

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.012

## 深度脱水污泥好氧发酵工艺研究

胡佩佩<sup>1</sup>, 侯 锋<sup>2</sup>, 范 莹<sup>1</sup>, 刘成军<sup>1</sup>, 陈力子<sup>1</sup>, 卢先春<sup>2</sup>, 周 晓<sup>2</sup>  
(1. 四川蓉信开工程设计有限公司, 四川 成都 610041; 2. 国投信开水环境投资有限公司, 北京 101101)

**摘 要:** 好氧发酵是市政污泥处理处置的重要工艺。常规污泥好氧发酵工艺以机械脱水的湿污泥(含水率约为80%)为原料,为调节含水率,需添加大量辅料和返混料,存在物料成本高、占地大、发酵效率低等弊端。为此,以深度脱水后的污泥为原料,采用好氧发酵处理工艺,通过优化物料配比进行中试。以贵阳市新庄一期污水处理厂含水率在60%左右的低温干化污泥为主要原料,添加总量约13%的辅料和返混料。发酵过程中记录温度和产品主要指标,结果表明,工艺改良后深度脱水污泥在大幅减少物料添加量、减小占地的情况下,可进行正常的好氧发酵,同时达到加速升温、缩短发酵周期的效果。

**关键词:** 污泥; 好氧发酵; 深度脱水; 含水率

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0074-04

### Aerobic Fermentation Process of Deep Dewatering Sludge

HU Pei-pei<sup>1</sup>, HOU Feng<sup>2</sup>, FAN Ying<sup>1</sup>, LIU Cheng-jun<sup>1</sup>, CHEN Li-zi<sup>1</sup>, LU Xian-chun<sup>2</sup>, ZHOU Xiao<sup>2</sup>

(1. Sichuan Rongxinkai Engineering Design Co. Ltd., Chengdu 610041, China; 2. SDIC Xinkai Water Environment Investment Co. Ltd., Beijing 101101, China)

**Abstract:** Aerobic fermentation is an important process for municipal sludge treatment and disposal. The traditional aerobic fermentation process utilizes the mechanical dewatered sludge (water content is about 80%) as the raw material, and needs to add a large number of auxiliary materials and returned mixture to regulate the water content, which leads to the problems of high reagent cost, large footprint and low efficiency. In the present work, the aerobic fermentation of the deep dewatering sludge was carried out in a pilot-scale device by optimizing the ratio of different materials. The raw material was the mixture of low-temperature dry sludge with water content of about 60% from the first phase of Xinzhuang Sewage Treatment Plant in Guiyang and auxiliary materials and returned mixture with a proportion of about 13% of the total materials. The temperature and the main product indexes were recorded during the fermentation. The aerobic fermentation was carried out normally even if significantly reducing the dosage of the auxiliary materials to the deep dewatering sludge and footprint after modification of the process, and the modified process also accelerated the temperature rise and shortened the fermentation period.

**Key words:** sludge; aerobic fermentation; deep dewatering; water content

随着我国污水处理设施的进一步建设,污泥产生量逐年增长,但污泥处理设施十分短缺,处置能力

严重不足。市政污泥带来的二次污染已成为各地突出的环境问题<sup>[1-2]</sup>。污泥好氧发酵工艺具有技术门

槛低、投资和运行成本低的优势,对于重金属等污染物含量不超标的污泥,通过好氧发酵可实现污泥土地利用资源化,是国家相关产业政策明确鼓励和支持的污泥处置措施。但传统的污泥好氧发酵以污水处理厂机械脱水污泥为原料,污泥含水率较高,因此需要添加大量生物质辅料和返混料。当湿污泥直接进行好氧发酵时,在混合过程中容易成团、难以混匀,导致内部透气性差、发酵不彻底;同时堆体占地大、辅料成本高、发酵周期长,是传统污泥好氧发酵工艺在实际应用中的主要问题。

理论上污泥好氧发酵的主要控制因素包括物料的C/N值、孔隙率和含水率,其中适宜的含水率一方面可以保障微生物活性,另一方面可为污泥堆体提供一定的空隙,是最重要的控制因素。因此,利用深度脱水工艺进行污泥好氧发酵的预处理,以提高发酵堆体的透气性、减少辅料添加,可以实现节约成本和减少用地的目的。笔者采用贵阳市新庄一期污水处理厂的低温干化污泥开展好氧发酵中试,研究深度脱水污泥好氧发酵的工艺条件和效果。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验原料采用含水率为60%的低温干化污泥,以及含水率为80%的带式脱水污泥。采用序批式发酵,共进行五批次试验,单批次处理污泥5~40 t。辅料采用机械破碎的干燥秸秆和油粕,质量配比为秸秆:油粕=10:1,平均含水率约为15%。共设置1组湿污泥对照试验(W1)和4组深度脱水污泥试验(D1~D4),通过添加辅料、返混料调整堆体含水率为55%~60%。此外1 t污泥添加0.5~1 kg微生物菌剂。各批次配比见表1。

表1 试验物料配比

Tab.1 Mixing ratio of materials

项目	物料配比					混合含水率/%
	污泥:辅料:返混料	污泥/kg	辅料/kg	返混料/kg	总质量/kg	
W1	100:40:0	5 000	2 000	0	7 000	61.4
D1	100:16:0	5 000	800	0	5 800	53.8
D2	100:10:5	20 000	2 000	1 000	23 000	55.0
D3	100:13:2.5	8 000	1 040	200	9 240	54.4
D4	100:13:2.5	40 000	5 200	1 000	46 200	54.4

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 工艺流程

工艺流程如图1所示。按照配比,采用滚筒式

搅拌机将污泥和辅料、返混料等混合均匀。采用条垛形式进行好氧发酵,堆体高度约1.5 m、宽3 m,曝气区总长为40 m。发酵过程依靠罗茨风机和预埋曝气管进行曝气,并采用自行走式翻堆机进行物料翻堆。根据温度和氧含量及时调整曝气和翻堆频次。当发酵堆体温度稳定下降至30~40℃时,移出发酵区进行二次腐熟。二次腐熟的污泥产品过筛,孔径为10 mm。部分筛上物作为返混料进入下一批次的好氧发酵。

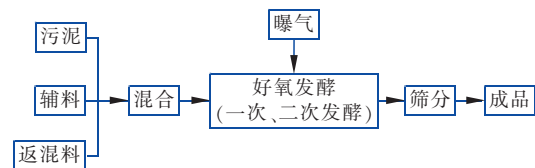


图1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process

#### 1.2.2 条件控制

试验设计了一套PLC自控系统,同时以时间间隔和温度控制风机的启停。堆体通风方式为强制间歇通风,正常情况下,曝气周期内每开启40 min关停20 min;高温情况下保持风机开启,控制堆体最高温度不超过80℃。设计曝气量为 $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ,根据每批次试验堆体的体积,采用曝气管道上的电磁流量计和球阀人工调节。一次发酵过程中堆体翻抛频次为3 d一次,在温度超过80℃的情况下,增加翻堆频次至1 d一次。试验场地位于污水处理厂污泥堆棚内,试验时间为2018年12月—2019年3月,冬季室内温度较稳定,约为7~10℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度监测数据

采用数显温度探杆并结合PLC系统自动记录堆体温度。试验共设置4个温度探杆,于堆体条垛的径向中线上等距分布;每个温度探杆均设有上、中、下3个探头,共计12个测温点,记录时间间隔为8 h,每个探杆测得的最高温度取平均值,作为堆体的瞬时最高温度。剔除翻堆后2 h内的温度波动,汇总后形成温度变化曲线,如图2所示。由图2可知,各批次试验发酵的最高温度均能达到70~75℃,升温段时间为2~4 d,高温段持续时间为3~7 d,一次发酵总周期在10~15 d。D1组升温最快,发酵1 d内即达到50℃以上。湿污泥对照组W1升温最慢,整体发酵周期也最长。在深度脱水污泥试

验组中,D1组高温期持续时间最短,60℃以上持续时间约为3d,55℃以上持续时间约为5d,但降温段出现了较大幅度的温度回升,推测原因可能是翻堆不均匀。深度脱水污泥试验组(D1~D4)高温持续时间和整体发酵周期相比湿污泥发酵都更短,可能是因为添加的辅料比例少,堆体整体有机质含量低,发酵持续时间短。

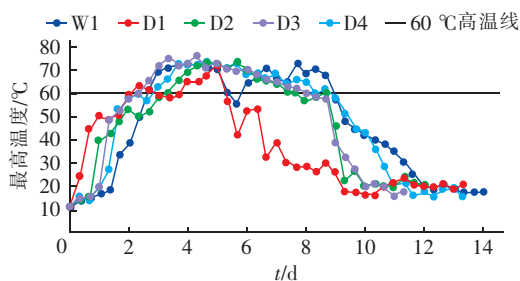


图2 污泥好氧发酵过程中温度的变化

Fig. 2 Variation of temperature in sludge aerobic fermentation

## 2.2 氧浓度监测情况

为掌握发酵过程中堆体的氧浓度情况,设置了4组数显氧浓度探杆,可同时监测4个点位的实时氧浓度。该氧浓度检测仪的核心是氧化锆动态氧传感器,探头外部为不锈钢防护罩和进气口,利用氧气在Pt电极上形成的电势差计算环境中的氧气浓度。但在试验过程中发现,对于强制通风的污泥好氧发酵形式,由于底部曝气造成气流扰动,堆体内部氧浓度不均匀,在风机开启的状态下,会导致氧浓度数据剧烈波动,此外堆体中的其他杂质气体也对氧浓度的检测产生影响。加上堆体湿度较大,部分黏滞性污泥颗粒黏附在探头上,导致检测过程中氧浓度探杆频繁损坏,因此本次试验未成功实现氧浓度检测。

目前国内正在运行的较大规模污泥好氧发酵工程均未进行氧浓度的实时监测,主要是受制于监测手段。好氧发酵过程中氧浓度的变化是连续且快速的,对检测的灵敏度和时间有比较高的要求<sup>[3]</sup>。因此,目前污泥好氧发酵的连续性氧浓度检测基本停留在实验室阶段。

## 2.3 产品检测项目与结果

各批次发酵结束后的产品呈灰褐色、深棕色,含水率为30%左右,干燥疏松,腐熟后无明显刺激性臭味。试验对D4组深度干化污泥发酵二次腐熟产品进行了检测,检测指标包括含水率、pH值、重金属含量、蠕虫卵死亡率、营养元素含量。经检测,污泥发酵产物中重金属未超标,各项指标已满足《城镇

污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)标准。可见,深度脱水污泥掺混少量辅料和返混料,仍可保证好氧发酵过程正常进行,尤其是蠕虫卵死亡率已达到100%,说明已充分实现了无害化。

## 3 讨论

### 3.1 辅料的选择和配比

污泥好氧发酵过程是一个复杂的生物化学过程,发酵效率受多重因素的影响,如物料的配比和物理化学性状、菌种的选择、温度、操作方法等<sup>[4]</sup>。通常对于辅料要尽量选择C/N值>50的。但由于某一单独物料在发酵过程中的实际生物降解率难以定量,不应以单一的C/N值作为依据选择辅料,还应同时考虑物料的生物降解率。本试验添加的油粕虽然C/N值低,但其分子质量和粒度小,有利于在发酵初期促进堆体快速升温。

为达到适宜的含水率,根据《城镇污水处理厂污泥好氧发酵技术规程》(T/CECS 536—2018),传统污泥好氧发酵常用的物料配比为污泥:辅料:返混料=100:(10~20):(50~60),辅料和返混料添加总量占比很大。而污泥深度脱水后含水率已达到60%,不需要以辅料和返混料调节含水率,可将物料配比调整至污泥:辅料:返混料=100:(10~16):(0~5)。在相同污泥干基处理规模下,污泥发酵前经过深度脱水至含水率为60%,污泥量减少1/2,好氧发酵添加的辅料可减少1/2以上,堆体总量减少约2/3。

此外,在深度脱水污泥好氧发酵中添加返混料,仅起到将发酵菌种带入下批次反应、促进升温的作用,因此可以添加少量菌剂替代返混料,在实际工程应用中可进一步节约返混料输送系统投资,减少发酵设施容积和占地。

### 3.2 污泥深度脱水好氧发酵工艺适用性

随着污泥行业和技术的发展,现代化的污泥处置设施对于占地、自动化程度、环境友好性提出了更高的要求。目前市场上已出现了多种现代化污泥发酵设备形式,如塔式、滚筒式、隧道仓式等,但基本上仍然以湿污泥为原料进行好氧发酵。尤其对于土地集约型、设备化污泥好氧发酵工程,前端深度脱水对于整体工艺的优化可能有相当的技术经济价值。

关于污泥深度脱水方式的选择,我国污水处理厂普遍具备污泥浓缩、脱水等通用技术环节,常用的



脱水设备包括带式脱水机、板框压滤机等,在不添加石灰的情况下,常规脱水方式只能将含水率降低至78%~82%。然而,有研究表明,石灰的添加会导致污泥产品发芽率降低,影响植物生长<sup>[5-6]</sup>,因此添加石灰的污泥深度脱水方式不适合用于污泥好氧发酵的预处理。为减轻污泥存储和处置压力,已有地区对污泥含水率进一步的降低提出了要求,污水处理厂采用污泥深度脱水工艺已越来越普遍。其中,低温干化、电渗透脱水等不添加石灰的工艺,既可实现污泥深度脱水,又可满足污泥后续好氧发酵的工艺要求,促进污泥的资源化土地利用。

#### 4 结论

针对污泥好氧发酵工艺,增加前端深度脱水环节可减少辅料添加量,同时保证污泥好氧发酵效率。深度脱水至含水率为60%的污泥进行好氧发酵,可采用污泥:辅料:返混料=100:(10~16):(0~5)的配料比。相比传统湿污泥好氧发酵,在相同干基处理规模下,添加的辅料和堆体总量可以减少约2/3。以本试验的方法进行污泥好氧发酵,一次发酵周期约为10~15 d,最高温度达到75℃,各项检测指标表明污泥产品满足土地安全利用的要求。对于现代化污泥好氧发酵工程,对污泥进行深度脱水预处理,具有节约占地和投资的明显优势,后续可结合实际工程进一步探索。

#### 参考文献:

- [1] 胡少华,潘移峰,陈涛. 污泥处理处置技术的现状与探讨[J]. 环境工程,2014,32(S1):762-764.  
HU Shaohua, PAN Yifeng, CHEN Tao. The state-of-art and exploration of sludge treatment & disposal technologies [J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (S1):762-764 (in Chinese).
- [2] 孙建升,叶雅丽,郑兴灿,等. 昆明市污水处理厂污泥处理工艺的研究与探讨[J]. 中国给水排水,2020,36(18):108-112.  
SUN Jiansheng, YE Yali, ZHENG Xingcan, et al. Research and discussion on the sludge disposal technology of Kunming WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2020,36(18):108-112 (in Chinese).
- [3] 孔建松,郑玉琪,陈同斌. 好氧堆肥过程中的氧气变化及其监测[J]. 生态环境,2003,12(2):237-239.  
KONG Jiansong, ZHENG Yuqi, CHEN Tongbin. Advances in research of oxygen in aerobic composting [J]. Ecology and Environment, 2003, 12 (2):237-239 (in Chinese).
- [4] 王首都,黄申斌,魏小玲,等. 立式移动地板发酵仓技术在崇明某污水厂的应用[J]. 中国给水排水,2020,36(14):138-141.  
WANG Shoudu, HUANG Shenbin, WEI Xiaoling, et al. Application of vertical mobile floor fermentation bin in a sewage treatment plant in Chongming District [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (14): 138-141 (in Chinese).
- [5] 谭施北,习金根,陈河龙,等. 添加菌剂和石灰对剑麻麻渣堆肥腐熟效果及养分含量的影响[J]. 中国农业科技导报,2020,22(2):166-172.  
TAN Shibe, XI Jinggen, CHEN Helong, et al. Effect of microbial inoculants and lime addition on composting maturity and nutrient content of sisal residue [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22 (2): 166-172 (in Chinese).
- [6] 和苗苗. 有机固体废弃物土地利用的生态风险机制及控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.  
HE Miaomiao. The Mechanism and Control of Ecological Risks on Land Applications of Organic Solid Wastes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009 (in Chinese).

作者简介:胡佩佩(1992-),女,浙江温州人,硕士,助理工程师,主要研究方向为市政污水及污泥处理处置技术和工艺设计。

E-mail:397104341@qq.com

收稿日期:2020-11-17

修回日期:2021-06-29

(编辑:任莹莹)