

# 城市污泥好氧发酵处理技术现状与对策

陈俊<sup>1,2</sup>, 陈同斌<sup>2</sup>, 高定<sup>2</sup>, 李君<sup>3</sup>, 张军<sup>1</sup>, 郑国砥<sup>2</sup>, 刘洪涛<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 3. 中国市政工程华北设计研究总院, 天津 300074)

**摘要:** “好氧发酵+土地利用”是适合我国国情的污泥处理与处置途径。总结了几种典型好氧发酵工艺在我国的应用现状,同时分析了制约好氧发酵技术在污泥处理行业推广应用的因素,主要包括工艺及设备的标准化程度低、臭气污染、部分地区调理剂短缺、发酵产品未被公众广泛接受等,其中工艺及设备的标准化程度低是制约工艺推广的最主要障碍。

**关键词:** 城市污泥; CTB工艺; 堆肥; 调理剂; 臭气污染

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2012)11-0105-04

## Current Status and Countermeasures of Aerobic Fermentation Technologies for Sewage Sludge Treatment in China

CHEN Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Tong-bin<sup>2</sup>, GAO Ding<sup>2</sup>, LI Jun<sup>3</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, ZHENG Guo-di<sup>2</sup>,  
LIU Hong-tao<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. North China Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** Aerobic fermentation plus land utilization is considered a suitable treatment and disposal method for sewage sludge in China. The applications of several typical aerobic fermentation processes were summarized. The factors restricting aerobic fermentation technologies in the sewage sludge treatment industry were analyzed. Limitations such as low standardization of the process and equipment, odor pollution, amendment shortage and low acceptance of fermentation products were discussed. Among these, the lack of standardization of the process and equipment is the vital restrictive factor.

**Key words:** sewage sludge; CTB process; composting; amendment; odor pollution

城市污泥的处理与处置途径主要有填埋、焚烧和好氧发酵(堆肥)后土地利用等。尽管填埋仍然是当前污泥处置的重要方式,但随着对其弊端的深入了解,选用的态度越来越谨慎。由于污泥呈半固态,含有大量不稳定有机质,直接填埋对填埋场破坏较大,且存在一定的安全隐患,许多国家对污泥进入

填埋场设置了严格的限制条件。欧盟国家对进入填埋场的污泥力学性能做了规定,并要求干物质中有机质比例 $<5\%$ <sup>[1]</sup>;我国《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋泥质》(CJ/T 249—2007)对城市污泥进入填埋场与生活垃圾混合填埋或作为填埋场覆盖土的含水率、pH值、混合比例等指标做了规定,杜绝未经

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA064703)

处理的脱水污泥直接进入填埋场。污泥焚烧虽然减量化彻底,但投资和运行成本高<sup>[2]</sup>,且焚烧过程容易排放汞、铅、二噁英等污染物,造成大气污染<sup>[3]</sup>。在美国,采用填埋和焚烧工艺处理城市固体废物所占的比例越来越少<sup>[4]</sup>。从20世纪80年代以后,能够回收能量和资源化再利用的厌氧消化和好氧高温发酵处理工艺所占比例逐年上升。

2009年,住房和城乡建设部、环境保护部和科学技术部联合发布了《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行)》,该文件鼓励符合标准的污泥进行好氧高温发酵处理并土地利用。2011年,住房和城乡建设部联合国家发展和改革委员会发布了《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》,进一步确立了“好氧发酵+土地利用”在污泥处置方面的主导地位。

## 1 好氧发酵工艺的应用现状

好氧发酵工艺可分为条垛式系统、密闭式反应器系统、强制通风静态垛系统和智能控制好氧高温发酵系统(CTB工艺)4种<sup>[5]</sup>,现对这4种发酵系统的优缺点及在我国的应用情况进行介绍。

### 1.1 条垛式系统

条垛式系统是一种最古老的堆肥方式,也是一种最简单的堆肥发酵系统,其特征是将堆肥物料以条垛状堆置,通过自然通风和机械翻堆方式向堆体供氧,通过较长时间的发酵过程,使物料达到腐熟。由于其建设成本低,所需设备少,操作简单<sup>[5]</sup>,在过去的堆肥厂中该系统是一种主流工艺,尤其是处理农业和畜禽废弃物的堆肥厂中大多选用该系统,在我国的大型城市污泥堆肥厂中北京市庞各庄污泥处理中心和河南洛阳市污泥处理中心也采用条垛式系统。条垛式发酵系统的缺点主要有:技术稳定性差、处理周期长、占地面积大、翻堆能耗高、臭气污染严重、腐熟与脱水效率低、难以进行自动控制、作业环境差等。因此,该工艺在多地少或对环境要求较高的地区难以得到普遍应用。

### 1.2 密闭式反应器系统

密闭式反应器系统是将物料置于部分或全部封闭的容器内,通过控制通风和水分条件,使物料进行生物降解和稳定化。密闭式反应器系统占地面积小,发酵过程中的温度、鼓风量、水分含量等参数易于控制,臭气收集方便,运转灵活,处理效率高,受天气条件的影响小。然而,密闭式反应器系统的主体

发酵过程在装置内完成,受容积限制,该工艺在规模上有一定局限性,只能适用于中小型污泥处理厂。目前该系统在国内的应用刚刚开始,对该系统的开发将是有机固废好氧高温发酵处理领域的一个新方向。

### 1.3 强制通风静态垛

强制通风静态垛系统通过鼓风机强制曝气为堆体供氧,不进行物料翻堆,能有效保证堆体的好氧状态,确保堆体达到高温杀灭病原菌的效果,该工艺处理周期和占地面积比条垛式系统大幅度缩减。采用强制通风静态垛系统可实现温度和氧气等参数的调控,保证堆体的好氧状态。强制通风静态垛系统工艺设备投资比条垛式系统高,由于该工艺具有处理过程不翻堆、单向强制通风和半开放的特点,堆体不同部位的物料腐熟程度不均匀,有些部位的物料可能难以完全腐熟<sup>[6]</sup>。

### 1.4 智能控制好氧高温发酵系统

中国科学院地理科学与资源研究所陈同斌等在强制通风静态垛工艺的基础上开发了智能控制好氧高温发酵工艺(简称CTB工艺)<sup>[7]</sup>。该工艺基于温度、氧气和臭气的在线监测,发酵过程采用专用智能控制软件(Compsoft)进行控制,根据堆体内部温度、氧气含量、耗氧速率和车间臭气状况等参数调节鼓风,使堆体始终处于良好的好氧状态,保证发酵过程顺利高效进行。为消除强制通风静态垛工艺单向通风引起的温度和氧气空间分布的差异造成的部分区域物料腐熟不充分的问题,工艺以静态发酵为主并辅以匀翻,消除发酵的死角。

智能控制好氧高温发酵工艺引入了智能控制技术,实现了发酵过程的实时在线监测,并根据发酵状态进行反馈控制,减轻了操作人员的劳动强度,保证了发酵产品的质量,是一种先进的处理工艺,代表了有机固体废弃物好氧发酵处理技术的发展方向。近几年国内新建的大型城市污泥好氧高温发酵工程大多都采用了CTB工艺,已经投入运行的有秦皇岛市绿港污水处理厂<sup>[7]</sup>、长春市污水处理厂、日照市污水处理厂、上海市松江区污水处理厂等。

## 2 好氧发酵技术的制约因素

传统堆肥技术是现代好氧发酵技术的起源。长期以来,人们一直采用堆肥方式处理农业废弃物或畜禽粪便,处理过程多在田间地头完成,管理粗放,对处理过程的时间成本、环境条件、机械化程度等均

未提出过高要求,导致该技术在过去很长的历史时期中技术进步一直比较缓慢。将该技术应用到城市污泥处理行业后,对其处理效率、运行的可靠性、产品的稳定性、恶臭污染程度等均提出了较高要求,目前所面临的制约因素主要有工艺的标准化和规范化、臭气污染问题、调理剂的来源、发酵产品的出路这几个方面。

## 2.1 工艺的标准化和规范化

好氧发酵工程的建设缺乏标准和规范的指导。针对污泥好氧发酵工程的设计规范、建设标准、施工安装规范、工程验收标准等均为空白。目前,只有少数有业绩和工程经验的研发机构和企业能够承担污泥好氧发酵处理工程的设计工作,大多数设计单位和环境工程领域的企业并不熟悉污泥好氧发酵处理工程。在污泥好氧发酵工程的建设、安装和验收过程中,也缺乏相应的标准和规范作指导,导致工程实施效果缺乏检验标准。

设备的标准化是推动行业快速发展的重要方面。污泥好氧发酵工程中采用的设备主要包括物料储存设备、物料输送设备、物料混合设备、筛分设备、物料运输设备、鼓风机设备、发酵设备、除臭设备及智能控制设备等,这些设备中只有少数设备是标准产品,如皮带机、螺旋输送机、鼓风机等,大多数设备均为非标产品,如混料机、污泥储存仓、调理剂储存仓、翻堆机、温度探头、氧气探头、臭气探头等,这些设备的制造和检验标准亟待出台。受住房和城乡建设部委托,北京中科博联环境工程有限公司已开始牵头制定《好氧堆肥氧气自动监测设备》、《垃圾源臭气实时在线监测设备》等标准。

## 2.2 臭气污染问题

无论采用何种技术处理城市污泥,都存在一定程度的臭气污染风险,因为在污泥的堆放、输送、处理等环节均会伴随着臭味气体的释放。采用好氧发酵工艺处理城市污泥,臭气污染风险更大。因为物料发酵过程会产生大量的挥发性物质,这些挥发性物质中有多种臭味气体,包括脂肪酸、胺类、芳香族化合物和环状物质、有机硫化物、萜烯、硫化氢、氨气等。若不能有效控制,恶臭气体会对厂区内部及周边环境造成严重污染,影响工程的运行,在国外有多起堆肥厂因臭气污染而关闭或重建的先例。

末端处理和过程控制是解决好氧发酵工程臭气污染的两条途径<sup>[8]</sup>。末端处理是对好氧发酵工程

各环节产生的臭气进行收集并通过末端处理装置进行有效处理后达标排放,臭气收集的环节主要有污泥储存车间、物料输送环节、发酵车间等,其处理工艺多采用生物滤池。但是,采用常规方法收集和和处理臭气存在臭气收集困难、处理过程能耗高的缺点。过程控制是通过调控物料的理化性质、优化发酵控制参数、保证物料好氧状态,在发酵过程中从源头上减少臭味气体的产生,从而降低末端处理装置的负荷,降低能耗和运行成本。已有工程运行经验表明,在采取良好的过程控制和末端处理的条件下,污泥好氧发酵工程的恶臭污染能够得到有效控制,不会对厂区及周边环境造成污染<sup>[8,9]</sup>。过程控制与末端处理相结合是解决污泥好氧发酵工程臭气污染的最佳策略。

## 2.3 调理剂的来源

调理剂的稳定供给是保证城市污泥好氧发酵工程稳定运行的重要因素。城市污泥是一种高含水率、低孔隙度、低碳氮比(C/N)物质,其含水率一般为80%左右,自由空域(FAS)极低,C/N值在(6:1)~(16:1)之间,无法直接进行发酵。在发酵前需混入一定量的调理剂将含水率、FAS和C/N值调节到适宜范围<sup>[10]</sup>。研究表明,堆肥发酵的最佳初始含水率为50%~60%、自由空域(FAS)为30%~36%、C/N值为25~35<sup>[11]</sup>。调理剂的使用量与其化学组成、水分含量和物理形态等有关。为减少调理剂用量,工程实践中可以回流部分腐熟的发酵产物。秦皇岛市绿港污泥处理厂的运行经验表明,调理剂的使用量约为污泥质量的10%~15%。

目前运行的污泥好氧发酵工程中,经常使用的调理剂有碎秸秆、锯末、木屑、蘑菇渣、花生壳等,对大多数地区而言,小麦、玉米、水稻等作物的秸秆是产生量较大的物料,然而作物秸秆季节性很强,在非收割季节难以大量提供,因此需要做好储存工作;锯末、木屑、蘑菇渣、花生壳等具有地域性,与当地的产业结构有关。所以,采用好氧发酵工艺处理城市污泥时,需对调理剂的供应量能否满足工程运行要求进行全面评估,避免因调理剂短缺而影响工程稳定运行。同时,应该加强合成调理剂的研发,减少污泥处理工程对这些有限资源的依赖。

## 2.4 发酵产品的出路

城市污泥发酵产品土地利用主要是担心其有害物质带来的环境风险。这些风险主要有重金属、病

原菌、杂草种子和不稳定有机质引起的烧苗等。其中病原菌、杂草种子和烧苗问题都可以通过发酵过程中微生物活动将不稳定有机质降解,生物反应产生热量使堆体维持足够的高温时间将病原菌和杂草种子杀灭,从而消除这些风险。人们对污泥重金属的担忧是限制污泥土地利用的最主要障碍<sup>[12]</sup>。然而,陈同斌等对全国100余座污水处理厂污泥重金属含量的取样调查表明,我国城市污泥中重金属含量普遍低于欧美等发达国家,超标率很低<sup>[12]</sup>,且我国城市污泥重金属含量呈持续降低趋势<sup>[13]</sup>。另外,高温好氧发酵处理可有效钝化污泥中的重金属,降低重金属污染的风险<sup>[14]</sup>。所以,在我国采用好氧发酵方式处理城市污泥并进行土地利用,重金属污染风险较小,不应该成为限制污泥发酵产品土地利用的主要障碍。

障碍的另一方面来自于我国的耕作习惯及国家的产业政策。对于使用者来说,有机肥运费相对较高,单位质量的有机肥肥效低于化肥,施用不便,所以有的农民不愿意选择购买有机肥。政府层面,化肥生产企业往往是当地的利税大户,受到了地方政府的扶持,所以有机肥生产产业发展较慢,与化肥相比处于边缘位置。随着人们对大量施用化肥带来的弊端的了解,国家开始重视有机肥产业的发展,自2008年起对于有机肥加工企业免征增值税,以鼓励行业的发展。近年来,农业部还从培肥土壤的角度推出“全国土壤有机质提升工程”,通过补贴形式鼓励农民大量施用有机肥。这些优惠政策的实施有望推动污泥好氧发酵产品在农业途径的应用。

### 3 结语

随着国家产业政策的倾斜,好氧发酵技术将成为解决城市污泥出路的主流工艺。智能化污泥好氧发酵技术因其具有效率高、成本低、运行稳定等优势,代表了好氧发酵技术的发展方向。然而,现阶段污泥好氧发酵技术的推广应用仍存在一些制约因素,主要表现在工艺和设备的标准化和规范化程度有待提高、能够承担污泥好氧发酵工程的设计单位较少、工艺设备的标准化和系列化程度较低、有些工程臭气污染较严重、有些地区调理剂供应量不足、公众对发酵产品的接受程度较低等方面。为促进好氧发酵技术的推广应用,相关企业及研究机构应不断完善技术方案,推进工艺的标准化和设备的成套化,

同时应加强宣传,提高公众对好氧发酵工艺的认同度。

### 参考文献:

- [1] 李金红,何群彪. 欧洲污泥处理处置概况[J]. 中国给水排水, 2005, 21(1): 101-103.
- [2] 鲁建新,赵铭,刘媛媛. 城市污水处理厂污泥焚烧处理的探讨[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(2): 60-62.
- [3] 张义安,高定,陈同斌,等. 城市污泥不同处理处置方式的成本和效益分析——以北京市为例[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 234-238.
- [4] Stroot P G, McMahon K D, Mackie R I *et al.* Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. digester performance [J]. Water Res, 2001, 35(7): 1804-1816.
- [5] 李艳霞,王敏健,王菊思,等. 固体废弃物的堆肥化处理技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, 1(4): 39-45.
- [6] 黄启飞,黄泽春,高定,等. 城市污泥堆肥温度的空间变异性研究[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 916-921.
- [7] 陈俊,陈同斌,高定,等. CTB自动控制污泥好氧发酵工艺工程实践[J]. 中国给水排水, 2010, 26(9): 138-140.
- [8] 陈俊. 城市污泥好氧生物发酵工程的臭气监测与控制[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2010.
- [9] 陈俊,高定,陈同斌,等. CTB污泥处理工艺的臭气控制效果研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(9): 134-136.
- [10] 张军,雷梅,高定,等. 堆肥调理剂研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 239-247.
- [11] 李国学,张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社, 2000.
- [12] 杨军,郭广慧,陈同斌,等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 122-124.
- [13] 陈同斌,郑国砥,高定,等. 关于《农用污泥中污染物控制标准》中锌限量值的讨论[J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1057-1065.
- [14] 高定,郑国砥,陈同斌,等. 堆肥处理对排水污泥中重金属的钝化作用[J]. 中国给水排水, 2007, 23(4): 7-10.

E-mail: chenjun1104@126.com

收稿日期: 2012-02-22