 $6\sim 8\text{ m/s}$,主管设计

流速宜为8~12 m/s。除臭风管的壁厚与风管口径设计要求:当管径<DN200时,壁厚≥3.0 mm;当管径为DN200~DN400时,壁厚≥4.0 mm;当管径为DN400~DN630时,壁厚≥5.0 mm;当管径为DN630~DN1 000时,壁厚≥6.0 mm。

3.3 新增铁氧化除H₂S喷淋吸收装置

铁氧化除H₂S喷淋吸收装置如图3所示。

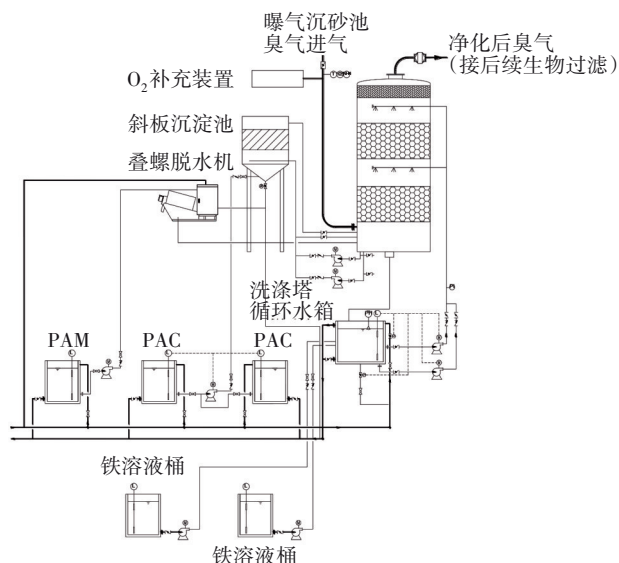


图3 新增铁氧化除H₂S工艺

Fig.3 New process for removing H₂S by iron oxidation

含H₂S气体扩散至液相中,HS⁻被Fe³⁺氧化,生成单质硫,脱硫液中的还原态Fe²⁺在被空气氧化后,循环至吸收段重复利用;整个反应过程金属离子基本不消耗,H₂S最终转化为单质硫从体系中分离出去。反应原理及过程如下:

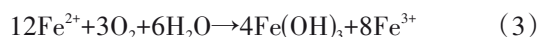
气相至液相:



H₂S氧化过程:



Fe²⁺氧化再生:



铁氧化除H₂S反应液经沉淀、脱水后形成含单质硫的污泥,与污水处理产生的污泥一并外运处置。由于铁氧化除H₂S反应液含单质硫,可考虑将其回流至脱氮单元用于自养反硝化脱氮电子供体。

铁氧化除H₂S装置尺寸为Ø1.8 m×6.0 m,处理风量为8 000 m³/h,填料高度为1.2 m,2层,填料有效停留时间为2.75 s,空塔流速为0.87 m/s,装置主体材质为玻璃钢,喷淋管件材质为UPVC,喷嘴材质

为PVC。

3.4 CO₂吸收装置

污水处理工艺中CO₂的主要来源是曝气电耗及设备能耗所导致的间接碳排放,以及有机物降解产生的直接碳排放^[10-11],以A²O法为主的直接碳排放可达0.502 4 kgCO₂/m³^[12]。由于曝气沉砂池的主要功能是去除污水中的无机砂粒,有机物平均去除率仅占污水处理工艺的10%左右^[13],按有机物去除率估算,CO₂排放量较低。采用Ca(OH)₂或NaOH等碱性物质吸收^[14],反应方程式:2NaOH+CO₂=Na₂CO₃+H₂O(CO₂为少量)。含Na₂CO₃的吸收液可回流至污水处理硝化单元,用于补充硝化消耗的碱度。

对于趋零排放系统中气体的闭路循环,需解决产生的CO₂的总量平衡问题,实现净化前后气体体积总量不变。因此,对原有设备进行内部改造,在保留生物洗涤和生物过滤的基础上,对生物除臭设备的出口端进行隔断,设置一套独立的CO₂吸收装置。CO₂吸收装置的主体材质为玻璃钢,喷淋管件材质为PVC,喷嘴材质为UPVC。CO₂吸收装置尺寸2 000 mm×3 000 mm×5 800 mm,处理风量8 000 m³/h,填料分两层,每层高1.2 m,填料有效停留时间6.48 s,空塔流速0.37 m/s,设有1台不锈钢316循环洗涤泵,流量为20 m³/h,扬程为250 kPa,功率为4.0 kW。

3.5 O₂平衡装置

O₂补给系统采用氧气发生装置,配套氧气监测仪表及自控系统,在线监测“趋零排放”系统中循环气体的O₂浓度,当O₂浓度低于进气浓度时,及时补充并达到正常工作的O₂浓度。氧气发生装置主体材质为304不锈钢,供氧能力3.0 kg/h,出气压力0.03~0.06 MPa,氧气浓度≥90%。

3.6 增设鼓风机曝气装置

为保证整套系统的气体动态平衡,曝气沉砂池独立设置1套曝气装置,主要包括1台鼓风机和1组过滤装置。

经过生物处理的气体送回至曝气沉砂池,其中3 000 m³/h的气量以曝气的形式送入,该部分气体先经由过滤装置过滤,然后通过鼓风机曝气重新送回曝气沉砂池。过滤材料采用过滤效率高、压力损失低、外形尺寸较小并可拆洗和重复利用的优质产品。过滤材料的压力损失小于0.05 kPa,可以降低整个系统的能耗及噪声。

4 “趋零排放”工艺调试及运行

4.1 “趋零排放”系统调试

① 系统调试起初启动离心风机,处理后废气返回曝气沉砂池上方,降低废气浓度;

② 停止原有鼓风机,启动零排放系统内鼓风机,处理后废气以回用曝气形式循环回用到曝气沉砂池;

③ 风机运行正常,铁氧化除 H_2S 设备运行正常,则进入废气零排放阶段。

调试过程中,均采用罗茨风机对曝气沉砂池曝气,而罗茨风机进口则通过管道接至恶臭气体处理设备出口,气体与污水接触后, H_2S 、 NH_3 等污染物进入气相,经过恶臭气体处理设施处理后,继续被罗茨风机吸入,使系统内气体循环使用。整个系统运行过程中,无额外气体进入,可实现恶臭气体的“趋零排放”。

4.2 “趋零排放”运行效果

对2021年5月19日—6月17日调试期间及6月17日至今稳定运行期间的系统进气 H_2S 、 NH_3 浓度进行检测及统计,进气 H_2S 、 NH_3 分别为250~1 000、13~106 mg/L,平均值分别为674、37 mg/L,浓度较高。经分析,虽然生活污水排入管网后发生厌氧反应难以产生较高浓度的 H_2S 及 NH_3 ,但管网中沉积物(污泥)却可在厌氧条件下发酵并产生较高浓度的 H_2S 及 NH_3 ^[15-17]。该污水处理厂曝气沉砂池进水中较高浓度的 H_2S 及 NH_3 恶臭组分可能来源于排水管网中沉积物的厌氧发酵产物,其溯源分析尚需进一步研究。

在调试过程中,铁氧化除 H_2S 工艺出气 H_2S 浓度为13~53 mg/L,对应去除率为92%~95%; NH_3 浓度为10~35 mg/L,对应去除率为40%~50%;在稳定运行期,对 H_2S 的去除率达到99.9%以上,装置出气中有时甚至无法检出;对 NH_3 的去除率在运行稳定期无明显变化。生物除臭单元菌种培养驯化7 d后即投入使用。在运行初始阶段生物除臭单元 H_2S 的出气浓度为0.5~1.0 mg/L,在调试后期及稳定期逐步提升至99%以上,出气浓度低于0.5 mg/L;调试初始对 NH_3 的去除率一直稳定在90%以上,调试后期及稳定期提升至98%以上,出气浓度为0.3~1.1 mg/L。

4.3 改造投资及运行成本

恶臭气体“趋零排放”系统改造投资见表1。

表1 恶臭气体“趋零排放”系统改造投资

Tab.1 Investment of near-zero emission system for odor gas

| 项目 | 设备 | 数量 | 单价/元 | 总价/元 |
|----------------------|--------------------------------|----|---------|---------|
| H ₂ S脱除系统 | 玻璃钢圆形塔 | 1座 | 145 760 | 145 760 |
| | 循环泵 | 2台 | 6 200 | 12 400 |
| | 过滤泵 | 2台 | 3 600 | 7 200 |
| | 喷淋系统 | 1套 | 6 000 | 6 000 |
| | 叠螺脱水机 | 1台 | 23 600 | 23 600 |
| | 斜板沉淀塔 | 1座 | 22 200 | 22 200 |
| | 氧气发生器、磁力加药泵、加药箱等 | | | 82 100 |
| 生物除臭系统 | 玻璃钢隔板 | 1套 | 20 000 | 20 000 |
| | 喷淋系统 | 1套 | 2 800 | 2 800 |
| | 气体平衡滤料 | 1套 | 26 000 | 26 000 |
| | 气体平衡系统 | 1套 | 60 000 | 60 000 |
| 鼓风曝气装置 | 鼓风机 | 1台 | 230 000 | 230 000 |
| | 过滤装置 | 1套 | 26 540 | 26 540 |
| 辅助系统 | 硫化氢检测仪、氨气检测仪、在线氧气检测仪、在线二氧化碳检测仪 | | | 213 720 |
| 合计 | | | | 878 320 |

调试运行期间电费计算见表2。

表2 调试运行期间电费

Tab.2 Cost of electricity during commissioning

| 项目 | 设备 | 装机功率/kW | 运行功率/kW | 运行时间/(h·d ⁻¹) | 耗电量/(kW·h·d ⁻¹) | 电费/(元·d ⁻¹) |
|----------------------|------------------|---------|---------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| H ₂ S脱除系统 | 循环泵 | 18.4 | 7.36 | 24 | 176.64 | 105.98 |
| | 过滤泵 | 3 | 1.2 | 24 | 28.8 | 17.28 |
| 生物除臭系统 | 生物循环泵 | 8 | 3.2 | 24 | 76.8 | 46.08 |
| | 离心风机 | 15 | 4 | 24 | 96 | 57.6 |
| 辅助系统 | 氧气发生器、叠螺脱水机、加药泵等 | 9.8 | 1.84 | 24 | 44.16 | 26.5 |
| 合计 | | 54.2 | 17.6 | | 421.4 | 253.44 |

调试及运行期间药剂费用计算见表3。

生物除臭及 CO_2 吸收系统喷淋水为二沉池出水,不需自来水。填料更换周期为10年,更换一次需43 000元,折算为11.9元/d。

总运行费用=电费+药剂费+填料更换及喷淋水

费用=253.44+328.2+11.9=593.54元/d。

表3 调试运行期间药剂费用

Tab.3 Cost of chemicals during commissioning

| 项目 | 用量/(L·d ⁻¹) | 单价/(元·L ⁻¹) | 合计/(元·d ⁻¹) |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 铁溶液 | 8.5 | 11.5 | 97.8 |
| 缓冲剂溶液 | 24 | 9.6 | 230.4 |
| 合计 | | | 328.2 |
| 注: 二氧化碳吸收装置喷淋水采用二沉池出水,由于二沉池出水偏碱性且系统CO ₂ 产生量较低,在实际运行中尚未发现二氧化碳积累。因此仅考虑在系统内CO ₂ 浓度偏高时在喷淋水中投加NaOH,NaOH与其他药剂费相比占比较低,可忽略不计。 | | | |

5 结论

① 对生活污水处理工艺曝气沉砂池恶臭气体采用铁氧化除H₂S+生物除臭组合工艺,并采用处理后气体闭路循环的方式,可实现恶臭气体“趋零排放”,该方案有利于进一步提升厂区及周边空气质量。

② 铁氧化除H₂S系统对H₂S与NH₃的去除率分别稳定在92%~95%、40%~50%,生物除臭系统经过调试和挂膜后,对H₂S与NH₃去除效率都稳定在98%以上,但是铁氧化除H₂S系统对NH₃去除能力有限,NH₃主要集中在生物系统去除。

③ 经调试期间运行成本分析,药剂费、电费及填料的综合成本为593.54元/d。

参考文献:

- [1] 韩彩云,张晶宇,丁永伟,等. 曝气沉砂池H₂S排放浓度的时间变化与影响因子[J]. 中国给水排水,2020,36(7): 74-77,83.
HAN Caiyun, ZHANG Jingyu, DING Yongwei, *et al.* Temporal variation characteristics and influencing factors of H₂S emission concentration in aerated grit chamber[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7): 74-77,83(in Chinese).
- [2] 杨鹏,刘雪峰,门玉葵,等. 多因素对地下污水厂H₂S与NH₃浓度的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2018,40(5): 124-132.
YANG Peng, LIU Xuefeng, MEN Yukui, *et al.* Effect of multi factor on H₂S and NH₃ concentration in underground wastewater treatment plants[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018,40(5): 124-132(in Chinese).

- [3] 林坚,李琳,刘俊新,等. 城市污水厂主要处理单元恶臭及挥发性有机物的逸散[J]. 环境工程学报,2016,16(5): 2329-2334.
LIN Jian, LI Lin, LIU Junxin, *et al.* Odors and volatile organic compounds emission from main processing units of wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 16(5): 2329-2334 (in Chinese).
- [4] 杜亚峰,李军,赵珊,等. 污水处理厂恶臭气体分布规律及挥发性气体定量评价[J]. 净水技术,2018,37(7): 69-74.
DU Yafeng, LI Jun, ZHAO Shan, *et al.* Distribution pattern of malodorous odor and quantitative of volatile gas in a sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(7): 69-74 (in Chinese).
- [5] 杨庆,李洋,崔斌,等. 城市污水处理过程中恶臭气体释放的研究进展[J]. 环境科学学报,2019,39(7): 2079-2087.
YANG Qing, LI Yang, CUI Bin, *et al.* Research advances of odor released from municipal wastewater treatment process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2079-2087 (in Chinese).
- [6] 吴见平,靳紫恒,长英夫,等. 污水处理厂生物除臭技术及其应用进展[J]. 化工进展,2021,40(5): 2774-2783.
WU Jianping, JIN Ziheng, CHANG Yingfu, *et al.* Biological deodorization technologies in wastewater treatment plant and their application [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(5): 2774-2783 (in Chinese).
- [7] 孙事昊,彭永臻,贾体沛,等. 填料对生物滴滤塔去除市政污水处理厂恶臭气体运行效果的影响[J]. 北京工业大学学报,2019,45(5): 493-501.
SUN Shihao, PENG Yongzhen, JIA Tipei, *et al.* Effect of packing materials on the performance of biotrickling filters treating odor from a municipal wastewater treatment plant [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(5): 493-501 (in Chinese).
- [8] 韩彩云,张晶宇,欧阳云,等. 利用污泥吸附硫化物控制H₂S排放的试验研究[J]. 给水排水,2020,46(增刊): 186-191.
HAN Caiyun, ZHANG Jingyu, OUYANG Yun, *et al.* Experimental study on controlling H₂S emissions by sludge adsorption of sulfide [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S1): 186-191 (in Chinese).
- [9] 王锦华,杨军,徐海波,等. 紫外光解处理石化污水臭

- 气中 VOCs 的应用研究[J]. 环境工程, 2020, 37(7): 148-152.
- WANG Jinhua, YANG Jun, XU Haibo, *et al.* Application research on treatment of odor and VOCs in petrochemical wastewater by ultraviolet photolysis [J]. Environmental Engineering, 2020, 37(7): 148-152 (in Chinese).
- [10] 王向阳. 污水处理碳足迹核算及环境综合影响评价研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
- WANG Xiangyang. Study on Calculating Carbon Footprint and Assessing the Total Environmental Impact of Wastewater Treatment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019 (in Chinese).
- [11] 柴春燕. 城镇污水处理厂温室气体排放规律及热岛效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- CHAI Chunyan. Study on the Characteristics of Greenhouse Gas Emissions and Heat Island Effect of Municipal Wastewater Treatment Plants [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).
- [12] 马欣. 中国城镇污水处理厂温室气体排放研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- MA Xin. Greenhouse Gas Emission Analysis from Municipal Sewage Treatment Plants of China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011 (in Chinese).
- [13] 柯浪文, 夏耿东, 冯珊, 等. 曝气沉砂池的预处理对 COD 去除效果的影响[J]. 净水技术, 2013, 32(增刊): 17-22.
- KE Langwen, XIA Gengdong, FENG Shan, *et al.* Effect of pre-treatment in aerated crit chamber on COD removal efficiency [J]. Water Purification Technology, 2013, 32(S1): 17-22 (in Chinese).
- [14] 何卉. 二氧化碳的化学吸收系统的工艺流程改进和集成优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- HE Hui. Study on the Modification and Integration of CO₂ Chemical Adsorption Process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [15] 赵茹涵, 杨庆, 武文君, 等. 城市污水处理厂恶臭气体产生与释放的影响因素[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 123-129.
- ZHAO Ruhan, YANG Qing, WU Wenjun, *et al.* Influencing factors on generation and release of malodorous gases in urban WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(11): 123-129 (in Chinese).
- [16] 申瀚彰. 城市污水处理厂污泥处理过程中恶臭气体排放特征和净化研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- SHEN Hanzhang. Emission Characteristics and Purification Study of Malodorous Gas in Sludge Treatment in Municipal Wastewater Treatment Plant [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020 (in Chinese).
- [17] 陈剑波. 污泥热水解处理产生的恶臭污染物治理方法研究[J]. 广东化工, 2020, 47(10): 87-88.
- CHEN Jianbo. Study on the treatment method of odor pollutants produced by sludge thermal hydrolysis [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(10): 87-88 (in Chinese).
-
- 作者简介: 劳红标(1972-), 男, 浙江绍兴人, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为污水处理运行及技术管理。
- E-mail: 541004375@qq.com
- 收稿日期: 2021-08-05
- 修回日期: 2021-12-22

(编辑: 衣春敏)

科学防御水旱灾害, 有效促进人水和谐