



移动扫码阅读

金顺利,陈步东,曹飞飞,等.城镇污泥脱水过程伴生恶臭控制技术研究进展[J].能源环境保护, 2021, 35(2):19-23.

JIN Shunli, CHEN Budong, CAO Feifei, et al. Research progress of the control technology of odor produced during the dewatering process of municipal sludge[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2):19-23.

城镇污泥脱水过程伴生恶臭控制技术研究进展

金顺利,陈步东,曹飞飞,吴启军,邵颂晶

(杭州楚环科技股份有限公司,浙江 杭州 310015)

摘要:介绍了城镇污泥脱水过程伴生恶臭气体的特点和危害,探讨了恶臭污染物形成的影响因素,从源头控制和末端治理两个方面总结了现有恶臭气体控制技术,展望了技术发展趋势。分析认为:污泥脱水恶臭气体的组成与污泥性质和脱水工艺相关,受污泥成分、污泥停留时间、温度和湍流程度等因素的影响;污泥脱水恶臭气体成分复杂、嗅阈值低,应结合源头控制和末端治理方面的先进技术进行联合处理,未来的技术开发集中于生物法、化学洗涤、高级氧化法、资源化回收利用等领域。

关键词:污泥脱水;恶臭控制;废气;组合工艺

中图分类号:X512

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)02-0019-05

Research progress of the control technology of odor produced during the dewatering process of municipal sludge

JIN Shunli, CHEN Budong, CAO Feifei, WU Qijun, SHAO Songjing

(Hangzhou Chuhuan Science and Technology Co., Ltd., Hangzhou 310015, China)

Abstract: The characteristics and hazards of odor produced during the dewatering process of municipal sludge were introduced. The factors influencing the formation of odor pollutants were discussed. The current source control and end treatment control technologies were summarized. Then the development trend of the technology was prospected. The analysis shows that the composition of the odor is related to the sludge properties and dewatering technologies and is affected by the sludge composition, sludge residence time, temperature and turbulence degree. The odor has complicate composition and low olfactory threshold, thus the advanced technologies of source control and end treatment control should be combined to treat odor. The future technology development will focus on biological method, chemical washing, advanced oxidation and resource recycling.

Key Words: Sludge dewatering; Odor control; Waste gas; Combined process

0 引言

随着城镇污水处理量的不断增加,城镇污泥的妥善处理处置越来越受到人们的重视。土地填埋、焚烧和资源化利用等众多的污泥处理处置方式被开发应用,这些处理处置方式都离不开污泥脱水这一重要的工艺环节。通过脱水减容,不仅大幅降低污泥的储运成本,而且减小设备的占地

面积、提高污泥的低位热值,从而为污泥堆肥、填埋、自持焚烧等进一步处理处置创造了有利条件^[1-2]。

污泥脱水过程伴生的恶臭废气带来的环境压力不容忽视。恶臭污染物往往嗅阈值非常低,即使在环境空气中的浓度很低,仍然能引起人们不愉快的感觉并损害生活环境。随着经济社会的发展和人民生活水平的提高,人们对工作和生活环

境的要求也逐步提高。恶臭作为环境公害之一已经受到广泛的关注,人们对环境问题的投诉中恶臭投诉的比例急剧增加^[3-5]。污泥脱水伴生恶臭废气以 H_2S 、 NH_3 为主要污染物,同时涉及含硫、含氮有机物等多种挥发性恶臭物质,严重危害工作人员身体健康和周界环境空气质量,已成为关系城镇污泥处理处置设施建设和持续运营的突出环境问题。

1 污泥脱水工艺类型

城镇污泥的含水率通常都很高,可达 99%,必须对污泥做脱水减容预处理,才能进行后续的污泥处理处置。常见的脱水工艺类型有污泥浓缩、机械脱水和污泥干燥三种。

污泥浓缩就是通过污泥增稠来降低污泥的含水率,减小污泥的体积,常用的方法有重力浓缩、气浮浓缩和离心浓缩等,是一种初步脱水处理工艺。机械脱水一般在污泥浓缩之后,污泥中的水分在过滤介质两侧的压力差的推动下强制通过过滤介质,污泥颗固体粒被截留在过滤介质上,从而达到脱水的目的。经机械脱水处理的污泥含水率一般能从 95% 左右降到 50%~75%,可满足污泥填埋、堆肥等处理处置要求。污泥干燥往往在污泥机械脱水后进行,有自然干燥和人工干燥两种形式。自然干燥露天作业,占地大,产生的恶臭难以收集,已很少被采用。人工干燥是在密闭环境下利用人工热源对污泥进行深度脱水,恶臭收集效率高,是主流的污泥干燥形式。污泥干燥是污泥焚烧、热解的预处理工艺,干燥产物也可用于堆肥或直接作为农用肥料。

2 污泥脱水恶臭废气特点

2.1 恶臭组成及性质

恶臭污染物伴随城镇污泥脱水过程而产生,其组成与污泥性质和脱水工艺密切相关。

对于污泥浓缩、机械脱水等常温脱水工艺,恶臭污染物来源于污水、污泥及其厌氧产物,按其组成成分可分 4 类:含硫化合物,如硫化氢、硫醇类、硫醚类等;含氮化合物,如氨、胺类、酸胺类、吡啶、粪臭素等;含氧有机物,如醇、醛、酮、酚以及有机酸等;烃类化合物,如芳香烃、卤代烃、烯烃等^[5-7]。众多的污染物中,硫化氢、氨的排放浓度最高。黄力华等^[8]研究表明,污泥浓缩池臭气中硫化氢、氨的浓度分别为 $0.09\sim 5.96\text{ mg/m}^3$ 、 $0.13\sim 11.24\text{ mg/m}^3$,机械脱水臭气中硫化氢、氨的浓度分别为 $0.17\sim 27.3\text{ mg/m}^3$ 、 $0.2\sim 18.45\text{ mg/m}^3$,而臭气中甲硫醇、甲硫醚、苯乙烯、二甲苯的浓度均 $\leq 1\text{ mg/m}^3$ 。唐小东等^[9]在污泥浓缩池和脱水机房的臭气中检测到了烷烃、卤代烃、烯烃、芳香烃、含氧有机物和硫醚等 40 种挥发性有机物,其中苯系物含量最高,各挥发性有机物浓度之和小于 1 mg/m^3 。

污泥干燥过程产生的恶臭污染物来源还包括不稳定化合物受热分解产物,如一氧化碳、氮氧化物、二氧化硫等,其成分和浓度随加热时间及温度等因素影响大。张灵辉等^[10]将城市生活污水脱水污泥于 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥 1 小时,在尾气中检测出氨、硫化氢及多种有机组分,如芳香族化合物、含硫化合物、含氧有机物、烃类等,其中氨的浓度为 4.9 mg/m^3 ,远高于其他成分,其次为硫化氢,浓度为 0.2 mg/m^3 。

恶臭污染物一般嗅阈值很低,具有刺激性或毒性,易造成嗅觉感官污染,危害人体健康。部分污泥脱水恶臭污染物嗅阈值及感官性质如表 1 所示^[11]。

表 1 污泥脱水恶臭污染物类型及感官性质

Table 1 Types and sensory properties of odor pollutants produced during the dewatering process of sludge

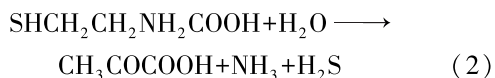
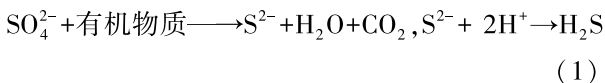
物质名称	分子式	感官性质	嗅阈值/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
硫化氢	H_2S	臭鸡蛋味	0.000 8
氨	NH_3	刺激性,令人不愉快	0.210 0~0.350 0
乙胺	$CH_3(CH_2)NH_2$	氨味	0.160 7
一甲胺	CH_3NH_2	腐烂、腥臭味	6.504 5
二甲胺	$(CH_3)_2NH$	腐烂、腥臭味	0.683 0
三甲胺	$(CH_3)_3N$	腐烂、腥臭味	0.001 1
吡啶	$C_6H_4(CH)_2NH$	粪臭味	0.000 5
粪臭素	C_9H_9N	粪臭味	0.005 8
甲硫醇	CH_3SH	烂卷心菜味	0.001 1
甲硫醚	$(CH_3)_2S$	烂卷心菜味	0.002 8

续表

物质名称	分子式	感官性质	嗅阈值/(mg·m ⁻³)
二甲二硫	(CH ₃) ₂ S ₂	烂蔬菜味	0.000 4
甲苯	C ₆ H ₅ CH ₃	刺激性	11.089 3
二甲苯	C ₆ H ₄ C ₂ H ₆	刺激性	0.440 0~1.320 0
乙酸	CH ₃ COOH	酸败味	2.678 6

2.2 恶臭污染物的形成及影响因素

恶臭污染物的形成与污泥中微生物的活动密切相关。H₂S 的形成源于硫酸盐、亚硫酸盐的还原和含硫有机化合物的脱硫反应。硫酸盐在厌氧微生物作用下还原形成硫化氢以式(1)表示。含硫有机物(以半胱氨酸为例)在厌氧状态下转化形成硫化氢的简化过程以式(2)表示^[6]。含硫有机恶臭物质(甲硫醚、甲硫醇等)的形成存在含硫氨基酸的厌氧降解、硫化物的厌氧甲基化反应等多种途径^[12]。含氮恶臭物质(氨、胺类、吲哚及其衍生物等)的形成与污泥中的蛋白质、氨基酸、硝酸盐等含氮物质的厌氧生化反应有关,如胺类物质通过氨基酸的脱羧基反应产生。挥发性脂肪酸、醛类、醇类、酮类等挥发性有机物则是碳水化合物厌氧发酵的副产物^[6]。



恶臭污染物的形成受污泥成分、污泥停留时间、温度、湍流程度等因素的影响。污泥中氮、硫元素及有机成分的含量越高,恶臭污染物的产生量也相应越大。Lomans 等^[12]研究表明含硫有机恶臭物质的产生量取决于污泥中硫化物和供甲基化合物的含量。缩短污泥的停留时间,降低了污泥厌氧腐败程度,有利于减少恶臭污染物的形成。眭光华等^[13]研究表明,采用高效脱水机直接对污泥进行脱水处理时污泥脱水机房内硫化氢、氨的浓度明显低于常规脱水工艺,分析认为直接对污泥脱水缩短了污泥的停留时间和污泥发酵产生恶臭物质的过程,减少了恶臭污染物的排放。温度影响厌氧过程微生物的活性,在污泥干燥过程中,污泥中的热不稳定物质受热分解,形成新的恶臭物质。眭光华等^[13]研究表明,污泥浓缩池硫化氢排放浓度具有夏季高、冬季低的季节性特点。Gomez-Rico 等^[14]的研究表明,当污泥干燥温度为 80~120 ℃时,在干燥废气中挥发性有机物含量随温度变化不大。Weng 等^[15]研究了干燥温度为 50

~300 ℃时苯系物的释放特性,结果表明,苯系物主要在干燥温度为 200~300 ℃时产生,当干燥温度低于 100 ℃时,苯系物的释放量仅占总量的 5.09%~7.34%。

3 污泥脱水恶臭控制技术

3.1 源头控制

源头控制是通过优化污泥脱水工艺,抑制污泥脱水处理工艺过程中恶臭污染物的形成。常见的有调节 pH、投加药剂、减少污泥停留时间、降低污泥干燥温度等^[16]。

一些研究表明当 pH 值低于 5.5 或高于 8.5 时,硫酸盐还原菌不能生长^[17]。将污泥初始 pH 从 6.5 提高至 8.0,硫化氢的产生量可下降 44.7%^[18]。通过控制硝酸钙的添加量,可以有效地防止污泥中 H₂S 等恶臭污染物的形成^[19]。莫少婷等^[20]研究表明丙酸钾对污泥硫化氢释放具有明显的抑制作用。Jaouadi 等^[21]研究表明向污泥中添加 3% 的芦荟凝胶或水玻璃可明显减少 VOCs 的产生量,降低污泥的感官臭味。范海宏等^[22]控制污泥干化温度小于 250 ℃、干化时间小于 30 s,同时将污泥与氧化钙按质量比 1:1 混合,对 CS₂、H₂S 和 SO₂ 的抑制率可接近 100%,分析认为氧化钙呈碱性,可抑制有机硫化物和脂肪硫的分解,同时释放出的 CS₂、H₂S 和 SO₂ 是酸性气体,均可与氧化钙反应。

3.2 末端治理

末端治理是对已经形成的恶臭污染物采取收集处理措施,以减轻或消除恶臭污染。常规的末端治理技术包括洗涤法、吸附法、高级氧化、掩蔽法、燃烧法、生物法等,各项治理技术的原理及优缺点见表 2^[23-24]。

随着研究的深入,一些新型除臭工艺被不断开发。Lu 等^[25]采用具有更高能量利用率的滑动弧放电等离子体处理污泥干化模拟废气,当输入电压 11 kV、气体流速 4.72 m/s 时,该反应器达到最大处理效率;当废气中同时含 NH₃ 和 H₂S 时,能耗可降低 38%。Almarcha 等^[26-27]以有机无机混

表 2 恶臭处理技术简介

Table 2 The introduction to odor treatment technology

治理技术名称	原理	优点	缺点
酸碱洗涤	中和吸收恶臭中酸/碱性物质	投资低;操作简单;对硫化氢、氨等酸/碱性成分处理效果好	运行费用高;对非酸/碱性成分无效;涉及危险化学品的储存、处置
氧化洗涤	利用循环液中的氧化剂降解恶臭	投资较低;操作维护简单	氧化剂费用高;涉及危险化学品的储存、处置;降解不完全
吸附法	利用活性炭将恶臭从气相转移到固相	效率高;可处理各种恶臭污染物	吸附效果受湿度影响大;活性炭再生困难,运行费用高;涉及危险废物处置
掩蔽法	利用异味掩盖剂遮盖恶臭气味,从而控制恶臭	投资低;设备操作简单	药剂费用通常较高;不能彻底消除恶臭物质
燃烧法	高温条件下将恶臭氧化为无毒或低毒物质	效率高;可处理各种恶臭污染物	能耗大;存在二次污染;设计不良的燃烧器存在安全隐患
高级氧化	采用等离子、紫外光解、光催化等产生强氧化剂处理恶臭污染物	占地面积小;通常投资较低;操作维护简单	机理有待进一步研究;残留臭氧控制困难
生物法	利用微生物将恶臭污染物转化为无毒无害物质	操作维护简单;运行费用低;绿色、安全,无二次污染;可处理各种恶臭污染物	占地面积大;建设投资通常较高;对难生物物质处理效果低下

合填料,并接种专门筛选的高效降解菌来改进生物滤池除臭性能,该生物滤池对污泥臭气中的主要污染物处理效率达 95%~99%,相比传统的生物滤池具有明显优势。Mika 等^[28]从资源化的角度研究了从废气中回收氮的可行性,结果表明废气中具有回收潜力的氮占污泥干重的比例可达 0.49%~0.62%。Eekert 等^[29]的研究报告则系统介绍了汽提、化学氧化、生物转化等氮回收方法。

大量的研究和工程实践表明,单一处理技术往往只能高效处理一类或几类恶臭物质,对多组分恶臭废气,在处理成本、处理效率、适用浓度范围等方面具有局限性,难以取得理想的除臭效果。多技术组合工艺可协同发挥单一技术的优势,实现优势互补,在满足除臭效果的同时降低了处理成本,因而成为污泥脱水臭气处理技术的研究热点。Weng 等^[16]针对不同工序阶段产生的臭气提出了一个分质分类处理的方案,其中污泥仓储臭气引入生物滤池或热力氧化炉处理,污泥热干化尾气引入水洗-碱洗装置处理,污泥储存库空间臭气采用 UV 光解原位处理。工程实践表明,该组合工艺对硫化氢和烟尘的去除率分别达 97.5%和 99.7%。Andersen 等^[30]研究了酸洗、非热等离子体、UV 光解及其组合工艺对污泥干化臭气的处理效果,结果表明,单独采用非热等离子体工艺时,臭气浓度的处理效率为 70%~79%;采用非热等离子体+UV 光解的组合工艺时,臭气浓度的处理效率提高至 70%~83%;采用酸洗+非热等离子体+

UV 光解的组合工艺时,臭气浓度的处理效率达 90%。组合工艺的除臭效率明显优于单一处理工艺。

4 展望

城镇污泥脱水恶臭废气具有成分复杂、臭气嗅阈值低等特点,在选择恶臭控制方法时,应注重源头控制和末端治理相结合,以源头治理为主,最大限度削减恶臭污染物的排放,在分析恶臭污染源,掌握恶臭废气特点的基础上,结合实际优选恶臭控制工艺。在实际末端除臭应用中,吸附法、洗涤法、燃烧法等除臭技术由于运行费用高、存在二次污染等问题,很少单独应用。掩蔽法主要用于恶臭污染物难以收集的场合,高级氧化技术对高浓度污染物处理效果不佳。生物法也存在占地面积大、对难生物物质处理效果低下的缺点。为适应不断提高的环境质量要求,在深入研究常规末端治理技术的基础上,开发生物、化学洗涤、高级氧化、资源化回收利用等处理技术相结合的组合除臭工艺,实现各项技术的优势互补,提高恶臭废气处理效果,降低运行成本,将是污泥脱水恶臭废气处理技术的发展方向。

参考文献

- [1] Fytli D, Zabanitout A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods-A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12 (1): 116-140.

- [2] Abusoglu A, Ozahi E, Kutlar A I. Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1684-1692.
- [3] Pochwat K, Kida M, Ziembowicz S, et al. Odours in sewerage - a description of emissions and of technical abatement measures [J]. *Environments*, 2019, 6 (8): 89.
- [4] Fisher R M, Le-Minh N, Alvarez-Gaitan J P, et al. Emissions of volatile sulfur compounds (VSCs) throughout wastewater biosolids processing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 622-631.
- [5] Piringer M, Schaubberger G. Environmental odour: Emission, dispersion, and the assessment of annoyance [J]. *Atmosphere*, 2020, 11 (9): 896.
- [6] Gostelow P, Parsons S A, Stuetz R M. Odour measurements for sewage treatment works [J]. *Water Research*, 2001, 35 (3): 579-597.
- [7] Daniel G, Nagore G, Joan C, et al. Filling in sewage sludge biodrying gaps: Greenhouse gases, volatile organic compounds and odour emissions [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 291: 121857.
- [8] 黄力华, 刘建伟, 夏雪峰, 等. 城市污水处理厂典型气体污染物产生特性研究 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15 (3): 295-299.
- [9] 唐小东, 王伯光, 赵德骏, 等. 城市污水处理厂的挥发性恶臭有机物组成及来源 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31 (4): 576-583.
- [10] 张灵辉, 苏达根. 水泥窑处置污泥烘干废气污染与防治 [J]. *水泥技术*, 2011 (6): 33-35.
- [11] Katia L, George K, Adamantini K, et al. Assessing odour nuisance from wastewater treatment and composting facilities in Greece [J]. *Waste Manage and Research*, 2010, 28 (11): 977-984.
- [12] Lomans B P, Pol A, Op den Camp H J M. Microbial cycling of volatile organic sulfur compounds in anoxic environments [J]. *Water Science and Technology*, 2002, 45 (10): 55-60.
- [13] 睦光华, 李建军, 孙国萍. 城市污水处理厂恶臭污染源调查与研究 [J]. *环境工程学报*, 2008, 2 (3): 399-402.
- [14] Gomez-Rico M F, Fullana A, Font R. Volatile organic compounds released from thermal drying of sewage sludge [J]. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2008, 111: 425-433.
- [15] Weng H X, Ji Z Q, Chu Y, et al. Benzene series in sewage sludge from China and its release characteristics during drying process [J]. *Environmental Earth Science*, 2011, 65 (3): 561-569.
- [16] Weng H, Dai Z, Ji Z, et al. Release and control of hydrogen sulfide during sludge thermal drying [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 296 (15): 61-67.
- [17] 陈野, 刘贵昌. 硫酸盐还原菌腐蚀的防治方法及其研究进展 [J]. *腐蚀与防护*, 2004, 25 (3): 102-104.
- [18] Yan L, Ye J, Zhang P, et al. Hydrogen sulfide formation control and microbial competition in batch anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater sludge: Effect of initial sludge pH [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 259: 67-74.
- [19] Einarsen A M, Rasmussen A I, Bungum S, et al. Biological prevention and removal of hydrogen sulphide in sludge at Lillehammer Wastewater Treatment Plant [J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41 (6): 175-182.
- [20] 莫少婷, 周兴求, 伍健东, 等. 丙酸钾污泥稳定化过程中硫化氢的释放规律 [J]. *环境化学*, 2017, 36 (3): 608-613.
- [21] Jaouadi T, Hajji M, Kasmi M, et al. Aloe sp. leaf gel and water glass for municipal wastewater sludge treatment and odour removal [J]. *Water Science and Technology*, 2020, 81 (3): 479-490.
- [22] 范海宏, 张诗洋, 李斌斌, 等. 污泥干化过程中含硫气体的抑制研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36 (3): 888-892.
- [23] Shammay A, Sivret E C, Le-Minh N, et al. Review of odour abatement in sewer networks [J]. *Journal of Environment Chemical Engineering*, 2016, 4 (4A): 3866-3881.
- [24] Smet E, Lens P, Langenhove H V. Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur compounds [J]. *Critical Reviews in Environment Science and Technology*, 1998, 28 (1): 89-117.
- [25] Lu S, Chen L, Huang Q, et al. Decomposition of ammonia and hydrogen sulfide in simulated sludge drying waste gas by a novel non-thermal plasma [J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 781-785.
- [26] Almarcha D, Almarcha M, Nadal S, et al. Assessment of odour and VOC depuration efficiency of advanced biofilters in rendering, sludge composting and waste water treatment plants [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, 40: 223-228.
- [27] Almarcha D, Almarcha M, Nadal S, et al. Comparison of the depuration efficiency for VOC and other odoriferous compounds in conventional and advanced biofilters in the abatement of odour emissions from municipal waste treatment plants [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 30: 259-264.
- [28] Horttanainen M, Deviatkin I, Havukainen J. Nitrogen release from mechanically dewatered sewage sludge during thermal drying and potential for recovery [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1819-1826.
- [29] Eekert V M, Weijma J, Verdoes N, et al. Explorative research on innovative nitrogen recovery [R]. Amersfoort, The Netherlands: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2012: 1-56.
- [30] Andersen K B, Feilberg A, Beukes J A. Use of non-thermal plasma and UV-light for removal of odour from sludge treatment [J]. *Water Science and Technology*, 2012, 66 (8): 1656-1662.