

玉米大垄双行气力集排式追肥装置设计与试验

徐征鑫^{1,2} 李贵蓉^{1,2} 王超^{1,2} 卢彩云^{1,2} 曾伟³ 王庆杰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083;

3. 黑龙江贝克斯现代农业科技有限公司, 哈尔滨 150060)

摘要: 针对玉米大垄双行种植模式下追肥作业效率低和排肥均匀性较差等问题,依据该种植模式下的追肥作业特点,设计一种适用于该种植模式的螺旋输送机排肥、多行集排、气流输肥的追肥装置,并对螺旋输送机排肥装置和气力输送装置关键参数进行了理论计算和优化设计。依据排肥流量需求设计螺旋输送机叶片结构,并确定螺旋输送机驱动电机功率;确定气-肥输送主管道和气-肥输送分配管道结构尺寸;采用三通管将气-肥输送分配管道合并方式,使双苗带中间施肥量多于两侧。对该装置进行排肥试验,结果表明:螺旋输送机式排肥装置排肥稳定,排肥量与转速具有较好的线性相关性;设计二因素三水平排肥试验探究风速和排肥转速对肥料分配均匀性的影响,排肥转速、风速以及排肥转速与风速的交互作用均对各行排肥量一致性变异系数影响显著,各行排肥量一致性变异系数随着转速和风速的增大而增大;气-肥输送分配管道合并后,各行排肥量一致性变异系数略有增加,未合并出肥口各行排肥量一致性变异系数为 6.5% ~ 7.1%,合并出肥口各行排肥量一致性变异系数为 3.8% ~ 5.8%,合并出肥口排肥量为未合并出肥口排肥量的 1.7 倍左右,排肥性能达到设计目标,满足玉米追肥机械作业标准要求。

关键词: 玉米; 大垄双行种植; 追肥装置; 气力集排式; 管道合并

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)04-0052-09

OSID:



Design and Experiment of Pneumatic Centralized Fertilizer Application Device for Maize Large Ridge Double Row Planting

XU Zhengxin^{1,2} LI Guirong^{1,2} WANG Chao^{1,2} LU Caiyun^{1,2} ZENG Wei³ WANG Qingjie^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. Heilongjiang BECRIS Modern Agricultural Technology Co., Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: Aiming to address the issues of moisture absorption, low efficiency in topdressing operations, and poor uniformity in fertilizer distribution in the fertilizer top-dressing process for the large ridge double row planting mode of maize, a spiral conveyor fertilization device, multi row collection and airflow fertilization device suitable for this planting mode was designed based on the characteristics of fertilization operation. Theoretical calculations were conducted for the parameters of the spiral conveyor fertilizer discharging device and pneumatic conveying structure. The blade structure of the spiral conveyor was designed and the power of the spiral conveyor drive motor was determined according to the required fertilizer discharge rate. The structural dimensions of the main pneumatic fertilizer conveying pipeline and the pneumatic fertilizer distribution pipelines were determined. By merging the pneumatic fertilizer distribution pipelines using tee pipes, the fertilizer application rate in the middle of the double seedling rows was increased compared to the sides. Fertilizer discharging tests were conducted on this device, and the results showed that the spiral conveyor fertilizer discharging device provided stable fertilizer discharge, with the discharge rate linearly related to the rotational speed. A two-factor, three-level experiment was designed to investigate the effects of wind speed and fertilizer discharge rotational speed on fertilizer distribution uniformity. The rotational speed of fertilizer discharge, wind speed, and their interaction all had extremely significant effects on the coefficient of variation for uniformity in fertilizer

收稿日期: 2024-12-20 修回日期: 2025-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1500400)

作者简介: 徐征鑫(1998—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: xuzhengxin@cau.edu.cn

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

discharge among rows. This coefficient was increased as both the rotational speed and wind speed increased. After merging the pneumatic fertilizer conveying pipes, the coefficient of variation for uniformity in fertilizer discharge among rows was slightly increased. The coefficient of variation for uniformity among rows without merged outlets ranged from 6.5% to 7.1% , while the coefficient with merged outlets ranged from 3.8% to 5.8% . The fertilizer discharge rate with merged outlets was approximately 1.7 times of that of the discharge rate without merged outlets. The fertilizer discharging performance met the design objectives and could effectively satisfy the mechanical operation standards for maize top-dressing.

Key words: maize; large ridge double row planting; fertilization device; pneumatic centralized conveying; tube combination

0 引言

玉米大垄双行种植模式是东北地区近年的种植模式,在固定的田间面积内,通过调整行距和株距,改变玉米植株分布密度,以达到增加产量、提高品质、减少病虫害等目的^[1-3]。在作物生长中依据作物生长需求进行追肥,能够促进作物生长发育和干物质积累,保证生长后期不脱肥早衰,是实现优质高产的必要保证^[4-7]。但在作物中耕时期,人工追肥劳动强度大、效率低,且目前我国中耕施肥装备与国外相比还有一定差距,功能单一,作业效率有待提高^[8-11]。

国外玉米中耕追肥技术及配套机具研究较为成熟,追肥方式主要分为固态肥料撒施、叶面肥喷施和液态肥深施^[12]。THAPER 等^[13]研究表明不同的颗粒粒径密度会导致肥料组分在撒布范围内的分布不均,从而影响肥料整体施用效果,颗粒形状对混合肥料的撒布影响相对较小。HALL^[14]通过对比离散元模拟仿真与试验结果,研究了颗粒相关参数对撒肥均匀性的影响。当前,我国玉米追肥机械研发尚处于初级阶段,主要采用重力直排式施肥技术。胡红等^[15-16]设计一种玉米定点扎穴追肥机,能够根据玉米植株位置实现定点扎穴施肥,可有效提高肥料利用率,该机器主要由玉米植株探测装置、外槽轮间隔排肥装置和滑轨连杆扎穴施肥装置组成,通过精确控制施肥位置和施肥量,实现肥料精准施用。林静等^[17]设计了 2ZZ-3 型深松培垄施肥联合作业机,可在作业过程中一次完成深松、追肥、培垄等一体化复式联合作业,通过正交试验,得到各因素对伤苗率和比阻影响的主次顺序为深松深度、培土器开角、前进速度。吴家安等^[18]设计了 3ZFD-440 型玉米大垄双行动力中耕追肥机,适用于玉米大垄双行中耕作业,一次作业可完成垄沟碎土除草、垄底深松、多苗带侧深施肥。然而,国内中耕追肥机具采用重力直排式施肥装置,肥箱通常位于施肥部件上方,空间位

置排布可塑性较差,不利于扩展机具作业幅宽,不适用于高速作业场景,使追肥机具作业效率较低。

气力集排式施肥技术能够有效增加肥料输送距离,相比于传统机械排肥“一器一行”的结构形式,简化了机器结构的复杂程度,而且排肥管道在空间位置排布具有很强的可塑性。何亚凯等^[19]设计一种集排风送式分层追肥机,探究了排肥转速对各行之间排肥量变异系数的影响。温翔宇等^[20-21]设计了一种高地隙底盘的配混施肥机,采用配混施肥搭配侧深施肥,提高了肥料利用率。

本文结合玉米大垄双行追肥以及大田施肥机具高速宽幅的作业需求,采用气力集排方式将肥料输送至施肥部件,以解决玉米大垄双行种植模式下追肥机具效率低、作业效果不佳的问题。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

如图 1 所示,气力集排式追肥装置安装于 12 行中耕施肥除草机上,使其在除草过程中完成追肥,减少机具下地次数,提高作业效率。气力集排式施肥装置包括螺旋输送器式排肥装置、风机液压驱动装置、风机、气力输送装置、两侧施肥铲和中间施肥铲。

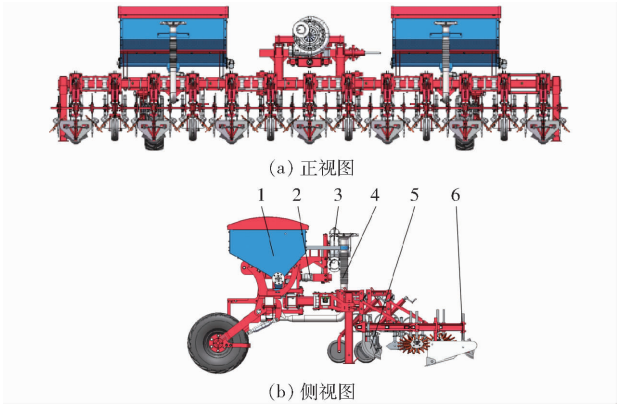


图 1 气力集排式追肥装置安装位置与结构图
Fig. 1 Installation position and structural diagram of pneumatic collection and discharge fertilizer application device
1.螺旋输送器式排肥装置 2.风机液压驱动装置 3.风机 4.气力输送装置 5.两侧施肥铲 6.中间施肥铲

1.2 工作原理

由拖拉机液压输出驱动的液压马达通过皮带传动增速持续驱动风机,风机向机具两侧的输送管道提供稳定的气流,螺旋输送机式排肥装置将肥料定量从肥箱中排出,气-肥混合器利用文丘里原理^[22]将输送气流与肥料颗粒高效混合,肥料分配器将混合形成的气-肥混合流均匀分配,肥料分配器出肥口流出的肥料由气-肥输送分配管道输送至施肥铲,施用在苗带附近。施肥铲安装在中耕施肥除草单体上,可依据实际需要自由调节施肥铲到苗带的距离和施肥深度。

依据玉米大垄双行种植要求(图2),目前东北大垄双行种植模式大多采用110 cm的垄距,每条垄上种植2行作物,行距为40 cm。在每条垄上布置3条施肥带,施肥带分别位于双苗带外侧各15 cm处以及双苗带中间位置,且双苗带中间位置施肥量多于双苗带外侧施肥量,控制施肥深度在5~8 cm之间。施肥行数增多有利于玉米植株根系向两侧扩展,使根系更加发达,有利于根系吸收养分,增加产量^[22]。在实际生产中,在出苗后几周(最早在玉米3叶期左右)即开始追肥,一次性将玉米生长所需的全部肥料施于土壤中^[20]。为避免养分流失,选用含氮量高的长效复合肥进行追肥。

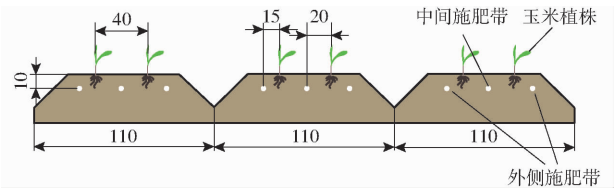


图2 大垄双行种植追肥示意图
Fig. 2 Diagram of fertilizer application for large ridge double row planting

2 关键部件设计

2.1 螺旋输送机式排肥装置设计

如图3所示,螺旋输送机式排肥装置主要由肥箱盖、肥箱壳体、肥箱安装架、螺旋输送机电机、斜齿外槽轮排肥器电机、斜齿外槽轮排肥器、肥箱盖气撑安装架、螺旋输送机、气力输送装置安装架、肥箱壳体加强架和挡肥斜板等组成。肥箱底部装有螺旋输送机,输送机叶片左右旋向相反,由电机驱动,可将肥箱两侧的肥料输送至肥箱中间的出肥口。采用螺旋排肥方式可以避免肥箱两侧肥料堆积^[23],有效扩展肥箱长度,增加肥箱容积,降低肥箱重心高度,使机具在作业过程中更加平稳。研究表明螺旋输送机在排肥作业的过程中存在排肥波动、排肥不均匀现象^[24],为此在肥箱底部安装斜齿外槽轮排肥器,以

改善肥箱排肥的均匀性。挡肥斜板可减小螺旋输送机与上方肥料的接触面积,减小排肥阻力。

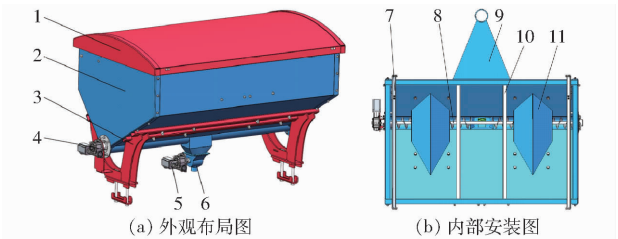


图3 螺旋输送机式排肥装置结构图
Fig. 3 Spiral auger fertilizer discharging device component diagram

1. 肥箱盖 2. 肥箱壳体 3. 肥箱安装架 4. 螺旋输送机电机
5. 斜齿外槽轮排肥器电机 6. 斜齿外槽轮排肥器 7. 肥箱盖气撑安装架 8. 螺旋输送机 9. 气力输送装置安装架 10. 肥箱壳体加强架 11. 挡肥斜板

2.1.1 肥箱容积设计

根据玉米施肥量和作业面积计算肥箱的容积,计算式为

$$V = \frac{QS_y}{1\,000\rho_1} \quad (1)$$

式中 V ——肥箱容积, m^3
 Q ——单位面积施肥量,取 $240 \sim 360 \text{ kg/hm}^2$
 S_y ——作业面积, hm^2
 ρ_1 ——肥料堆积密度,取 0.93 g/cm^3

设计装置一次加肥可完成作业面积 3.5 hm^2 ,设计单个肥箱长度为 1.5 m ,2个肥箱总体积约为 1.35 m^3 。

2.1.2 所需排肥流量计算

田间作业时,施肥速率为

$$q_1 = \frac{QBv}{10^4} \quad (2)$$

式中 q_1 ——农艺要求的施肥速率, kg/s
 v ——施肥作业速度, m/s
 B ——施肥幅宽, m

单个螺旋输送机式排肥装置为作业幅宽 6.6 m 的施肥单体供肥,施肥速度为 $3 \sim 12 \text{ km/h}$,则施肥速率 q_1 为 $0.13 \sim 0.79 \text{ kg/s}$ 。

2.1.3 螺旋输送机结构设计

螺旋输送机旋转1圈所需排肥量 Q_1 为

$$Q_1 = \frac{60\,000W_h}{N} \quad (3)$$

式中 N ——螺旋输送机最大转速,取 90 r/min
 W_h ——螺旋输送机排肥速率, kg/s
单个螺旋输送机排肥最大排肥速率取 0.395 kg/s ,得 Q_1 最大为 263.3 g/r 。

螺旋输送机结构如图4所示,左侧输送机为右

旋,右侧输送器为左旋,由左侧连接的电机驱动,螺旋输送器旋转将两侧肥料输送至中间。

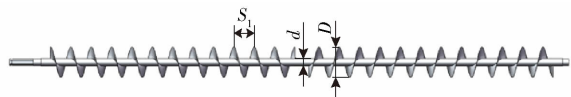


图 4 螺旋输送器结构图

Fig. 4 Structural diagram of spiral conveyor

单侧螺旋输送器理论单圈排肥量 Q_2 计算公式^[25]为

$$Q_2 = \left[\frac{\pi(D^2 - d^2)S_1}{4} - b \frac{(D - d)}{2} L \right] \varphi \rho_1 \times 10^{-3} \quad (4)$$

其中 $L = \sqrt{\pi[(D + d)/2]^2 + S_1^2}$ (5)

式中 D ——螺旋输送器公称直径,mm

d ——螺旋输送器叶片轴径,mm

S_1 ——螺旋输送器叶片螺距,mm

b ——叶片平均厚度,mm

L ——螺旋输送器叶片平均长度,mm

φ ——肥料填充系数

参考行业标准 JB/T 7679—2019《螺旋输送机》,对于易流动的几乎没有磨损性的物料(如面粉、谷类), φ 取 0.45。螺旋输送器公称直径和螺旋输送器叶片螺距决定螺旋输送器输送量,所设计的螺旋输送器式排肥装置排肥量比螺旋输送机输送量小,因此结合实践经验螺旋输送器公称直径取 90 mm,螺旋输送器叶片螺距取 60 mm,螺旋输送器叶片轴径取 22 mm,叶片平均厚度取 2 mm。将各参数代入式(4)、(5)计算得理论单圈排肥量为 146.9 g/r,双输送器理论单圈排肥量为 293.8 g/r,排肥量符合设计要求。

2.1.4 排肥器电机功率计算

GB/T 36865—2018《粮油机械 螺旋输送机》中关于螺旋输送所需驱动功率 P 为

$$P = P_H + P_N + P_{st} \quad (6)$$

其中 $P_H = \frac{I_m L_g \lambda_g}{367}$ (7)

$$P_N = \frac{DL_g}{20} \quad (8)$$

式中 P_H ——物料运行时所需的功率,kW

P_N ——螺旋输送机空载运转时驱动功率,kW

P_{st} ——倾斜功率,kW

I_m ——最大输送量,取 1.4 t/h

L_g ——输送器长度,取 1.5 m

λ_g ——运行阻力系数,对于流动性良好、轻度

磨琢性粉状和细粒状物料,取 1.9

由于输送器为水平输送肥料,所以 $P_{st} = 0$ kW,

计算得 $P_H = 12.3$ W、 $P_N = 6.8$ W、 $P = 19.1$ W。由于螺旋输送式肥箱的输送器布置方式与常规的螺旋输送机相比,螺旋输送器与肥料的接触面积较大,并且考虑输送器长度较大,由于制造精度所限和容易变形,容易与壁面产生摩擦,为保证电机能顺利驱动螺旋输送器,选用功率为 100 W 的无刷电机。

2.2 气力输送装置设计

如图 5 所示,气力输送装置主要由气-肥混合器、气-肥混合器安装架、分配器锥盖、分配器密封圈、分配器壳体、波纹管、气-肥输送主管道和气-肥输送分配管道等组成。气-肥混合器利用文丘里原理,通过减小空气和肥料混合处的管径,增大气流速度,压强减小,肥料能顺利落下,空气与肥料高效混合。同时进肥管与水平混合管应呈一定夹角,避免气流进入进肥管,干扰肥料下落,参照文献[26],进肥管与水平混合管夹角为 55° 。波纹管凹凸结构可以增加管内空气和肥料的扰动,使肥料与壁面碰撞几率增加,使肥料在管内分布更加均匀。马文鹏等^[27]分别对长直圆管、U 形波纹管和 V 形波纹管进行数值模拟,发现 V 形波纹管更有利于气固两相流均匀分配,因此选用 V 形波纹管。分配器类型选用锥顶型,锥盖锥角为 120° ,压力损失和气流速度变化较小^[28]。在分配器壳体与分配器锥盖之间增加分配器密封圈可以保证装置气密性。通过三通管将 2 个气-肥输送分配管道合并成 1 个,以增加苗带中间的施肥量,为减小气-肥输送分配管道合并对前端肥料分配的影响,气-肥输送分配管道合并位置应该远离分配器,且每组合并的管道连接分配头的位置应该尽可能对称布置,避免分配器内部气压分布不均匀。由于三通管 3 个出口的内径相等以及两侧施肥铲和中间施肥铲的排肥口截面积相等,导致管道合并后出口变小,阻力变大,会对气力输送系统内部的气压分布和肥料分配造成影响,需通过试验进行探究。

2.2.1 气流输送速度计算

为确保肥料颗粒能够被有效输送,需要计算肥料悬浮速度 v_0 和气力输送速度 v_a 。气力集排式排肥系统工作原理是依赖调速风机产生的气流输送肥料颗粒,气流与肥料颗粒共同形成两相流,在输送管道中首先进行水平输送,随后通过弯头转变为垂直向上输送,在分配器进行肥料分配。为了使肥料颗粒在气流作用下达到悬浮状态,需满足空气阻力与物料在空气中的浮重相等。根据颗粒在管道中的输送理论^[29],颗粒肥料悬浮速度 v_0 计算式为

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{K_s}} \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_f(\rho_2 - \rho_a)g}{C\rho_a}} \quad (9)$$

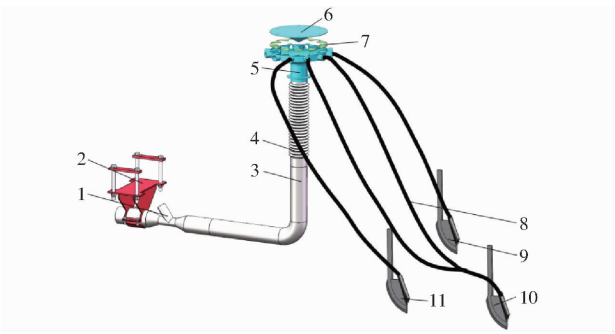


图 5 气力输送装置构成图

Fig. 5 Composition diagram of pneumatic conveying device

1. 气-肥混合器 2. 气-肥混合器安装架 3. 分配器锥盖 4. 分配器密封圈 5. 分配器壳体 6. 波纹管 7. 气-肥输送主管道 8. 气-肥输送分配管道 9. 右侧施肥铲 10. 中间施肥铲 11. 左侧施肥铲

式中 K_s ——不规则形状物料修正系数,对于不规则球体,取 1.2

d_f ——肥料颗粒等效粒径,取 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}$

ρ_2 ——肥料颗粒真密度,取 $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

ρ_a ——空气密度,取 1.293 kg/m^3

C ——绕流阻力系数,取 0.44

g ——重力加速度,取 9.81 m/s^2

由此计算得肥料颗粒自由悬浮速度 v_0 为 9.7 m/s ,根据气力输送气流速度经验系数,输送管道布置比较复杂时,风机提供的输送气流速度 v_a 应为颗粒悬浮风速 v_0 的 2.6 ~ 5.0 倍^[26],则 v_a 最小值应大于 $2.6v_0$,即 25.22 m/s ,取整为 26 m/s 。

2.2.2 气-肥输送主管道设计

排肥系统单位时间内输送空气体积 Q_a 与气-肥输送主管道直径 D_a 之间满足

$$Q_a = \pi \left(\frac{D_a}{2} \right)^2 v_a \quad (10)$$

颗粒肥料在输送管道中运输,单位时间所需空气体积 Q_a 为

$$Q_a = \frac{W_a}{\rho_a} = \frac{q_1}{2\mu\rho_a} \quad (11)$$

式中 W_a ——单位时间输送气流质量, kg/s

μ ——肥料质量与气流质量混合比,取 2.2 ^[30]

综上,可得气-肥输送管道直径 D_a 为

$$D_a = \sqrt{\frac{2q_1}{\pi\mu\rho_a v_a}} \quad (12)$$

计算得气-肥输送主管道直径 D_a 为 82.4 mm ,取 85 mm ,单位时间所需空气体积 Q_a 为 $0.139 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2.3 气-肥输送分配管道设计

为了保障分配后气体和肥料能够顺利排出分配

器,并减少在分配器内部产生气流压力损失,与分配器各出口连接的气-肥输送分配管道截面积总和需要大于其入口截面积,分配器入口截面积等于气-肥输送主管道截面积,因此气-肥输送分配管道内径 D_c 应满足

$$n\pi \left(\frac{D_c}{2} \right)^2 > \pi \left(\frac{D_a}{2} \right)^2 \quad (13)$$

式中 n ——分配器出口数量,取 9

计算得出气-肥输送分配管道内径 D_c 应大于 28.3 mm 。因此,气-肥输送分配管道内径选用市面常用管径 32 mm 。

3 排肥试验

3.1 试验材料

为验证螺旋输送器式排肥装置的排肥稳定性和气力集排式追肥装置的肥料输送稳定性以及肥料分配的均匀性,进行排肥试验。如图 6 所示,气力集排式追肥装置排肥试验于 2024 年 10 月在黑龙江贝锐斯现代农业科技有限公司试验场地进行。通过三点悬挂将机具挂接在拖拉机上,通过油管将拖拉机液压输出与液压马达连接,驱动液压马达带动风机工作。通过控制拖拉机油门开度来调节风机输出风量。



图 6 玉米大垄双行中耕除草施肥试验样机

Fig. 6 Maize large-ridge double-row midseason weeds weeding and fertilizing experimental prototype machine

3.2 试验方法与指标

根据标准 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》对装置排肥性能进行检测。选用呼伦贝尔东北阜丰生物科技有限公司生产的黑色含有机质复合肥作为试验肥料,颗粒平均直径为 3.07 mm ,球形度较好,堆积密度为 920 kg/m^3 。检测设备包括电子天平、风速仪、秒表等。试验过程中追肥样机在施肥口套袋测量排肥量。试验前,用风速仪测量排肥管出口风速,通过控制拖拉机油门调整风机风量符合试验要求。试验时启动排肥电机 60 s 后关闭,待管道中的肥料排出后,关闭风机,测量袋子中肥料质量。以各行排肥量一致性变异系数 C_V 为肥料分配均匀性评价指标。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 螺旋输送机式排肥装置排肥性能

螺旋输送机式排肥装置在不连接气力输送装置时,在不同转速下,测量 30 s 内螺旋输送机式排肥装置出肥口排肥量,排肥期间未开启螺旋输送机,排肥量测量每组重复 3 次取平均值,结果如图 7 所示,表明排肥稳定,且排肥量与转速呈线性关系。

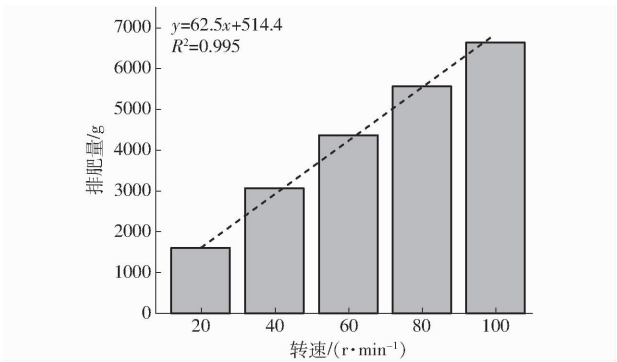


图 7 排肥转速与排肥量关系曲线

Fig.7 Relationship curve between fertilizer discharging rotational speed and fertilizer output

在肥箱中间位置底部可安装肥料容量检测传感器,检测肥箱中间位置肥料是否排尽,在肥箱中间肥料即将排尽时,启动螺旋输送机驱动电机,观察肥料运动状态,如图 8 所示,当螺旋输送机肥料输送流量略大于外槽轮排肥流量时,螺旋输送机输送的多余肥料会被两侧输送机挤到螺旋输送机上方,两侧肥料能通过螺旋输送机顺利输送到肥箱中部。

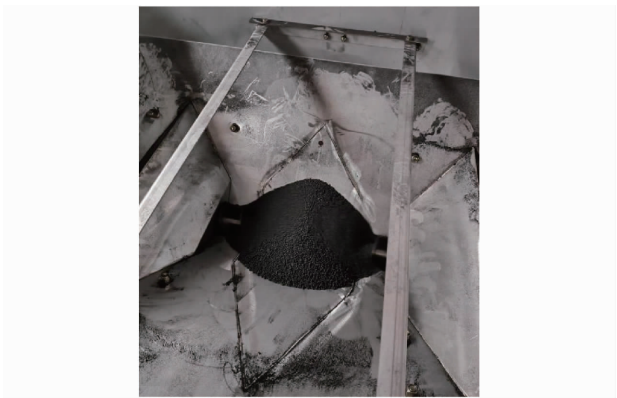


图 8 螺旋输送机排肥过程

Fig.8 Spiral conveyor fertilizer discharging process

3.3.2 风速和排肥转速对气力输送装置肥料分配均匀性的影响

探究风速和排肥转速对气力输送装置肥料分配均匀性的影响,不考虑气-肥输送分配管道合并,在 12 个出肥口套上袋子进行测试,测试前往肥箱倒入肥料 100 kg。选取斜齿外槽轮排肥转速为 60、80、100 r/min 和出肥口风速为 15、20、25 m/s 进行二因素三水平试验,每组试验重复 3 次,试验结果取平均

值,如表 1 所示。

表 1 气-肥输送分配管道未合并试验结果

Tab.1 Result of test for non-consolidated air-fertilizer conveying tube

排肥转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	风速/ $(m \cdot s^{-1})$	各行排肥量一致性 变异系数/%
60	15	4.01
	20	4.41
	25	7.93
80	15	4.55
	20	4.76
	25	6.43
100	15	6.57
	20	5.47
	25	7.95

由表 1 可得,当气-肥输送分配管道未合并(图 9),当出口风速为 15 ~ 25 m/s、排肥转速为 60 ~ 100 r/min 时,各行排肥量一致性变异系数为 4.01% ~ 7.95%。对试验结果进行双因素方差分析,如表 2 所示,由表 2 可得,排肥转速、风速以及转速与风速的交互作用均对各行排肥量一致性变异系数影响极显著。总体上看,各行排肥量一致性变异系数随着排肥转速和风速增大而增大。



图 9 气-肥输送管未合并

Fig.9 Non-combined air-fertilizer conveying tube

表 2 不同排肥转速和风速下各行排肥量一致性变异系数方差分析结果

Tab.2 Variance analysis for coefficient of variation in consistency among rows at different fertilizer discharging rotational speeds and wind speeds

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
排肥转速	10.555	2	5.277	16.152	<0.001 **
风速	36.808	2	18.404	56.328	<0.001 **
排肥转速 × 风速	6.655	4	1.664	5.092	0.006 **
误差	5.881	18	0.327		
总计	963.776	27			

注：**表示差异极显著($P < 0.01$)。

3.3.3 气-肥输送分配管道合并对肥料分配均匀性的影响

为了探究气-肥输送分配管道合并对肥料分配

均匀性的影响,利用三通管将其中 6 路气-肥输送管合并,如图 10 所示,用序号标记气-肥输送分配管道与分配器的连接位置,其中奇数表示未合并管道,偶数表示合并管道。如图 11 所示,在 9 个出肥口套袋收集进行测试。以风速为 15、20、25 m/s 和排肥转速为 80 r/min 进行试验,每组试验重复 3 次,试验结果取平均值,如表 3 所示。

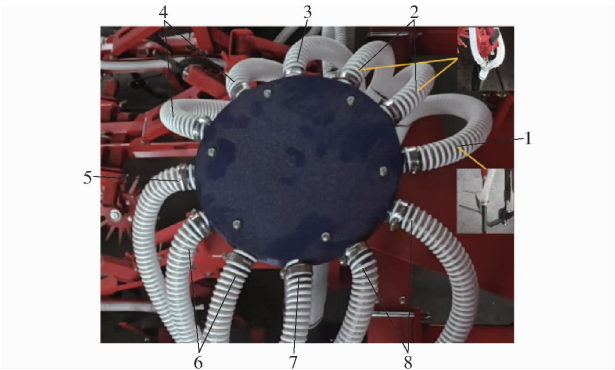


图 10 分配器连接管道分布
Fig. 10 Distributor connection pipeline layout



图 11 气-肥输送管合并
Fig. 11 Combined air-fertilizer conveying tube

表 3 气-肥输送分配管道合并试验结果
Tab. 3 Result of test for consolidated air-fertilizer conveying tube

风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	管道出肥口 类型	各行排肥量一致 性变异系数/%	两种方式出 肥量比值
15	未合并	7.1	1.77
	合并	5.8	
20	未合并	6.5	1.75
	合并	3.8	
25	未合并	6.5	1.75
	合并	5.5	

由表 3 可得,气-肥输送分配管道合并后对肥料分配均匀性产生了一定影响,各行排肥量一致性变异系数略有增加,未合并出肥口各行排肥量一致性变异系数为 6.5%~7.1%,合并出肥口各行排肥量一致性变异系数为 3.8%~5.8%;合并出肥口排肥

量是未合并出肥口排肥量的 1.7 倍左右,而测得合并出肥口风速分别为 22、26、31 m/s,是未合并出肥口风速的 1.24~1.45 倍,可见肥料流量变化与风速变化存在差异。

两个气-肥输送管道合并后管道横截面积等于原来单个气-肥输送管道,根据能量守恒定律,合并后管道中气流速度和排肥量均会增大。当两个管道通过三通接头合并时,由于两根管道内肥料的未均匀混合而产生局部的气流、压力等因素差异,加之肥料重力惯性的影响,管道合并出肥口变小导致管道气流阻力变大,导致对应分配器出口处的风速增大幅度略小;同样地,气流速度增大使肥料颗粒在输送管道内的运动速度加快,同时也可能加剧肥料颗粒与管道内壁碰撞,使肥料颗粒在管道内运动轨迹发生改变,导致排肥量在空间分布上的不均匀,部分肥料颗粒可能存在破碎或堵塞管道出肥口,使得实际管道出肥口横截面积减小,从而影响管道合并后实际排肥量与理论排肥量增加幅度存在差异,即合并后管道排肥量并非是未合并管道的 2 倍,而是未合并管道 1.7 倍左右。

4 结论

(1)依据玉米大垄双行种植模式下追肥作业特点,设计了一种气力集排式追肥装置,阐述该装置组成结构、安装位置与工作原理。

(2)对螺旋输送器式排肥装置和气力输送结构参数进行理论计算;依据排肥流量需求设计了螺旋输送器叶片结构和确定了螺旋输送器驱动电机功率;确定了气-肥输送主管道和气-肥输送分配管道结构尺寸。

(3)排肥试验结果表明,螺旋输送器式排肥装置排肥稳定,排肥量与转速呈线性关系;通过二因素三水平排肥试验探究风速和排肥转速对肥料分配均匀性的影响,排肥转速、风速以及转速与风速的交互作用均对各行排肥量一致性变异系数影响极显著,各行排肥量一致性变异系数随着转速和风速增大而增大;气-肥输送分配管道合并后,各行排肥量一致性变异系数略有增加,未合并出肥口各行排肥量一致性变异系数为 6.5%~7.1%,合并出肥口各行排肥量一致性变异系数为 3.8%~5.8%,合并出肥口排肥量是未合并出肥口排肥量 1.7 倍左右,满足中耕施肥作业要求。

参 考 文 献

[1] 牛世伟,安景文,刘慧屿,等.大垄双行疏密种植对玉米冠层结构及产量影响的研究[J].玉米科学,2014,22(5):98-103.
NIU Shiwei, AN Jingwen, LIU Huiyu, et al. Effect of big ridge double line spacing plantation on canopy structure and yield of

- maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(5): 98 – 103. (in Chinese)
- [2] 韩毅强,高亚梅,郑殿峰,等.寒区玉米大垄双行直播技术研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):128 – 132.
HAN Yiqiang, GAO Yamei, ZHENG Dianfeng, et al. Effects of wide ridge and double row planting of maize in cold regions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(4): 128 – 132. (in Chinese)
- [3] 张丹丹,宋建宇,李慧,等.不同种植模式及种植密度对玉米生长的影响[J].肥料与健康,2024,51(5):24 – 26.
ZHANG Dandan, SONG Jianyu, LI Hui, et al. The effect of different planting modes and planting densities on maize growth [J]. Fertilizer & Health, 2024, 51(5): 24 – 26. (in Chinese)
- [4] 陈浩源,张玉斌,朱建国,等.氮素追施对玉米花后光合特性和子粒灌浆特征的影响[J].玉米科学,2024,32(2):135 – 143.
CHEN Haoyuan, ZHANG Yubin, ZHU Jianguo, et al. Effects of topdressing with nitrogen on photosynthesis and grain – filling characteristics of spring maize after anthesis[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(2): 135 – 143. (in Chinese)
- [5] 孙笑梅,武庆慧,李宏杰,等.一次性施用减氮增磷钾配方肥对夏玉米产量和养分利用效率的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(2):54 – 60.
SUN Xiaomei, WU Qinghui, LI Hongjie, et al. Effects of one-off fertilization of formula fertilizer with reducing N while increasing P and K on maize yield and nutrient use efficiency[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(2): 54 – 60. (in Chinese)
- [6] 赵政鑫,王晓云,李府阳,等.秸秆还田配施稳定性氮肥对麦玉轮作水氮利用的影响[J].农业机械学报,2023,54(6):350 – 360.
ZHAO Zhengxin, WANG Xiaoyun, LI Fuyang, et al. Effects of straw returning and application of stable nitrogen fertilizer on water and nitrogen use efficiencies of wheat maize rotation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 350 – 360. (in Chinese)
- [7] 姜涛.氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(3):559 – 565.
JIANG Tao. Effects of nitrogen application regime on yield, quality and plant nutrient contents of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(3): 559 – 565. (in Chinese)
- [8] 张艳霞,高超男,张宏彦.夏玉米中期追肥技术应用情况调查及分析[J].现代农业科技,2012(9):314.
- [9] 沈卓群.玉米施肥装备研究发展概述[J].农业科技与装备,2022(5):75 – 76.
SHEN Zhuoqun. Overview of research and development of maize fertilization equipment[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2022(5): 75 – 76. (in Chinese)
- [10] 李坤,袁文胜,张文毅,等.玉米施肥技术与施肥机械的研究现状及趋势[J].农机化研究,2017,39(1):264 – 268.
LI Kun, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. Research status and development trend of corn fertilizing technology and fertilizing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 264 – 268. (in Chinese)
- [11] 何亚凯,赵学观,李翠玲,等.玉米追肥机械施肥技术研究现状与分析[J].农机化研究,2021,43(7):1 – 9.
HE Yakai, ZHAO Xueguan, LI Cuiling, et al. Research status and analysis on fertilization technology of corn topdressing machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(7): 1 – 9. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] THAPER K R, FULTON P J, MCDONALD P T, et al. Potential of fertilizer segregation during application using spinner disc spreader[J]. Precision Agriculture, 2021, 23(1): 1 – 18.
- [14] HALL J. Using discrete element modeling to evaluate material distribution using spinner-disc spreaders[D]. Auburn: Auburn University, 2012.
- [15] 胡红.玉米行间定点扎穴深施追肥机设计与研究[D].北京:中国农业大学,2017.
HU Hong. Design and research of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between maize rows[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 林静,王磊,李宝筏,等.2ZZ – 3型深松培垄施肥联合作业机的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(24):9 – 17.
LIN Jing, WANG Lei, LI Baofa, et al. Design and test of 2ZZ – 3 type deep scarification-terrace ridge-fertilization combine intertill machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 9 – 17. (in Chinese)
- [18] 吴家安,李向军,常传义,等.3ZFD – 440型玉米大垄双行动力中耕追肥机设计与试验[J].中国农机化学报,2023,44(1):69 – 76.
WU Jiaan, LI Xiangjun, CHANG Chuanyi, et al. Design and experiment of 3ZFD – 440 cultivator-fertilizer machine with double row power of large ridge for corn[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 69 – 76. (in Chinese)
- [19] 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)

[20] 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)

[21] 贾洪雷, 谭贺文, 温翔宇, 等. 气力集排式精量配混施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 109 – 119, 203.
JIA Honglei, TAN Hewen, WEN Xiangyu, et al. Design and experiment of pneumatic aggregate and discharge precision fertilizer mixing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 109 – 119, 203. (in Chinese)

[22] 赵萍, 张焕章, 田悦, 等. 玉米大垄双行深耕施肥播种机设计与试验[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(2): 235 – 240.
ZHAO Ping, ZHANG Huanzhang, TIAN Yue, et al. Design and experiment on maize deep-ploughed fertilization seeder suiting double row at width ridge[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(2): 235 – 240. (in Chinese)

[23] 顿国强, 吴星澎, 纪欣鑫, 等. 斜口螺旋精控排肥器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 167 – 174.
DUN Guoqiang, WU Xingpeng, JI Xinxin, et al. Optimization design and experiment of oblique spiral precise control fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 167 – 174. (in Chinese)

[24] 张猛强. 螺旋式排肥器流量波动特性研究及关键参数优化[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
ZHANG Mengqiang. Study on flow fluctuation characteristics of spiral fertilizer distributor and optimization of key parameters [D]. Alar: Tarim University, 2023. (in Chinese)

[25] 陈平录, 苏江红, 许静, 等. 丘陵果园立式螺旋开沟施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 223 – 233, 274.
CHEN Pinglu, SU Jianghong, XU Jing, et al. Design and experiment of hilly orchard vertical spiral ditching-fertilizing machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 223 – 233, 274. (in Chinese)

[26] 杨庆璐. 气力集排式玉米分层施肥关键技术与装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2022.
YANG Qinglu. Research on key technology and device of pneumatic centralized layered fertilization for maize[D]. Beijing: China Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[27] 马文鹏, 尤泳, 王德成, 等. 苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 70 – 78.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of pneumatic and pneumatic collecting and discharging system of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 70 – 78. (in Chinese)

[28] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 – 89. (in Chinese)

[29] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[30] 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 CSAE, 2020, 36(1): 1 – 10. (in Chinese)

(上接第 51 页)

[21] 李贤哲, 张明柱, 刘孟楠, 等. 基于多岛遗传算法的电动拖拉机分布式驱动系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 401 – 411.
LI Xianzhe, ZHANG Mingzhu, LIU Mengnan, et al. Optimized design and validation of distributed drive system for electric tractor based on multi-island genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 401 – 411. (in Chinese)

[22] GU Qinghua, GAO Song, LI Xuexian, et al. An adaptive adjacent maximum distance crossover operator for multi-objective algorithms[J]. Soft Computing, 2023, 27(11): 7419 – 7438.

[23] 王礼炳, 王琦, 王志红, 等. NSGA – II 算法的参数取值对供水管网多目标优化设计的影响[J]. 给水排水, 2018, 44(10): 136 – 140.
WANG Libing, WANG Qi, WANG Zhihong, et al. Influence of parameter values in NSGA – II algorithm on multi. objective optimization design of water supply network[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(10): 136 – 140. (in Chinese)

[24] 胡晓敏, 段宇晖, 欧炜标, 等. 交通流优化膨胀控制遗传规划算法[J]. 计算机应用研究, 2024, 42(1): 171 – 176.
HU Xiaomin, DUAN Yuhui, OU Weibiao, et al. Traffic flow optimization bloat control genetic programming algorithm[J]. Application Research of Computers, 2024, 42(1): 171 – 176. (in Chinese)

[25] 成大先. 机械设计手册第 1 卷[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[26] 谢里阳, 秦大同. 现代机械设计手册第一卷[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.