

有机废弃物好氧发酵反应器的开发和应用进展

柳蒙蒙^{1,2}, 刘越³, 高志永³, 陈亚松^{1,2*}, 陈述悦³, 马磊³, 刘瑶瑶³, 赵云鹏^{1,2}

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038; 2. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 北京 100038; 3. 中持水务股份有限公司, 北京 100192)

摘要: 好氧发酵是有机废弃物资源化利用的主要途径。在我国, 大规模好氧发酵处理工程正在快速发展。一体化好氧发酵设备适用于中小型规模养殖场粪污处理利用, 不仅可以提高堆肥产品质量, 还可以解决建设用地限制、降低建设成本, 对于促进我国畜禽养殖废弃物资源化利用具有重要意义。通过对国内外立式、卧式和新型好氧发酵设备及翻抛、曝气、控制等关键部件的研究发展现状进行综述, 提出好氧发酵设备目前研究进展及存在问题, 并提出研究重点。

关键词: 有机废弃物; 好氧发酵; 堆肥设备; 控制系统

中图分类号: S216.4; X713 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2024)01-0010-09

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024010010

Progress on the Development and Application of Aerobic Fermentation Reactor for Organic Waste / LIU Mengmeng^{1,2}, LIU Yue³, GAO Zhiyong³, CHEN Yasong^{1,2*}, CHEN Shuyue³, MA Lei³, LIU Yaoyao³, ZHAO Yunpeng^{1,2} / (1. YANGTZE Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. National Engineering Research Center for Ecological Environment of Yangtze River Economic Zone, Beijing 100038, China; 3. CSD Water service Co Ltd, Beijing 100192, China)

Abstract: Aerobic fermentation is one of the most important method for utilization of organic waste. In China, large-scale aerobic fermentation treatment projects are developing rapidly. The integrated aerobic fermentation equipment is suitable for the treatment and utilization of manure in both small and medium scale farms, which can not only improve the quality of compost products, but also solve the construction land restrictions and reduce construction costs, which is of great significance to promote the resource utilization of livestock and poultry breeding waste in China. By reviewing the current researches and development status of vertical, horizontal and new aerobic fermentation equipment and key components such as turning, aeration and control at home and abroad. The current research progress and problems of aerobic fermentation equipment are presented, and research priorities are proposed.

Key words: organic waste; aerobic fermentation; composting equipment; control system

目前,我国每年产生的固体有机废弃物总量已经超过2亿吨,其中有机废弃物占比较大。这些有机废弃物主要包括食品废弃物、农业废弃物、工业废弃物等。由于废弃物的来源和性质不同,处理方式也各不相同^[1]。目前,我国正积极推进有机废弃物的分类处理和资源化利用,以减少对环境的污染。一体化好氧发酵设备具有占地面积小、土建要求低、受环境影响小、发酵产品质量好以及臭味控制效果好等优点,因此备受关注,市场前景广阔^[2-3]。目前,市场上常见的一体化装置主要分为立式反应器

和卧式反应器两种类型,同时还有堆肥舱、槽、塔和滚筒等不同形式^[4]。目前,我国的一体化好氧发酵设备存在一系列问题,如通风供氧不均、曝气量大、控制系统难以实现自动化等^[5]。相比之下,反应器堆肥工艺起步较晚,主要通过将物料部分或全部封闭在容器内,调控系统的通风量和含水率等参数,使堆体进行生物腐熟和腐殖质的转化。这种堆肥工艺具有环境要求降低、密闭性好、易于收集和集中处理有害气体及渗滤液、堆体环境可控性较好、设备可重复利用等优点。但是,该工艺的前期研发与制造投

收稿日期: 2023-06-09

项目来源: 中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(202203373)

作者简介: 柳蒙蒙(1992-),男,中级工程师,主要从事污水处理与资源化等方面工作, E-mail: liu_mengmeng@ctg.com.cn

通信作者: 陈亚松, E-mail: chen_yasong@ctg.com.cn

入成本较高,这是一个比较明显的缺点^[6]。在上世纪70年代,我国开始研究开发好氧堆肥反应器,经过多年的努力和国家的大力支持,现在已经形成了一定的技术标准和配套设施。针对二次污染、堆肥消纳困难和技术体系不完善等问题,我国进行了进一步的探索和研究^[7]。现在,我国已经具备了多种立式、卧式好氧堆肥反应器的研制技术,并实现了高度机械化和自动化控制。这些反应器适用于我国的地域和环境。本文针对目前各类一体化好氧发酵设备及其研究进展进行了综述,分析了立式、卧式和新型好氧发酵反应器的特点、参数和存在的问题。最后,提出了进一步研发和改进的方向,为今后一体化好氧反应器的研发提供指导。

1 立式好氧发酵反应器

立式好氧发酵反应器是一种从上方进料、从底部出料的设备,适用于处理畜禽粪便、厨余垃圾、污泥和混合秸秆等物料的好氧发酵。该反应器具有占地面积小、适用范围广等特点^[8]。根据反应器的不同形式,它可以分为塔式反应器和仓式反应器(见图1、图2和表1)。

1.1 塔式反应器

塔式反应器和仓式反应器在外观上相似,但它们的堆肥机理不同。混合污泥和调理剂后,通过皮带机或提升机输送到反应器系统内,从顶部连续或间歇性输入。在内部翻板的作用下,堆体从上到下逐层掉落,同时与上升的空气对流,进行充氧。这样,堆体开始发酵,空气对流,冷空气与堆肥堆体发生热交换,堆体温度上升。因此,在塔顶部的堆体可以快速升温,促进堆肥反应的快速进行。堆体从顶部掉落的过程中实现翻堆和供氧的目的。在跌落到下层后,堆体开始静置发酵,可以在竖向空间上对堆肥过程的控制^[9]。王涛^[11]等针对中小型养殖场畜禽粪便堆肥工艺简单粗放、堆肥反应器简陋的问题,设计了一种多层塔式的小型堆肥反应器。该反应器具有占地面积小、机械化程度高、堆肥质量好等优点,并实现了精准数据实时采集和多模式反馈控制功能。该反应器用于解决中小型养殖场自产粪便处理问题,减少环境污染,提高养殖场收益。

1.2 仓式反应器

仓式反应器是一种立式结构的密闭式堆肥反应器,其堆体从上部加入,底部卸料,底部通风供氧,发酵产生的废气在筒仓上部收集后经过无害化处理达

标后排放。该反应器通常采用序批式的堆肥方式,堆肥周期为10 d。从底部取出的堆体一般会放入第2个筒仓进行二次堆肥,以进一步腐熟。常见的筒仓式堆肥反应器有容器式发酵筒和连续式发酵仓。该反应器具有结构简单、占地面积小、发酵升温快、发酵周期短和机械化程度高等优点。此外,该反应器还能对臭气进行集中处理,处理量大^[12]。研究人员使用生活垃圾进行静态仓式堆肥。堆层原料含水率为53.8%,有机物含量大于50%,堆层高度为1.4 m,并采用了保温措施。在开始阶段,通风时间为10 min,关机时间为30 min。在发酵期间,堆层内部温度一直保持在62℃以下。经过5 d的高温持续期后,进入降温阶段^[10]。尽管仓式反应器在中小型养殖场和家庭废弃物处理方面的应用越来越广泛,但该类反应器仍然存在堆体压实、通风不均匀等问题。为了更加注重节能减排,国外立式堆肥反应器也在不断发展。其中,Earth Tub和Wright等系统采用翻堆方式,Wright系统还采用液压机构进行搅拌,具有强劲的搅拌力^[13]。2000年,G-M Technologies公司生产的CCS堆肥反应器一体化水平较高,可实时监测和记录反应器内堆体环境,并通过闭环控制各个



图1 塔式反应器



图2 仓式反应器

反应装置进气阀门。堆肥结束后,可打开出料舱门并除杂^[14]。2005年,日本 C-ECOTEC 公司开发的筒仓式堆肥反应器可自动搅拌物料,通过逆向通风完成曝气,并在仓筒顶部进行臭气收集与处理。物

料腐熟后,可自动从下部出料。2015年,中机华丰公司研制的 C50 堆肥反应器集废弃物收集、储存及腐熟功能于一体,结构紧凑、自动化程度高^[15]。

表1 典型立式好氧发酵反应器

反应器类型	物料	搅拌类型	腐熟周期	通风类型	优势	参考文献	
塔板式反应器	重力翻板式	生活垃圾	重力翻抛	10	自然或强制	风耗小、占地面积小,能够根据初级发酵全过程的温度、供氧量、水分等的变化要求进行分层控制	[16]
	多层塔式	畜禽粪便	重力翻抛	8	强制	占地面积小,机械化程度高,堆肥质量好等优点,实现精准数据实时采集和多模式反馈控制功能	[17]
	密封塔式	畜禽粪便	重力翻抛	7	强制	自动换仓,自动调剂、稳定传送、连续排出	[18]
	自然通风式	锯末、粪便	重力翻抛	14	自然通风	通风管拔风原理工作,设备成本低	[19]
仓式反应器	仓式静态	生活垃圾	—	6~12	供风沟、供风管道或强制曝气	全部封闭的发酵仓内,控制通风和水分等条件,使垃圾物料在仓内进行生物降解和转化	[20]
	螺旋搅拌式	生活垃圾	螺旋翻抛	5~10	强制	原料升温快,臭气小	[21]

2 卧式好氧发酵反应器

卧式好氧发酵反应器是一种自动搅拌物料的设备,其工作方式为倾斜式横向作业,一端进料一端出料,逆向通风。该设备主要用于畜禽粪便的好氧堆肥,具有机械化程度高、占地面积大的特点。根据设备的工作方式和特点,卧式好氧发酵设备可分为滚筒式、隧道式和槽式好氧发酵反应器(见图3~图5)^[21]。该设备易于收集好氧发酵产生的废弃物,可自动完成进料和出料。然而,卧式好氧发酵反应器的运行成本较高,设备质量较大,维修和维护成本也较高。该设备一般水平放置,与水平面有一定夹角,进料口和出料口分别置于两端。在发酵过程中,通过转筒(输送带等、水平搅拌器)混合物料,将物料运送至出料口完成卸料^[22]。

2.1 滚筒式好氧发酵反应器

1983年,美国俄勒冈州的 Portland 城采用了 Taulman-Weiss 堆肥系统来处理城市污泥。该系统由一个封闭的滚筒组成,滚筒前方设有投料口,可加入堆肥原料。滚筒尾部通风,与物料形成逆流,提供发酵所需的氧气,从而实现气体与物料的充分接触,这种方式能够有效地处理污泥^[23]。DANO 滚筒是丹麦丹诺公司提出的一种堆肥系统,用于废弃物的处理。它是一种典型的水平流动工艺中的旋转滚筒反应器。滚筒支撑在支座上,沿水平方向稍微倾斜。物料从滚筒前端投入,滚筒后端有鼓风机进行通风。

通过机械传动装置使滚筒连续旋转,完成物料混合、供氧等过程,其中空气与物料流动方向相反。通过调整滚筒倾角和转速,可以调节物料发酵周期,这种堆肥系统能够有效地处理废弃物^[24]。爱温森(Eweson)推出了一种新型反应器——Bedminster 滚筒反应器系统,该系统是在转鼓式反应器的基础上开发而来。与 DANO 滚筒不同的是,Bedminster 滚筒反应器系统将整个滚筒分为3个独立但相互连接的舱室。物料在每个舱室中发酵一段时间后,会自动流入下一个舱室。此外,约有15%的物料会留在原舱室中,作为下一批物料的接种剂,以实现堆肥的快速启动。目前,Bedminster 系统、Augsburger 系统、EPTC 系统等多种滚筒反应器系统已经在工业领域得到广泛应用^[25]。典型滚筒式好氧发酵设备详见表2。

2010年,加拿大 Nioex 公司研制的 Blovator 卧式反应器采用喷水装置调节物料湿度,并通过内部抄板进行混料,实现了堆肥过程的全部自动化^[26]。许多学者针对这种滚筒式反应器做进一步改进,比如采用共转式托轮^[27],双层曝气结构^[28],反应器的底部设置空气扩散器,在空气注入反应堆之前设置空气加热器进行辅热^[29],增加自动供料系统等提高反应器的生产效率^[30]。

2.2 槽式堆肥系统

在20世纪中叶,日本人冈田发明了槽式堆肥系统,也称为 OKADA 工艺。该工艺需要先根据所使

表2 典型滚筒好氧发酵设备

类型	主要优势	主要劣势	参考文献
Taulman-Weiss 堆肥滚筒	逆向通风, 氧气混合效果好, 水平作业, 自动翻抛。	水蒸气、臭气收集不彻底, 分离不完全。	[23]
DANO 滚筒	空气与物料流动方向相反, 通过调整滚筒倾角和转速可调节物料发酵周期。	建设成本过高, 主机功率大, 土地利用率低。	[24]
Bedminster 滚筒反应器	滚筒被分为三个舱, 每个舱之间独立且连接, 物料经过一段时间的发酵后由一个舱进入下一个舱。	Bedminster 滚筒反应器通常需要在高温下运行, 但由于反应物在滚筒中的混合程度不均匀, 因此很难控制反应温度。	[25]
BIOvator 滚筒反应器	自动调整物料湿度; 自动供氧, 智能化程度高; 24 h 旋转, 日转 4 ~ 5 个周期; 工作环境完全密闭, 节省人工。	需要加入辅料, 混合程度高, 程序较复杂; 利用空间有限, 填料过多不易搅拌。	[26]
螺旋滚筒式反应器	共转托轮, 保证了转筒稳定性, 筒壁内置抄板, 便于混合供氧。	但该滚筒体积大, 不易安装与调试, 内置抄板不可自洁。	[27]
动态滚筒反应器	实现了自动出料和自动翻板, 可有效打碎块状物料, 采用双层曝气结构, 物料不易堵塞。	体积庞大, 占地较大; 结构复杂, 密封问题不易解决; 出口物料易堆积。	[28]



图3 滚筒反应器

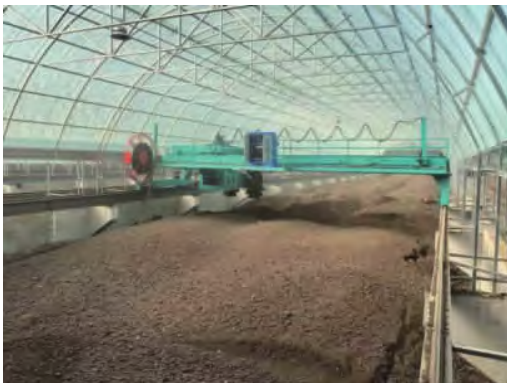


图4 槽式反应器



图5 隧道式反应器

用的翻抛机类型建造合适的发酵槽,并在槽上安装翻抛机行走的轨道。槽式堆肥工艺需要根据翻抛机的类型建设适用于该翻抛机的发酵槽,并将堆肥转为室内作业。曝气管布设在槽底部,轨道靠墙体支撑,翻堆机沿轨道运行并对堆体进行翻抛。该工艺处理量大、自动化程度高且空间利用率高,但运行成本高,适用于商业化堆肥^[31-33]。1972年,Marvin Urbanczyk制造出滚筒式翻堆机构,滚筒安装在工作架中间,根据不同高度的堆体上下调节,增强了翻抛机构的工作适应性^[34]。美国和加拿大联合研发的“新远东-圣甲虫”翻抛机构通过调节物料配比,生产出各类有机肥,从根本上解决了传统制肥工艺不足的问题^[35]。近年来,德国的BACKHUS公司专业生产翻抛机,产品已形成规模化和系列化^[36]。在我国,自上世纪70年代以后,市场上开始出现适合我国好氧堆肥的槽式翻抛机。随着我国设计与生产水平的提高,翻抛机性能有所进步。2008年,北京化工大学的张华^[37]等研制了有机固废进行深槽式堆肥的工艺,并以此设计了HC-01型深槽式螺旋搅拌堆肥装置,工作性能优良。同年,南京农业机械化研究所的彭宝良^[38]等根据卧式双向对置及组合链动刮板抛送粉碎结构,研制了作业顺畅、运行可靠、效率高和自平衡性能好的FP2500A型翻抛机。

2.3 隧道式好氧发酵反应器

隧道窑好氧发酵反应器是一种全密闭式的堆肥反应器系统,是在槽式堆肥系统的基础上,将发酵槽做成了相互独立的隧道式结构,在发酵和堆体翻堆过程中产生的臭气和粉尘被集中收集和处理,不会散发到空气中,避免了对环境和操作人员造成的不利影响。与槽式堆肥类似的是,隧道窑堆肥反应器

的底部布置了通风管,可以向槽内通风供氧。不同的是,隧道窑堆肥反应器还配置了输送带承载和移动堆体,行走过程中搅拌、通风和输出堆体,堆体在输送带上缓慢行走,翻堆机的位置是固定的,到达翻堆机位置时,由翻堆机进行翻抛。由于发酵过程在密闭空间中进行,堆体高度较高,温度上升较快,保温效果较好,堆体温度可以上升至 60 ℃ ~ 70 ℃ 以上^[39]。张智^[40]等开发了一种隧道式好氧发酵反应器,该设备采用间接进料式螺旋轴结构,可填充和移动物料。通过调整螺距和每天转动的圈数,可以确定物料的移动距离。此外,反应器还安装了条钢于螺旋轴中部,以充分搅拌物料,防止物料结块并产生局部厌氧环境。该反应器表现出良好的发酵效果,发酵周期为 8 d,通风量为 6.7 ~ 8.3 m³·h⁻¹·t⁻¹。经过处理,腐熟肥料的含水率和有机质降解率分别达到 35% 和 46%。各类立式反应器与卧式反应器在投资成本与处理规模上存在一定差异,具体如表 3 所示。

3 新型好氧发酵反应器

随着有机固体废弃物处理技术的快速发展,固体废弃物堆肥工艺已经广泛应用。这种趋势也推动了有机固体堆肥反应器的创新和发展,涌现了一批新型的堆肥反应器。堆肥工艺也从传统的粗放式堆

肥向工业化、设备化、自动化方向发展。目前,国外的研究针对农村生活垃圾开发了新型智能化反应器,以及对反应器应用条件的研究^[46],如太阳能发酵仓中试装置^[47],立式多层移动底板堆肥舱^[50],序批式一体化反应器^[51]、智能型膜覆盖好氧堆肥反应器系统^[52],集成了稳定化堆肥、生物抽风除臭和生物滤池处理垃圾渗滤液的功能,能够使垃圾减量化、无害化和资源化。具有发酵周期短、投资省、运行管理方便、能够就地处理当地产生的垃圾等特点。同时,研究人员开发了涉及大型养殖厂的好氧发酵一次发酵设备和二次发酵设备,组合了不同的处理工艺^[48-49]。其中两个发酵仓可以独立完成堆肥发酵,并通过二次污染控制系统有效减少废水和臭气的排放。此外,该组合还采用了空气加热系统,可以快速均匀地加热堆体,以满足不同堆肥工艺的需要,适用于大型养殖场中禽畜粪便等废弃物的发酵和利用,具体如表 4 所示。

4 新型好氧发酵反应器关键结构设备

新型好氧发酵反应器的关键结构设备主要有搅拌设备、加热设备、通风曝气设备以及控制系统。

4.1 搅拌设备

翻抛机构是用于好氧发酵设备内部的结构,主要用于翻转和充氧堆体,以促进物料内外混合更均

表 3 各类反应器差异对比

类型	发酵周期	投资成本	运行成本	处理规模	主要优势	主要劣势	参考文献	
立式反应器	塔式反应器	4 ~ 6 d	高	高	较大	堆肥过程由横向的空间变为竖向的空间变化过程,节省占地,处理能力强,处理效果稳定,本身具有一定的烟囱效应,可以节省通风供氧的能源,降低运行成本,堆肥产品腐熟度较高可以减少后续的堆肥投入。	曝气不够均一,塔楼主体采用钢结构材料,投资成本高,且钢质翻板长期与含有腐蚀性物质的畜禽粪便等物料接触,容易生锈腐蚀,影响发酵塔的使用寿命并提高维修成本。	[41]
	仓式反应器	10 d	低	较低	较小	机械化程度相对较低,多用于发酵孔隙较大、翻抛少且无添加剂的有机废弃物,使功能更加多样,发酵效果也更均一,造成本与操作难度较低,更容易大范围推广。	处理量相对小,多用于中小型养殖场或作为试验中试装置,结构一般比较简单,翻抛结构少,人力、物力耗费较大。	[42]
	滚筒式反应器	7 ~ 10 d	较高	高	适中	搅拌强度大、结构简单、密闭性较强、运行成本低等特点。	主机耗能较大。	[43]
卧式反应器	隧道式反应器	7 ~ 15 d	低	适中	大	自动化程度较高,无臭味,厂区运行环境较好,使用寿命较长,而且每个隧道都可以实现独立控制,可以适用于中大规模的堆肥项目。	能耗较高、维护成本高、防渗漏措施不易实施以及受环境影响大等方面。	[44]
	槽式堆肥	8 ~ 10 d	低	较低	大	处理量大;发酵周期短;堆肥产品质量均匀。	整槽翻堆,搅拌设备的功率较大,占地面积大,臭气收集效果差。	[45]

表4 新型好氧发酵反应器

反应器类型	物料	搅拌类型	腐熟周期 / d	通风类型	优势	参考文献
渗滤一体式	有机垃圾	—	36	负压吸气	适用于个体农户、成本低、滤液可收集。	[46]
太阳能发酵仓	畜禽粪便	—	20	强制曝气	太阳能供热,可在西北等低温区使用;成本高,受气候影响大。	[47]
两室发酵一体	畜禽粪便	螺旋翻抛	7	强制曝气	两反应室相互串联,有利于气体相互吸附;可进行一次和二次发酵。	[48]
串联发酵	秸秆和 畜禽粪便	桨叶翻抛	7	强制曝气	槽式和立式发酵设备串联,发酵效率高。	[49]
立式多层移动 底板堆肥舱	污泥	—	12	强制曝气	移动地板的物料推送、掉落实现污泥翻抛作业,自动化程度显著提高。	[50]
序批式一体 化反应器	秸秆、粪便 和树枝	桨叶翻抛	15	强制曝气	堆肥过程的自动化。	[51]
智能型膜覆 盖好氧堆肥	粪便	—	10	通风曝气	在线监测、数据导出、无线通讯和智能反馈控制。	[52]

匀,增加物料间孔隙率,加快发酵过程,并促进气体在内部的循环^[53](见图6)。翻抛机械的工作精度和抗疲劳强度已经得到了大幅提高,特别是仿真技术的运用,优化了翻抛结构,提高了关键部件的耐用性^[54]。翻抛结构的种类有很多,根据翻抛机结构类型可分为拨齿式、螺旋式、旋切式和桨叶式等^[55]。不同类型的翻抛机构各有异同和特点,各类型翻抛机构异同及特点见表5。为了适应不同的翻抛机类型,国内的一些企业和研究单位进行了大量的研究工作,并生产出了不同结构形式的翻抛机,例如某(北京)科技有限公司生产的链板式翻抛机和桨叶式翻抛机,以及广东省农机所研制生产的螺旋式翻抛机等。总之,翻抛机构在好氧发酵设备中起着至关重要的作用。

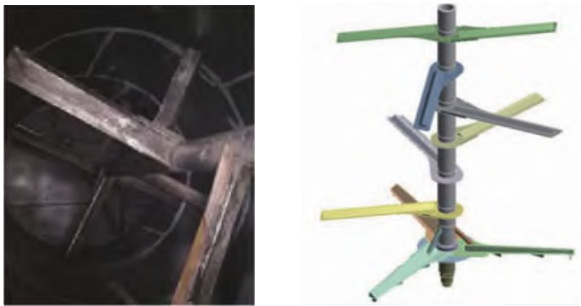


图6 反应器搅拌设备

4.2 加热设备

好氧发酵系统的加热设备主要作用是将发酵罐内的物料加热到所需的温度,以促进微生物的生长和代谢,从而实现发酵过程。加热设备可以提高发酵速率和产物质量,从而提高发酵效率,缩短发酵周期,降低生产成本。目前,好氧发酵系统中常用的加热方式包括电加热、蒸汽加热、燃气加热等。近年来,一些新型加热方式也开始应用于好氧发酵系统

中,如微波加热、红外线加热等。好氧发酵系统中的加热控制对发酵效果有着重要的影响。目前,研究人员通过建立数学模型、控制算法等手段,对好氧发酵系统的加热控制进行了深入研究。为了提高好氧发酵系统的加热效率和节能性,研究人员对加热设备的结构和材料进行了优化设计。例如,采用高效换热器、陶瓷加热棒等新型加热设备,可以提高加热效率和使用寿命。随着物联网、人工智能等技术的发展,好氧发酵系统的加热设备也开始向智能化方向发展。研究人员通过加入传感器、控制器等设备,实现对加热设备的远程监控和智能化控制。张玉良^[62]等针对畜禽粪便发酵工艺设计了一种“空气能+电加热”新型加热系统,该系统由PLC、空气能机、加热炉、温度传感器、内循环泵和外循环泵等器件构成,结构复杂,前期投入成本较高,但后期使用成本低。

4.3 通风曝气设备

曝气设备是一种供氧系统,旨在为好氧发酵提供所需的氧气。它能够增加堆体透气性,维持发酵环境的稳定,排除发酵过程中产生的二氧化碳、氨类气体和多余的水分等,直接影响微生物活性,从而加快或减缓发酵过程^[63]。曝气设备通常分为翻堆、被动通风和强制通风三类^[64],不同的通风方式对堆肥过程有不同的影响^[65]。强制通风是通过在堆体下方安装通风管,采用正压鼓风或负压抽风方式进行定量换气,也可在内部翻抛时增加供气量,以提高堆肥效果。相比之下,被动通风则是利用安装在堆体内部的穿孔管,利用堆体内外的温度差,由高压向低气压流动,带动有害气体与空气的自然交换,虽然不需要翻堆和强制曝气,也没有复杂的专用设备,但堆肥效果较差。重力翻板式曝气多用于塔式好氧堆

表5 不同翻抛结构性能分析

翻抛结构	主要参数	主要优点	主要缺点	参考文献
拨齿式	拨齿密度、拨齿长度	结构简单、易更换。	材料要求高,易缠绕。	[56]
螺旋式	螺旋轴、步进距离、叶片旋转角度与面积	电机正反转可实现进、出料,能耗小。	有轴螺旋叶片不可搅拌非牛顿流体。	[57]
旋切式	结构、形状、翻抛角度及旋切刀排布	可进行切碎、打散,前进方向阻力小。	对翻抛物料要求高,能耗较大。	[58]
桨叶式	桨叶长度、分布数量与间距大小	可圆周分布,搅拌彻底。	搅拌材料阻力小,桨叶强度韧性要求高。	[59]
翻料式	滚筒类型、翻版密度、工作面和倾斜角	翻抛量较大,可进行粉碎和协助曝气。	安装后不易更换,工作后清洗困难。	[60]
链板式	翻转角度、翻转速度	处理量大,自动化程度高。	设备体积大,能耗高。	[61]

肥中,其工作原理是利用设备机械力和物料自身重力,从发酵塔较高处逐级向下层翻抛,在物料下落过程中与氧气充分接触,并完成物料的初步发酵。通风控制方式有很多种,如时间控制、时间-温度控制、耗氧速率控制、综合控制等。时间控制方式可分为连续通风和间歇通风两种,其中间歇通风更适宜于堆肥过程。该控制方式设备投资少,易于操作和管理,如 Beltsville 方式。时间-温度联合控制的方式目标在于试图保持最佳的堆体温度,该方式设备投资较高,操作和管理较时间控制方式复杂,如 Rutgers 方式。此外,耗氧速率控制、综合控制等控制方式投资高,操作复杂,维护性差,应用较少。其中,时间控制和时间-温度联合控制的通风方式比较经济适宜,适用于中国国情^[66-68]。

4.4 控制系统

好氧发酵设备控制系统是指对好氧发酵过程中的温度、pH 值、氧气含量、搅拌速度等参数进行实时监测和控制的系统。目前,好氧发酵设备控制系统的研究现状主要表现在以下几个方面:在控制算法的研究方面,好氧发酵设备控制系统需要根据实时监测的数据进行控制,因此控制算法的研究至关重要。目前,常用的控制算法包括 PID 控制、模糊控制、神经网络控制等。在传感器技术的研究方面,好氧发酵设备控制系统需要实时监测温度、pH 值、氧气含量、搅拌速度等参数,因此传感器技术的研究对于系统的稳定性和精度至关重要。目前,常用的传感器技术包括光学传感器、电化学传感器、压力传感器等。在控制系统的硬件设计方面,好氧发酵设备控制系统需要具备高精度、高稳定性、高可靠性等特点,因此控制系统的硬件设计也是研究的重点之一。目前,常用的硬件设计方案包括单片机控制、PLC 控制、DSP 控制等。在控制系统的软件设计方面,好氧发酵设备控制系统的软件设计需要实现数据采集、

数据处理、控制算法实现等功能,因此软件设计也是研究的重点之一。目前,常用的软件设计方案包括 LabVIEW、C++、MATLAB 等。在堆肥领域,许多研究者设计了各种发酵系统和控制系统,以实现堆体环境的自动控制和优化。例如, Bertoldi^[69] 等使用气相色谱仪监测氧气浓度,并通过计算机控制鼓风机的风量来稳定堆肥环境。朱能武^[70] 等则使用温度传感器检测堆体温度,并通过控制风机的工作来实现对堆体的分层控制。蒋金明^[71] 则采用 PROFIBUS 现场总线技术,实现了对堆体温度、氧气浓度、含水率和鼓风机频率的在线实时监测和控制。张海波^[72] 等则建立了基于 STC89C52 单片机的“温度-时间”控制系统,通过控制通风供气量来调节堆体温度。孙言岩^[73] 等则设计了基于 3G 无线通讯的 SACT 污泥堆肥远程监控系统,实现了对物料参数的实时远程监测和调整优化。许佳瑜^[74] 等则利用神经网络对堆肥时长、原料质量、曝气量和 C/N 之间的参数关系进行研究,并设计了多点好氧堆肥试验装置和预测模型。这些系统和模型的研究和应用,为堆肥的自动化和优化提供了有力的支持。

5 展望

有机废弃物好氧发酵设备是一种将有机废弃物转化为有机肥料的技术。目前,有机废弃物好氧发酵设备的研究已经取得了一定的进展,研究主要包括优化设备结构,提高设备的发酵效率,控制发酵过程中的温度、湿度、通气等参数。曝气设备、翻抛设备和废弃物处理设备是影响好氧堆肥腐熟度优劣的重要组成部分。现今多数翻抛结构对物料的适应性不强,物料翻抛程度不够彻底,粉碎作用较小。加大实用性强和可规模化堆肥的一体化好氧发酵设备是突破当今好氧堆肥设备瓶颈的重要手段。应进一步从智能控制、翻抛、高效除臭等环节进一步提升好氧

发酵设备性能,提高有机肥品质和农业废弃物资源化利用水平。

参考文献:

- [1] 胡学玉,李学垣. 有机固体废弃物的堆肥化处理与资源化利用[J]. 农业环境与发展, 2002, 19(2): 20 - 21.
- [2] 郭光星,张茜,何子俊,等. 资源化好氧堆肥装置的设计[J]. 环保科技, 2016, 22(2): 26 - 29.
- [3] 张家才,胡荣桂,雷明刚,等. 畜禽粪便无害化处理技术研究进展[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(1): 85 - 90.
- [4] BERTOLDI M D, VALLINI G, PERA A. The biology of composting: A review [J]. *Waste Management Research*, 1983, 1(1): 157 - 176.
- [5] 李星. C50堆肥反应器的研究设计[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2015.
- [6] ZHU B, GIKAS P, ZHANG R, et al. Evaluation of the Rotary Drum Reactor Process as Municipal Solid Waste Pretreatment Technology for Biomass Utilization [C]. 生物质能源技术国际会议, 2008.
- [7] 魏源送,李承强,樊耀波,等. 浅谈堆肥设备[J]. 城市环境与城市生态, 2000(05): 17 - 20.
- [8] 张俊超. 立式好氧发酵罐在处理城市固体废物中的实践应用[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(3): 280 - 281.
- [9] 韦建吉,曾庆东,黄激文. 畜禽粪便塔式堆肥发酵无害化处理工艺与设备[J]. 现代农业装备, 2015(03): 51 - 54.
- [10] 蒲一涛,郑宗坤,石春芝,等. 静态好氧堆肥处理城市生活垃圾的工艺特性[J]. 环境卫生工程, 2003(4): 173 - 176.
- [11] 王涛,姚爱萍,徐锦大,等. 小型多层塔式堆肥反应器的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(08): 68 - 73.
- [12] 侯超,李永彬,徐鹏翔,等. 筒仓式堆肥反应器不同通风量对堆肥效果的影响[J]. 环境工程学报, 2017(08): 4737 - 4744.
- [13] SOARES M A, QUINA M M, QUINTAFERREIRA R M. Co-composting of eggshell waste in self-heating reactors: monitoring and end product quality. [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 148(11): 293.
- [14] RYNK R. Contained composting systems review. Part 1. [J]. *Biocycle*, 2000, 41(3): 30 - 36.
- [15] 李星. C50堆肥反应器的研究设计[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2015.
- [16] 陈海滨,万迎峰. 重力翻板式垃圾快速堆肥装置的工艺设计[J]. 环境卫生工程, 2006(01): 40 - 43.
- [17] 王涛,姚爱萍,徐锦大,等. 小型多层塔式堆肥反应器的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(08): 68 - 73.
- [18] 王玉新,任勇翔,王晓昌,等. 塔式自然通风好氧堆肥反应器的开发与应用[J]. 环境工程学报, 2014, 8(04): 1631 - 1636.
- [19] 孙冬,母晓东,毛丽琼. 生活垃圾仓式静态好氧发酵供风系统工艺设计[J]. 环境污染与防治, 2004(05): 390 - 392 + 320.
- [20] 胡天觉. 城市有机固体废物仓式好氧堆肥工艺改进及理论研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [21] 陈玲,赵建夫,李宇庆,等. 城市污水厂污泥快速好氧堆肥技术研究[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 192 - 195.
- [22] 杨杰. 好氧堆肥反应装置设计及其效能评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [23] 韩北忠. 滚筒式生物反应器固态发酵的应用研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(2): 96 - 100.
- [24] 马蔷,赵志顶,王奎升,等. 滚筒式生物反应器的设计及应力分析[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4581 - 4585.
- [25] LI Q, WANG X C, ZHANG H H, et al. Characteristics of nitrogen transformation and microbial community in an aerobic composting reactor under two typical temperatures. [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 137(11): 270 - 277.
- [26] 李国学,李玉春,李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252 - 256.
- [27] 马蔷. 城市生活垃圾好氧堆肥用滚筒式生物反应器的研制[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [28] 张海霞,李爱民,鞠茂伟. 小型好氧堆肥设备处理有机垃圾[J]. 环境工程学报, 2013, 7(05): 1939 - 1944.
- [29] LI Q, WANG X C, ZHANG H H, et al. Characteristics of nitrogen transformation and microbial community in an aerobic composting reactor under two typical temperatures. [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 137(11): 270 - 277.
- [30] 迟文慧,任勇翔,陈威,等. 梨形筒式好氧堆肥反应器的开发与应用[J]. 环境工程学报, 2013, 7(09): 3561 - 3566.
- [31] 耿宏超,王建平,陈启东,等. 耙爪式堆肥翻抛机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(04): 5 - 8.
- [32] BAX A, DAVIS D G. Practical aspects of two-dimensional transverse NOE spectroscopy [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 1985, 63(1): 207 - 213.
- [33] 李季,彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [34] YEPSEN R. Nuts&Bolts: window turners [J]. *Biocycle*

- September, 2008, 6(49): 237-240.
- [35] 秦现增,马戎,张华,等. 新远东——圣甲虫设备[J]. 农机科技推广, 2005(01): 41.
- [36] 周 纬. 槽式机械翻抛好氧发酵技术[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2012(04): 31-33.
- [37] 张 华,李秀金,蔡璐平,等. HC-01 深槽式螺旋搅拌堆肥装置的研制[J]. 农机化研究, 2008(3): 222-224, 227.
- [38] 彭宝良,胡志超,王海鸥,等. FP2500A 型有机肥翻抛机的研制[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 126-129.
- [39] 徐鹏翔. 反应器堆肥过程中氮素的转化特征及工艺优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- [40] 张 智,刘浏. 卧式螺旋污泥好氧动态堆肥技术的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(3): 112-116.
- [41] 周永信,农 斌,陆立海,等. 塔式高温好氧堆肥发酵处理工程实践[J]. 轻工科技, 2014(8): 96-97.
- [42] 居玉坤. 密闭仓式污泥高温好氧快速发酵资源化技术及应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 博士学位论文 2014.
- [43] 夏建芳,张振兴. 回转窑剖分式滚圈结构设计与接触应力分析[J]. 现代制造工程, 2008(11): 95-98.
- [44] 鹏 翔. 反应器堆肥过程中氮素的转化特征及工艺优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- [45] 王丽莉. 槽式堆肥体温度等理化性质的空间变异及其相关研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [46] 文国来,王德汉,李俊飞,等. 处理农村生活垃圾装置的研制及工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(06): 283-287.
- [47] 秦翠兰,王磊元,刘 飞,等. 新型太阳能堆肥反应装置设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 43-47.
- [48] 李鸣晓,席北斗,戴 京,等. 两室堆肥生物反应装置研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(8): 1092-1097.
- [49] 邹远志. 有机废弃物好氧发酵工艺与关键设备研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [50] 盛金良,赵 焱,郝冰波,等. 立式多层移动地板发酵仓及其液压系统设计[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(06): 54-57.
- [51] 冯 康. 序批式好氧发酵一体化反应器设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
- [52] 孙晓曦,崔儒秀,马双双,等. 智能型规模化膜覆盖好氧堆肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 356-362.
- [53] 钱 恺,田晋跃. 农业废弃物堆肥平面翻堆技术的应用[J]. 农机化研究, 2009(3): 189-192.
- [54] 张宝岩. 翻抛机翻抛装置的仿真分析[D]. 柳州: 广西科技大学, 2015.
- [55] 李国学,张福锁. 废物堆肥化与有机无机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [56] 盛金良,朱金龙,胡海鹤,等. 污泥膜覆盖好氧发酵堆体流场模拟及应用研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(01): 298-304.
- [57] 郭宪峰,孙长征,马学良,等. 链板式翻抛机在养鸡场堆肥中的应用[J]. 中国家禽, 2011(20): 47-49.
- [58] 刘新玲,庄佃霞. 全自动发酵翻拌机的设计研究[J]. 潍坊高等职业教育, 2012(03): 62-64.
- [59] 张海霞,李爱民,鞠茂伟. 小型好氧堆肥设备处理有机垃圾[J]. 环境工程学报, 2013, 7(05): 1939-1944.
- [60] 周艳文. 动态滚筒式污泥堆肥一体化设备的研制和应用[J]. 污染防治技术, 2016(02): 49-52.
- [61] 徐鹏翔,王大鹏,田学志等. 国内外堆肥翻抛机发展概况与应用[J]. 环境工程, 2013, S1: 547-549.
- [62] 张玉良,赵 国,龙东海. 一种节能的畜禽粪便转化有机肥设备的加热系统结构及工艺设计[J]. 农业与技术, 2020, 40(4): 3.
- [63] HAUG RT. Engineering principles of sludge composting[J]. Water Poll Control Fed, 2010, 51(8): 2189-2206.
- [64] 鲁 娟. 接种白腐菌对城市污泥堆肥腐熟度和养分转化的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [65] FEMANDES L, SARTAJ M. Comparative study of static pile composting using natural, forced and passive aeration methods[J]. Comp Sci Utiliz, 1997, 5(4): 65-77.
- [66] FINSTEIN M. S, MILLER F C, STROM P F. Monitoring and evaluating composting process performance[J]. Journal WPCF, 1986, 58(4): 272-278.
- [67] 魏源送,樊耀波,王敏健,等. 堆肥系统的通风控制方式[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 101-104.
- [68] 徐 红,樊耀波,王敏健. 污泥堆肥的通风及控制技术[J]. 环境科学进展, 1999, 7(4): 120-126.
- [69] DE BERTOLDI M, RUTILI A, CITTERIO B, et al. Composting Management: a New Process Control Through O₂ Feedback[J]. Waste Management Research, 1988, 6(1): 239-259.
- [70] 朱能武,邓昌彦,熊远著,等. 基于温度-时间的好氧堆肥通风控制系统的设计与运行效果[J]. 农业工程学报, 2003(04): 282-286.
- [71] 蒋金明. 垃圾堆肥自动控制系统设计[J]. 环境卫生工程, 2009, 17(04): 24-25+28.
- [72] 张海波,武占银,郑风玲,等. 基于单片机的堆肥好氧发酵时间-温度反馈控制系统研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(29): 364-367.
- [73] 孙言岩,李加文,王 涛,等. 基于 3G 无线通讯的 SACT 污泥堆肥远程监控系统[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(03): 78-80.
- [74] 许佳瑜. 好氧堆肥发酵装置设计及过程曝气控制的试验研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江八一农垦大学, 2019.