doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.038

滚筒式堆肥反应器通风搅拌系统设计与试验

李　骅[1,2]　朱振明[1,2]　王居飞[1,2]　於海明[1,2]　李　超[1,2]　朱雪茹[1,2]
(1.南京农业大学工学院,南京 210031;2.江苏省智能化农业装备重点实验室,南京 210031)

摘要:针对有机废弃物堆肥过程中物料溶氧效率低导致的堆体起温速率慢、发酵不彻底等问题,设计了一种高效堆肥通风搅拌系统,该系统由分段式通风系统和组合式搅拌装置构成,通过对两个主要装置进行理论设计和 DEM-FEM 耦合仿真,实现堆肥通风和搅拌工艺优化。结果显示,通风系统中的最大应力出现在通风管上,为 13.064 MPa,最大形变量为 0.038 126 mm,搅拌装置中最大应力出现在抄板上,为 190.31 MPa,最大形变量为 0.344 17 mm,符合设计要求。在此基础上,以食物垃圾和梧桐叶为原料,进行为期 14 d 的堆肥试验,监测堆肥过程中关键参数变化并测定发酵产物相关指标,完成通风搅拌系统性能验证试验。试验结果表明:使用该通风搅拌系统的滚筒式堆肥反应器,其内部堆体温度在 3 d 时达到 53.34℃,堆肥过程中堆体最高温度可达 69.56℃,堆体高温期(大于 50℃)可持续 6 d 以上;试验结束后其产物含水率降至 27.21%、pH 值升至 8.4、种子发芽指数最高可达 131.4%,符合有机肥料测定标准(NY/T 525—2021),滚筒反应器运行成本仅 65.51 元/t。

关键词:有机废弃物;堆肥;滚筒式堆肥反应器;通风搅拌系统
中图分类号:X705　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)05-0395-10　　**OSID**:

Design and Test of Aeration and Mixing System for Rotary Composting Reactor

LI Hua[1,2]　ZHU Zhenming[1,2]　WANG Jufei[1,2]　YU Haiming[1,2]　LI Chao[1,2]　ZHU Xueru[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: An effective aeration and mixing system composting system was created to address the problems of slow temperature rise and incomplete composting. The system consisted of a segmented aeration mechanism and a combined mixing device for dissolved oxygen. The composting process was designed in a stepwise composting process through the structural design of the two main devices, and the strength of the aeration device and mixing device of the aeration and mixing system were verified by using EDEM (DEM) and ANSYS (FEM) software. The results showed that the maximum stress value in the aeration system appeared in the aeration pipe with 13.064 MPa and the maximum deformation was 0.038 126 mm, and the maximum stress value in the mixing device appeared in the mixing blade with 190.31 MPa and the maximum deformation was 0.344 17 mm, which was in accordance with the design requirements. On this foundation, a 14 day composting test using food waste and maple leaves as feedstock was carried out to test the performance of the aeration and mixing system, record the changes in key parameters of the composting process and measure the relevant indexes of the fermentation production. The test results showed that the compost pile temperature of the rotary composting reactor with this aeration and mixing system reached 53.34℃ on the third day, the maximum temperature of the compost pile reached 69.56℃, and the high temperature period (>50℃) was maintained for 6 d. At the same time, the water content of the product reduced 27.21%, the pH value was increased to 8.4 and the maximum seed germination index reached 131.4%, which met the standards for organic fertilizers (NY/T 525—2021), and the rotary composting reactor operating costed only RMB 65.51 yuan/t.

Key words: organic waste; composting; drum composting reactor; aeration and mixing system

收稿日期:2023-09-25　修回日期:2024-01-22
基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1906103)
作者简介:李骅(1972—),男,教授,博士,主要从事生物质转化技术与装备、精准种收技术与智能装备研究,E-mail:lihua@njau.edu.cn

0 引言

堆肥作为农业废弃物、有机生活垃圾等有机废弃物资源化利用的重要途径之一,应用前景十分广阔。滚筒式堆肥反应器作为一种处理有机废弃物的高效制肥设备,具有制肥周期短、结构简单以及运行成本低等优点,在好氧发酵制肥领域得到广泛应用[1-5]。通风搅拌系统作为堆肥反应器的核心部件,对堆肥过程及发酵产物质量有重要影响,好的通风搅拌系统可提高物料溶氧效率,提升堆体起温速率、避免发酵不彻底等问题。

通风搅拌系统主要由通风系统和搅拌装置组成。通风系统通常分为翻堆、被动通风和强制通风 3 类[6],在滚筒反应器的堆肥研究和实际工程中,强制通风方式应用最为广泛。强制通风是利用机械通风系统通过正压鼓风或负压抽风的方式对物料进行通风供氧,按通风形式可分为集中式和分布式两种。集中式通风采用端面进气和端面出气形式,存在通风不充分、能耗高等问题,分布式通风多采用轴向通风和周向通风方式,存在结构强度低等问题[1-3]。此外,在通风工艺参数(通风量、通风速率、通风频率等)设计方面,大多数研究没有充分考虑好氧发酵不同阶段对氧气量的需求差异,易导致氧气分布不均匀、水分脱除难等问题[7]。滚筒反应器搅拌装置主要用于对堆体进行翻转和协助充氧,促进氧气在堆体内部循环,加速发酵过程。抄板作为搅拌装置的关键部件,对堆体搅拌和充氧效果有重要影响,其结构、尺寸和排布设计与堆肥原料的密度、粘度等特性密切相关,但是,现有搅拌装置对物料的适应性不强,物料搅拌程度不够彻底且不易维修[8]。

为解决上述问题,本研究采用食物垃圾和梧桐叶混合堆肥,依托滚筒式堆肥反应器进行高效堆肥通风搅拌系统设计,该系统由分段式通风系统和组合式搅拌装置构成,实现堆肥过程分段通风,抄板角度、位置排布等可根据物料特性自由调整。通过离散元(DEM)和有限元(FEM)耦合仿真进行通风系统和搅拌装置设计,并通过堆肥滚筒性能试验验证该通风搅拌系统的可行性。

1 反应器结构与工作原理

本研究依托的滚筒式堆肥反应器主要由滚筒筒体、通风搅拌系统、传动系统、监测系统、臭气处理装置等组成,如图 1 所示。堆肥滚筒工作时,物料由进料口添加进滚筒筒体,根据堆肥过程需要,滚筒做间歇性转动,在此过程中,物料在搅拌装置的作用下完成翻抛移动,并与空气充分接触。堆肥 14 d 后发酵完成,物料由出料口排至收集装置,同时,混合好的物料又可以同步添加,发酵产生的尾气(CH_4、NH_3 和 H_2S 等)由气泵排入臭气处理装置(活性炭、KDF 多级吸附),经净化处理后排入空气[9]。

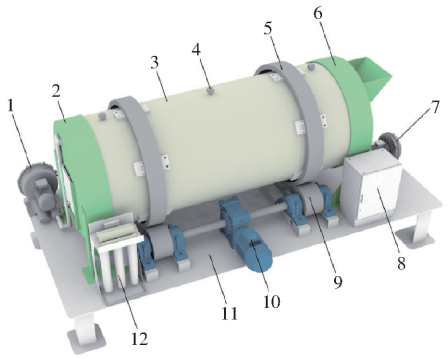


图 1 滚筒式有机废弃物堆肥反应器三维图

Fig. 1 3D model of organic waste rotary composting reactor

1. 抽气泵 2. 出料端盖 3. 滚筒筒体 4. 温度传感器 5. 滚圈 6. 进料端盖 7. 风机 8. 电控柜 9. 滚轮 10. 驱动电机 11. 机架 12. 臭气处理装置

监测系统主要用于采集堆体的温度和湿度数据,由温湿度传感器和数据监测平台组成,由于滚筒内同时存在发酵前、中、后期的物料,故在滚筒前(进料端)、中、后(出料端)段分别布置 1 组温湿度传感器,温度传感器选用 K 型热电偶,湿度传感器选用电容式。此外,考虑到堆肥过程中会有热量流失,滚筒采用双层结构,内层为钢板,外部为保温层[10-11]。同时,为便于后续取样,在滚筒前、中、后部筒壁上均设置有取样口,反应器主要技术参数如表 1 所示。

表 1 堆肥反应器主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of composting reactor

参数	数值
滚筒体积/m^3	0.55
滚筒填充率/%	60~75
滚筒有效容积/m^3	0.5
滚筒转速/($r \cdot min^{-1}$)	0~5
堆肥周期/d	14
日进料量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	0~0.05

2 通风搅拌系统设计

通风搅拌系统由通风系统和搅拌装置组成,如图 2 所示,该通风搅拌系统具有以下特点:采用分段通风技术,通过控制通气孔数量和通风管阶梯间隔以满足不同堆肥阶段通风需求,从而提升堆体充氧效果;搅拌装置由多组六棱长柱和抄板组合,抄板的数量、间距、倾角等可根据物料特性、堆肥不同阶段所需的搅拌要求进行拆装调整,维修方便。

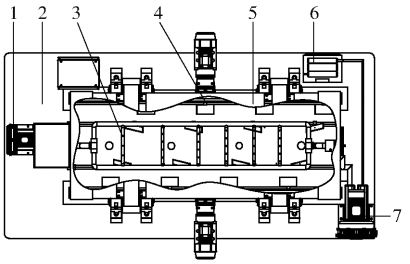


图 2　通风搅拌系统结构示意图

Fig. 2　Aeration and mixing oxygen system structure

1. 风机　2. 机架　3. 通风管　4. 搅拌装置　5. 滚筒筒体　6. 臭气处理装置　7. 抽气泵

在堆肥过程中，搅拌是一种特殊的通风方式，通过分子扩散和能量差驱动空气质量运动，从而为堆体供给足够的氧气。在搅拌过程中，抄板不仅能够协助物料均匀混合，还能够有效增大物料和氧气的接触机会、接触面积，有助于提高通风效率和充氧效果。但是，仅仅依靠抄板搅拌来为堆体供氧，堆肥效果通常较差，因此，本研究以通风系统为主，搅拌装置为辅进行滚筒反应器通风搅拌系统设计，通过理论计算和耦合仿真确定最佳的通风与搅拌工艺参数，以改善堆肥过程中堆体的溶氧效果，提高堆肥效率和产品质量。

2.1　通风系统设计

2.1.1　通风系统结构设计

通风系统主要由进气管、通风管、风机、气泵等构成，通风管与滚筒端盖直接相连，端盖与机架焊接固定，滚筒与端盖之间为摩擦接触，因此，在滚筒转动过程中，通风管保持不动，始终处于水平位置（图 2）。由于滚筒采用间歇式转动方式，在堆肥过程中，物料多处于静止状态，故采用堆体覆埋的轴向通风方式，为堆体提供充足氧气，实现高效溶氧。同时考虑到物料在滚筒搅拌装置的作用下会倾斜至滚筒一侧，致使部分通风管外露，为避免通风浪费，故在轴向通风的基础上，将通风管相对于滚筒中轴线位置降低一定高度，使堆体可始终埋覆通风管，为提升其耐腐性，通风管采用 316 号不锈钢材料，如图 3 所示。

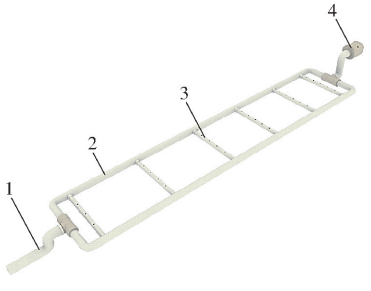


图 3　通风管三维图

Fig. 3　3D model of aeration tube

1. 进气端　2. 通风主管　3. 通风支管　4. 旋转接头

2.1.2　通风系统参数设计

（1）通风量

通风量即堆肥需氧量，通常指堆肥过程中微生物活动和物料脱水所需通风量，其大小会直接影响堆体的温度变化，从而影响堆肥效果。

微生物活动所需通风量：根据已有研究基础，微生物分解包括升温期、高温期、降温期 3 个阶段[12-16]。有机质分解速率主要与发酵温度、物料含水率、堆体含氧量以及腔体的自由空域有关，含水率和氧浓度主要影响微生物的活性，一般认为物料含水率在 60% 时[17]，微生物活性最高，氧含量不超过 21%，腔体的自由空域主要影响堆体氧体积分数，一般取 30% 以上[15]。

以食物垃圾和梧桐叶混合堆肥为例（食物垃圾与梧桐叶按质量比 3∶1 混合），物料堆积密度采用定容积法测定约为 480 kg/m^3，根据前期研究基础，堆体的有机质质量分数经计算约为 46.5%，当被氧化分解的有机质质量为 M_S 时，理论通风量为 3.82M_S[18]，考虑到通风量应满足最大理论值要求，故按高温发酵阶段计算通风量，计算公式为

$$Q_B = 3.82\varepsilon\rho V M_{OM} V_{OM} \tag{1}$$

式中　Q_B——有机质分解所需空气体积，m^3

ε——滚筒填充率，取 65%

ρ——物料堆积密度，取 480 kg/m^3

V——滚筒有效容积，取 0.5 m^3

M_{OM}——物料有机质质量分数，取 46.5%

V_{OM}——有机质降解率，取 35%[17]

经计算，整个堆肥过程中微生物分解有机质所需的通风量 Q_B 为 96.99 m^3。

物料脱水所需通风量：在堆肥过程中，物料脱水所需通风量要比有机质分解所需通风量高很多，一般要求出料含水率降至 30% 以下，当物料初始含水率为 60% 时，1 kg 干物料水分蒸发量为 1.67 kg[19]，即 1 kg 原始物料水分蒸发量为 0.625 kg。考虑到在不同地区、不同季节堆肥，其外部环境不同，堆肥效果会略有差异，因此，本研究选取环境温度平均值（20℃）作为反应器外部温度，反应器内部温度取堆肥阶段堆体平均温度（50℃），进行物料脱水所需空气量计算，计算公式应满足[1,19]

$$Q_W\rho_A = \frac{M_w}{\omega_1\varphi_1 - \omega_2\varphi_2}\rho V\varepsilon \tag{2}$$

式中　Q_W——物料脱水所需空气体积，m^3

ρ_A——空气密度，取 1.293 kg/m^3

M_w——单位质量原始物料水分蒸发量，kg

ω_1——50℃ 空气饱和湿度，取 87.56 g/kg[19]

ω_2——20℃ 反应器出气口饱和湿度，取

14.89 g/kg[19]

φ_1——20℃环境相对湿度,取 100%[20]

φ_2——50℃环境相对湿度,取 75%[20]

经计算可得,物料在堆肥过程中脱水所需通风量为 986.99 m^3。

综上所述,在堆肥过程中,通风量 Q 应为有机质降解所需通风量和物料脱水所需通风量之和,即

$$Q = Q_W + Q_B \tag{3}$$

经计算,该通风搅拌系统在堆肥过程中的理论通风量为 1 083.98 m^3。

CJJ 52—2014《生活垃圾堆肥处理技术规范》提出,配有强制通风设施的机械翻堆动态堆肥,所推荐的最佳工艺风量为 0.05 ~ 0.2 m^3/min(以每立方米垃圾为基准计算)。结合反应器内物料体积为 0.325 m^3,堆肥周期为 14 d 可得,该通风搅拌系统在堆肥过程中通风量为 327.6 ~ 1310.4 m^3,说明该通风搅拌系统的理论通风量(1 083.98 m^3)满足《生活垃圾堆肥处理技术规范》对通风量的设计要求。

(2)通风频率与通风速率

通风频率和通风速率是通风系统设计的关键参数,与堆肥所需的通风量密切相关,二者通常以理论通风量的最大值为设计依据。研究表明持续通风 5 ~ 10 min 可以维持堆体中 O_2 浓度在 17% 以上,通风结束后的前 10 min,堆体内氧气供应充足,微生物活力旺盛;10 ~ 20 min 时,堆体内氧气浓度呈快速下降趋势,微生物活力下降;20 ~ 40 min 时,堆体内氧气浓度逐渐降低并趋于平缓后,微生物活力受限[21-22]。因此,为了保证微生物活力,从而达到堆体控温效果,本研究选取间歇通风方式,通风周期为 30 min,通风 10 min,停止 20 min。结合通风间歇时间和通风量大小,计算可得堆肥系统通风需求的理论通风速率为

$$I = \frac{Q}{2 \times 24 \times 10T} \tag{4}$$

式中 I——理论通风速率,m^3/min

T——堆肥周期,d

由式(4)可知理论通风速率 I 为 0.161 m^3/min。风机选用最大通风量为 0.3 m^3/min 的变频式气泵,通风精度可精确至 0.001 m^3,流量计量程 0 ~ 0.3 m^3/min,可满足精准监控通风速率要求。

(3)通气孔设计

通气孔倾角、直径和数量设计是解决通气孔堵塞问题的关键,而通气孔位置分布决定了通风管能否满足均匀布气要求。根据已有研究发现,斜向下 45°开收敛型通气孔时,最易形成微小射流,可以有效防止因沉淀物积累导致的通气孔堵塞[23]。此外,当通气孔直径为 3 mm,通气孔气流流速大于 10 m/s 时,通气孔可同时满足防堵和通风要求[24],故取通气孔倾角为 45°,通气孔孔径为 3 mm,通气孔气流流速取 15 m/s,根据气流流速公式计算得出通气孔数量

$$N = \frac{I}{V_i A} \tag{5}$$

式中 N——通风管上的通气孔总数

V_i——通气孔处气流速度,m/s

A——通气孔截面积,m^2

代入已知条件计算得通气孔总数 N 为 26 个(向上取整)。

考虑到堆肥滚筒为连续进出料,不同堆肥阶段通风量需求不同,堆肥初期堆体快速升温,对通风量需求最小,堆肥高温期堆体中的有机质大量降解,微生物需要充足的氧气来维持活性,堆肥降温期通风主要起脱水作用,通风量需求最大。故采用分段结构将通风管划分为 3 段,分别对应堆肥升温期(2 d)、高温期(5 d)和降温期(7 d)[1],通过控制阶梯间隔和阶梯上的通气孔数量实现堆肥不同阶段、堆体不同位置分阶通风,越靠近降温期阶梯间隔越小,通气孔数量越多(图 4)。

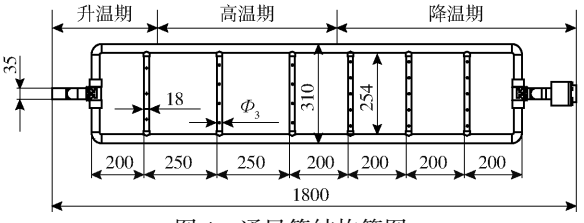


图 4 通风管结构简图

Fig. 4 Aeration tube structure

结合上述要求,堆肥升温期、高温期和降温期应满足关系

$$N_3 > N_2 > N_1 \tag{6}$$

$$S_1 > S_2 > S_3 \tag{7}$$

式中 N_1——升温期阶梯通气孔数量

N_2——高温期阶梯通气孔数量

N_3——降温期阶梯通气孔数量

S_1——升温期阶梯间距离,mm

S_2——高温期阶梯间距离,mm

S_3——降温期阶梯间距离,mm

结合式(5)~(7)可得,堆肥升温期、高温期、降温期分别对应 1、2、3 根阶梯,每根阶梯上应均匀排布 4.3 个通气孔,但考虑到气流在管道中的流动会有一定的损耗,具体表现为越靠近滚筒出料端,气体流速越低,且通气孔数量必须为整数。因此,将堆肥升温期通风支管上的通气孔数量调整为 3 个,N_1 =

3；堆肥高温期各通风支管上的通气孔数量设计为 4 个，$N_2=8$；堆肥降温期各通风支管上的通气孔数量调整为 5 个，$N_3=15$。其中升温期通风速率 $V_1=0.019\ m^3/min$，高温期通风速率 $V_2=0.050\ m^3/min$，降温期通风速率 $V_3=0.093\ m^3/min$。

2.1.3　通风系统仿真设计

根据上述理论计算结果，在实际堆肥过程中，由于物料黏度较高，通风管作为直接接触部件易发生应力集中，为得出通风管的应力分布及变形情况，为加工与应用提供参考，基于 EDEM、ANSYS 软件对通风管进行静应力分析。首先利用 EDEM 2020 进行堆肥过程模拟和后处理分析，获取模型受到的最大载荷及产生最大载荷时刻，再通过 ANSYS 建立通风管有限元模型，网格单元尺寸定义为 2 mm，模型的约束和载荷由 EDEM 导出后再导入 ANSYS 软件，最后求解得出通风管应力、形变云图和安全系数图，如图 5 所示。

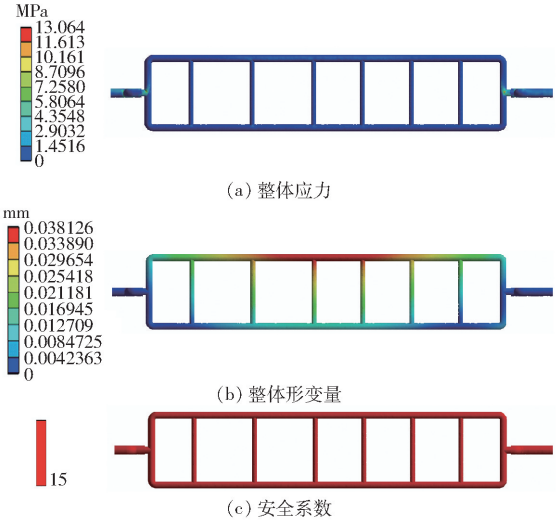


图 5　通风系统应力、形变量、安全系数仿真图

Fig. 5　Stress, deformation and safety factor simulation of aeration system

由图 5a 可知，应力集中在通风管两端，最大应力出现在管道交接处，应力为 13.064 MPa，查阅《机械设计手册》可知[25]，316 号不锈钢屈服强度大于等于 205 MPa，说明通风管结构强度满足设计要求。由图 5b 可知，整个通风管结构的形变主要发生在通风管左侧，最大形变量为 0.038 126 mm，这与滚筒转动方向有关，由于滚筒采用顺时针转动，随着滚筒转动，物料大多累积在滚筒左侧，从而对通风管左侧部分产生较大的压力，使得形变量略高于右侧部分。安全系数是评定设计性能的关键参数，一般来说，标准工程规定安全系数应大于 1，图 5c 表明该通风管结构满足强度要求，可实现通风系统长期稳定工作。

2.2　搅拌装置设计

2.2.1　抄板设计

在滚筒转动过程中，抄板会将筒内堆体抄起，增大物料和氧气的接触面积，抄板形状、尺寸以及与滚筒中轴线之间的夹角都会对搅拌效果产生影响[26]。目前，滚筒设备中常用的抄板形状有直板式、直角弯板式、半圆式、弧圆组合式、变截面式 5 种[26-27]。直板式抄板的形状为矩形，抄板结构简单，加工较易，但物料抛起时间较短，搅拌效果稍差。直角弯板式、半圆式、弧圆组合式和变截面式抄板由于顶部折弯的设计使物料被抛起的时间变长，因此搅拌效果较好，但是加工难度和成本都比直板式抄板高[28-29]，抄板的折弯部分还易藏垢物料，引起部分物料发生厌氧发酵，产生恶臭。

此外，考虑到滚筒式堆肥反应器的转速较慢，不同形状的抄板对筒内物料的抛撒幅度影响很小[5]，因此，本研究选用直板式抄板，抄板的尺寸根据使用环境确定。当抄板高度为发酵滚筒直径的 1/10 时，搅拌及移料效果较好[10-11]，结合滚筒反应器直径（$D=600$ mm），设计抄板高度 H 为 60 mm。同时，为保证抄板在堆肥过程中的强度和使用寿命，抄板长度 L 设计为 $L=2H=120$ mm，加工材料选用厚度 δ 为 3 mm 的 45 号钢板，结构设计如图 6 所示。

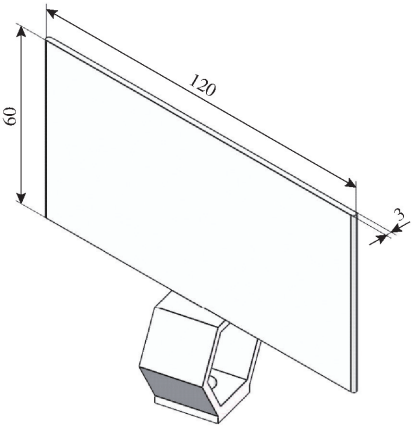


图 6　抄板三维图

Fig. 6　3D model of flight

抄板与滚筒中轴线之间的夹角为抄板倾角，倾角会影响物料的搅拌、移动效果，当抄板倾角 θ 为 45°时，物料搅拌效果最好[5]。此外，由于不同堆肥阶段搅拌要求不同，故本研究对抄板进行了可拆卸设计，从而实现组合式搅拌。

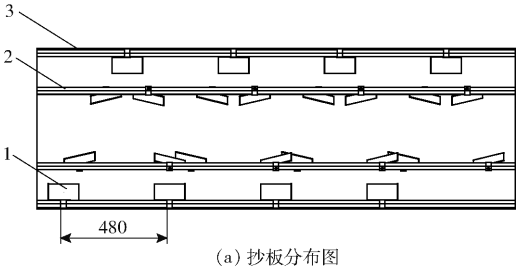
2.2.2　主体结构设计

滚筒搅拌装置由绕滚筒中轴线均布的 6 根六棱柱和呈螺旋分布的多组抄板构成，如图 7a 所示。其中，筒内物料移动速度与抄板组螺距有关，参照《农业机械设计手册》，螺距 S 与滚筒直径 D

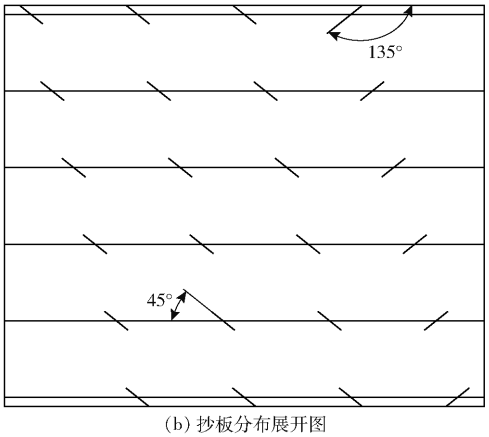
满足公式[30-31]

$$S=0.8D \tag{8}$$

结合滚筒直径 D,设计螺旋结构的螺距 $S=480$ mm。考虑到滚筒长度仅为 1 800 mm,故在出料口位置布置一圈阻料抄板,用于降低物料向出料端推进的速度,使物料能够均匀且充分的腐熟,同时匹配每日出料量需求(0.05 m^3/d)。如图 7b 所示,当阻料抄板与滚筒轴线呈 135°夹角时,阻料效果较好[1,5]。



(a) 抄板分布图



(b) 抄板分布展开图

图 7 堆肥滚筒螺旋结构简图

Fig. 7 Composting drum spiral structure

1. 抄板 2. 六棱长柱 3. 堆肥滚筒

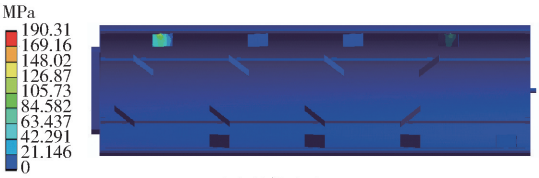
由于滚筒在实际运转过程中,物料对搅拌装置有一定冲击作用,因此,本研究利用 DEM-FEM 耦合仿真对搅拌装置进行静力学分析,其应力云图、形变量云图和安全系数图如图 8 所示。

由图 8a 可知,应力主要集中在靠近进料端的抄板上,最大应力为 190.31 MPa,出现在抄板与搅拌轴的连接处,符合强度要求(抄板屈服强度约为 355 MPa(45 号钢)[25]),同时由图 8b 可知,整个搅拌装置形变量均较小,只在抄板的悬臂远端有形变发生,其形变量仅为 0.334 17 mm,同时由图 8c 可知,本结构最小安全系数为 1.313 6,大于 1,说明该结构符合设计要求。

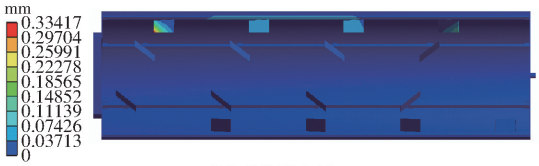
3 性能试验

3.1 材料与方法

为检验滚筒堆肥反应器性能及堆肥效果是否满足实际应用要求,以食物垃圾和梧桐叶为原料开展



(a) 整体应力



(b) 整体形变量



(c) 安全系数

图 8 搅拌系统应力、形变量、安全系数仿真图

Fig. 8 Stress, deformation and safety factor simulation of stirring system

堆肥试验,食物垃圾取自南京农业大学浦口校区学生食堂,梧桐叶于南京农业大学校园内收集,所有物料经粉碎处理后尺寸为 20 mm,堆肥反应器实物图如图 9 所示。



图 9 滚筒式堆肥反应器实物图

Fig. 9 Actual rotary composting reactor

堆肥处理时,将食物垃圾和梧桐叶按质量比 3∶1均匀混合,总质量约为 180 kg,调节其含水率为 60%,控制滚筒填充率为 65%。由于本试验的重点是验证通风搅拌系统的合理性以及该系统对堆肥效果的影响,因此,试验采取单批次投入物料,通过比较不同发酵阶段,滚筒前、中、后段堆体理化性质,来评价所采用的分段通风技术优势,单一物料与混合原料理化参数见表 2[32-33]。

表 2 堆肥物料基本理化参数

Tab. 2 Physical and chemical parameters of compost materials

参数	食物垃圾	梧桐叶	混合物料
含水率/%	81.40	8.10	62.12
碳氮比/(g·kg^{-1})	5.69	41.0	12.40
容重/(kg·m^{-3})	1 045	10	480
pH 值	8.24	5.37	6.60

根据已有研究经验并结合文献[1],滚筒转速

取 3 r/min，搅拌频率为 2 次/d，每次转动一圈，试验周期共 14 d，通风速率为 0.161 m^3/min，通风频率为 30 min/次，通风时间为 10 min/次。

试验开始后，每天从堆肥滚筒前、中、后段的温度传感器读取堆体温度并取出 100 g 样品，混合均匀后置于 -5℃冷藏室保存备用，用于后续 pH 值、含水率和种子发芽指数(GI)测定，其中含水率采用 GB/T 8576—2010 进行测定，pH 值和种子发芽指数采用 NY/T 525—2021 进行测定。

此外，为探究该滚筒反应器的经济性，通过计算堆肥过程中的能源消耗费用和人工费用，开展滚筒反应器堆肥运行成本分析。

3.2　结果分析

3.2.1　堆肥过程中堆体温度

堆肥过程中堆体温度随时间变化曲线如图 10 所示。滚筒前、中、后段物料在堆肥初期均稳定升温，在堆肥 3 d 时达到 50℃以上，其中滚筒前段和中段物料在堆肥 6 d 时达到高温峰值 67.89℃和 67.85℃，滚筒后段物料在堆肥 5 d 时达到高温峰值 69.56℃。高温期持续高温能充分杀灭病虫卵等有害物质，试验堆体温度在 50℃以上维持了 6 d，符合堆肥无害化处理要求。相比于其他反应器堆肥[2,26,34]，应用该通风搅拌系统的堆肥反应器，起温速率更快，在堆肥 5 d 时，堆体温度即达到高温峰值，可有效缩短堆肥时间。

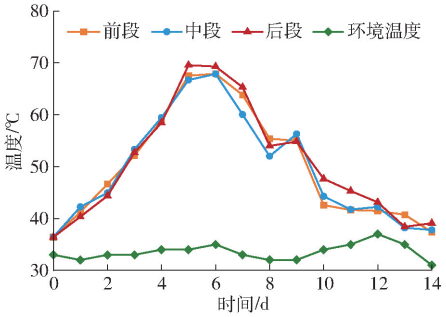


图 10　堆肥过程中堆体温度变化曲线

Fig. 10　Temperature changes curves during composting

3.2.2　堆肥过程中堆体含水率

堆肥过程中堆体含水率随时间变化曲线如图 11 所示。在整个堆肥期间，滚筒内堆体含水率逐渐下降，其中升温期(72 h)堆体含水率下降较慢，基本维持在 55%以上；高温期堆体含水率开始快速下降，其含水率变化规律如下：高温期 1 ~ 4 d(72 h)，滚筒内堆体水分逐渐减少，滚筒前段堆体含水率降低速度相对较慢，滚筒中、后段堆体含水率降低至 40%左右；高温期 4 ~ 5 d(24 h)，堆体含水率上升，这是由于滚筒具有良好的保温性，随着温度的不断上升，有机质的降解以及水分子的热胀，导致腔体内水分子含量急剧增加，水汽未能及时排出而回流堆体，致使堆体含水率上升；高温期 5 ~ 7 d(48 h)，堆体含水率恢复正常下降趋势；降温期 1 ~ 2 d(24 h)，堆体含水率又出现了小幅上升，这是因为滚筒密封性好，温度降低后，滚筒内的水蒸气遇到滚筒内壁冷凝滴落，导致堆体含水率出现小幅提高；降温期 2 ~ 5 d(72 h)，随着堆肥试验的进行，堆体含水率开始逐步降低并趋于稳定；降温期的最后 1 d(24 h)，筒前、中、后段堆体含水率分别降低至 32.11%、27.21%和 33.5%，与已有的研究相比(出料含水率一般高于 40%)[32-33]，物料去水效果更为理想，有利于实现餐厨垃圾快速减量化处理。

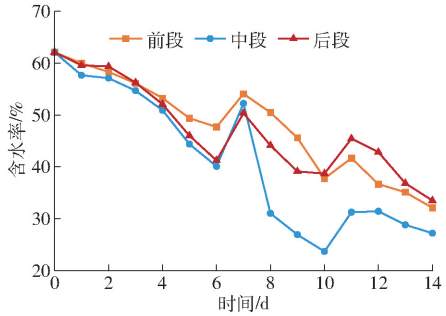


图 11　堆肥过程中堆体含水率变化曲线

Fig. 11　Water content changes curves during composting

3.2.3　堆肥过程中堆体 pH 值

堆肥过程中堆体 pH 值随时间变化曲线如图 12 所示。随着好氧发酵的进行，堆体的 pH 值呈上升趋势，升温期堆体 pH 值在 6.5 ~ 7.6 之间，大多呈现弱酸或中性。随着堆肥进入高温期，堆体的 pH 值有一个明显的下降，这是由于温度逐渐升高，产酸微生物(欧陆森氏菌属、乳杆菌属、梭菌属)快速繁殖导致有机酸积累，致使 pH 值下降[35]。随着好氧发酵的不断进行，物料不断被微生物分解，有机酸和蛋白质被分解，pH 值逐渐升高，降温期堆体 pH 值逐渐上升至 8.0 以上，呈现弱碱性，符合堆肥腐熟国标要求。由 pH 值曲线可知，不同发酵区间的理化参数差异性并不显著，说明该反应器稳定性良好，相比于其他反应器堆肥[26,34]，堆体 pH 值上升更快，在堆肥的第 8 天即呈现弱碱性，发酵周期预计可缩短7 d。

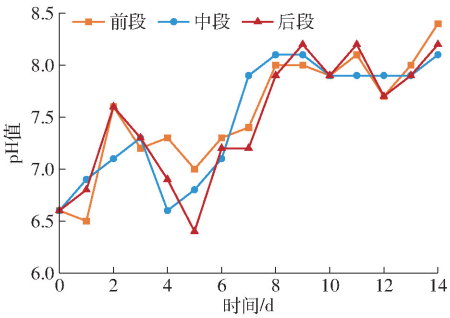


图 12　堆肥过程中堆体 pH 值变化曲线

Fig. 12　pH value changes curves during composting

3.2.4 种子发芽指数测定

种子发芽指数(GI)是判断植物毒性和好氧堆肥腐熟度的一种简单有效的方法,国标规定种子发芽指数大于70%时可认为堆体没有毒性且已腐熟。种子发芽指数试验结果如图13所示,随着好氧发酵的进行,种子发芽指数不断上升,堆肥14 d时,滚筒前、中、后段种子发芽指数分别达到97.5%、93.6%和131.4%。与文献[1,34]相比,本试验的物料腐熟速度更快,在堆肥的第8天即满足堆肥腐熟要求(NY/T 525—2021)(GI大于等于70%),种子发芽指数(物料腐熟度)最高可提升40%。

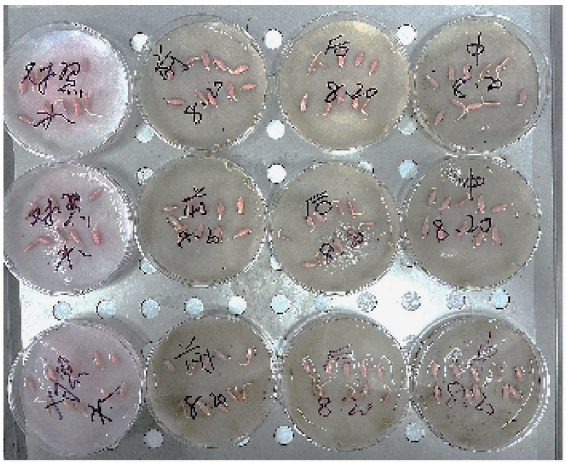


图13 种子发芽指数试验结果

Fig. 13 Seed germination index (GI) test results

3.2.5 运行成本分析

滚筒反应器堆肥运行成本主要由能源消耗费用和人工费用组成,其中能源消耗费用包括驱动电机、风机、抽气泵电能消耗,人工费用主要用于进出物料和保障设备正常运行。

滚筒反应器理论运行成本计算公式为[36]

$$C = Y_M + \frac{P_i T_i Y_E T}{\rho V \varepsilon} \tag{9}$$

式中 Y_M——堆肥所需人工单价,取25元/t

P_i——反应器各电器设备运行功率,kW

T_i——电器设备日运行时间,h

Y_E——用电单价,取0.56元/(kW·h)

C——反应器运行成本,元/t

结合滚筒反应器运行参数(滚筒有效容积、物料容重、滚筒填充率、电机功率、搅拌时间、通风时间),其中驱动电机、风机和抽气泵运行功率分别为550、60、40 W,驱动电机日运行时间(搅拌时间)为0.011 h,风机和抽气泵日运行时间(通风时间)均为8 h,代入公式(9)计算可得,滚筒反应器堆肥运行成本C为65.51元/t。与已有堆肥反应器堆肥运行成本相比[36],当堆肥周期相同时,该滚筒反应器堆肥运行成本更低。

4 结论

(1)设计了一套适用于滚筒反应器的高效堆肥通风搅拌系统,可有效提高物料溶氧效率,提升堆体起温速率,避免发酵不彻底等问题。

(2)通过DEM耦合FEM的方法,采集物料发酵过程中粘度最大时的物理参数作为输入,对通风系统和搅拌装置进行可靠性分析,结果显示,通风系统最大应力出现在通风管上,为13.064 MPa,最大形变量为0.038 126 mm,搅拌装置最大应力出现在抄板上,为190.31 MPa,最大形变量为0.344 17 mm,均在允许范围之内,设计合理。通风系统和搅拌装置均满足强度要求,该系统硬件安全可靠。

(3)滚筒反应器性能试验结果表明,采用该通风搅拌系统进行食物垃圾和梧桐叶混合堆肥,堆体温度持续高于50℃的时间维持在6 d以上,堆肥结束时含水率下降到30%以下,pH值上升至8.0以上,种子发芽指数最高可达131.4%,反应器堆肥运行成本为65.51元/t。因此,采用该通风搅拌系统可有效改善堆肥质量,实现高效堆肥。

参 考 文 献

[1] 程红胜, 隋斌, 孟海波, 等. 滚筒式沼渣好氧发酵反应器中试装置设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2018,34(24):224-231.
CHENG Hongsheng, SUI Bin, MENG Haibo, et al. Design and performance test of aerobic fermentation rotary reactor pilot plant for biogas residue[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 224-231. (in Chinese)

[2] 郑相炜. 餐厨垃圾好氧堆肥用滚筒反应器的研制[D]. 北京:北京林业大学, 2017.
ZHENG Xiangwei. Design of rotational drum reactor used in food waste aerobic composting[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)

[3] 景显晟. 死畜禽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, 2018.
JING Xiansheng. Research and design of mortality composter[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese)

[4] BUSTAMANTE M A, RESTREPO A P, ALBURQUERQUE J A, et al. Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 47: 61-69.

[5] 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.

MA Qiang. Design of rotary bioreactor used in municipal solid waste aerobic composting[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013. (in Chinese)

[6] 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.
LU Juan. The effects of inoeulation white rot fungus on maturity and nutrients transformation of sewage sludge compost[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009. (in Chinese)

[7] 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)

[8] JARA-SAMANIEGOA J, PÉREZ-MURCIA M D, BUSTAMANTE M A, et al. Development of organic fertilizers from food market waste and urban gardening by composting in Ecuador[J]. PloS One, 2017, 12(7): e0181621.

[9] 占晶, 高彩霞, 王帅, 等. 臭气治理技术在污水处理和固废处理行业的应用[J]. 环境与发展, 2018(7): 34 - 35.
ZHAN Jing, GAO Caixia, WANG Shuai, et al. Application of odor control technology in wastewater treatment and solid waste treatment industry[J]. Environment and Development, 2018(7): 34 - 35. (in Chinese)

[10] 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.
LI Xing. Research and design of C50 compost bioreactor[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015. (in Chinese)

[11] 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, 29(2): 49 - 52.
ZHOU Yanwen. Development and application of dynamic fermentation rotary reactor for sewage sludge[J]. Pollution Control Technology, 2016, 29(2): 49 - 52. (in Chinese)

[12] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 猪粪麦秸反应器好氧堆肥水分平衡模型研究[J]. 农业机械学报,2012,43(6):102 - 106.
WANG Yongjiang, HUANG Guangqun, HAN Lujia. Modeling of moisture balance during pig slurry reactor composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 102 - 106. (in Chinese)

[13] 王永江. 猪粪堆肥过程有机质降解动力学模型研究[D]. 北京：中国农业大学, 2014.
WANG Yongjiang. Study on kinetic model of organic matter degradation in pig manure composting process[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[14] 常勤学, 魏源送, 夏世斌. 堆肥通风技术及进展[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(10): 98 - 103.
CHANG Qinxue, WEI Yuansong, XIA Shibin. Progress on technology of aeration in composting[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(10): 98 - 103. (in Chinese)

[15] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 122 - 126.
WANG Yongjiang, HUANG Guangqun, HAN Lujia. A mathematical model for the continuous cultivation of thermophilic microorganisms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 122 - 126. (in Chinese)

[16] HANG R T. Thepractical handbook of composting[M]. Bocaraton: Lewis Publishers, 1993.

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

[18] 宋彩红, 李鸣晓, 魏自民, 等. 初始物料组成对堆肥理化、生物和光谱学性质的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(8): 2268 - 2274.
SONG Caihong, LI Mingxiao, WEI Zimin, et al. Influence of the composition of the initial mixtures on the physicochemical and biological properties and spectral characteristics of composts[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(8): 2268 - 2274. (in Chinese)

[19] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 240 - 245.
SUN Xiaoxi, MA Shuangshuang, HAN Lujia, et al. Design and test on lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 240 - 245. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 沈玉君, 张朋月, 孟海波, 等. 通风方式对猪粪堆肥主要臭气物质控制的影响研究[J]. 农业工程学报, 2019,35(7): 203 - 209.
SHEN Yujun, ZHANG Pengyue, MENG Haibo, et al. Effects of ventilation modes on control of main odor substances in pig manure composting[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 203 - 209. (in Chinese)

[22] 陈同斌, 郑玉琪, 高定, 等. 猪粪好氧堆制不同阶段氧气含量变化特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2179 - 2183.
CHEN Tongbin, ZHENG Yuqi, GAO Ding, et al. Variation of oxygen concentration during aerobic composting of pig manure [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004,15(11): 2179 - 2183. (in Chinese)

[23] 刘平, 王欣. 降低通风装置堵塞率的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2014, 27(5): 25 - 27.
LIU Ping, WANG Xin. Study on reducing blockage rate of aeration device[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2014, 27(5): 25 - 27. (in Chinese)

[24] LI Qi, WANG Xuchang, ZHANG Haihua, 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.
[25] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
[26] 于海涵. 滚筒发酵实验设备研制[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
YU Haihan. Research on drum fermentation experiment equipment[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. (in Chinese)
[27] SHU L, YANG M, ZHAO H, et al. Process optimization in a stirred tank bioreactor based on CFD-Taguchi method: a case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 1074 - 1084.
[28] 冯福海, 冯艳辉, 刘兆丰, 等. 滚筒式干燥机抄板撒料分析[J]. 现代化农业, 2008(8): 37 - 38.
[29] 张立栋, 李少华, 朱明亮, 等. 回转干馏炉内抄板形式与双组元颗粒混合过程冷模数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 72 - 78.
ZHANG Lidong, LI Shaohua, ZHU Mingliang, et al. Cold mode numerical analysis of flights forms and two component particles mixing in rotary retorting[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11): 72 - 78. (in Chinese)
[30] 袁佳诚, 杨佳, 万星宇, 等. 油菜联合收获机滚筒筛式复清装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 99 - 108.
YUAN Jiacheng, YANG Jia, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of cylinder sieve type re-cleaning device for rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 99 - 108. (in Chinese)
[31] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册 (下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
[32] OHASHI Y. Current status of the municipal organic waste composting project in Japan[J]. Geographical Review of Japan, 2008, 81(7): 591 - 603.
[33] CHENG J W, GAO X Z, YAN Z W, et al. Intermittent aeration to reduce gaseous emission and advance humification in food waste digestate composting: performance and mechanisms[J]. Bioresource Technology, 2023, 371: 128644.
[34] 王雅雅, 陈高攀, 孙浩, 等. 基于 EDEM 的分仓立式好氧堆肥反应器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 171 - 179.
WANG Yaya, CHEN Gaopan, SUN Hao, et al. Design and experiments of a vertical aerobic composting reactor based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(3): 171 - 179. (in Chinese)
[35] 孙鸿, 肖向哲, 罗进财, 等. pH 值调控对柑橘废渣与污泥厌氧共发酵产酸影响[J]. 中国环境科学, 2022,42(4): 1762 - 1769.
SUN Hong, XIAO Xiangzhe, LUO Jincai, et al. Effects of pH regulation on acid production by anaerobic co-ermentation of citrus waste residue and sludge[J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1762 - 1769. (in Chinese)
[36] 刘泽龙, 王选, 曹玉博, 等. 立式筒仓反应器堆肥技术工艺优化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1979 - 1989.
LIU Zelong, WANG Xuan, CAO Yubo, et al. Optimization of composting technology for vertical silo reactor[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1979 - 1989. (in Chinese)

(上接第 289 页)

[20] WANG L, XIONG Y, WANG Z, et al. Temporal segment networks: towards good practices for deep action recognition[C]// European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016: 20 - 36.
[21] 顾静秋,王志海,高荣华,等. 基于融合图像与运动量的奶牛行为识别方法[J]. 农业机械学报,2017,48(6):145 - 151.
GU Jingqiu, WANG Zhihai, GAO Ronghua, et al. Recognition method for cow behavior based on combination of image and activities[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 145 - 151. (in Chinese)
[22] LIU Z, LIN Y, CAO Y, et al. Swin transformer: hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021: 10012 - 10022.
[23] YANG L, ZHANG R Y, LI L, et al. Simam: a simple, parameter-free attention module for convolutional neural networks[C]// International Conference on Machine Learning. PMLR, 2021: 11863 - 11874.
[24] HSIAO T Y, CHANG Y C, CHOU H H, et al. Filter-based deep-compression with global average pooling for convolutional networks[J]. Journal of Systems Architecture, 2019, 95: 9 - 18.
[25] XIONG R, YANG Y, HE D, et al. On layer normalization in the transformer architecture[C]//International Conference on Machine Learning. PMLR, 2020: 10524 - 10533.
[26] BA J L, KIROS J R, HINTON G E. Layer normalization[J]. arXiv preprint, arXiv:1607.06450, 2016.
[27] HENDRYCKS D, GIMPEL K. Gaussian error linear units (gelus)[J]. arXiv preprint, arXiv:1606.08415, 2016.
[28] LOSHCHILOV I, HUTTER F. SGDR: stochastic gradient descent with warm restarts[J]. arXiv preprint, arXiv:1608.03983, 2016.