

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.040

智能型规模化膜覆盖好氧堆肥系统设计与试验

孙晓曦 崔儒秀 马双双 韩鲁佳 黄光群

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 设计了一种适用于规模化生产的节能环保智能型膜覆盖好氧堆肥系统, 主要包括总控系统、风控系统、传感系统和覆膜系统。结合上述各系统的功能性需求, 进行了系统整体性设计、功能模块独立设计选型, 该系统可实现堆肥关键参数的高精度实时监测、通风供氧的灵活智能反馈控制、多设备无线通讯等功能。利用该系统进行规模化膜覆盖好氧堆肥性能试验, 研究结果表明: 整个堆肥过程高温时段满足粪便无害化处理需求, 堆体氧浓度维持在适宜水平, 覆膜工艺下可确保堆体发酵状况良好。从所监测的流量、频率、温度、压力、氧浓度等多元参数和总体性能来看, 与传统技术模式相比, 该系统智能化程度显著提升, 生产能耗和气体产排显著降低。

关键词: 膜覆盖; 好氧堆肥; 规模化; 系统设计; 性能试验

中图分类号: X705; S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0356-07

Design and Test on Large-scale Semi-membrane-covered Compost System

SUN Xiaoxi CUI Ruxiu MA Shuangshuang HAN Lujia HUANG Guangqun

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the actual production and scientific research needs of semi-membrane-covered aerobic composting, a kind of energy-saving, environmentally friendly and intelligent semi-membrane covered aerobic composting system was designed, including a master control system, ventilation control system, sensor system and membrane sealing system. Based on the system functional requirements above, the work of designing holistic system, selection of function modules and independent design of each modules was done, specifically including: component selection and structure design of the master control system and ventilation control system, selection of sensors and establishment of monitoring methods, determination of communication methods, design of expansion module, selection of semi-membrane and an establishment of seal fixation solutions for membranes and compost pile and ventilation control program programming of membrane-covered compost system. Based on the above system modules, the device system can realize high-precision real-time monitoring and display of key parameters for composting, flexible and intelligent feedback control of ventilation and oxygen supply, and multi-device wireless communication and other functions. The China's conventional trough composting model was selected as the composting infrastructure. The performance of aerobic composting with membrane covering was studied by using cow manure from surrounding dairy farms and corn stalks in the planting area as the main compost material. The results showed that during the entire composting process, the maximum temperature of the body exceeded 70°C and the duration of high temperature met the requirements for the harmless treatment of manure. The oxygen concentration was maintained at a suitable level (higher than 5%), and the whole aerobic fermentation of the whole body under the film coating process was in good condition. From the actual conditions of the flow rate, frequency, temperature, pressure and oxygen concentration parameters monitored by the system and the realization effect of each functional module, each module of the system operated basically well and can basically realize the data of temperature,

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31771684)、国家奶牛产业技术体系项目(CARS-36)、教育部创新团队发展计划项目(IRT1293)和国家重点研发计划项目(2018YFD0800102)

作者简介: 孙晓曦(1993—),男,博士生,主要从事生物质资源利用研究,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利用研究,E-mail: huangguangqun@126.com

pressure, flow rate and frequency. The real-time acquisition, display and export functions enabled the local area network wireless communication functions of the total control system, the wind control system, and the PC, and can realize the function of intelligent feedback mode to adjust the ventilation mode. In general, the research and design of this equipment had a positive effect on the intelligence and greenness of China's aerobic composting equipment, but the system still needed to be further upgraded to meet the actual production needs of membrane-covered aerobic compost.

Key words: membrane covering; aerobic compost; large scale; design of system; property test

0 引言

目前,我国农业有机固体废弃物产出量巨大,其中每年畜禽粪便约为 38 亿 t,每年农作物秸秆约为 9 亿 t,但总体利用率不足 60%^[1],文献[2]中提出:到 2020 年,全国粪污综合利用率达 75% 以上。基于我国过量使用化肥所带来的农业成本上升、农产品质量下降、农业生态环境恶化的问题,农业部提出到 2020 年减少 20% 果菜茶化肥使用量的目标^[3]。

好氧堆肥是实现畜禽粪污资源肥料化利用的重要途径,我国现有的有机肥生产企业多以中小型为主,受成本所限,尚存在生产工艺落后、生产效率低下、能耗较高、生产的有机肥产品质量不高、生产过程环保性较差等问题^[4]。半渗透膜覆盖好氧堆肥工艺因其结构简单、操作便利、高效智能、节能环保、经济性较高,可以满足不同客户的不同需求,从而能够解决上述问题^[5-8]。

通过智能控制通风的方式,实现好氧堆肥过程中温度、氧浓度、水分的调节,可促进好氧堆肥的过程良性化。国内外学者基于不同类型好氧堆肥工艺研制了智能控制系统,并用于试验或实际生产^[9-12]。笔者所在团队率先在国内研发了智能型膜覆盖好氧堆肥反应器系统^[13]。基于前期研究基础,本文设计一种适用于规模化生产的节能环保智能型膜覆盖好氧堆肥系统,旨在满足规模化膜覆盖

好氧堆肥的绿色生产和智能化需求。

1 系统设计

智能型膜覆盖好氧堆肥系统包括传感系统、总控系统、风控系统及覆膜系统 4 部分,图 1 是该系统的设计思路及方案。

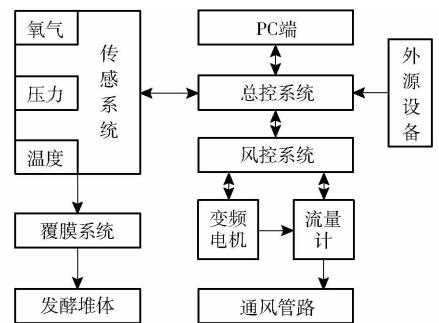


图 1 膜覆盖好氧堆肥系统设计思路及方案

Fig.1 Designing scheme of membrane-covered system

1.1 总控系统

图 2 是总控制系统的三维结构及操作界面的结构功能示意图。

总控系统作为智能型膜覆盖好氧堆肥系统的核心,主要用于对接各子系统,收集并处理来自各子系统的数字信号或模拟信号,并将其以模拟信号或数字信号输出,这种模拟信号可以在人机交互界面(Human machine interface, HMI)显示,也可通过通用串行总线(Universal serial bus, USB)接口以 Excel

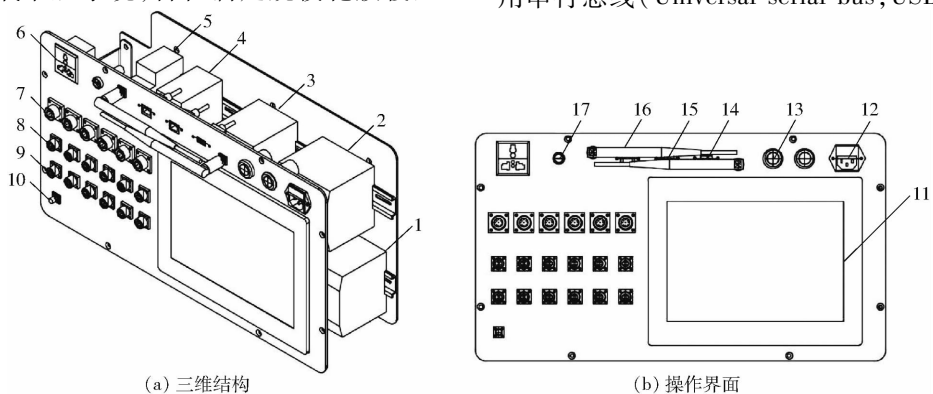


图 2 总控系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagrams of master control system

1. 无线通讯模块
2. 热电阻模块
3. PLC 主机
4. 模拟量模块
5. 微型断路器
6. 外接电源插口
7. 温度传感器接口
8. 氧浓度传感器接口
9. 压力传感器接口
10. 备用接口
11. 人机交互界面屏
12. 供电插口
13. 电源开关
14. USB 接口
15. 网线接口
16. 无线天线
17. 保险丝

文件的形式导出,或者通过接入该系统的计算机(Personal computer, PC)端查看。此外,总控系统具备控制各子系统的功能,目前该系统主要通过手动控制、自动控制及智能反馈控制3种方式用于各子系统的控制。上述功能实现所依赖的核心模块主要包括可编程控制器(Programmable logic controller, PLC)(T16S2R、T16S0R、S20M2R、S16M2R,厦门海为科技有限公司)模拟量模块(S04AI、S08AI)以及人机交互界面(C10,厦门海为科技有限公司)。

总控系统与各子系统的信号传递主要通过有线或无线两种方式,其中总控系统与传感系统的信号传递是通过P16型航空插头(宁波市重强电器有限公司)和电缆线实现。总控系统与风控系统以及PC端的信号传递则是通过无线方式(ZigBee)实现,这种无线功能的实现主要依赖于人机交互界面其本身具备无线功能以及总控系统与风控系统内部均配置的H0Z1B型无线通讯模块(厦门海为科技有限公司)。无线通讯方式一般分为两种:一种是基于以上无线通讯模块的局域网内通讯的功能,另一种则是基于具备云传输功能的人机交互界面,通过让系统接入互联网,则可使用相应的云平台操作软件实现PC端、手机端和该系统的云数据互通及云范围内的远程控制。

为维持总控系统各模块的正常供电运转,系统内部还接入了24V6EP1 332-1LA10型电源模块(西门子股份有限公司),用于将220V交流电转化为各控制元器件模块工作所需的24V直流电。为防止过载情况下电流过大可能会对各元器件造成的损坏,该系统配备了微型断路器(IC65N 2P C2, IC65N 2P C4, IC65N 4P D20, 施耐德电气有限公司)。

1.2 风控系统

风控系统属于子控制系统,其主要作用是用于

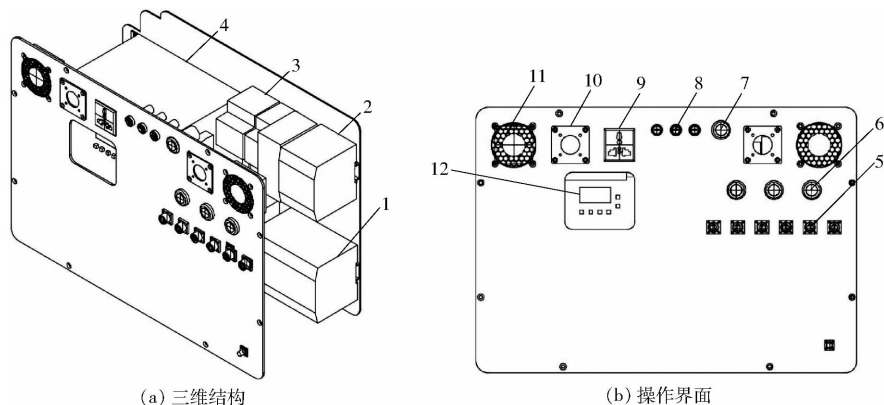


图3 风控系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagrams of blower control system

1. 无线通讯模块 2. 模拟量模块 3. 微型断路器 4. 变频器 5. 流量计接口 6. 工作指示灯
7. 电源开关 8. 保险丝 9. 外接电源插口 10. 风机接口 11. 散热器

连接位于不同位置的风机以及流量计,从而实现总控系统-风控系统-风机-流量计的信号互通。风控系统的核心部件是6SL3210-5BE31-1UA0型变频器(西门子股份有限公司),变频器接受总控系统的信号指令,并根据指令内容通过调整风机工作电源频率的方式控制调节风机风量。风控系统配有流量计用于测量各管路进风流量,本系统所选用的流量计为VT2WE二线E系列涡街式流量计(安徽皖科电子工程有限公司),其工作温度范围为0~50℃,压力上限38 kPa,量程0~480 m³/h,精度±0.5%,响应时间6 s。该类型流量计主要用于工业管道介质流体(如气体、液体、蒸汽等多种介质)的流量测量,其特点是压力损失小,量程范围大,精度高,在测量工况体积流量时几乎不受流体密度、压力、温度、粘度等参数的影响^[14],故该类型流量计适用于监测通风管路的进风流量。变频器、流量计向主控系统的信号传递过程可描述为:变频器或流量计输出4~20 mA电流信号,经无线通讯模块传送至PLC的模拟信号采集模块,再经无线模块传输至主控系统,经PLC的中央处理器(Central processing unit, CPU)处理之后,通过以态网的通讯方式将信号传输至触摸屏。图3是风控系统的结构图,与总控系统相似,风控系统配置了模拟量模块、无线通讯模块、航空插头、24V电源模块以及微型断路器等功能模块,以满足其数据采集传输、控制、电路保护等功能的实现。

1.3 传感系统

传感系统主要用于采集好氧堆肥过程中的关键性指标数据,本系统主要选用了温度、氧浓度及压力作为监测主要参数。选用PT100(铂热电阻)温度传感器,该类型的传感器因具备精度高、响应时间短、测量范围广的优势而被普遍用于好氧堆肥的监测领

域^[9,15],本温度传感器选用德国贺利氏公司生产的 M222 型传感器,该传感器的定制量程为 $-50 \sim 100^{\circ}\text{C}$,响应时间为 30 s 以内,稳定时间为 4 min 以内,精度为 $\pm 0.5\%$ 。在实际监测过程中,将传感器探头依照 3 个垂直梯度装在一根长 1.05 m 的金属套管中,并进行后续加工形成了三梯度插入式的温度在线监测装置,该装置的可监测深度分别为堆体下 1.05、0.7、0.35 m。该温度传感器与主控系统的信号传输过程可简单描述为:温度传感器输出 PT100 电信号并经由热电阻模块(H04RC、H08RC,厦门海为科技有限公司)将 PT100 电信号放大传输至 PLC 的 CPU 进行处理,CPU 再通过以太网的通讯方式传输到触摸屏,触摸屏主机经过处理后呈现出温度数值。

压力监测选用工业内常用的 WNK59M3 型扩散硅式智能压力传感器(安徽皖科电子有限公司),该传感器的常规量程最大为 700 Pa,但其量程比可达 100,响应时间为 200 ms,传感器精度受温度的影响为每 10°C 变化 $\pm 0.045\%$ 。该压力传感器精度高,响应时间快,抗过载能力强,适用于本领域的堆体内气体压力的监测。压力传感器与主控系统的信号传输过程可描述为:压力传感器将采集到的信号转换成 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 的电流信号,经电缆传送至 PLC 的模拟信号采集模块,经 PLC 的 CPU 处理之后,通过以太网的通讯方式将信号传输至触摸屏,触摸屏主机经过处理后呈现出压力数值。氧浓度监测由于在预试验阶段采用插入式的氧化锆氧浓度传感器效果不理想,氧浓度传感器防水性能未到达预期,故选用外源设备——英国 Geotech 公司生产的 Biogass 5000 进行监测。为更准确便捷地监测堆体内压力及氧浓度,压力监测装置与氧浓度传感器前端连接了具备通气作用的插入式不锈钢套管。

1.4 覆膜系统

覆膜系统主要包括半渗透性功能膜以及膜密封装置两部分。其中,半渗透性功能膜需要具备良好的防水透湿性能,以保证堆体内的水分在高温发酵期处在一个相对平衡的状态,并保证堆体后期的含水率可通过持续的水蒸气散失降至 30% 左右。此外,半渗透性功能膜需要具备良好的选择透过性,以减少 $10 \mu\text{m}$ 以上的颗粒物、病原菌以及臭气等有害物质的挥发。因用于强制通风好氧堆肥过程的功能膜会在堆体曝气时受到一定气压($3\,000 \sim 5\,000 \text{ Pa}$),故该膜材料的力学强度需达到一定要求。以聚四氟乙烯为核心材料的膜材料可具备以上功能特性^[16],近年来已经被用于膜覆盖好氧堆肥工艺中^[5,6,13,17],故本文选用的半渗透功能膜为志腾堆肥膜(青岛志腾科技有限公

司),其主要参数如表 1 所示。膜密封装置,因所采用的好氧堆肥基础设施不同而不同,如图 4 所示,本文基于槽式堆肥,利用翻抛机轨道构建了适用于槽式翻抛的膜密封装置。

表 1 半渗透膜参数

Tab. 1 Parameters of semi-permeable membrane

参数	数值
功能层材料	聚四氟乙烯
保护层材料	聚酯纤维
单位面积质量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	260 ~ 450
125 Pa 下透气性指数/ $(\text{m}^3\cdot(\text{min}\cdot\text{m})^{-1})$	0 ~ 0.028
200 Pa 下透湿性指数/ $(\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1})$	0 ~ 10^4
防水性指数/kPa	100
50 cm 宽度拉伸强度/ $(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2})$	9.3(经向),9.7(纬向)
延伸率/%	2.1(经向),3.6(纬向)
吸水性指数/%	≤ 8
抗紫外线时间/h	5 000

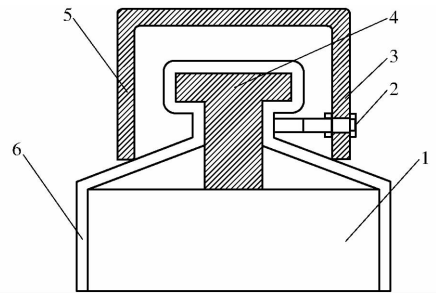


图 4 膜密封装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of membrane sealing device

1. 堆肥槽墙体 2. 六角螺栓 3. 六角螺母 4. 工字钢(翻抛机轨道) 5. 槽钢 6. 功能膜

1.5 控制工艺及外形设计

控制工艺程序是以 PLC 编程软件 HaiwellHappy (V2.2.4) 为基础,通过组态软件内部的各模块功能的调用、组合、编辑形成了满足膜覆盖好氧堆肥过程参数控制的工艺操作界面。图 5 是工艺操作界面图,其中图 5a 为数据显示界面图,可实时显示好氧堆肥过程中各接口对应的温度、压力、氧浓度、流量以及各风机的实际工作频率。图 5b 是参数设定界面,主要用于设定风机的通风方案,从左至右的 5 栏分别代表以时间、流量、压力、氧气以及温度作为基本参数进行通风调节的 5 种智能反馈模式,每一栏都可以通过设定反馈值或者反馈区间两种方式进行参数反馈控制,当实际值与所设参数值不符时,反馈控制功能启动,风机以最初设定的反馈工作值或区间进行调节直至实际值与所设参数值符合。此外,每一栏上部设有反馈参数功能选择按钮与反馈目标风机选择按钮,操作中可根据实际需求实现多参数多风机的灵活反馈功能。图 5c 是针对系统内重要传感器损坏而启用系统外部的设备时提出的通风工

艺备用解决方案,其实现流程为:首先由技术人员根据前几批试验的历史数据或文献里的数据,输入不同目标值(氧浓度、温度)下的通风参考方案(通风

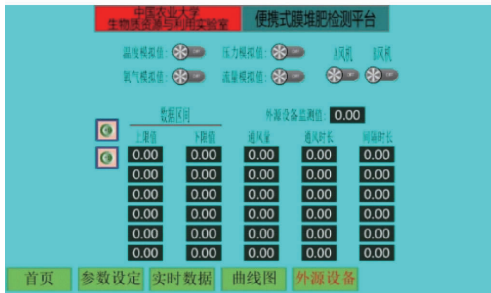
量、通风间隔),其次手动输入用外源设备所测的数值,则该模块会根据参考方案自动确立通风方案。图5d则是根据各参数所绘制的参数变化曲线。



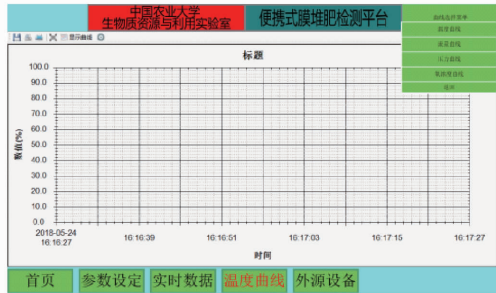
(a) 数据显示界面



(b) 参数设定界面



(c) 外源设备参数设定界面



(d) 数据变化曲线

图5 工艺操作界面示意图

Fig.5 Operation interfaces of process

2 性能试验

2.1 试验设计

基于以上膜覆盖好堆肥智能监测装备,进行了性能试验,针对其主要测定参数及性能稳定性进行了检验。本次试验所采用的原料是北京市顺义区周边奶牛养殖场生产的奶牛粪便,以及密云区农机合作社提供的打捆玉米秸秆,两者比例调至质量比大约10:1,并添加40%的腐熟堆肥用于调节水分。

试验采用堆肥槽由北京市北郎中有机肥料厂提供(长44 m,宽3.85 m,高1.8 m),试验时覆盖半渗透膜(图6c),覆膜方案与预设方案一致(图6h)。曝气采用一台最大通风量可达3100 m³/h的离心风机并经由改良过的通风管路实现(图6d)。总控系统设备平台(图6a)、风控系统设备平台(图6b)、温度监测装置(图6e)、压力监测装置(图6f)、氧浓度监测装置(图6g)与上文所述一致。

2.2 结果与讨论

图7a为本次试验的体积流量及频率变化曲线,本次试验采用4条通风管路送风至堆体的4个不同方位,由图7a可知,各管路的体积流量差别不大,基本上满足送风的均匀性。综合频率变化及体积流量变化来看,变频调节的方式稳定性高,相同频率下的体积流量基本趋于平稳。体积流量与频率在第8天的缺失是因为第8天全天进行了翻抛。

图7b为本次试验的温度变化曲线,在该系统控制下的堆体发酵情况较为良好,最高温度达到了70℃以上,且高温持续时间较长,符合国家粪便卫生化处理需求^[18]。此外,温度曲线在第22天时发生骤降,是由夜间环境温度过低导致的系统暂时性失灵所致,此外获取稳定温度约需8~10 min,比预计的4 min要长。图7c是氧浓度变化曲线,由图可知,堆体内氧气体积分数基本高于5%,证明覆膜系统作用下的堆体好氧程度较高,与已报道文献中合理的氧浓度区间范围一致^[19]。

压力分布是覆膜型好氧堆肥关注的重点过程指标,基于此可判断堆体内的通风是否良性,氧浓度分布是否均匀。根据所测的整个堆体的压力分布箱图可知(图7d),相同时间内,堆体不同位置压力差异较大,不同时间点压力也各不相同,自16 d之后,大部分压力基本上趋于零,这与文献[13,20]报道的压力分布规律差异较大。结合实际监测情况判断,一方面是由于插入式压力监测装置容易产生堵塞,一方面是由于堆体内气孔分布不均,堆体内气压不便采集所致。

与此同时,本系统的使用使得曝气方式更加智能,曝气效率更高,并降低了翻抛机的使用频率,从而在节能降耗方面表现优异。而覆膜系统的存在则可显著降低温室气体及环境恶臭气体的排放,该设备系统环保性表现优异。



图 6 堆肥试验过程

Fig. 6 Test pictures of compost process

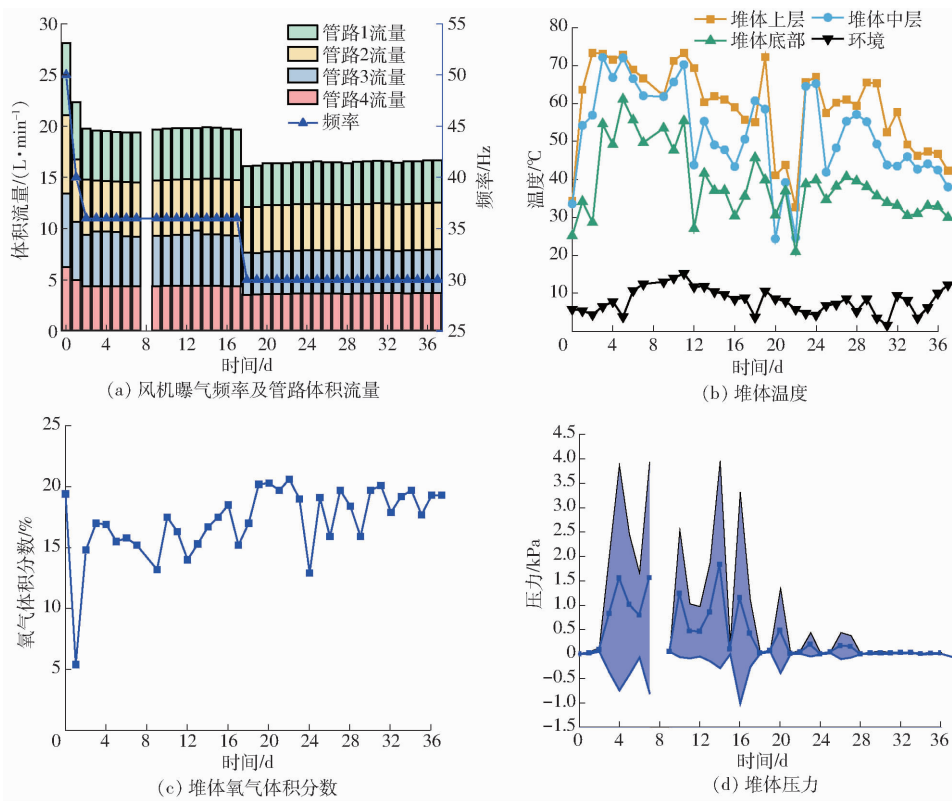


图 7 好氧堆肥过程参数监测结果

Fig. 7 Monitoring results of aerobic compost process parameters

3 结论

(1) 设计了一种适用于规模化生产的节能环保智能型膜覆盖好氧堆肥系统, 主要包括总控系统、风控系统、传感系统和覆膜系统 4 部分, 具备在线监测、数据导出、无线通讯和智能反馈控制功能。该系

统智能化程度显著提升, 生产能耗和气体产排显著降低。

(2) 利用所设计的节能环保智能型膜覆盖好氧堆肥系统进行性能试验, 结果表明: 该系统在实际应用中, 可实现较高的好氧堆肥发酵智能化控制水平, 且实际发酵效果良好。

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[J]. 中国经贸导刊, 2014, 7(30): 49-56.
- 2 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[J]. 再生资源与循环经济, 2017, 10(6): 11-14.
- 3 李书魁. 农业部通知开展果菜茶有机肥替代化肥行动[J]. 中国茶叶, 2017(2): 26-27.
- 4 符纯华, 单国芳. 我国有机肥产业发展与市场展望[J]. 化肥工业, 2017, 44(1): 9-12.
FU Chunhua, SHAN Guofang. Development of organic fertilizer industry in China and market outlook[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2017, 44(1): 9-12. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 马双双, 孙晓曦, 韩鲁佳, 等. 功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 344-349. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171142&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.042.
MA Shuangshuang, SUN Xiaoxi, HAN Lujia, et al. Reduction of ammonia emission during membrane-covered aerobic composting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 344-349. (in Chinese)
- 7 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.
- 8 SCHMIDT C E, CARD T R, KIEHL B. Composting trials evaluate VOC emissions control. [J]. Biocycle, 2009, 50(4): 33-36.
- 9 曾剑飞, 张安琪, 黄光群, 等. 规模化好氧堆肥温氧监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 186-191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.026.
ZENG Jianfei, ZHANG Anqi, HUANG Guangqun, et al. Design of temperature and oxygen monitoring system for large-scale aerobic composting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 186-191. (in Chinese)
- 10 余群, 董红敏, 张肇鲲. 国内外堆肥技术研究进展(综述)[J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(1): 109-112.
YU Qun, DONG Hongmin, ZHANG Zhaokun. Research progress on composting technology at home and abroad (review)[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2003, 30(1): 109-112. (in Chinese)
- 11 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/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 156-161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140725&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.025.
ZHANG Anqi, HUANG Guangqun, ZHANG Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 156-161. (in Chinese)
- 12 GUARDIA A D, PETIOT C, BENOIST J C, et al. Characterization and modelling of the heat transfers in a pilot-scale reactor during composting under forced aeration[J]. Waste Management, 2012, 32(6): 1091-1105.
- 13 孙晓曦, 马双双, 韩鲁佳, 等. 智能型膜覆盖好氧堆肥反应器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 240-245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161229&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.029.
SUN Xiaoxi, MA Shuangshuang, HAN Lujia, et al. Design and test on lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 240-245. (in Chinese)
- 14 苏文. 浅谈流量计的发展及现状[J]. 中国仪器仪表, 2002(6): 1-4.
SU Wen. Brief introduction of the application status and development of flowmeter[J]. China Instrumentation, 2002(6): 1-4. (in Chinese)
- 15 SHEN Y, CHEN T B, GAO D, et al. Online monitoring of volatile organic compound production and emission during sewage sludge composting[J]. Bioresource Technology, 2012, 123(4): 463-470.
- 16 张雨果, 谢苏江, 连光坤, 等. 膨体聚四氟乙烯的发展和应[J]. 液气气动与密封, 2014, 34(11): 6-10.
ZHANG Yuguo, XIE Sujiang, LIAN Guangkun, et al. Development and application of extending PTFE[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2014, 34(11): 6-10. (in Chinese)
- 17 GONZÁLEZ I, ROBLEDO-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.
- 18 卫生部. 粪便无害化卫生标准:GB 7959—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- 19 LETON T G, STENTIFORD E I. Control of aeration in static pile composting[J]. Waste Management & Research, 1990, 8(4): 299-306.
- 20 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(1): 298-304.
SHENG Jinliang, ZHU Jinlong, HU Haihe, et al. Research on application & flow field simulation of membrane-covered compost pile in sludge aerobic fermentation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(1): 298-304. (in Chinese)