

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.013

斗式黑水虻处理猪粪有机肥取料机设计与试验

彭才望¹ 贺喜² 孙松林¹ 宋世圣¹ 向阳¹ 许道军³

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学动物科学技术学院, 长沙 410128;

3. 湖南农业大学动物医学院, 长沙 410128)

摘要: 针对黑水虻处理的猪粪有机肥在取料输送过程中劳动强度大、作业效率低的问题, 根据黑水虻养殖工艺流程与有机肥物理特性, 设计了一种斗式取料机。采用离散元软件构建了有机肥-斗轮机械部件耦合仿真模型, 运用单因素试验方法获得了斗轮进给速度、料斗转速、料斗数量对单斗平均取料量、变异系数的影响规律, 并确定了各因素取值范围。在单因素试验基础上, 运用 Box - Behnken 中心组合试验方法, 以斗轮进给速度、料斗转速、料斗数量为试验因素, 进行了三因素三水平二次回归正交试验。建立了响应面数学模型, 分析了各因素对作业效果的影响, 同时对影响因素进行了综合优化。结果表明: 对单斗平均取料量与变异系数影响显著顺序由大到小均为料斗转速、料斗数量、斗轮进给速度; 最优工作参数组合为斗轮进给速度 65 mm/s、料斗转速 8.25 r/min、料斗数量 3 个, 在最优工作参数组合下, 单斗平均取料量、变异系数的理论优化值与试验值分别为 4.008、4.236 kg 和 3.19%、3.37%, 二者相对误差为 5.38%、5.34%, 仿真试验和台架试验结果吻合度较好。

关键词: 猪粪; 黑水虻; 有机肥; 斗式取料机; 离散元

中图分类号: S817.2; X713

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)02-0145-12

OSID: 

Design and Experiment on Shoveling Device of Pig Manure Organic Fertilizer by *Hermetia illucen* Transforming Based on Bucket-wheel Mechanism

PENG Caiwang¹ HE Xi² SUN Songlin¹ SONG Shisheng¹ XIANG Yang¹ XU Daojun³

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2. College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

3. School of Veterinary Medicine, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity in the collection and transportation for pig manure organic fertilizer by *Hermetia illucen* transforming, based on the process flow of *Hermetia illucen* breeding and the physical characteristics of organic fertilizer, a bucket-wheel shoveling device was designed. To improve the mean mass shoveled by hopper and reduce the coefficient of variation between each hopper, single-factor test was used to get the best form of the bucket-wheel mechanism. The Box - Behnken central composite experimental design principle was adopted on the basis of single factor experiment to research the working parameters of the shoveling device. The moving speed of bucket-wheel, rotation speed of hopper, and number of the hopper were taken as the influencing factors, the mean mass of organic fertilizer shoveled by the hopper and coefficient of variation were selected as the responsive variables. The results showed that the mean mass of organic fertilizer shoveled by the hopper and coefficient of variation could be fitted with two regression polynomials. According to the rate of factors contribution, the results indicated that the rotation speed of hopper had the greatest effect on the mean mass of organic fertilizer shoveled by the hopper and coefficient of variation among the three selected main factors followed by counterweight position, and moving speed of bucket-wheel had the minimum effect. Taking the maximum average mass of organic fertilizer shoveled by the hopper and the smallest coefficient

收稿日期: 2020-11-30 修回日期: 2020-12-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0501209)、湖南省自然科学基金项目(2020JJ5253)、湖南省科技厅重点研发项目(2018NK2061)和湖南农业大学“双一流”建设项目(SYL201802015)

作者简介: 彭才望(1988—),男,讲师,博士生,主要从事农业与畜牧业机械设备研究,E-mail: hndpcw@163.com

通信作者: 孙松林(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械设备研究,E-mail: hndssl@163.com

of variation as the optimization goal, the optimal operating parameters of the machine was obtained: the moving speed of bucket-wheel was 65 mm/s, the rotation speed of hopper was 8.25 r/min and number of the hopper was 3. At this time, the theoretical values of mean mass of organic fertilizer shoveled by the hopper and coefficient of variation were 4.008 kg and 3.19%, respectively. Based on the optimization result, the physical prototype was processed. The test results showed that the mean mass of organic fertilizer shoveled by the hopper and coefficient of variation were 4.236 kg and 3.37%, respectively. The relative errors between the experimental and predicted values of average mass of organic fertilizer shoveled by the hopper and coefficient of variation were 5.38% and 5.34%, respectively. The results indicated that the multivariate regression model was reliable.

Key words: pig manure; *Hermetia illucen*; organic fertilizer; bucket-wheel reclaiming; discrete element

0 引言

黑水虻处理畜禽粪便可获得黑水虻昆虫蛋白^[1]和有机肥^[2],其转化效率高,有效降低了畜禽粪便积累和污染,已成为当前研究的热点^[3]。黑水虻两周内将猪粪堆积减少56%,同时,猪粪残渣中氮、磷、钾的含量分别降低了55.1%、44.1%、52.5%,也减弱了猪粪臭味^[4];黑水虻处理猪粪后的有机肥,肥效较高,富含抗植物病害的活性物质,在牧草、果蔬种植业中得到广泛应用^[5-7]。我国畜牧养殖业生产经营规模化不断提高,发展以黑水虻为中介的低碳养殖是实现畜牧业可持续发展的有效途径。但是,在黑水虻养殖过程中,布料、取料、运输、筛分等机械设备落后,尤其是取料阶段,无法规模化有序铲取、转移和输送黑水虻处理畜禽粪便后的有机肥,影响了后期黑水虻筛分作业等环节,降低了畜牧养殖的经济效益。

目前,国内外学者在黑水虻转化畜禽粪便效率^[8]、黑水虻生长变化^[9]、黑水虻昆虫蛋白^[1]、有机肥应用^[2,5-7]等方面进行了大量的研究与探索。但是,黑水虻养殖及有机肥取料机械的研究还处于起步阶段,成熟产品较少。前期作者借鉴文献[10-12]设计了双向螺旋装置,对黑水虻处理的猪粪有机肥进行集料输送,满足取料输送要求,但取料效率较低、适应性较差^[13]。

现有取料机械中常见的斗轮取料机用于散体物

料收集与输送^[14-15]。围绕斗轮取料,众多学者在斗轮进给速度^[16]、铲斗几何结构^[17]、取料过程^[18]、铲斗挖掘轨迹^[19]、铲斗应变规律^[20]、料斗间距与填充率^[21]等方面进行了数值模拟研究,并获得了对应的最佳作业参数。但是,这些研究中的取料机构为大型,且取料的对象主要是工业中堆积的散体物料(煤、矿石、沙土等),因此不适应黑水虻养殖环境特点与有机肥的特性。

基于以上背景,本文在课题组前期研究基础上^[22],结合黑水虻养殖特点与黑水虻处理的猪粪有机肥物理特性,借鉴斗轮在工业散体物料方面的研究成果,设计一种斗式有机肥取料机,通过分析其工作原理,确定斗式取料机关键结构参数,应用离散元仿真试验确定斗轮取料机最佳的工作参数组合,并进行台架试验验证,以期实现有序铲取黑水虻处理的猪粪有机肥,从而促进畜禽废弃物的资源化利用。

1 黑水虻养殖工艺流程与有机肥物理特性

1.1 黑水虻养殖工艺流程

研究表明,4日龄的黑水虻幼虫在温度为28°~30°、新鲜畜禽粪便含水率为70%~75%、堆料厚度在10~15 cm时,生物转化效率较高^[23],养殖过程中分批次添加新鲜畜禽粪便,养殖8~10 d,在黑水虻成虫化蛹之前,结束黑水虻对畜禽粪便的处理。此时,可进行有机肥取料作业,养殖工艺流程如图1

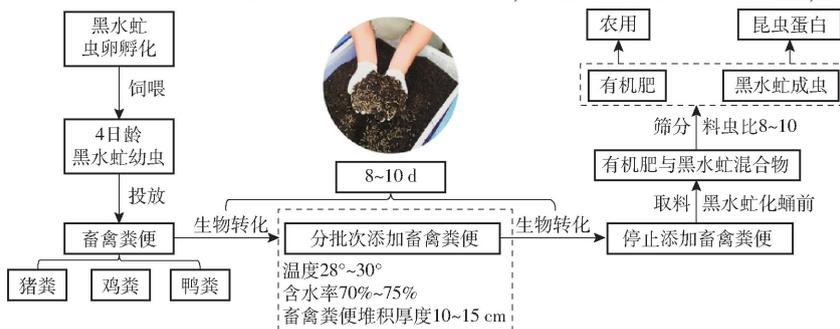


图1 黑水虻养殖工艺流程图

Fig. 1 Process flow of *Hermetia illucen* breeding

所示。基于黑水虻这一养殖特点,本研究采用四周边框式料盘养殖黑水虻,分批次添加新鲜猪粪,便捷、可视性好,层叠式养殖占地面积少。料盘为钢材,宽度1 m,四周侧壁高0.15 m,取料时料盘中的有机肥层铺厚度均值为0.1 m。

1.2 有机肥物理特性

本研究所用黑水虻处理的猪粪有机肥样品由湖南大湘农环境生物科技有限公司提供,通过烘干法采取两次平行试验测得有机肥的含水率为44.50%,筛分测量发现有机肥颗粒基本呈近似的球体,蓬松、沙土状,极小部分呈团状,粒径分布范围为1.6~2.6 mm,平均粒径为2 mm,如图2所示。文献[22]标定了有机肥其他本征参数,其中泊松比为0.11、密度为 1703 kg/m^3 、剪切模量为 $5.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。有机肥的料虫比为8~10,为便于后续分析,选取有机肥颗粒作为主要研究对象,对有机肥颗粒中混杂的黑水虻虫体不予考虑。



图2 黑水虻处理的猪粪有机肥

Fig. 2 Pig manure organic fertilizer by *Hermetia illucen* transforming

2 斗式取料机整机结构与工作原理

2.1 整机结构

根据黑水虻养殖特点与有机肥物理特性,设计的斗式取料机整机结构主要由机架、料盘、搅拌疏松杆、斗轮机构、卸料槽、丝杆升降机构、齿轮齿条、电动推杆等部件组成,结构如图3所示,其中斗轮机构为主要工作部件。搅拌疏松杆用于疏松有机肥,便于斗轮铲取,降低取料阻力。自走式斗轮机构横向移动,在电动推杆作用下可越过料盘,在丝杆升降机构辅助下,可纵向升降,完成多层料盘的有机肥取料作业。根据湖南大湘农环境科技有限公司黑水虻养殖环境,整机结构参数为:料盘为3层,层叠式,料盘宽度为1 m,上下层料盘的垂直间距为1.25 m,斗轮机构高度为1 m,料斗取料深度为0.1~0.15 m,取料幅宽为1 m,丝杠升降高度范围为0~3.0 m,机架与料盘纵向长度为50 m,斗式取料机平均取料效率为 $10 \sim 15 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.2 斗轮机构及工作原理

斗轮机构如图4所示,主要由电动推杆、卸料槽、料斗、斗轮机架、齿条、电动机、驱动轴等组成。

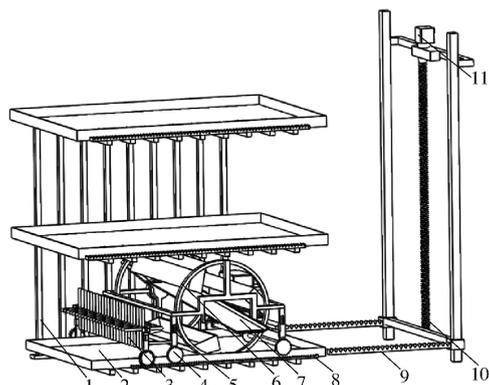


图3 斗式取料机结构示意图

Fig. 3 Structure diagrams of bucket-wheel reclaimer

1. 机架 2. 料盘 3. 搅拌疏松杆 4. 齿轮 5. 电动推杆 6. 斗轮机构 7. 卸料槽 8. 齿条 I 9. 齿条 II 10. 丝杆 11. 电动机

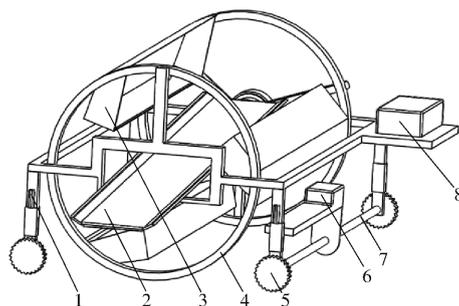


图4 斗轮结构图

Fig. 4 Structure diagrams of bucket-wheel

1. 电动推杆 2. 卸料槽 3. 料斗 4. 斗轮机架 5. 齿轮 6, 8. 电动机 7. 驱动轴

斗轮机构工作时,电动机带动驱动轴旋转,驱动轴通过两端的驱动齿轮与齿条配合,实现斗轮机构自走式横向移动。根据湖南大湘农环境生物科技有限公司黑水虻养殖情况,料盘与斗轮宽均为1 m,斗轮直径 D 为1 m,前方层铺有机肥高度 h 为0.1 m,斗轮机架两侧的圆边平行料盘侧壁,其底部与料盘底面呈线接触,料斗沿斗轮机架周向均匀分布,且料斗圆弧底壁侧边线与斗轮机架圆边内侧边重合,如图4所示。料斗以角速度 ω 旋转,以进给速度 v 自走式驱动前移,完成料盘中的有机肥取料、提升输送过程,如图5所示。卸料槽内置倾斜于斗轮中,引导卸料后的有机肥滑移并输送进入后续筛分等作业环节。

图中, θ 为卸料槽侧壁与底面的夹角, $(^\circ)$; a 为卸料槽底部宽度,m; b 为卸料槽顶部宽度,m; c 为卸料槽侧壁长度,m; d 为卸料槽长度,m。

3 关键部件设计与分析

3.1 斗轮取料受力分析

斗轮铲取有机肥受力分析如图6所示,其中 XOY 为静坐标系,与斗轮机架固连; $X'O_1Y'$ 为动坐标

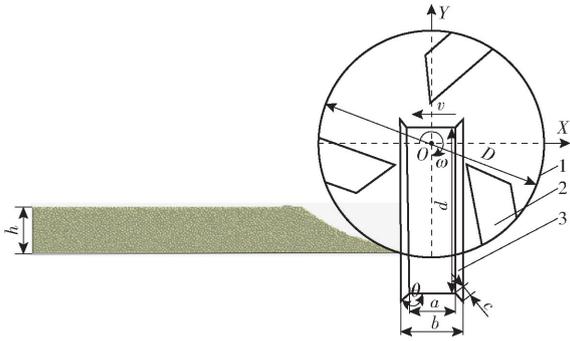


图5 斗轮铲取有机肥示意图

Fig.5 Schematic of bucket-wheel shoveling organic fertilizer

1. 机架 2. 料斗 3. 卸料槽

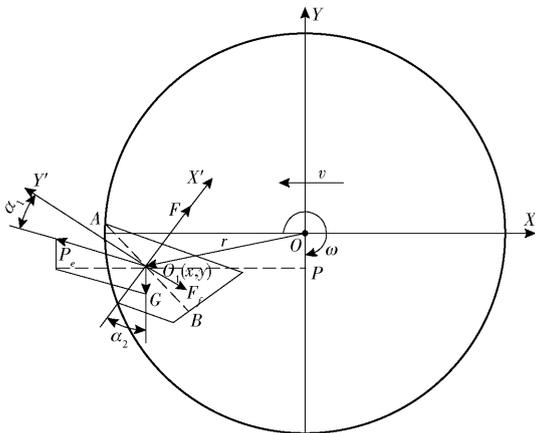


图6 斗轮取料受力分析

Fig.6 Force analysis of bucket-wheel shoveling

系,与料斗固连,形成一个绕固定轴 O 做顺时针匀速转动的非惯性坐标系,其转动速度为斗轮转速 n 。以料斗内滑移面 AB 上任一颗粒 O_1 为质点进行研究,根据达朗贝尔原理,此时有机肥颗粒受重力 G 、离心惯性力 P_e 、下层物料支持反力 F 、下层物料最大静摩擦力 F_f 等多个作用力的合力。

根据图6分析可知

$$F_{X'} = F - P_e \sin \alpha_1 - G \cos \alpha_2 \quad (1)$$

$$F_{Y'} = P_e \cos \alpha_1 - G \sin \alpha_2 - F_f \quad (2)$$

其中 $G = mg$ $P_e = m\omega^2 r$ $\omega = \frac{2\pi n}{60}$

式中 $F_{X'}$ 、 $F_{Y'}$ ——合力在 X' 、 Y' 方向上的分量
 α_1 —— Y' 正向与离心惯性力之间的夹角, ($^\circ$)
 α_2 ——重力 G 与 X' 反向之间的夹角, ($^\circ$)
 r ——颗粒单元瞬时回转半径, m
 m ——颗粒质量, kg
 g ——重力加速度, m/s^2

由图6可知,在 Y' 方向上,若 $F_{Y'} = 0$,则颗粒单元 O_1 处于临界状态;若 $F_{Y'} > 0$,则物料单元 O_1 将沿着滑移面 AB 向料斗底壁方向运动,不符合本研究有机肥潮湿物理特性与重力式卸料设计的要求。因此,物料单元 O_1 在克服离心力、摩擦力后沿着滑

移面 AB 向料斗后壁方向运动,实现重力式卸料的极限条件为: $F_{X'} \geq 0$ 、 $F_{Y'} \leq 0$ 。由式(1)、(2)分析可知,斗轮转速越高,角速度越大,料斗内颗粒单元所受离心力与摩擦力越大,且过高的斗轮转速导致离心力过大,无法满足重力式卸料。因此,斗轮转速不宜过高,离心力必须小于或等于重力,当极限情况时重力与离心力相等,则斗轮的极限速度为^[24]

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{Dg}{2}} = 2.21 \sqrt{D} \quad (3)$$

为了使料斗内有机肥能够依靠重力全部卸出,引入小于1的卸料速度系数 k ,使料斗的实际切向速度 v_c 小于极限速度 v_{\max} ^[24],即

$$v_c = v_{\max} k = 2.21 \sqrt{D} k \quad (4)$$

又由圆周运动关系有 $v_c = \frac{n\pi D}{60} = 2.21 \sqrt{D} k$,整理得

$$n = \frac{60 \times 2.21 k}{\pi D} = 42.2 k \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (5)$$

本研究的斗轮为半格式斗轮^[25],而针对半格式斗轮,其卸料速度系数 k 取值范围为 0.35 ~ 0.45,基于有机肥物理特性, k 取 0.45^[24],确定斗轮转速范围为: $n \leq 18.99 \text{ r/min}$ 。

3.2 料斗设计与分析

3.2.1 料斗参数设计

料斗周向旋转与直线进给时,料斗内有机肥受到上层有机肥颗粒的摩擦力与压力、料斗底部的摩擦力与支撑力。取料时,需要将有机肥加速到与料斗同速,有机肥会受到内部加速惯性阻力。同时,有机肥颗粒间存在黏附作用力。在这些合力的作用下,料斗进给方向的有机肥物料表面将前移一定的距离,形成一个物料堆积曲线表面^[17]。根据图7、8的料斗底壁长度试验可知:一定条件下,减少斗底圆弧长度,有效降低了有机肥物料的扰动与堆积效应,但取料质量低、始落料点与离斗轮中心远,取160 mm时,有效保证了取料质量,始落料点与斗轮中心的距离比较适宜,减少落料偏摆振动,此时物料堆积高度为7.61 mm。

基于料斗底壁长度,优化料斗后壁张角 β ,如图9所示。以料斗后壁张角为试验因素,分析后壁张角对落料速度和始落料点的影响,结果如图10所示。结果表明,同等条件下,料斗后壁张角 60° 时始落料点与斗轮中心位置适宜,避免碰到相邻料斗或卸料槽。此时,始落料点位置的斗内有机肥颗粒速度矢量沿斗轮径向层状分布,速度大小沿斗轮径向逐渐变大,表层的有机肥颗粒速度分布合理,沿滑移面无剧烈倾斜运动趋势,如图11所示。根据斗轮直

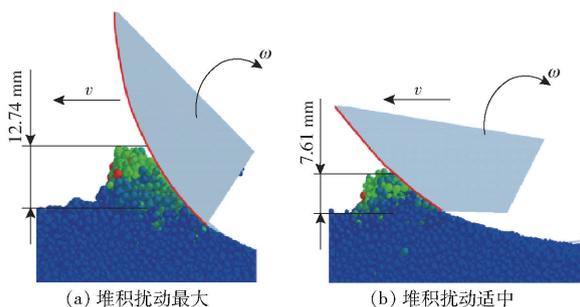


图7 取料时有机肥堆积扰动现象

Fig. 7 Accumulation disturbance of organic fertilizer during shoveling

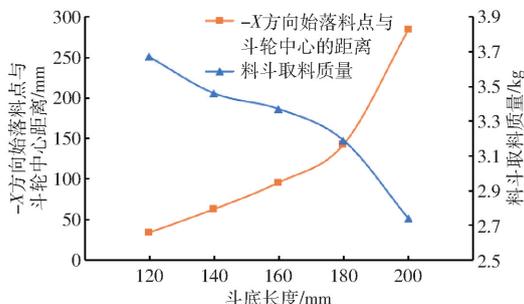


图8 不同斗底长度时取料性能参数变化曲线

Fig. 8 Change curve of reclaiming performance parameters with different bucket bottom length

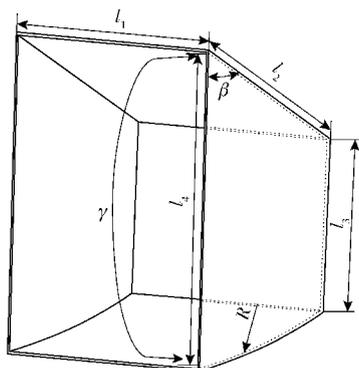


图9 料斗结构参数示意图

Fig. 9 Schematic of hopper structural parameters

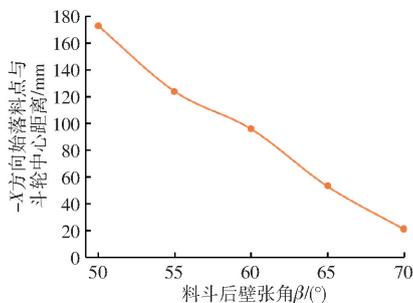


图10 不同料斗后壁张角时卸料性能参数变化曲线

Fig. 10 Change curve of unloading performance parameters with different back wall opening

径、料盘宽度,设定斗底圆弧半径 R 为 500 mm、斗宽为 1 m。结合有机肥物理特性、参考文献[26],通过修正调整,最后料斗结构设计为浅斗型、圆弧曲面底壁、平面斗底,参数确定为:料斗宽 l_1 为 1 m,料斗后

壁长 l_2 为 0.165 m,料斗底长 l_3 为 0.16 m,斗底圆弧半径 R 为 0.5 m,料斗高 l_4 为 0.3 m,料斗张角 γ 为 65° ,料斗后壁张角 β 为 60° 。

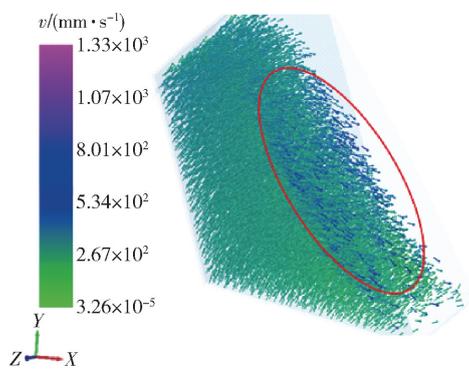


图11 斗内颗粒速度矢量分布($\beta = 60^\circ$)

Fig. 11 Distribution of particle velocity vector in bucket ($\beta = 60^\circ$)

参考文献[27],料斗间距过小导致料斗布置过密而影响料斗的装料,且在卸料时,导致物料在途中碰到前面的料斗而落不到卸料槽内等因素,对于浅料斗有

$$u = (2 \sim 3.5) h_1 \quad (6)$$

式中 u ——料斗间距,即圆周方向等弧长距离,mm

h_1 ——料斗高度,mm

根据料斗结构设计,料斗在圆周方向弧长间距范围为 600 ~ 1 050 mm。料斗间距与料斗数量之间的公式为

$$Z = \frac{\pi D}{u} \quad (7)$$

式中 Z ——料斗数量,个

根据斗轮直径 D 与料斗间距 u 取值范围,由式(7)计算可得料斗数量理论范围为 3 ~ 5 个。

3.2.2 料斗运动轨迹分析

斗轮机架上圆周方向均匀分布的料斗取料作业过程包括:下降进入有机肥中、有机肥中取料、取料后提升 3 个阶段。在取料过程中,料斗运动轨迹与斗轮进给速度 v 、料斗角速度 ω 以及固定的斗轮直径有关,通过分析料斗运动轨迹,确定料斗运动的工作状态。本研究选取卸料完的 A 位置某料斗为研究对象,并以该料斗圆弧底壁最先入料的某点 P 进行分析,以斗轮转动轴圆心为原点,做 x 轴与 y 轴的相交坐标,如图 12 所示,图中 A 、 B 、 D 、 E 、 F 分别为料斗所处的位置点。

假设料斗需要完成 BC 段的有机肥取料过程,其中料斗沿 AB 段为下降进入有机肥阶段; BD 段为有机肥中取料阶段; DE 段为取料后提升阶段; EF 段为卸料阶段。当斗轮机构沿 v 方向匀速进给运动,同时以 ω 绕 O 点顺时针匀速圆周运动。开始时,料

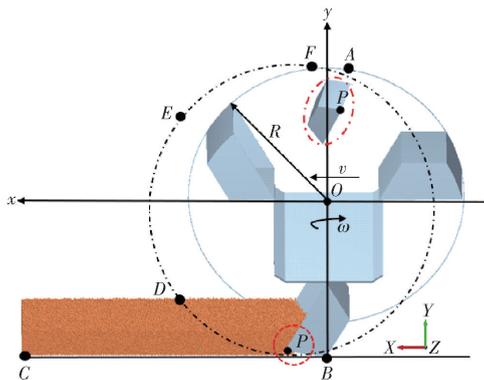


图12 料斗运动轨迹分析

Fig. 12 Analysis of trajectory of hopper

斗 P 点位置与 x 轴正向相反, 因此, 经过 t 段时间后, 料斗顶点 P 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = vt - R\cos(\omega t) \\ y = R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (8)$$

将运动轨迹方程(8)对时间 t 求导, 得料斗在 x 轴与 y 轴方向的运动速度分别为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v + R\omega\sin(\omega t) \\ v_y = \frac{dy}{dt} = R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

对公式(9)在 x 轴和 y 轴方向的运动速度进行时间求导, 得料斗在 x 轴和 y 轴方向上的运动加速度分别为

$$\begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = R\omega^2\sin(\omega t) \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = R\omega^2\cos(\omega t) \end{cases} \quad (10)$$

料斗顶点 A 的合速度 v_o 和合加速度 a 为

$$\begin{cases} v_o = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v^2 + 2vR\omega\cos(\omega t) + (R\omega)^2} \\ a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = R\omega^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中 x, y ——料斗水平方向和垂直方向的位移, mm

通过斗轮机构料斗的运动学分析可知: 料斗在旋转运动时, 料斗在有机肥中取料过程中不会有速度上的突变, 能够保持旋转方向的匀速运动, 顺利完成周期内位移、速度以及加速度的转变。

3.3 斗轮取料过程仿真分析及参数确定

为合理有效地进行仿真模拟计算, 对斗轮机构进行简化处理, 去除电动机、驱动轴、齿轮、斗轮机架等部件, 根据物理样机特点, 应用 SolidWorks 软件对斗轮机构进行实体建模, 主要包括料斗、料盘、卸料槽等部件, 模型中料盘和料斗宽度均为 0.3 m, 为物理样机的 1/3, 卸料槽槽底长为 0.4 m, 斗轮直径为 1 m, 其他参数与物理样机一致, 实体三维模型以

.stl 文件格式导入 EDEM 软件中。材料属性为不锈钢, 泊松比为 0.30, 剪切模量 7.9×10^{10} Pa, 密度为 7860 kg/m^3 。根据有机肥的物理特性, 选取“Hertz-Mindlin with JKR”作为接触模型, 以基本球体作为有机肥的仿真颗粒模型, 建立半径为 1 mm 的离散元模型^[22]。为真实模拟料斗取料、提升环境, 在 EDEM 中建立长×宽为 1 m×0.3 mm 的长方形虚拟面作为颗粒工厂, 以正态分布、动态方式生成颗粒, 形成长×宽×高为 1 m×0.3 m×0.1 m 的有机肥模型。仿真设定固定步长时间为 Rayleigh 时间步长的 22%, 数据保持间隔为 0.01 s, 网格单元尺寸为 2 倍最小有机肥颗粒半径。待斗轮机构取料仿真过程稳定后, 利用后处理模块 Grid Bin Group, 选中无撒料现象的料斗区域, 统计单个料斗取料的质量并计算料斗间取料质量的变异系数, 取料仿真过程如图 13 所示。

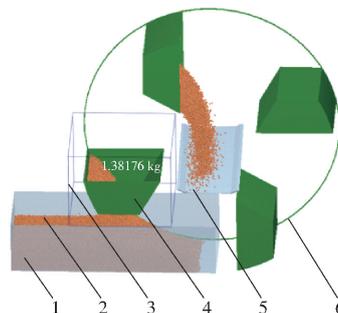


图13 斗轮铲取有机肥仿真过程

Fig. 13 Simulation process of bucket-wheel shoveling organic fertilizer

1. 料盘 2. 有机肥 3. 质量监测区 4. 料斗 5. 卸料槽 6. 斗轮机架

堆积角能反映有机肥颗粒的内摩擦性与散落性能, 前期通过圆筒提升堆积物理试验与 EDEM 仿真结合的方法对含水率为 43.60% 有机肥颗粒进行了仿真参数标定。二者堆积角的相对误差仅为 1.88%, 标定的参数准确可靠^[22], 可用于取料仿真试验, 仿真参数如表 1 所示。

3.4 评价指标

参考文献[26, 28], 斗轮取料过程中物流流应尽可能稳定, 等量取料有利于提高斗轮取料能力和效率。为确认斗轮取料效果的最优结构参数, 本次取料仿真试验选取单斗平均取料量与变异系数为评价指标, 重点研究工作参数对斗轮取料的影响规律。试验统计斗轮正常连续作业时单个料斗依次取料质量, 计算单斗平均取料量和变异系数, 计算公式为

$$\bar{M} = \frac{\sum M}{N} \quad (12)$$

表1 离散元模型材料参数及与有机肥颗粒之间的接触参数

Tab.1 Material parameters and contact parameters between discrete element model and organic fertilizer particles

材料	参数	数值
有机肥	泊松比	0.11
	剪切模量/Pa	5.5×10^6
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1703
	JKR 表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.3
不锈钢	泊松比	0.30
	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7860
有机肥-有机肥	碰撞恢复系数	0.40
	静摩擦因数	0.55
	动摩擦因数	0.13
有机肥-不锈钢	碰撞恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.40
	动摩擦因数	0.35

$$S = \frac{\sqrt{\sum (M - \bar{M})^2}}{N - 1} \quad (13)$$

$$C_v = \frac{S}{\bar{M}} \times 100\% \quad (14)$$

式中 \bar{M} ——正常连续作业料斗依次取料质量,kg/个
 M ——正常连续依次取料单斗平均取料量,kg/个
 N ——正常连续依次取料作业料斗数量
 S ——标准差,kg/个
 C_v ——变异系数,%

4 取料试验与结果分析

根据文献[14],斗式取料机斗轮进给速度、料斗数量、料斗转速等参数均会影响斗轮取料机构的生产率。本次试验以黑水虻处理的猪粪有机肥颗粒为试验对象,利用斗轮取料机构模型进行取料试验,料盘中有机肥颗粒模型尺寸(长×宽×高)为1m×0.3m×0.1m,分析斗轮进给速度、料斗转速、料斗数量对单斗平均取料量和变异系数的影响规律。

4.1 单因素试验与结果分析

4.1.1 斗轮进给速度

在料斗转速为12 r/min,料斗数量为4的试验条件下,进给速度对斗轮取料效果的影响如图14所示。单斗平均取料量随进给速度的增大而增加,在斗轮进给速度为60 mm/s时,料斗平均取料量达到2.670 kg/个,斗轮进给速度过大,将造成散料自由表面线过长,取料量没有明显增大趋势。变异系数随进给速度的增加先急剧降低,然后保持平缓的较低值范围。进给速度20 mm/s时变异系数达到

12.4%;进给速度40~60 mm/s时,变异系数降低到2.1%~2.6%;进给速度大于60 mm/s,料斗平均取料量增加趋势平缓,变异系数呈小幅增大趋势,斗轮等量取料优势降低。因此,选取斗轮进给速度范围为45~65 mm/s。

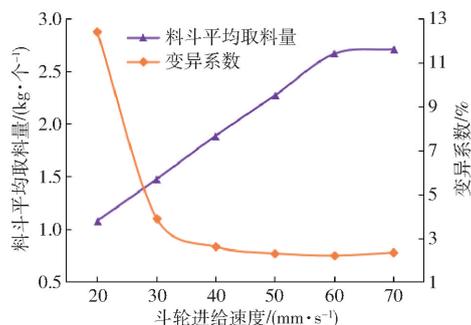


图14 不同进给速度时料斗取料量变化曲线

Fig. 14 Change curves of reclaiming mass with different moving speeds of bucket-wheel

4.1.2 料斗转速

在斗轮进给速度为30 mm/s,料斗数量为4试验条件下,转速对斗轮取料效果的影响如图15所示。料斗平均取料量随转速增大而逐渐降低,转速为6 r/min时,料斗平均取料量达到2.23 kg/个,转速低于6 r/min时,旋转周期内转移输送有机肥效率低;考虑斗轮机构重力卸料要求,转速不宜过高。变异系数随着转速提高先增加后降低,转速为6 r/min时变异系数最低,为1.5%。转速增加,取料量分布不均,变异系数增大。转速为15 r/min时,变异系数为8.2%。但是,料斗转速超过15 r/min时,单个料斗取料频率增加,取料量降低,但单斗取料均匀度提高,变异系数较低。因此,选取料斗转速范围为6~12 r/min。

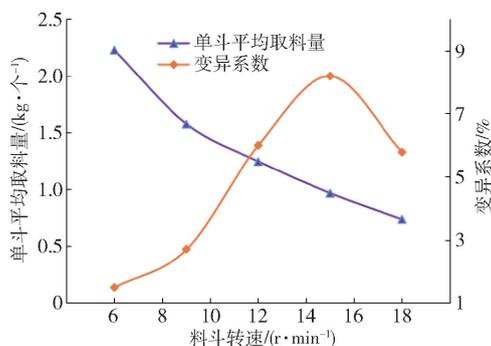


图15 不同料斗转速时料斗取料量变化曲线

Fig. 15 Change curves of reclaiming mass with different rotation speeds of bucket-wheel

4.1.3 料斗数量

在斗轮进给速度为30 mm/s,料斗转速为12 r/min试验条件下,考虑斗轮直径、料斗尺寸、料斗间距等参数的影响,选取2~6个料斗作为试验因素,料斗数量对斗轮取料效果的影响如图16所示。

随料斗数量的增加,单位时间内料斗的单次取料量降低。料斗数量为6个时,取料量最小,为0.43 kg/个。变异系数随着料斗数量的增加,总体呈M型曲线变化趋势。料斗数量为偶数时,取料相对均匀度高;料斗数量为奇数时,取料量差异大,变异系数较高。料斗数量为2个,单斗处于取料状态,易带来偏摆振动、不稳定;料斗数量为5个,单位时间的取料频率高,但单斗取料质量不均,变异系数最大;料斗数量为6个,布局过于紧凑,导致两个料斗同时卸料重叠,冲击振动较大。考虑取料效率和作业稳定,试验分析结果和式(7)理论计算获得的料斗数量范围具有很好的 consistency,因此,选取料斗数量范围为3~5个。

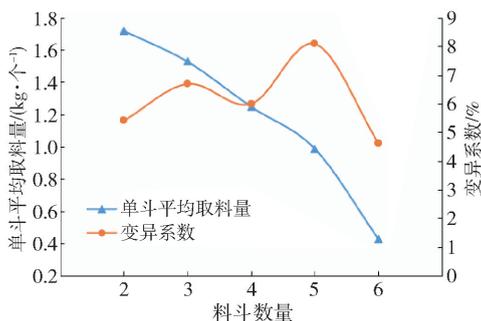


图16 不同料斗数量时料斗取料量的变化曲线

Fig. 16 Change curves of reclaiming mass with different numbers of hopper

4.2 正交试验与结果分析

4.2.1 正交试验方案设计

综合考虑单因素试验分析结果,确定如表2所示的各工作参数的试验因素编码,以单斗平均取料量 Y_1 和变异系数 Y_2 为评价指标,选取斗轮进给速度、料斗转速、料斗数量为试验因素,根据 Box - Behnken 试验原理设计三因素三水平回归正交试验^[29-30],试验方案与结果如表3所示,表3中 X_1 、 X_2 、 X_3 为斗轮进给速度、料斗转速、料斗数量的编码值。

表2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of test factors

编码	因素		
	斗轮进给速度 $x_1/(mm \cdot s^{-1})$	料斗转速 $x_2/$ $(r \cdot \min^{-1})$	料斗数量 x_3
-1	45	6	3
0	55	9	4
1	65	12	5

4.2.2 回归模型建立与显著性检验

根据表3中的数据样本,利用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据开展多元回归拟合分析,建立单斗平均取料量、变异系数对斗轮进给速度、料斗转

表3 试验方案与结果

Tab. 3 Experiment design and response values

序号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/(kg \cdot \text{个}^{-1})$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	0	3.157	2.81
2	1	-1	0	4.340	4.32
3	-1	1	0	1.744	1.28
4	1	1	0	2.411	0.24
5	-1	0	-1	2.887	1.90
6	1	0	-1	4.040	3.21
7	-1	0	1	1.860	0.40
8	1	0	1	2.581	0.72
9	0	-1	-1	4.620	9.13
10	0	1	-1	2.738	2.13
11	0	-1	1	3.090	4.13
12	0	1	1	1.748	1.46
13	0	0	0	2.630	1.49
14	0	0	0	2.616	1.60
15	0	0	0	2.652	0.40
16	0	0	0	2.674	1.44
17	0	0	0	2.623	1.20

速、料斗数量3个自变量的二次多项式响应面回归模型

$$Y_1 = 2.64 + 0.47X_1 - 0.82X_2 - 0.63X_3 - 0.13X_1X_2 - 0.11X_1X_3 + 0.14X_2X_3 + 0.033X_1^2 + 0.24X_2^2 + 0.17X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_2 = 1.23 + 0.26X_1 - 1.91X_2 - 1.21X_3 - 0.64X_1X_2 - 0.25X_1X_3 + 1.08X_2X_3 - 0.86X_1^2 + 1.80X_2^2 + 1.19X_3^2 \quad (16)$$

对回归模型进行方差分析^[31],结果如表4所示。由表4可知,二次回归模型 $P < 0.001$,表明回归模型极显著;失拟项 $P > 0.05$ (分别为0.4297、0.1207),失拟不显著,说明模型所得二次回归方程拟合程度高,能正确反映单斗平均取料量 Y_1 、分离变异系数 Y_2 与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的关系;其决定系数 R^2 分别为0.9996和0.9525,表明2个回归模型可以很好解释95%以上的评价指标。因此,斗轮取料机构的工作参数可以用该模型来进行预测。

其中,单斗平均取料量 Y_1 模型中有8个回归项影响极显著 ($P < 0.01$),分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 ,有1个回归项影响显著 ($P < 0.05$),为 X_1^2 ;变异系数 Y_2 模型中有3个回归项影响极显著 ($P < 0.01$),分别为 X_2 、 X_3 、 X_2^2 ,有3个回归项影响显著 ($P < 0.05$),分别为 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 。

在保证 Y_2 模型显著、失拟项不显著的情况下,剔除模型不显著的回归项,对模型 Y_2 进行优化,得

$$Y_2 = 1.23 - 1.91X_2 - 1.21X_3 + 1.08X_2X_3 - 0.86X_1^2 + 1.80X_2^2 + 1.19X_3^2 \quad (17)$$

表4 回归模型方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression model

试验 指标	方差 来源	平方和	自由 度	均方	F	P
Y ₁	模型	10.84	9	1.20	1998.99	<0.000 1**
	X ₁	1.73	1	1.73	2877.56	<0.000 1**
	X ₂	5.39	1	5.39	8945.53	<0.000 1**
	X ₃	3.13	1	3.13	5199.79	<0.000 1**
	X ₁ X ₂	0.067	1	0.067	110.49	<0.000 1**
	X ₁ X ₃	0.047	1	0.047	77.45	<0.000 1**
	X ₂ X ₃	0.073	1	0.073	121.01	<0.000 1**
	X ₁ ²	4.725 × 10 ⁻³	1	4.725 × 10 ⁻³	7.84	0.026 5*
	X ₂ ²	0.24	1	0.24	404.26	<0.000 1**
	X ₃ ²	0.12	1	0.12	200.80	<0.000 1**
	残差	4.217 × 10 ⁻³	7	6.024 × 10 ⁻⁴		
	失拟	1.957 × 10 ⁻³	3	6.523 × 10 ⁻⁴	1.15	0.429 7
	误差	2.260 × 10 ⁻³	4	5.650 × 10 ⁻⁴		
总和	10.84	16				
Y ₂	模型	70.55	9	7.84	15.59	0.000 8**
	X ₁	0.55	1	0.55	1.10	0.329 9
	X ₂	29.18	1	29.18	58.04	0.000 1**
	X ₃	11.66	1	11.66	23.20	0.001 9**
	X ₁ X ₂	1.63	1	1.63	3.23	0.115 2
	X ₁ X ₃	0.25	1	0.25	0.49	0.507 7
	X ₂ X ₃	4.69	1	4.69	9.32	0.018 5*
	X ₁ ²	3.11	1	3.11	6.18	0.041 8*
	X ₂ ²	13.58	1	13.58	27.00	0.001 3**
	X ₃ ²	5.97	1	5.97	11.87	0.010 8*
	残差	3.52	7	0.50		
	失拟	2.58	3	0.86	3.67	0.120 7
	误差	0.94	4	0.23		
总和	74.07	16				

注：**表示差异极显著(P < 0.01)；*表示差异显著(0.01 < P < 0.05)。

4.2.3 单斗平均取料量与变异系数的影响因素分析

由表4中各因素F值分析可知,3个因素对单斗平均取料量与变异系数的影响显著性顺序均为料斗转速、料斗数量、斗轮进给速度。根据回归方程分析结果,利用 Design-Expert 8.0.6 软件分别作影响显著的各交互因素与单斗平均取料量、变异系数之间关系的响应面图(图17、18),根据响应曲面形状,对单斗平均取料量、变异系数变化趋势影响较大的

试验因素进行分析说明。

(1)交互因素对单斗平均取料量的影响

斗轮进给速度、料斗转速、料斗数量对响应值Y₁影响的响应曲面如图17所示。由图17a可以看出,提高进给速度和降低转速有利于提高单斗平均取料量。由图17b可以看出,提高进给速度和降低料斗数量有利于提高单斗平均取料量。由图17c可以看出,降低转速和减少料斗数量有利于提高单斗平均取料量。此外,从各因素对响应值Y₁影响的响应图可以得知,响应面变化规律与表4回归方程分析结果、模型式(15)分析一致,总体影响趋势为斗轮进给速度越大、料斗转速越小、料斗数量越少,单斗平均取料量越高。其主要原因在于:斗轮进给速度增加与料斗转速减小,单个料斗取料量明显增多;料斗数量减少,单位时间内取料次数降低,增加了单个料斗的取料量。

(2)交互因素对变异系数的影响

图18为斗轮进给速度处于中心位置(55 mm/s)时,料斗转速和料斗数量对变异系数Y₂的交互作用响应面图,由图18可以看出当料斗数量为定值时,变异系数随料斗转速的增加先减小后增大,存在最优值。当转速一定时,变异系数随料斗数量的增加先减小后增大,并且变化幅度较为平缓,存在最优值。虽然变异系数随转速与料斗数量变化都产生了改变,但响应曲面沿料斗转速方向的变化较料斗数量方向的变化更为明显,在中心水平下,料斗转速对变异系数的影响比料斗数量的影响更显著。另外,由图18可知,响应面变化规律与表4分析结果及模型式(17)分析相吻合,总体影响趋势为转速越低、料斗数量越少,变异系数越大。其主要原因在于:斗轮进给速度一定时,转速降低,料斗数量减少,单位时间料斗取料次数减少,料斗间的取料量差异性增大。

5 最优参数确定与试验验证

5.1 参数优化

为达到最佳的斗式取料机工作参数,按照单斗

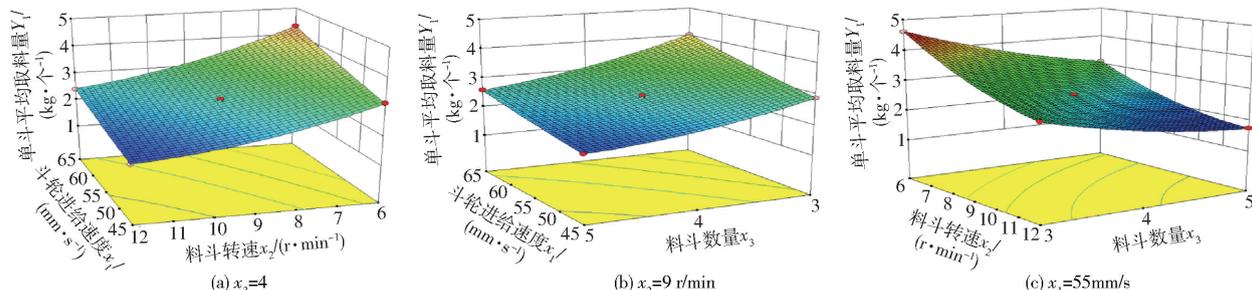


图17 因素交互作用对单斗平均取料量影响的响应曲面

Fig.17 Response surfaces of influence of factor interaction on mean mass shoveled by hopper

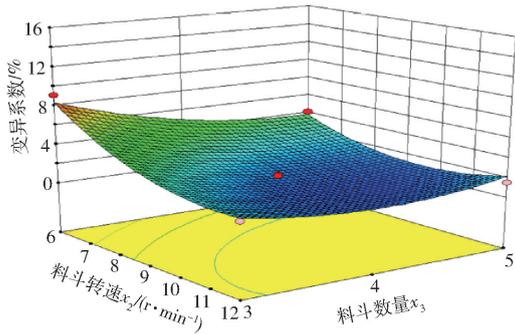


图 18 因素交互作用对变异系数影响的响应曲面

Fig. 18 Response surface of influence of factor interaction on coefficient of variation

平均取料量最大、变异系数最小的优化目标,对斗轮进给速度、料斗转速、料斗数量进行优化研究。运用 Design-Expert 8.0.6 软件对建立的 2 个指标的全因子二次回归模型进行最优化求解,约束目标函数为: $\max Y_1$ 、 $\min Y_2$; 约束条件为: $-1 \leq X_j \leq 1 (j=1, 2, 3)$ 。根据 2 个指标对斗轮取料过程评价与设备利用率的同等重要性^[22-23,25],设置单斗平均取料量与变异系数的权重分配均为 0.5。优化得到各因素最优参数为:斗轮进给速度 65 mm/s,料斗转速 8.25 r/min,料斗数量 3.39 时,单斗平均取料量为 3.924 kg/个,变异系数为 2.57%,根据优化结果,将料斗数量 X_3 设置为 -1,其他条件不变,再次利用软件求优,优化参数结果为:斗轮进给速度 65 mm/s,料斗转速 8.25 r/min,料斗数量 3,此时单斗平均取料量为 4.008 kg/个,变异系数为 3.19%。

5.2 试验验证

根据优化工作参数模拟斗轮卸料,如图 19 所示。仿真过程选取料斗内外侧 8 个代表颗粒点,得到始末落料轨迹,初步确定卸料槽结构参数。结果表明,在斗内有机肥颗粒持续落料冲击下,卸料槽满足卸料要求,基本结构参数为:卸料槽向下倾斜 30°,卸料槽侧壁与底面的夹角 θ 为 135°,卸料槽底部宽度 a 为 0.31 m、卸料槽顶部宽度 b 为 0.395 m、卸料槽侧壁长度 c 为 0.055 m、卸料槽长度 d 为 0.4 m。为进一步验证模型的可靠性,2020 年 10 月 12 日在湖南农业大学综合实训中心,以湖南大湘农环境科技有限公司提供的黑水虻处理猪粪有机肥为样品进行验证试验。采用上述最优斗轮参数设计料斗、料盘以及斗轮机架,料盘及料盘中的有机肥与仿真试验设计保持一致,料盘长 × 宽为 1 m × 0.3 m、有机肥层铺填充高度为 0.1 m,采用两次平行试验烘干法测得有机肥含水率为 44.50%,略高于文献[19]中测得有机肥的含水率。在斗轮进给速度 65 mm/s、料斗转速 8.25 r/min、料斗数量 3 个条件下进行试验,试验

现场如图 20 所示。

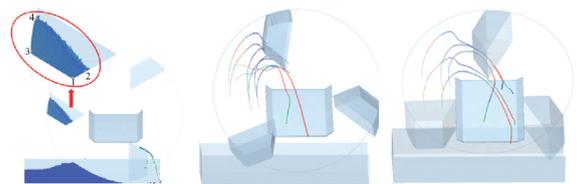


图 19 斗轮卸料仿真过程

Fig. 19 Simulation process of bucket wheel discharging

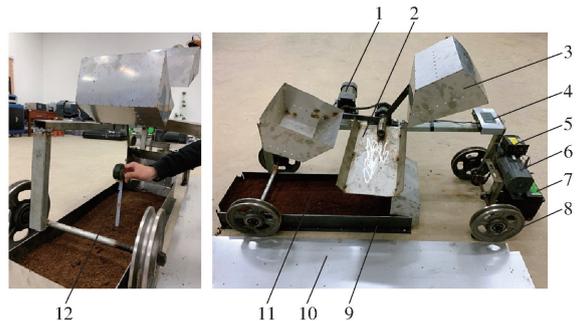


图 20 试验现场

Fig. 20 Test site

1. 斗轮旋转调速电机 2. 卸料槽 3. 料斗 4. 转速测量仪 5. 调速器 6. 驱动电机 7. 蓄电池 8. 驱动轮 9. 料盘 10. 集料板
11. 有机肥 12. 有机肥高度测量装置

在斗轮进给速度 65 mm/s、料斗转速 8.25 r/min、料斗数量 3 个条件下,提取斗轮机构取料时第 8 秒时的过程模拟图,同时验证试验现场通过高速摄像机拍摄第 8 秒时的斗轮取料图像,对比结果如图 21 所示。由图 21 可知,斗轮机构在优化参数下工作,能够实现无残留铲取水平料盘上层铺状态的有机肥,料斗提升有机肥时,因为散体物料堆积曲面前移,导致料盘侧壁位置存在极小部分撒料,卸料槽结构参数满足斗轮机构重力式卸料要求,无撒料现象,仿真试验与物理试验规律基本一致。另外,由于试验时有机肥的含水率略高于前期研究试验所测得的含水率,但小于 1 个百分点,仿真参数可用于模拟试验,卸料速率略低于仿真卸料速率,有机肥质量略高于仿真值,最后试验测得单斗平均取料量为 4.236 kg,变异系数为 3.37%,理论仿真结果与试验结果的相对误差分别为 5.38%、5.34%。

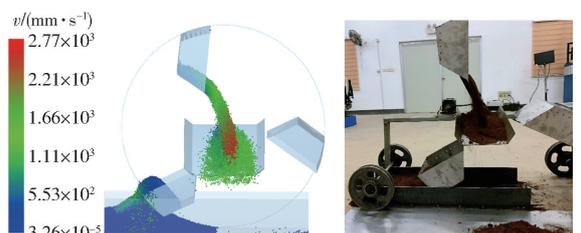


图 21 斗轮机构第 8 秒时取料状态

Fig. 21 Reclaiming status of bucket-wheel mechanism at 8 seconds

6 结论

(1)根据黑水虻养殖工艺流程和黑水虻处理的猪粪有机肥的物理特性,设计了一种斗式取料机。该机能有序铲取料盘中层铺放状态的有机肥,解决了黑水虻处理的猪粪有机肥在取料与输送过程中劳动强度大的问题。

(2)通过对斗式取料机中的斗轮取料工作过程进行理论分析,确定了斗轮的主要结构和影响取料效果的关键参数。应用离散元仿真进行单因素试验和三因素三水平正交试验,研究分析了工作参数对单斗平均取料量和变异系数的影响规律。采用多目

标多变量优化方法寻求最优工作参数组合,为样机制作提供参考。仿真试验表明,工作参数对单斗平均取料量和变异系数的影响显著顺序由大到小均为料斗转速、料斗数量、斗轮进给速度,最优工作参数组合为斗轮进给速度 65 mm/s、料斗转速 8.25 r/min、料斗数量 3,此时,斗轮取料效果最佳。

(3)根据仿真优化试验得出的最优工作参数组合,搭建台架试验进行验证,结果表明,单斗平均取料量、变异系数的理论优化值与试验值分别为 4.008、4.236 kg 和 3.19%、3.37%,二者相对误差分别为 5.38%、5.34%。研究表明,借助离散元仿真优化斗式取料机工作参数是可行的。

参 考 文 献

- [1] YU M, LI Z M, CHEN W D, et al. Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source: effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs[J]. *Meat Science*, 2019, 158:107839.
- [2] 杨树义,李卫娟,刘春雪,等. 发酵猪粪对黑水虻转化率的影响及黑水虻幼虫和虫沙营养成分测定[J]. *安徽农业科学*, 2016,44(21):69-70,73.
YANG Shuyi, LI Weijuan, LIU Chunxue, et al. Effects of fermented swine manure on the conversion ratio of *Hermetia illucens* and nutritional components detection of *Hermetia illucens* larva and sandworm[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(21):69-70,73. (in Chinese)
- [3] 余苗,李贞明,容庭,等. 黑水虻在低碳畜牧业中的应用研究进展[J]. *广东农业科学*, 2020,47(12):122-133.
YU Miao, LI Zhenming, RONG Ting, et al. Research progress in the application of *Hermetia illucens* in low-carbon animal husbandry[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020,47(12):122-133. (in Chinese)
- [4] BESKIN K V, HOLCOMB C D, CAMMACK J A, et al. Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (*Diptera:Stratiomyidae*) impacts associated volatile emissions[J]. *Waste Management*, 2018, 74: 213-220.
- [5] 刘巧林. 黑水虻在奶牛粪便中生长对大肠杆菌 ER2566 的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2008.
LIU Qiaolin. Influence of escherichia coli ER2566 by black soldier fly larvae grown in dairy manure[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [6] CHOI Y C, CHOI J Y, KIM J G, et al. Potential usage of food waste as a natural fertilizer after digestion by *Hermetia illucens* (*Diptera: Stratiomyidae*)[J]. *International Journal of Industrial Entomology*, 2009, 19(1):659-663.
- [7] NEWTON L, SHEPPARD C, WATSON D W, et al. Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure[D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2005.
- [8] 袁橙,魏冬霞,解慧梅,等. 黑水虻幼虫处理规模化猪场粪污的试验研究[J]. *畜牧与兽医*, 2019,51(11):49-53.
YUAN Cheng, WEI Dongxia, XIE Huimei, et al. Research on treatment of fecal pollution on large scale pig farms with black soldier fly larva[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2019, 51(11): 49-53. (in Chinese)
- [9] 徐齐云,龙镜池,叶明强,等. 黑水虻幼虫的发育速率及食物转化率研究[J]. *环境昆虫学报*, 2014,36(4):561-564.
XU Qiyun, LONG Jingchi, YE Mingqiang, et al. Development rate and food conversion efficiency of black soldier fly, *Hermetia illucens*[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36(4): 561-564. (in Chinese)
- [10] 付建伟,张国忠,谢干,等. 双通道喂入式再生稻收获机研制[J]. *农业工程学报*, 2020,36(3):11-20.
FU Jianwei, ZHANG Guozhong, XIE Gan, et al. Development of double-channel feeding harvester for ratoon rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(3): 11-20. (in Chinese)
- [11] 刘文政,何进,李洪文,等. 马铃薯微型种薯种植机双侧位深施肥装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2020,51(1):56-65.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of double-side deep fertilizing device for potato micro-seed planter[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 56-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.006. (in Chinese)
- [12] 戚江涛,蒙贺伟,坎杂,等. 基于 EDEM 的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2017,33(24):65-71.
QI Jiangtao, MENG Hewei, KAN Za, et al. Analysis and test of feeding performance of dual-spiral cow feeding device based on EDEM[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(24): 65-71. (in Chinese)
- [13] 彭才望,孙松林,贺喜,等. 双向螺旋黑水虻虫沙收集装置设计与试验[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, 46(5):637-646.

- PENG Caiwang, SUN Songlin, HE Xi, et al. Design and experiment of bidirectional spiral collecting device for *Hermetia illucens* insect sand[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2020, 46(5): 637-646. (in Chinese)
- [14] 邵明亮, 于国飞, 耿华, 等. 斗轮堆取料机[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [15] 应光伟, 李波, 刘勤国, 等. 斗轮堆取料机的发展与展望[J]. 港口装卸, 2010, 19(4): 1-3.
- [16] 杨公波, 李郁, 陈定方. 基于 EDEM 仿真的斗轮堆取料机取料机理研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(3): 680-683.
- YANG Gongbo, LI Yu, CHEN Dingfang. Research of reclaiming mechanism of the bucket wheel stacker reclaimer based on EDEM simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(3): 680-683. (in Chinese)
- [17] 方自强, 简斌. 斗轮挖掘机取料过程的离散元仿真分析[J]. 起重运输机械, 2018(3): 93-97.
- [18] 吴奋敬, 胡吉全, 陈定方, 等. 斗轮堆取料机关键参数离散元仿真研究[J]. 起重运输机械, 2016(4): 86-89.
- [19] 毕秋实, 王国强, 陈立军, 等. 基于离散元-多体动力学联合仿真的机械式挖掘机挖掘阻力仿真与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(1): 106-116.
- BI Qiushi, WANG Guoqiang, CHEN Lijun, et al. Numerical simulation and experiment on excavation resistance of mechanical excavator based on EDEM-MBD co-simulation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1): 106-116. (in Chinese)
- [20] 焦志勇, 段玉如, 杨春宏, 等. 基于 RecurDyn 的斗轮取料机铲斗工作过程仿真[J]. 天津科技大学学报, 2011, 26(5): 44-46, 60.
- JIAO Zhiyong, DUAN Yuru, YANG Chunhong, et al. Simulation of bucket working process of the bucket-wheel reclaimer based on RecurDyn[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2011, 26(5): 44-46, 60. (in Chinese)
- [21] 刘庚. 基于 EDEM 斗式提升机卸料过程的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2018.
- LIU Geng. Research on unloading process of bucket elevator based on EDEM[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [22] 彭才望, 许道军, 贺喜, 等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 212-218.
- PENG Caiwang, XU Daojun, HE Xi, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for organic fertilizer of *Hermetia illucens* treated with pig manure[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 212-218. (in Chinese)
- [23] 解慧梅, 程汉, 魏冬霞, 等. 黑水虻处理规模化猪场粪便效果及工艺研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(4): 165-168.
- [24] 张亮, 金铁岩, 刘云峰. 臂式斗轮堆取料机斗轮机构基本参数的确定[J]. 机械工程与自动化, 2013(3): 85-87.
- ZHANG Liang, JIN Tiejian, LIU Yunfeng. Basic parameter determination for bucket wheel of boom-type bucket wheel stacker/reclaimer[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(3): 85-87. (in Chinese)
- [25] 孙境谣. 斗轮堆取料机关键部件参数化设计及性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- SUN Jingyao. Cantilever bucket wheel stacker's parameterization design and performance analysis of key parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] 于茂友. 斗轮堆取料机工作装置性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- YU Maoyou. Research on performance of the working device of bucket wheel stacker-reclaimer[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [27] 许翊鸣. 斗式提升机的选型及主要参数确定[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2004(3): 201-205.
- XU Yiming. Selection of scoop-type elevator and determination of its key parameters[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 2004(3): 201-205. (in Chinese)
- [28] 耿麒, 谢立扬, 张泽宇, 等. 全断面隧道掘进机刀盘刮渣铲斗结构对出碴性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(11): 149-157.
- GENG Qi, XIE Liyang, ZHANG Zeyu, et al. Influence of the TBM scraper bucket structure on the mucking performance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(11): 149-157. (in Chinese)
- [29] 丁素明, 薛新宇, 蔡晨, 等. 梨树枝条切割装置刀片参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 75-82.
- DING Suming, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Optimization and experiment of blade parameter for pear branches cutting device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 75-82. (in Chinese)
- [30] 严伟, 胡志超, 吴努, 等. 铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 17-24.
- YAN Wei, HU Zhichao, WU Nu, et al. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 17-24. (in Chinese)
- [31] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.