

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.019

新地标背景下北京某污泥堆肥厂除臭系统升级改造

曹东明, 刘鹏飞, 杜强强, 李振川, 戴明华
(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要: 北京某污泥堆肥厂污泥处理车间产生和收集的臭气经生物除臭处理后无法达到《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB 11/2007—2022), 亟需进行改造。针对污泥处理产生臭气中氨气浓度高以及含有一定粉尘的特点, 采用“水洗+酸洗+生物除臭+吸附”的组合除臭处理工艺, 实现了尾气达标排放, 提升了车间及厂区周边的空气环境质量。

关键词: 污泥堆肥; 生物除臭; 组合工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0113-06

Deodorization System Upgrading of a Sludge Composting Plant in Beijing under New Local Standard

CAO Dong-ming, LIU Peng-fei, DU Qiang-qiang, LI Zhen-chuan, DAI Ming-hua
(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: After biological deodorization, the odor generated and collected from the sludge treatment workshop of a sludge composting plant in Beijing cannot meet the new local *Emission Standard of Air Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (DB 11/2007-2022), and urgently needs to be upgraded. In view of the high concentration of ammonia and the certain dust generated by sludge treatment, the combined deodorization process of washing, pickling, biological deodorization, and adsorption is adopted to achieve the discharge standard and improve the environmental quality of the workshop and the surrounding area of the plant.

Key words: sludge composting; biological deodorization; combined process

随着北京市大气污染治理力度的不断加强,城镇污水与污泥处理厂的大气污染物排放问题受到广泛关注,如何在愈发严格的排放标准之下科学合理、经济有效地治理污水/污泥处理厂产生的臭气,是整个行业面临的挑战。北京某市政污泥处理厂设计规模200 t/d,建成投产于2018年,采用堆肥发酵工艺,主工艺及相关附属系统均位于1座组合车间内。污泥堆肥发酵是在人工控制下,在一定的水分、C/N比和通风条件下通过微生物的发酵作用,将污泥中的有机物转变为稳定有机质的过程。发酵过程中会产

生大量高浓度的臭气,不仅会危害操作人员的健康、腐蚀车间内的设备,还会对周边的空气环境构成潜在的威胁。

1 除臭系统改造的必要性

该污泥处理厂除臭系统自生产投运以来,主要存在以下问题,亟需升级改造。

① 现况除臭设计排放标准已过期

该污泥处理厂于2015年完成工程设计,除臭系统根据环评报告批复执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)及北京市《大气污染物综合排放标

准》(DB 11/501—2007),但建成投产后北京市实际执行的标准已升级为《大气污染物综合排放标准》(DB 11/501—2017),且到2022年又颁布了新标准《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB 11/2007—2022)(2021年处于送审和报批程序中),对氨、硫化氢、臭气浓度等指标均提出了更高要求。

② 污泥车间除臭、通风条件较为恶劣

原系统臭气的收集与处理效果均不佳,车间内臭气未得到妥善处置,工作环境恶劣,工人因作业时间长而憋闷造成身体不适的情况时有发生。同时又因城市化影响,原厂区周边由湿地公园调整为新增居民区,当气压低时仓内空气上升快,导致室外气味明显,臭气外逸影响周边居民生活环境。

③ 影响堆肥发酵运行成本

由于臭气收集效果较差,同步导致堆肥过程中产生的水汽无法有效排出,堆肥调理剂的用量比设计值增加100%以上,大幅增加了污泥处理运行成本。此外,臭气中腐蚀性气体的累积严重影响了正常的生产,增加了现况设备设施维护的成本。

2 现有除臭工艺存在的问题

该污泥处理厂配套设计规模为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{h}$ 的生物滤池除臭系统,设置于污泥处理车间屋顶,收集处理后臭气排放执行国家和北京市相关标准。

2020年11月,该项目开始前期调研与解决方案论证工作,执行初期遇到以下难题:

① 现况除臭系统运行不佳,原收集和处理方案不合理、原因不清晰;

② 按照相关部门要求,该项目拟执行新版除臭地方标准,成为当地首个采用新标准进行设计和改建的项目,无行业案例参考;

③ 现况污泥处理厂用地紧张,无法新增用地,改造条件有限。

针对上述难题,制定了明确的工作思路:一方面进行系统与臭气检测/试验,另一方面进行多次现场调研和踏勘,以及考察、技术交流和方案论证。

2.1 现场检测

2020年11月—2021年2月对已有设施进行了数次现场检测。

① 臭气成分

结合文献统计,污泥好氧发酵过程中产生的致臭物质主要由挥发性无机物和部分挥发性有机物

组成,主要成分为二甲基硫、二甲基二硫醚、氨气等^[1]。根据运行时现场手持式仪表数次检测数据,确定车间内臭气主要成分为氨气($300\sim 500\text{ mg}/\text{m}^3$),同时还含有一定量的粉尘和硫化氢($0\sim 10\text{ mg}/\text{m}^3$)。

② 除臭管道

对风机出口和风管典型位置进行分段取样,分别检测风速和风压,结果显示所有检测点均有流速,但风压较小。例如,临近风机入口处管道取样口的静压+动压合计负压132.6 Pa,但风机的设计风压为2 kPa,两者差距较大,可见整个收集系统压力不足。

2.2 同类项目调研

2020年12月—2021年1月,分别对北京市通州区和房山区污泥处理厂(均以堆肥发酵为核心工艺)进行参观考察,重点调研除臭系统的运行情况,这两座污泥处理厂均运行良好,与拟改造污泥处理厂的主要差异与优势如下:

① 堆肥发酵仓数量多,自动化程度高,同时考虑有充足的作业空间;

② 收集管道布置合理,管道材质与密封性好;

③ 以生物除臭为核心,辅以附属系统,除臭气量大。

2.3 现况除臭系统主要问题

① 污泥车间水汽和恶臭气体无法有效排出,无法满足污泥处理工艺要求,车间作业环境恶劣。各堆肥发酵仓的除臭支管管径较小,管路布置合理性欠佳;各除臭支管不具备调节功能,风量不可控;风管系统各阀门密封性较差,内部串风,影响外排风量;总体处理风量未考虑冗余度,除臭气量不足;未考虑进料区和混料区的除臭问题。

② 现有工艺和设备选型不合理,造成处理效果不理想。设计前未进行臭气成分分析,其设计参数按照常规市政污水处理厂典型进气指标和浓度,仅采用生物除臭无法有效处理当前臭气。单一的生物净化方法对成分复杂臭气的净化性能往往不稳定,在实际应用中通常采用组合处理方法^[2];未考虑废气中含尘因素,粉尘进入和累积后增加了生物滤池堵塞率,使其无法有效发挥作用;进气以氨气为主,硫化氢含量较少,生物滤池对氨气去除率较低,生物滤池中去除氨气的微生物极难培养,且较高浓度的氨气会同时抑制生物除臭的效果。

3 改造方案

3.1 方案确定原则

结合该污泥处理厂实际情况与业主需求,升级改造方案确定原则如下:

① 维持污泥堆肥的主工艺不变,以现有工艺为基础进行除臭系统升级改造,不能对现况污泥处理产生较大影响;

② 充分利用现有厂区条件和现有建(构)筑物,不新增用地;

③ 在执行除臭新标准条件下,除臭系统改造工艺需经济可行、稳定达标。

3.2 主要工程内容

① 拆除现有除臭系统,主要包括除臭箱体内部滤料、风机和风管等;

② 新建除臭系统及相关设施;

③ 改造过程中涉及的围墙、道路、地下管线等现况设施的拆除、移位及恢复。

3.3 除臭规模

该项目臭气源主要有湿泥卸料口、混料机、发酵仓等。除臭气量计算结果见表1。

表1 除臭气量计算结果

Tab.1 Calculation results of deodorization volume

项目	单体体积/ m ³	单体风量/ m ³	数量/ 个	换气次数/ (次·h ⁻¹)	总风量/ (m ³ ·h ⁻¹)
发酵仓	2 160	12 960	16	6	207 360
湿料卸料口及料仓	1 520	15 200	2	10	30 400
混料机区域	2 400	24 000	2	10	48 000
合计					285 760

根据以上计算结果,同时对比北京市同类污泥厂臭气处理规模与设备配置水平,确定该污泥处理厂改造后臭气处理总规模不低于300 000 m³/h,新增处理规模不低于200 000 m³/h,现状100 000 m³/h臭气处理系统需整体改造。

3.4 设计进气指标

结合实际检测数据,以及其他同类污泥处理厂的调研与文献等资料,确定除臭系统主要进气指标:氨气为300~600 mg/m³,硫化氢为0~10 mg/m³,粉尘为20 mg/m³,臭气浓度为20 000。

3.5 臭气处理工艺

原除臭系统采用单一生物除臭工艺,一方面生物除臭不适于处理氨气浓度较高的臭气,另一方面现况系统在运行一段时间后,滤料易被臭气中的粉

尘堵塞,进一步降低了处理能力。结合设计进气指标以及臭气性质、设备处理效率和运行要求,需采用更具针对性的工艺路线。

结合现场调研、检测、技术交流与研究结果,对行业中应用较多的物理、化学、生物等各类除臭工艺进行综合比选论证后,认为:

① 臭气中含有的粉尘易对其他处理工艺设备造成不利影响,需在系统前端工艺去除;臭气湿度较大,不适合各种干式过滤工艺去除臭气中粉尘(易板结);因粉尘浓度不高且颗粒相对较大,利用水洗塔可有效去除,同时水洗对氨也有一定的去除效果,可减少后续药剂使用量。

② 对于较高浓度的氨气和硫化氢等酸、碱性废气,化学洗涤工艺除污效果较好,但其反应机理较单一,无法去除与药液不反应的臭气组分。

③ 对于中低浓度硫化氢和含硫有机物恶臭气体,采用生物过滤有其独到优势:去除率稳定、设备运行稳定可靠;除臭微生物的多样性使得生物过滤对多种恶臭物质都具有很好的去除效果;但生物过滤法对该项目的主要污染物——氨气去除效率较低,同时对部分长链有机物去除要求的停留时间较长,设备占地较大且不经济。

④ 吸附作为对各种气体都有一定去除能力的工艺,设置在系统最末端,根据需要启动,能起到对除臭效果最终的保障作用,同时克服了吸附介质容易饱和、长期高频使用容易失效、运行费用较高的问题。

根据以上分析、现场检测数据,结合现场实际设备等情况,采用“水洗+酸洗+生物除臭+吸附”的组合工艺对收集的恶臭气体进行处理。

4 工程设计

4.1 除臭系统划分

现有2套除臭系统并联运行(单套规模为5×10⁴ m³/h),单套系统服务范围较大且部分位置未设置收集管道,同时采用单一枝状主管收集臭气。为此,需对现有污泥车间进行分区除臭升级改造,将除臭系统分为污泥预处理区和发酵车间两个除臭系统。

① 预处理区:改造现有除臭系统

结合厂区现有除臭系统设计风量、设备和厂区布置情况,将现有除臭系统改造后作为卸料口及混料机等污泥预处理专用区域。预处理区(混合卸料

口及料仓、混料机区域)总除臭计算风量为78 400 m³/h,考虑一定的冗余度后,预处理区的除臭风量确定为100 000 m³/h,与现况2套除臭系统总风量一致,设计利用原生物除臭系统对预处理区进行臭气处理,并针对混料区域增加洗涤和吸附装置。

② 污泥发酵区:新增除臭系统

16座发酵区除臭总计算风量为207 360 m³/h,考虑一定的冗余度后,发酵区的除臭风量为208 000 m³/h。将生物发酵区分为4套除臭系统,每套除臭系统收集与处理4座发酵仓产生的臭气。

综上,共设置6套除臭装置,各自分区覆盖、独立控制、独立运行,管道系统布置简单合理,互不影响,方便运行管理。

响,方便运行管理。

4.2 除臭设备布置

原污泥车间屋顶结构除现有除臭系统外,其余多数为不上人屋面,设计屋面荷载远小于除臭系统新增荷载。经计算复核,原结构梁板柱、基础截面和配筋均不能承受新增除臭系统荷载,需对原结构进行加固改造,东侧厂房则将停产,柱基、主梁、屋面均需进行加固,实施费用高,施工难度大。

经与业主讨论并进行技术经济比选,在无法新增占地的条件下,新增除臭系统于堆肥车间南北的道路上架空设置除臭箱体,尽可能减小对现有运行的影响。最终除臭系统布置见图1。

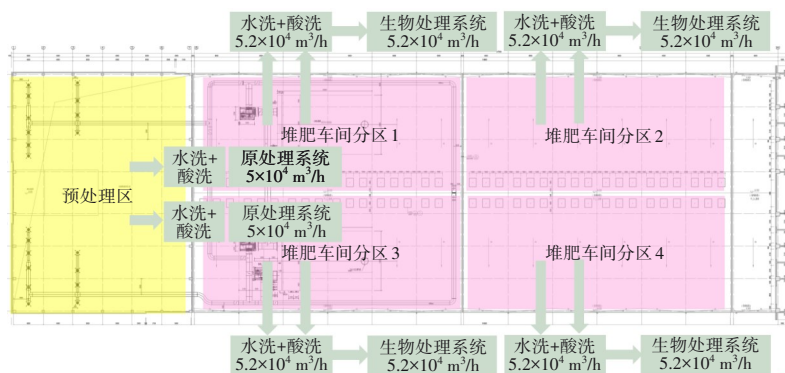


图1 除臭系统总体布置

Fig.1 General layout of the deodorization system

4.3 收集管道系统设计

4.3.1 收集管道

① 现有收集风管存在与改造方案计算风量不匹配、风管内部泄漏、串风等问题,需要整体更换。

② 卸料和混料区整体分2个区域设置排风管道,总管直径1.4 m,分别接至现有2套除臭系统;根据现场设备及操作人员位置设置收集风口分布,多点收集,保证收集效果。

③ 每个发酵仓内部设置收集风管,均匀布置不少于16个收集排风口,4座发酵仓对应1套除臭系统,就近布置,总管风速<12 m/s,支管风速6~8 m/s,减少风阻。

④ 除臭风管分段设置冷凝水的排放。

4.3.2 管道系统及支吊架

① 收集风管系统包括所有送排风管、风阀、风口等风管部件和配件等,采用微负压运行,防止臭气外逸。

② 风管内流动介质主要为硫化氢、氨气等臭气,具有一定的腐蚀性,因此要求收集管道防腐,每个吸风罩或独立料仓上设置调节阀。

③ 室内管道吊架、支架、管卡、管托均采用SS304材质,室外管道支架为镀锌钢材质。

④ 臭气收集系统在大面积的臭气源设多个收集口,保证构筑物的恶臭气体能够被均匀抽吸,并在每个臭气源构筑物上配备必要的阀门以调节风量和风压。

⑤ 除臭风管为有机玻璃钢乙烯基材质,表面为防紫外线胶衣,满足强度要求,并符合《通风与空调工程施工质量验收规范》(GB 50243—2016)壁厚要求。

4.4 CFD模拟气流组织设计

设计阶段对堆肥车间建立三维模型进行CFD气流组织模拟,并结合现场条件,确定送、排风口布置位置,优化除臭通风气流组织。主要进行以下2个方面的数值模拟:

① 对比有组织补风与门窗缝隙补风的室内气流分布情况。改造前后气流流动情况模拟效果见图2。

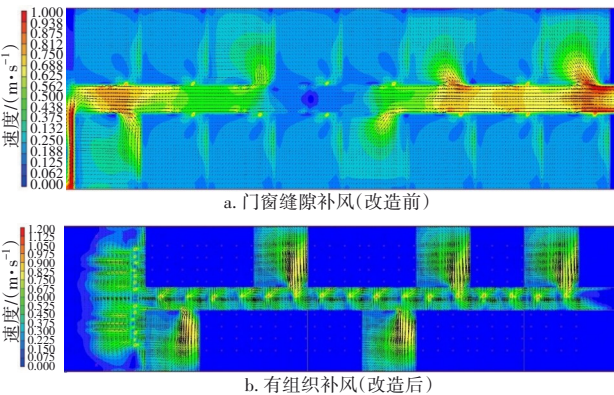


图2 Z=0.5 m处门窗缝隙补风与有组织补风局部速度分布云图

Fig.2 Cloud map of local velocity distribution of wind supplement and organized wind supplement through door and window gaps at Z=0.5 m

② 分析料仓门打开时臭气逸散影响因素。改造前后的臭气逸散模拟结果见图3。

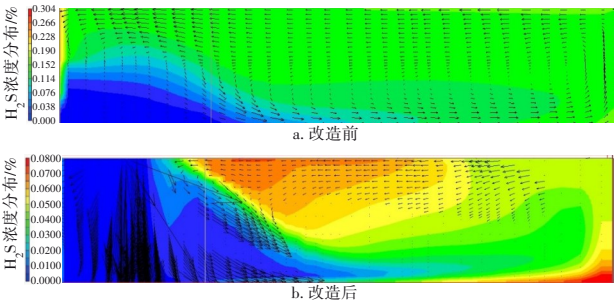


图3 改造前后某门洞处H₂S浓度分布剖面云图

Fig.3 Profile cloud map of H₂S concentration distribution at a door opening before and after reconstruction

通过气流流态和臭气浓度分布模拟等确定行车通道送风、发酵料仓内抽风的整体气流组织,以及送风口的位置与送风风速。

4.5 除臭工艺设计

通过引导污泥车间发酵仓、湿污泥卸料仓及混料区域等的室内气流走向,负压收集恶臭气体,经处理后达标排放。水洗主要用于除尘和去除部分氨气,第二级酸洗主要去除氨气,利用酸与氨气产生化学反应,通过检测循环液的pH,控制加药量和氨气去除率;生物除臭主要针对硫化氢、含硫有机物等其他不能酸洗去除的恶臭污染物质,利用在生物填料上培养的除臭微生物进行降解;末端吸附装

置利用吸附介质,将残余的微量恶臭物质去除,使除臭系统出口恶臭浓度稳定达标。主要工艺设备及参数见表2。

表2 主要工艺设备及参数

Tab.2 Main process equipment and parameters

项目		规格/型号	数量/套	备注
现有系统改造	二级卧式洗涤塔	Q=50 000 m ³ /h, 填料停留时间≥2 s	2	整体改造(部分利旧)
	生物滤池	预洗改造, 填料更换, 50 000 m ³ /h, 滤料停留时间≥25 s	2	
	吸附装置	Q=50 000 m ³ /h, 空塔停留时间≥1.5 s	2	
新增除臭系统设备	二级卧式洗涤塔	Q=52 000 m ³ /h, 填料停留时间≥2 s	4	
	生物滤池	Q=52 000 m ³ /h, 滤料停留时间≥25 s	4	
	吸附装置	Q=52 000 m ³ /h, 空塔停留时间≥1.5 s	4	

主要工段预估处理效率见表3。

表3 除臭系统预估去除率

Tab.3 Estimated removal rate of deodorization system

项目	NH ₃		H ₂ S		臭气		粉尘	
	浓度/(mg·m ⁻³)	去除率/%	浓度/(mg·m ⁻³)	去除率/%	浓度	去除率/%	浓度/(mg·m ⁻³)	去除率/%
系统进气浓度	600		20		20 000		20	
水洗处理后	400	33.30	16	20	16 000	20	2	90
酸洗涤处理后	5~10	98.3~99.2	16	20	6 000	70	1	95
生物除臭出口	<3	>99.5	<3	>85	<2 000	>90	<0.5	>97.5
干式化学吸附出口	<1	>99.8	<1	>95	<600	>97		

5 处理效果及投资费用

5.1 处理效果

该工程于2022年8月启动现场施工,2023年10月完成土建施工、设备与管道安装调试等工作,经环保部门验收合格后于2023年11月正式投入运行。待系统稳定运行后对排气筒尾气与厂界尾气浓度进行第三方检测,主要指标均达到北京市《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB 11/2007—2022),典型数据分别见表4、5。

表4 排气筒检测数据

Tab.4 Detection data of odor pollutants from exhaust funnel

检测指标	排放浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	排放速率/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	排放标准/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)
硫化氢	0.025	0.001 8	0.03
氨	0.37	0.027	0.6
臭气浓度		309	600

表5 厂界检测数据

Tab.5 Detection data of odor pollutants from plant boundary

检测指标	排放浓度	排放标准
硫化氢/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.008 7	0.01
氨/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.028	0.2
臭气浓度	<10	10

5.2 投资及运行费用

该工程总投资为5 780.47万元,其中除臭系统为2 404.06万元。除臭系统运行过程中主要药剂消耗包括硫酸、水、电、活性炭等,其中98%硫酸约1 430 t/a,中水约2 089 m^3 /月,电约822 240 $\text{kW}\cdot\text{h}$ /月。

6 设计体会

① 遵循系统设计的理念

由于新版臭气排放标准要求更高,且该污泥堆肥发酵处理系统产生的臭气及浓度不同于污水处理厂以及其他类别的污泥处理厂,需遵循系统设计的理念,以确保改造项目成功。对于前无先例的项目,采用现场踏勘、同类项目调研、现场检测、技术交流与论证等综合措施,充分研究除臭系统升级改造各个环节;系统封闭、收集、处理等各环节均需充分考虑且有针对性,充分吸收原有系统的经验教训;各专业协同设计,综合考虑设计过程的每个环节及解决方案。

② 通风与除臭协同设计

通风、除臭设计方案需协同考虑,气流组织应同时考虑臭气收集与人员新风需求^[3]。通风系统通过风口布置、风量计算等措施合理组织室内气流,便于臭气有效收集,收集后的臭气集中处理。送风直接送至人员活动区域。采用机械送风形式,将室外空气送入行车通道区域,改善空气环境。同时,通过机械送风,行车通道形成正压区域,能够有效

防止相邻发酵仓内的臭气外逸至通道。除臭系统主要通过组合工艺将臭气处理至达标排放。设计过程中需对通风、除臭系统进行模拟,寻求最优化的设计,在确保除臭效果的前提下,减少除臭风管的布置和除臭风量,降低建设和运行成本。

7 结论

结合现场调研、同类项目考察、现场检测与研究论证等综合措施,充分吸收现况系统的经验教训,采用“水洗+酸洗+生物除臭+吸附”的组合除臭工艺,设计排放气体执行北京市《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB 11/2007—2022)。后续将继续跟踪项目建成投产后的除臭系统运行情况,研究动态出现的问题及解决方案,以进一步优化同类项目的设计和实现。

参考文献:

- [1] 郭瑞. 生物滤池除臭在好氧发酵工程中的应用研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
GUO Rui. Biofiltration for Odour Control in Composting Facility[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2013(in Chinese).
- [2] 刘璐,陈同斌,郑国砥,等. 污泥堆肥厂臭气的产生和处理技术研究进展[J]. 中国给水排水,2010,26(13): 120-124.
LIU Lu, CHEN Tongbin, ZHENG Guodi, et al. Odor production and treatment technologies in sewage sludge composting plant[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(13): 120-124(in Chinese).
- [3] 曹东明,于文俊,周燕昭. 污泥板框脱水间除臭与通风探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 317-322, 327.
CAO Dongming, YU Wenjun, ZHOU Yanzhao. Discussion on ventilation and deodorization of sludge plate and frame dehydration room [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 317-322, 327 (in Chinese).

作者简介:曹东明(1987—),男,山西运城人,硕士,高级工程师,主要从事市政领域除臭、通风等设计工作。

E-mail:330899668@qq.com

收稿日期:2022-10-18

修回日期:2024-04-23

(编辑:衣春敏)