

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: jiahli@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

0 引言

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。

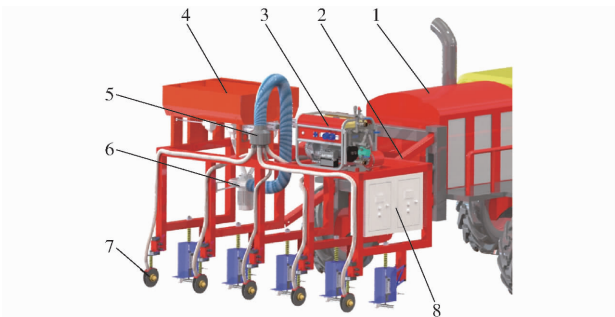


图 1 气力集排式精量配混施肥装置总体结构示意图

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

1. 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
工作幅宽/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。

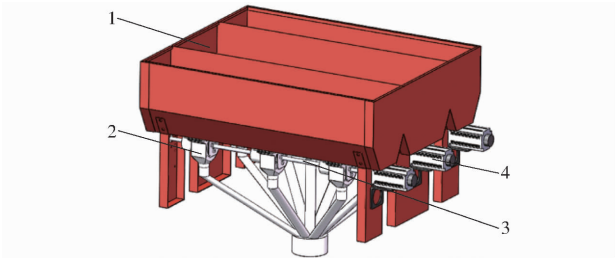


图 2 配肥装置结构示意图

Fig.2 Structure diagram of mixed fertilization device

1. 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

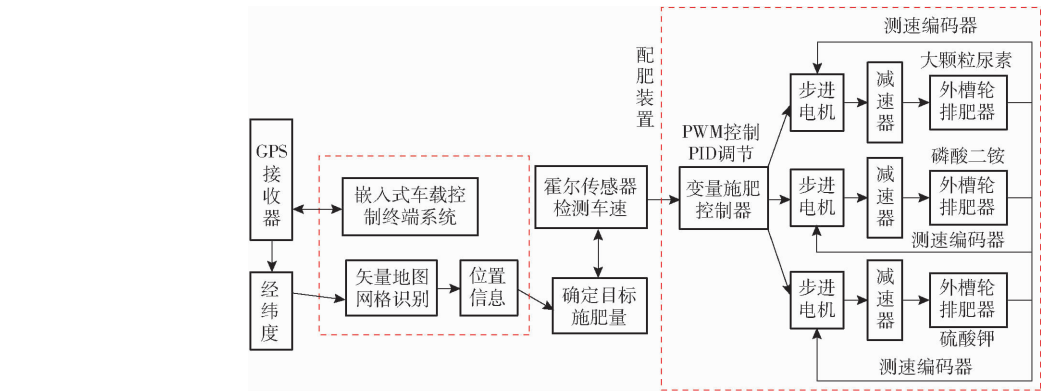


图 3 变量施肥控制系统原理图

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的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配性能有重要影响。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。

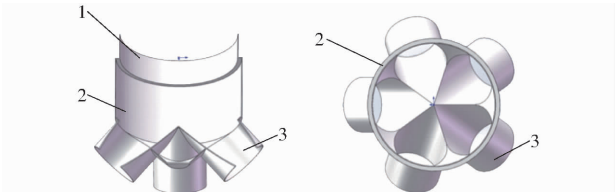


图 4 肥料分配器结构示意图

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,肥料颗粒与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。

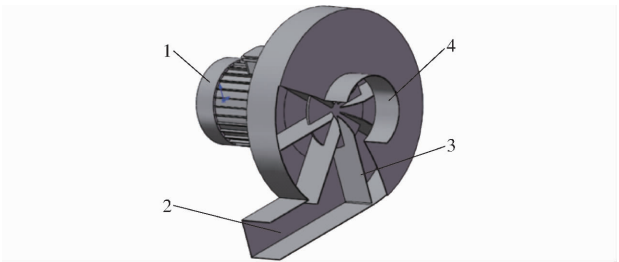


图 5 抛送式混肥器结构示意图

Fig. 5 Schematic of throwing mixer structure

1. 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

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

式中 D_2 ——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/m^3
 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 $1\,000\text{ Pa}$)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 $1.5\sim 2.5$ 倍^[16],通过试验台测定大颗粒尿素悬浮速度 $6.68\sim 12.48\text{ m/s}$,磷酸二铵悬浮速度 $7.22\sim 11.96\text{ m/s}$,硫酸钾悬浮速度 $9.46\sim 17.81\text{ m/s}$ ^[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 $687\text{ m}^3/\text{h}$ 空气流量,混肥器进口直径最小值计算式为

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

(3)

其中

$$\varphi=\frac{4Q}{\pi u_2 D_2}$$

(4)

$$u_2=\frac{\pi D_2 n}{60}$$

(5)

式中 D_1 ——混肥器进口直径, m
 φ ——流量系数
 Q ——空气流量, m^3/s
 u_2 ——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 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 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_2O_5 含量 46% 的磷酸二铵,钾肥选用 K_2O 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 Basic material parameters

材料	参数	数值
大颗粒尿素	泊松比	$0.4^{[18]}$
	剪切模量/ Pa	$3.48\times 10^{7[19-21]}$
	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$1\,337$
	粒径/ mm	$1.60\sim 5.00$
磷酸二铵	泊松比	0.25
	剪切模量/ Pa	$9.20\times 10^{6[22]}$
	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$1\,485$
	粒径/ mm	$1.60\sim 4.00$
硫酸钾	泊松比	0.4
	剪切模量/ Pa	1.33×10^7
	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$2\,419$
	粒径/ mm	$2.00\sim 5.60$
PVC	泊松比	0.47
	剪切模量/ Pa	3.57×10^6
	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$1\,282$

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/hm^2 ,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/hm^2 ,磷酸二铵和硫酸钾各 75 kg/hm^2 ,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

项目	参数	数值
尿素-尿素	碰撞恢复系数	0.28
	静摩擦因数	0.36
	滚动摩擦因数	0.15
尿素-二铵	碰撞恢复系数	0.20
	静摩擦因数	0.41
	滚动摩擦因数	0.15
尿素-硫酸钾	碰撞恢复系数	0.20
	静摩擦因数	0.30
	滚动摩擦因数	0.15
尿素-PVC	碰撞恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.41
	滚动摩擦因数	0.15
二铵-二铵	碰撞恢复系数	0.19
	静摩擦因数	0.26
	滚动摩擦因数	0.21
二铵-硫酸钾	碰撞恢复系数	0.20
	静摩擦因数	0.30
	滚动摩擦因数	0.15
二铵-PVC	碰撞恢复系数	0.32
	静摩擦因数	0.39
	滚动摩擦因数	0.15
硫酸钾-硫酸钾	碰撞恢复系数	0.18
	静摩擦因数	0.34
	滚动摩擦因数	0.17
硫酸钾-PVC	碰撞恢复系数	0.30
	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
颗粒群 1	基准半径/mm	1.6	1.5	2.2
	平均半径/mm	3.2	1.5	2.2
	标准差/mm	0.4	0.07	0.1
	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
颗粒群 2	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
	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

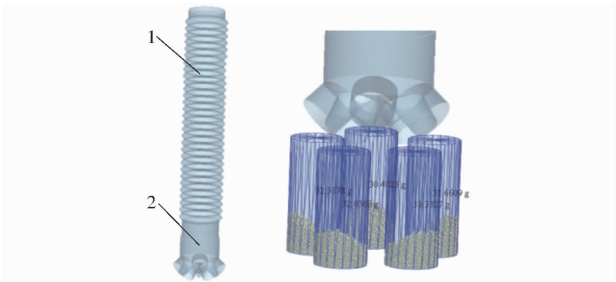


图 6 肥料分配器与质量传感器布置示意图

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 $k - \epsilon$ 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

参数	数值	
流体类型	空气(不可压缩流体模型)	
流体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.225	
流体粘度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.79×10^{-5}	
边界条件值	Velocity – inlet	
	Outflow	
湍流模型参数	标准 $k-\varepsilon$	
	$k-\varepsilon$ 输运方程常数 1	0.09
	$k-\varepsilon$ 输运方程常数 2	1.44
	$k-\varepsilon$ 输运方程常数 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 functions	
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 30 m/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

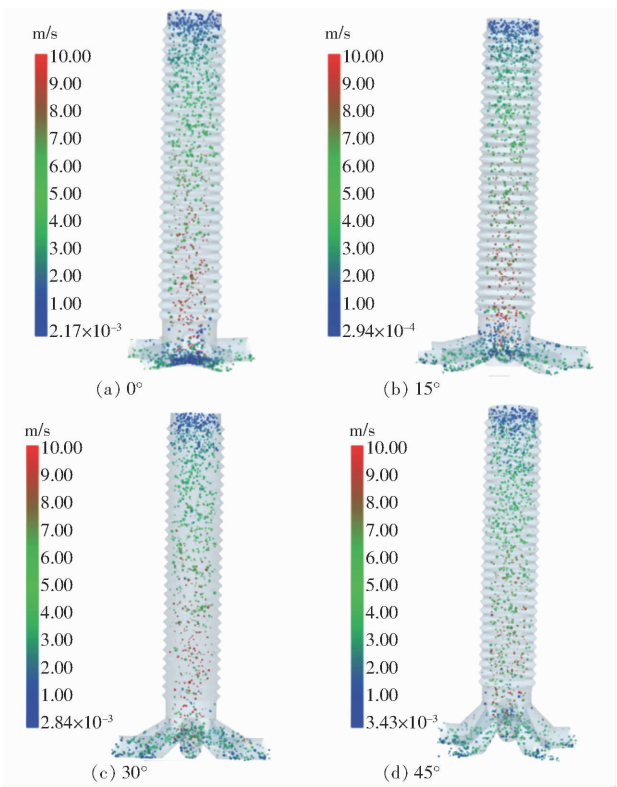


图7 不同排肥口倾角的肥料分配器中肥料颗粒分布图
Fig. 7 Distribution of fertilizer particles in fertilizer distributor with different angles of fertilizer outlet

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。

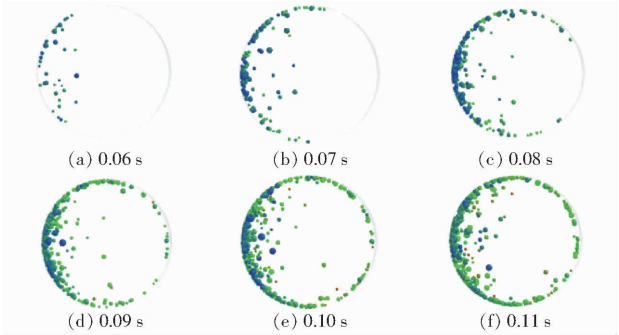


图8 施肥管垂直段颗粒扩散轨迹
Fig. 8 Particle diffusion trajectory in vertical section of fertilization pipe

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。

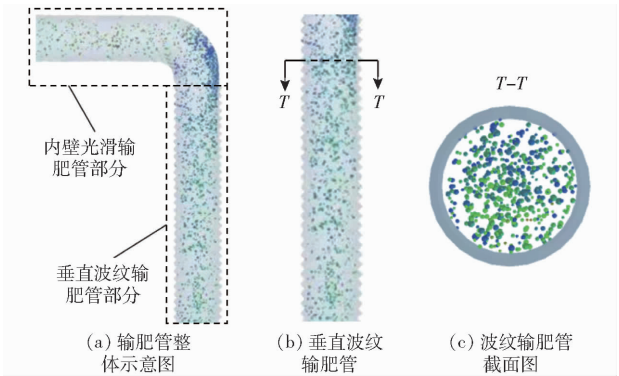


图9 波纹输肥管垂直段颗粒分布图
Fig. 9 Particle distribution in vertical section of bellows

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 ~ 1 000 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

编码	因素		
	排肥口倾角/ (°)	输送气速/ (m·s ⁻¹)	波纹管长度/ 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。

表 7 试验设计方案及结果

Tab. 7 Test design scheme and results

编号	因素			各行排肥量变异 系数 Y_1 / %
	x_1	x_2	x_3	
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 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	P
模型	39. 40	58. 89	<0. 000 1 ***
x_1	15. 95	214. 55	<0. 000 1 ***
x_2	0. 36	4. 87	0. 063 2 *
x_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. 002 7 ***
$x_2 x_3$	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 x_1 、 x_2^2 、 x_3^2 、 x_1^2 、 x_3 、 $x_1 x_3$ 、 x_2 、 $x_1 x_2$ 。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 $P = 0. 648\ 3$, 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: $X_1 \leq 45^\circ$; $34. 1\text{ m/s} \leq X_2 \leq 36\text{ m/s}$; $457\text{ mm} \leq X_3 \leq 648\text{ mm}$ 。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

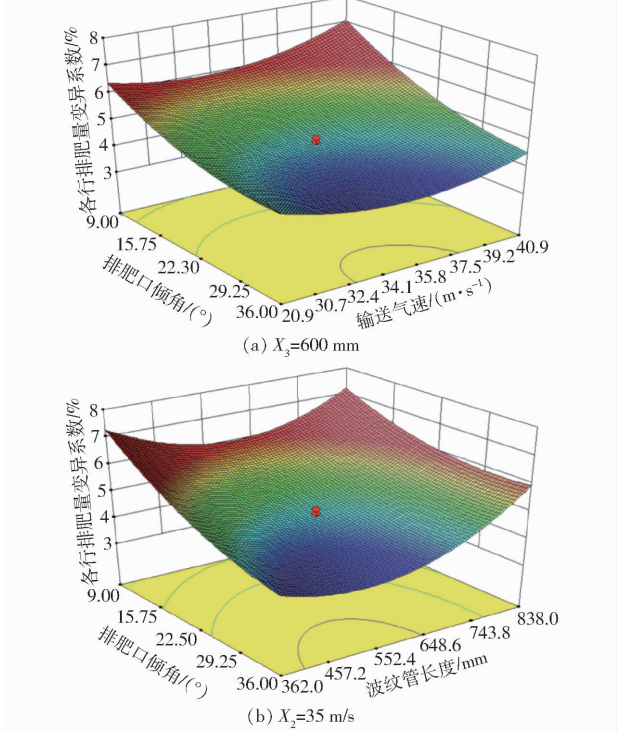


图 10 性能优化试验响应曲面分析

Fig. 10 Response surface analysis of performance optimization test

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。

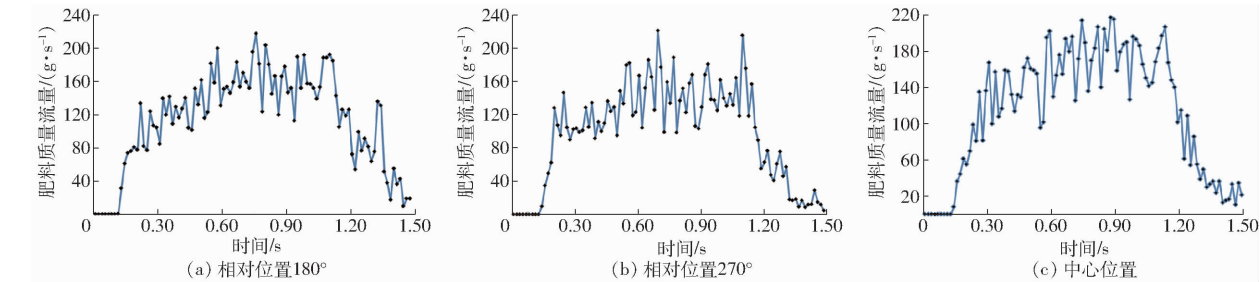


Fig. 11 Simulation results of different feed inlet positions

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。

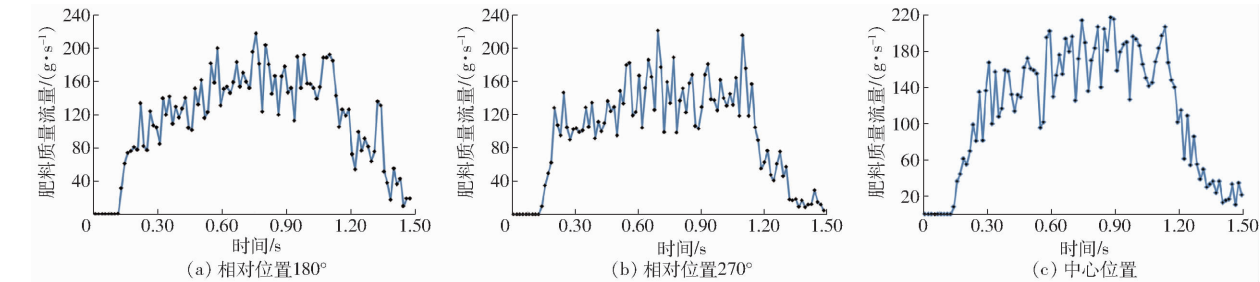


图 12 不同混肥器进口位置颗粒质量流量随时间变化曲线

Fig. 12 Relationship between particle mass flow rate and time at different feed inlet locations

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 0.6 s 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

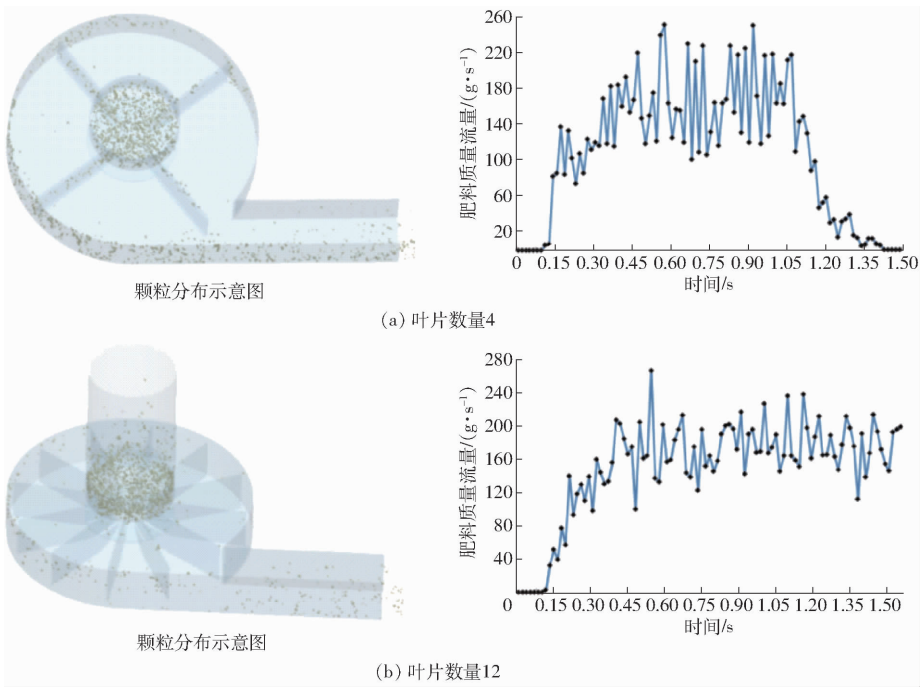


图 13 不同叶片数量仿真结果

Fig. 13 Simulation results at different blade number

所示。

混合均匀度计算式为

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

(7)

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

式中 M ——混合均匀度,%
 N ——试验次数 σ ——标准差,g

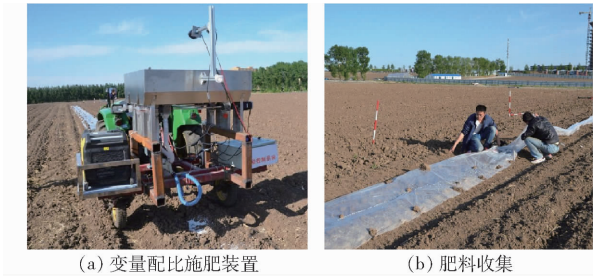


图 14 肥料混合均匀性试验

Fig. 14 Test of uniformity of fertilizer mixing

表 9 不同施肥比例下施肥量测定

	区域 1			区域 2			区域 3		
	N	P	K	N	P	K	N	P	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6 km/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 DnaM} \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 \delta_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。
- (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。

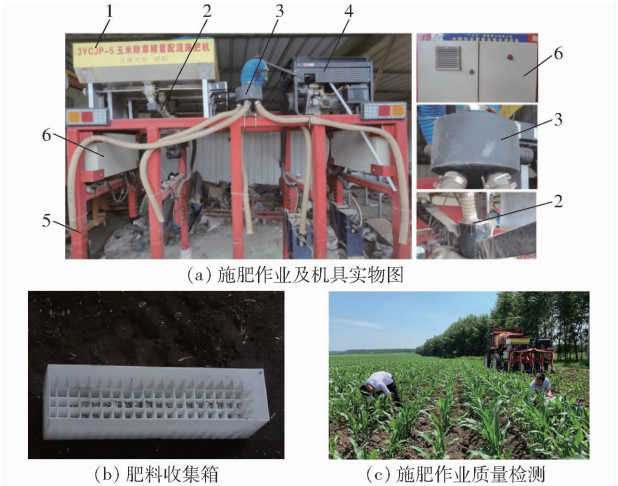


图15 施肥装置田间试验

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%,各行排肥量一致性变异系数小于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 Wenming,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 Xiaou, 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)