

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.13.015

生物除臭串联分子筛吸附处理污水泵站臭气

廖 静¹, 韩文轩², 黄熠丽¹, 李碧科³, 孙军波³

(1. 杭州市水务集团有限公司, 浙江 杭州 310009; 2. 杭州市排水有限公司, 浙江 杭州 310009; 3. 杭州市环境保护科学研究设计有限公司, 浙江 杭州 310011)

摘 要: 针对城镇化进程中污水泵站面临的臭气排放“达标扰民”问题,在杭州市某污水泵站构建并运行了一套“生物除臭+分子筛吸附”中试系统,以实现深度除臭。结果表明,在夏季高浓度及大幅波动的臭气负荷下,组合工艺对臭气的平均去除率高达99.46%,出口浓度可基本控制在200以下,表现出良好的稳定性。生物除臭与分子筛除臭在去除恶臭物质上协同互补,生物除臭可高效去除氨与硫化氢,而分子筛除臭对甲硫醇、二甲二硫、硫化氢的去除率分别可达95.06%、85.82%和97.33%。组合工艺可减少能耗,分子筛脱附再生能耗占比低,具有良好的技术经济可行性。

关键词: 污水泵站; 臭气处理; 生物除臭; 分子筛除臭

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)13-0105-05

Biological Deodorization Combined with Molecular Sieve Adsorption for Treatment of Odors in Sewage Pumping Stations

Liao Jing¹, Han Wenxuan², Huang Yili¹, Li Bike³, Sun Junbo³

(1. Hangzhou Water Group Co. Ltd., Hangzhou 310009, China; 2. Hangzhou Drainage Co. Ltd., Hangzhou 310009, China; 3. Hangzhou Environmental Protection Scientific Research and Design Co. Ltd., Hangzhou 310011, China)

Abstract: To address the issue of odors from sewage pumping stations meeting standards but disturbing residents during urbanization, this study constructed and operated a pilot-scale “biological deodorization + molecular sieve adsorption” system at a sewage pumping station in Hangzhou to achieve deep deodorization. The results indicated that under high-concentration and significantly fluctuating odor loads during summer, the combined process achieved an average odor concentration removal rate of 99.46%, with outlet concentrations consistently maintained below 200, demonstrating excellent operational stability. Biological deodorization and molecular sieve deodorization synergistically complemented each other in removing odorous substances. Biological deodorization efficiently removed ammonia and hydrogen sulfide, while molecular sieve deodorization achieved removal rates of 95.06%, 85.82%, and 97.33% for methyl mercaptan, dimethyl disulfide, and hydrogen sulfide, respectively. Furthermore, the combined process demonstrated energy savings, with low energy consumption for molecular sieve desorption and regeneration, indicating strong technical and economic feasibility.

Keywords: sewage pumping station; odor treatment; biological deodorization; molecular sieve deodorization

通信作者: 黄熠丽 E-mail: 1318738041@qq.com

污水在长时间的厌氧状态下会产生大量的恶臭物质,并在污水泵站的格栅、泵池等区域释放。臭气主要由硫化氢、氨和多种挥发性有机化合物(VOCs)等恶臭物质组成,这些恶臭物质不仅会降低环境空气质量,影响感官,还可能危害身体健康,尤其是VOCs类恶臭物质,在低浓度下就能够对大气环境和人类健康产生影响^[1]。

近年来,杭州城镇化进程快速推进,原本在污水泵站和居民之间的卫生防护距离被不断压缩,加之居民对环境空气质量的要求越来越高,污水泵站的邻避效应愈加明显。目前对于15 m及以上的排气筒,臭气浓度排放限值执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)中不应高于2 000的标准,2018年发布的《恶臭污染物排放标准(征求意见稿)》,对15 m及以上排气筒的臭气浓度排放限值收紧至1 000。但在实际运行管理中,部分污水泵站的臭气排放浓度在满足标准的情况下,仍无法满足居民要求,臭气投诉频繁出现。为解决“达标扰民”的现实矛盾,本研究基于紧密型邻避场景的特殊性,结合实际运行经验,拟将臭气浓度排放目标控制为200,以降低臭气对居民的影响,减少臭气投诉。

目前,杭州市主城区大部分污水泵站为无人泵站,无技术人员驻场负责除臭设备的运行维护,且存在“达标扰民”这一问题的污水泵站一般位于建筑密集的老城区,在进行除臭改造时用地面积受限。基于上述两个特点,污水泵站除臭工艺应具备占地节省、自动化程度高、管理维护量小的特点。在目前应用较为广泛的臭气处理工艺中,化学洗涤的处理效率高且占地节省,但所使用的酸液、碱液等属于危化品,管理和运行成本较高;等离子除臭能够快速将臭气氧化去除^[2],且对VOCs类恶臭物质的去除效果较好^[3],但其反应过程产生的臭氧量难以控制,会导致二次污染;生物除臭因其成本低廉、无二次污染而被广泛应用于污水厂臭气处理^[4],但因用地受限,在污水泵站设置的生物除臭箱空床停留时间相对较短,对臭气的净化效果有限,因此,需要与其他工艺衔接成组合工艺,以实现稳定处理至臭气浓度在200以下的目标。活性炭吸附工艺衔接生物除臭,实现臭气浓度高标准排放具备可行性。吸附饱和的活性炭有两种处理方式,一是根据《国家危险废物名录》(2025年版)按照危险废物处置;二是送至具备相关资质的单位再生,但频繁的吸附

饱和会加重运行成本负担。分子筛同样是通过吸附去除恶臭污染,与活性炭不同的是,分子筛材料更加耐热,能够实现原位脱附再生^[5]。综上所述,将生物除臭与分子筛串联用于污水泵站除臭,实现臭气浓度小于200的目标具有一定的可行性。

本文以在某污水泵站搭建的“生物+分子筛除臭”中试装置为研究对象,监测了分子筛对主要特征恶臭污染物的去除效果和组合工艺对臭气浓度的控制效果,评价组合工艺实现臭气高标准排放的技术可行性。

1 试验装置及方法

1.1 中试工艺流程

中试地点位于杭州市某污水泵站内,该污水泵站的设计提升量为28 300 m³/d。中试工艺流程见图1,设计风量为2 000 m³/h,主要收集污水泵站的泵池和进、出水井的臭气。

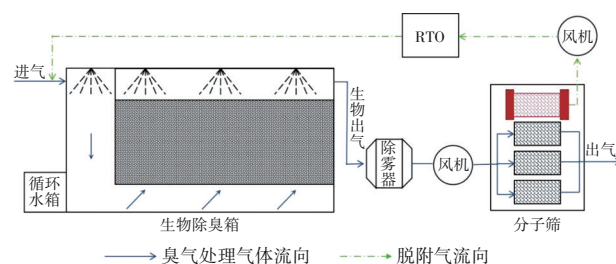


图1 生物串联分子筛除臭组合工艺示意

Fig.1 Scheme of combined biological tandem molecular sieve deodorization process

各区域的臭气汇总后进入生物除臭箱,空床停留时间为20 s,处理后进入除雾器以去除其中的水汽,从而降低对分子筛吸附饱和的影响,最后经分子筛吸附后排放。分子筛空床停留时间约为1 s,共包含6个独立单元。当分子筛吸附饱和后启动脱附模块,分子筛单元被逐个加热脱附。分子筛脱附温度一般在200~350 ℃,脱附温度越高,再生后的吸附效能越好,考虑到污水泵站臭气成分复杂,为使分子筛脱附完全,保证较好的臭气去除效果与长期使用的吸附效率,将脱附温度设为350 ℃。脱附气量为80 m³/h,经风机送至蓄热式氧化装置(RTO),RTO内部温度为800 ℃,脱附气在高温下裂解为CO₂、H₂O等无害的小分子,高温再生尾气与蓄热陶瓷进行热交换至80 ℃后,从RTO中排出回到处理工艺的前端,该回流点位于进气总管。按正常进气温度为10~35 ℃计算,再生尾气可使总进气温度提升1.7~

2.7℃,对生物无热冲击风险。脱附过程不影响臭气吸附,脱附后的分子筛原位再生,恢复吸附能力。中试设置了进口、生物出口和出口三个采样点。

中试分为三个阶段,第一阶段采用分子筛除臭,该阶段生物箱中未放置填料,也不进行微生物接种,臭气穿过空生物箱后直接进入除雾器、分子筛,主要研究分子筛单工艺控制臭气浓度的能力以及对主要臭气成分的去除效果;第二阶段进行生物除臭调试,在生物除臭箱中安装填料并接种污水厂活性污泥,目的是培养驯化微生物,为下一阶段做好准备;第三阶段进行生物串联分子筛除臭,研究组合工艺对臭气浓度的控制效果并估算运行能耗。

1.2 臭气组分和臭气浓度的采样和测定方法

分子筛单工艺除臭阶段在预设的进口和出口采集臭气样品并检测硫化氢、氨、甲硫醇、二甲二硫和臭气浓度,生物除臭调试阶段和生物串联分子筛除臭阶段在预设的进口、生物出口和出口采集臭气样品并检测臭气浓度。其中,硫化氢采用《固定污染源废气 硫化氢的测定 亚甲基蓝分光光度法》(HJ 1388—2024)测定,氨采用《环境空气 氨、甲胺、二甲胺和三甲胺的测定 离子色谱法》(HJ 1076—2019)测定,甲硫醇、二甲二硫采用《固定污染源废气 甲硫醇等8种含硫有机化合物的测定 气袋采样-预浓缩/气相色谱-质谱法》(HJ 1078—2019)测定,臭气浓度采用《环境空气和废气 臭气的测定 三点比较式臭袋法》(HJ 1262—2022)测定。

2 结果与讨论

2.1 分子筛及生物组合工艺对臭气浓度的控制

中试各阶段对臭气的去除效果见图2。

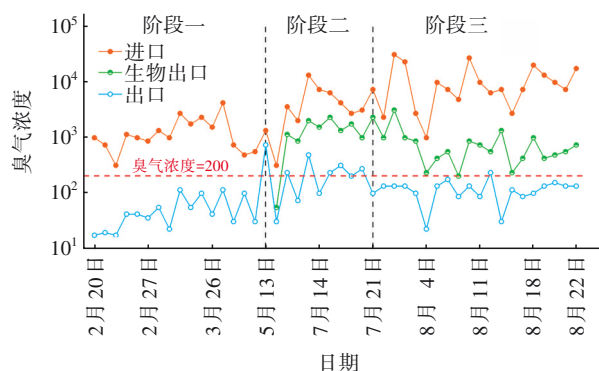


图2 各阶段对臭气的去除效果

Fig.2 Removal effect of odor at each stage

阶段一:2月20日—5月13日为分子筛单工艺运行阶段,进口臭气浓度在309~4 168之间波动,平

均为 $1\,338\pm 993$,这一时期气温和水温相对较低,尽管泵站运行过程中存在水量和液位差的变化,导致臭气浓度波动幅度较大,但总体进口臭气浓度较低。除5月13日外,出口臭气浓度均在200以下,臭气浓度平均为51,平均去除率为96.17%。5月13日在进气浓度为1 318的情况下,分子筛出口臭气浓度为724,此时可认为分子筛经过83 d的运行后吸附饱和。5月19日进行脱附再生并进行了一次高浓度臭气下的性能测试,在进口臭气浓度分别为9 772和4 786的情况下,出口臭气浓度分别为309和209。尽管出口臭气浓度超过200,但在比整个第一阶段的进口臭气浓度都高的情况下,平均臭气去除率达到了96.30%,遂认为脱附过程基本完全恢复了分子筛的吸附能力。同时还发现,随着气温和水温升高,进口臭气浓度也有所升高,仅分子筛工艺已经难以将臭气浓度稳定处理至200以下。

阶段二:6月4日接种了某市政污水厂生物池活性污泥后,进入生物除臭调试阶段。该阶段进口臭气浓度在309~13 182之间,平均为 $4\,726\pm 3\,805$,明显高于分子筛单工艺阶段的进口臭气浓度。调试期间,经生物除臭后的出口臭气浓度平均为 $1\,317\pm 670$,对臭气浓度的平均去除率为72.12%;再经分子筛吸附后,出口臭气浓度平均为 212 ± 137 ,分子筛对臭气浓度的去除率为83.87%;整体来看,生物串联分子筛组合工艺对臭气浓度的平均去除率为95.50%。尽管该阶段分子筛进口(即生物除臭出口)与分子筛单工艺除臭阶段的进口臭气浓度相当,但分子筛对臭气浓度的去除率却低于分子筛单工艺除臭阶段,这是因为生物除臭内部的喷淋加重了气体中的湿度,而除雾器的效率有限,大量水汽进入分子筛占用了吸附位点,降低了分子筛对恶臭物质的吸附效率。生物除臭调试阶段共运行46 d,7月20日再次对分子筛进行脱附再生。

阶段三:7月21日—8月22日为生物串联分子筛除臭阶段。该阶段进口臭气浓度在977~30 902之间,平均为 $10\,826\pm 8\,480$,这是全年气温和水温最高的时段,且水量较大,进口臭气浓度也受到泵站本身的运行影响产生极大的波动,组合工艺的稳定运行面临很大考验。生物出口臭气浓度平均为 840 ± 709 ,生物除臭对臭气的平均去除率为91.64%,调试完成的生物除臭效率较上一阶段更高,也更稳定;再经分子筛吸附后,出口臭气浓度基本在200以

下,平均为 116 ± 45 ,分子筛对臭气的平均去除率为93.59%;整体来看,生物串联分子筛组合工艺对臭气的平均去除率为99.46%。

2.2 分子筛对主要恶臭物质的去除效果

在分子筛单工艺除臭阶段,分子筛对甲硫醇、二甲二硫、氨和硫化氢的去除效果见图3。

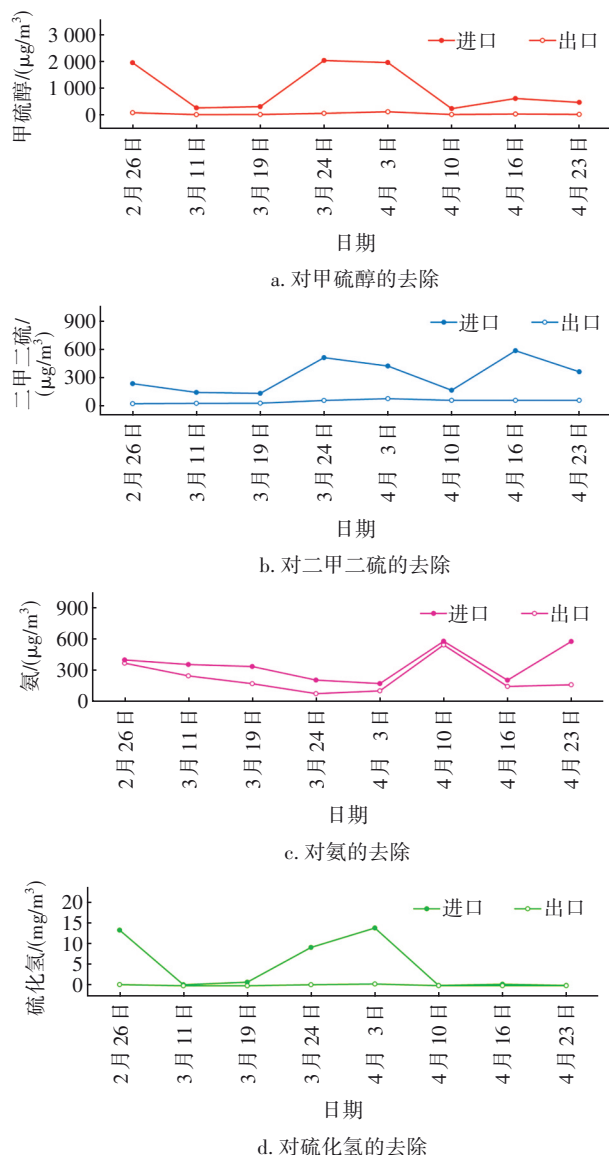


图3 分子筛对主要恶臭物质的去除效果

Fig.3 Removal of key odorous compounds by molecular sieve

中试期间,污水泵站进口臭气浓度波动性较大的特点也同样反映在主要恶臭物质的浓度变化上。分子筛对甲硫醇、二甲二硫和硫化氢的去除规律类似,能够应对三种物质的大幅波动,出口浓度接近于0。甲硫醇、二甲二硫和硫化氢的进口平均浓度

分别为 $(986.5\pm 841.8) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $(318.7\pm 177.3) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(4.8\pm 6.3) \text{mg}/\text{m}^3$,出口平均浓度分别为 $(18.7\pm 39.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $(45.2\pm 19.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(0.13\pm 0.17) \text{mg}/\text{m}^3$,平均去除率分别为95.06%、85.82%和97.33%。而分子筛对于氨的去除效果一般,进口平均浓度为 $(354.8\pm 160.8) \mu\text{g}/\text{m}^3$,出口平均浓度为 $(227.3\pm 157.8) \mu\text{g}/\text{m}^3$,平均去除率仅有35.93%。这与选用的分子筛材料的性质相关,由于氨分子较小,而用于去除VOCs的分子筛孔隙较大,因此对氨的去除率较低。但氨和硫化氢的溶解性和生化性好,极易被生物除臭去除;分子筛则展现出对硫化氢和典型VOCs的高去除率,能够配合生物除臭实现高标准排放。

2.3 运行费用估算

2.3.1 运行电耗

中试期间分子筛单工艺除臭阶段经历了一次完整的吸附-脱附过程,将此阶段运行的83 d作为一个运行周期进行估算,一年按365 d计,年脱附次数取5次。生物串联分子筛除臭工艺各设备的年电耗见表1。生物除臭、分子筛吸附、分子筛脱附过程的年电耗分别为1 606、35 040、954 kW·h,年运行总电耗为37 600 kW·h,处理单位臭气的电耗仅为0.002 kW·h/ m^3 ,其中吸附过程的风机电耗占比93.2%,而生物除臭电耗仅占4.3%,脱附过程电耗仅占2.5%。按照电费为0.8元/(kW·h)估算,年运行成本约为3.01万元。

表1 生物串联分子筛除臭工艺运行能耗计算

Tab.1 Operational power consumption assessment of combined biological tandem molecular sieve deodorization process

阶段	设备	功率/kW	运行时间/h	能耗/(kW·h)	运行模式
生物除臭	循环水泵	2.2	730	1 606	间歇运行(每小时运行喷淋5 min)
分子筛吸附	吸附风机	4	8 760	35 040	全年持续运行
分子筛脱附	脱附风机	2.2	40	88	单次持续运行8 h
	脱附预热	16	5	80	单次持续运行1 h
	稳定脱附	9.6	35	336	单次持续运行7 h
	RTO 预热	20	5	100	单次持续运行1 h
	稳定氧化	10	35	350	单次持续运行7 h

2.3.2 分子筛更换成本

分子筛在经过多次“吸附-脱附”循环后,会出现吸附容量衰减和材料劣化的问题,需要更换分子

筛材料。在处理风量为 $2\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 的情况下,分子筛材料成本约为10万元。根据实际情况的不同,按照使用时间为10~20年计算,年分摊材料成本为5 000~10 000元。

综上所述,利用组合工艺处理单位风量臭气的年综合成本约为 $17.5\sim 20.0\text{ 元}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 。该组合工艺可减少能耗,主要能耗为除臭系统的风机电耗,而用于分子筛脱附的能耗占比很低,相比活性炭处置或异位再生,分子筛原位脱附再生更具经济性。

3 结论与展望

3.1 结论

① 春季进口臭气浓度在309~4 168之间波动时,仅分子筛工艺对臭气浓度的平均去除率为96.17%;污水泵站臭气波动较大,夏季臭气浓度升高,进口臭气浓度在977~30 942波动时,生物串联分子筛除臭能够将臭气浓度稳定降低至200以下,组合工艺对臭气的平均去除率达到99.46%。

② 生物除臭对氨和硫化氢的去除效率较高,而对VOCs去除效果一般;分子筛工艺则与生物除臭协同互补,对甲硫醇、二甲二硫、硫化氢的去除效果良好,去除率分别为95.06%、85.82%和97.33%,经组合工艺处理后能够实现臭气高标准排放。

③ 生物串联分子筛除臭组合工艺的生物除臭停留时间仅为20 s,节省占地;处理单位臭气的电耗仅为 $0.002\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,且脱附再生电耗仅占2.5%;综合运行与更换成本,臭气的单位处理成本约为 $17.5\sim 20.0\text{ 元}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$,具有经济性和环保性。

3.2 展望

① 本研究根据脱附前后分子筛对臭气及主要恶臭物质的去除效率间接判断分子筛的脱附效果,未来将继续探索分子筛在臭气处理过程中的结构与材料性能变化,研究最佳工艺运行参数,为实际运行与节能降耗提供指导。

② 该中试可为泵站除臭改造工程提供数据支持,但其在多次循环下的寿命评估仍是工程应用中的不确定点。后续拟将生物串联分子筛除臭组合工艺应用于泵站除臭改造,并开展长期循环性能评估,量化“吸附-脱附”循环中的容量保持率、穿透时间变化、去除效率衰减趋势等,从而科学界定该组合工艺在满足排放要求的前提下可稳定运行的

再生次数范围,为确定更换周期提供直接依据。

参考文献:

- [1] 杨培清. 城镇污水厂臭气中甲硫醇处理研究[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(7): 27-30.
Yang Peiqing. Study on the treatment of methyl mercaptan in the odor of urban WWTP [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2023, 43(7): 27-30 (in Chinese).
- [2] 邹克华, 严义刚, 刘咏, 等. 低温等离子体治理恶臭气体研究进展[J]. 化工环保, 2008(2): 127-131.
Zou Kehua, Yan Yigang, Liu Yong, et al. Research progresses of non-thermal plasma for malodorous gas control [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2008(2): 127-131 (in Chinese).
- [3] 翁林钢, 张帅, 叶青, 等. 低温等离子体技术用于餐厨垃圾恶臭气体治理的中试研究[J]. 环境科技, 2021, 34(3): 34-37.
Weng Lingang, Zhang Shuai, Ye Qing, et al. Pilot study on the treatment of odor in kitchen waste by non-thermal plasma technology [J]. Environmental Science and Technology, 2021, 34(3): 34-37 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 陈万堂. 分子筛吸附技术在垃圾转运站除臭中的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(7): 161-163.
Chen Wantang. Research on the application of molecular sieve adsorption technology in deodorization of garbage transfer station [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2024, 5(7): 161-163 (in Chinese).

作者简介:廖静(1981—),女,四川自贡人,硕士,高级工程师,主要从事城镇给排水技术研究。

E-mail:liaoqingnew@163.com

收稿日期:2025-11-12

修回日期:2026-01-21

(编辑:李德强)