doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.035

螺旋挤压固液分离机出料端结构优化与试验

关正军[1]　束　勇[1]　熊丕荣[1]　谢钦淞[1]　许远航[1]　杨仁强[1]　朱曲波[2]
(1.西南大学工程技术学院,重庆 400715;2.西南大学动物科学技术学院,重庆 402460)

摘要:为实现螺旋挤压固液分离机长期稳定高效运行、降低人力成本,设计了一套自适应出料端加压装置及其自动控制系统,可以根据出料口压力变化自动调节开口距离。运用仿生学原理设计加压阀接触曲线,采用离散元与试验相结合的方法对出料口加压阀结构优化,通过摩擦特性试验和碰撞试验标定了牛粪的接触参数,建立了牛粪颗粒在螺旋挤压脱水过程中的离散元模型,将仿生加压阀结构进行离散元仿真,比较加压阀开口距离和出料口质量流量,最终选取了 3 种不同结构的加压阀。通过正交试验,研究加压阀结构、出料端压力和螺旋轴转速对机器分离效率、分离后固形物含水率和机器有效功率的影响,结果表明,在仿生(田鼠爪趾)二次拟合加压阀作用下,试验样机出料端压力 1 000 N、螺旋轴转速 60 r/min 时,分离固形物含水率为 58.73%,分离效率达到 2 279.76 kg/h,有效功率为 2.83 kW,分离效率最高,分离能耗最低,能耗较优化前降低了 30%。

关键词:牛粪;固液分离机;出料端;结构优化;自动控制系统;螺旋挤压
中图分类号:X713　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)03-0365-12　　**OSID**:

Optimization and Test of Discharge End Structure of Spiral Extruded Solid-liquid Separator

GUAN Zhengjun[1]　SHU Yong[1]　XIONG Pirong[1]　XIE Qinsong[1]　XU Yuanhang[1]　YANG Renqiang[1]　ZHU Qubo[2]
(1. *College of Engineering and Technology*, *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *China*
2. *College of Animal Science and Technology*, *Southwest University*, *Chongqing* 402460, *China*)

Abstract: Intelligent and green is the current development trend of agricultural environmental protection equipment. In order to achieve long-term stable and efficient operation of spiral extrusion solid-liquid separator and reduce labor cost, a set of adaptive discharge end pressure device and its automatic control system was developed, which can automatically adjust the size of the outlet according to the change of outlet pressure. The contact curve of the pressure valve was designed based on the principle of bionics, and the structure of the pressure valve at the discharge port was optimized by combining discrete elements with experiments. The contact parameters of cow dung were calibrated through friction characteristic test and collision test, and the discrete element model of cow dung particles in the process of spiral extrusion dehydration was established. Comparing the opening size of the pressure valve and the mass flow rate of the discharge port, three kinds of pressure valves with different structures were selected. Through orthogonal test, the influences of pressure valve structure, initial pressure at discharge end and rotation speed of spiral shaft on separation efficiency, moisture content of solid after separation and effective energy consumption of the machine were studied. The results showed that under the bionic (vole claw toe) secondary fitting pressure valve, the initial pressure at discharge end of the test prototype was 1 000 N and rotation speed of spiral shaft was 60 r/min. The separation efficiency reached 22 79.76 kg/h, the moisture content of cow manure was 58.73%, the effective power was 2.83 kW, the separation efficiency was the highest, the energy consumption per ton of cow manure was the lowest, and the effective power was reduced by 30% compared with that before optimization.

Key words: cow dung; solid-liquid separator; discharge end; structure optimization; automatic control system; spiral extrusion

收稿日期:2024-10-30　修回日期:2024-11-26
基金项目:重庆市科技局农高新专项(CSTC2019ngzx0017)和重庆市技术创新与应用发展专项(CSTC2021jscx-dxwtBX0003)
作者简介:关正军(1970—),男,教授,博士,主要从事农业废弃物资源化利用研究,E-mail:zhjguan@163.com

0 引言

据农业农村部[1]统计,当前我国畜禽粪污年产生量 30.5 亿吨以上,研究表明畜禽粪污中含有丰富的氮磷钾等元素,具有巨大的利用价值。螺旋挤压可以将畜禽粪污分离成固态粪污和液态粪污,其中固态粪污经堆肥后制作有机肥料,液态粪污通过沼气发酵、固液分离后沼渣经过堆肥处理制作有机肥料,是实现畜禽粪污资源化利用的有效途径之一[2]。其操作简单、自动化水平高、日处理量大,因而广泛应用于各类养殖场粪污以及部分粗纤维有机废弃物的处理中[3-6]。

目前市场上销售的螺旋挤压固液分离机出料端加压装置分为重锤式和弹簧式,需要工人根据经验调节弹簧压力或重锤位置从而改变出料口压力,既增加了劳动强度,又无法实现出料端压力准确、及时调节,随着固液分离原料复杂程度增加,该机器分离过程常发生堵塞、抱料和分离效果较差等问题,进而导致机器工作能耗高,分离后固态粪污含水率 70% 以上,无法直接成为堆肥或生产垫料原料。重锤式和弹簧式固液分离机出料口加压阀分别采用上、下压板和平阀结构,前者在机器工作前需要在出料口塞料,易发生出料口漏水现象,导致分离后固态粪污含水率较高,后者平阀结构卸料阻力较大影响分离效率。

目前国内外学者针对该机器结构展开了大量改进研究,其中针对螺旋轴结构、分离筛网间隙、机器运行参数优化取得了显著成果[7-8],EOM 等[9]和 NAKAN 等[10]分别针对锥形挤压固液分离机结构和二级脱水型螺旋挤压固液分离机结构设计展开研究。经优化后螺旋挤压固液分离机分离后固形物含水率不断下降,分离效率逐渐提高。但是费辉盈等[11]发现牛粪在含水率低于 65% 后不易脱水,苏海泉[12]研究发现将挤压后的粪渣摊晒 12 h 可以降低 20% 的含水率。综上所述,针对螺旋挤压固液分离机研究普遍存在以下问题:片面追求机器分离效果而忽视机器分离效率和能耗等因素;缺少出料端结构减阻和机器智能化运行控制相关研究。

针对当前研究存在的问题,本文以牛粪尿为原料,研究牛粪挤压脱水规律及其接触参数,以离散元仿真为依据优化加压阀结构,并研发一套自适应出料端加压装置,以降低劳动成本和机器卸料阻力,实现出料端压力智能化调节和分离后固态粪污含水率精确控制,解决机器分离过程中发生堵塞、抱料和分离效果较差等问题。通过正交试验研究加压阀结构、出料端压力和螺旋轴转速对机器分离效率、分离后固形物含水率和机器有效功率的影响,提高机器分离效率,降低有效功率,实现畜禽养殖业可持续发展。

1 自适应出料端加压装置设计

1.1 堵塞原因分析

图 1 所示为市场上某款螺旋挤压固液分离机结构示意图,通过考察重庆市铜梁区肉牛场该型号机器使用情况,总结出造成机器堵塞及分离效率降低的两大类原因。

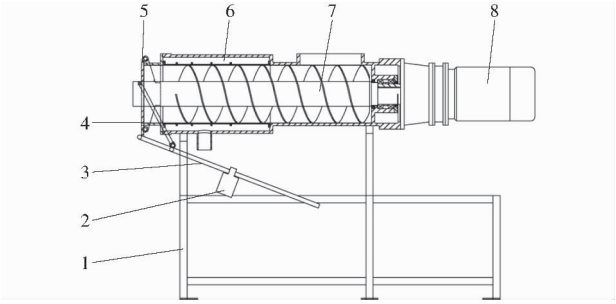


图 1 螺旋挤压固液分离机结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of screw extrusion solid-liquid separation machine

1. 机架 2. 配重块 3. 压杆 4. 下压板 5. 上压板 6. 机罩 7. 螺旋轴 8. 主电机

机器智能化程度低和日常维护问题:当前机器末端需要工人凭借经验调节重锤或弹簧位置进而改变出料端压力,并且开机前出料口需要人工塞料,既增加了劳动强度,螺旋轴与筛网之间易发生磨损导致螺旋叶片与筛网之间产生间隙,牛粪中的粗纤维通过间隙堵塞筛网;机器在停机之后,残留在筛网段中的粗纤维易堵塞筛网间隙从而造成机器堵塞。

筛网及出料端加压装置存在结构缺陷:加压装置结构影响卸料阻力,该型号机器末端加压采用压板控制开口大小,卸料过程牛粪与平面压板接触会产生较大的阻力和能量损耗,若设计具有引导曲面的加压阀结构可以有效解决上述问题,图 2 所示为一种加压阀结构,对加压阀横截面进行受力分析,选取加压阀引导曲面上某一固形物微元为分析对象,

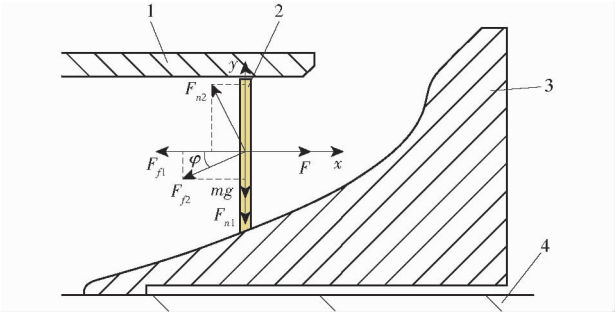


图 2 牛粪微元受力分析

Fig. 2 Microelement force analysis of cow manure

1. 出料套筒 2. 牛粪微元 3. 加压阀 4. 螺旋轴

为便于计算，假设该时刻固形物微元受力不变，且固形物微元不可再压缩。

在 x、y 方向上的运动微分方程分别为

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=F-F_{n_2}\sin\varphi-F_{f_1}-F_{f_2}\cos\varphi \tag{1}$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=F_{n_2}\cos\varphi-F_{f_2}\sin\varphi-mg-F_{n_1} \tag{2}$$

对式(1)、(2)积分得出固形物微元在 x、y 方向上的速度v_x、v_y方程

$$v_x=\frac{t}{m}(F-F_{n_2}\sin\varphi-F_{f_1}-F_{f_2}\cos\varphi)+C_1 \tag{3}$$

$$v_y=\frac{t}{m}(F_{n_2}\cos\varphi-F_{f_2}\sin\varphi-F_{n_1})-gt+C_2 \tag{4}$$

式中　F——x 方向推力，N

F_{n_1}——出料套筒与牛粪微元之间的压力，N

F_{f_1}——出料套筒与牛粪微元之间摩擦力，N

F_{n_2}——加压阀对牛粪微元的支持力，N

F_{f_2}——加压阀与牛粪微元之间的摩擦力，N

φ——牛粪微元和加压阀接触曲面切线与 x 轴夹角，(°)

m——牛粪微元质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

t——时间，s

C_1、C_2——积分常数

由式(3)、(4)分析可得固形物微元在 x、y 方向上的运动速度与接触曲面准线的斜率密切相关，即加压阀接触曲面准线形式直接影响加压阀工作阻力，因此改变加压阀结构是改善机器出料口堵塞的有效途径之一。

综上所述，实现出料端压力智能化调节，优化机器末端结构尤其是加压阀和卸料口处结构，是降低劳动成本，保证机器长期使用过程中高效稳定运行的有效途径。

1.2　加压阀结构优化

加压阀接触曲面形式特别是其准线形式直接决定了接触曲面的法线方向，进而直接影响到滑过接触曲面固形物的法向压力，从而影响到加压阀接触面工作阻力。为降低工作部件接触面摩擦阻力，国内外学者针对接触曲面准线形式展开了大量研究。本文借鉴上述研究结论，设计 3 种接触面准线形式的曲面阀。

近年来国内外学者针对仿生减阻曲面进行了大量研究，其中对于田鼠爪趾、狗獾爪趾和蝼蛄爪趾仿生研究较多，并将研究成果应用于农机作业部件设计中[13-18]。文献研究结果为加压阀接触曲面优化提供了仿生研究的基础，本文通过对上述文献的详细解析获取 3 种爪趾曲线的拟合方程，使用 UG 进行建模、缩放和曲线提取，最终得出田鼠爪趾、狗獾爪趾、蝼蛄爪趾仿生曲面阀接触面准线方程为

$$\begin{cases}y_1=0.000\,1x^4-0.001\,7x^3-0.016\,2x^2+0.732\,4x\\ \qquad(0\leqslant x\leqslant 34\ \text{mm})\\ y_2=0.000\,003x^4+0.000\,2x^3+0.006\,5x^2+0.008x\\ \qquad(-70\ \text{mm}\leqslant x\leqslant -14\ \text{mm})\\ y_3=0.000\,3x^3-0.028\,8x^2+1.381\,3\\ \qquad(0\leqslant x\leqslant 56\ \text{mm})\end{cases} \tag{5}$$

文献[19]研究发现：抛物线曲率半径和方向变化连续均匀，曲率半径中心轨迹分布在原曲线一侧，曲率趋势线从坐标原点起逐渐下降并趋向于零，整条曲线光滑且无拐点。从接触面力学特性来看，滑过抛物线型接触曲面的散体物料受到的法向压力连续变化，有利于形成滑裂面并降低散体物料的内摩擦，正因如此抛物线也广泛应用于各种农机具的脱附减阻中[20]。参考上述研究结论，结合加压阀设计要求，获取了 3 种抛物线基底准线方程

$$\begin{cases}y_4=0.057\,3x^2-0.144\,9x & (0\leqslant x\leqslant 34\ \text{mm})\\ y_5=0.011x^2+0.309\,5x & (-70\ \text{mm}\leqslant x\leqslant -14\ \text{mm})\\ y_6=-0.002\,4x^2+0.843\,7x & (0\leqslant x\leqslant 56\ \text{mm})\end{cases} \tag{6}$$

传统观念认为，锥面表面若足够光滑，将具有良好的脱附减阻效果，然而已有仿真与试验研究表明，锥面接触曲面在工作过程中易产生较大粘附从而增加摩擦阻力，并且弯曲型接触曲面较直纹面工作阻力降低 7% ~20%[21-22]。本文从降低机器生产成本的角度出发对锥面加压阀的结构进行研究，针对母线倾斜角度为 30°、45°和 60°的曲面加压阀进行研究。

根据 GR150 型固液分离机出料口尺寸及正常工作开口距离，加压阀总高 68 mm，其中接触曲线段高 56 mm，外径 72 ~156 mm，内径 70 mm，经虚拟仿真后选取的 3 种结构加压阀如图 3 所示。

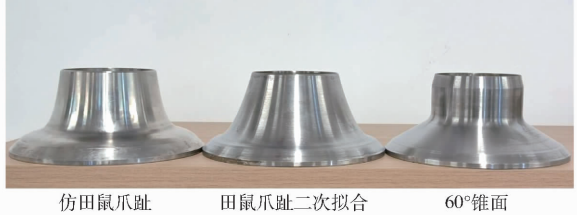


图 3　加压阀实物图

Fig. 3　Physical picture of pressure regulating valve

1.3　出料端加压装置结构设计

自适应出料端加压装置结构如图 4 所示，工作

原理是通过伺服电机驱动螺母丝杠传动装置带动加压阀前后移动,从而实现自动控制出料端开口距离,分离前使用加压阀堵住出料口省去了人工塞料的环节。该装置主要由伺服电机、螺母丝杠传动装置、弹簧、加压阀和出料套筒组成,其中伺服电机功率为750 W,螺母丝杆传动装置最大承载2.5 t,传动比为6。螺母丝杠传动装置采用横向联动安装,其法兰上依次安装有推力板、弹簧、加压阀,加压阀上设有压力传感器实时采集末端压力信号,为防止加压阀因摩擦力随螺旋轴一起转动,在加压阀与出料套筒上分别安装限位板和限位螺栓,系统压力反馈时间为0.5 s。

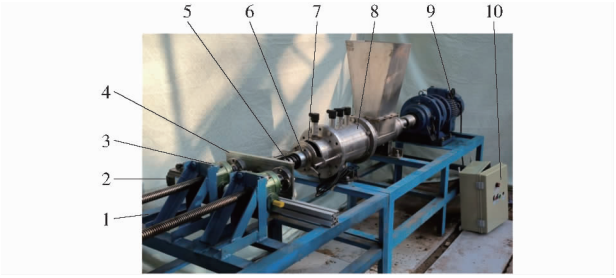


图4 自适应出料端加压装置

Fig. 4 Self-adaptive pressure application unit at the discharge end

1. 机架 2. 伺服电机 3. 螺母丝杠传动装置 4. 推力板 5. 弹簧 6. 压力传感器 7. 加压阀 8. 螺旋挤压固液分离机主体 9. 主电机 10. 控制箱

1.4 出料端控制系统设计

1.4.1 控制系统结构与工作原理

为实现出料端压力自动控制,控制系统主要由电源系统、PLC主机及其拓展模块、机械按键和触摸屏、传感器、伺服驱动器和执行机构组成,系统结构如图5所示。

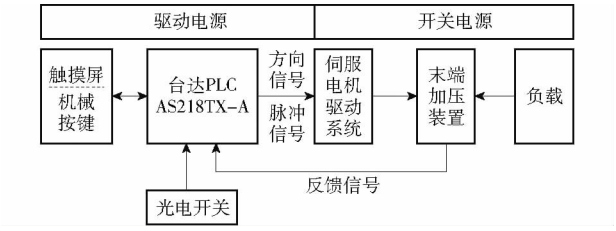


图5 控制系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of control system structure

其中电源系统包括220 V驱动电源和24 V开关电源,PLC主机型号AS218TX-A,触摸屏选用DOP-107BV,压力传感器采用蚌埠精合JH-LFA120环形中空称量传感器,选用欧姆龙E3Z-R61型光电开关,伺服驱动器型号为ASDA-B3。

开机前首先设定加压阀压力的正常运行范围,工作中当加压阀上的压力传感器测量值偏离预设压力范围时,控制系统根据当前压力的偏离值进行调节,输出为伺服电机正反转,最终表现为加压阀出料端压力大小。停机前系统设有预停机过程,输出为伺服电机反转直至出料端压力降为零,防止下一次工作启动堵塞。

1.4.2 控制系统程序设计

图6所示为控制系统流程图。系统完成初始化后可以选择手动/自动运行模式。自动运行模式下,系统首先判断出料端压力是否到达预设范围,若压力达到预设范围则伺服电机停止转动,反之则通过控制电机正反转调节出料端压力。期间,若分离物料纤维含量高,可能导致加压阀运动到极限位置,此时会触发光电开关,系统会进行报警并停止电机转动。机器运行结束前,系统会控制伺服电机转动进而将末端压力降为零再停机。

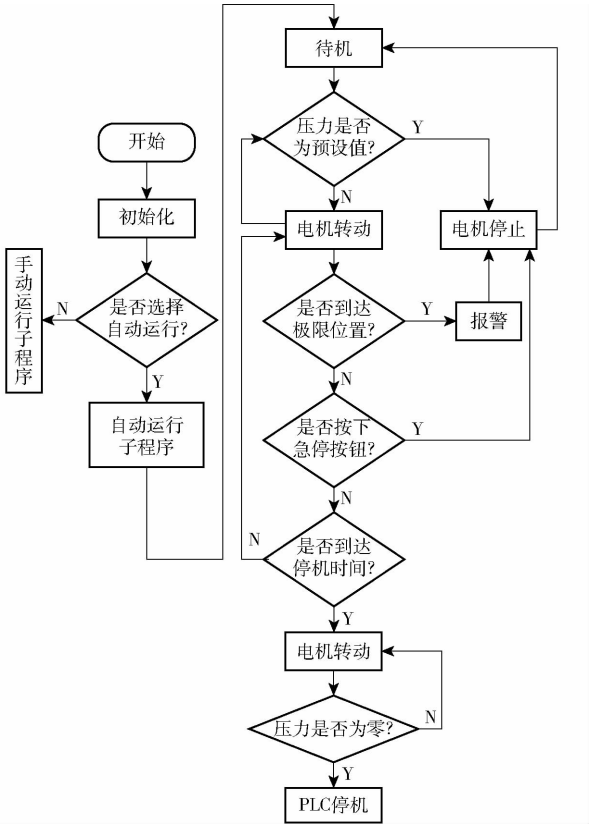


图6 控制系统流程图

Fig. 6 Control system flowchart

1.4.3 触摸屏软件设计

为提高控制系统操作便利性、监控系统工作状况,设计了一套人机交互界面。人机界面包含自动/手动模式切换菜单,在手动模式下可以修改伺服电机转速,根据需求控制电机运动进而调节出料端压力。在自动模式下,设置好出料端压力的上限、下限值以及机器延时停止时间,通过自动模式按键便可实现自适应出料端加压装置自动运行。在人机交互界面上显示当前压力值,便于实时监控系统运行状

况。人机交互界面如图 7 所示。

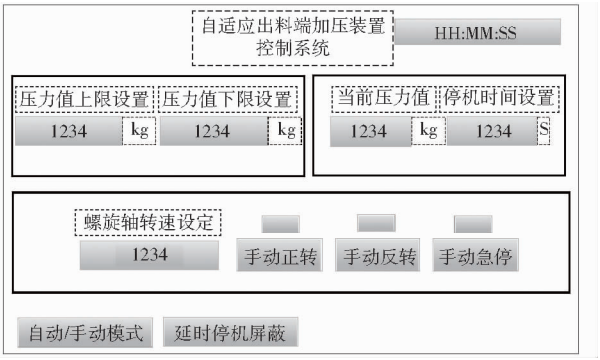


图 7　人机交互界面

Fig. 7　Human-computer interaction interface

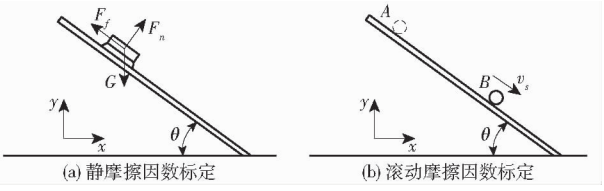
2　离散元仿真参数标定

离散元法(Discrete element method, DEM)是求解与分析复杂离散系统运动规律与力学特性的一种非连续介质力学数值方法[23],通过离散元仿真,国内外学者克服了大量散体物料接触力学的难题[24-26]。本文采用直接测量与虚拟标定相结合的方式获取牛粪接触参数,为仿真试验提供数据支持。

使用高速摄像机结合自主搭建的摩擦因数试验台和碰撞恢复系数试验台标定牛粪颗粒的接触参数。试验原料选自重庆市铜梁区肉牛养殖场固液分离后的牛粪,晒干后将含水率调配为 61% 进行试验。

2.1　摩擦因数标定

本文使用斜面法[27-28]标定牛粪静摩擦因数和滚动摩擦因数,其原理如图 8 所示。标定静摩擦因数时,取适量牛粪于环刀中称量并置于斜面上,缓慢调节斜面角度直至牛粪与斜面间发生相对运动,记录当前倾斜角度 θ。检测动摩擦因数时,将牛粪捏成直径约 10 mm 小球并称量,置于斜面点 A 处,观察斜度仪调节斜面倾斜角度为 15°、20°、25°、30°、35°,使牛粪小球自然滚落至点 B,使用高速摄像机记录运动轨迹,结合 Tracker 软件获得小球在点 B 的运动速度 v_s。测量牛粪之间的摩擦因数可以将斜面铺满牛粪并压实,重复上述操作,每组试验重复 5 次取平均值。



(a) 静摩擦因数标定　　(b) 滚动摩擦因数标定

图 8　摩擦因数标定原理图

Fig. 8　Schematic of friction factor calibration

计算静摩擦因数,代入公式

$$F_f = \mu F_n \tag{7}$$

其中　$F_f = G\sin\theta$　　$F_n = G\cos\theta$

式中　F_f——牛粪静摩擦力,N

F_n——牛粪受斜面支持力,N

G——牛粪和环刀重力,N

μ——静摩擦因数

计算滚动摩擦因数,代入公式

$$C_f = \frac{W_{fr}}{U} = \frac{U - E_k}{U} = \mu_R \cos\theta \tag{8}$$

其中　$U = mgl\sin\theta$　　$E_k = \frac{1}{2}mv_s^2$

式中　C_f——与斜面倾角余切呈线性关系的变量

W_{fr}——滚动摩擦损失功,J

μ_R——滚动摩擦因数

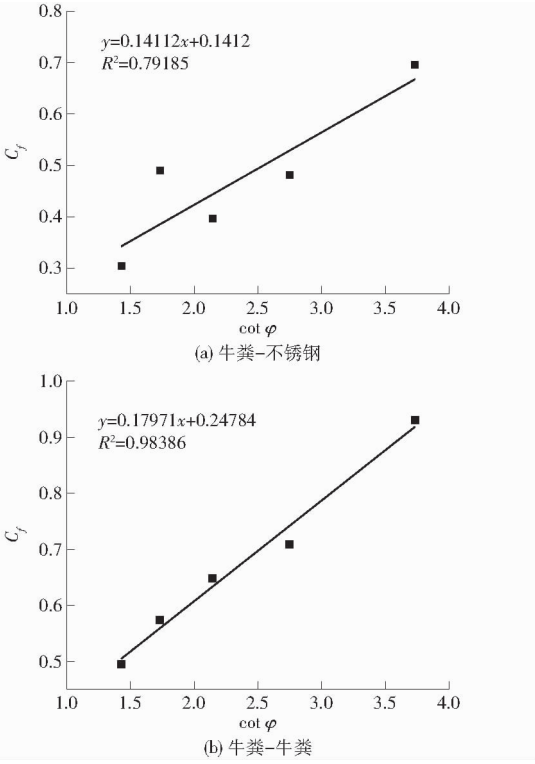
l——点 A 到点 B 的直线距离,m

v_s——牛粪小球在点 B 的运动速度,m/s

U——牛粪小球重力沿斜面向下的分力,N

E_k——牛粪小球在点 B 的动能,J

将 C_f 与 $\cos\theta$ 值导入 Origin 2021 并使用线性拟合,直线斜率即滚动摩擦因数,拟合数据如图 9 所示。



(a) 牛粪-不锈钢

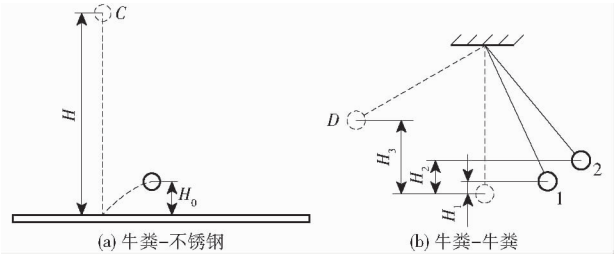
(b) 牛粪-牛粪

图 9　牛粪滚动摩擦因数拟合曲线

Fig. 9　Fitting curves of rolling friction coefficient of cow dung

2.2　碰撞恢复系数标定

碰撞恢复系数测量原理如图 10 所示。标定牛粪和不锈钢板碰撞恢复系数,将牛粪小球从点 C 自然下落至不锈钢板上,使用高速摄像机记录运动轨



(a) 牛粪-不锈钢 (b) 牛粪-牛粪

图 10 牛粪碰撞恢复系数标定原理图

Fig. 10 Schematics of calibration of collision recovery coefficient of cow dung

迹,结合 Tracker 软件获得牛粪小球弹起的最大高度 H_0,代入公式

$$e_1 = \sqrt{\frac{H_0}{H}} \tag{9}$$

式中 e_1——牛粪与不锈钢薄板碰撞恢复系数

H——点 C 与不锈钢板垂直距离,mm

标定牛粪与牛粪的碰撞恢复系数,将两牛粪小球系在铁架台的悬臂杆上,保证自然下垂两小球在同一高度。将牛粪小球 1 提至点 D 松手,碰撞牛粪小球 2,使用高速摄像机记录运动轨迹,结合 Tracker 软件获得两个小球碰撞后上升高度 H_1、H_2,代入公式

$$e_2 = \frac{\sqrt{H_2} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_3}} \tag{10}$$

式中 e_2——牛粪之间碰撞恢复系数

H_1——牛粪小球 1 碰撞后上升高度,mm

H_2——牛粪小球 2 碰撞后上升高度,mm

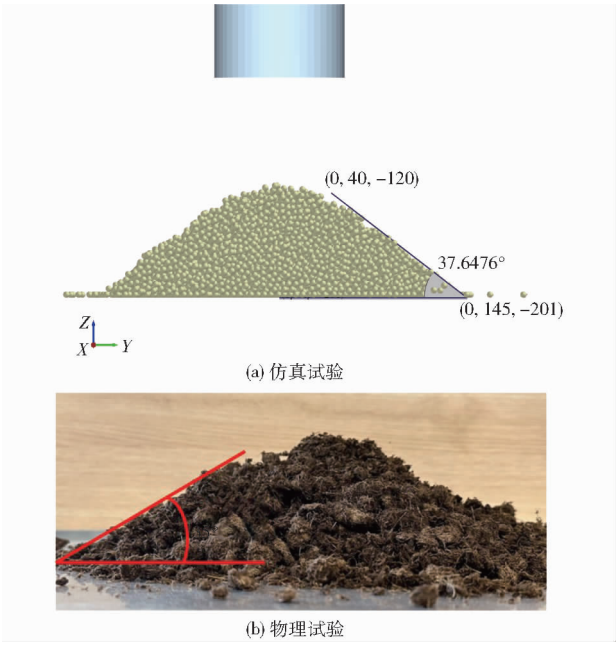
H_3——碰撞前牛粪小球 1、2 垂直距离,mm

得出牛粪碰撞恢复系数,改变 H_3,多次试验取平均值。

2.3 虚拟标定

通过直接测量法得出离散元仿真中牛粪接触参数的大致范围,无法直接应用于仿真,需要进行虚拟标定。本文采用空心筒法试验与离散元(DEM)仿真相结合的方式,通过对比堆积角进一步调节接触参数。标定结果如图 11 所示。

调整接触参数后的仿真与试验堆积角分别为 37°和 35°,相对误差 5.7%,在可接受的范围内,最终获得牛粪接触参数如表 1 所示。



(a) 仿真试验

(b) 物理试验

图 11 标定结果

Fig. 11 Calibration results

表 1 牛粪接触参数

Tab. 1 Cow dung contact parameters

参数	数值
牛粪泊松比	0.3
牛粪剪切模量/Pa	1×10^7
牛粪密度/(kg·m^{-3})	364
不锈钢泊松比	0.3
不锈钢剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
不锈钢密度/(kg·m^{-3})	7 865
牛粪之间碰撞恢复系数	0.2
牛粪之间静摩擦因数	0.9
牛粪之间滚动摩擦因数	0.2
牛粪表面能/(J·m^{-2})	0.1
牛粪与不锈钢之间碰撞恢复系数	0.3
牛粪与不锈钢之间静摩擦因数	0.6
牛粪与不锈钢之间滚动摩擦因数	0.1

3 自适应出料端加压装置性能试验

3.1 仿真试验

3.1.1 仿真模型设置

离散元(DEM)仿真在螺旋挤压固液分离机研究中应用广阔[29-30],为简化试验、降低成本,采用离散元仿真试验,构建前文所述9种结构加压阀作用下牛粪颗粒离散元模型,对比加压阀开口距离和出料口质量流量,最终选取 3 种结构加压阀作为正交试验研究对象。仿真模型如图 12 所示。

牛粪组成成分复杂,新鲜牛粪中含有大量纤维,难以通过筛分法[31]获得离散元模型,从微观角度看,牛粪由大量丝状颗粒构成,其中颗粒直径 1 ~ 2 mm 占比最大,约占 44%[32],如果按照该尺寸进行仿真会大大降低计算效率,大量离散元实践应用表明,当颗粒数量足够多时,适当放大颗粒尺寸、简化颗粒模型同样可以较准确地模拟出颗粒群体运动行为[33]。为简化仿真,本研究采用单球型颗粒模型,颗粒直径设置为 5 mm,并将颗粒数量设置足够大。在螺旋挤压过程中,牛粪颗粒受到变径螺旋轴和筛网的挤压表现出粘性和可压缩性,为简化仿真,本研

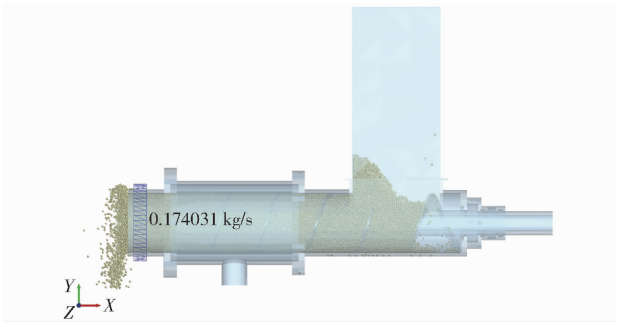


图 12　螺旋挤压固液分离机仿真模型

Fig. 12　Simulation model of a spiral extrusion solid-liquid separator

究牛粪颗粒与机器之间采用 Hertz - Mindlin (no slip) 非线性接触模型；牛粪颗粒之间采用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型；离散元仿真运动参数设置如下：加压阀初始加压 500 N 并在 8 s 开始运动，螺旋轴转速 60 r/min，仿真总时长均为 16 s，对上述 9 种加压阀进行仿真。

仿真过程中牛粪颗粒质量流量和末端开口距离是衡量机器分离效率以及出料端阻力的重要指标。通过 EDEM 后处理在出料口处设置质量流量传感器实时监控牛粪颗粒的运动状况，同时经后处理可以获得加压阀位置变化进而获得末端开口距离。由于牛粪颗粒质量流量受到末端开口距离影响，本文将开口距离作为比例因子，令质量流量除以对应模型稳定工作下开口距离的平均值获得修正后的质量流量。通过对比上述指标以期为加压阀结构优化提供数据支持。

3.1.2　仿真结果分析

离散元仿真结果如图 13 所示。

经分析得出如下结论：开口距离间接体现牛粪

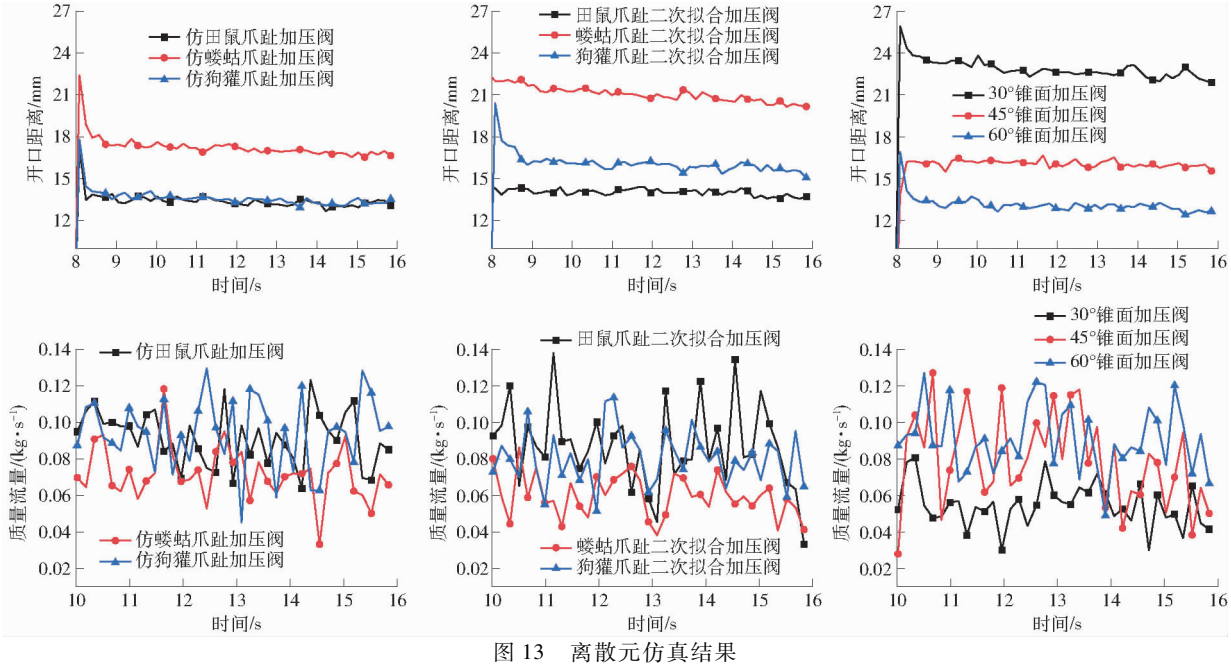


图 13　离散元仿真结果

Fig. 13　Discrete element simulation results

颗粒与加压阀接触曲面摩擦阻力大小，开口距离较小者摩擦阻力较小，在实际应用中减阻性能更优；质量流量指单位时间内通过某一截面牛粪颗粒质量，质量流量间接体现机器的分离效率。

分析仿真结果可以得出：仿生加压阀组中的仿田鼠爪趾及仿狗獾爪趾加压阀开口距离平均值相近，分别为 13.3、13.4 mm，并且均小于仿蝼蛄爪趾加压阀，而在机器稳定卸料时间段内仿田鼠爪趾加压阀质量流量平均值大于其他两类加压阀，为 0.09 kg/s；同上分析，田鼠爪趾二次拟合加压阀和 60°锥面加压阀效果更优。

综上所述，本文选用仿田鼠爪趾加压阀、田鼠爪趾二次拟合加压阀、60°锥面加压阀作为正交试验研究对象。

3.2　牛粪挤压预试验

当前低压作用下牛粪含水率变化规律并无系统研究，本文通过挤压试验探究该变化规律，并为后续正交试验提供数据支持。

3.2.1　试验材料与设备

试验材料选自重庆市铜梁区某肉牛养殖中心固液分离后的牛粪，初始含水率约 71%。

试验设备如图 14 所示，主要由空气压缩机、调压阀、手扳阀、气缸、滤筒、支架等组成。其中滤筒材料选用 20 目 40 丝不锈钢网制作，其孔隙小于 1 mm，底部铺有栅格板防止液体滞留带来试验误差。

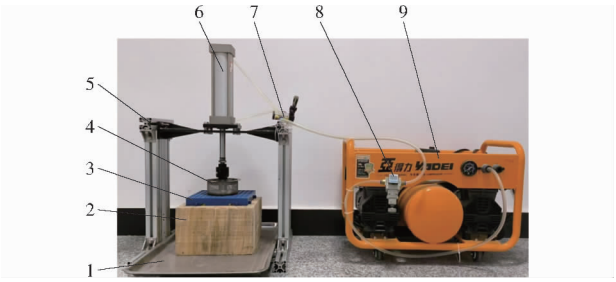


图 14 牛粪挤压试验平台

Fig. 14 Cow dung extrusion test platform

1. 托盘 2. 垫块 3. 栅格板 4. 滤筒 5. 机架 6. 气缸 7. 手扳阀 8. 调压阀 9. 空气压缩机

3.2.2 试验过程与结果分析

首先将牛粪尿混合物加水搅拌至流动态后喂入滤筒中并不断向滤网中加水，拨动调压阀直至压力达到预期值，最后调节手扳阀使气缸活塞向下运动，挤压滤筒中的牛粪尿混合物，经过充分挤压直至不再有液体流出后取样烘干并计算其含水率。为防止牛粪尿混合物内部挤压脱水不充分，试验采用薄层挤压即喂入量不超过滤筒的 1/3，并对相同的压力进行 3 组试验后取平均值以减少试验误差。牛粪挤压试验结果拟合曲线如图 15 所示。

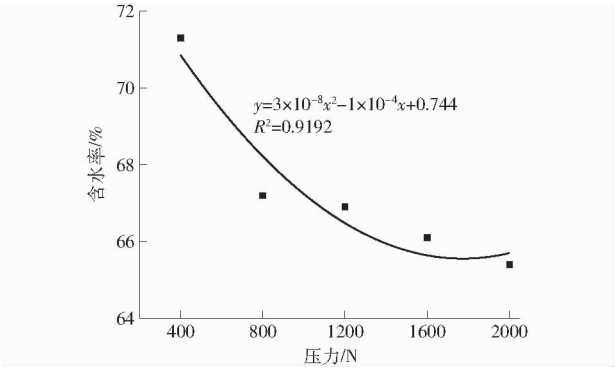


图 15 牛粪挤压试验结果

Fig. 15 Results of cow dung compression test

由图 15 可知，在牛粪挤压预试验中，随着挤压力不断增加，牛粪尿混合物的含水率呈现出从快速下降到趋于平缓的趋势。通过分析拟合曲线变化趋势可知，当挤压力达到 1 800 N 左右，牛粪尿混合物含水率约为 65% 时，即使增大挤压力，脱水效率也不会明显增加，所以在螺旋挤压固液分离机工作的过程中，为降低机器能耗，挤压脱水后的牛粪尿含水率不建议低于 65%。由于试验所用螺旋挤压固液分离机采用变径螺旋结构，实际分离段挤压力大于出料端压力，故后续正交试验出料端压力选取应低于 1 800 N。

3.3 正交试验

3.3.1 试验原料

试验材料选自重庆市铜梁区肉牛养殖中心经螺旋挤压处理后的牛粪污，试验前进行摊晒处理。规模化养牛场内螺旋挤压固液分离机均配备有潜水泵将牛粪尿混合物提升送至固液分离机中，挤压出的粪水部分经过回流管重新注入固液分离机中，该过程牛粪尿混合物含水率约为 90%。为模拟规模化养牛场牛粪尿混合物的状态，试验开始前将 5 kg 干牛粪与 45 kg 清水混合，浸泡 10 h 以上作为试验原料。

3.3.2 试验仪器设备

试验设备采用 GR150 螺旋挤压固液分离机，主电机功率 3 kW，螺旋轴为变轴径变螺距结构，螺旋轴最大直径 80 mm，最小直径 65 mm，筛网空隙 0.75 mm。试验仪器有数字钳形表、JH－LFA120 环形中空称量传感器、高精度电机转速表、电子秤和秒表。

3.3.3 试验方案设计

加压阀结构尤其是接触曲面形式直接影响固液分离机出料口卸料状态，因此作为首要考察因素；此外，出料端压力、螺旋轴转速直接影响机器分离效率、有效功率和出料含水率，因此作为主要考察因素，上述 3 种试验因素分别记为 A、B、C。

为简化试验过程，采用三因素三水平正交试验，因素之间无交互作用，参考文献[34]结合牛粪挤压预试验结果，从能耗与分离效率角度出发，出料端压力水平选择 500、1 000、1 500 N，螺旋轴转速水平选择 40、60、80 r/min，试验因素水平如表 2 所示。

表 2 固液分离试验因素水平

Tab. 2 Solid-liquid separation test factors and levels

水平	试验因素		
	加压阀结构 A	出料端压力 B/N	螺旋轴转速 C/(r·min^{-1})
1	仿田鼠爪趾	500	40
2	田鼠爪趾二次拟合	1 000	60
3	60°锥面	1 500	80

根据试验因子水平表，选定正交表 $L_9(3^4)$，该正交表最多允许安排 4 个因子，将上述因子安排在 1、2、4 列中，设置第 3 列为空列。

3.3.4 试验过程

试验前准备工作如下：提前调配试验原料并充分浸泡；调节螺旋轴电机转速；调试出料端加压装置控制程序；启动固液分离机冲洗水装置 30 s 清洁筛网。

首先启动出料端加压装置，使加压阀紧压出料口直至伺服电机停止转动，此时出料端压力达到预设值。将试验原料倒入固液分离机后开机运行，当固形物从出料口挤出时开始计时并记录钳表读数，

当机器停止出料时终止计时并关闭主电机，将加压阀复位，称取挤出固形物的质量并取样。关闭电源，更换加压阀，调节出料端压力，启动固液分离机冲洗水装置清洗机器内壁和筛网，重复上述操作进行下一组试验直至完成所有试验。

3.3.5　试验结果分析

为探究各因素对单指标的影响程度，对试验数据进行极差分析，分析结果如表 3 所示。

表 3　螺旋挤压固液分离机试验结果与极差分析

Tab. 3　Test results and range analysis of spiral extrusion solid-liquid separator

试验号	试验因素				试验指标		
	加压阀结构	出料端压力	空列	螺旋轴转速	分离效率	牛粪含水率	有效功率
	A	B/N		C/(r·min^{-1})	Y/(kg·h^{-1})	W/%	P/kW
1	仿田鼠爪趾	500	1	40	1 434.49	61.30	2.59
2	仿田鼠爪趾	1 000	2	60	2 207.11	58.75	2.86
3	仿田鼠爪趾	1 500	3	80	1 297.21	58.51	3.36
4	田鼠爪趾二次拟合	500	2	80	1 771.85	61.35	3.00
5	田鼠爪趾二次拟合	1 000	3	40	2 055.36	59.27	2.65
6	田鼠爪趾二次拟合	1 500	1	60	1 363.10	55.62	3.05
7	60°锥面	500	3	60	1 501.53	60.83	2.91
8	60°锥面	1 000	1	80	1 973.91	59.09	3.32
9	60°锥面	1 500	2	40	862.42	56.39	3.25
$\overline{Y}_1$	1 646.270	1 569.290	1 590.500	1 450.757			
$\overline{Y}_2$	1 730.103	2 078.793	1 613.793	1 690.580			
$\overline{Y}_3$	1 445.953	1 174.243	1 618.033	1 680.990			
R	284.150	904.550	27.533	239.823			
$\overline{W}_1$	59.520	61.160	58.670	58.987			
$\overline{W}_2$	58.747	59.037	58.830	58.400			
$\overline{W}_3$	58.770	56.840	59.537	59.650			
R	0.773	4.320	0.867	1.250			
$\overline{P}_1$	2.937	2.833	2.987	2.830			
$\overline{P}_2$	2.900	2.943	3.037	2.940			
$\overline{P}_3$	3.160	3.220	2.973	3.227			
R	0.260	0.387	0.064	0.397			

分离效率是衡量机器工作性能的重要指标，分离效率越高表明机器处理养殖粪水的能力越强。因此根据表 4 极差大小得到各因素对分离效率影响的主次顺序为：B、A、C，最优组合为 $A_2B_2C_2$。

牛粪含水率是衡量机器分离效果的重要指标，牛粪含水率越低表明机器脱水能力越好。各因素对牛粪含水率影响的主次顺序为：B、C、A，最优组合为 $A_2B_3C_2$。试验结果表明，在当前出料端压力作用下分离后牛粪含水率均低于 65%，满足肥料或垫料生产原料的要求，因此牛粪含水率不作为主要指标，对其最优组合不做分析。

有效功率是反映机器耗能的重要指标，各因素对有效功率影响的主次顺序为：C、B、A，最优组合为 $A_2B_1C_1$。

对试验数据进行方差分析，得到数据如表 4 所示。

通过方差分析结果得出：试验指标为分离效率 Y 时，$F_{0.01}(2,2) > F_A > F_{0.05}(2,2)$，$F_B > F_{0.01}(2,2)$，$F_{0.01}(2,2) > F_C > F_{0.05}(2,2)$，$B$ 为极显著因素，A、C 为显著因素，试验模型整体上呈显著性。

试验指标为牛粪含水率 W 时进行方差分析，$F_{0.1}(2,2) > F_A$，$F_{0.01}(2,2) > F_B > F_{0.05}(2,2)$，$F_{0.1}(2,2) > F_C$，$B$ 为显著因素，A、C 因素对牛粪含水率 W 影响不显著，模型整体上不呈显著性。

试验指标为有效功率 P 时进行方差分析，有 $F_{0.05}(2,2) > F_A > F_{0.1}(2,2)$，$F_{0.01}(2,2) > F_B > F_{0.05}(2,2)$，$F_{0.01}(2,2) > F_C > F_{0.05}(2,2)$，$B$、$C$ 均为显著因素，A 因素对有效功率 P 可能存在一定影响，模型整体上呈显著性。

通过极差分析与方差分析可以得出如下结论：出料端压力是影响机器分离效率和牛粪含水率的首要因素，并且也是影响有效功率的主要因素之一，结合各组试验数据不难发现，随着出料端压力不断增加，分离效率和牛粪含水率呈现下降趋势，机器有效功率呈现上升趋势；螺旋轴转速是影响机器有效功率的首要因素，转速越大机器有效功率越大，合理调

表 4 方差分析

Tab. 4 Variance analysis

指标	误差来源	偏差平方和 S_j	自由度 f_j	均方和 $\bar{s}_j$	F	显著水平
分离效率 Y	A	127 896.017	2	63 948.008 5	96.991	显著
	B	1 233 866.218	2	616 933.109	935.710	极显著
	C	110 614.587	2	55 307.293 5	83.885	显著
	误差(空列)	1 318.64	2	659.32		
	总和	1 473 695.462	8			
	模型显著性				372.195	极显著
含水率 W	A	1.161	2	0.581	0.910	不显著
	B	27.996	2	13.998	21.939	显著
	C	2.347	2	1.173	1.839	不显著
	误差(空列)	1.276	2	0.638		
	总和	32.780	8			
	模型显著性				8.23	不显著
有效功率 P	A	0.119	2	0.059	17.764	不显著
	B	0.238	2	0.119	35.605	显著
	C	0.252	2	0.126	37.618	显著
	误差(空列)	0.007	2	0.003		
	总和	0.615	8			
	模型显著性				30.329	显著

节转速对机器分离效率有一定影响;加压阀结构直接影响到机器卸料是否顺畅,是影响分离效率、有效功率的主要因素之一,但对于分离效果影响并不显著。

使用综合平衡法对试验结果进行分析,从表 4 看出,出料端压力对分离效率的极差最大,对牛粪含水率和有效功率均有显著性,这表明出料端压力是首要影响因素,当出料端压力取第二水平 B_2 对分离效率影响最好,虽然对牛粪含水率高于 B_3,对有效功率高于 B_1,但牛粪含水率满足生产垫料原料的要求,有效功率与 B_3 相差较小且分离效率远高于 B_1,综合分析出料端压力取第二水平 B_2 更好,同理加压阀结构和螺旋轴转速分别选取 A_2 和 C_2 更好。综上所述本试验各因子最优水平组合是:加压阀结构为田鼠爪趾二次拟合加压阀,出料端压力为 1 000 N,螺旋轴转速为 60 r/min。

根据优化结果进行 3 组重复试验,试验结果取平均值,最终获得各试验指标数据如下:分离效率 2 279.76 kg/h,牛粪含水率 58.73%,有效功率2.83 kW,分离每吨养牛粪污能耗最低,较优化前降低了 30%。

4 结论

(1)针对当前螺旋挤压固液分离机智能化程度低,长期使用中易发生堵塞,研究普遍追求分离效率等问题,本文设计了一套新型自适应出料端加压装置及其控制系统,优化了传统固液分离机出料端加压阀结构,基于 GR150 型固液分离机,通过正交试验模拟规模化养牛场牛粪污处理环境,探究加压阀结构、出料端压力和螺旋轴转速对机器分离效率、固形物含水率和机器有效功率的影响。

(2)通过离散元仿真确定了减阻效果较好的加压阀结构,并通过牛粪挤压预试验,揭示了牛粪挤压过程中压力与含水率之间的函数关系,试验结果表明:牛粪含水率低于 65% 挤压脱水更加困难,螺旋挤压固液分离机出料端压力应小于 1 800 N。

(3)通过极差分析和方差分析,获得各试验指标下的最优组合和各因素的显著水平。使用综合平衡法并通过验证试验得到各因子最优水平组合:加压阀结构为田鼠爪趾二次拟合加压阀,出料端压力为 1 000 N,螺旋轴转速为 60 r/min。在该试验条件下,结合自适应出料端加压装置,机器分离效率达到 2 279.76 kg/h,分离后牛粪含水率为 58.73%,机器有效功率为 2.83 kW,分离每吨养牛粪污能耗最低,较优化前降低了 30%。

参 考 文 献

[1] 农业农村部关于贯彻实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的意见[J]. 畜牧产业,2021(10):29 - 31.

[2] GIACOMO C, KARIN S T, ALEX E P. Solid-liquid separation of digestate from biogas plants: a systematic review of the techniques' performance[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 356: 120585.

[3] 林代炎,翁伯琦,钱午巧. FZ - 12 固液分离机在规模化猪场污水中的应用效果[J]. 农业工程学报,2005,21(10):184 - 186.

LIN Daiyan, WENG Boqi, QIAN Wuqiao. Application of FZ－12 solid-liquid separator to the treatment of wastewater for large scale pig farm[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(10):184－186. (in Chinese)

[4] 江滔,温志国,马旭光,等.畜禽粪便固液分离技术特点及效率评估[J].农业工程学报,2016,32(增刊 2):218－225.
JIANG Tao, WEN Zhiguo, MA Xuguang, et al. Characteristics and efficiency evaluation of livestock slurry separation technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2): 218－225. (in Chinese)

[5] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,等.我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1168－1176.
WU Haowei, SUN Xiaoqi, LIANG Bowen, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science,2020,39(6):1168－1176. (in Chinese)

[6] 张应鹏,叶小梅,杜静,等.江苏省规模奶牛场粪污处理利用现状调研分析[J].生态与农村环境学报,2022,38(4):466－471.
ZHANG Yingpeng, YE Xiaomei, DU Jing, et al. Research analysis on current situation of manure treatment and utilization of large-scale dairy farms in Jiangsu Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(4): 466－471. (in Chinese)

[7] 关正军,王新志,张旭,等.牛粪污螺旋挤压固液分离机优化设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(11):192－197,149.
GUAN Zhengjun, WANG Xinzhi, ZHANG Xu, et al. Optimal design and experiment of screw extrusion solid-liquid separator for cow manure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 192－197,149. (in Chinese)

[8] 赵维松.螺旋挤压固液分离机构优化设计与试验[D].北京:中国农业科学院,2017.
ZHAO Weisong. Organization design and experiments of screw separator[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2017. (in Chinese)

[9] TAE-KYU E, JIN-SEOK L. Field application study on the solid-liquid separation of livestock manure applying a tapered type screw press[J]. Joural of Korean Society of Water Science and Technology,2016, 24(5): 11－21.

[10] NAKAN O, TSUYOSH I, TATSUYA S. Solid-liquid separator and solid-liquid separation system: U.S. Patent 11,219,849[P]. 2022－01－11.

[11] 费辉盈,常志州,王世梅,等.畜禽粪便水分特征研究[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊 2):599－603.
FEI Huiying, CHANG Zhizhou, WANG Shimei, et al. Characterization of moisture in three livestock manures[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(Supp.2):599－603. (in Chinese)

[12] 苏海泉.螺旋挤压固液分离机及其应用[J].农村实用工程技术,1999(2):24－25.
SU Haiquan. Spiral extrusion solid-liquid separator and its application[J]. Agricultural Engineering Technology, 1999(2): 24－25. (in Chinese)

[13] 郭志军,杜干,李忠利,等.触土曲面形式对推土板减阻性能影响的正交试验[J].农业机械学报,2015,46(7):372－378.
GUO Zhijun, DU Gan, LI Zhongli, et al. Orthogonal experiment on resistance reduction by soil engaging surfaces of bulldozer blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 372－378. (in Chinese)

[14] 王立冬.双耦合仿生减阻深松铲性能试验研究[D].长春:吉林大学,2020.
WANG Lidong. Experimental study on the performance of double-coupling bionicdrag-reducing subsoiler[D]. Changchun:Jilin University,2020. (in Chinese)

[15] 高吭. 东方蝼蛄(*Gryllotalpa orientalis* Burmeister):特征、功能、力学及其仿生分析[D].长春:吉林大学,2009.
GAO Hang. Characteristic, function, mechanics and bionic analysis of oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister)[D]. Changchun:Jilin University,2009. (in Chinese)

[16] ZHANG Zhijun, JIA Honglei, SUN Jiyu. Review of application of biomimetics for designing soil-engaging tillage implements in Northeast China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 12－21.

[17] 王金武,李响,高鹏翔,等.胡萝卜联合收获机高效减阻松土铲设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):93－103.
WANG Jinwu, LI Xiang, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of high efficiency drag reducing shovel for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):93－103. (in Chinese)

[18] 王鹏飞. 基于蝼蛄爪趾结构的减阻机理研究[D].天津:天津科技大学,2021.
WANG Pengfei. Study on resistance reduction mechanism based on mole cricket claw toe structure[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology,2021. (in Chinese)

[19] 张鹏,郭志军,倪利伟,等.触土曲面准线曲率特征及其减阻性能分析[J].农机化研究,2017,39(2):11－16,21.
ZHANG Peng, GUO Zhijun, NI Liwei, et al. Analysis on the curvature characteristics and resistance reduction performance of soil-engaging surface directrix[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 11－16,21. (in Chinese)

[20] 张盼港.抛物线基底自激振动式推土板触土曲面减阻设计与试验[D].洛阳:河南科技大学,2022.
ZHANG Pangang. Design and experiment of drag reduction on self-exciting vibrating soil-engaging surfaces of bulldozing plates with parabolic basement[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology,2022. (in Chinese)

[21] 吉尔 W R,范德伯奇 G E. 耕作和牵引土壤动力学[M]. 北京:北京农业出版社,1983.
[22] 郭志军,周德义,周志立. 几种不同触土曲面耕作部件的力学性能仿真研究[J]. 机械工程学报,2010,46(15):71 - 75.
GUO Zhijun, ZHOU Deyi, ZHOU Zhili. Simulation research on mechanical performances of several kinds of cultivating components with different soil-engaging surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 71 - 75. (in Chinese)
[23] 王国强,郝万军,王继新. 离散元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
[24] 王黎明,范盛远,程红胜,等. 基于 EDEM 的猪粪接触参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(15):95 - 102.
WANG Liming, FAN Shengyuan, CHENG Hongsheng, et al. Calibration of contact parameters for pig manure based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15): 95 - 102. (in Chinese)
[25] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):115 - 122, 142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):115 - 122, 142. (in Chinese)
[26] SADEK M A, CHEN Y. Micro properties calibration of discrete element models for soil-tool interaction[C]// American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2014: 1.
[27] 王守江,颜丙新,李立伟,等. 基于离散元的肥料流重构玉米分层施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9): 138 - 150,184.
WANG Shoujiang, YAN Bingxin, LI Liwei, et al. Design and experiment of corn layer fertilization device with fertilizer flow reconstruction based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9):138 - 150,184. (in Chinese)
[28] 张宏建,陈修波,李宏立,等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):80 - 90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6):80 - 90. (in Chinese)
[29] 秦柱学,鲁耀中,陈焕武. 一种新型螺旋挤压机结构仿真分析及优化设计[J]. 中国沼气,2024,42(6):65 - 70.
QIN Zhuxue, LU Yaozhong, CHEN Huanwu. The structure simulation analysis and optimization design of a new type screw extruder[J]. China Biogas, 2024,42(6):65 - 70. (in Chinese)
[30] 王浩璇,果霖,王一鸣,等. 基于 EDEM - Fluent 仿真的餐厨垃圾渣液分离机设计与试验[J]. 食品与机械,2021,37(1): 130 - 136.
WANG Haoxuan, GUO Lin, WANG Yiming, et al. Design and test of the separator of kitchen waste residue liquid based on EDEM-Fluent simulation[J]. Food and Machinery, 2021, 37(1): 130 - 136. (in Chinese)
[31] 蔡斌,王瑞青,叶上游. 动态图像法、激光散射法及筛分法的比较[J]. 炭素,2018(1):27 - 34.
CAI Bin, WANG Ruiqing, YE Shangyou. Comparison of dynamic image analysis, laser diffraction and sieve analysis[J]. Charcoal Element, 2018(1): 27 - 34. (in Chinese)
[32] 王盼柳,曹哲,李浩,等. 利用牛粪生产垫料的滚筒结构优化[J]. 中国农业大学学报,2021,26(9):189 - 196.
WANG Panliu, CAO Zhe, LI Hao, et al. Structure optimization of a drum recycling solid cow manure as bedding[J]. Journal of China Agricultural University, 2021,26(9):189 - 196. (in Chinese)
[33] 张晓明,贺刚,冯晨,等. 三回程有机肥颗粒转筒干燥设备中筒抄板设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):151 - 158.
ZHANG Xiaoming, HE Gang, FENG Chen, et al. Design and experiment of flights in middle drum of triple-pass rotary drum dryer for organic fertilizer pellets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 151 - 158. (in Chinese)
[34] 关正军,李文哲,杨柏松,等. 牛粪螺旋压榨固液分离工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2010,26(12):276 - 279.
GUAN Zhenjun, LI Wenzhe, YANG Baisong, et al. Optimization on parameters of solid-liquid separation process of dairy manure by screw press[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 276 - 279. (in Chinese)