doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.013

气力集排式精量配混施肥装置设计与试验

贾洪雷^{1,2} 谭贺文¹ 温翔宇³ 王 刚¹ 袁洪方¹ 黄东岩^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院,长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室,长春 130022;3. 深圳市现代农业装备研究院,深圳 518038)

摘要:为满足玉米生长中后期的追肥需求,本文设计一种气力集排式精量配混施肥装置。电机驱动叶片旋转进行 混肥,将肥料分配器内部设计成锥形结构。基于流体动力学和离散元耦合法对分配器排肥口倾角、分配器上端波 纹管的结构和布置方式进行研究;以排肥口倾角、输送气速和波纹管长度为试验因素,以各行排肥量变异系数为试 验指标,进行三元二次回归正交组合设计试验。试验结果表明,当排肥口倾角 45°、输送气速 35 m/s、波纹管长度 568 mm 时,性能最优。混肥器进口采用中心布置方式,叶片数量为 8。田间试验结果表明,该机施肥量误差小于 2%,总施肥量稳定性变异系数为 2%,施肥断条率低于 2%,满足国家标准。

关键词:施肥装置;精量配混;气力输送

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022) S2-0109-11

Design and Experiment of Pneumatic Aggregate and Discharge Precision Fertilizer Mixing Device

JIA Honglei^{1,2} TAN Hewen¹ WEN Xiangyu³ WANG Gang¹ YUAN Hongfang¹ HUANG Dongyan^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China

3. Shenzhen Modern Agricultural Equipment Research Institute, Shenzhen 518038, China)

Abstract: In order to meet the requirement of top dressing in the middle and late period of maize growth, a kind of pneumatic gathering and discharging type corn precision fertilizer mixing device was designed. The variable mixing fertilizer scheme with pneumatic set and row was designed. The motor driven blade rotation was used to mix fertilizer, and the inside of the fertilizer distributor was designed as a cone structure. By means of computer fluid dynamics, discrete element coupling method and two factors and five levels orthogonal experiment, the dip angle of the fertilizer outlet and the structure and arrangement of the bellows at the upper end of the distributor were studied. With the coefficient of variation of fertilizer discharge in each row as the test index, and with the angle of fertilizer discharge outlet, conveying gas velocity, and bellows length as the experiment factors, a three-way quadratic regression orthogonal combination design experiment was conducted to obtain the optimal operation parameters of key components of the precision fertilizer mixing device, namely, the angle of fertilizer discharge outlet of 45°, conveying gas velocity of 35 m/s, and bellows length of 568 mm. The inlet layout of fertilizer mixer was as follows: central layout, and the number of blades was 8. In June 2019, the machine field inspection was done at the National Agricultural Machinery and Tools Quality Supervision and Inspection Center, the inspection results showed that the machine's fertilizer application error was 2%, the total fertilizer application stability coefficient was 2%, and the fertilization rate was less than 2%. The research result can provide useful reference for the design and development of pneumatic fertilizing machinery and tools.

Key words: fertilizer apparatus; precise mixing; pneumatic transmission

收稿日期: 2022-06-08 修回日期: 2022-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31901408)和吉林省科技发展计划项目(20200201206JC)

作者简介:贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作技术研究,E-mail: jiahl@ vip. 163. com 通信作者: 王刚(1988—),男,副教授,博士生导师,主要从事智能农业机械研究,E-mail: gw611004@ jlu. edu. cn

中耕作业是农业生产的重要环节之一,可以疏 松土壤、消灭杂草^[1-2]。中耕施肥作为中耕作业的 一部分,能够增强土壤肥力^[3],促进作物根系生长 发育,提高作物产量^[4]。

国内外研究者对中耕施肥研究较多, MISERQUE 等^[5]通过理论研究和模型计算分析得 出离心式撒肥盘角速度变化影响撒肥半径,落料口 位置影响撒肥半径和撒肥范围形状。美国 John Deere 公司研制的 2510H 型气力集排式固态肥侧深 追肥机,采用单圆盘开沟器进行侧深追肥,可将土壤 中氮和磷损失减少45%;胡红等[6]为解决玉米生长 中后期追肥困难的问题,结合农艺与仿真手段,设计 了一种玉米行间定点扎穴深施追肥机,其追肥深度 合格率和追肥距离合格率分别为88.3%和96.7%, 漏追率为 2.7%,提高了追肥机作业效率;何亚凯 等[7]设计了一种多行集中排肥、气流输肥以及分层 深施肥方式的玉米追肥机,提高了玉米行间排肥量 一致性和施肥深度均匀性,解决了追肥作业效率及 肥料利用率不高等问题。综上,研究者们对施肥精 准度及施肥效率进行研究,对于精量配混施肥机械 少有报道。

精量配混施肥技术^[8]作为精准农业的核心技 术之一,能更好实现按需配混施肥,提升作业效率。 目前,国内研究者对智能精量配混施肥机具研究较 少^[9]。

本文设计气力集排式精量配混施肥装置,并设 计气力集排式精量配混施肥系统,将氮、磷、钾 3 种 肥料按需求量配比混合后通过气力输送排施,以提 高肥料利用率,为精量配混施肥机具的设计提供参 考。

1 装置结构与工作原理

气力集排式精量配混施肥装置由机架总成、发 电机、配肥装置、抛送式混肥器、肥料分配器、双圆盘 开沟器和变量施肥控制系统组成,整机结构如图1 所示。

变量施肥控制系统控制配肥装置,将分放在肥 箱中的化肥(氮、磷、钾肥)按需求量进行配比排施, 肥料受重力作用下落至抛送式混肥器中,在电机的 驱动下,混肥器内旋转的扇叶将3种肥料混合,并通 过扇叶产生的气流将混合肥料输送至肥料分配器 中,肥料被均匀地分成5 垄后输送至双圆盘开沟器 排施到土壤。气力集排式玉米精量配混施肥装置主 要技术参数见表1。



图1 气力集排式精量配混施肥装置总体结构示意图

Fig. 1 Schematic of pneumatic aggregate and discharge precision fertilizer mixing device

高地隙底盘总成 2. 机架总成 3. 发电机 4. 配肥装置 5. 肥料分配器 6. 抛送式混肥器 7. 双圆盘开沟器 8. 变量施肥控制系统

表1 气力集排式玉米精量配混施肥装置主要技术参数

Tab. 1 Pneumatic gathering and discharging type corn precision fertilizer mixing device

参数	数值
作业速度/(km·h ⁻¹)	5~9
工作宽幅/m	3.5
施肥行数	5
施肥深度/cm	5~8
肥料与植株距离/cm	3~5

2 施肥关键部件结构设计

2.1 配肥装置结构设计

配肥装置结构如图2所示,主要由肥料箱、排肥 器、排肥轴、步进电机组成,肥料箱内置3个容腔,分 别装有大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾,每个容腔下 均设有3个外槽轮排肥器,3个排肥器通过排肥轴 带动,排肥轴一侧与步进电机输出轴连接,步进电机 输出轴安装了行星齿轮减速器,3个容腔下排肥器 的转速分别由3个步进电机控制。



Fig. 2Structure diagram of mixed fertilization device1. 肥料箱2. 外槽轮排肥器3. 排肥轴4. 步进电机

变量施肥控制系统原理如图 3 所示。机具作业时,施肥机通过 GPS 获取车辆在田间的位置信息, 车载计算机读取当前位置大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾的目标施肥量,同时,结合霍尔传感器反馈到车载计算机中生成施肥策略,并将控制信号分别传递



Fig. 3 Schematic of variable fertilization control system

到变量施肥控制器进而控制步进电机转动。步进电 机输出轴上安装有行星齿轮减速器(减速比为1: 10,增大扭矩保证排肥流畅性)。排肥轴在步进电 机动力驱动下控制排肥槽轮进行排肥,此时电机上 的编码器对排肥轴转速进行测定,速度信号实时反 馈给电机,以保证动力输出轴即时调整转速,实现变 量配比施肥的目的。

2.2 肥料分配器设计

肥料分配器是气力集排式精量配混施肥装置的 关键部件之一,如图 4 所示,主要包括分配器进口、 分配器壳体和排肥口。输肥管下端与分配器进口相 连接,分配器壳体下方圆周均布 5 个排肥口,排肥口 与水平面呈一定的角度,延展的排肥口在分配器壳 体内部形成锥形结构,对下落的肥料起到较好的分 配和导流作用^[10-12],因此,排肥口轴线与水平面间 的夹角,即为排肥口倾角,该角度对肥料分配器的分 肥性能有重要影响。排肥口外部与排肥管相连接, 将分配后的肥料输送至双圆盘开沟器排施到土壤 中。



 Fig. 4
 Schematic of fertilizer distributor structure

 1. 分配器进口
 2. 分配器壳体
 3. 排肥口

玉米单垄施肥常用排肥管内径为40 mm,为保 证肥料分配器排肥口与排肥管对接后的风压和输送 气速恒定,排肥口外径设计为40 mm,且设有倾角, 使排肥口在肥料分配器腔体内两两相切,形成契合 的锥形结构,通过排肥口倾角可直接计算出肥料分 配器腔体直径。

为保证装置输肥管的输送气速与经肥料分配器 分流后单垄排肥管的输送气速一致,输肥管直径计 算式为

$$d_s = \sqrt{5}d_L \tag{1}$$

式中 d_L——单垄排肥管直径,mm

d_s——集排式施肥装置输肥管直径,mm

经计算,输肥管内径约为90 mm,则肥料分配器 进口外径设计为90 mm。

2.3 抛送式混肥器设计

为使肥料均匀混合,设计了一种抛送式混肥器 (图5),电机驱动叶片旋转将混肥器内的空气排出, 在混肥器进口处产生负压,外部空气和配肥装置排 出肥料颗粒流同时进入混肥器,肥料颗粒在重力作 用下落入叶片间空隙,随着叶片旋转,肥料颗粒有叶 片接触聚集在叶片前表面,同时叶片径向上产生的 离心力使颗粒不断向叶片外端移动,形成混合颗粒 群,依附在混肥器内壁上随着叶片旋转方向移动,到 达混肥器出口时,在惯性力和叶片产生的气流共同 作用下被抛出。



图 5 抛送式混肥器结构示意图

Fig. 5Schematic of throwing mixer structure1. 电机2. 混肥器出口3. 径向直板叶片4. 混肥器进口

混肥器叶片需与大量肥料颗粒接触,故将其设 计为耐磨性较好的径向直板形式^[13]。叶片外径计 算式为

$$D_2 = \frac{60}{\pi n} \sqrt{\frac{p}{\rho \psi}} \tag{2}$$

式中 D₂——叶片外径,m *n*——电机转速,r/min *p*——全压,Pa ρ----空气密度,取1.2 kg/m³

ψ-----压力系数

径向直板叶片出口角为90°,根据叶片出口角 与压力系数关系曲线,确定压力系数为1.3,施肥装 置采用开放式气力输送系统,因输肥管中的气固两 相流为稀相流,采用低压压送稀相流具有能耗低、输 送距离远的优点,试验研究表明采用低压气源(小 于1000 Pa)可以满足开放式气力施肥的作业需 求^[14],因此,设计抛送式混肥器提供 600 Pa 的气源 压力,采用额定转速960 r/min 的电机,求得叶片外 径为390 mm。输送气速过低会使肥料阻塞管路,输 送气速过高,会增加能耗,同时加剧管道的磨损[15], 通常输送气速设置为肥料悬浮速度的 1.5~2.5 倍[16],通过试验台测定大颗粒尿素悬浮速度6.68~ 12.48 m/s,磷酸二铵悬浮速度7.22~11.96 m/s,硫酸 钾悬浮速度 9.46~17.81 m/s^[17]。因此,为保证肥 料不堵塞管道,输送气速需大于硫酸钾颗粒最大悬 浮速度的1.5倍,同时考虑管道衔接处气密性的影 响,将输送气速设置为30 m/s。

抛送式混肥器为直径 90 mm 的输肥管内提供 30 m/s 风速,可计算出抛送式混肥器至少需提供 687 m³/h 空气流量, 混肥器进口直径最小值计算式 为

$$\frac{D_1}{D_2} \ge 1.194 \sqrt[3]{\varphi} \tag{3}$$

其中

$$\varphi = \frac{4Q}{\pi u_2 D_2} \tag{4}$$
$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} \tag{5}$$

(4)

式中 D1------混肥器进口直径,m *φ*——流量系数 0----空气流量,m³/s

u,-----叶片外端圆周线速度,m/s

为保证在较小压力下吸入足够的空气,经计算, 混肥器进口直径148 mm。为保证稳定的气源压力, 混肥器出口与输肥管截面面积应相等,则抛送式混 肥器出口为边长 80 mm 的正方形。为降低换件成 本,用变径管将抛送式混肥器出口与输肥管连接,变 径管连接混肥出口端边长为 80 mm × 80 mm 正方 形,连接输肥管端为直径 90 mm 圆形。混肥叶片安 装在混肥器内部,其宽度应小于混肥器(80 mm),则 叶片宽度取为70 mm。

3 施肥部件仿真优化试验与分析

输送气速、输肥管布置情况和排肥口倾角等会 影响分配器分肥的均匀性。采用计算流体力学和离

散单元相结合的方法研究肥料分配器中肥料颗粒的 运动特性^[18-20],选用 ANSYS Fluent 16.0 (美国 ANSYS 公司)和 EDEM 2.7(英国 DEM - Solutions 公 司)软件进行耦合仿真。

3.1 试验材料

氮肥选用 N 含量 46% 的大颗粒尿素,磷肥选用 N 含量 18%、P,O,含量 46% 的磷酸二铵,钾肥选用 K,O含量50%的圆粒硫酸钾,输肥管、肥料分配器、 抛送式混肥器均为聚氯乙烯(PVC)材料,试验材料 基本参数如表2所示。

	表 2	材料基本	参数
Tab. 2	Basi	c material	parameters

材料	参数	数值
	泊松比	0. 4 ^[18]
	剪切模量/Pa	3. 48 × 10 ^{7[19-21]}
大颗粒脉系	密度/(kg·m ⁻³)	1 337
	粒径/mm	1.60 ~ 5.00
	泊松比	0. 25
磷酸二铵	剪切模量/Pa	9. $20 \times 10^{6[22]}$
	密度/(kg·m ⁻³)	1 485
	粒径/mm	1.60 ~4.00
	泊松比	0.4
T 去 悪会 占田	剪切模量/Pa	1.33×10^{7}
机的种	密度/(kg·m ⁻³)	2 419
	粒径/mm	2.00 ~ 5.60
PVC	泊松比	0. 47
	剪切模量/Pa	3. 57 $\times 10^{6}$
	密度/(kg·m ⁻³)	1 282

各个材料间的接触参数(静摩擦因数、滚动摩 擦因数)对仿真试验结果有着十分重要的影 响^[21-23],采用文献[24]提出的标定方法在 EDEM 软件中进行标定试验,各个材料间接触参数见表3。

通过预试验发现本次试验所选的肥料样本粒径 呈正态分布,但磷酸二铵、硫酸钾颗粒粒径不完全服 从正态分布,因此,建立两种粒径的颗粒模型,采用 正态分布参数设置进行分段拟合,参数设置如表4 所示。

气力集排式配混施肥装置作业幅宽 3.5 m,5 垄 同步施肥,施肥装置需满足最大追肥量 300 kg/hm², 以大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾比例 2:1:1排施为 例进行仿真,需大颗粒尿素 150 kg/hm²,磷酸二铵和 硫酸钾各75 kg/hm²,以前进速度6 km/h 计算得,排 施大颗粒尿素 87.5 g/s,磷酸二铵、硫酸钾 43.75 g/s。

3.2 肥料分配器气、固两相流耦合仿真

为测定肥料分配器性能,肥料分配器上方配置 一段长480 mm 的输肥管,在输肥管上端生成3种颗 粒肥料,并设置重力加速度方向,在 EDEM 软件中,

表 3 仿真参数 Tab. 3 Parameters used in simulation

14510		
项目	参数	数值
	碰撞恢复系数	0. 28
尿素-尿素	静摩擦因数	0.36
	滚动摩擦因数	0.15
	碰撞恢复系数	0.20
尿素-二铵	静摩擦因数	0.41
	滚动摩擦因数	0.15
	碰撞恢复系数	0.20
尿素−硫酸钾	静摩擦因数	0.30
	滚动摩擦因数	0.15
	碰撞恢复系数	0.35
尿素-PVC	静摩擦因数	0.41
	滚动摩擦因数	0.15
	碰撞恢复系数	0.19
二铵-二铵	静摩擦因数	0.26
	滚动摩擦因数	0.21
	碰撞恢复系数	0.20
二铵-硫酸钾	静摩擦因数	0.30
	滚动摩擦因数	0.15
	碰撞恢复系数	0.32
二铵-PVC	静摩擦因数	0.39
	滚动摩擦因数	0.15
	碰撞恢复系数	0.18
硫酸钾−硫酸钾	静摩擦因数	0.34
	滚动摩擦因数	0.17
	碰撞恢复系数	0.30
硫酸钾-PVC	静摩擦因数	0.37
	滚动摩擦因数	0.15

表4 肥料样本粒径正态分布参数设置

Tab. 4 Parameter setting of fertilizer sample size normal distribution

颗粒	参数	尿素	磷酸二铵	硫酸钾
	基准半径/mm	1.6	1.5	2.2
	平均半径/mm	3.2	1.5	2.2
颗粒群1	标准差/mm	0.4	0.07	0.1
釈杠杆Ⅰ	半径下限/mm	1.6	1.5	1.6
	半径上限/mm	5.0	1.9	2.8
	质量/g	200	103	178
	基准半径/mm		1.2	1.6
	平均半径/mm		1.2	1.6
	标准差/mm		0.2	0.6
颗粒群2	半径下限/mm		0.8	1.0
	半径上限/mm		1.5	1.6
	质量/g		97	22

固相选用 Hertz – Mindlin 无滑动接触模型, 仿真模型如图 6 所示。

各排肥口排肥量测试方法如图 6 所示,在 EDEM 后处理阶段,在出肥口处添加质量传感器,设 置统计目标为总质量传感器,统计各出肥口处肥料



图 6 肥料分配器与质量传感器布置示意图 Fig. 6 Schematic of fertilizer distributor and mass sensor layout 1. 输肥管 2. 肥料分配器

总质量。

在 Fluent 软件中,气相选用 Eulerian – Langrangian 方法的不可压缩流体模型,采用标准 k – ε 模型求解,耦合仿真模块中选用 Saffman 剪切升力 和 Magnus 旋转升力模型^[25-27],EDEM 软件中仿真 时间步长设置为 5 × 10⁻⁶ s,按 EDEM 软件与 Fluent 软件耦合计算的数据需要,Fluent 软件中时间步长 需设置为 EDEM 中时间步长的整数倍,Fluent 软件 中仿真时间步长设置为 4 × 10⁻⁴ s,是 EDEM 软件所 设时间步长的 80 倍。DEM – CFD 耦合仿真流体相 关参数如表 5 所示。

表 5 DEM – CFD 耦合仿真流体相关参数

Tab. 5 Fluid related parameters of DEM – CFD coupling simulation

Sinulation						
参数	数值					
流体类型	空气(不可压缩流体模型)					
流体密度/(kg·m ⁻³)	1. 225					
流体粘度/(Pa•s)	1. 79×10^{-5}					
计用文件店	Velocity - inlet					
边介东什但	Outflow					
	标准 $k-\varepsilon$					
	k-ε 输运方程常系数1	0.09				
迪达措理全新	<i>k</i> -ε输运方程常系数2	1.44				
而孤快望参奴	<i>k</i> -ε输运方程常系数3	1.92				
	湍流动能普朗特数	1				
	湍流耗散率普朗特数	1.3				
近壁面处理	Standard wall function	ons				
求解时步/s	4×10^{-4}					

仿真试验针对排肥口倾角这一结构参数进行分析,建立排肥口倾角0°、15°、30°、45°的仿真模型,进行对比试验,输送气速均设置为30m/s,不同排肥口倾角的肥料分配器肥料颗粒分布图,如图7所示。

由图7可以看出,当排肥口倾角为0°时,没有 锥形斜面导流,颗粒在分配区滞留,大部分颗粒在平 面处聚集,肥料强排效率低于输肥管中的肥料供给 效率,颗粒因碰撞和压力差导致移动速度降低,造成



Fig. 7 Distribution of fertilizer particles in fertilizer distributor with different angles of fertilizer outlet

拥堵,影响肥料均匀分配,随着倾角逐渐增加,这一 现象得到有效缓解。当倾角45°时,颗粒速度损失 小,分配器排肥能力明显增强,但排肥口与外部水平 排肥管角度增加,随着角度增加,排肥口末端的蓝色 颗粒数量逐渐增加,说明颗粒从分配器排出至排肥 管时,颗粒与排肥管壁碰撞产生了能量速度,颗粒速 度降低,不利于连续排肥,分配器分出的肥料容易在 排肥口末端产生堵塞。

综合两者考虑,排肥口倾角 45°时,输肥管内与 排肥口处输送气速差较小,且无明显压力差,同时排 肥口末端无颗粒拥堵,利于肥料排施,形成均匀稳定 的颗粒流,排肥口倾角 45°综合性能最优。

3.3 输肥管中颗粒运动仿真

气流为肥料颗粒的加速提供能量,颗粒由于动 能增加而跟随气流方向移动,但是由于空间布置需 要,除正对肥料分配器进口的输肥管之外,其余的输 肥管并不总是沿垂直方向布置,其弯曲程度可达 90°。因此建立90°弯曲条件下输肥管道模型,进行 气、固耦合仿真,观察肥料颗粒运动状态,找出影响 肥料均匀分配的因素。通过预试验发现,波纹输肥 管在水平段输送肥料,波纹之间的褶皱会导致肥料 堆积,需要更大的输送气速保证肥料的输送,造成能 源浪费,故通过仿真试验研究内壁光滑的输肥管是 否可以代替波纹输肥管。 在输送气速 30 m/s 下,采用 90°弯曲、内壁光滑 的输肥管进行仿真试验,肥料颗粒在输肥管垂直段 扩散轨迹如图 8 所示。仿真试验中发现,颗粒与壁 面碰撞后,颗粒速度明显降低,随着后续的肥料颗粒 涌入弯曲段,在弯管的外壁附近,流体和颗粒浓度局 部增加。同时,连续的颗粒流向着弯曲段冲击,阻止 肥料反弹,颗粒流继续沿着外壁移动。



依附于管壁的颗粒流不利于肥料分配器工作, 因此,在垂直管道处采用波纹输肥管进行两相流仿 真预试验,截取垂直管段颗粒分布图(图9),发现颗 粒群大部分处于管道中心,颗粒流进入分配器中被 均匀分成5股后输送至各垄。



Fig. 9 Particle distribution in vertical section of bellows

综上所述,需要在肥料分配器上端设有一定长 度的垂直波纹输肥管,为避免肥料在波纹输肥管中 堆积,除垂直波纹管外,均采用内壁光滑的施肥管。

为探究排肥口倾角、输送气速和波纹管长度对 肥料分配器分肥均匀性的影响,采用采用三元二次 回归正交组合设计。以排肥口倾角、输送气速和波 纹管长度为试验因素,以各行排肥量变异系数为试 验指标。

选取试验因素排肥口倾角为0°~45°;根据文献[16-17],经综合计算取输送气速为25~45 m/s;考虑气力集排式精量配混施肥装置各部件的实际装配尺寸,在不发生干涉情况下,取波纹管长度为

200~1000 mm。因素水平编码如表6 所示。

表6 仿真试验因素水平编码

 Tab. 6
 Code of simulation test factors and levels

		因素	
编码	排肥口倾角/	输送气速/	波纹管长度/
	(°)	$(m \cdot s^{-1})$	mm
1.682	45	45	1 000
1	36	41	838
0	22. 5	35	600
- 1	9	29	362
- 1. 682	0	25	200

试验设计仿真试验结果见表 7,*x*₁、*x*₂、*x*₃为因素 编码值。仿真数据方差分析如表 8 所示。

	1ab. / 1es	a design s	cheme and	results
紽巳		因素		各行排肥量变异
細石	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	系数 Y1/%
1	- 1	- 1	- 1	7.71
2	1	- 1	- 1	5.16
3	- 1	1	- 1	8.48
4	1	1	- 1	5.02
5	- 1	- 1	1	7.83
6	1	- 1	1	6.90
7	- 1	1	1	8.06
8	1	1	1	6.48
9	-1.682	0	0	7.63
10	1.682	0	0	3.92
11	0	- 1. 682	0	5.87
12	0	1.682	0	6.93
13	0	0	- 1. 682	7.07
14	0	0	1.682	8.69
15	0	0	0	4.54
16	0	0	0	4.13
17	0	0	0	4. 71

表 7 试验设计方案及结果 b 7 Tost dosign scheme and results

表 8 试验结果方差分析

Tab. 8	Analysis	of	variance	of	test	results	

方差来源	均方和	F	Р
模型	39.40	58.89	< 0. 000 1 ***
x_1	15.95	214. 55	< 0. 000 1 ***
<i>x</i> ₂	0.36	4.87	0.063 2 *
<i>x</i> ₃	2.32	31.16	0.000 8 ***
$x_1 x_2$	0.30	4.09	0. 082 8 *
$x_1 x_3$	1.53	20.60	0.0027***
$x_2 x_3$	0.084	1.13	0. 323 0
x_{1}^{2}	2.76	37.14	0.000 5 ***
x_{2}^{2}	5.78	77.71	< 0.000 1 ***
x_{3}^{2}	17.31	232. 82	< 0. 000 1 ***
残差	0.52		
误差	0.18		

注:*** 表示极显著(P<0.01);** 表示显著(0.01<P<0.05);*表示较显著(0.05<P<0.1)。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行 二次回归分析,并进行多元回归拟合,得到试验指标 各行排肥量变异系数的回归方程并对其显著性进行 检验。通过对试验数据的分析和多元回归拟合,各 行排肥量变异系数方差分析如表 8 所示。因素及 因素之间的交互作用影响的主次顺序是 x₁、x₂²、x₃²、 x₁²、x₃、x₁x₃、x₂、x₁x₂。将不显著的交互作用项的回 归平方和及自由度并入残差项后,再进行方差分 析。得到各因素对各行排肥量变异系数影响的回 归方程为

 $Y = 4.45 - 1.08x_1 + 0.16x_2 + 0.41x_3 - 0.2x_1x_2 +$

 $0.44x_1x_3 + 0.49x_1^2 + 0.72x_2^2 + 1.24x_3^2$ (6)

对上述回归方程进行失拟性检验 *P* = 0.6483, 其不显著,说明不存在其他影响试验指标的主要因 素,试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

经软件对数据处理得到排肥口倾角、输送气速、 波纹管长度之间显著和较显著交互作用对各行排肥 量变异系数影响的响应曲面,如图 10 所示。以试验 指标最小值为优化目标,结合 3.2 节中得到的研究 结果,即排肥口倾角 45°时综合性能最优,并结合响 应曲面选定各试验因素约束条件: $X_1 \leq 45^\circ$; 34.1 m/s $\leq X_2 \leq 36$ m/s;457 mm $\leq X_3 \leq 648$ mm。对 其参数进行求解,参数优化结果为排肥口倾角 45°、 输送气速 35 m/s、波纹管长度 568 mm,得到理论上 各行排肥量变异系数为 3.9%,小于 7.5%,满足国



家标准 GB/T 20346.1—2006《施肥机械试验方法》。

3.4 抛送式混肥器颗粒运动仿真

利用 EDEM 软件模拟叶片旋转搅动并抛送肥料颗粒的过程,观察肥料颗粒在混肥器中的运动规律,合理确定混肥器进口布置位置、叶片数量等参数。

通过预试验发现,混肥器进口位置对颗粒运动 规律有一定的影响,设置不同混肥器进口位置的对 比仿真试验,分为与混肥器出口相对位置 180°、相 对位置 270°以及中心位置等 3 种布置形式,如图 11 所示。试验模型叶片数量设置为 8 片,叶片厚度 2 mm,混肥器进口颗粒流量设为 175 g/s,在混肥器 出口设置质量流量传感器,对质量流量进行监测。



Fig. 11 Simulation results of different feed inlet positions

通过仿真试验观测颗粒在混肥器中运动规律, 相比于混肥器进出口相对位置 180°布置以及相对 位置 270°布置,混肥器进口中心布置时,肥料进入 混料腔后,直接被均分成 8 份同时向各个叶片外缘 移动,而在非中心布置的情况下,所有颗粒均落在一 组相邻叶片间的空隙中,所以图 12c 中抛送的颗粒 流相对浓度更低,分散更为均匀,3 种不同的布置形 式排肥量随时间变化曲线如图 12 所示。





从图 12 中可以看出,相比于非中心布置,中心 布置的混肥器,其流量增长更加平稳,无跳跃性波 动,当0.6s时,肥料质量流量趋于稳定。非中心布 置方式下,颗粒堆积在进料口一侧的管壁上,而中心 布置方式中,反弹的颗粒被均匀分摊在进料口圆周 壁面上,对后续颗粒的阻碍相对较小,肥料颗粒在出 料口的质量流量与进料口肥料的供给速率接近,而 非中心布置的混肥器出肥速率低于进肥速率,故混 肥器进口位置采用中心布置的形式。

继续分析叶片数量对肥料混合抛送效果的影响。分别设置叶片数量4、8、12 仿真对比试验,混肥器进口颗粒流量设为175 g/s,在肥料出口设置质量流量传感器,通过 EDEM 软件中输出的时间—流量折线图进行分析。

如图 13a 所示,当叶片数量为4时,相邻叶片间 距较大,而肥料颗粒均聚集在叶片前表面,在叶片后 方形成了较大的空白区,颗粒流流动连续性较差,质 量流量上下大幅度波动,产生了脉动性;8 片叶片使 得两叶片间的空隙减小了一半,每组颗粒仅需叶轮 旋转 45°即可送至肥料出口处,肥料颗粒流更均匀, 脉动性显著降低。

如图 13b 所示,当叶片数量为 12 时,混肥器进口处迎合叶片旋转方向的内壁面上堆积了大量颗粒,停止排肥后,颗粒仍难快速进入混料腔,这是因

为叶片具有一定厚度,快速旋转对颗粒流进入混料 腔起到阻碍,尤其随着叶片数量增加,叶片与颗粒接 触几率增加,部分颗粒被反弹出去,随着后续颗粒的 补充,会出现堵塞现象,同时,因混肥器进口处颗粒 浓度不断增加,进料速率也会受到影响。

综上所述,设置叶片数量为8,混肥器进口中心 布置,叶片宽度70 mm、外壳宽度80 mm,进行抛送 式混肥器实物加工,采用希玛AR866A型热敏式风 速仪(香港恒高电子集团)测定出料口风速,计算混 肥器产生的空气流量约为709 m³/h,满足肥料输送 要求。

3.5 配混施肥混合均匀性检验

通过对各关键部件的仿真优化试验,确定最优 工作参数组合为:排肥口倾角45°、输送气速35 m/s、波 纹管长度568 mm、抛送式混肥器设置叶片数量为8, 混肥器进口采用中心布置。为进一步检验装置在最 优工作参数下的混肥效果,于2018 年5 月25 日在 吉林农业大学试验田进行田间试验。试验时划定长 度为180 m 的施肥区域,每60 m 树立一个标杆,施 肥装置在180 m 区域内进行3 次连续变量施肥。施 肥试验时,拖拉机稳定行驶速度为10 km/h,试验重 复3 次。待施肥装置作业完成后,收集9 个施肥区 域的肥料进行称量,并对每个施肥区域按设定比例 配混排施的氮磷钾3 种肥料手动分选称量,如图14



(b) 叶片数量12

图 13 不同叶片数量仿真结果



所示。

混合均匀度计算式为

$$M = \left(1 - \frac{\sigma}{m}\right) \times 100\% \tag{7}$$

其中

 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} (m_i - m)^2}$



(a) 变量配比施肥装置

出施肥装置
 (b)肥料收集
 图 14 肥料混合均匀性试验

g



表9 不同施肥比例下施肥量测定

Fab. 9	Determination	of fertilizer	application	rate at	different	fertilization	ratios

	区域1			区域2			区域3		
-	Ν	Р	K	N	Р	K	Ν	Р	K
目标施肥量	788	788	788	1 576	788	788	1 576	1 051	525
目标总施肥量		2 364			3 152			3 152	
第1次实际施肥量	762	764	756	1 536	774	769	1 542	1 023	501
第1次实际总施肥量		2 282			3 079			3 066	
第2次实际施肥量	776	765	747	1 583	795	806	1 561	1 064	506
第2次实际总施肥量		2 288			3 184			3 131	
第3次实际施肥量	750	769	773	1 592	803	767	1 500	1 008	497
第3次实际总施肥量		2 292			3 162			3 005	

m_i——实际施肥量,g

m----目标施肥量,g

经表9算得,第1阶段氮磷钾3种肥料混合均 匀度为95.7%、96.6%、95.1%,第2阶段混合均匀 度为98.0%、98.1%、97.0%,第3阶段混合均匀度 为96.2%、96.4、94.4%。综上,3个阶段3种肥料 混合均匀度均不小于94.4%。

4 田间性能试验

4.1 试验条件

于 2019 年 6 月在吉林省长春市宽城区天吉村 (43.90°N,125.33°E)进行田间试验,试验对象为苗 期玉米,采用小垄单行种植模式,垄距 700 mm。将 本装置通过平行四杆机构挂接在高地隙底盘(中国 农业机械化科学研究院研制与生产)上,液压驱动 该施肥装置的升降,机具前进作业速度为6km/h。

4.2 试验指标

所有试验前后各留出 10 m 的预备区,通过树立 标杆划定,试验前拆卸双圆盘开沟器,将肥料收集盒 固定在各行排肥管末端,对施肥装置排出的肥料进 行收集,田间作业时,高地隙作业底盘匀速行驶,到 达施肥区域开始作业,驶出施肥区域后自动停止排 肥,对各组肥料进行称量,往返两次共计4 组数据, 机具作业宽幅 3.5 m,单组试验施肥面积 350 m²,测 定行数为5 行。

依据国家施肥机械质量评价标准,以施肥量、各 行排肥量一致性为静态试验指标,以施肥均匀性、施 肥断条率为动态试验指标。

(1)施肥量。使精量配混施肥机处于水平状态,令步进电机以相当于常用作业速度的转速驱动排肥轴施肥,排肥量计算式为

$$R = \frac{10q}{\pi D n a M} \tag{8}$$

式中 *R*——排肥量,kg/hm² *n*——转数

q——驱动电机转 n 转所测定排肥口各次总 排量平均值,g

a---平均行距,m

M-----试验机具行数

D----排肥轴直径,m

(2) 施肥均匀性。调整使排肥管口距离地面高度 3~5 cm。沿机具前进方向按 10 cm 长度连续等分 30 段,分别收集掉落在各小段内的肥料并称量其质量,测量精度少于 0.1 g。

(3) 施肥断条率。长度在 10 cm 以上的无肥料 区段即为断条。测定试验区域内各行断条数和断条 长度, 施肥断条率计算式为

$$\delta_d = \frac{\sum_{i=1}^k L_i}{L} \times 100\% \tag{9}$$

式中 δ_d ——施肥断条率,%

L_i——第*i*个断条长度,cm

L----排肥总长度, cm

4.3 试验方案与试验结果

本次试验分为定量施肥试验和变量施肥试验, 设计较高施肥量和较低施肥量的两组定量施肥试 验,以及一组连续变量施肥试验,具体试验方案如 下:

(1)定量施肥:200 kg/hm²,氮磷钾配比2:1:1, 施肥区域长度100 m_o

(2)定量施肥:400 kg/hm²,氮磷钾配比 2:1:1,

施肥区域长度100 m。

(3) 变量施肥:150~450 kg/hm²,在长度90 m 的施肥区内,划分3个施肥区域,每个施肥区域长度 30 m,设置150、300、450 kg/hm²共3个施肥量等级, 依次对应3个施肥区域,氮磷钾配比依次为1:1:1、 2:1:1、3:2:1。



图 15 施肥装置田间试验

Fig. 15 Field experiment of fertilization device

1. 配肥装置 2. 抛送式混肥器 3. 配肥装置 4. 发电机 5. 机 架总成 6. 变量施肥控制系统

4.3.1 排肥相关指标变异系数

定量施肥量 200 kg/hm²条件下,4 次试验排肥 量计算总施肥量稳定性变异系数为 2%,各组试验 施 肥 量 误 差 依 次 为 1.49%、1.83%、1.98%、 1.57%。

定量施肥量 400 kg/hm²条件下,4 次试验排肥 量计算总施肥量稳定性变异系数为 1.63%,4 次试 验施肥量误差依次为 1.47%、1.05%、1.96%、 1.28%。随着施肥量增加,各行排肥量一致性变异 系数减小,高地隙作业车田间行走的过程中,随着地 面起伏波动,肥料分配器受到机具振动的影响,施肥 管中的颗粒流与肥料分配器的相对位置会产生微小 的偏差,影响肥料的均匀分配,当颗粒数量较多时, 分布在施肥管中颗粒流随机性更强,更易被均匀地 分配。

连续变量施肥 150~450 kg/hm² 总施肥量稳定 性变异系数为 1.70%,4 次试验施肥量误差依次为 1.50%、1.96%、1.80%、0.48%,满足国家标准 GB/ T 20346.1—2006《施肥机械试验方法》中规定的总 施肥量稳定性变异系数小于 7.5%,各行排肥量— 致性变异系数小于 13%的技术要求。

4.3.2 施肥断条率

定量施肥量 200 kg/hm²条件下,4 次试验施肥 断条率依次为 0.73%、0.79%、0.81%、0.74%;定

量施肥量 400 kg/hm²条件下,4 次试验施肥断条率 依次为 0.83%、0.79%、0.82%、0.86%;连续变量 施肥 150~450 kg/hm²条件下,4 次试验施肥断条率 依次为 1.02%、0.94%、1.23%、1.08%。定量施肥排出 的肥料分布多为均匀的条状,断条率低于变量施肥。

综上所述,不同排肥模式下的精量配混施肥装 置施肥断条率均小于2%,其性能满足国家标准。

5 结论

(1)为满足玉米中后期追肥需求,设计了一种

可根据作业情况即时调整排肥量的气力集排式玉米 精量配混施肥装置。主要由配肥装置、肥料分配器 及抛送式混肥器构成。

(2)通过仿真分析出施肥部件最优结构参数: 排肥口倾角为45°、输送气速为35 m/s、肥料分配器 上端需布置一段长度为568 mm的垂直波纹管;混 肥器进口采用中心布置,叶片数量为8。

(3)田间检测结果表明,施肥量误差小于 2%,总施肥量稳定性变异系数为 2%,施肥断条率低于 2%,满足国家标准。

参考文献

- [1] 陈子文,张春龙,李南,等.智能高效株间锄草机器人研究进展与分析[J].农业工程学报,2015,31(5):1-8.
 CHEN Ziwen,ZHANG Chunlong,LI Nan, et al. Study review and analysis of high performance intra-row weeding robot [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(5):1-8. (in Chinese)
- [2] 周福君,王文明,李小利,等.凸轮摇杆式摆动型玉米株间除草装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(1):77-85.
 ZHOU Fujun, WANG Wenning, LI Xiaoli, et al. Design and experiment of cam rocker swing intra-row weeding device for maize
 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):77-85.(in Chinese)
- [3] 李沐桐,温翔宇,周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 37-43.
 LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 37-43. (in Chinese)
- [4] 吕金庆,刘志峰,王鹏榕,等. 驱动式碎土除草多功能马铃薯中耕机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):1-8.
 LÜ Jinqing,LIU Zhifeng, WANG Pengrong, et al. Design and experiment of driving-type rushing-weeding multi-functional potato cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10):1-8. (in Chinese)
- [5] MISERQUE O, PIRARD E, SCHENKEL Y, et al. Spreading segregation of blended fertilizers: influence of the particles properties[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008,24(2): 137-144.
- [6] 胡红,李洪文,王庆杰,等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 26-35.
 HU Hong,LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26-35. (in Chinese)
- [7] 何亚凯,杨学军,翟长远,等. 集排风送式玉米分层追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 54-63.
 HE Yakai, YANG Xuejun, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of air-assisted layered fertilization machine of centralized distributing for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 54-63. (in Chinese)
- [8] 温翔宇.高地隙变量配混施肥装置仿真优化与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
 WEN Xiangyu. Simulation optimization and experimental research of high-clearance variable rate assorted fertilizer applicator
 [D]. Changchun; Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [9] 王立军,靳晓燕,陈宝昌,等. 精量配混施肥关键技术研究[J]. 农业装备技术,2019,45(4):14-17.
 WANG Lijun,JIN Xiaoyan, CHEN Baochang, et al. Study on key technology of precision mixing fertilization[J]. Agricultural Equipment&Technology,2019,45(4):14-17. (in Chinese)
- [10] KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1): 81-95.
- [11] BOURGES G, MEDINA M. Air-seeds flow analysis in a distributor head of an "air drill" seeder [J]. Acta Horticulturae, 2013, 1008: 259 - 264.
- [12] 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.
- [13] 杨伦,谢一华. 气力输送工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [14] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 171-180.
 LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaoou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer
 - feeder of rice fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018, 49(Supp.): 171 180. (in Chinese)
- [15] 王太柱. 气流输送机构的参数确定[J]. 中国农机化,2008(4):74-78.
 WANG Taizhu. The confirming of the argument on airflow transportation mechanism[J]. Chinese Argiculture Mechanization, 2008(4):74-78. (in Chinese)

architectural traits in peach trees [J]. Sensors, 2022, 22(12): 4619.

- [21] 曹伟,陈动,史玉峰,等. 激光雷达点云树木建模研究进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(2):203-220. CAO Wei,CHEN Dong,SHI Yufeng, et al. Progress and prospect of LiDAR point clouds to 3D tree models[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 203-220. (in Chinese)
- [22] 郭彩玲,刘刚. 基于三维点云的苹果树冠层点-叶模型重建方法[J]. 农业机械学报,2020,51(4):173-180.
 GUO Cailing, LIU Gang. Reconstruction method of apple tree canopy point-leaf model based on 3D point clouds [J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):173-180. (in Chinese)
- [23] 程智君,游雨云,詹华群,等.基于三维激光扫描仪的单颗树木几何重建技术研究[J].中国农机化学报,2019,40(6): 152-157.

CHENG Zhijun, YOU Yuyun, ZHAN Huaqun, et al. Research on geometric reconstruction of single tree based on threedimensional laser scanner[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(6):152-157. (in Chinese)

- [24] PFISTER A, WEST A M, BRONNER S, et al. Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis[J]. Journal of Medical Engineering & Technology, 2014, 38(5):1-7.
- [25] 常乐乐. SICP 配准的三维人脸建模研究[D]. 合肥: 合肥工业大学,2016. CHANG Lele. 3D face modeling based on registering of SICP[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [26] DU S, LINDENBERGH R, LEDOUX H, et al. AdTree: accurate, detailed, and automatic modelling of laser-scanned trees [J]. Remote Sensing, 2019, 11(18): 2074.
- [27] GUO J, XU S, YAN D M, et al. Realistic procedural plant modeling from multiple view images [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 26(2): 1372 - 1384.
- [28] NURUNNABI A, SADAHIRO Y, LINDENBERGH R, et al. Robust cylinder fitting in laser scanning point cloud data[J]. Measurement, 2019, 138: 632-651.

(上接第119页)

- [16] 左兴健,武广伟,付卫强,等.风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):14-21.
 ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(3):14-21. (in Chinese)
- [17] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等. 基于 EDEM Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3): 69-77.
 WEN Yianguy, UA Hanglai, ZHANG Shanguyai, et al. Test of guarantian valuation of granular fartilizer based on FDEM = Fluent

WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM – Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):69–77. (in Chinese)

- [18] IQBAL N, RAUH C. Coupling of discrete element model (DEM) with computational fluid mechanics (CFD) a validation study
 [J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 277: 154 163.
- [19] YANG S, LUO K, ZHANG K, et al. Numerical study of a lab-scale double slot-rectangular spouted bed with the parallel CFD DEM coupling approach[J]. Powder Technology, 2015, 272: 85 – 99.
- [20] QIAN F P, HUANG N J, LU J L, et al. Design and test analysis of elbow in one-step centralized pneumatic seeding system [J]. Computers and Chemical Engineering, 2014, 71: 478 – 488.
- [21] 周韦,王金峰,王金武,等. 基于 EDEM 的水田深施肥机构螺旋钢丝的数值模拟与分析[J]. 农机化研究, 2015, 37 (1): 27-30.

ZHOU Wei, WANG Jinfeng, WANG Jinwu, et al. Numerical simulation and analysis of a fertilizer can on fertilizer spreader based on EDEM[J]. Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 27 – 30. (in Chinese)

- [22] MARTINA C L, BOUVARDA D, SHIMAB S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003, 51(4): 667-693.
- [23] CLEARY P W. Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods [J]. Minerals Engineering, 1998, 11(11): 1061 - 1080.
- [24] 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.
 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. (in Chinese)
- [25] FRYE L, PEUKERT W. Identification of material specific attrition mechanisms for polymers in dilute phase pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2005, 44(2): 175 - 185.
- [26] KARAVEL D, BARUT Z B, OZMERZI A. Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.
- [27] AKHSHIK S, BEHZAD M, RAJABI M. CFD DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127: 224 229.