

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.005

螺旋锥体离心式排肥器扰动防堵机理分析与试验

刘晓东^{1,2} 丁幼春^{1,2} 舒彩霞^{1,2} 王凯阳^{1,2} 刘伟鹏^{1,2} 王绪坪^{1,2}

(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: 针对传统排肥器因肥料架空结拱堵塞而影响排肥性能的问题,通过构建螺旋锥体离心式排肥器排肥过程颗粒化肥的运动模型及扰动破拱防堵机理分析,阐明了螺旋扰动叶片破拱防堵作用机理。采用 EDEM 离散元软件,进行了有、无螺旋扰动杯的排肥器排肥过程仿真对比分析,螺旋叶片能够为肥箱出肥口与排肥器连接处及扰动杯内的颗粒化肥提供卷携扰动作用,同时可增大颗粒化肥下移速度,防止肥料架空结拱堵塞。高速摄像试验表明:肥箱出肥口与有螺旋扰动杯排肥器连接处的颗粒化肥做与弧形锥体圆盘转速相同方向的向下运动,颗粒化肥运动流畅,无断层下落问题;无螺旋扰动杯排肥器与肥箱出肥口连接处的颗粒化肥做缓慢的向下运动,且运动过程中出现了颗粒化肥断续下落问题。台架试验表明:有螺旋扰动杯的排肥器排肥频率稳定性系数在 96% 以上,排肥量稳定性变异系数不超过 5.57%,满足施肥质量要求,明显优于无螺旋扰动杯的排肥器。

关键词: 油菜; 离心式排肥器; 螺旋锥体; 结拱; 机理分析

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0044-11 OSID: 

Mechanism Analysis and Test of Disturbance and Blockage Prevention of Spiral Cone Centrifugal Fertilizer Apparatus

LIU Xiaodong^{1,2} DING Youchun^{1,2} SHU Caixia^{1,2} WANG Kaiyang^{1,2} LIU Weipeng^{1,2} WANG Xuping^{1,2}

(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: Arch blocking is an important factor that affects the stability of fertilizer apparatus performance. It is of great significance to analyze the mechanism of arching, anti-clogging and arch breaking mechanism of the fertilizer discharge to improve the performance of the fertilizer discharge and the quality of fertilizing. In order to further explore the mechanism of anti-clogging and arch breaking by spiral cone centrifugal fertilizer apparatus and provide theoretical basis for later optimization, the theoretical analysis and simulation tests of the designed spiral disturbance cone centrifugal centralized chemical fertilizer apparatus were conducted to explore the mechanism of anti-clogging and arch breaking by spiral cone centrifugal fertilizer apparatus. And the anti-clogging performance of the fertilizer apparatus was further tested by high-speed photographic test and a bench test. The movement model of granular fertilizers during the process of fertilizer removal by the designed spiral cone centrifugal fertilizer apparatus was constructed and the mechanism of disturbance anti-clogging and arch breaking was analyzed. The positive effects of spiral disturbing blades on anti-clogging and arch breaking and the feasibility of fertilizer apparatus disturbance anti-clogging were clarified. By using the EDEM discrete element simulation software, the effects of the fertilizer apparatus with and without the spiral disturbance cup on the movement of the fertilizer were simulated. Spiral blades can provide rolling disturbance for the granular fertilizer at the junction of the fertilizer box outlet and the fertilizer apparatus, at the same time, increasing the downward movement speed of the granular fertilizer can prevent arching and clogging at this location. The high-speed photographic test showed that the granular fertilizer at the junction of the fertilizer box outlet and the fertilizer apparatus with a spiral disturbance cup was moved downward and in the same direction as the speed of the cambered cone disk. The process of granular fertilizer movement was smooth and there was no problem of fault falling. The granular fertilizer at the connection between the

收稿日期: 2020-01-03 修回日期: 2020-06-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600、2016YFD0200606)
作者简介: 刘晓东(1991—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: 17863963882@163.com
通信作者: 丁幼春(1978—),男,教授,博士,主要从事油菜机械化生产智能化技术与装备研究,E-mail: kingbug163@163.com

fertilizer apparatus without a spiral disturbance cup and the fertilizer box outlet made a slow downward movement, and the problem of fault falling during the movement of granular fertilizer. The bench test showed that when the rotation speed of the cambered cone disk was the same, the coefficient of variation of fertilizing amount stability of the spiral disturbance cup fertilizer apparatus was lower than that of the non-spiral disturbance cup of the fertilizer apparatus, and the coefficient of variation of fertilizing amount stability of two types of fertilizer apparatus was decreased with the increase of cambered cone disk rotating speed. When the rotation speed of the cambered cone disk was low, the coefficient of fertilizing frequency stability in the same row of the non-spiral disturbance cup fertilizer apparatus was lower than that of the spiral disturbance cup of the fertilizer apparatus. With the increase of the rotating speed of the cambered cone disk, the coefficient of fertilizing frequency stability in the same row of the fertilizer apparatus with and without the spiral disturbance cup were increased. When the speed was the same, the coefficient of fertilizing frequency stability in the same row of the spiral disturbance cup fertilizer apparatus was higher than that of the non-spiral disturbance cup of the fertilizer apparatus. The coefficient of variation of fertilizing amount stability of the spiral disturbance cup fertilizer apparatus was above 96%, the variation curve of coefficient of variation of fertilizing amount stability was not more than 5.57%, which can fully meet the quality requirements for field discharge of fertilizer.

Key words: rapeseed; centrifugal fertilizer apparatus; spiral cone; bridging; mechanism analysis

0 引言

精准施肥是实现化肥减施、解决农业面源污染的重要方式,同时也是保证农作物增产、农民增收的重要举措^[1-2]。精准施肥的关键在于排肥器,肥料减施须从排肥器性能着手,确保排肥器排肥均匀、稳定,从而达到精量施肥的目标。

变量施肥能够显著提高肥料利用率、减少化肥浪费及环境污染^[3-7]。为了提高播种质量和种肥利用率,金鑫等^[8]针对冬小麦播种作业方式粗放、效率低等问题,设计了 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机。杨硕等^[9]将变量施肥控制系统与排肥监测系统集成,形成了一套支持多路播种施肥监测的变量施肥控制系统。张睿等^[10]针对变量施肥机作业幅宽小等问题,设计了一种基于处方图的链条式变量施肥抛撒机。气力集排式排肥器能够实现多行均匀分肥、高速送肥的宽幅作业^[11-14]。NAVEEN 等^[15]通过对增压管垂直试验段不同位置统计速度分布的研究,建立了质点速度与加速度长度的相关关系。ANDRII 等^[16]研究了分种头的几何形状和分种条件对分配精度的影响。杨庆璐等^[17]基于 CFD-DEM 耦合,研究了分配器参数对气流压力、风速以及肥料运动特性的影响,确定了分肥装置的最佳结构参数。李立伟等^[18]对气送式水稻施肥机输肥装置进行了气固两相流仿真分析,获得了优化后气体肥料混合腔的结构参数及气动参数。目前,对颗粒化肥在排肥器内的运动学模型和因肥料缓慢下移及上端肥料压力造成肥料滞留而导致的结拱堵塞等问题缺少理论分析与研究,未从根本上解决颗粒化肥架空结拱堵塞造成的断条漏施问题。

长江中下游地区为我国冬油菜主产区^[19-21],该

地区土壤黏重,小地块较多,小型施肥播种联合作业机具有发展优势,排量均匀、稳定、结构紧凑、排送形式简单的集排式排肥器具有更广阔的发展空间。但肥料架空结拱堵塞问题仍是影响排肥器排肥稳定性、精量性的主要因素^[22]。

笔者通过试验对设计的螺旋锥体离心式排肥器排肥性能进行了检验,排肥性能满足田间施肥质量要求,且未出现因排肥器架空结拱堵塞造成的断条漏施问题^[23],为进一步探究排肥器螺旋扰动破拱防堵机理,本文对颗粒化肥在螺旋锥体离心式排肥器内的运动过程进行理论分析和仿真试验,并通过高速摄像试验和台架试验进一步检验排肥器扰动防堵性能。

1 排肥器结构与工作原理

螺旋锥体离心式排肥器主要由上壳体、螺旋扰动杯、弧形锥体圆盘、下壳体等组成,均采用 ABS 高精度树脂打印制作,如图 1 所示。

螺旋扰动弧形锥体圆盘(图 1c)由螺旋扰动杯与弧形锥体圆盘两核心部件组成,螺旋扰动杯由高 $L_0 = 40 \text{ mm}$ 位于弧形锥体圆盘上端直管和从直管上端开始沿直管内壁以外径 62 mm、内径 56 mm、螺距 90 mm、厚度 2.5 mm 扫描 0.3 圈形成的螺旋曲面构成,共 8 个螺旋曲面均匀分布于直管内壁;弧形锥体圆盘为一旋转抛物面,由一段抛物线和一条与抛物线连接的倾斜直线为母线绕定轴旋转一周形成;弧形锥体圆盘上端面均匀布置有 8 个与径向呈 $\gamma = 12^\circ$ 的离心推板,弧形锥体圆盘母线方程为

$$y = \begin{cases} \frac{H_0}{R_0^2}(R_0 - x)^2 & (0 \leq x \leq R_0) \\ \tan\delta(x - R_0) & (R_0 < x \leq R') \end{cases} \quad (1)$$

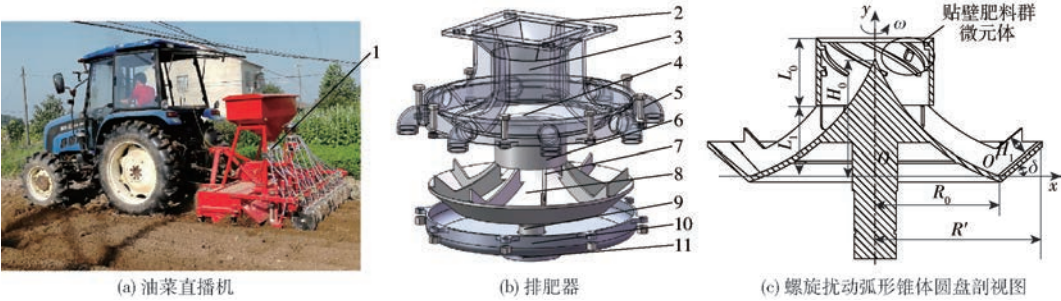


图1 排肥器结构示意图

Fig. 1 Schematics of fertilizer apparatus structure

1. 排肥器 2. 肥箱连接底座 3. 上壳体 4. 螺旋叶片 5. 排肥管 6. 螺旋扰动杯 7. 弧形锥体圆盘 8. 肥室 9. 驱动轴 10. 下壳体 11. 轴承座

式中 H_0 ——弧形锥体圆盘高度,mm
 R_0 ——谷点半径,mm
 δ ——离送锥桶侧壁与水平面夹角, (°)
 x ——弧形锥体圆盘母线方程横坐标值,mm
 R' ——弧形锥体圆盘外缘半径,mm

弧形锥体圆盘外缘半径 R' 为 104 mm; 谷点半径 R_0 为 75 mm; 高度 H_0 为 80 mm; 离心推板上端面与弧形锥体圆盘上端面距离 H_1 为 25 mm; 离送锥桶侧壁与水平面的夹角 δ 为 35°。

工作时, 电机带动排肥器弧形锥体圆盘以角速度 ω 逆时针转动, 颗粒化肥在扰动杯内螺旋叶片的扰动及自身重力和上端肥料的压力作用下向下运动, 在弧形锥体圆盘的作用下均匀进入 8 个肥室, 颗粒化肥在离心力作用下向排肥器外缘移动, 最后从排肥口排出。

2 排肥过程动力学分析与螺旋扰动防堵机理

2.1 扰动杯内颗粒化肥运动过程力学分析

螺旋扰动杯在旋转过程中, 螺旋叶片对紧贴扰动杯内壁颗粒化肥施加垂直于螺旋叶片下端面的推力, 带动颗粒化肥做沿螺旋叶片相对运动速度为 v_r 、牵连运动速度为 v_e 的复合运动, 位于扰动杯中间的颗粒化肥由于受到紧贴扰动杯内壁颗粒化肥的摩擦力、肥料群压力及自身重力作用也做向下的螺旋运动, 以此实现对内颗粒肥料群在扰动杯内的螺旋扰动及下排。

假设任何面上的压力为一常量 p , 贴壁肥料群与内肥料群之间的摩擦因数为 f_a , 贴壁肥料群与螺旋叶片之间的摩擦因数为 f_b , 贴壁肥料群与扰动杯内壁之间的摩擦因数为 f_c , 根据农业物料流变学, 颗粒化肥可视作微元体进行受力分析, 故取位于螺旋槽内紧贴扰动杯内壁的颗粒化肥群微元体作为研究对象, 该微元体做沿螺旋叶片下移及随扰动杯转动的复合运动, 贴壁肥料群(图 1c)在扰动杯螺旋叶片上的受力如图 2 所示。

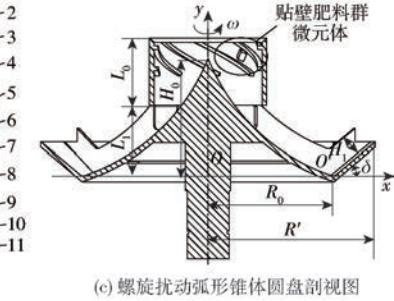


图2 贴壁肥料群微元体受力分析

Fig. 2 Force analysis of fertilizer group against inner wall

根据微元体受力分析, 建立贴壁肥料群微元体受力方程

$$\begin{cases} F_6 + G\sin\alpha + F_1\cos(\alpha + \theta) - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 = ma \\ F_2 = pWh \\ F_3 = f_b(phdz + F_d) \\ F_4 = f_bphdz \\ F_5 = f_cWphdz\omega^2r \\ F_6 = Wh(p + dp) \\ F_7 = phdz + F_d \\ F_8 = phdz \\ m = Wphdz \\ F_d = Wphdz(\omega\cos\theta)^2r \\ G = Wphdzg \end{cases} \quad (2)$$

式中 ρ ——肥料密度,kg/m³
 h ——贴壁肥料群微元体沿扰动杯径向的厚度,m
 W ——两螺旋叶片间距离
 dz ——微元体宽度,m
 r ——微元体转动半径,m
 a —— z_0 方向加速度,m/s²
 g ——重力加速度,m/s²
 F_d ——螺旋叶片推动面对微元体正推力,N
 m ——贴壁肥料群微元体质量,kg
 F_1 ——微元体与内肥料群表面的摩擦力,N

- F_2 ——微元体下端肥料对微元体的压力, N
 F_3 ——螺旋叶片下侧面与微元体之间的摩擦力, N
 F_4 ——螺旋叶片上侧面与微元体之间的摩擦力, N
 F_5 ——扰动杯内壁与微元体之间摩擦力, N
 F_6 ——微元体上端肥料对微元体的压力, N
 F_7 ——螺旋叶片下侧面对微元体的压力, N
 F_8 ——螺旋叶片上侧面对微元体的压力, N
 G ——贴壁颗粒化肥群微元体重力, N
 α ——螺旋叶片螺旋角, ($^\circ$)
 θ ——微元体前进角, ($^\circ$)

由式(2)得

$$F_1 = [f_b W \rho h dz (\omega \cos \theta)^2 r + f_c W \rho h dz \omega^2 r + W \rho h dz a - W \rho h dz g \sin \alpha + 2 f_b p h dz - W h dp] \frac{1}{\cos(\alpha + \theta)} \quad (3)$$

由固体输送理论^[24]知,前进角 θ 取决于贴壁肥料群微元体与扰动杯内壁摩擦因数和微元体与内肥料群表面摩擦因数的比值,由于肥料的物理特性及排肥器参数一定, θ 为一定值。由式(3)知微元体与内肥料群表面的摩擦力 F_1 与扰动杯转动角速度 ω 及螺旋叶片螺旋升角 α 有关;当 α 确定后,随角速度的增加,微元体与内肥料群表面摩擦力 F_1 增加,由于内肥料群受到与 F_1 大小相等方向相反的力,可为内肥料群提供绕轴线扰动和沿轴向的下推力,为内肥料群运动起到促进作用; α 是影响贴壁肥料群与内肥料群运动的重要参数,其值过大或过小,均无法保证紧贴扰动杯内壁的颗粒化肥下移并为扰动杯内的肥料提供向下的摩擦力。

对于扰动杯内横切面半径为 R 的内肥料群,选取深度 y_h 处微小肥料层 dy 为研究对象,设肥料层上端面垂直压应力为 σ_1 ,侧面压应力为 σ_2 ,内肥料群微元体受力如图 3 所示。

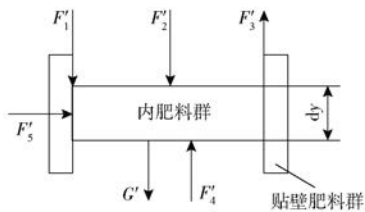


图 3 内肥料群微元体受力分析图

Fig. 3 Force analysis of intermediate fertilizer group

假设内肥料群微元体以速度 v 向下运动,则该方向上的加速度为 dv/dt ,根据深仓压力理论与微元体的受力分析,建立内肥料群微元体受力方程

$$\begin{cases} F_1' + F_2' + G' = F_3' + F_4' + m_1 \frac{dv}{dt} \\ F_1' = dF_1 C dy \cos \theta \\ F_2' = \sigma_1 A \\ F_3' = f_a C F_5' \\ F_4' = (\sigma_1 + d\sigma_1) A \\ F_5' = \sigma_2 dy \\ G' = m_1 g \\ m_1 = \rho dy A \end{cases} \quad (4)$$

式中 A ——内肥料群水平横截面面积, m^2

C ——肥料群水平横截面周长, m

m_1 ——内肥料群微元体质量, kg

F_1' ——贴壁肥料群对内肥料群提供的摩擦力, N

F_2' ——微小肥料层上端面受到的肥料群压力, N

F_3' ——内肥料群微元体与贴壁肥料群表面摩擦力, N

F_4' ——微小肥料层下端面受到的支持力, N

F_5' ——微小肥料层侧面受到的压力, N

G' ——内肥料群微元体重力, N

根据深仓压力理论知,深仓内微小肥料层 dy 的垂直压力与侧压力的比值为 K ,可得深度 y_h 处微小肥料层 dy 的上端面垂直压应力 σ_1 和侧面压应力 σ_2 分别为

$$\sigma_1 = \frac{\rho_b R}{K f_a} (1 - e^{-\frac{K f_a y_h}{R}}) \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \frac{\rho_b R}{f_a} (1 - e^{-\frac{K f_a y_h}{R}}) \quad (6)$$

式中 ρ_b ——肥料重度, N/m^3

由式(4)得

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sigma_1 A + dF_1 C dy \cos \theta + m_1 g - f_a \sigma_2 C dy - (\sigma_1 + d\sigma_1) A}{\rho dy A} \quad (7)$$

由式(5)~(7)可看出微小肥料层竖直方向加速度和贴壁肥料群微元体与内肥料群表面的摩擦力 F_1 呈正相关,结合式(3)结论可知,当扰动杯角速度增加时,微小肥料层竖直方向加速度增大,随扰动杯角速度增加,内肥料群下移效果越好。通过上述分析可知,扰动杯内的螺旋叶片对颗粒化肥在排肥器内的运动具有积极作用,螺旋叶片的螺旋角 α 、角速度 ω 是影响肥料扰动、排肥稳定的重要参数,后期需进一步分析确定最佳参数。

2.2 颗粒化肥结拱堵塞与破拱防堵机理分析

颗粒化肥结拱是影响排肥稳定性的重要原因,结拱堵塞主要有两种形式,一种是在出肥口形成的

半球形空洞,另一种是出肥口上方的肥料以漏斗流的方式排空形成空心管状抽芯式结拱,该两种成拱形式均是由于与管壁接触的肥料下移缓慢,同时肥料受到上端化肥的压实作用,导致管壁处的肥料滞留形成硬实的表层而滞留不动,随着排肥过程的持续,管壁处的肥料无法下移导致。

在螺旋扰动杯内,贴壁肥料群为内肥料群提供的摩擦力可分解为水平切向和竖直方向两部分,摩擦力的水平切向分力为内肥料群提供沿扰动杯轴线转动的力,摩擦力的竖直方向分力使肥料群下移。根据深仓压力理论,内肥料群与贴壁肥料群之间的竖直方向摩擦力为

$$F = \frac{\rho_b AR}{Kf_a} \left[\frac{Kf_a y_h}{R} - (1 - e^{-\frac{Kf_a y_h}{R}}) \right] \tag{8}$$

式中 $\rho_b = 8\,292.60\text{ N/m}^3$, $K = 0.44$, $f_a = 0.5$, $y_h = 0.5\text{ m}$ 。根据式(8),取扰动杯内的颗粒化肥为研究对象,以杯内颗粒化肥所在位置到扰动杯轴线距离为半径,通过 Excel 软件处理可得不同半径 R 下颗粒化肥受到的摩擦力 F ,抛物线方程为

$$F_r = 7\,549.8R^2 + 69.282R - 0.1957 \tag{9}$$

根据式(9),以长度 l 表征内肥料群受到贴壁肥料群的摩擦力,以扰动杯轴线纵切面构建平面直角坐标系,扰动杯轴线为 y 轴,深度 y_h 处水平位置为 x 轴,从 x 轴向 y 轴负方向以长度 l 为基准做不同半径对应的摩擦力,得到反映在扰动杯轴线纵切面的一条抛物线,如图 4 所示。

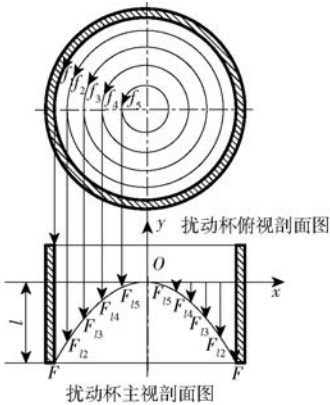


图 4 扰动杯内颗粒化肥所受摩擦力分析

Fig. 4 Analysis of friction force on particle fertilizer in disturbed cup

由图 4 可知,扰动杯内的螺旋叶片可为紧贴管壁的肥料群施加沿管壁的水平方向和竖直向下的扰动作用,内肥料群中越靠近贴壁肥料群的肥料受到的摩擦力越大,在扰动杯轴线附近的肥料受到的摩擦力最小,该摩擦力可将肥料滞留形成的硬实肥料群扰动,肥料群由于失去紧贴管壁肥料的支撑,肥料破拱塌落下移,有效防止化肥结拱堵塞现象的发生,

同时保证颗粒化肥持续稳定向下移动补充肥料,防止断条问题的出现。

2.3 锥盘与上壳体内化肥运动过程力学分析

根据小区播种机锥体格盘排种器分种机理设计的弧形锥体圆盘,可保证扰动杯内的颗粒化肥在弧形锥体圆盘锥顶与锥盘上端面的作用下均匀流畅进入肥室。颗粒化肥在扰动作用下进入弧形锥体圆盘上端锥顶,此时颗粒化肥受到盘面摩擦力最小,保证颗粒化肥顺利进入下端肥室,随着颗粒化肥下移,受到盘面的摩擦力逐渐变大,但排肥器表面光滑,摩擦力变化对颗粒化肥的下移运动影响较小,由于弧形锥体圆盘自身的转动,颗粒化肥受到的离心力远大于摩擦力,被迫向外缘移动,实现整个下移过程。将上壳体与螺旋扰动弧形锥体圆盘进行简化,仅保留上壳体与弧形锥体圆盘,选取上壳体与下壳体之间宽度为 dw 的下移肥料群微元体作为研究对象,其受力分析如图 5 所示。

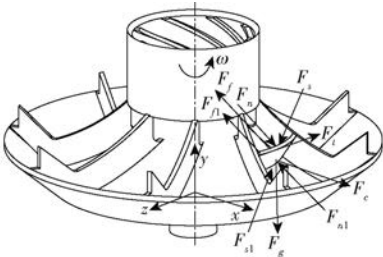


图 5 下移肥料群微元体受力分析

Fig. 5 Force analysis of fertilizer group moving down process

由式(1)知,弧形锥体圆盘上端面任意位置处的切线与水平面的夹角 β 可由弧形锥体圆盘母线方程求导得到,任意位置 x_1 处的 β 为

$$\beta = \arctan \frac{d \left[\frac{H_0}{R_0^2} (R_0 - x)^2 \right]}{dx} = \arctan \frac{2H_0}{R_0^2} (x_1 - R_0) \tag{10}$$

式中 x_1 ——下移肥料群微元体下侧面中点到轴心的距离, m

根据微元体的受力分析和达朗贝尔原理,建立下移肥料群微元体受力方程

$$\begin{cases} F_c \cos \beta + F_n + F_g \sin \beta + F_a = F_{n1} + F_N + F_{f1} + F_f \\ F_{s1} + F_c \sin \beta = F_s + F_g \cos \beta \\ m_2 = L \rho dw \frac{2\pi R_1}{8} \\ F_c = m_2 \omega^2 R_1 \\ F_f = \mu F_s \\ F_{f1} = \mu_1 F_{s1} \\ F_N = f \cos \gamma F_t \\ F_g = m_2 g \\ F_a = m_2 a_1 \end{cases} \tag{11}$$

式中 μ ——上壳体与下移肥料群的摩擦因数
 μ_1 ——弧形锥体圆盘上端面与下移肥料群的摩擦因数
 f ——离心推板与下移肥料群的摩擦因数
 R_1 ——微元体重心到轴线的距离, m
 L ——上壳体与下壳体之间的距离, m
 F_N ——离心推板对微元体的摩擦力, N
 m_2 ——下移肥料群微元体质量, kg
 a_1 ——离心加速度, m/s^2
 γ ——离心推板径向偏角, $(^\circ)$
 F_c ——微元体的惯性离心力, N
 F_n ——微元体上端肥料群压力, N
 F_g ——微元体重力, N
 F_s ——上壳体对微元体的压力, N
 F_f ——上壳体下端与微元体的摩擦力, N
 F_t ——离心推板对下移肥料群微元体的支持力, N
 F_{f1} ——弧形锥体圆盘上端面与微元体的摩擦力, N
 F_{s1} ——弧形锥体圆盘上端面对微元体的支持力, N

F_{n1} ——下端肥料群对微元体的支持力, N
由式 (11) 知肥料群下移的必要条件为
$$F_c \cos\beta + F_n + F_g \sin\beta - F_{n1} - F_N - F_{f1} - F_f \geq 0 \quad (12)$$

颗粒化肥在弧形锥体圆盘与壳体间主要受离心力作用向排肥器外缘移动, 因此弧形锥体圆盘上端面对微元体的支持力 F_{s1} 和弧形锥体圆盘上端面与微元体的摩擦力 F_{f1} 可忽略不计, 下移肥料群微元体向弧形锥体圆盘边缘移动过程中, 由于微元体外缘的颗粒化肥受到的离心力大于微元体受到的离心力, 微元体外缘的颗粒化肥对微元体的作用力 F_{n1} 可忽略不计, 由于排肥器各部件材质一样, 因此肥料与排肥器之间的摩擦因数均设为 f , 整理得

$$\omega \geq \sqrt{\frac{f \cos\gamma F_t - F_n - mg(\sin\beta + f \cos\beta)}{(\cos\beta - f \sin\beta) m R_1}} \quad (13)$$

由式 (10) 知, 颗粒化肥从排肥器弧形锥体圆盘顶端沿弧面向外缘移动, 在弧形锥体圆盘上端面任意位置切线与水平面的夹角 β 逐渐减小, 结合式 (13) 可知, 在相同排肥器弧形锥体圆盘转速下, 靠近排肥器外缘的颗粒化肥比靠近扰动杯轴线的颗粒化肥先达到下移条件, 可防止颗粒化肥在弧形锥体圆盘与壳体间堆积压实, 保证颗粒化肥持续稳定顺利向外缘移动, 该运动过程及肥料的扰动防堵保证了排肥器的排肥稳定性、流畅性。

3 扰动过程仿真分析

为验证螺旋锥体离心式排肥器的扰动防堵作用, 开展有、无螺旋扰动杯的排肥器排肥过程仿真分析对比试验。

3.1 仿真模型构建

3.1.1 排肥器模型

为了缩短仿真时间, 将与颗粒化肥无接触的部件省去, 采用 SolidWorks 软件进行排肥器建模, 排肥器模型如图 6 所示, 并将模型以 IGS 格式文件导入 EDEM 软件。设置模型的泊松比为 0.394, 剪切模量为 3.18×10^8 Pa, 密度为 $1\,070\text{ kg/m}^3$ 。

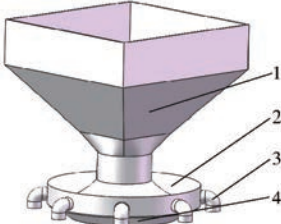


图 6 排肥器模型

Fig. 6 Model of fertilizer apparatus

1. 肥箱 2. 上壳体 3. 排肥管 4. 弧形锥体圆盘

3.1.2 颗粒化肥模型

随着颗粒化肥造粒技术的成熟, 颗粒表面光滑圆润, 不容易结块, 合格率高, 形状一般为球形或椭圆形, 可定义为球形散粒体。以常用史丹利复合肥理化特性参数为依据, 设置直径为 3.32 mm , 密度为 845.61 kg/m^3 , 泊松比为 0.25, 剪切模量为 1.1×10^8 Pa, 在 EDEM 软件中构建肥料颗粒体, 模拟复合肥料形状。

3.1.3 接触模型

由于颗粒化肥近似球形, 颗粒表面没有粘附作用, 所以选择 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型^[27], 仿真参数综合参考文献 [3, 6, 17, 28] 确定, 颗粒化肥与颗粒化肥之间的恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.3、0.34、0.16, 颗粒化肥与排肥器之间的恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.2、0.18、0.01。设置 EDEM 颗粒工厂的生成速率为 $100\,000\text{ 粒/s}$, 生成总量为 $50\,000\text{ 粒}$, 弧形锥体圆盘设置为 1 s 时开始转动, 以此保证在转动前生成的颗粒完全静止于肥箱内, 设置固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%, 总时间为 20 s ^[29]。

3.2 扰动防堵性能仿真试验分析

3.2.1 排肥器内颗粒化肥扰动过程分析

通过前期试验, 结合油菜直播施肥量要求, 若播种机前进速度为 3.5 km/h , 此时排肥器转速应大于 100 r/min , 为直观观察排肥器内部肥料运动情况,

两种排肥器弧形锥体圆盘转速均选取 110 r/min,在 EDEM 软件中的 Clipping 组框中添加 Clipping Planes(平面截断),通过调整 Plane Orientation 和 Distance from Center 值确定平面截断位置,平面截断模型如图 7 所示(左侧有螺旋扰动杯,右侧无螺旋扰动杯,红色方框内为肥箱出肥口与排肥器连接处)。

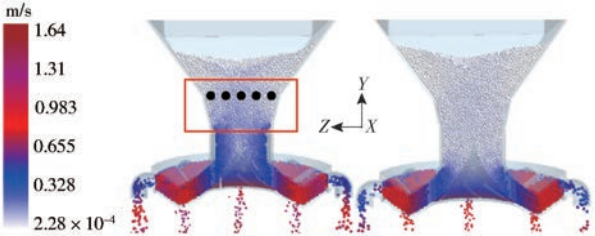
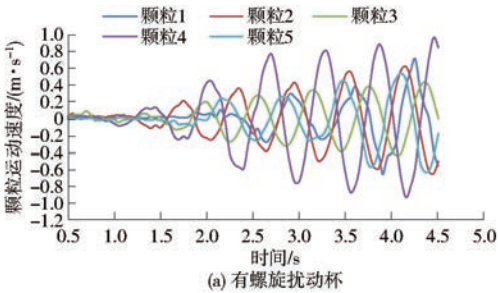


图 7 平面截断模型

Fig. 7 Clipping planes model

从图 7 可以看出,颗粒化肥在有螺旋扰动杯和没有螺旋扰动杯的排肥器内的运动速度存在明显差别。安装有螺旋扰动杯的排肥器内,位于扰动杯内的颗粒化肥呈蓝色,说明扰动杯为其提供了扰动作用,位于肥箱出肥口与排肥器连接处内的颗粒化肥为浅蓝色,说明螺旋扰动杯对其提供了卷携扰动作用,因为紧贴螺旋扰动杯内壁的颗粒化肥在螺旋叶片的作用下运动时,会卷携中间的颗粒化肥运动,并为位于螺旋扰动杯上端肥箱内的颗粒化肥提供动



能,可以有效防止化肥结拱,保证化肥顺利下移,说明螺旋扰动杯具有较好的扰动作用,同时随着颗粒化肥在离心力的作用下向排肥器外缘移动,颗粒化肥速度不断增加,保证了化肥的顺利离送;在没有螺旋扰动杯的排肥器内颗粒化肥为白色,说明颗粒化肥仅靠自身重力和上端肥料的压力缓慢向下移动,若肥箱出肥口形成半球形空洞,无法破拱,严重影响排肥稳定性。从上述分析可知,安装有螺旋扰动杯的排肥器具有很好的扰动防堵性能。

通过上述分析知,扰动杯带动紧贴扰动杯内壁的肥料运动,进而卷携肥箱出肥口与排肥器连接处的颗粒化肥运动,为后续高速摄像试验观察表层肥料运动提供了理论支撑。

3.2.2 颗粒化肥水平方向速度分析

为更直观分析颗粒化肥在有、无螺旋扰动杯排肥器内的运动情况,选取位于肥箱出肥口与排肥器连接处内 5 颗化肥(颗粒化肥选取位置如图 7 中黑点所示,从左往右依次代表颗粒 1 至颗粒 5,这 5 点可较好代表颗粒运动变化,且所选取的有螺旋扰动杯内的颗粒化肥所在初始位置与无螺旋扰动杯内的颗粒化肥位置保持相近或一致),通过 EDEM 后处理软件分析其在排肥器内水平 x 方向速度变化,颗粒化肥在 x 方向速度随时间变化的曲线如图 8 所示。

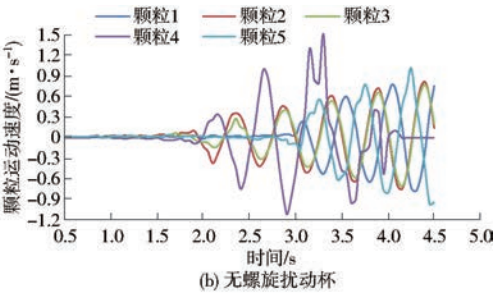


图 8 颗粒化肥水平方向速度变化曲线

Fig. 8 Velocity variation curves of granular fertilizer in x -axis direction

弧形锥体圆盘在 0.5 s 时开始转动,从图 8 可看出,有螺旋扰动杯的排肥器内颗粒化肥在 1 s 前速度较低,颗粒 2、4 在 1.3 s 时出现了水平 x 方向速度的波动,颗粒 1、3、5 在 1.6 s 时出现了水平 x 方向速度的波动,速度波动的最高点和最低点代表此时颗粒化肥在 x 方向的瞬时速度,此时颗粒化肥在扰动杯的作用下做沿扰动杯轴线向下的螺旋运动,颗粒 2、4 在 1.5 s 后水平 x 方向速度出现规律的大幅波动,颗粒 1、3、5 在 1.8 s 后水平 x 方向速度出现规律的大幅波动,说明此时颗粒化肥已进入肥室,并随转动半径的增加,线速度逐渐增加;没有螺旋扰动杯的排肥器内由于离心推板对颗粒化肥的带动,颗粒均在进入肥室前出现了短暂的速度波动,颗粒 2、3、4

在 2 s 时进入肥室,颗粒 1、5 在 3 s 时进入肥室。根据颗粒化肥在两排肥器内的速度变化可知,有螺旋扰动杯的排肥器内颗粒化肥在进入肥室前,出现了持续的速度波动,说明螺旋扰动杯为肥料提供了扰动作用,增加了肥料的流动性,可防止肥料滞固形成硬实的表层而出现堵塞,保证颗粒化肥持续稳定供给,避免出现断条现象;无螺旋扰动杯的排肥器由于缺少扰动作用,肥料流动性稍差,因此比有螺旋扰动杯的排肥器内颗粒化肥进入肥室内的时间稍长。

4 台架试验

4.1 试验材料与方法

排肥器架空结拱堵塞严重影响排肥稳定性,为

分析排肥器螺旋扰动防堵作用及排肥性能,应用自制的排肥装置试验台开展有、无螺旋扰动杯排肥器排肥性能试验研究,试验所用肥料为史丹利复合肥,以同行排肥频率稳定性系数与排肥量稳定性变异系数为评价指标,所用肥料 10 kg,收集 8 个排肥管内的颗粒化肥。

通过分析油菜直播施肥量要求,结合前期排肥器供肥速率,为适应不同施肥量要求,开展弧形锥体圆盘转速在 80、90、100、110、120、130 r/min^[27](转速利用速为 SW6234C 型激光测速仪测定;利用兆信 30V5A 的数显线性可调直流稳压电源 RXN-3005D 作为 12 V 电源,为弧形锥体圆盘驱动电机供电)同行排肥频率稳定性系数与排肥量稳定性变异系数对比试验研究,并利用高速摄像机(Pco. dimaxHD,摄像方向为排种器斜下方)观察肥箱出肥口与排肥器连接处内颗粒化肥卷携运动状态,高速摄像试验装置如图 9 所示。



图 9 高速摄像试验装置

Fig. 9 High-speed photography experiment device

1. 可调直流稳压电源 2. 直流电机调速器 3. 肥管 4. 排肥器
5. 肥箱 6. 台架 7. 高速摄像系统 8. 补光灯

同行排肥频率稳定性系数为

$$C_V = \left[1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \right)^2}}{\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}} \right] \times 100\%$$

(14)

式中 N ——试验次数
 x_i ——每行排肥管第 i 次的排肥频率, g/s
若式(14)中 x_i 为第 i 次 60 s 内总排肥量(g),则排肥量稳定性变异系数为 $1 - C_V$ 。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 颗粒化肥卷携运动分析

为分析螺旋扰动杯是否对颗粒化肥产生卷携扰动作用,在肥箱出肥口与排肥器连接处上端铺放了一层标记颜色的颗粒化肥,从左往右依次铺放红-

蓝-红-蓝-红-蓝色颗粒化肥,并用竖线在图中分隔开,分成 6 个区域,如图 10 所示。a 代表初始状态; b 代表标记颜色的颗粒化肥运动到肥箱出肥口与排肥器连接处末端; c 代表标记颜色的颗粒化肥通过肥箱出肥口与排肥器连接处末端。

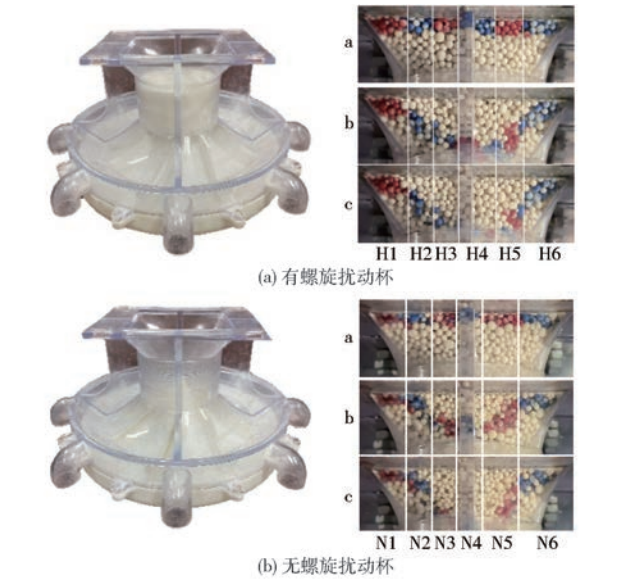


图 10 肥料运动状态

Fig. 10 Fertilizer state of motion

从图 10a 可以看出,在状态 b 时,区域 H2 内的蓝色颗粒化肥进入区域 H3,且区域 H3 内完全布满区域 H2 内的蓝色颗粒化肥,区域 H3 内的红色颗粒化肥完全进入区域 H4,区域 H4 内一半以上的蓝色颗粒化肥进入区域 H5;随着排肥器继续运动,在状态 c 时, H2 区域内的蓝色颗粒化肥进一步向右运动,且有部分蓝色颗粒进入区域 H4。颗粒化肥存在向右下方的卷携运动,且运动过程流畅,无断层下落问题;根据图 10b 颗粒化肥位置变化可知,在状态 b 和状态 c 时,各区域内的颗粒化肥除区域 N2 内的极少蓝色肥料进入区域 N3 外,其余区域内颗粒化肥均未出现在其它区域,各区域颗粒化肥均做向下的竖直运动,不存在卷携运动,且在试验过程出现了颗粒化肥断续下落问题。根据上述颗粒化肥运动情况可知,有螺旋扰动杯的排肥器可为肥箱出肥口与排肥器连接处的颗粒化肥提供卷携扰动作用,该部位扰动作用是由螺旋扰动杯内的颗粒化肥运动卷携所致,可有效防止肥料架空结拱堵塞,提高排肥流畅性。

4.2.2 排肥稳定性分析

同行排肥频率稳定性系数是衡量排肥器相同时间内同一排肥管排肥频率差异的指标;排肥量稳定性变异系数是衡量排肥器相同时间内排肥管排肥量差异的指标,两者均是排肥器排肥稳定性最直观的判断标准。

同行排肥频率稳定性分析结果如图 11 所示,图中蓝色和红色分别代表有螺旋扰动杯和无螺旋扰动杯的排肥器不同转速同行排肥频率稳定性系数,由内向外的等值线分别为 90%、92%、94%、96%、98%、100%,数字 1~8 为排肥管编号。由图可知,当弧形锥体圆盘转速较低时,无螺旋扰动杯排肥器较有螺旋扰动杯排肥器同行排肥频率稳定性系数低,且各排肥管之间的排肥频率稳定性系数差异明显,有螺旋扰动杯排肥器同行排肥频率稳定性系数虽较低,但各排肥管之间的排肥频率稳定性系数相差不大,均在 96% 以上;随着弧形锥体圆盘转速增

加,有、无螺旋扰动杯的排肥器同行排肥频率稳定性系数均有提高,且各排肥管之间的排肥频率稳定性系数差异减小,当弧形锥体圆盘转速达到 130 r/min 时,有、无螺旋扰动杯排肥器同行排肥频率稳定性系数相差最小,且各排肥管之间的排肥频率稳定性系数相差最小;弧形锥体圆盘从低速到高速,在相同转速时,有螺旋扰动杯排肥器均较无螺旋扰动杯排肥器同行排肥频率稳定性系数高,且各排肥管排肥频率稳定性系数相差不大。说明螺旋扰动杯对排肥器排肥稳定性具有积极作用,螺旋锥体离心式排肥器具有较高的排肥稳定性,对提高排肥质量和精度具有重要意义。

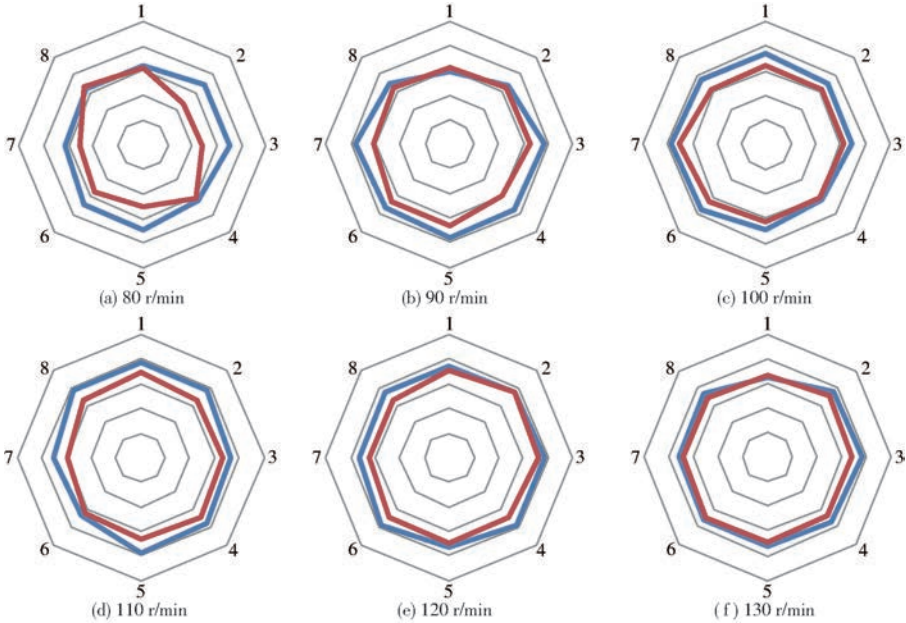


图 11 同行排肥频率稳定性分析结果

Fig. 11 Analysis result of fertilizing frequency stability in the same row

排肥量稳定性变异系数随转速变化曲线如图 12 所示。由图 12 知,当弧形锥体圆盘转速相同时,有螺旋扰动杯排肥器比无螺旋扰动杯排肥器排肥量稳定性变异系数低,且两种排肥器排肥量稳定性变异系数随弧形锥体圆盘转速增加而减小;无螺旋扰动杯排肥器排肥量稳定性变异系数在 5.11%~10.82% 之间,有螺旋扰动杯排肥器排肥量稳定性变异系数在 3.19%~5.57% 之间,两者均满足施肥质量要求,但有螺旋扰动杯排肥器明显低于无螺旋扰

动杯排肥器的排肥量稳定性变异系数。综上,说明螺旋扰动杯有助于排肥器稳定均匀排肥,对缩小各排肥管排量差异、提高排量稳定性具有重要作用。

5 结论

(1)通过对颗粒化肥在排肥器内运动学分析和颗粒化肥架空结拱堵塞形式分析,明确了颗粒化肥结拱机理,通过构建螺旋扰动杯内颗粒化肥所受摩擦力模型可知,贴壁肥料群可为内肥料群提供随半径变化竖直向下的摩擦力和与径向垂直的摩擦力,可有效解决管壁处因肥料滞固形成硬实的表层而造成的结拱堵塞问题。

(2)排肥器仿真试验表明,安装有螺旋扰动杯的排肥器内颗粒化肥为蓝色,说明螺旋扰动杯为颗粒化肥提供了卷携扰动作用;无螺旋扰动杯的排肥器内颗粒化肥为白色,说明颗粒化肥运动缓慢无扰动作用。由颗粒化肥在有、无螺旋扰动杯排肥器内的速度对比分析可知,有螺旋扰动杯排肥器比无螺

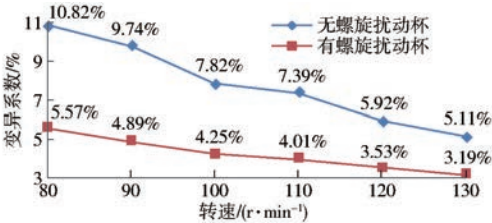


图 12 排肥量稳定性变异系数随转速的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of variation coefficient of fertilizing amount stability with increase of rotate speed

旋扰动杯排肥器内的颗粒化肥进入肥室的时间短,且进入肥室前出现了持续0.5 s的速度波动,说明螺旋扰动杯对颗粒化肥的运动具有积极作用。

(3)高速摄像试验表明,有螺旋扰动杯的排肥器可为颗粒化肥提供卷携扰动作用,有效防止肥料

架空结拱堵塞。台架试验表明,有螺旋扰动杯排肥器各排肥管之间的排肥频率稳定性系数在96%以上,且同行排肥频率稳定性系数随弧形锥体圆盘转速的增加而提高,排肥量稳定性变异系数不超过5.57%,具有较高的排肥均匀性和稳定性。

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/OL].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 increaser [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.001. (in Chinese)
- [2] 白由路.高效施肥技术研究的现状与展望[J].中国农业科学,2018,51(11):2116-2125.
BAI Youlu. The situation and prospect of research on efficient fertilization [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2116-2125. (in Chinese)
- [3] 郭涵,方龙羽,叶扬青,等.基于EDEM转盘式变量排肥装置的设计与试验[J].机械设计,2019,36(9):67-71.
GUO Han, FANG Longyu, YE Yangqing, et al. Design and test of the disk-type variable-rate fertilizer feeder based on EDEM [J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(9): 67-71. (in Chinese)
- [4] 杨洪坤,张立新,董万城,等.基于离散元法的双变量施肥机排肥装置分析与试验[J].机械设计与研究,2019,35(5):179-183.
YANG Hongkun, ZHANG Lixin, DONG Wancheng, et al. Analysis and experiment of fertilizer device for bivariate fertilizer based on discrete element method [J]. Machine Design & Research, 2019, 35(5): 179-183. (in Chinese)
- [5] 王金武,潘振伟,周文琪,等.SYJ-2型液肥变量施肥机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):53-58.
WANG Jinwu, PAN Zhenwei, ZHOU Wenqi, et al. Design and test of SYJ-2 type liquid variable fertilizer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 53-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150708&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.008. (in Chinese)
- [6] 施印炎,陈满,汪小岳,等.稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(7):97-103.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012. (in Chinese)
- [7] 金梅,梁苏宁,张文毅,等.多功能施肥播种机的研发[J].中国农机化学报,2015,36(1):4-7,17.
JIN Mei, LIANG Suning, ZHANG Wenyi, et al. Development of multi-function fertilizing seeder [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(1): 4-7, 17. (in Chinese)
- [8] 金鑫,李倩文,苑严伟,等.2BFJ-24型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(5):84-92.
JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 84-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010. (in Chinese)
- [9] 杨硕,王秀,翟长远,等.支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):145-153.
YANG Shuo, WANG Xiu, ZHAI Changyuan, et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 145-153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181016&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.016. (in Chinese)
- [10] 张睿,王秀,赵春江,等.链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(6):20-25.
ZHANG Rui, WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer spreader with conveyorchain [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 20-25. (in Chinese)
- [11] 齐兴源,周志艳,杨程,等.稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(6):20-26,316.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 20-26, 316. (in Chinese)
- [12] 杨程,臧英,周志艳,等.基于PID算法的气力式施肥机变量施肥控制系统设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2017,48(3):320-327.
YANG Cheng, ZANG Ying, ZHOU Zhiyan, et al. Design and test of pneumatic fertilizer applicator variable ratio fertilization control system based on PID algorithm [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(3): 320-327. (in Chinese)
- [13] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等.气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):141-148.
YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-

- tillage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (Supp.): 141 - 148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s019&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)
- [14] 齐兴源,周志艳,林蜀云,等.稻田气力式变量施肥机肥料喷撒器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):164-170,180.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, LIN Shuyun, et al. Design of fertilizer spraying device of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (Supp.): 164 - 170, 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s022&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.022. (in Chinese)
- [15] NAVEEN M T, NIR S, HAIM K, et al. Experimental analysis of particle velocity and acceleration in vertical dilute phase pneumatic conveying[J]. Powder Technology, 2018, 330: 239 - 251.
- [16] ANDRII Y, JEAN-PIERRE L, FREDERIC C. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder [J]. Biosystems Engineering, 2017, 161: 120 - 134.
- [17] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等.基于CFD-DEM的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(8):81-89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 - 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
- [18] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等.气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):171-180.
LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (Supp.): 171 - 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s023&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.023. (in Chinese)
- [19] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (9): 1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [20] 张青松,廖庆喜,肖文立,等.油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J].中国油料作物学报,2018,48(5):702-711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 48(5): 702 - 711. (in Chinese)
- [21] 张智,丛日环,鲁剑巍.中国冬油菜产业氮肥减施增效潜力分析[J].植物营养与肥科学报,2017,23(6):1494-1504.
ZHANG Zhi, CONG Rihuan, LU Jianwei. Potential analysis on winter oilseed rape production under reducing nitrogen input and increasing its efficiency in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1494 - 1504. (in Chinese)
- [22] 王森森.烟田电动精量施肥机的设计与试验研究[D].郑州:河南农业大学,2018.
WANG Miaosen. Study on design and experiment of tobacco electric precision fertilizing machine [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [23] 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):34-43.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Design and experiment of spiral disturbance cone centrifugal fertilizer apparatus [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 34 - 43. (in Chinese)
- [24] 贾明印,王克俭,薛平,等.考虑离心作用的螺杆挤出机固体输送理论模型[J].高分子材料科学与工程,2008,24(4):109-112.
JIA Mingyin, WANG Kejian, XUE Ping, et al. Modeling solid conveying in novel screw extruder considering centrifugal force and compressibility [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(4): 109 - 112. (in Chinese)
- [25] 杨明韶.农业物料流变学[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [26] 马云海.农业物料学[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [27] VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. EDEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348 - 360.
- [28] 曹艳文.基于离散元法的螺旋式排肥器仿真分析与试验研究[D].长春:吉林农业大学,2017.
CAO Yanwen. Simulation analysis and experimental study of screw fertilizer distributor based on EDEM [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [29] 胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010.