

智能型膜覆盖好氧堆肥反应器设计与试验

孙晓曦 马双双 韩鲁佳 黄光群
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 设计了一种智能型膜覆盖好氧堆肥反应器试验系统, 主要包括发酵系统、布气系统、覆膜系统和控制系统。依据热力学及相关原理, 进行了各子系统和整体系统的优化设计。发酵系统采用圆柱形反应器, 有效容积约 90 L; 布气系统采用变频泵精确调速, 可提供最大 20 L/min 曝气量, 曝气精度 0.1 L/min; 覆膜系统选用具有选择渗透性的聚四氟乙烯材料 Gore 膜并与发酵系统良好密封; 控制系统实现多点温度、氧体积分数、压力、气体监测以及经多元反馈实时调控通风供氧量。通过好氧堆肥性能试验并经物理、化学和生物学指标综合评价, 结果表明: 该膜覆盖好氧堆肥反应器试验系统具有良好的发酵效果, 智能化程度高, 可满足开展不同需求的膜覆盖好氧堆肥试验。

关键词: 反应器; 膜覆盖; 好氧堆肥; 设计; 性能试验

中图分类号: X705; S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0240-06

Design and Test on Lab-scale Intelligent Membrane-covered Aerobic Composting Reactor

Sun Xiaoxi Ma Shuangshuang Han Lujia Huang Guangqun
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The technology of membrane-covered compost is a good choice to more efficiently, environmentally and cost-effectively solve the problem of agriculture wastes' pollution. Researchers, company and government pay more attention to this new compost technology, while limited research can be only developed in composting plant. In order to develop membrane-covered compost test in laboratory, an lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor test system was presented, including fermentation system, gas distribution system, membrane-covered system and control system. In accordance with the thermodynamics and relevant principles, the whole system and subsystem of the reactor were optimized. The reactor tank was cylindrical and volume of the tank was 90 L. Aeration system can provide an accurate aeration with a frequency control fan, the maximum aeration rate was 20 L/min and the aeration accuracy was 0.1 L/min. A selected pervious membrane-covered system was designed which used PTFE as a core material compared with traditional aerobic composting reactor system. The membrane-covered system and fermentation system were connected by seats. A system of measurement and control was developed that can achieve temperature, oxygen concentration, pressure, aeration and gas real-time accurate monitoring and multivariate feedback control. The results of property test showed that the compost tests results were good according to main physical, chemical and biological indicators. In conclusion, various requests of compost tests can be satisfied by the lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor system.

Key words: reactor; membrane covered; aerobic composting; design; property test

收稿日期: 2016-09-05 修回日期: 2016-10-08
基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-12-0524) 和国家国际科技合作专项 (2015DFA90370)
作者简介: 孙晓曦 (1993—), 男, 博士生, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: sunxiaoxi@cau.edu.cn
通信作者: 黄光群 (1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: huangguangqun@126.com

引言

我国有机固体废弃物资源量巨大,以畜禽养殖业和种植业为例,畜禽粪便年产出量约为 38 亿 t,农作物秸秆年产出量约为 9 亿 t^[1]。好氧堆肥是有机固体废弃物实现无害化、减量化和资源化利用的重要途径^[2],其通过微生物作用可将富含有机物质和营养物质的有机固体废弃物转化为优质有机肥,与此同时,可有效减轻潜在的生态环境污染风险。

目前,有关好氧堆肥反应器装备技术的研究报道较多^[2-3],其中实验室规模好氧堆肥反应器因其工艺参数优化和对比试验具有较便捷、成本低、效率高等优点而被广泛应用,是规模化好氧堆肥研究的重要试验装备基础。张锐等^[4]设计的可控制通风供氧速率的实验室小型好氧堆肥反应器、张安琪等^[5]设计的实验室智能型好氧堆肥反应器、LI 等^[6]设计的滚筒式好氧堆肥反应器以及 LASHERMES 等^[7]设计的小型智能好氧堆肥反应器系统均可较好地实现模拟好氧堆肥的功能。

近年来,减少好氧堆肥过程臭气、温室气体的产生和排放成为关注的热点。膜覆盖好氧堆肥工程技术模式,相比传统好氧堆肥技术模式,具有供氧均匀、能耗低、气体产排少等优势,可减少 90% 的氨气和挥发性有机物的排放^[8-12]。但有关膜覆盖好氧堆肥的基础研究鲜见报道,盛金良等^[13]以污泥堆肥为研究对象,研制了一种膜覆盖好氧堆肥反应器装置,可满足一般性试验需求,但无法满足空间梯度差异比较研究且智能化程度较低。

本文设计一种智能型膜覆盖好氧堆肥反应器试验系统。

1 膜覆盖好氧堆肥反应器装置设计

膜覆盖好氧堆肥反应器试验装置主要包括发酵系统、布气系统、覆膜系统和控制系统 4 部分。该装置结构示意图如图 1 所示。

1.1 发酵系统

设计发酵系统最关键的是应保证其良好的保温性。由文献[14]可知,反应器发酵罐体满足

$$Q_{in} > Q_{out, W} + Q_{out, E} + Q_{out, S} + Q_{out, A} \quad (1)$$

式中 Q_{in} ——堆肥物料的产热量,即输入反应器的能量

$Q_{out, W}$ ——水分蒸发带走的热量

$Q_{out, E}$ ——散失在环境中的热量

$Q_{out, S}$ ——堆肥物料升温所需的热量

$Q_{out, A}$ ——加热空气所需的热量

堆料质量与反应器有效表面积之比应大于

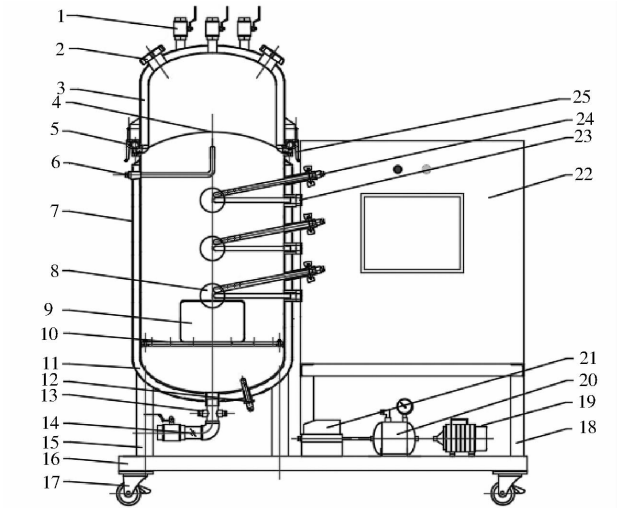


图 1 膜覆盖好氧堆肥反应器系统结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of membrane-covered aerobic composting reactor

1. 出气阀 2. 视窗 3. 保温罩 4. 选择渗透性膜 5. 紧固螺栓
6. 压力传感器监测口(监测膜下压力) 7. 发酵罐体 8. 取样口
9. 出料口 10. 布气筛 11. 聚氨酯发泡 12. 压力传感器监测口(监测进风压) 13. 进气口 14. 滤液聚集视窗 15. 三点釜式支撑结构 16. 移动平台 17. 双向万向轮 18. 布气系统 19. 气泵 20. 气囊 21. 流量计 22. 电控柜 23. 温度传感器 24. 压力传感器监测口(监测罐体内压力) 25. 锁扣

6. 31^[5];反应器发酵罐体选用圆柱形^[4];当堆肥装置直径小于 2.25 m 时,须采用保温措施^[15]。因此,本文中反应器发酵罐体设计为圆柱体,采用双层不锈钢结构,中间填充 22 mm 厚的聚氨酯保温材料。反应器发酵罐体高 0.6 m,内部直径 0.45 m,有效容积约为 90 L。为满足研究空间梯度差异需要,反应器上、中、下各设有一个取样口。为保证膜覆盖堆肥试验正常有效,反应器发酵罐体与覆膜系统间装有密封圈以保证其良好的密封性。通过预试验发现,由于膜系统保温保湿效果略差,故在其上部增加保温罩。

1.2 布气系统

设计布气系统需确定适宜的通风量。通常,以理论通风量最大值作为设计依据。理论通气量的计算一般涉及有机质分解所需通气量和堆体冷却所需通气量 2 部分。

1.2.1 有机质分解所需通气量

根据文献[15],氧化 1 kg 可降解有机质需氧 1.07 kg,而当干物质为 1 kg 时实际氧化可降解有机质为 0.125 kg,所以折算为空气量时,1 kg 干物质氧化 0.125 kg 可降解有机质所需的通气量为 480 L。

按照初始物料 60% 的含水率计,氧化 1 kg 初始物料所需通气量为 288 L。

1.2.2 物料冷却所需通气量

物料冷却所需通氧量的计算一般包括 2 部分,

即整个堆肥过程需要带走总水分所需通氧量,以及将水分带至空气中所需要的空气量^[14-15]。根据文献[16],单位质量干物质水分蒸发量计算公式为

$$M_s = \frac{1 - S_e}{S_e} - \frac{1 - V_e}{1 - V_r} \frac{1 - S_r}{S_r}$$

(2)

式中 M_s ——单位质量干物质水分蒸发量
 S_e ——最终物料含水率
 V_e ——最终物料挥发度
 V_r ——初始物料挥发度
 S_r ——初始物料含水率

按照初始物料 60% 的含水率,堆肥结束时以含水率 30% 计,初始与最终物料的挥发度设为一致。则可计算得,1 kg 干物料水分的蒸发量为 1.67 kg。

蒸发水分所需通气量计算公式^[15]为

$$G = \frac{M_s}{w_1 \psi_1 - w_2 \psi_2}$$

(3)

式中 G ——蒸发水分所需空气量, 1.295×10^{-6} L
 w_1 ——50℃ 空气饱和湿度,取 87.56 g/kg
 w_2 ——20℃ 反应器出气口饱和湿度,取 14.89 g/kg
 ψ_1 ——20℃ 环境相对湿度,取 100%
 ψ_2 ——50℃ 环境相对湿度,取 75%

经计算可得,蒸发 1 kg 干物料的水分时所需空气量为 16 888 L,物料初始含水率按 60% 计,则蒸发 1 kg 物料所需的空气量为 6 755 L。

反应器最大初始物料容纳量为 40 kg 左右,计算得整个堆肥过程中所需空气量约为 108 400 L,堆肥周期按 30 d 计算,布气方式采用间歇通风(通风 1 h、停歇 1 h)方式,最大平均通风量为 10 L/min。考虑到填充物料对实际通风的影响、半渗透膜对通风的影响并结合预试验情况,布气系统选用最大曝气量为 80 L/min 的变频式气泵,可实际提供最大 20 L/min 的曝气量,曝气精度可精确至 0.1 L。流量计选用量程 0.8 ~ 50 L/min,精度为 0.1 L/min。可满足精确通风供氧及数据采集的精确性。

1.3 覆膜系统

覆膜系统核心部分是具有选择渗透性的聚四氟乙烯膜,其具有良好的防水透湿性能^[17],对气体减排具有良好效果^[18]。本研究选用的膜材料为 Gore 膜,其主要参数如表 1 所示。

表 1 Gore 膜参数

Tab.1 Parameters of Gore-tex

参数	数值	测定方法
平均气孔直径/ μm	<0.2	GB/T 17639—2008
耐水性/kPa	>50	ISO 811/DIN EN ISO 20811
水蒸气渗透阻力/ $(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{W}^{-1})$	<19.5	EN 31092/ISO 11092:1993
透气性/ $(\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1})$	1.5 ~ 6.5	EN ISO 9237:1995

1.4 控制系统

1.4.1 监测点和传感器选型

该反应器系统可实现对堆体的多点温度、氧体积分数和压力进行连续监测、记录并及反馈至控制系统进行实时通风供氧调节控制。

反应器呈圆柱形,高度为 0.6 m,为满足其在轴向方向空间梯度差异研究需要,分别在其上、中、下部位设置有 3 组温度传感器和压力传感器监测点。反应器底部进风口处设置一个温度传感器以监测环境温度,反应器下腔布气区域以及膜下堆体上部空间各设置一个压力传感器接口,分别用以监测进风压及膜下压力。每一个压力传感器接口可同时连接气体监测装置以实现堆体内气体采集或在线监测。

温度传感器选用 PT100 型铂电阻,其具有测量精度高、稳定、测量量程大等优点^[19]。电容式真空压力传感器具有测量精度高、过载情况下不易损坏等优势^[20],故结合预试验情况并参照文献[13],选用电容式真空压力传感器,型号为 E + H PMD55 - 1KTA3/0,量程为 0 ~ 3 000 Pa,精度为 0.1%。堆体内气体监测采用多功能气体在线监测仪(GT2000 型,深圳市科尔诺电子科技有限公司生产),其可通过压力监测口同时在线监测氧气、二氧化碳、甲烷、氨气、氧化亚氮和硫化氢 6 种气体;也可通过压力监测口用气袋集气分析。

1.4.2 控制工艺与系统设计

该反应器控制系统可实现一元及多元反馈控制。图 2 为反应器工艺流程图界面,可实时监测反应器内部多点温度、压力、气流等。图 3 为参数设定界面,上半部分为功能选择区域,可进行反馈调节参数设定;左下半部分是功能控制模块,可选择开始或结束试验,同时也可选择开启或关闭不同反馈功能;右下半部分是参数设定模块,可根据试验需求设置反馈调节参数范围。

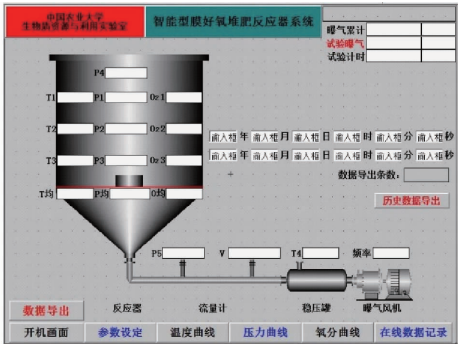


图 2 膜覆盖好氧堆肥反应器控制系统工艺流程界面图

Fig.2 Process interface diagram of membrane-covered aerobic composting reactor's control system

反应器控制系统的设计基于布气系统和试验数据监测模块,可实现对反应器内部相关试验数据的

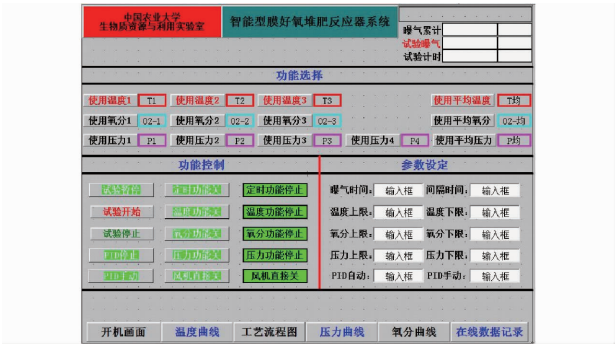


图 3 膜覆盖好氧堆肥反应器控制系统参数设定界面图

Fig. 3 Parameter setting interface diagram of membrane-covered aerobic composting reactor's control system

实时精确获取和 USB 接口快速导出。所选变频控制布气系统可对反应器进气量进行精确调节,频率调节范围 0~50 Hz,调节精度 0.1 Hz;曝气量调节范围 0~20 L/min,调节精度 0.1 L/min。

2 性能试验

2.1 试验设计

以猪粪和麦秸为试验原料。猪粪取自中国农业科学院畜禽养殖中心,秸秆取自中国农业大学上庄实验站并将其切短至 3~5 cm。堆肥前,将猪粪与秸秆按质量比 11.5:1 的比例混合均匀,调节其含水率在 60% 左右,碳氮比在 15 左右。原料及初始混合料的含水率(MC)、挥发性固体质量分数(VS)、总有机碳质量分数(TOC)、总氮质量分数(TN)及碳氮比(C/N)基本理化指标详见表 2。

表 2 堆肥物料基本理化性质					
Tab.2 Physicochemical properties of materials					
原料	MC/%	VS/%	TOC/%	TN/%	C/N
猪粪	67.24 ± 1.38	81.77 ± 0.31	35.24 ± 0.28	2.70 ± 0.08	13.05 ± 0.48
	5.13 ± 0.28	92.85 ± 0.32	42.36 ± 0.33	0.50 ± 0.04	71.80 ± 4.86
秸秆	62.27 ± 1.29	82.66 ± 0.31	35.81 ± 0.28	2.50 ± 0.08	15.34 ± 0.83

堆肥过程通风方式采用间歇式通风(通气 1 h,间隔 1 h),控制堆体氧体积分数处于 5%~15%。

性能试验评价指标选用堆体感官指标、温度、可挥发性固体含量、碳氮比以及种子发芽指数等。

2.2 结果与讨论

2.2.1 堆肥过程堆体感官特性

堆肥初期,堆体呈现暗黄绿色,臭味浓重。随着堆肥的进行,堆体呈现褐色,臭味变淡。堆肥后期,堆体呈现暗褐色,臭味基本消失,基本无团聚现象。

2.2.2 堆体温度

图 4 是反应器上、中、下层堆体温度和环境温度

随时间的变化曲线。由图可知,堆肥初期堆体升温较快,升至 50℃ 用时约 1 d。第 6 天堆体温度开始下降,至第 9 天温度降至 40℃ 左右并呈现缓慢下降趋势。堆肥第 9 天之后堆体上层温度略低是因为物料降解导致上层物料量较少所致。堆体温度符合有关标准^[21]。

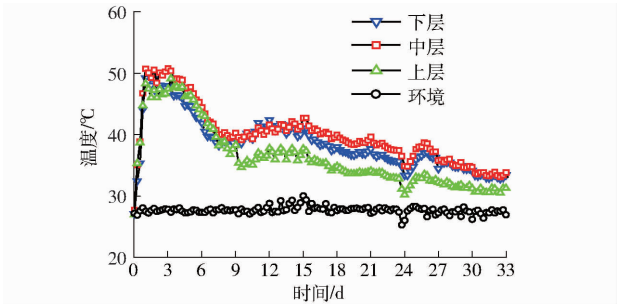


图 4 温度随时间的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of substrate temperatures

2.2.3 堆体氧体积分数

由文献[22]可知,堆肥过程氧体积分数适宜范围为 5%~15%。图 5 是堆体氧体积分数变化曲线,由图可知,堆肥前期堆体消耗氧气量大,随着反应进行逐渐减缓,堆体内氧体积分数逐渐上升。整个堆肥过程,堆体氧体积分数基本维持在 5%~15% 之间,满足好氧堆肥供氧需求。

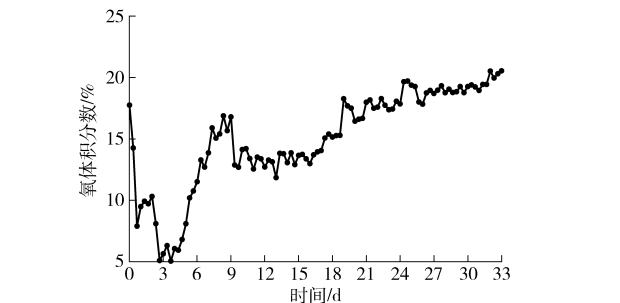


图 5 氧体积分数随时间的变化曲线

Fig. 5 Changing curve of oxygen concentration

2.2.4 堆肥过程压力

图 6 是反应器堆体内压力变化散点图,由图可知,堆体内压力基本上都在 1 000 Pa 以上,满足膜堆肥所要求的“微正压”环境,有利于氧气均匀分布于堆体以及微生物降解有机质需要供氧。

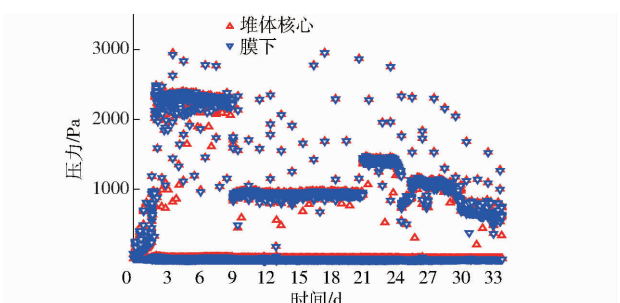


图 6 压力变化散点图

Fig. 6 Scatter figure of pressure

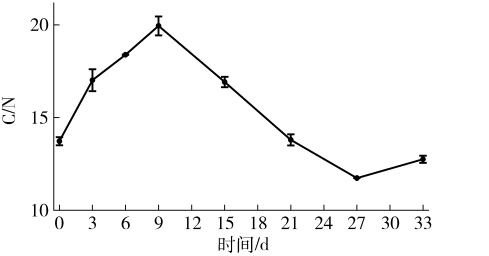


图 7 碳氮比随时间的变化曲线

Fig. 7 Changing curve of ratio of carbon to nitrogen

2.2.5 堆体碳氮比

图 7 是堆肥过程堆体碳氮比变化曲线。由图可知,堆体碳氮比呈现先升后降的变化趋势。根据相关文献[4]可知,堆肥过程是有机碳不断分解并通过二氧化碳形式逸散的过程,而堆体中氮由于氨气的挥发,前期呈现下降趋势,后期由于固氮作用,堆体总氮质量分数又会呈现上升趋势。堆体前期碳氮比上升可能因为有机碳降解速率低于总氮损失速率;堆肥中后期,有机碳降解速率逐渐提高,硝化作用促使堆体总氮质量分数逐渐提升,因此,堆肥中后期堆体碳氮比呈现下降趋势。

2.2.6 堆体挥发性固体质量分数

图 8 是堆体挥发性固体质量分数随时间的变化曲线。初始物料挥发性固体质量分数为 82.19%,堆肥末堆体挥发性固体质量分数为 77%。由于该反应器为试验模拟用,体积偏小,挥发性固体降解有限,但符合中小型反应器好氧堆肥挥发性固体降解规律和一般性要求[5]。

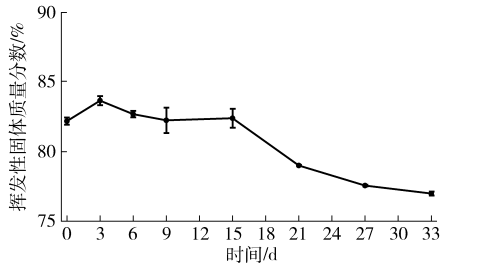


图 8 可挥发性固体质量分数随时间的变化曲线

Fig. 8 Changing curve of volatile solids

2.2.7 堆体种子发芽指数变化

种子发芽试验是评估堆肥植物毒性的一种简单有效的方法[23-25]。种子发芽指数达 80%~85%即可认为堆肥没有毒性或者堆肥已经腐熟[26]。根据文献[24],种子发芽指数计算公式为

$$G_l = \frac{A_1 A_2}{B_1 B_2} \times 100\%$$
 (4)

式中 G_l ——种子发芽指数
 A_1 ——堆肥提取液培养种子的发芽率
 A_2 ——堆肥提取液培养种子的总根长

B_1 ——去离子水培养种子的发芽率
 B_2 ——去离子水培养种子的总根长

如图 9 所示,第 0、3、6、9 天的种子发芽指数都在 50% 左右,堆肥第 15 天的种子发芽指数为 74.21%,堆肥第 21、27、33 天的种子发芽指数分别为 101.53%、105.7% 和 112.81%,该反应器对于去除堆体物料植物毒性效果明显。

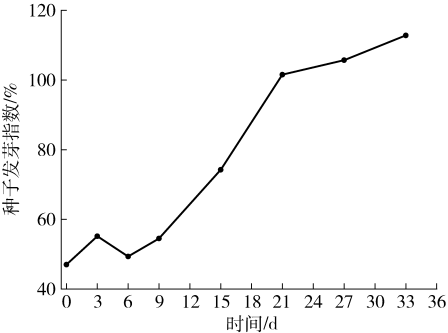


图 9 种子发芽指数随时间的变化曲线

Fig. 9 Changing curve of germination index

2.2.8 堆肥过程气体排放情况

整个堆肥过程,以单位质量干物质每天的排放量计算,甲烷最大排放量为 0.67 g,氨气最大排放量为 0.7 g。与传统的好氧堆肥技术相比[27-28],甲烷排放量减少了 40% 以上,氨气排放量减少了 30% 以上。该膜覆盖好氧堆肥反应器试验系统在气体减排方面效果明显。

设计的智能型膜覆盖好氧堆肥反应器试验系统,因具有精确曝气、多点多元关键参数在线精确监测和实时智能控制等功能,相比传统实验室用反应器系统投资成本略高,但具有供氧均匀、能耗较低、臭气和温室气体产排较少等优势;通过智能化优化控制,可有效改善好氧堆肥堆体微单元好氧反应环境,加速堆体腐熟,缩短堆肥周期,效率较高;通过显著减少能耗可有效降低产品成本,可有效确保获得优良的有机肥品质。

3 结论

(1)设计了一种膜覆盖好氧堆肥反应器试验系统,有效容积 90 L。其上部设有以 Gore 膜为核心的覆膜系统;布气系统通过变频控制可控布气流量范围为 0~20 L/min,精度 0.1 L/min;可实现堆体多点温度、氧体积分数、压力和气体实时监测和智能化反馈控制。

(2)由膜覆盖好氧堆肥反应器试验系统性能试验可知,该系统对于堆体物料发酵效果良好,并具有显著的气体减排作用,可满足开展膜覆盖好氧堆肥研究需要。

参 考 文 献

- 1 国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告(2014)[R]. 国家发展和改革委员会, 2014.
- 2 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社农业科技出版中心, 2005.
- 3 [美] 迪亚兹, [意] 贝托尔迪, [德] 比德林麦尔, 等. 堆肥科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- 4 张锐. 小型试验室好氧堆肥反应器系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
ZHANG Rui. Study on the bench-scale aerobic composting reactor system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 5 张安琪, 黄光群, 张绍英, 等. 好氧堆肥反应器试验系统设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 156 – 161.
ZHANG Anqi, HUANG Guangqun, ZHANG Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 156 – 161. (in Chinese)
- 6 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: 270 – 277.
- 7 LASHERMES G, BARRIUSO E, LE VILLIO-POITRENAUD M, et al. Composting in small laboratory pilots: performance and reproducibility [J]. Waste Management, 2012, 32(2): 271 – 277.
- 8 王涛. 膜覆盖条垛堆肥技术与应用案例[J]. 中国环保产业, 2013(12): 25 – 28.
WANG Tao. Twig buttress compost technology of membrane cover and application cases [J]. China Environmental Protection Industry, 2013(12): 25 – 28. (in Chinese)
- 9 SCHMIDT C E, CARD T R, KIEHL B. Composting trials evaluate VOC emissions control [J]. BioCycle, 2009, 50(4): 33 – 36.
- 10 BIASIOLI F, GASPERI F, ODORIZZI G, et al. PTR – MS monitoring of odour emissions from composting plants [J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2004, 239(2): 103 – 109.
- 11 LEVIS J W, BARLAZ M A. What is the most environmentally beneficial way to treat commercial food waste? [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(17): 7438 – 7444.
- 12 GONZÁLEZ I, ROBLEDÓ-MAHÓN T, SILVA-CASTRO G A, et al. Evolution of the composting process with semi-permeable film technology at industrial scale [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115: 245 – 254.
- 13 盛金良, 龚莹, 宫宁, 等. 污泥膜覆盖好氧发酵通风调节方法[J]. 环境工程学报, 2013, 7(2): 705 – 710.
SHENG Jinliang, GONG Ying, GONG Ning, et al. Ventilation adjustment methods in sludge static aerobic fermentation with membrane covering technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(2): 705 – 710. (in Chinese)
- 14 席北斗, 刘鸿亮, 孟伟, 等. 翻转式堆肥反应装置设计研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(9): 85 – 88.
XI Beidou, LIU Hongliang, MENG Wei, et al. Research on the design of a rotation composting reactor for municipal solid waste composting [J]. Techniques & Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(9): 85 – 88. (in Chinese)
- 15 戴芳, 曾光明, 袁兴中, 等. 新型堆肥装置设计及其应用研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 24 – 28.
DAI Fang, ZENG Guangming, YUAN Xingzhong, et al. Design of a new type of composting device and its application [J]. Techniques & Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(2): 24 – 28. (in Chinese)
- 16 蔡建成. 堆肥工程与堆肥工厂[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- 17 潘莺, 王善元. Gore-tex 防水透湿层压织物的概述[J]. 中国纺织大学学报, 1998, 24(5): 110 – 114.
- 18 张慧峰, 张卫东, 石冰洁, 等. 膨体聚四氟乙烯膜气体透过行为的研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(4): 9 – 12.
ZHANG Huifeng, ZHANG Weidong, SHI Bingjie, et al. Gas permeation behavior across expanded polytetrafluoroethylene membranes [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2003, 30(4): 9 – 12. (in Chinese)
- 19 隋洪岗. PT100 温度传感器在温度数据实时监测系统中的应用[J]. 电脑开发与应用, 2011, 24(4): 64 – 65.
SUI Honggang. Application of PT100 temperature sensor to real-time temperature monitoring system [J]. Computer Development & Applications, 2011, 24(4): 64 – 65. (in Chinese)
- 20 郭冰, 王冲. 压力传感器的现状与发展[J]. 中国仪器仪表, 2009(5): 72 – 75.
GUO Bing, WANG Chong. Development of pressure sensors [J]. China Instrumentation, 2009(5): 72 – 75. (in Chinese)
- 21 GB 7959—2012 粪便无害化卫生要求[S]. 2012.
- 22 LETON T G, STENTIFORD E I. Control of aeration in static pile composting [J]. Waste Management & Research, 1990, 8(1): 299 – 306.
- 23 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.
- 24 ZUCCONI F, PERA A, FORTE M, et al. Evaluating toxicity of immature compost [J]. BioCycle, 1981, 22(2): 54 – 57.
- 25 SELIM S M, ZAYED M S, ATTA H M. Evaluation of phytotoxicity of compost during composting process [J]. Nature and Science, 2012, 10(2): 69 – 77.
- 26 RIFFALDI R, SAVIOZZI A, LEVI-MINZI R. Water extracts of fresh and mature farmyard manure [J]. Biological Wastes, 1988, 23(1): 65 – 72.
- 27 GE J, HUANG G, HUANG J, et al. Particle-scale modeling of methane emission during pig manure/wheat straw aerobic composting [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(8): 4374 – 4383.
- 28 江滔. 堆肥化过程中温室气体产生机理及减排技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
JIANG Tao. The greenhouse gas formation mechanism during composting and mitigation technologies research [D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)