

离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器设计与试验

徐春保，董万静，李浩鹏，余秋丽，张驰海，丁幼春*

(1. 华中农业大学工学院，武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，武汉 430070)

摘要：针对现有排肥装置无法满足油菜高速机直播排肥量范围且易卡顿拥堵，排肥稳定性差及肥料颗粒破碎严重的问题，该研究设计了一种离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器。根据高速直播作业农艺要求，结合肥料颗粒运动过程分析，确定了进肥口、离心腔盘、排肥口、动力系统等相关参数。利用离散元软件 EDEM 建立排肥过程仿真模型，明确了排肥器转速变化对离心腔盘转矩、肥料颗粒平均载荷、肥料破碎率的影响规律。分析结果表明，随着排肥器转速增加，离心腔盘转矩增加，腔盘内的肥料颗粒平均载荷逐渐减小，破碎率增加，破碎率不超过 0.80%。排肥器性能试验表明，排肥器转速 30~120 r/min (对应排量 15.0~58.1 g/s)，可满足最大施肥量为 600 kg/hm² 时 3.0~12.0 km/h 的油菜高速机直播作业需求，排肥器各行排量一致性变异系数低于 8.58%，同行排量稳定性变异系数低于 6.45%，破碎率低于 0.89%；正常田间作业 0°~5° 倾斜状态下各行排量一致性变异系数不超过 8.72%。对比试验结果表明，相较螺旋扰动式排肥器，离心腔盘式排肥器适应高速作业，破碎率减少 63.82%，高速大排量排肥时未出现卡肥堵塞等情况。田间试验表明，作业速度在 4.1~10.1 km/h 范围内，排肥器各行排量一致性变异系数不大于 6.72%，同行排肥量稳定性变异系数不大于 4.84%，实际排肥量相对误差小于 4.54%。设计的排肥器排量范围广，排肥顺畅稳定，破碎率低，满足油菜高速直播精量排肥需求。

关键词：农业机械；设计；油菜；精量排肥器；肥料颗粒；排肥性能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404207

中图分类号: S223.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0022-13

徐春保, 董万静, 李浩鹏, 等. 离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 22-34. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404207 <http://www.tcsae.org>

XU Chunbao, DONG Wanjing, LI Haopeng, et al. Design and experiment of a centrifugal cavity disc extrusion type high-speed precision fertilizer apparatus for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 22-34. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404207 <http://www.tcsae.org>

0 引言

化肥可改善土壤养分，提高作物产量，但过度施肥易造成土壤酸化板结等农业面源污染问题^[1]。精量施肥是解决农业面源污染的关键之一，排肥器作为精准施肥环节的核心工作部件，其排肥性能对提高肥料颗粒排施作业质量具有重要意义。然而，在油菜高速（6~10 km/h）机直播作业过程中，肥料颗粒排量大，与排肥机构之间存在复杂的相互作用力，排肥负载大，导致排肥稳定性差，肥料易破损^[2-3]。破损后的肥料易粘结堵塞装置，且影响养分释放特性，无法满足油菜苗期生长发育需要^[4-5]，影响油菜产量^[6]。

目前，国内外油菜播种机配套排肥器主要有外槽轮式、螺旋式、气力集排式、圆盘式等^[7-8]。外槽轮式排肥器通过槽轮的转动，强制带动肥料颗粒由排肥舌排出，

相关学者围绕外槽轮排肥器结构、排肥性能优化等展开了大量研究^[9-10]。高丽萍等^[11]研究机具动态倾斜对油菜外槽轮排肥器肥料颗粒流动特性的影响，构建不同倾斜工况下动力学模型；螺旋式排肥器主要利用螺旋体转动推动肥料颗粒排出，实现排肥作业^[12]。肖文立等^[13]设计油菜直播机四头螺旋双行排肥器，实现一器双行，减少了排肥脉冲现象。为实现油菜宽幅播种同步施肥，王磊等^[14]研制气送式油菜排肥系统，研究不同型式分配装置对肥料颗粒运动特性及排肥性能的影响；圆盘式排肥器通过在水平面内旋转的刮板带动肥料运动排出。刘晓东等^[15-16]设计螺旋扰动锥体离心式排肥器，并通过理论分析确定并优化了关键部件的参数，实现中低作业速度（2~5 km/h）下流畅、稳定排肥，对油菜高速机直播作业的适应性有待进一步研究。综上，现阶段油菜直播施肥普遍采用外槽轮式，但存在低转速下脉动性强和肥量调节范围小等问题^[17-18]；螺旋式排肥器因工作特性导致对肥料作用力大，破碎率高，应用于油菜多行直播存在一定局限性；而圆盘式排肥器能够实现一器多行，具有结构简单、排肥性能良好等优点^[19]，通过圆盘孔径和转速实现排量调节，排量一致性较好，但肥料颗粒易破损，长时间作业时易在较小的充肥区粘结，降低排肥性能^[20]。通过上述研究可知，圆盘式排肥器实现均匀稳定精量排

收稿日期: 2024-04-29 修订日期: 2024-06-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2001001, 2023YFD2001001-1)、湖北省农业关键核心技术攻关项目 (HBNYHXGG2023-2)

作者简介: 徐春保, 博士生, 研究方向为现代农业装备设计与测控。

Email: xu_cb008@163.com

*通信作者: 丁幼春, 教授, 博士生导师, 研究方向为油菜机械化生产智能化技术与装备。Email: kingbug163@163.com

肥,对机直播排肥装置性能提升起到重要支撑作用。

本文以提高排肥稳定性,减少肥料颗粒破碎,满足油菜高速直播作业为目标,设计一种离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器,确定进肥口、离心腔盘结构、排肥口结构、动力系统等关键参数,建立排肥过程动力学模型,并利用离散元仿真分析明确转速变化对排肥性能的影响规律,通过台架试验与田间试验检验排肥性能,以期对油菜直播高速精量排肥技术与装置的设计提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

气送式油菜智能联合直播机(图1)主要由排肥系统、排种系统、机架、测速雷达、旋耕装置、开畦沟装置、开沟器、种肥控制终端等组成。工作时,直播机由拖拉机牵引前进,肥箱中的肥料颗粒,通过排肥器排出后经导肥管撒至未耕地表,旋耕装置在拖拉机动力输出轴驱动下将土壤细碎、疏松,并将肥料土壤混合物裹挟旋入耕层土壤,两侧的前后组合式开沟犁开出畦沟,测速雷达实时采集机具作业速度,种肥控制终端根据设定的播种施肥量,结合机具作业速度等信息驱动排种排肥电机转动,实现随速变量播种施肥作业。

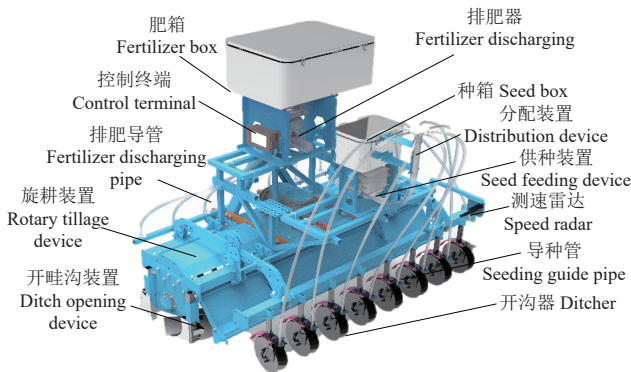


图1 油菜直播机整体结构图

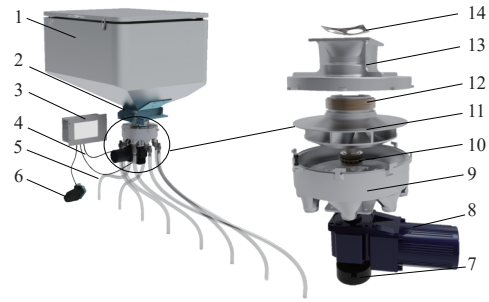
Fig.1 Overall structure diagram of rapeseed direct seeding machine

1.2 排肥器结构与工作原理

气送式油菜智能联合直播机排肥系统(图2a)主要由肥箱、肥量调节开关、控制终端、信号线、排肥导管、测速雷达、排肥器等组成。

其中离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器由编码器、电机、底座、底座轴承、离心腔盘、腔盘轴承、上盖、减压滤网等组成(图2b)。排肥作业时,电机带动离心腔盘转动,腔盘裹挟附近肥料颗粒形成扰动层,肥箱内的肥料颗粒在重力和上层肥料压力作用下经减压滤网后,进入离心腔盘;肥料随离心腔盘转动,匀肥叶片推动其沿匀肥锥面均匀分散到离心腔盘圆周;具有一定初速度的肥料颗粒在上层肥料压力、重力和匀肥叶片的作用下从排肥口排出,完成排肥作业,编码器实时监测电机转速,并反馈给控制终端。其中,离心腔室数量与排肥口数对应,8个离心腔室组成的离心腔盘是实现离心挤压

精量排肥的核心。



1.肥箱 2.肥量调节开关 3.控制终端 4.信号线 5.排肥导管 6.测速雷达 7.编码器 8.电机 9.底座 10.底座轴承 11.离心腔盘 12.腔盘轴承 13.上盖 14.减压滤网
1. Fertilizer box 2. Fertilizer adjustment switch 3. Control terminal 4. Signal line 5. Fertilizer discharging pipe 6. Speed radar 7. Encoder 8. Motor 9. Base 10. Base bearing 11. Centrifugal cavity disc 12. Chamber bearing 13. Upper cover 14. Pressure reducing filter screen

图2 排肥系统结构示意图

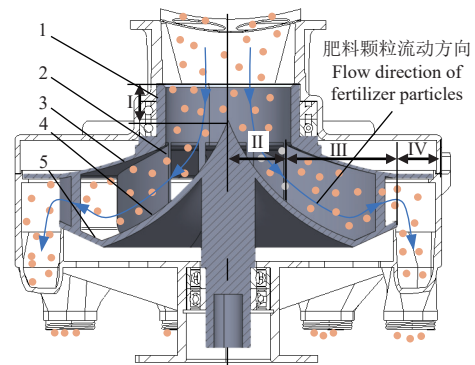
Fig.2 Structural diagram of fertilizer discharging system

2 排肥器关键结构设计

在排肥作业过程中,颗粒间受挤压、摩擦、剪切等作用,易产生磨损、破碎,肥料拥堵易导致排肥负载增大。为解决上述问题,设计排肥器关键结构。离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器的工作可分为充肥、分肥、匀肥、排肥4个过程,各过程相互关联,任一过程出现问题均会影响肥料颗粒排施效果。通过分析排肥器工作过程,确定离心腔盘、进肥口、匀肥锥面、排肥口、动力系统等关键参数。

2.1 离心腔盘

离心腔盘主要由进肥口、匀肥叶片、档肥锥面、匀肥锥面、防自流挡板等组成,如图3所示。



1.进肥口 2.匀肥叶片 3.档肥锥面 4.匀肥锥面 5.防自流挡板 I.充肥段 II.分肥段 III.匀肥段 IV.排肥段
1. Fertilizer inlet 2. Uniformly fertilized leaves 3. Fertilizer Retaining cone 4. Uniform fertilizer cone 5. Anti gravity flow baffle I. Fertilizer filling section II. Fertilizer separation section III. Fertilizer uniform section IV. Fertilizer discharging section

图3 离心腔盘结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of centrifugal cavity disc structure

2.1.1 进肥口设计

排肥器进肥口大小直接影响肥料颗粒排出速率,合适的进肥口尺寸可提高肥料颗粒输送均匀性和排肥精度,油菜直播机排肥量影响进肥口内肥料颗粒流量,进肥口肥料颗粒流量计算式^[21]为

$$q_{ut} = \frac{vBQ}{36} \quad (1)$$

式中 q_{ut} 为进肥口肥料颗粒流量, g/s; v 为油菜直播机前进速度, m/s; B 为直播机幅宽, m; Q 为农艺要求施肥量, kg/hm²。

充肥作业时, 肥料颗粒从肥箱下落至排肥器进肥口, 根据深仓理论^[22], 结合已有研究结果^[23], 考虑排肥器充肥过程, 在重力作用下进肥口直径、肥料颗粒密度和排肥速率关系为

$$\begin{cases} q_0 = 1\,000C_0\rho_f\sqrt{g}(D_0 - kd_f)^{5/2}F(\alpha, \varphi_f) \\ q_0 \geq q_{ut} \end{cases} \quad (2)$$

$$F(\alpha, \varphi_f) = \begin{cases} \tan\alpha\tan\varphi_f, & \tan\alpha\tan\varphi_f < 1 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中 q_0 为排肥速率, g/s; C_0 为调整系数; ρ_f 为颗粒密度, kg/m³; D_0 为进肥口直径, mm; k 为常数; d_f 为肥料颗粒等效直径, mm; α 为进肥口上顶角, (°); φ_f 为常数; g 为重力加速度, m/s²。

联立式 (1) ~ (3) 得进肥口直径为

$$D_0 = \left[\frac{VBQ}{36\,000C_0\rho_f\sqrt{g}F(\alpha, \varphi_f)} \right]^{\frac{2}{5}} + kd_f \quad (4)$$

根据长江中下游稻油轮作区油菜机直播实际作业要求, 直播机作业速度为 3~12 km/h, 作业幅宽为 2.3 m, 施肥量为 225~600 kg/hm², 计算可得进肥口肥料颗粒流量为 43.1~460.0 g/s, 取最大值 460.0 g/s。本研究选用油菜机直播常用的“宜施壮”配方肥为对象, 利用细盐填充法测量肥料颗粒的密度为 1 435 kg/m³, 随机选取 50 粒肥料颗粒, 用千分尺测量其平均三轴尺寸为 3.646 mm×3.536 mm×3.286 mm, 计算得肥料颗粒的等效粒径为 3.486 mm, 球形率为 0.96。为满足肥料颗粒输送要求, 取 $k=10$, 肥料颗粒等效直径为 3.5 mm, 代入式 (4) 计算得进肥口直径应大于 69.6 mm。综合考虑离心排肥与排种系统整体结构确定进肥口直径为 70 mm。

2.1.2 匀肥锥面

匀肥锥面母线方程是确定匀肥锥面参数的主要依据。为缩短肥料颗粒下滑时间, 提高肥料颗粒流动性, 基于最速降线原理设计匀肥锥面。以进肥口上平面向右为 x 轴正方向, 中心轴向下为 y 轴正方向建立直角坐标系 Oxy , 匀肥锥面母线如图 4 所示。

由图 4 可知, 肥料颗粒由锥面顶点沿锥面下滑时存在最速降线, 所设计的匀肥锥面母线可近似为最速降线, 其方程为

$$\begin{cases} OA段: Y = aX \\ AB段: \begin{cases} X = C_1(\theta - \sin\theta) + D \\ Y = C_1(1 - \cos\theta) \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

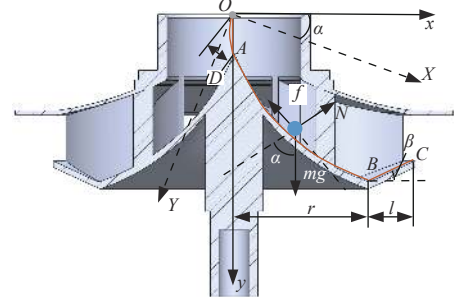
式中 (X, Y) 为肥料颗粒位置坐标, mm; C_1 为坐标变换后轨迹的半径, mm。

为使肥料颗粒均匀分散, 确保肥料颗粒沿匀肥锥面均匀分肥^[24-25], 需保证锥面顶点位置和锥面直径不变。

根据离心腔盘结构尺寸得到 AB 点坐标为: $A(0, 20)$ 、 $B(70, -90)$, 代入式 (5), 即可得到最速降线曲线为

$$OA段: Y = 1.51X$$

$$AB段: \begin{cases} X = 33.36(\theta - \sin\theta) + 0.7 \\ Y = 33.36(1 - \cos\theta) \end{cases} \quad (6)$$



注: xOy 为原坐标系; XOY 为旋转角度 α 后坐标系; A 为最速降线与 y 轴的交点; B 为最速降线与防自流挡板的交点; C 为防自流挡板的最外侧点; D 为最速降线沿 X 轴方向平移量, mm; f 为肥料颗粒摩擦力, N; mg 为肥料颗粒重力, N; F_N 为斜面支持力, N; β 为排肥仰角, (°); r 为母线最大半径, mm; l_a 为防自流挡板投影长度, mm。
Note: xOy is the original coordinate system; XOY is the rotation angle α rear coordinate system; A is the intersection point between the steepest descent line and the y -axis; B is the intersection point between the steepest descent line and the anti gravity baffle; C is the outermost point of the anti flow baffle; D is the translation amount of the steepest descent line along the X -axis direction, mm; f is the friction force of fertilizer particles, N; mg is the gravity of fertilizer particles, N; F_N is the support force of inclined plane, N; β is the elevation angle of fertilizer discharging, (°); r is the maximum radius of bus, mm; l_a is the projection length of anti gravity baffle, mm.

图 4 匀肥锥面母线

Fig.4 Busbar of uniform fertilizer cone surface

2.2 肥料颗粒运动分析

为分析肥料颗粒在腔盘内的运动情况, 选取扇形饼状区域内肥料颗粒为研究对象, 对其进行受力分析, 如图 5 所示。

根据动力学原理和达朗贝尔原理, 建立匀肥输送段肥料颗粒运动状态模型。肥料颗粒在该区域内填充均匀有序, 且颗粒间间隙较小, 因此将其简化为连续体, 截面简化为梯形, 匀肥输送段肥料颗粒群力学平衡方程为

$$\begin{cases} Sdp = \mu(F_{nl} - F_{nr} - F_{nb} - F_{nt}) \\ S = \frac{(d_b + d_t)H}{2} \\ d_b = d_t + \frac{H}{\tan\gamma} \\ F_{nl} = \lambda p H dl \\ F_{nr} = \frac{\lambda p H dl}{\sin\gamma} \\ F_{nb} = \lambda p d_b dl \\ F_{nt} = \lambda p d_t dl \end{cases} \quad (7)$$

式中 λ 为端面压力比; S 为肥料颗粒群截面面积, mm²。

利用分离变量法, 化简式 (7) 可得微分方程式为

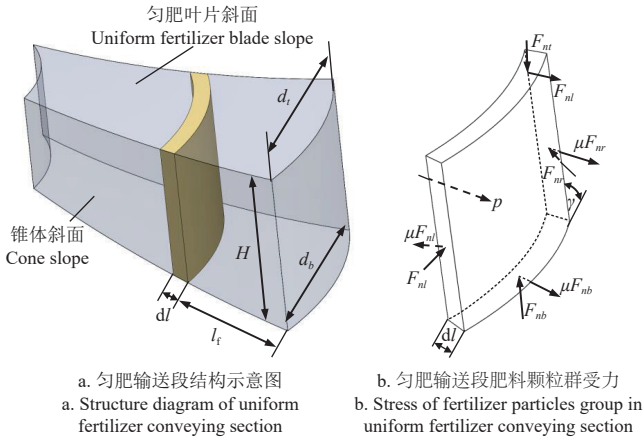
$$\frac{dp}{p} = \frac{2\lambda\{\mu H \sin\alpha - \mu[H + \sin\alpha(d_b + d_t)]\}}{H \sin\alpha(d_b + d_t)} dl \quad (8)$$

肥料颗粒端面均匀分布初始截面压力 p_0 , 其大小由排肥器内肥料颗粒的高度、密度和内摩擦角等决定, 根

据深仓理论，估算肥料颗粒各截面压力为

$$p = p_0 \exp \left(\frac{2\lambda \left[\frac{\mu H \sin \alpha \tan \alpha - \mu (H \tan \alpha + H \sin \alpha + 2d_t \sin \alpha \tan \alpha)}{H(d_t \sin \alpha \tan \alpha + H \sin \alpha)} \right] l_f}{0 \leq l_f \leq l_0, 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}} \right), \quad (9)$$

由式 (9) 可知，初始截面压力 p_0 与肥料群微分段距充肥起始距离 l_f 呈指数关系增大。肥料颗粒与离心腔盘上表面、下表面动摩擦系数为 0.28^[26-27]，根据排肥作业效果，确定离心腔盘倾角设计为 70°，此时肥料颗粒群底部宽度 d_b 为 26 mm，充肥高度 H 为 25 mm。



注： p 为肥料颗粒群压力，MPa； d_t 为肥料颗粒群顶部宽度，mm； d_b 为肥料颗粒群底部宽度，mm； H 为充肥高度，mm； F_{nl} 为肥料颗粒群微段左表面法向力，N； F_{nr} 为肥料颗粒群段右表面法向力，N； F_{nb} 为肥料颗粒群下表面法向力，N； F_{nt} 为肥料颗粒群微段上表面法向力，N； μ 为肥料颗粒与离心腔盘动摩擦因数； γ 为匀肥叶片倾角，(°)； l_f 为颗粒群微分段距充肥起始处弧长，mm； d_l 为颗粒群微元段长度，mm。

Note: p is the pressure of the fertilizer particles group, MPa; d_t is the width of the top of the fertilizer particles group, mm; d_b is the bottom width of the fertilizer particles group, mm; H is the height of fertilization, mm; F_{nl} is the normal force on the left surface of the micro segment of the fertilizer particles group, N; F_{nr} is the normal force on the right surface of the fertilizer particles group segment, N; F_{nb} is the normal surface force under the fertilizer particles group, N; F_{nt} is the surface normal force on the micro segment of the fertilizer group, N; μ Friction coefficient between fertilizer particles and centrifugal chamber disc; γ The inclination angle of uniformly fertilized leaves, (°); l_f is the arc length between the differential segment of the fertilizer group and the starting point of fertilization, mm; d_l is the length of micro segment of fertilizer group, mm.

图 5 肥料颗粒群受力分析

Fig.5 Force analysis of fertilizer particles group

在油菜直播作业前，需将肥料颗粒倒入肥箱中，若匀肥锥面边缘直接与排肥口相连，肥料颗粒会直接通过排肥口流出，造成肥料浪费。为避免肥料自流，在匀肥锥面外侧设计防自流挡板。排肥仰角 β 是防自流挡板的关键结构参数，测量得到肥料颗粒自然休止角为 37.21°。为保证肥料颗粒顺利沿防自流挡板流下，排肥仰角 β 应小于等于 37.21°，取排肥仰角为 37°。

为确定排肥器转速范围，研究排肥器转速对排肥过程肥料颗粒运动的影响，对排肥口位置肥料颗粒动力学特性进行分析，如图 6 所示。

根据达朗贝尔原理，肥料颗粒在 x 轴受力平衡，可得肥料颗粒在排肥口 x 轴的受力方程为

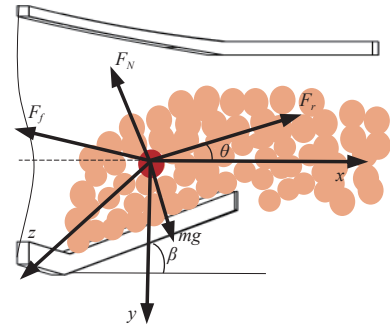
$$\begin{cases} mg \sin \theta + F_r \cos \theta - F_{fx} - F_{ax} = 0 \\ F_{fx} = F_f \cos \beta \\ F_{ax} = ma_x \\ F_r = m\omega^2 R \\ \omega = \frac{\pi n}{30} \end{cases} \quad (10)$$

为保证排肥器均匀稳定性，应减少腔盘内肥料的充肥时间，排肥时应当使肥料颗粒具有沿 x 轴正方向的加速度，即 $a_x > 0$ ，化简式 (10) 可得：

$$\omega \geq \sqrt{\frac{g \mu \cos \theta \cos \beta - \sin \theta}{R \cos \theta + \mu \cos \beta}} \quad (11)$$

根据式 (11) 可知，为保证排肥口位置肥料连续排出，满足 x 轴正方向的加速度大于零的离心腔盘最小转速与离心腔盘半径 R 、摩擦系数 μ 、排肥仰角 β 、摩擦力与 x 轴夹角 θ 相关。综合空间尺寸关系，取匀肥仰角 $\beta = 37^\circ$ ，摩擦力与 x 轴夹角 $\theta = 103^\circ$ ，离心腔盘半径 $R = 115$ mm。将上述数据代入式 (11)，计算得 $\omega \geq 29.3$ r/min，因此确定排肥器最小转速 ω 为 30 r/min。

适当增加排肥器转速，肥料颗粒流动速度加快，但过快的流动速度会导致肥料堆积，颗粒间挤压和碰撞增加，破碎率增加。根据实际试验测试，排肥器转速达到 120 r/min 时，可满足作业速度 12 km/h 下最大施肥量为 600 kg/hm² 的农艺要求。因此，确定排肥器转速范围为 30~120 r/min。



注： F_f 为离心腔盘与微元体的摩擦力，N； F_r 为肥料群离心力，N； F_N 为离心腔盘对肥料颗粒群的支持力，N。

Note: F_f is the frictional force between the centrifugal cavity disc plate and the microelement, N; F_r is the centrifugal force of the fertilizer group, N; F_N is the support force of the centrifugal cavity disc on the fertilizer particles group, N.

图 6 排肥口位置肥料颗粒受力分析

Fig.6 Force analysis of fertilizer particles at the position of fertilizer discharging port

2.3 排肥口

根据油菜直播排肥作业需求，排肥口尺寸应与进肥口大小匹配，与排肥导管内径保持一致。为确定排肥口尺寸，进行肥料颗粒在排肥口处运动分析，如图 7。

在水平方向上，在排肥口位置具有一定初速度的肥料颗粒受到排肥口的支持力、肥料重力、内侧肥料之间的挤压力，使得肥料颗粒做离心运动；在竖直方向上，由于离开防自流挡板减少锥面提供的支持力，在重力作用下，肥料颗粒做自由落体运动，运动平衡方程为

$$\begin{cases} S_x = \omega(r+l)t \cos \beta \\ S_y = \omega(r+l)t \sin \beta - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中 t 为肥料颗粒运动时间, s。

根据能量守恒定律得, 在初始位置肥料颗粒在竖直方向的初速度为 0, 化简式 (12) 可得:

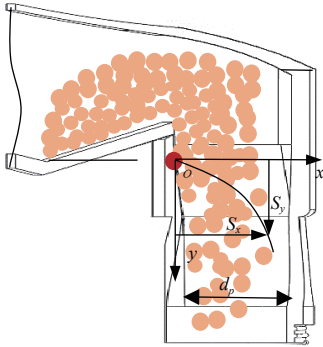
$$S_x = \omega(r+l) \sin \beta \sqrt{\frac{2S_y}{g}} \quad (13)$$

为保证顺畅稳定排出肥料颗粒, 排肥器排肥口尺寸应大于肥料在最大初速度下水平方向的移动距离, 单位时间内离心腔盘排出肥料颗粒应及时排出。此时, ω 为 120 r/min, 将上述条件代入式 (13) 可得 S_x 为 24.3 mm。

为使得匀肥叶片推出的肥料颗粒及时排出, 排肥口尺寸应满足输送肥料颗粒质量流量要求。结合整机作业速度和农艺要求, 排肥口直径与进肥口直径应满足:

$$\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 \pi \leq 8 \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \pi \quad (14)$$

代入进肥口直径 $D_0=70$ mm, 计算得排肥口直径为 24.8 mm, 综合考虑排肥器与导肥管连接方式和肥料颗粒排出的要求, 确定排肥口直径 $d_p=25$ mm。



注: S_x 为肥料颗粒横向移动距离, mm; S_y 为肥料颗粒纵向移动距离, mm; d_p 为排肥口直径, mm。
Note: S_x is the lateral movement distance of the fertilizer particles, mm; S_y is the longitudinal movement distance of the fertilizer particles, mm; d_p is the diameter of the fertilizer discharging port, mm.

图 7 肥料颗粒在排肥口处运动分析

Fig.7 Analysis of fertilizer particle movement at the discharge port

2.4 动力系统设计

排肥作业时, 排肥器转动所需扭矩为克服肥料颗粒间相互摩擦的剪切扭矩和肥料颗粒与肥箱间的摩擦力矩, 即电机负载扭矩。为保证排肥系统工作稳定, 肥料均匀稳定顺畅排出, 选择任意时刻腔盘进肥口位置扰动层微元体颗粒进行受力分析, 如图 8 所示。

根据图 8 分析可知, 上层肥料主要受到颗粒间的内摩擦力 f_1 和颗粒与腔盘的外摩擦力 f_2 的作用。上层肥料与扰动层之间的内摩擦力 f_1 使肥料运动, 肥料与肥箱两侧壁之间的外摩擦力 f_2 阻碍肥料运动, 其值分别为

$$f_1 = \mu_1 N_1 = \mu_1 \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 \pi d_f \delta \quad (15)$$

$$f_2 = \mu_2 N_2 = \mu_2 \times \frac{1}{2} d_f \delta \xi \times D_0 \pi \times d_f = \frac{1}{2} \mu_2 \delta \xi D_0 \pi d_f^2 \quad (16)$$

式中 N_1 为两层肥料间的压力, N; N_2 为单侧压力, N; μ_1 为内摩擦系数; δ 为散密度, t/m³; μ_2 为外摩擦系数; ξ 为侧压系数。

当扰动层肥料对其上层肥料的内摩擦力不小于上层肥料与肥箱之间的外摩擦力^[28], 即 $f_1 \geq f_2$ 时, 上层肥料随离心腔盘转动, 由此可得:

$$M_1 \geq K \frac{M_2}{i} \quad (17)$$

$$M_2 = f_2 \frac{D_0}{2} \quad (18)$$

式中 M_2 为作业时排肥器最大负荷, N·m; M_1 为电机驱动扭矩, N·m; K 为安全系数; i 为传动比。

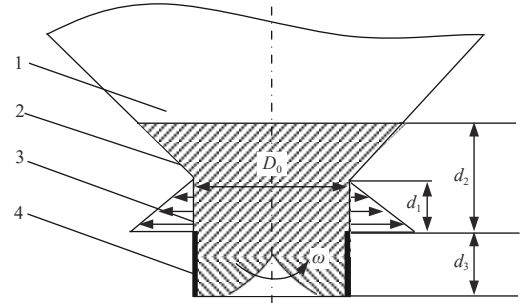
联立式 (15) ~ (18) 可得排肥功耗为

$$P = \frac{nM_2}{9550} = \frac{n\mu_2 \delta \xi D_0^2 \pi d_f^2}{38200} \quad (19)$$

根据式 (19) 可知, 排肥功耗主要与进肥口直径、摩擦因数、散密度、侧压系数、带动层肥料高度等有关。

根据排肥器与电机连接方式, 确定传动比 $i=1$ 。利用式 (18) 计算得本研究设计的离心排肥器作业时最大负荷

$M_2=0.32$ N·m, 考虑自重和摩擦力, 取安全系数 $K=3$, 计算得到电机驱动扭矩 $M_1=0.96$ N·m。选用上海双霸机械设备有限公司 90 W 直角直流减速电机, 其转矩为 1.10 N·m, 工作电压 DC 12 V, 额定电流 7.5 A, 可满足作业要求。



注: d_1 为带动层肥料高度, mm; d_2 为扰动有效高度, mm; d_3 为强制层高度, mm。
Note: d_1 is the height of the driving layer fertilizer, mm; d_2 is the effective disturbance height, mm; d_3 is the forced layer height, mm.

图 8 进肥口位置颗粒受力分析

Fig.8 Force analysis of particles at fertilizer inlet

3 排肥过程离散元仿真分析

为观察离心腔盘排肥器排肥过程, 优化排肥性能, 利用离散元方法 (discrete element method, DEM) 模拟高速直播排肥作业。

3.1 仿真模型构建

为缩短仿真时间, 减少计算量, 提高仿真效率, 简化与肥料颗粒无直接接触的部分^[29]。其中, 离心腔盘排肥器模型采用 1:1 比例, 可保证仿真精度。利用 SolidWorks 建立离心腔盘排肥器模型, 将处理好的三维模型以 .STP 格式导入 EDEM 仿真软件中, 如图 9 所示。肥料颗粒间

的粘结键受到挤压和剪切等作用而断裂，因此选择 Hertz-Mindlin with BondingV2 模型模拟肥料的破碎过程。为观察肥料颗粒破碎情况，选择直径为 0.5 mm 的小颗粒粘结成直径 3.5 mm 的球形肥料颗粒^[30]。在前处理模块 Creator 的颗粒工厂中设置仿真参数，如表 1 所示^[31]。其中，Bonding 键粘结参数参照文献^[32-33]进行设置，具体参数为单位法向刚度 $5.0\times10^9\text{ N/m}^3$ ，单位切向刚度 $1.0\times10^9\text{ N/m}^3$ ，临界法向应力 25 MPa，临界切向应力 12 MPa，粘结半径比值为 1，单个肥料颗粒由 179 个小颗粒粘接而成，颗粒工厂总计生成 50 000 个颗粒。

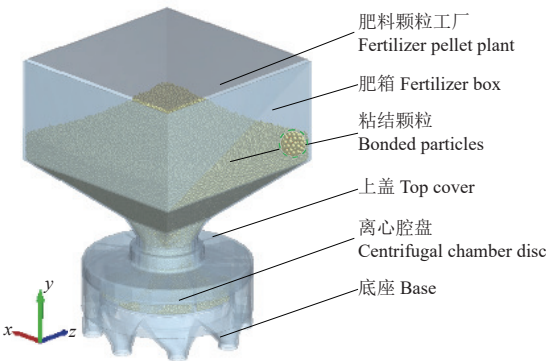


图 9 排肥仿真模型
Fig.9 Simulation model of fertilizer discharging

表 1 排肥过程 EDEM 仿真参数			
Table 1 EDEM simulation parameters of discharging process			
材料 Material	参数 Parameters	数值 Value	
肥料颗粒 fertilizer particles	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 435	
	泊松比	0.25	
	剪切模量/MPa	1.1×10^2	
排肥器（不锈钢） Fertilizer discharging (stainless steel)	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7.87×10^3	
	泊松比	0.39	
	剪切模量/MPa	8.9×10^2	
肥料颗粒-肥料颗粒 Fertilizer particles-fertilizer particles	恢复系数	0.30	
	静摩擦系数	0.34	
	滚动摩擦系数	0.16	
	恢复系数	0.32	
排肥器-肥料颗粒 Fertilizer discharging- fertilizer particles	静摩擦系数	0.30	
	滚动摩擦系数	0.28	

3.2 排肥过程仿真分析

根据前期理论分析结果并结合排肥器结构特点，设置排肥器转速为 30~120 r/min，开展不同排肥器转速对肥料颗粒受力、肥料颗粒破损、排肥负载的影响试验。通过后处理对仿真结果进行数据处理，排肥过程仿真结果如图 10 所示。

3.3 肥料颗粒受力、破损与转矩分析

为观察肥料颗粒在离心腔盘内的运动过程，利用 EDEM 中 Analyst 模块的 Clipping 工具添加排肥器中心位置竖直方向的 Clipping Planes（平面截断），如图 11 所示。匀肥叶片带动肥料颗粒在进肥口处产生旋流，有效搅动肥料颗粒。为分析肥料颗粒在排肥过程中的转矩和运动情况，每次试验选取初始位置相近或一致即位于排肥器进肥口处中心位置的肥料颗粒，如图 11 中黑点所示。该位置肥料颗粒排出时完整经过充肥、分肥、匀肥、

排肥 4 个过程，同时排出过程中与中心轴线距离从 0 到 116.5 mm，可较好代表排肥器内的肥料颗粒受力与运动变化情况。

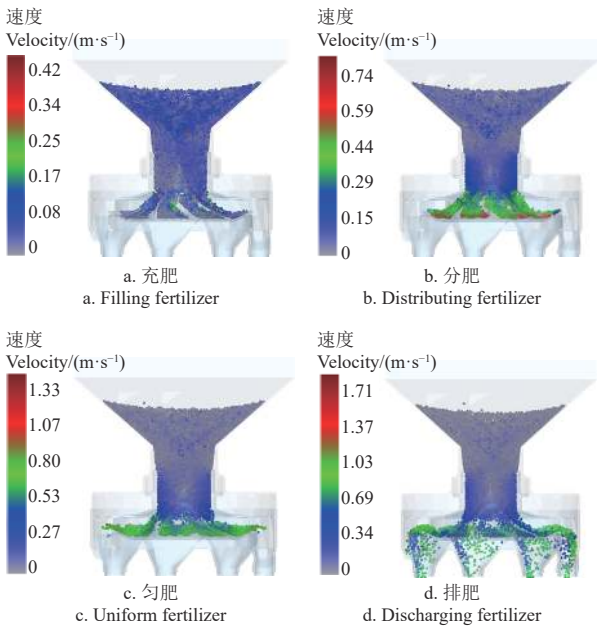


图 10 排肥过程
Fig.10 Fertilizer discharging process

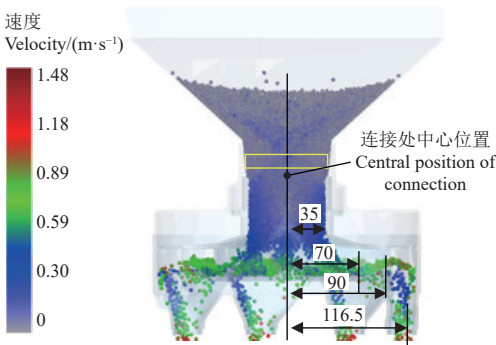


图 11 平面截断模型
Fig.11 Clipping planes model

通过 EDEM 软件后处理模块 Analyst 分析离心腔盘转矩、选中肥料颗粒在排肥器内平均载荷、肥料颗粒破碎情况，如图 12 所示。其中，离心腔盘转矩、肥料颗粒平均载荷在后处理模块中导出，肥料颗粒破碎率 c 根据排肥前后颗粒间粘结键数量利用式（20）计算得出。

$$c = \frac{N_1}{N_0} \times 100\% \tag{20}$$

式中 N_1 为排肥后肥料颗粒间粘结键断裂数量； N_0 为排肥前肥料颗粒间粘结键总数量。

从图 12a 可看出，在排肥器转速 30~120 r/min 范围内，随转速增加，排肥器转矩分为启动、波动、平稳 3 个阶段。在启动阶段（0~0.6 s），离心腔盘开始转动，随着腔盘转速增加，腔盘的启动转矩总体呈上升趋势，排肥器转速越高，转矩越大，最大不超过 0.048 N·m；在波动阶段（0.6~2.0 s），排肥器转动扭矩出现上下剧烈

震荡现象,且震荡幅值逐渐减小,随着转速增加,转矩波动时间越长;在稳定阶段(2.0~5.5 s),排肥器转矩

上下波动,转速在 60 r/min 以下时,随着排肥时间增加,转矩趋于稳定。

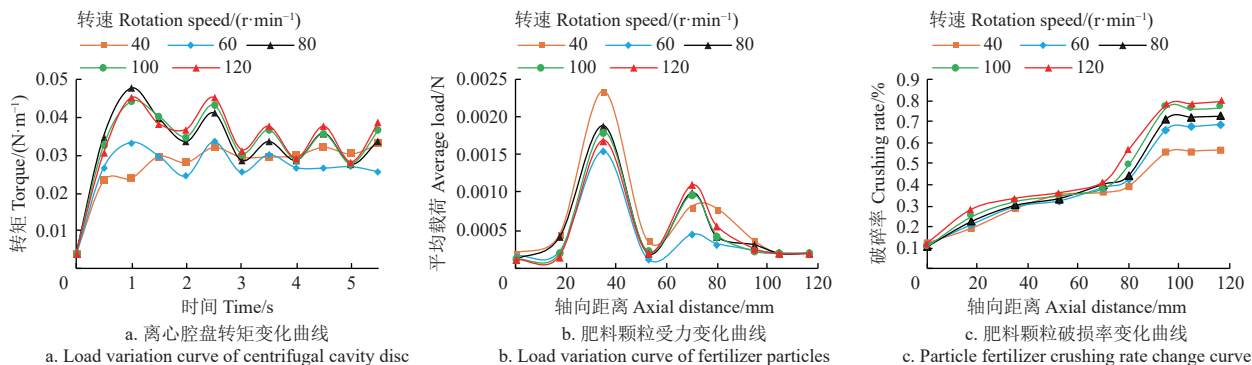


图 12 排肥过程离散元仿真试验结果

Fig.12 Discrete element simulation test results of fertilizer discharging process

从图 12b 可看出,随着排肥器转速增加,平均载荷逐渐减小。肥料颗粒在轴向距离 35 mm 时受力明显,平均载荷曲线出现了载荷的激增,载荷波动的拐点代表此时肥料颗粒从肥箱与排肥器连接处进入离心腔盘内部,随后在匀肥叶片的作用下做沿锥面母线向下的螺旋运动,并随转动半径的增加,平均载荷逐渐增加;在轴向距离 70 mm 时平均载荷出现增大趋势,说明此时肥料颗粒到达防自流挡板位置,在挡板、上层肥料压力、外层肥料阻力作用下,平均载荷增大后逐渐减小;在轴向距离 95 mm 时平均载荷持续减小,此时肥料颗粒主要受上层肥料的压力作用;在轴向距离 116.5 mm 后平均载荷趋于稳定,代表此时肥料颗粒到达排肥口位置,排出排肥器,受力结束。整个过程中,由于排肥器转速不同,离心腔盘施加在肥料颗粒上的载荷也不同,随着排肥器转速增加,肥料颗粒受力和速度均增加,肥料颗粒在排肥器中停留时间越短,受力过程持续越短。肥料颗粒在进入离心腔盘口和到达防自流挡板 2 个位置的所受平均载荷较大,肥料易破碎,因此对上述位置的腔盘结构用圆角平滑处理,可有效减小破碎率。

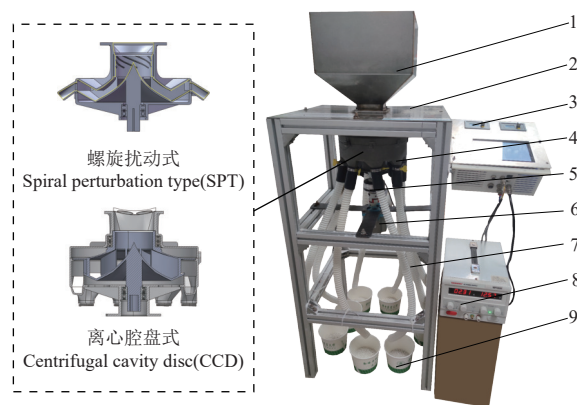
从图 12c 可看出,排肥器工作过程,肥料颗粒的破碎可划分为进入离心腔盘前的挤压破碎、随离心腔盘转动的挤压剪切复合破碎、排出排肥器的碰撞破碎 3 个阶段。进入离心腔盘前肥料颗粒主要受上层肥料的压力和下层肥料的裹挟作用做螺旋运动,此时产生的破碎主要为挤压破碎,破碎率不高于 0.32%;进入离心腔盘内部的肥料颗粒在匀肥叶片的推动下,沿叶片外表面和锥面母线向下运动,颗粒间相互挤压、摩擦,破碎率逐渐增加。运动至匀肥叶片外侧时,速度增加,受叶片剪切作用,破碎率急剧增加;匀肥叶片的推动作用使具有一定速度的肥料颗粒经过排肥口顺畅排出,破碎率曲线较为平缓,此时主要是碰撞破碎。整个排肥过程,随着肥料颗粒轴向距离增加,破碎率逐渐增加;随着排肥器转速增加,破碎率增加,但最高不超过 0.80%,说明利用离心腔盘结构可减小肥料颗粒与排肥器摩擦、剪切等作用,有利于降低破碎率。

4 田间试验

4.1 排肥性能试验

4.1.1 试验条件及方法

为验证排肥器排肥性能,以长江流域油菜机直播常用的缓释配方肥“宜施壮”为试验材料,等效粒径为 3.5 mm,含水率为 2.35%,开展排肥性能试验,试验装置如图 13 所示。



1.肥箱 2.台架 3.控制终端 4.排肥器 5.编码器 6.电机 7.排肥导管 8.直流稳压电源 9.接肥盒
1. Fertilizer box 2. Rack 3. Control terminal 4. Fertilizer discharging 5. Encoder 6. Motor 7. Fertilizer discharging pipe 8. DC regulated power supply 9. Fertilizer receiving box

图 13 排肥器性能试验装置

Fig.13 Performance test device of fertilizer apparatus

为统计排肥过程肥料颗粒破碎情况,根据肥料颗粒三轴尺寸测量结果,试验前利用网格大小为 3.5 mm 的清选筛筛选出试验所需肥料颗粒数。利用排肥软管分别与 8 个排肥口相连,使肥料颗粒排入接肥盒内,设定排肥器转速 30~120 r/min,对应作业速度 3.0~12.0 km/h。各行排量一致性试验时,每次试验持续 20 s,每个速度梯度重复 3 次,取平均值作为对应试验方案的排肥量,利用式(22)计算各行排量一致性变异系数。同行排量稳定性试验时,连续试验,每个速度梯度重复 5 次,计算同行排肥量稳定性变异系数。上述过程重复 3 次取均

值,并记录试验结果。倾斜试验时,通过方块垫高台架一侧两个角,利用倾角仪测量角度后开展排肥试验。试验后,用上述清选筛对排出的肥料颗粒进行筛分,利用式(20)计算肥料颗粒破碎率。

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{\delta} m_i}{\delta} \\ C_v = \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{\delta-1} \sum_{i=1}^{\delta} (m_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \right) \times 100\% \end{cases} \quad (21)$$

式中 δ 为排肥口数, $\delta=8$; \bar{x} 为排肥器各行排出肥料质量的平均值, g; m_i 为第 i 个排肥口排出的肥料质量, g; C_v 为各行排量一致性变异系数, %。若 δ 为排肥取样次数,则 \bar{x} 为单行 δ 次排肥质量的平均值, g; m_i 为第 i 次取样的肥料质量, g; 此时 C_v 为同行排量稳定性变异系数, %。

4.1.2 结果分析

缓释配方肥“宜施壮”在不同排肥器转速的排肥速率、各行排量一致性变异系数、同行排肥量稳定性变异系数试验结果如图 14 所示。

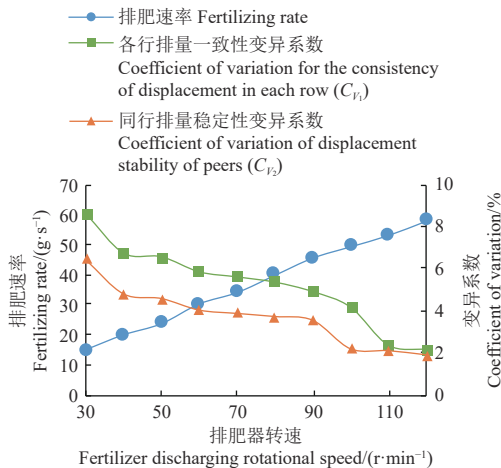


图 14 转速对排肥性能影响的试验结果

Fig.14 Test results of influence of rotating speed on fertilizer discharging performance

试验结果表明:随排肥器转速增加,肥料颗粒排量总体呈线性增加趋势,各行排量一致性变异系数和同行排量稳定性变异系数逐渐下降。排肥器转速处于 30~50 r/min 时,各行排量一致性变异系数和同行排量稳定性变异系数均大于 4.58%,这可能是由于低转速下肥料颗粒流动性不足造成的;60~120 r/min 范围内,充肥排肥状态稳定,变异系数明显下降。观察不同转速下充肥、分肥、匀肥、排肥区域内肥料颗粒运动状态可知,试验转速范围内,各区域肥料颗粒状态稳定,腔盘内未出现因肥料颗粒堆积而产生“卡肥”现象,说明排肥器对肥料颗粒均具有较好的适应性,作业过程未出现断流、堵塞等现象,排肥顺畅稳定,排量范围广,排肥

性能较好,满足油菜高速直播精量排肥需求。

根据稻油轮作区油菜机直播施肥作业农艺要求,综合考虑肥料排量、排肥均匀性和稳定性,排肥器转速 30~120 r/min,对应排量 15.0~58.1 g/s,可满足最大施肥量为 600 kg/hm² 时 3.0~12.0 km/h 油菜高速机直播作业需求,随着排肥器转速增加,各行排量一致性变异系数和同行,随着排肥器转速增加,各行排量一致性变异系数和同行排量稳定性变异系数逐渐减小,与各行排量一致性变异系数相比,同行排量一致性变异系数随转速增加变化不明显,但两者相差不大,各行排量一致性变异系数低于 8.58%,同行排量稳定性变异系数低于 6.45%,均满足行业标准要求,满足排肥质量要求,可通过调节排肥器转速进行肥料颗粒排量调节。

选取离心腔盘转速 120 r/min 的试验组,利用筛网筛选出排肥作业后各类颗粒,并用电子秤称量其质量,结果如图 15 所示。破碎状态可分为 3 类:粉末颗粒(占比为 0.08%)、未完全破碎物料(占比为 0.81%)、完整颗粒(占比为 99.11%),破碎率为 0.89%,与仿真试验得到的肥料破碎结果基本一致。与仿真试验相比,破碎率台架试验结果存在一定差异。这主要与排肥器加工过程的形变、肥料颗粒参数变化且不规则外形等有关。但两种试验结果均能较好的体现试验规律,且台架试验肥料颗粒破碎率低,结果满足行业标准要求。

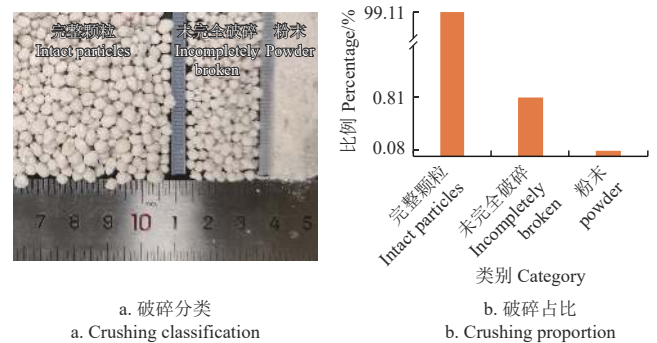
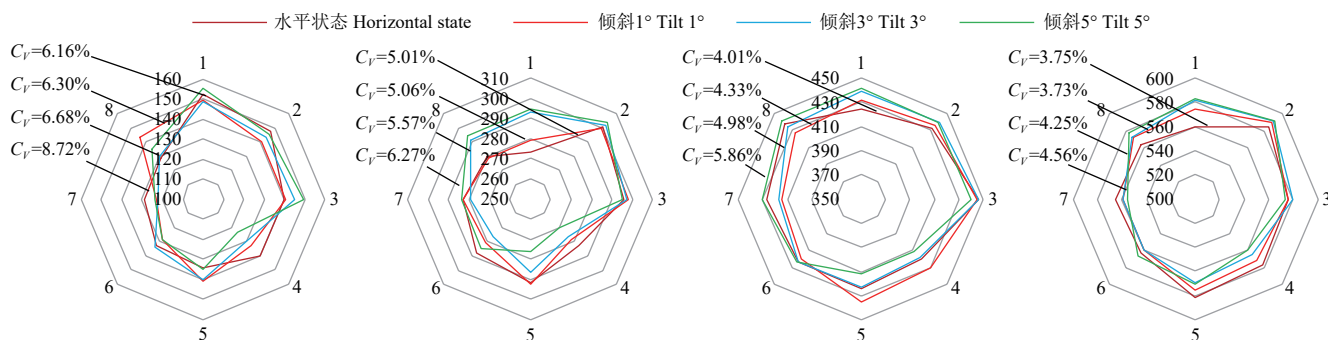


图 15 肥料颗粒破碎状态

Fig.15 Crushing state of fertilizer particle

倾斜状态下排肥器排肥性能试验结果如图 16 所示。从图 16 可知,在相同排肥转速下,排肥器各行排量一致性变异系数随倾斜角度增加而增加,排肥器转速较低(<60 r/min)时倾斜角度对各行排量一致性影响较大,转速较高(≥ 60 r/min)时倾斜角度对各行排量一致性影响较小;相同倾斜角度下,水平状态各行排量一致性变异系数均优于排肥器倾斜状态,排肥器各行排量一致性变异系数随排肥器转速增加而减小。在低速时,高于原水平面排肥口排出的肥量比低于原水平面排肥口排出的肥量明显减少,随转速增加两者排肥量差距缩小。排肥器转速 30 r/min、倾斜 5°时,各行排量一致性变异系数为 8.72%,说明排肥器具有良好的排肥稳定性和均匀性,同时对倾斜状态具有较好的适应性,可满足田间复杂状况的作业质量要求。



注：图中 C_v 为各行排量一致性变异系数。1~8 表示排肥器排出口编号。各圈数值代表各行实际排肥质量，g。
Note: C_v is the coefficient of variation for the consistency of displacement in each row. 1-8 represents the number of fertilizer outlets in each row of the fertilizer feeder. The values in each circle represent the actual fertilizer discharging quality of each row, g.

图 16 倾斜状态排肥器排肥性能试验结果

Fig.16 Test results of fertilizer discharging performance of tilted state fertilizer discharging

4.2 排肥性能对比试验

为对比分析作业过程中肥料颗粒排量、破碎率的变化，开展螺旋扰动式、离心腔盘式排肥器排肥性能对比试验，如图 13 所示（螺旋扰动式作业转速为 80~130 r/min）。试验时，将可调直流电源作为供电模块模块，利用控制终端调整电机转速，控制相同田间作业速度对应排量的排肥器转速，利用肥料颗粒破碎率试验统计方法和式（21）计算肥料颗粒破碎率，对比试验结果如图 17 所示。

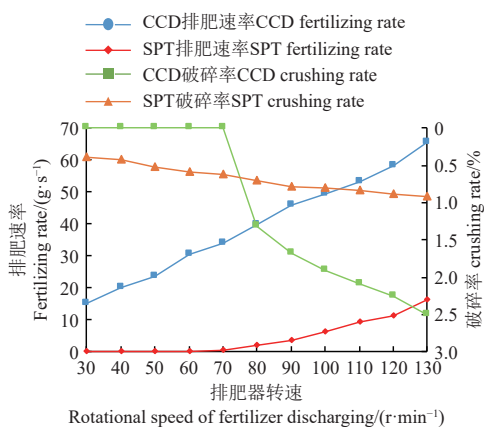


图 17 排肥性能对比试验结果

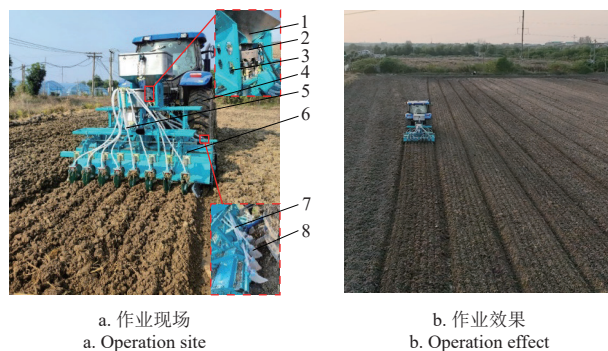
Fig.17 Comparison test results of fertilizer discharging performance

由图 17 可知，随着排肥器转速增加，两种排肥器排肥速率和破碎率逐渐增加。相较螺旋扰动式，离心腔盘式排肥器排量范围为 15.0~58.1 g/s，能够适应油菜高速机直播作业（6~12 km/h），高速大排量排肥时未出现卡肥堵塞等情况，螺旋扰动式排肥器范围为 2.0~16.1 g/s，适应油菜 2~5 km/h 速度的机直播作业。在排肥器工作转速范围内，离心腔盘式排肥器的肥料颗粒破碎率整体平稳，均低于螺旋扰动式排肥器，说明由于离心腔盘的设计降低相同排量下的排肥器转速，有效降低匀肥叶片与肥料颗粒接触转速，减小肥料破碎；随着转速增高，破碎率逐渐增高。相较螺旋扰动式排肥器，离心腔盘式排肥器肥料颗粒破碎率减少 63.82%。这与动力系统设

阶段理论分析结果吻合，说明离心腔盘式设计能够实现高速精量小负载低损排肥作业。

4.3 田间试验

为进一步检验离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器排肥性能，于 2023 年 10 月 24 日在华中农业大学襄阳现代农业示范基地开展油菜机直播作业田间排肥试验，如图 18 所示。前茬作物为水稻，肥料选用宜施壮配方肥。试验以凯斯 1404 拖拉机搭载智能油菜直播机作为试验平台，施肥量为 600 kg/hm²。排肥器电机电源为拖拉机蓄电池，分别在拖拉机行驶速度约为 4.1、6.1、8.1 和 10.1 km/h 开展试验，通过控制终端控制对应排肥器转速，分别为 40、60、80 和 100 r/min，每次试验机组连续作业 15 m，取中间稳定段 10 m，在排肥导管底部连接接肥袋，每组试验重复 3 次，试验结果如表 2 所示。



1. 肥箱 2. 高速精量排肥器 3. 排肥电机 4. 凯斯 1404 拖拉机 5. 智能油菜播种机 6. 旋耕机 7. 排肥导管 8. 接肥袋
1. Fertilizer box 2. High-speed precision fertilizer apparatus 3. Motor 4. Case 1404 tractor 5. Intelligent rapeseed seeder 6. Rotary tiller 7. Fertilizer discharging pipe 8. Fertilizer receiving bag

图 18 田间试验

Fig.18 Field test

试验结果表明：当排肥器转速 40~100 r/min（对应作业速度 4.1~10.1 km/h），随着排肥器转速增加，排肥器各行排量一致性变异系数逐渐减小。当排肥器转速为 100 r/min 时，各行排量一致性变异系数最小；各行排量一致性变异系数不大于 6.72%，同行稳定性变异系数不大于 4.84%，实际与理论排肥量相对误差小于 4.54%。作业过程中肥料排出顺畅稳定，未发生卡肥堵塞等现象，

表明设计的排肥器满足油菜高速直播精量排肥需求。播种 40 d 后统计出苗情况，如图 19 所示，取 5 个点重复测定 1 m 内 8 行油菜总株数，总株数变异系数为 2.98%，并对油菜长势进行为期半年的持续跟踪，油菜植株个体发育均匀，长势一致性好，说明离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器能满足油菜生产实际应用需求。

表 2 排肥器田间试验结果
Table 2 Field results of fertilizer discharging

作业速度 Operation speed/ (km·h ⁻¹)	对应排肥器转速 Rotational speed of fertilizer discharging/ (r·min ⁻¹)	排肥速率 Fertilizing rate / (g·min ⁻¹)	各行排肥量 Fertilizer discharging of each row /g								与理论排肥量的平均相对误差		
			1	2	3	4	5	6	7	8	C ₁₁ /%	C ₁₂ /%	Average Relative error between actual and theoretical fertilizer discharging/%
4.1	40	1 135.76	169	174	159	164	144	157	153	157	6.72	4.84	4.54
			180	165	179	167	156	157	156	167	6.60	4.63	
			171	184	171	168	166	168	165	192	6.31	4.41	
6.1	60	1 714.35	156	163	178	161	162	154	157	172	5.78	4.07	3.81
			166	167	175	170	173	156	158	183	5.97	3.91	
			172	163	182	179	169	172	167	192	6.06	3.76	
8.1	80	2 349.00	163	161	160	164	181	178	176	169	5.56	3.74	3.10
			163	163	179	178	182	167	172	180	5.11	3.64	
			175	175	191	183	179	164	184	189	5.46	3.48	
10.1	100	2 900.94	175	166	183	182	168	180	167	183	4.82	2.09	1.80
			178	164	175	168	183	168	167	177	4.36	2.13	
			160	171	179	171	167	164	162	178	4.73	2.18	

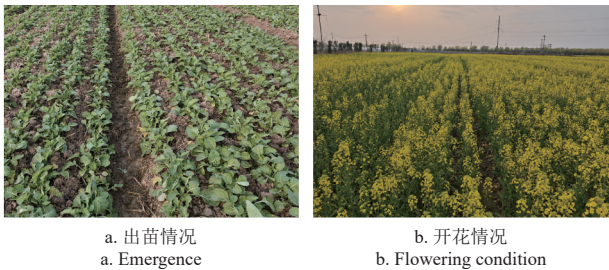


图 19 长势情况
Fig.19 Growth situation

5 结 论

针对油菜高速机直播作业过程中肥料颗粒排量大，现有排肥装置排肥量调节范围小，易卡顿拥堵，导致排肥稳定性差，肥料颗粒破碎严重等问题，设计了一种离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器，并阐述该装置的工作原理。根据高速机直播作业农艺要求，结合肥料颗粒运动过程分析，确定了进肥口、离心腔盘、排肥口、动力系统的关键参数，主要研究结果如下：

1) 通过建立的离心腔盘排肥器排肥过程仿真模型，明确了排肥器转速变化对离心腔盘转矩、肥料颗粒平均载荷、肥料破碎率的影响规律。分析表明，匀肥叶片带动肥料颗粒在进肥口处产生旋流，有效搅动肥料颗粒，随着排肥器转速增加，离心腔盘内的肥料颗粒平均载荷逐渐减小。随着肥料颗粒轴向距离增加，破碎率逐渐增加；随着排肥器转速增加，破碎率增加，破碎率不超过 0.80%。说明利用离心腔盘结构可减少肥料颗粒与排肥器摩擦、剪切等作用，有助于降低破碎率。

2) 排肥器性能试验表明，排肥器转速 30~120 r/min（对应排量 15.0~58.1 g/s），可满足最大施肥量 600 kg/hm² 时 3.0~12.0 km/h 油菜高速机直播作业需求，排肥器各行排量一致性变异系数低于 8.58%，同行排量稳定性变异系数低于 6.45%，破碎率低于 0.89%；随转速增加，正常田间作业 0°~5°倾斜状态下各行排量一致性变异系

数逐渐减小，不超过 8.72%。对比试验结果表明，相较螺旋扰动式排肥器，离心腔盘式排肥器适应高速作业，破碎率减少 63.82%，高速大排量排肥时未出现卡肥堵塞等情况。田间试验表明，作业速度在 4.1~10.1 km/h 范围内，排肥器各行排量一致性变异系数不大于 6.72%，同行稳定性变异系数不大于 4.84%，实际与理论排肥量相对误差小于 4.54%，排肥过程顺畅和稳定，排量范围广，排肥器具有较好的排肥性能，满足油菜高速直播精量排肥需求。

【参 考 文 献】

[1] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1-19.
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1-19. (in Chinese with English abstract)

[2] 吕伟生, 肖小军, 肖国滨, 等. 缓释肥侧位深施及用量对油菜产量和肥料利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 19-29.
LYU Weisheng, XIAO Xiaojun, XIAO Guobin, et al. Effects of lateral deep application and dosage of slow-release fertilizer on yield and fertilizer utilization efficiency of rape (*Brassica napus* L.) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 19-29. (in Chinese with English abstract)

[3] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese with English abstract)

[4] 武淑霞, 刘宏斌, 刘申, 等. 农业面源污染现状及防控技

- 术[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(5): 23-30.
- WU Shuxia, LIU Hongbin, LIU Shen, et al. Review of current situation of agricultural non-point source pollution and its prevention and control technologies[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(5): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘晓东, 王绪坪, 陈礼源, 等. 油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 1-10.
- LIU Xiaodong, WANG Xuping, CHEN Liyuan, et al. Design and experiments of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [6] 韩英, 贾如, 唐汉. 精准变量施肥机械研究现状与发展建议[J]. *农业工程*, 2019, 9(5): 1-6.
- HAN Ying, JIA Ru, TANG Han. Research status and development suggestions of precision variable-rate fertilization machine[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈慧, 高丽萍, 廖庆喜, 等. 肥料减量深施对土壤 N₂O 排放和冬油菜产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 80-87.
- CHEN Hui, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Effects of reduced and deep fertilizer on soil N₂O emission and yield of winter rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(21): 80-87. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨庆璐, 李洪文, 何进, 等. 基于气力分配的不同肥料分层深施装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 61-73.
- YANG Qinglu, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of layered deep fertilization device of different fertilizers based on pneumatic distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 61-73. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨文武, 方龙羽, 罗锡文, 等. 螺旋排肥器排肥口参数对排肥性能影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 1-8.
- YANG Wenwu, FANG Longyu, LUO Xiwen, et al. Experimental study of the effects of discharge port parameters on the fertilizing performance for fertilizer distribution apparatus with screw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(17): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘正道, 王庆杰, 刘春鸽, 等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 137-144, 355.
- LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LIU Chunge, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 137-144, 355. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高丽萍, 陈慧, 廖庆喜, 等. 油菜深施肥播种机动态倾斜工况排肥性能试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 64-72.
- GAO Liping, CHEN Hui, LIAO Qingxi, et al. Experiment on fertilizing performance of dynamic tilt condition of seeder with deep fertilizer for rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 64-72. (in Chinese with English abstract)
- [12] SUGIRBAY A M, ZHAO J, NUKESHEV S, et al. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 179: 105835.
- [13] 肖文立, 廖宜涛, 单伊尹, 等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 68-77.
- XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 68-77. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王磊, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 气送式排肥系统分配装置结构型式对排肥性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(7): 24-34.
- WANG Lei, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Effects of distributor types on fertilizing performance in an air-assisted applicator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(7): 24-34. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘晓东, 丁幼春, 舒彩霞, 等. 螺旋扰动锥体离心式排肥器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 40-49.
- LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Design and experiment of spiral disturbance cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(2): 40-49. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘晓东, 胡瑞, 王登辉, 等. 基于颗粒肥料运动模型的排肥器优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 85-95.
- LIU Xiaodong, HU Rui, WANG Denghui, et al. Optimization and test of fertilizer apparatus based on granular fertilizer movement model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 85-95. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王金峰, 付佐栋, 翁武雄, 等. 圆锥盘推板式水田侧深施肥双行排肥器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(2): 53-62.
- WANG Jinfeng, FU Zuodong, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of conical-disc push plate double-row fertilizer apparatus for side-deep fertilization in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(2): 53-62. (in Chinese with English abstract)
- [18] 雷小龙, 李蒙良, 张黎骅, 等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调节定量供肥装置设计与试验[J]. *农业工程学报*,

- 2018, 34(19): 9-18.
- LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(19): 9-18. (in Chinese with English abstract)
- [19] 祝清震, 武广伟, 陈立平, 等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 12-20.
- ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(18): 12-20. (in Chinese with English abstract)
- [20] 宋灿灿, 周志艳, 王国宾, 等. 施肥无人机槽轮式排肥器槽轮结构参数优选[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 1-10.
- SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, WANG Guobin, et al. Optimization of the groove wheel structural parameters of UAV-based fertilizer apparatus[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(22): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [21] 都鑫, 刘彩玲, 姜萌, 等. 倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 43-53.
- DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 43-53. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘彩玲, 张福印, 都鑫, 等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 165-174.
- LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 165-174. (in Chinese with English abstract)
- [23] 陈林涛, 李开文, 牟向伟, 等. 不同改流体对稻种颗粒在料仓卸料流动的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(21): 36-46.
- CHEN Lintao, LI Kaiwen, MOU Xiangwei, et al. Effects of different modification fluids on the flow of rice seed particles during unloading in the silo[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(21): 36-46. (in Chinese with English abstract)
- [24] 史乃煜, 陈海涛, 魏志鹏, 等. 基于最速降线原理的免耕播种机强制回土装置研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 37-44.
- SHI Naiyu, CHEN Haitao, WEI Zhipeng, et al. Design and test of forced-return device based on principle of brachistochrone[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- [25] CHERKASOY O Yu, SMIRNOVA N V. On the Brachistochrone problem with state constraints on the slope angle[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2022, 139: 103871.
- [26] 赵淑红, 张鑫, 袁溢文, 等. 粉末状有机肥条施排肥器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(10): 98-107.
- ZHAO Shuhong, ZHANG Xin, YUAN Yiwu, et al. Design and experiment of powder organic fertilizer drilling fertilizer distributor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10): 98-107. (in Chinese with English abstract)
- [27] 顿国强, 刘文辉, 吴星澎, 等. 螺旋挤压式精量排肥器的仿真优化及试验[J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2023, 53(10): 3026-3037.
- DUN Guoqiang, LIU Wenhui, WU Xingpeng, et al. Simulation optimization and experiment of screw extrusion precision fertilizer ejector[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(10): 3026-3037. (in Chinese with English abstract)
- [28] SHI Y Y, CHEN M, WANG X C, et al. Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable-rate fertilizer applicator based on DEM software[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 144: 249-259.
- [29] 杨庆璐, 王庆杰, 李洪文, 等. 气力集排式变量排肥系统分层施肥量调节装置研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 1-10.
- YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Development of layered fertilizer amount adjustment device of pneumatic centralized variable fertilizer system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈桂斌, 王庆杰, 李问盈, 等. 对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 65-76.
- CHEN Guibin, WANG Qingjie, LI Wenying, et al. Design and experiment of double roller differential speed crushing fertilizer device for block organic fertilizer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 65-76. (in Chinese with English abstract)
- [31] CHEN G B, WANG Q J, LI H W, et al. Experimental research on a propeller blade fertilizer transport device based on a discrete element fertilizer block model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 208: 107781.
- [32] PEZO M, PEZO L, JOYANOYIC A P, et al. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors[J]. *Powder Technology*, 2018, 336: 255-264.
- [33] UCGUL M, SAUNDERS C, LI P, et al. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM)[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 1-10.

Design and experiment of a centrifugal cavity disc extrusion type high-speed precision fertilizer apparatus for rapeseed

XU Chunbao , DONG Wanjing , LI Haopeng , YU Qiuli , ZHANG Chihai , DING Youchun^{*}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Precision fertilization is one of the key technologies to control non-point source pollution in agriculture. Fertilizer reduction and efficiency technology can greatly contribute to green and sustainable agriculture in the rice-oil rotation region in the mid-lower reaches of the Yangtze River. Among them, fertilizer apparatuses have been focused mainly on the performance and optimization of structural devices. It is relatively lacking in the high speed and precision of fertilizer apparatus for rapeseed in real time. It is a high demand to optimize the precision fertilizer discharging for the reference value. The performance of fertilizer apparatus can depend directly on the accuracy of working components, in terms of uniformity and rational fertilization. However, the existing fertilizer apparatus cannot fully meet the range of direct seeding rapeseed of high-speed machines, due to the jam, low stability and distribution, as well as the serious crushing of particle fertilizer. In this study, an extrusion fertilizer apparatus for rapeseed was designed with a centrifugal cavity disc with high speed and precision. According to the agronomic requirements of high-speed direct seeding, the movement analysis of fertilizer particles was combined to determine the key parameters, such as fertilizer inlet, centrifugal cavity disc, fertilizer outlet, and power system. The discrete element software (EDEM) was used to establish the simulation model of fertilizer discharging. A systematic investigation was implemented to clarify the influence of the speed of the fertilizer apparatus on the torque of the centrifugal cavity disc, the average load, and the crushing rate of fertilizer particles. The results showed that the torque of the centrifugal cavity disc increased, whereas, the average load of fertilizer particles in the cavity disk decreased gradually, and the crushing rate increased below 0.80%, with the increase of the speed of fertilizer apparatus. The performance test showed that the speed of the fertilizer ejector was 30-120 r/min, and the displacement was 15.0-58.1 g/s, fully meeting the demand of high-speed direct seeding when the maximum fertilization amount was 600 kg/hm². The coefficient of variation was less than 8.58% for the consistent displacement in each row of fertilizer discharging, less than 6.45% for the stability of the displacement in the same industry, and the crushing rate was less than 0.89%; Specifically, the coefficient of variation was below 8.72% for the displacement consistency of each row shall under normal field operation with 0°~5° inclination. The comparative test showed that compared with the spiral perturbation, the fertilizer discharging with a centrifugal cavity disc was suitable for high-speed operation, where the crushing rate was reduced by 63.82%. There was no fertilizer jam when discharging fertilizer at high speed and large displacement. The field test showed that when the operation speed was in the range of 4.1-10.1 km/h, the coefficient of variation was not more than 6.72% for the consistent discharge in each row of the fertilizer ejector, while the coefficient of variation for the stability of the same row during fertilizer discharging was not more than 4.84%, and the relative error between actual and theoretical fertilizer discharging was less than 4.54%. The fertilizer discharging shared a wide range of displacement, smooth and stable operation, in order to effectively avoid the fertilizer sticking and the crushing rate in the process of fertilizer discharging. The fertilizer apparatus also fully met the demand for the high-speed direct seeding and precision fertilizer discharging of rapeseed.

Keywords: agricultural machinery; design; rapeseed; precision fertilizer apparatus; fertilizer particles; fertilizer discharging performance