doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.042

集约化层式好氧发酵智能装备设计与试验

姚玉梅[1,2]　张琦峰[1,2]　曾庆臻[1,2]　齐自成[1,2]　徐建南[3]　徐晓青[3]　朱洪安[3]

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 养分资源高效利用全国重点实验室, 济南 250100;
3. 山东圣甲虫环境工程有限公司, 潍坊 261100)

摘要: 设计了一款适用于多元有机废弃物快速无害化处理的节能环保型层式好氧发酵智能装备,主要包括发酵仓、布料系统、匀翻系统、增氧曝气系统、出料移位系统和控制系统。发酵仓采用层式箱体结构,有效容积为 136.51 m^3;位于箱体顶端的布料系统采用链式刮板结构;匀翻系统采用偏心翻转下料结构;增氧曝气系统通过变频泵调速进行流量调节和单层独立曝气;出料移位系统采用链式刮板出料,并通过输送带输送至陈化区;控制系统实现多点温度、含水率、压力、气体质量分数等数据监测,可多元反馈实时调控通风供氧。在此基础上,以鸡粪、牛粪沼渣、稻壳为主要原料,进行为期 4 d 的好氧发酵试验,检测发酵过程中关键参数变化并测定物料基础特性过程指标,完成装备性能试验。试验结果表明:内部堆体温度在 28 h 时升至 50℃,发酵过程中堆体最高温度可达 70.36℃,试验结束后发酵产物含水率降低至 34.35%,发酵效果良好;与传统技术模式相比,智能化程度高。

关键词: 有机废弃物; 好氧发酵; 层式堆肥反应器

中图分类号: S141.4; X705　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0445-08　　**OSID**:

Design and Test on Intelligent Equipment of Intensive Layered Aerobic Composting

YAO Yumei[1,2]　ZHANG Qifeng[1,2]　ZENG Qingzhen[1,2]　QI Zicheng[1,2]　XU Jiannan[3]　XU Xiaoqing[3]　ZHU Hongan[3]

(1. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences*, *Ji'nan* 250100, *China*
2. *State Key Laboratory of Nutrient Use and Management*, *Ji'nan* 250100, *China*
3. *Shandong Shengjiachong Environmental Engineering Co.*, *Ltd.*, *Weifang* 261100, *China*)

Abstract: The technology of intensive aerobic composting is an important approach to more efficiently, green, and environmentally solve the problem of agricultural waste pollution. It has attracted widespread attention from researchers, companies, and governments. An energy-saving and environmentally friendly intelligent equipment of layer aerobic composting was presented, including a fermentation tank, automatic distributing system, uniform flipping system, aeration system, discharge displacement system, and control system. The key system and the whole system of intelligent equipment were optimized. One of the most critical related studies was measuring the reliability of uniform flipping systems. It was the foundation for studying flipped material dropping applications. The fermentation tank was a layered box and the effective volume of the tank greater than was 136.51 m^3. The automatic distributing system located at the top of the box was selected by the chain scraper structure. The uniform flipping system was an eccentric flipping structure with a daily flipping capacity. Aeration systems can provide accurate aeration and single-layer independent aeration with a frequency control fan. The discharge displacement system selected a chain scraper and belt conveyor to realize material displacement. The control system was developed that achieved multi-point temperature, humidity, pressure, aeration, gas real-time monitoring, and multivariate feedback control. On this foundation, a 4-day composting test was conducted using chicken manure, cattle manure biogas residue, and rice husk as feedstock. The changes in key parameters of the composting process and the relevant indexes of fermentation production were detected. The results of the property test from intelligent equipment showed that the compost pile

收稿日期: 2024-08-08　修回日期: 2024-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002105)和山东省农业科学研究院创新工程人才类任务项目(CXGC2024F17)

作者简介: 姚玉梅(1992—),女,工程师,博士,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: Yaoyumei_sdnky@163.com

通信作者: 齐自成(1967—),男,研究员,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: qizcheng@sina.com

temperature reached 50℃ at 28 h, and the maximum temperature of the compost pile reached 70.36℃. The water content of the fermentation product was decreased to 34.35%. The composting test results were good, which had a high intelligence level. In conclusion, various requests for compost tests can be satisfied by intensive aerobic fermentation treatment of multiple organic wastes.

Key words: organic waste; aerobic composting; layered composting reactor

0 引言

2024 年中央一号文件明确指出“协同推进农村有机生活垃圾、粪污、农业生产有机废弃物资源化处理利用”。畜禽粪污、作物秸秆、尾菜等有机废弃物肥料化利用的重要途径是集约化好氧发酵[1]。将有机废弃物以适宜碳氮比、含水率、酸碱度等混合,在强制通风供氧条件下微生物分解有机质,可释放大量热量,使之无害化、腐质化形成稳定有机肥料[2-3]。目前,集约化好氧发酵工艺主要包括条垛式、槽(仓)式、反应器和覆膜式等[4]。其中,反应器式好氧发酵设备的实际工程应用已较为成熟[5],根据处理原料特点及规模不同,主要分为筒仓式、塔式、滚筒式、螺旋输送机式等,集上料、出料、翻堆、曝气、尾气控制等多种功能于一体,具有结构简单紧凑、自动化水平较高、便于污染物收集处理等优点[6]。

然而,传统的反应器式好氧发酵设备在实际生产中普遍存在多元有机废弃物发酵周期长、传质传热效果差、生产能耗高、污染风险高等问题[5]。文献[7]针对发酵过程中堆体起温速率慢、发酵不彻底的问题,设计了一种高效堆肥通风搅拌系统,并优化其堆肥通风和搅拌工艺,可实现 3 d 堆体温度达到 53.34 ℃,最高温度可达 69.56 ℃。文献[8]设计了一种多层塔式的小型堆肥反应器,通过内部翻转落料的方法实现物料混合和供氧。文献[9]设计了一种立式多层移动地板发酵仓,通过箱体地板往复移动实现物料前进,并在箱尾落入下层完成物料翻抛。

借鉴塔式堆肥反应器结构[10-11],本文设计一种层式好氧发酵智能装备,通过设计偏心下料器实现物料翻转落料,改善物料脱水、除臭、灭菌等无害化处理效果,进而提升有机废弃物资源化高效处理和循环利用水平。

1 层式好氧发酵智能装备设计与原理

1.1 整体结构设计

层式好氧发酵智能装备主要由进料口、布料系统、发酵仓、匀翻系统、增氧曝气系统、出料移位系统、控制系统等组成,并配有传感系统、除臭装置,如图 1 所示。智能装备由上层结构、2 个中层结构和底层结构组成,总长为 8.99 m,宽度为 2.65 m,总高为 5.73 m。整体框架结构由碳钢焊接组成并采用防腐工艺,外层板材罩壳采用镀锌板,接触内壁采用 304 号不锈钢,内设保温层采用聚氨酯发泡剂[12]。每层结构的高度不同,这是因为上层结构内有布料系统进行布料,下层结构下设有出料系统。增氧曝气系统采用单层独立曝气方式,格栅式的曝气管道位于匀翻系统上部,可保证在好氧发酵处理时管道居于堆体中间位置,曝气效果良好[9]。此外,其箱体长度支持灵活定制,纵向高度上可支持 8 层扩展,空间利用优势明显,在处理规模化有机废弃物时具有一定优势。

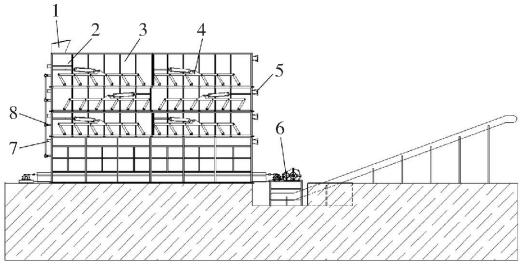

图 1 好氧发酵智能装备整体结构图

Fig. 1 Structure diagram of aerobic compost intelligent equipment

1. 进料口 2. 布料系统 3. 发酵仓 4. 匀翻系统 5. 臭气收集口 6. 出料移位系统 7. 送风口 8. 增氧曝气管道

采用智能装备处理有机废弃物流程如图 2 所示。有机废弃物经粉碎减量、清塑除杂、复配混料后,通过上料系统按照固定效率提升至智能装备顶端的进料口,通过布料系统自动智能化布料至第 1 层,控制系统根据仓内发酵温度升高情况智能控制层叠式匀翻系统进行翻转落料和增氧曝气,堆体依次翻落至第 2 层,同时第 1 层可以继续上料。第 2 层达到设定时间后,堆体翻转到第 3 层,第 1 层堆体翻转到第 2 层,第 1 层可以继续上料。以此类推,当堆体达到最后一层后经出料移位装置将好氧发酵产物移位至陈化区进行陈化处理。智能装备负压运行,尾气经除臭装置的生物处理、光氧催化等处理后达标排放[13]。该装备可大幅度提高处理效率,缩短发酵周期,发酵参数更易于控制和稳定,提高生物有机肥产品品质。

日均处理量计算公式为

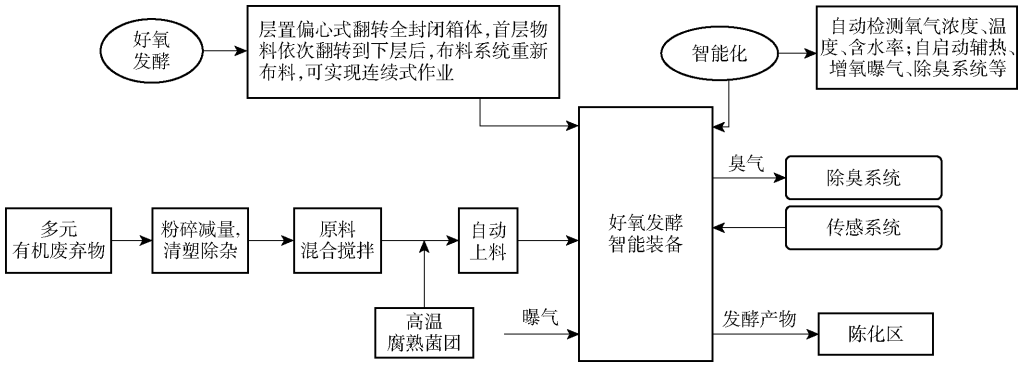

图 2　基于层式好氧发酵智能装备的有机废弃物处理流程

Fig. 2　Flowchart of organic waste utilization using layered aerobic composting intelligent equipment

$$E_d = \frac{aV}{T_z}$$

式中　E_d——日均处理量，m^3/d

V——盛料容器容积，m^3

T_z——发酵周期，d

a——装料系数，取 0.7（罐式）或 1.0（层叠式）

该装备理论日均处理量可达到 34.13 m^3/d，有效容积为 136.51 m^3。但考虑到待处理物料堆积密度，同时为保证曝气效果和翻料效率，每层宜铺设堆体厚度为 45 ~ 100 cm，若以每层物料铺设厚度 90 cm 计算，日均处理量为 21.44 m^3/d，满足规模化废弃物处理需求。

1.2　核心部件设计

层式好氧发酵智能装备的核心部件之一为匀翻系统，主要起到翻转落料、堆体分层发酵的作用。匀翻系统主要由气缸、连杆机构和若干偏心翻转下料器组成，整体结构紧凑，占用空间小。工作原理为：气缸一端连接空气压缩机，将气体压力转化为机械能，驱动连杆机构带动偏心翻转下料器做周期性往复翻转运动，从而实现堆体翻转落料。匀翻系统独特的结构设计，使得堆体物料在翻转落料过程中自由落体下落，整体系统间歇式运行，耗能水平低。作为匀翻系统的主要工作部件，偏心翻转下料器主要由转轴、若干柱状条、网板组成，其中，柱状条在转轴主体上等间距穿设，长边网板和短边网板通过若干喉箍固定在柱状条上，如图 3 所示。偏心翻转下料器转轴直径、柱状条数量、偏心比是决定匀翻系统是否节能翻转、安全可靠的关键。设计的偏心翻转下料器选用锰钢材质，表面做耐酸处理；转轴直径 70 mm 以上；柱状条以转轴为中心，直径 20 mm 以上，均匀分布 20 个，偏心比为 3∶4。

考虑到实际堆肥过程中，智能装备为连续进料，堆肥初期载荷大，物料黏度较高、流动性差且易出现板结，偏心翻转下料器作为直接接触部件易发生应力集中。为得出偏心翻转下料器的应力分布及变形情况，采用 Solidworks 软件自带 Simulation 插件对其进行静应力仿真分析，直观分析转轴直径、偏心距、柱状条数量分布等关键设计参数对其强度和变形情况的影响，并结合实际情况全面评估偏心翻转下料器的性能和可靠性。首先，确定堆肥过程偏心翻转下料器受到的最大载荷及产生最大载荷时刻，其次根据偏心翻转下料器工作条件对其转轴添加固定约束，对其开展静应力分析，结果如图 4 所示。由图 4 可知，偏心翻转下料器受到的最大应力为 311.30 MPa，抗拉强度为 355.00 MPa，容易变形的地方主要集中在转轴中间位置，所受应力小于抗拉强度。因此，偏心翻转下料器受力在安全范围之内，其结构尺寸、材料强度设计合理可靠。

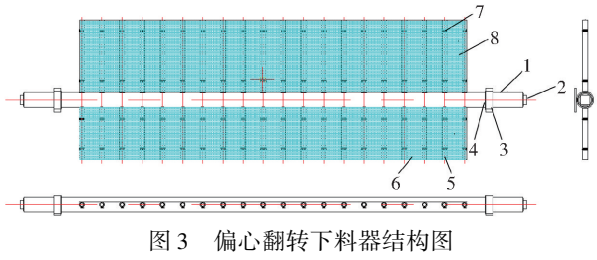

图 3　偏心翻转下料器结构图

Fig. 3　Structure diagram of eccentric turnover feeder

1. 芯轴　2. 管堵　3. 轴座　4. 挡圈　5. 柱状条　6. 短边网板　7. 喉箍　8. 长边网板

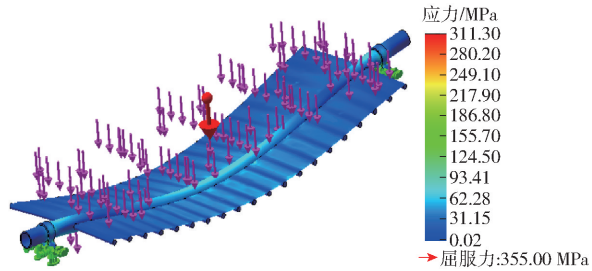

图 4　偏心翻转下料器静应力仿真分析

Fig. 4　Static stress simulation analysis of eccentric turnover feeder

1.3　控制工艺与系统设计

智能装备控制系统可实现一元及多元反馈控

制[7]。图 5 为智能装备控制工艺流程界面,可实时监测各工艺流程状态,实时获取智能装备内堆体温湿度、pH 值、压力等。控制系统设计采用 PLC 全自动控制系统和手动控制备用系统,其中,PLC 系统具备自动判断设备常规故障和报警提示的功能[14],并具备较强的联网功能,在国内互联网覆盖区域内可实现办公室计算机、智能手机远程监控和操作。

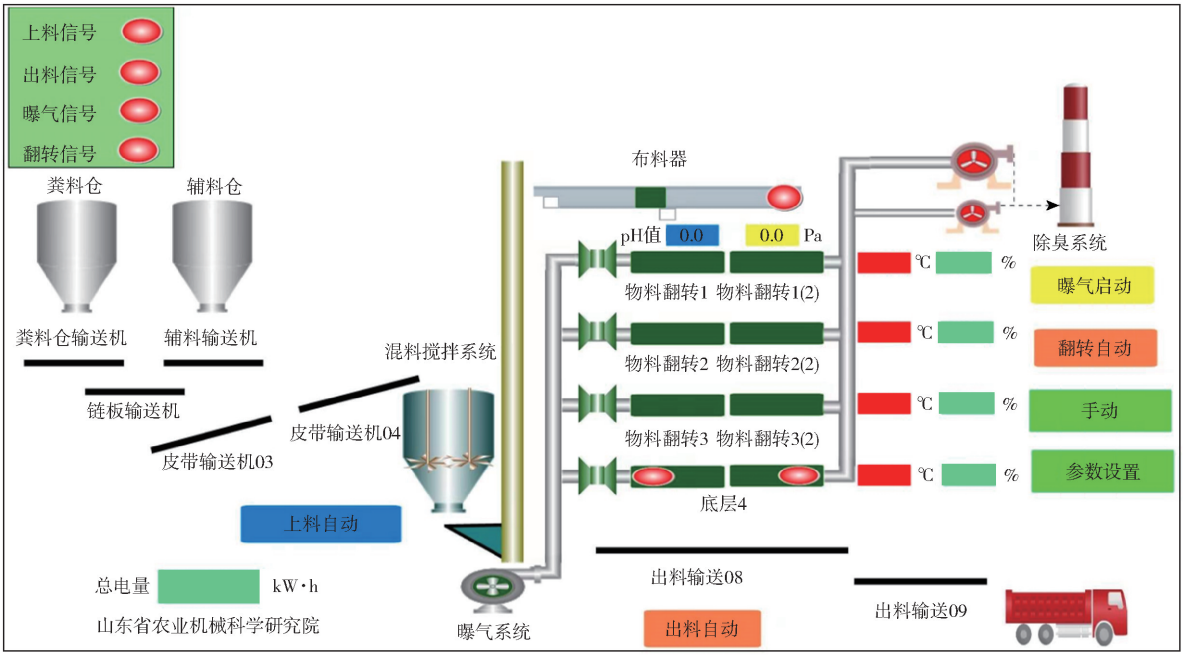

图 5 控制系统主界面

Fig. 5 Main display interface of control system for intelligent equipment

1.4 工作原理

层式好氧发酵智能装备外部罩壳与内有的层叠式匀翻系统部件形成类似蒸笼结构。待处理物料由顶端的布料系统撒布在顶层,此时,匀翻系统和堆体形成相对封闭的热量屏障。当堆体依次翻转落料到下层后,散发的热量可继续给上层堆体提供能量,最大程度利用了堆体发酵产生的热量。智能装备采用堆体内强制曝气、层间独立通风与翻转落料相结合的方式,可维持堆肥过程中 O_2 浓度整体处于好氧状态。由于装备内各层的空气受热不均,高温潮湿的气体在通风作用下形成对流,发酵仓存在的温度梯度差异导致热量与气压会凝聚于顶部[8],促进堆体升温发酵,形成了定时由上向下翻料-热量由下向上循环利用的“蒸笼效应”。此外,考虑到复杂环境的制约,发酵过程中若堆体自身发酵温度不足时,可启动智能装备底部的辅热系统提供热量。根据温度传感器的温度反馈,该装备智能判定匀翻系统将堆体翻转依次向下传送,并通过智能增氧曝气装置、送风口和除臭装置加快仓内空气流动,整体结构和热量传递符合有机质堆肥好氧发酵热量需求规律。

2 性能试验

2.1 试验设计

采用设计的层式好氧发酵智能装备开展性能试验。试验所采用的原料为山东省济南市平阴县周边种植场产生的稻壳废弃物,周边养殖场产生的鸡粪,当地奶牛养殖场生产处理的牛粪沼渣,以及山东佐田氏生物科技有限公司自主调配的枯草芽孢杆菌微生物菌剂。好氧发酵处理前,按照鸡粪、牛粪沼渣、稻壳质量比 3∶5∶2 混合,混合物料含水率调节至 48% ~ 55%,初始 pH 值为 5.5 ~ 7.5,碳氮比为(20 ~ 30)∶1,并喷施微生物菌剂,菌剂添加量为 0.02%。试验原料和初始混合物料的含水率、挥发性固体质量分数、总有机碳质量分数、总氮质量分数及碳氮比等基本理化指标如表 1 所示。

初始混合物料经上料系统输送至层式好氧发酵智能装备进行好氧发酵,通过智能自动控制系统在发酵仓内自动翻料曝气发酵,发酵周期为 4 d。在试验过程中,每日 08:00 待单层翻转落料后再进行顶层布料,间歇式通风,风量为 0.05 ~ 0.20 $m^3/(min \cdot m^3)$;配备的温度传感器实时采集好氧发酵过程中各层堆体温度数据,同时用水银温度计测定并记录环境温度。针对同一批次物料,分别在好氧发酵试验初始和第 1、2、3、4 天时分别取智能装备对应层数(第 1 ~ 4 层)的上、中、下 3 点固体样品,混匀作为代表性样本,编号分别为 D0、D1、D2、D3、D4;在出料结构处采集好氧发酵产物的代表性样本,编号为 D5。6 份代表性样本于 -20℃ 保存用于基础理化指标测定。

表 1　原料和初始混合物料基础理化特性参数

Tab. 1　Physicochemical properties of raw materials and initial mixed materials

参数	鸡粪	牛粪沼渣	稻壳	初始混合物料
含水率/%	49.55 ±0.18	50.21 ±0.20	5.10 ±0.03	48.95 ±0.25
挥发性固体质量分数/%	81.46 ±0.81	51.67 ±0.62	90.27 ±0.31	63.20 ±3.20
总有机碳质量分数/%	30.75 ±0.62	14.17 ±0.22	40.37 ±0.26	19.25 ±0.05
总氮质量分数/%	1.52 ±0.02	0.38 ±0.01	0.42 ±0.01	0.96 ±0.01
碳氮比	20.23 ±0.14	37.62 ±0.30	96.15 ±1.67	20.05 ±0.16

性能试验评价指标选用 pH 值、含水率、挥发性固体质量分数、总有机碳质量分数、总氮质量分数、木质纤维素质量分数以及种子发芽指数等，操作步骤参照文献[15]略有改动。将鲜样和去离子水按固液比 0.1 g/mL 浸提过滤取其上清液，采用 PHS－3C 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定 pH 值；采用 PHG－9123A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)在 105 ℃条件下干燥至质量恒定，计算样本含水率；样本经烘干、粉碎处理后，采用 SX2－8－10 型程控箱式电阻炉(天津市天宇实验仪器有限公司)在(575 ±25)℃条件下燃烧至质量恒定，计算样本挥发性固体质量分数；采用 Vario EL Ⅲ型元素分析仪(Elementar 公司，德国)测定总有机碳质量分数、总氮质量分数并计算碳氮比；参照美国国家可再生能源实验室测定农业生物质标准方法(NREL/TP－510－42618)测定样本中纤维素、半纤维素和木质素质量分数；将鲜样和去离子水按固液比 0.1 g/mL 浸提过滤取其上清液，采用早熟 5 号水萝卜种子在 25℃培养 48 h 后测定发芽率和根长，计算种子发芽指数。

2.2　数据分析

数据表示方法采用平均值 ± 标准差，统计分析及相关性分析采用 SPSS V20.0 软件(IBM，美国)进行。采用 Origin 8.5 作图(OriginLab 公司，美国)。

2.3　结果与讨论

2.3.1　基础理化指标

(1)温度

温度是判断好氧堆肥过程的重要参数[16]。图 6 为智能装备顶层、第 2～4 层堆体温度和环境温度随时间的变化曲线。如图 6 所示，堆体温度在智能装备的 4 层结构相差较大，经历了升温期、高温期和降温期 3 个典型阶段[17]，与文献[18]报道一致。好氧堆肥初期，顶层堆体升温较慢，温度在 27～40℃范围内波动；当堆体翻转至第 2 层后，堆体升温较快，升至 50℃共用时约 28 h，随后温度继续升高，最高温度可达 70.36 ℃，这是由于在高温下，复杂的有机物如纤维素、半纤维素、高分子脂肪、蛋白质及复杂碳水化合物也开始被强烈分解，堆体温度继续

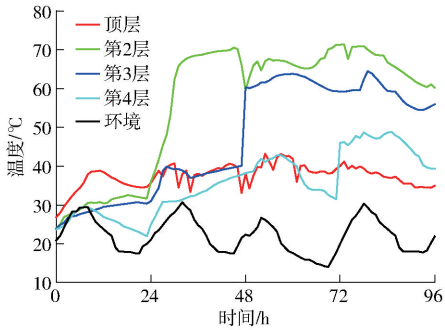

图 6　温度随时间的变化曲线

Fig. 6　Changing curves of substrate temperatures

升高[19]；当堆体翻转至第 3 层后，温度一直维持在高温状态，同时，高温期产生的热量会杀死有害病原体和杂草种子等；当堆体翻转至第 4 层后，温度呈现先升高后降低趋势，数值在 39～48℃范围内波动。高温期主要集中在第 2 层和第 3 层，但温度相差不大，这是由于智能装备采用单层独立曝气供氧方式，且增氧曝气管道设于堆体内部，不需考虑单层堆体在垂直方向上存在温度梯度差异[4]。此外，环境温度波动明显是由于试验期间智能装备安装在半户外，夜间环境温度较低，昼夜温差较大。

(2)含水率

含水率直接影响堆体的氧气扩散和微生物活性，是堆肥过程中最重要影响因素之一[20]。由图 7a 可知，好氧发酵结束时，堆体含水率为 34.35%，与好氧发酵初始相比，含水率降低 29.83%。这是好氧发酵过程中快速高温发酵脱水和强制通风造成的。含水率呈先升高后降低趋势，这是由于发酵仓内层叠结构使得水蒸气在发酵仓顶部冷凝聚集，导致顶层堆体含水率明显升高。在第 2 天以后，含水率明显降低，这是由于在发酵仓强制通风和翻转落料作用下，微生物分解有机质产生的水分少于强制通风带走的水分。

(3)挥发性固体质量分数

图 7b 为堆体挥发性固体质量分数随发酵时间的变化曲线。其初始挥发性固体质量分数为 63.20%，好氧发酵结束时挥发性固体质量分数为 52.25%，整个好氧发酵过程中挥发性固体降解 17.31%。该智能装备设计为 4 层，挥发性固体降解

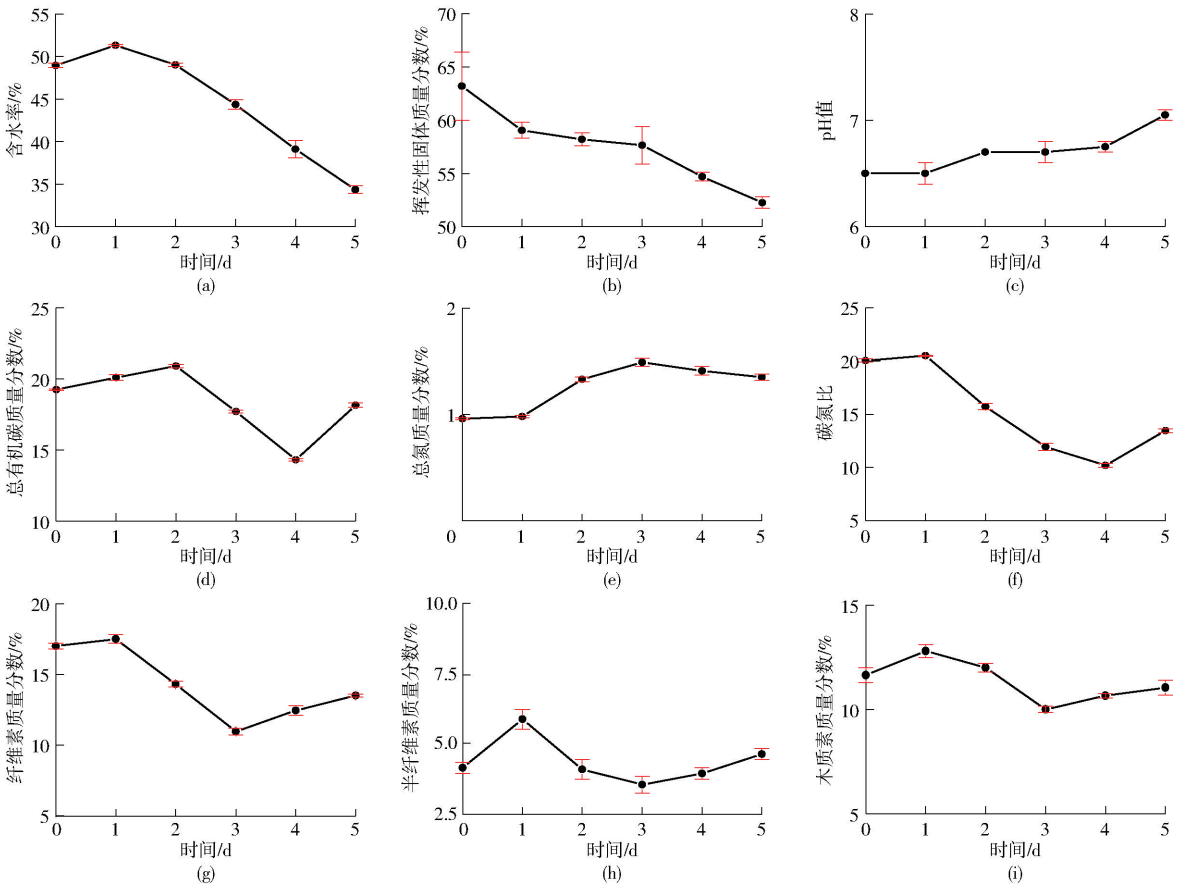

图 7 基础理化指标动态变化曲线

Fig. 7 Dynamic changes of basic physicochemical indexes

较好,降解率明显高于中小型反应器的一般性要求,符合现代化、规模化好氧发酵的需求。

(4)pH 值

pH 值是影响好氧发酵堆肥中微生物活动的主要因素[21]。如图 7c 所示,在好氧发酵过程中,堆体 pH 值在 6 ~ 8 范围内变化,pH 值呈缓慢增加趋势。这可能是因为前期有机氮被氨化,堆体中的铵态氮的积累使得 pH 值增加[22];中后期,在高温、高 pH 值环境下,铵态氮易以氨气的形式在堆体中逸出,而发酵仓内层叠式结构和翻转落料工艺导致氨气溶于水回流至堆体,易出现顶层至底层的 pH 值梯度差异。

(5)碳氮比

图 7d ~ 7f 为堆肥过程中堆体总有机碳质量分数、总氮质量分数和碳氮比的变化曲线。由图可知,堆体碳氮比呈先升后降的变化趋势。这是由于在堆肥前期,随着温度和 pH 值的变化,大部分氮素以氨气的形式损失[23],有机碳降解速率低于总氮损失速率;堆肥中后期,由于固氮作用,总氮质量分数呈现上升趋势,而有机碳降解速率高于总氮损失速率,因此碳氮比呈下降趋势。

(6)木质纤维素成分质量分数

图 7g ~ 7i 为堆肥过程中纤维素、半纤维素和木质素质量分数动态变化情况。纤维素、半纤维素、木质素质量分数始值为 17.00%、4.10%、11.65%。在好氧发酵的第 1 天,纤维素、半纤维素质量分数均呈上升趋势,这是因为此阶段纤维素和半纤维素降解速率低于有机质降解速率;在第 1 天后,纤维素和半纤维素质量分数下降,表明纤维素和半纤维素开始被快速分解[24],直至好氧发酵结束时,纤维素质量分数降低 20.59%。木质素质量分数变化趋势与纤维素、半纤维素质量分数变化趋势一致,在 10.65% ~ 12.80% 范围内波动。木质素由于其结构复杂不易水解,降解相对较难[25],好氧发酵结束时,木质素质量分数降低 12.20%。

(7)种子发芽指数

种子发芽指数是有效评估堆肥的生物毒性、判断堆肥无害化和腐熟度的重要指标。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[26-27]。由图 8 可知,好氧发酵结束时,种子发芽指数为 82.37%,这表明该智能装备去除堆体物料生物毒性效果明显。

2.3.2 基于多元参数的相关性分析

利用 Pearson 相关系数法分析好氧发酵过程指标间的相关性,相关系数绝对值越大,相关性越强[28]。从表 2 可以看出,总体而言,好氧发酵过程

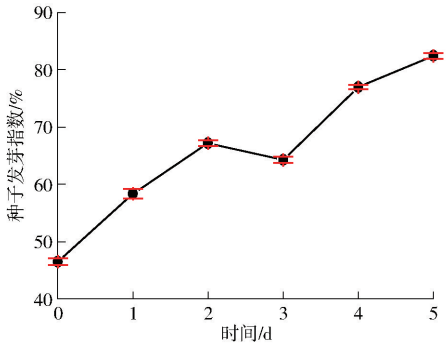

图 8　种子发芽指数随时间的变化曲线

Fig. 8　Changing curves of germination indexes

中各指标间具有良好的动态相关关系。从相关性分析来看，堆体 pH 值与含水率、挥发性固体质量分数呈显著负相关，与种子发芽指数呈显著正相关。含水率与挥发性固体质量分数呈显著正相关，与种子发芽指数呈显著负相关。挥发性固体质量分数与种子发芽指数呈极显著负相关。总氮质量分数与碳氮比、纤维素质量分数呈极显著负相关。碳氮比与纤维素质量分数呈极显著正相关，与木质素质量分数呈显著正相关。纤维素质量分数与木质素质量分数呈显著正相关。这是由于纤维素、半纤维素、木质素作为有机质的重要组成部分[24]，纤维素、木质素质量分数的动态变化在一定程度上可以反映堆体好氧发酵过程有机质的降解过程。

表 2　好氧发酵过程中理化指标相关系数

Tab. 2　Correlations coefficent of physicochemical indicators during aerobic composting process

参数	pH 值	含水率	挥发性固体质量分数	总有机碳质量分数	总氮质量分数	碳氮比	纤维素质量分数	半纤维素质量分数	木质素质量分数	种子发芽指数
pH 值	1									
含水率	−0.91*	1								
挥发性固体质量分数	−0.90*	0.86*	1							
总有机碳质量分数	−0.34	0.67	0.50	1						
总氮质量分数	0.68	−0.63	−0.69	−0.51	1					
碳氮比	−0.67	0.75	0.74	0.76	−0.95**	1				
纤维素质量分数	−0.60	0.62	0.61	0.60	−0.97**	0.95**	1			
半纤维素质量分数	−0.22	0.29	0.03	0.41	−0.65	0.64	0.72	1		
木质素质量分数	−0.48	0.64	0.41	0.71	−0.79	0.84*	0.90*	0.80	1	
种子发芽指数	0.90*	−0.84*	−0.99**	−0.50	0.74	−0.77	−0.63	−0.12	−0.41	1

注：* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平（双侧）上显著相关。

3　结论

（1）设计了一种层式好氧发酵智能装备，其上部设有链式刮板布料系统，出料移位系统设于底部，可实现单层独立增氧曝气、同步翻料和增氧热循环；并配备了传感系统、除臭装置，可实现多点温湿度、压力、pH 值和气体实时监测和智能化反馈控制。

（2）利用所设计的层式好氧发酵智能装备进行性能试验，结果表明：该智能装备在多元有机废弃物好氧发酵实际应用中，处理效果良好，且操作简单、成本低，满足大中小型规模化多元有机废弃物处理中心的需要。

参　考　文　献

[1]　李季，彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京：化学工业出版社，2011.

[2]　沈玉君，李冉，孟海波，等. 国内外堆肥标准分析及其对中国的借鉴启示[J]. 农业工程学报，2019，35(12)：265－271.
SHEN Yujun，LI Ran，MENG Haibo，et al. Analysis of composting standards at home and abroad and its enlightenment to China[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(12)：265－271.(in Chinese)

[3]　张涛，李国学. 探究畜禽粪污资源化技术革新促进养殖业绿色可持续发展[J]. 畜牧业环境，2019(3)：29－31.
ZHANG Tao，LI Guoxue. Explore the technological innovation of livestock and poultry manure recycling for promoting the green and sustainable development of breeding industry[J]. Animal Indusry and Environment，2019(3)：29－31.(in Chinese)

[4]　孙晓曦. 功能膜覆盖好氧堆肥系统研发与性能试验研究[D]. 北京：中国农业大学，2020.
SUN Xiaoxi. Design and performance test of semi-membrane covered composting system[D]. Beijing：China Agricultural University，2020.(in Chinese)

[5]　袁兴茂，范国昌，陈林，等. 畜禽粪便高温快速发酵装备设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：413－418.
YUAN Xingmao，FAN Guochang，CHEN Lin，et al. Design and experiment of high temperature and rapid fermentation equipment for livestock and poultry excrement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(Supp.)：413－418.(in Chinese)

[6]　柳蒙蒙，刘越，高志永，等. 有机废弃物好氧发酵反应器的开发和应用进展[J]. 中国沼气，2024，42(1)：10－18.
LIU Mengmeng，LIU Yue，GAO Zhiyong，et al. Progress on the development and application of aerobic fermentation reactor for organic waste[J]. China Biogas，2024，42(1)：10－18.(in Chinese)

[7] 李骅, 朱振明, 王居飞, 等. 滚筒式堆肥反应器通风搅拌系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 395 - 404.
LI Hua, ZHU Zhenming, WANG Jufei, et al. Design and test of aeration and mixing system for rotary composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 395 - 404. (in Chinese)
[8] 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(8):68 - 73.
WANG Tao, YAO Aiping, XU Jinda, et al. Design and test of small multilayer tower composting reactor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8): 68 - 73. (in Chinese)
[9] 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(6): 54 - 57.
SHENG Jinliang, ZHAO Yan, HAO Bingbo, et al. Design of vertical multi-layer walking-floor fermentation reactor and its hydraulic system[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2017, 25(6): 54 - 57. (in Chinese)
[10] 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(4): 1631 - 1636.
WANG Yuxin, REN Yongxiang, WANG Xiaochang, et al. Development and application of a tower natural ventilation reactor for aerobic composting[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(4): 1631 - 1636. (in Chinese)
[11] 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, 14(1): 40 - 43.
CHEN Haibin, WAN Yingfeng. Process design of gravity tipping rapid composting device[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, 14(1): 40 - 43. (in Chinese)
[12] 何贵生. 有机废弃物好氧发酵设备开发研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2016.
HE Guisheng. The development and research on aerobic fermentation equipment for organic waste[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2016. (in Chinese)
[13] 衣蕊, 赵立欣, 姚宗路, 等. 干法厌氧发酵装备同步升温发酵及微生态网络研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 376 - 385.
YI Rui, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Synchronous heating fermentation and micro-ecological network of dry anaerobic fermentation equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 376 - 385. (in Chinese)
[14] 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.
SUN Xiaoxi, CUI Ruxiu, MA Shuangshuang, et al. Design and test on large-scale semi-membrane-covered compost system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 356 - 362. (in Chinese)
[15] SUN X, MA S, HAN L, et al. The effect of a semi-permeable membrane-covered composting system on greenhouse gas and ammonia emissions in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 204: 778 - 787.
[16] DUAN Y, SANJEEV K A, CHEN H, et al. Evaluating the impact of bamboo biochar on the fungal community succession during chicken manure composting[J]. Bioresource Technology, 2019, 272: 308 - 314.
[17] MORALES A B, BUSTAMANTE M A, MARHUENDA F C, et al. Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the composts obtained[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,121:186 - 197.
[18] 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, 30(8): 96 - 97.
ZHOU Yongxin, NONG Bin, LU Lihai, et al. Treatment practice of high temperature aerobic fermentation in tower reactor[J]. Light Industry Science and Technology, 2014, 30(8): 96 - 97. (in Chinese)
[19] AJMAL M, SHI A, AWAIS M, et al. Ultra-high temperature aerobic fermentation pretreatment composting: parameters optimization, mechanisms and compost quality assessment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105453.
[20] LIANG Z, WU J, HE D, et al. Degradation characteristics and effect mechanisms of estrogens during aerobic composting of chicken manure based on the orthogonal test[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122751.
[21] ZHANG M, SHI A, AJMAL M, et al. Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2021, 13(7): 1 - 24.
[22] 王友玲, 邱慧珍, PHILIP G, 等. 通风方式对牛粪堆肥氨气排放与氮素转化的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 313 - 320.
WANG Youling, QIU Huizhen, PHILIP G, et al. Influence of ventilation modes on ammonia emission and nitrogen conversion in cattle manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 313 - 320. (in Chinese)
[23] MA S, FANG C, SUN X, et al. Bacterial community succession during pig manure and wheat straw aerobic composting covered with a semi-permeable membrane under slight positive pressure[J]. Bioresource Technology, 2018, 259: 221 - 227.
[24] 王凌英. 纤维素降解菌强化牛粪小麦秸秆堆肥效果及促生作用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
WANG Lingying. Effect of the cellulose degrading bacteria on composting of cattle manure and wheat straw and promoting function of the compost products on corn cultivation[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023. (in Chinese)
[25] 范长征. 堆肥过程中木质素降解及甲烷排放相关功能基因研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
FAN Changzheng. Researches on the lignin degradation and CH_4 emission related functional during composting[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
[26] ZUCCONI F, PERA A, FORTE M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. BioCycle, 1981, 22(2): 54 - 57.
[27] RIFFALDI R, SAVIOZZI A, LEVI-MINZI R. Water extracts of fresh and mature farmyard manure[J]. Biological Wastes, 1988, 23(1): 65 - 72.
[28] 罗鑫源. 鸡粪好氧/厌氧发酵过程对腐植酸类物质组成与结构的影响[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
LUO Xinyuan. Effects of aerobic/anaerobic fermentation of chicken manure on the composition and structure of humic acids [D]. Ji'nan: Qilu University of Technology, 2024. (in Chinese)