

基于 CFD - DEM 耦合的气力式导种装置中种子运动与受力研究

李鸿盛¹ 杨丽^{1,2} 张东兴^{1,2} 崔涛^{1,2} 和贤桃^{1,2} 李治民¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在高速作业条件下,为提高玉米气力式播种机的播种精度与均匀性,减少种子在导种过程碰撞与偏移,本文基于空气动力学原理,构建了种子颗粒在导种管内气流输送过程的 CFD - DEM 耦合仿真模型,分析在气流作用下种子的运动响应与受力特性。结合典型导种结构,探讨了气流速度、结构参数与缓冲区尺寸对种子出口水平速度的影响。在此基础上,采用 Box - Behnken 试验设计方法,建立响应面模型,筛选并优化影响导种性能的关键结构参数。仿真结果表明,合理设计导种结构可显著降低颗粒壁面碰撞次数与出口水平速度波动,有效实现“零速投种”。导种系统台架试验表明,仿真结果与实测结果具有良好一致性,最大误差小于 8%,表明所建 CFD - DEM 模型具有较高的预测精度。研究结果可为高速气力式播种机导种装置优化与投种控制提供理论基础与工程参考。

关键词: CFD - DEM; 气流输送; 空气动力学; 导种结构; 响应面试验

中图分类号: S817.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)06-0104-15

OSID:



Seed Motion and Force Characteristics in Pneumatic Seed Delivery Device Based on CFD - DEM Coupling

LI Hongsheng¹ YANG Li^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} CUI Tao^{1,2} HE Xiantao^{1,2} LI Zhimin¹

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

2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to enhance the seeding accuracy and uniformity of pneumatic maize planters under high-speed operating conditions, and reduce seed collision and deviation during the seed delivery process, a CFD - DEM coupled simulation model was developed based on aerodynamic principles to describe the airflow-induced motion of seed particles within the seed delivery tube. The motion response and force characteristics of seeds under airflow action were systematically analyzed. Considering a representative seed delivery structure, the effects of airflow velocity, structural parameters, and buffer zone dimensions on the horizontal velocity of seeds at the outlet were investigated. On this basis, the Box - Behnken design (BBD) method was employed to establish a response surface model for screening and optimizing key structural parameters influencing delivery performance. Simulation results indicated that a properly designed delivery structure can significantly reduce the frequency of particle-wall collisions and fluctuations in outlet horizontal velocity, effectively achieving “zero-velocity seed release”. Further bench tests of the seed delivery system showed good agreement between the simulation and experimental results, with a maximum error of less than 8%, demonstrating the high predictive accuracy of the proposed CFD - DEM model. The research findings can provide a solid theoretical foundation and valuable engineering reference for the structural optimization of seed delivery systems and the development of precise seed release control strategies in high-speed pneumatic planting devices.

Key words: CFD - DEM; airflow conveying; aerodynamics; seed-guiding structure; response surface methodology

收稿日期: 2025 - 09 - 14 修回日期: 2025 - 10 - 20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000404)和国家现代玉米产业技术体系项目(CARS - 02)

作者简介: 李鸿盛(2000—),男,博士生,主要从事农业机械装备及自动化研究,E-mail: lhs7099@163.com

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事精量播种技术及其智能装备研究,E-mail: yl_hb68@126.com

0 引言

玉米是我国第一大粮食作物,其年产量约占全国粮食总产量的40%,在保障国家粮食安全中具有基础性地位^[1-2]。实现玉米高产稳产,播种环节至关重要,其质量直接关系作物出苗整齐度、群体生长一致性以及最终产量水平。近年来,随着精准农业和智能农机技术快速发展,高速气力式播种机因具有播种速度快、适应性强、种子损伤率低等优势,正逐步替代传统机械式播种成为玉米播种的主流装备^[2-5]。在气力导种系统中,种子依赖高速气流实现非接触式导向与加速投送,其输送过程中的速度控制与轨迹稳定性是确保播种均匀性和投种精度的关键^[6-7]。

在高速作业条件(机具前进速度不小于12 km/h)下,种子颗粒在导种结构内受到湍流扰动、颗粒旋转、滑移及壁面多次碰撞的共同作用,其运动行为呈高度不稳定性^[8-9]。已有研究表明,当导种气流速度波动仅 ± 1 m/s时,种子在出口处投种位置偏移超过20 cm,严重影响田间行距一致性与苗期同步性^[10-11]。当前研究多聚焦于气力播种的宏观参数调控,如风速设定、排种通量等,对非球形种子(如玉米种子球形度约0.82)在流场中的微观响应过程与颗粒-流体间的双向耦合行为研究仍较为薄弱。此外,传统欧拉-欧拉两相流模型由于难以捕捉单颗粒运动细节,尚难满足“精准投种”对颗粒轨迹与末端速度高保真模拟的需求^[10,12-13]。

针对高速气力式播种中导种结构缺乏理论设计依据的问题,本文以玉米高速精量播种机为对象,综合考虑颗粒几何形状、密度分布及流场变化特性,分析其运动轨迹及受力演化机制^[14-19]。构建面向导种设计的CFD-DEM双向耦合模型,在拖曳相关计算中引入形状修正与等效直径,结合Hertz-Mindlin接触与滚动阻力,并考虑种子形貌、初始位姿与投种负荷对运动轨迹与受力演化的影响;采用Box-Behnken响应面设计对加速段长度、内径、弯曲比等关键参数开展优化,建立“可计算物理量-可操作结构参数”的系统关联,给出设计判据与参数区间。以期为气力式导种结构优化与“零速投种”控制提供理论依据。

1 气力式导种装置设计与工作原理

1.1 气力式导种装置总体结构

气力式导种装置作为高速精量播种投种环节,安装在高速精量播种单体上。图1为设计的气力式导种装置整体结构及其关键组件分布情况,主要由

电动风机、电驱式精量排种器和气力式导种管3部分构成,集成度高、结构紧凑,适用于多种行距与作业幅宽配置的玉米高速播种机^[20-21]。

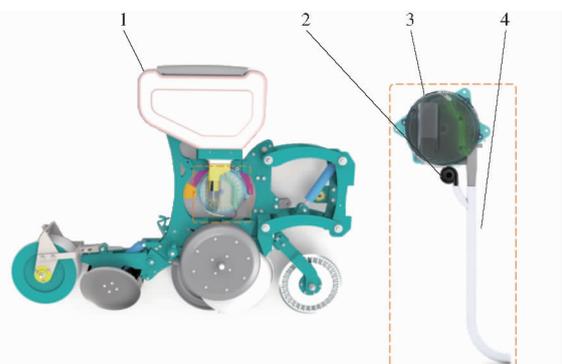


图1 气力式导种装置总体结构示意图

Fig.1 Schematic of pneumatic seed-guiding device

1. 播种单体 2. 电动风机 3. 电驱式精量排种器 4. 气力式导种管

排种器通过电机驱动,实现种子从种箱向下定量排放,在此过程,风机产生的高速气流通过导种管与排种器出口相连,将落下的种子颗粒包裹并引导其沿导种管快速输送至出种口。导种管采用圆形弯管结构,包含1段垂直段、1段平滑过渡弯曲段及末端缓冲减速段。该结构不仅可适应播种机不同安装角度和机械布局,还能有效控制种子颗粒在高速运动过程的加速行为与末端投送速度。

导种装置采用全气力式输送方式,在传输过程可实现非接触式加速投种,显著降低种子与管壁碰撞频率,有效减少破损率。同时,导管内部气流流线可控性强,通过结构参数调控可实现种子粒子运动速度的动态调节,为实现“零速投种”提供基础结构支撑^[22-24]。

1.2 气力式导种装置工作原理与参数

气力式导种装置以高速气流为动力载体,借助流体动压作用对种子颗粒实现非接触式加速。在实际工作过程,由电动风机生成的高速气流经管道输送至导种管内,与电动精量排种器释放的种子在导种管入口处交汇并产生裹挟作用。气流对种子实现包裹、牵引和拉引效果,使其随气流进入导种管。其核心在于通过控制导种管内的气流流态与压力分布,使种子能够在不与管壁频繁碰撞的前提下,顺利、稳定地输送至目标种床,实现“精准投种”。

种子颗粒在导种装置内由气流输送过程,其受力以气动拖曳力为主导,同时受到重力、浮力及与管壁碰撞引起的接触力等共同作用。如图2所示,颗粒运动方程表达式为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_g + F_d + F_b + F_l + F_i \quad (1)$$

式中 m_p ——颗粒质量, kg
 v_p ——颗粒速度, m/s
 F_g ——重力, N
 F_d ——拖曳力, N
 F_l ——升力, N
 F_b ——浮力, N
 F_i ——惯性力, N

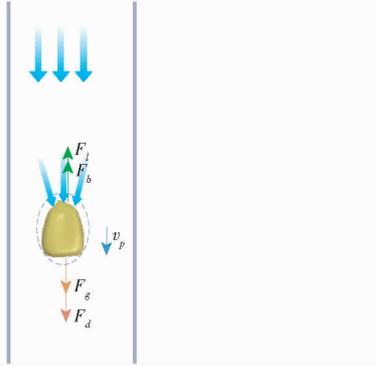


图2 种子在高速气流作用下受力示意图

Fig.2 Schematic of forces acting on a seed under high-speed airflow

在气流输送系统中,种子颗粒作为离散相在连续气相中运动,其动力学行为受多种力学因素耦合作用的显著影响,呈加速、跟随流线运动、碰撞及减速等非线性特征^[4]。为更清晰地理解其运动机制,如图3所示,将颗粒在导种管内的运动过程划分为4个阶段:启动加速(I)、稳定输送(II)、结构干扰(III)和末端投种(IV)。其中,转弯和变径区域的非稳态流场易导致种子偏移、翻转或滑移,是结构优化重点。

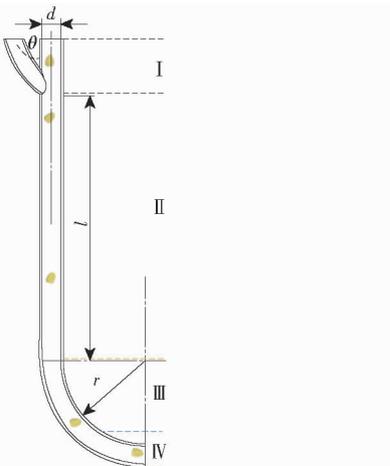


图3 基于导种管结构特征的种子颗粒运动阶段与机理

Fig.3 Motion stages and mechanism of seed particles based on structural features of seed guide tube

在启动加速阶段,在气流正压作用下颗粒迅速加速,主要由拖曳力驱动,且拖曳力与颗粒与气流相对速度平方成正比。此时颗粒惯性大,响应滞后,常用 Stokes 数(St)衡量其随流性。当 St 远大于 1 时,

颗粒滞后于气流变化,易产生偏移与壁面碰撞;进入稳定输送阶段后,颗粒速度趋于稳定,沿气流方向运动,若导管为直管段,颗粒多保持中心轨迹。但在结构干扰阶段,如弯管或变径处,气流速度和方向突变,颗粒因惯性产生离心偏移,易与壁面或其他颗粒发生碰撞,造成速度波动和能量损耗,从而影响最终出口状态;末端投种阶段是实现“零速投种”的关键。此时气流速度下降或出口扩张,颗粒需减速平稳着落。导种管结构设计旨在有效耗散种子残余动能,从而提升播种过程稳定性。

导种装置主要结构参数如表1所示。如图3所示,加速段长度 l 直接影响气流加速过程。在加速段中,气流速度逐渐增大,推动种子持续加速。增加加速段长度虽可延长加速时间、提升种子末速,但过长将导致气流能量损失。因此,加速段长度需在确保种子充分加速与控制气流能耗之间取得平衡。假设气流速度 v_i 随加速段长度呈线性变化,可表示为

$$v_i = v_0 + \alpha l \quad (2)$$

式中 v_0 ——入口气流速度, m/s

α ——加速常数, s^{-1}

表1 导种装置主要结构参数

Tab.1 Main structural parameters of seed-guiding device

参数	数值	说明
加速段长度 l /mm	150 ~ 350	含直管段与弯管段
管道内径 d /mm	25 ~ 35	影响气流流量与种子约束性
弯管半径 r	2 ~ 4 倍管道内径	对应气流偏转强度

随着 l 增加,气流速度逐步提升,从而提高种子颗粒加速效率。

假设导种管内气体为不可压缩定常湍流的一维主导流动,种子颗粒视为刚性等效球体,忽略颗粒间长期多体接触对平均动力学的二阶影响。在忽略压缩性和温度变化的情况下,导种管内气流流量 Q 是一个关键参数。根据连续性方程,气流平均速度 v_f 与横截面积 A 关系可表示为

$$Q = Av_f \quad (3)$$

气流推进颗粒模型与加速段长度 l 颗粒沿轴向动量方程表示为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + m_p g - F_f \quad (4)$$

其中 $F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_g A_p (v_g - v_p)^2 \quad (5)$

式中 F_D ——启动阻力, N

C_d ——拖曳系数

ρ_g ——种子密度, kg/m^3

F_f ——次要力, N

A_p ——气体作用面积, m^2

v_g ——气体速度, m/s

以“零速投种”为设计目标,要求种子出口水平速度 v_{px} 接近作业速度 u^* 。在给定允许偏差 Δu 的条件下,可通过不等式

$$|v_{px} - u^*| \leq \Delta u \quad (6)$$

确定对加速时长 t_i 的约束。若将 t_i 表示为 $t_i \approx l/\bar{u}_g$, 则可建立关系式

$$l \geq \bar{u}_g \tau_p \ln \frac{|v_{p0} - u_g + \tau_p g \cos \beta|}{|u^* - u_g + \tau_p g \cos \beta|} \quad (7)$$

式中 u_g ——平均气流速度, m/s

τ_p ——颗粒弛豫时间, s

β ——导种管倾角, ($^\circ$)

为实现目标出口水平速度加速段所需的最小长度 l , 揭示了 l 与颗粒弛豫时间 τ_p 及平均气流速度 \bar{u} 之间的量级关系。基于此, 推导出 Stokes 数表达式为

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} \approx \frac{\tau_p \bar{u}_g}{l} \quad (8)$$

式中 τ_f ——流体特征时间

当 $St < 1$ 时, 颗粒能够有效跟随气体运动, 实现充分加速。给定平均气流速度 \bar{u} 和颗粒物性参数下, 加速段长度 l 不宜过短, 否则 St 偏大, 将导致颗粒响应滞后, 与管壁发生碰撞的风险增高。此外, 在入口压差 Δp 和体积流量 Q 一定的条件下, 管径 d 对气流平均速度 \bar{u} 及颗粒所受推进力具有显著影响, 轴向平均速度 \bar{u} 与管径 d 之间的关系式为

$$\bar{u} = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (9)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_g u_g^2 \left(\frac{4fl}{d} + \sum K_i \right) \quad (10)$$

式中 f ——达西摩擦因子

$\sum K_i$ ——局部损失(弯头、入口等)系数总和

由此可得

$$u_g = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_g \left(\frac{4fl}{d} + \sum K_i \right)}} \quad (11)$$

由此可见, 在入口压差 Δp 一定时, 减小管径 d 将增大沿程阻力, 从而提高气流速度 u_g 上限; 然而, d 过小会加剧局部损失、流动剪切与湍动效应。相反, 增大 d 可降低沿程阻力, 但会导致 u_g 与气流对颗粒推进力下降。因此, 管径 d 需在提升流速与控制流动损失及不稳定性之间取得平衡。结合前文分析, d 通过影响 u_g 与 Stokes 数, 间接决定了所需加速段长度 l 。此外, 弯曲比 r/d 对流动稳定性与颗粒碰撞风险具有重要影响: 弯管会诱发横向二次流, 其强度可由 Dean 数表征, 表达式为

$$De = Re \sqrt{d/2r} \quad (12)$$

其中

$$Re = \frac{\rho_g u_g d}{\mu} \quad (13)$$

式中 De ——迪恩数 Re ——雷诺数

μ ——气体动力黏度, Pa·s

Dean 数越大, 二次流与速度梯度越强, 颗粒越易偏离主流线, 导致撞壁及能量耗散风险升高。局部损失系数可表示为 $K_{bend} \approx C_b (d/r)^m$, 并计入总压降计算。因此, 增大弯曲比 r/d 可同时降低 De 数与 K_{bend} , 有助于维持流动稳定、抑制颗粒碰撞与速度波动; 该结论与仿真及试验中“碰撞次数随 r/d 增大而减少, 出口水平速度稳定性提高”的结果一致。

入口夹角影响气流动量分解与颗粒入射条件。当气管与加速段轴线夹角为 θ 时, 入口气流速度 U_0 的轴向分量为 $U_0 \cos \theta$ 。为实现“入射即加速”, 需满足关系

$$U_0 \cos \theta \geq U_{ent} \quad (14)$$

式中 U_{ent} ——入口气流速度, m/s

入口夹角 θ 直接影响气流对种子的裹挟效果与能量效率。过大的 θ 易引发流动分离与回流, 增大局部阻力; 适当减小 θ 则有助于提升轴向动量利用率、降低入口损失。MILLER 等^[25] 推荐采用 $20^\circ \sim 45^\circ$ 的小角度斜接结构, 其阻力显著低于传统 90° 三通。综合考虑流动效率、装配空间与制造工艺, 将 θ 设为 30° , 在抑制回流的同时确保种子获得稳定的下行牵引力。

对于非球形颗粒, 需引入等效直径 d_e 与球形度 ψ_s , 对 C_d 进行修正, 结合 Haider - Levenspiel 型相关式并在非球形范围内引入形状修正, 表达式为

$$C_d = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 4.2 \times 10^4 Re_p^{-1.16} \psi_s^{-0.3}} \quad (15)$$

其中

$$Re_p = \rho_f |V_f - V_p| d_e / \mu_f$$

式中 μ_f ——流体动力黏度, Pa·s

V_f ——流体速度

V_p ——颗粒速度, mm³

拖曳力随相对速度、等效直径及形状因子变化而变化; 导种管内径 d 与局部几何参数通过改变流场速度与紊动强度, 间接影响相对速度与 C_d 。除拖曳力外, 压力梯度力在弯管与变径等强非均匀区域同样不可忽视, 其表达式为

$$F_p = -V_p \nabla P \quad (16)$$

式中 ∇P ——局部压力梯度

F_p ——压力梯度力, N

该力可通过 CFD 仿真获取精确的压力场分布并代入离散元计算。几何参数 γ 与 α 可改变 ∇P 大

小与方向,进而影响颗粒所受的压力梯度力。

颗粒与管壁的碰撞接触采用 Hertz - Mindlin(无滑移)模型描述。法向接触力 F_n 为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2} \quad (17)$$

式中 E^* ——等效弹性模量

R^* ——等效半径

δ_n ——法向重叠量

切向摩擦力 F_t 则取决于法向力与摩擦因数。导种管弯曲半径与内径通过影响颗粒运动轨迹和碰撞频率,间接影响接触力,如较大弯曲比可减少颗粒与外壁碰撞频率和碰撞角度,从而降低能量损失。

从颗粒响应看,以加速段长度 l 为特征尺度 L_c ,以 $U_c \approx 4Q/(\pi d^2)$ 表示的轴向特征速度估算 Stokes 数,即

$$St \approx \frac{\rho_p d_p^2 U_c}{18 \mu_f L_c} \quad (18)$$

2 仿真试验

种子颗粒在导种结构中的运动响应机制受气流结构、颗粒尺寸与物性以及空间边界条件共同影响。为深入揭示颗粒运动特性,通过量化分析玉米种子形状、尺寸及密度等关键参数对受力和运动轨迹的影响规律,构建了 CFD - DEM 耦合模型,对其气固耦合过程进行参数化建模与仿真^[26-27]。

2.1 仿真参数测定

种子粒径、形状及接触行为直接决定颗粒与流体的惯性耦合特性、受力响应及运动轨迹稳定性。种子尺寸会决定种子受力面积,气流作用力会随着受力面积产生变化。种子受力面积 A 与种子尺寸成正比,种子在气流中的拖曳力越大。通过对 1 000 粒郑丹 958 玉米种子进行测量,获取长、宽、厚三维尺寸,得到不同类型玉米种子尺寸,如表 2 所示。

表 2 4 种类型玉米种子几何尺寸

Tab. 2 Geometrical dimensions of four maize seed types mm

类型	参数	长度	宽度	厚度
马齿型	平均值	11.51	9.05	5.31
	标准差	0.65	0.51	0.56
半马齿型	平均值	10.86	7.87	5.17
	标准差	0.69	0.29	0.62
糯质型	平均值	10.27	8.83	6.94
	标准差	0.73	0.57	0.69
硬粒型	平均值	10.17	7.88	6.5
	标准差	0.90	0.35	0.44

如图 4 所示,对不同种类玉米种子进行填充颗粒操作,得到数学模型。玉米种子通常呈椭球形或不规则块状,可采用体积等效直径近似处理。等效体积计算式为

$$d_v = (6V/\pi)^{1/3} \quad (19)$$

式中 V ——种子实际体积, mm^3

d_v ——等效直径, mm

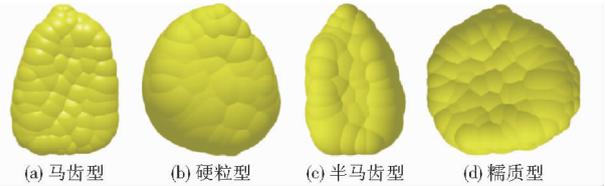


图 4 EDEM 中 4 类玉米种子颗粒的建模与填充

Fig. 4 Modeling and packing of four maize seed types in EDEM

对等效直径进行修正,其中种子球形度 $\psi = 0.82$,等效直径计算式为

$$d_e = d_v \psi^{1/3} \quad (20)$$

玉米种子三轴尺寸为 10、8、4.5 mm,则体积为 0.25 cm^3 ,则对应体积等效直径为 $d_v \approx 7.8 \text{ mm}$,形状修正后等效直径为 $d_e \approx 7.3 \text{ mm}$ 。玉米种子呈典型非球形特征(球形度 $\psi = 0.82$),其几何异质性显著改变流场绕流结构。不规则形状种子在气流中会产生较大的拖曳力系数,其受到的拖曳力 F_d 为

$$F_d = C_d \rho v^2 A \quad (21)$$

其中 C_d 取决于种子形状。较规则种子拖曳力系数较小,运动阻力较小,运动轨迹更为平稳;而不规则形状种子由于表面不对称,会导致流动分离形成较大拖曳力。非球形颗粒的投影面积各向异性导致拖曳系数 C_d 产生方位依赖性,可基于等效直径 $d_e = d_v \psi^{1/3}$ 构建修正曳力模型。

流场入口边界采用压力入口(Pressure inlet)模式,根据播种机作业参数设为 5 kPa,气流分布满足均匀流假设。流场出口边界采用压力出口(Pressure outlet),参考大气压为 101 kPa,回流湍流参数与入口一致。导种管壁面采用无滑移边界(No-slip wall),壁面粗糙度 R_z 为 $12.5 \mu\text{m}$;颗粒-壁面交互通过 Hertz - Mindlin(无滑移)接触模型定义法向刚度 k_n 为 $1.2 \times 10^5 \text{ N/m}$ 与切向阻尼系数 γ_t 为 $0.3 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。初始状态位置分布:颗粒群初始集中于导种管入口段(轴向位置 x 为 $0 \sim 0.1 \text{ m}$),体积分数 α_v 为 3%。采用随机填充算法生成颗粒位置,确保无初始重叠。颗粒初始速度 v_0 为 0 m/s ,由气流曳力驱动加速。为模拟实际投种过程,设置颗粒释放时间间隔为 0.01 s ,模拟播种频率 10 粒/s。玉米种子与导种管接触参数如表 3 所示。

表 3 导种管与种子接触模型参数

Tab. 3 Contact-model parameters between guide

tube and seed		
材料	参数	数值
玉米种子	泊松比	0.4
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 197
	剪切模量/Pa	1.37×10^8
导种管	泊松比	0.5
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 180
	剪切模量/Pa	1.77×10^8
种子对种子	碰撞系数	0.182
	静摩擦因数	0.431
	滚动摩擦因数	0.078
种子对管壁	碰撞系数	0.621
	静摩擦因数	0.459
	滚动摩擦因数	0.093

阻力系数采用非球形颗粒相关式 (Haider - Levenspiel 型) 计算, 计算式为

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.180 6 Re^{0.6459}) + \frac{0.425 1}{1 + \frac{6 880}{Re}} \chi(\Phi) \quad (22)$$

玉米颗粒注入时以欧拉角 (α, β, γ) 参数化初始位姿; 位姿不可控时按均分布 $\alpha, \gamma \sim U(0, 2\pi), \beta \sim U(0, \pi)$ 赋值; 若高速摄影统计到位姿, 则按实测分布采样。位姿对初期受力与自旋的影响由气动矩 M 与滚动摩擦模型体现。投种负荷以作业工况约束: 设目标行距 s (m) 与作业速度 U (m/s), 则投种频率计算式为

$$f = \frac{U}{s} \quad (23)$$

则得到对应固体质量流量 $m_s = m_p f$ 。

2.2 几何模型和数值解法

基于 EDEM 与 FLUENT 构建导种结构的三维几何模型, 采用 CFD-DEM 耦合方法开展种子颗粒在导种结构内的输送过程仿真。

如图 5 所示, 构建 CFD 和 DEM 几何模型。利用 Solidworks 软件对导种装置进行三维建模, 保存为 .stl 格式导入 EDEM 中。流体域模型采用 Solidworks 软件进行几何建模, 保存为 .STEP 格式导入 Workbench 进行网格划分, 划分后网格保存为 .mesh 文件。气相介质为空气, 密度为 1.225 kg/m^3 , 粘度 μ 为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 壁面设置为无滑移条件, CFD 网格为多面体, 总体约 5.7×10^4 单元。流场入口采取 Pressure inlet 边界条件, 设置进种口压力为 5 kPa, 种子无初始速度, 在重力作用下掉落, 种子流量为 5 g/s, 进种口为 inlet, 出种口为 outlet, 均设置为自由流出口, 将划分好的网格文件导入 FLUENT

中进行初始化条件设置, 选取 RNG $k-e$ 湍流模型, 计算时间步长设置为 0.001 s, 步数为 1 000, 每个时间步迭代 20 次, 总仿真时间为 1 s。采用双向 (two-way) CFD-DEM 耦合。CFD 时间步 Δt_{CFD} 为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}$, DEM 时间步 Δt_{DEM} 为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$, 子步比为 $\Delta t_{\text{DEM}} : \Delta t_{\text{CFD}} = 1:100$ 。设置固相体积分数稳定阈值 α_s 小于 0.20。粒-网格映射/插值采用体素加权 (Cloud-in-cell, CIC) 方案。

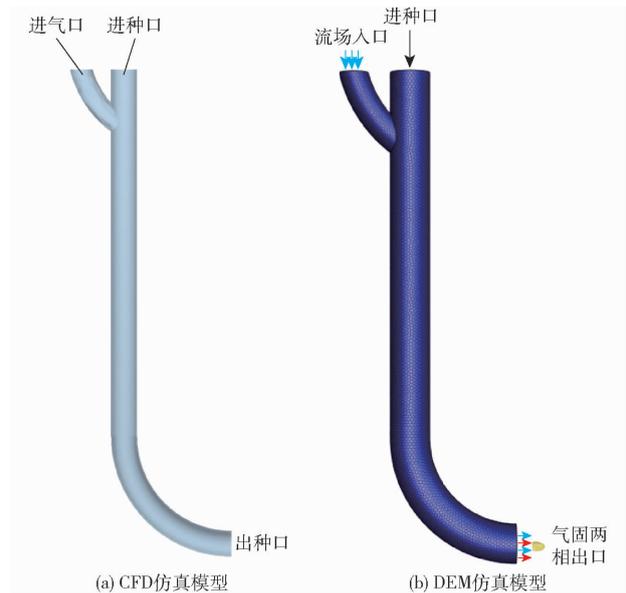


图 5 CFD 和 DEM 仿真模型

Fig. 5 CFD and DEM simulation models

气相求解 (Fluent) 中控制方程选择求解不可压缩 RANS 方程 (RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型), 动量方程源项包含颗粒反作用力 S_p ; 离散方法采用有限体积法 (FVM), 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项为中心差分; 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法, 压力修正方程松弛因子 0.3; 收敛准则采用连续性方程残差小于 10^{-4} , 动量方程残差小于 10^{-5} , 能量方程残差小于 10^{-6} 。

2.3 Box-Behnken 正交组合试验

2.3.1 试验设计

采用 Box-Behnken Design (BBD) 响应面设计方法, 建立多因素响应面模型。试验因素编码如表 4 所示。响应指标为 CFD-DEM 仿真得到的种子颗粒在导管末端的出口水平速度。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Test factors and code

编码	因素		
	导管长度/ mm	弯管半径与 内径比/倍	导管内径/ mm
-1	150	2	25
0	250	3	30
1	350	4	35

2.3.2 回归方程建立及显著性检验

表5为基于BBD试验种子水平速度与结构参数的试验设计及结果, A 、 B 、 C 为因素编码值。表6为BBD试验方差分析结果,并建立了二阶多项式回归模型。模型 F 为 12.11, $P = 0.0017$, 表明模型具有极显著性 ($P < 0.01$)。模型主要影响因素 A 、 B 和 C 均表现出极显著影响 ($P < 0.01$), 其中半径倍数 B ($F = 49.52$, $P = 0.0002$) 对出口水平速度影响最显著, 导管内径 C 次之, 加速段长度 A 亦具有一定影响作用。三者之间的交互作用项 (AB 、 AC 、 BC) 均未达到显著性水平 ($P > 0.05$)。回归方程为

$$v = 4.03 + 0.2163A + 0.4069B - 0.3314C - 0.0990AB - 0.0699AC - 0.0680BC - 0.1088A^2 + 0.0009B^2 + 0.2291C^2 \quad (24)$$

表5 基于BBD试验种子水平速度与结构参数试验设计及结果

Tab.5 Experimental design and results of seed horizontal velocity versus structural parameters based on Box - Behnken design

试验组	因素			种子水平速度/($m \cdot s^{-1}$)
	A	B	C	
1	-1	1	0	4.18598
2	-1	-1	0	3.15147
3	1	0	-1	4.65003
4	1	0	1	4.00886
5	0	0	0	3.73421
6	0	1	1	4.17732
7	1	-1	0	3.85997
8	1	1	0	4.49865
9	0	-1	1	3.52242
10	0	1	-1	5.13754
11	0	0	0	4.14135
12	-1	0	1	3.79419
13	0	0	0	4.03634
14	0	-1	-1	4.21064
15	0	0	0	4.17032
16	0	0	0	4.07750
17	-1	0	-1	4.15584

在优化过程中,以种子输送速度为目标,使用数值优化方法调整导种管长度、半径和管径等参数。优化结果显示,最佳组合为加速段长度 350 mm、半径 4 倍、导管内径 25 mm,此时速度达到 5.082 m/s,理想度为 0.972,表明该方案有效提升了速度并满足优化要求。

模型拟合优度结果表明,模型决定系数 R^2 为 0.8556,调整决定系数 R_{Adj}^2 为 0.7689,表明模型可解释 85.56% 的总变异,具有良好的拟合性能。预

表6 出种速度回归模型方差分析结果

Tab.6 Analysis of variance for regression model of seed exit speed

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.92	9	0.3239	12.11	0.0017**
A	0.3741	1	0.3741	13.99	0.0073**
B	1.32	1	1.32	49.52	0.0002**
C	0.8787	1	0.8787	32.86	0.0007**
AB	0.0392	1	0.0392	1.46	0.2655
AC	0.0195	1	0.0195	0.7304	0.4210
BC	0.0185	1	0.0185	0.6916	0.4331
A^2	0.0499	1	0.0499	1.87	0.2143
B^2	3.49×10^{-6}	1	3.49×10^{-6}	0.0001	0.9912
C^2	0.221	1	0.221	8.27	0.0238*
残差	0.4480	10	0.0448		
失拟	0.3262	6	0.0544	1.78	0.2993
误差	0.1219	4	0.0305		
总和	3.1000	16			

注: * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$), ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

测决定系数 R_{Pre}^2 为 0.4365,虽略低于 R_{Adj}^2 ,但仍表明模型在当前设计空间内具备一定预测能力。信噪比为 11.2525,远大于 4,说明模型信噪比较高,预测能力可靠。

为进一步验证模型拟合质量,进行了残差分析。图6为标准正态残差正态概率百分比图,大部分残差点均沿直线分布,未见明显偏离,表明残差服从正态分布,满足模型假设。图7为残差与预测值分布图,残差无明显趋势性变化,随机分布于 0 上下,表明模型未存在系统性偏差,整体拟合效果较好,拟合结果可信。

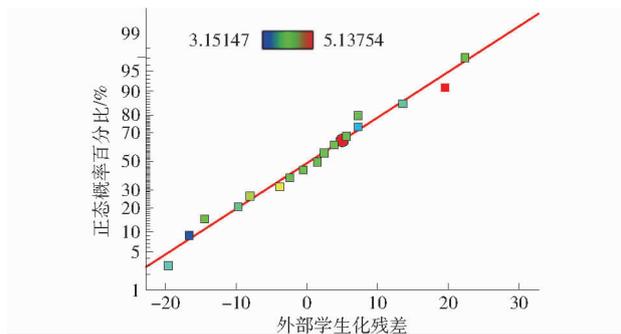


图6 出口水平速度回归模型的拟合优度统计结果

Fig.6 Goodness-of-fit statistics for regression model of seed discharge velocity

2.3.3 响应曲面

图8为3个单因素主效应图。由图8可知,随着加速段长度从 150 mm 增至 350 mm,种子速度呈缓慢上升趋势,较长的加速段通过延长气动力作用时间提升了出口速度,但其影响相对较小,属于次要因素;弯曲比增大显著提高了种子速度,较平缓的弯

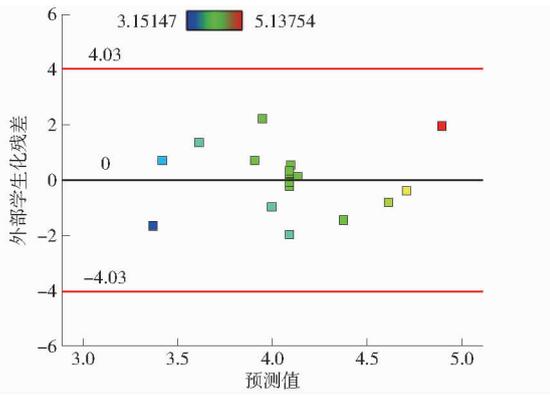


图7 标准残差与预测值的散点图

Fig.7 Scatter plot of standardized residuals versus predicted values

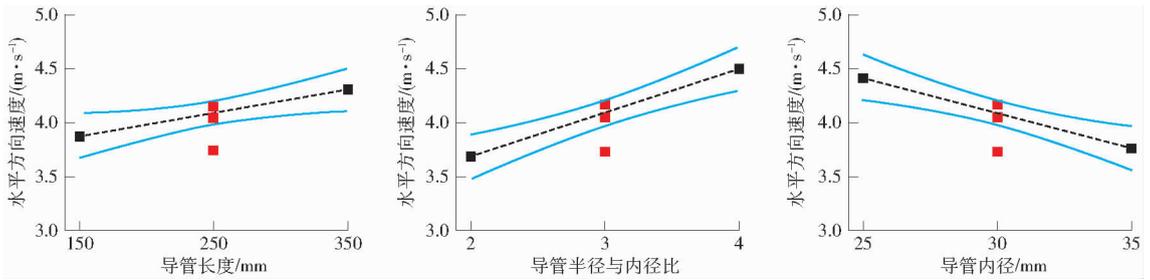


图8 试验因素对出口水平速度影响

Fig.8 Effect of experimental factors on horizontal exit velocity

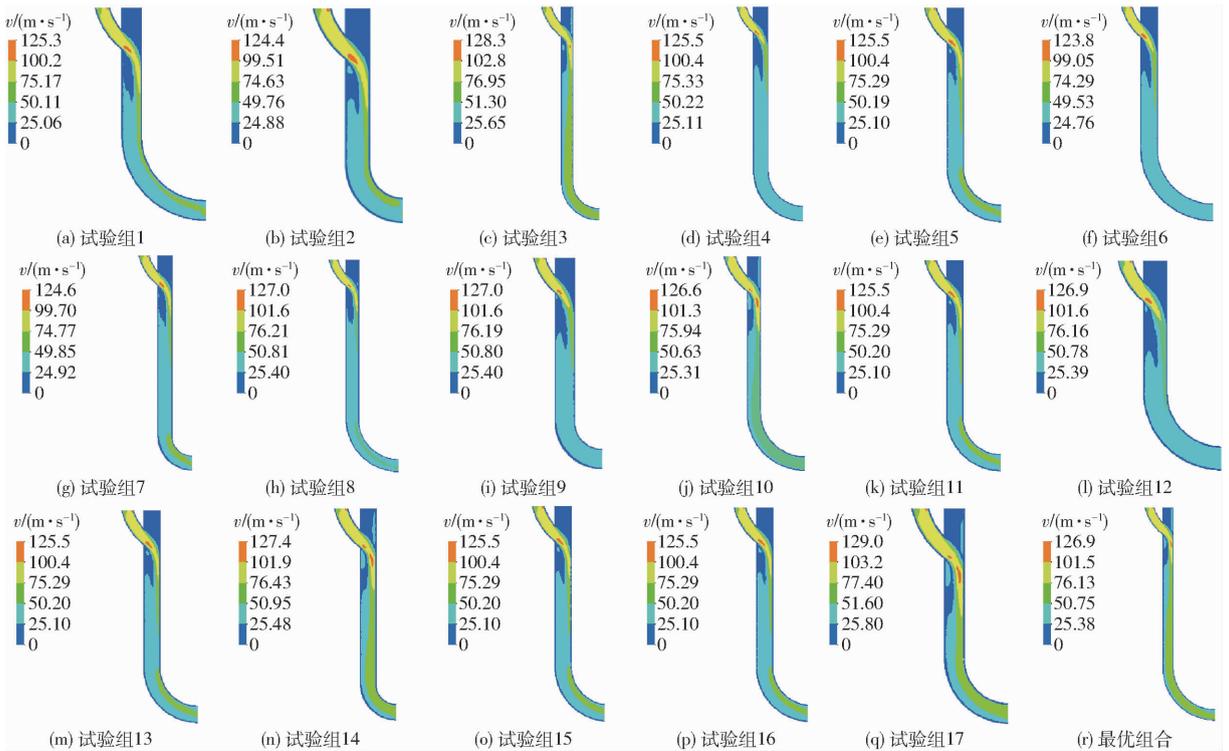


图9 导种管CFD仿真截面速度分布图

Fig.9 CFD simulated cross-sectional velocity distribution of seed-guiding tube

由图9可知,试验组1(短管+小弯曲半径)入口速度为1.03 m/s,弯段降至0.77 m/s,扰动显著;而试验组10(长管+适中弯曲半径)气流加速至1.15 m/s,流动稳定。最优组合下导种管入口与出口速度分别为1.25、1.35 m/s,实现均匀加速。

道有效减少了颗粒的离心偏移与碰撞损失,表现为主要影响因素;而内径由25 mm增大至35 mm则导致种子速度下降,这源于相同流量下气流速度降低从而削弱了对种子的推动作用。

2.4 仿真结果分析

如图9所示,不同导种管结构参数下的气流速度分布存在显著差异。多数试验组中,气流速度由入口至下游逐渐降低,其中试验组3、7和12在弯管段出现明显速度下降,表明流动扰动较强,不利于种子稳定输送;相比之下,试验组16和17在弯管段速度分布均匀且流动平稳,反映该参数组合能有效提升气流加速能力并抑制扰动。

图10为不同结构参数下压力分布特征。多数工况下,导种管入口区域压力较高,而在弯曲段出现显著压力变化。短管结构(试验组1、2)在弯段压差较大,易引起压力波动,影响种子运动稳定性;相比之下,长管结构(试验组13、16、17)的压力分布更为

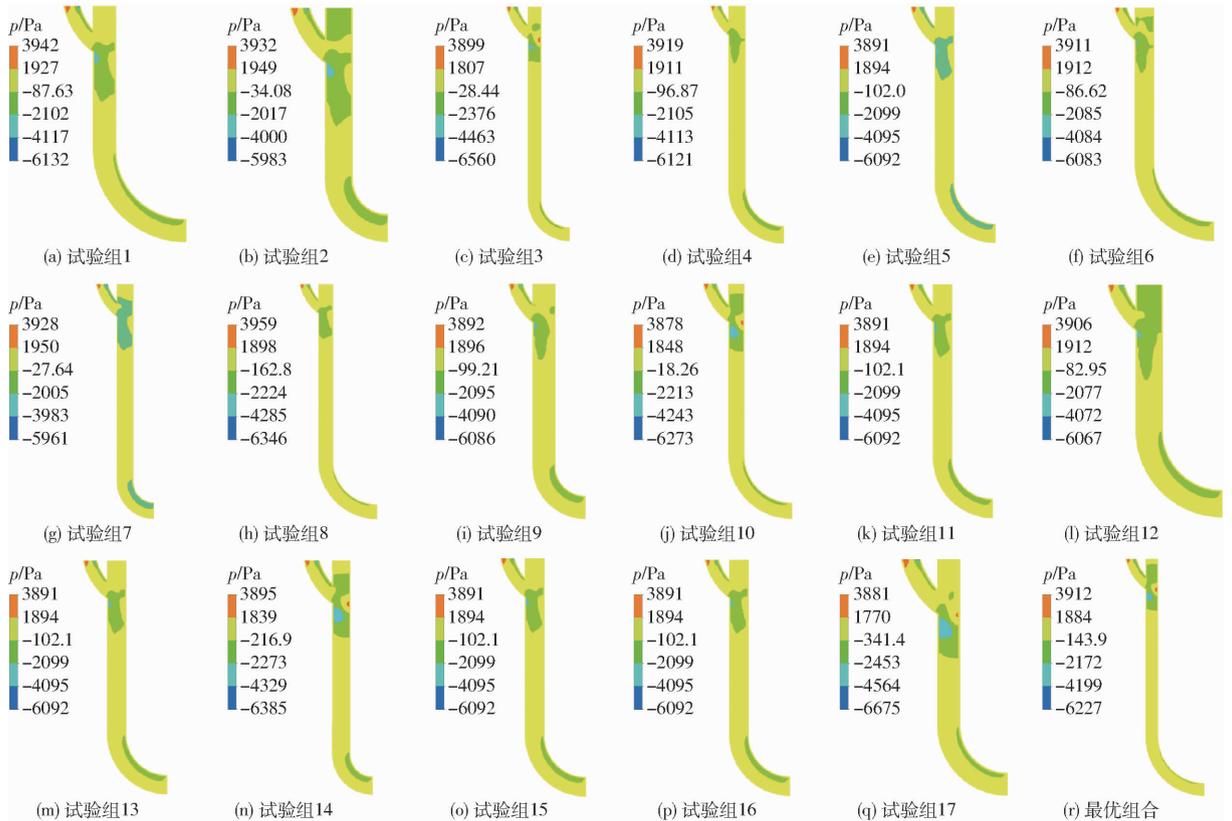


图 10 导种管 CFD 仿真截面压力分布图

Fig. 10 CFD simulated cross-sectional pressure distribution of seed-guiding tube

平缓,压力梯度变化较小,表明此类设计有助于流动稳定。

由图 10 可知,试验组 5(中等管长+小弯曲半径)压力由 3.92×10^3 Pa 降至 2.55×10^3 Pa,弯段波动明显;试验组 14(长管+大弯曲半径)压力平缓降至 3.01×10^3 Pa,流动更稳定。最优组合压力从 3.94×10^3 Pa 平稳过渡至 3.63×10^3 Pa。

图 11、12 为各组气流整体流动趋势。试验组 1、4、6 等弯曲半径较小,流线在弯管段呈较为复杂的分布,流体容易产生回流和紊流,表明气流运动受到较大干扰,可能导致颗粒的非定向输送。相比之下,试验组 14、16、17 等长导管与适当弯曲半径的组合显示出流线较为规整,气流通过管道时的流线更加顺畅,能够有效降低颗粒偏移和碰撞频次,从而提高投种精度。

由图 11、12 可知,试验组 2(短管+小弯曲半径)出现显著回流,影响输送稳定性;试验组 8 与最优组合则流线平顺、无回流湍流,有效保障种子精准输送。综合表明,所提最优结构能显著提升气流稳定性与输送性能。

如图 13 所示,在 EDEM 后处理中对种子颗粒轨迹进行分析,并在出口处设置 Grid Bin Group 对经过的种子水平速度进行统计分析,使用 Particle Analytic 分析种子与管壁的接触情况。

图 14 为 4 种不同类型种子平均速度和碰撞次数。4 类种子运动特性统计显示,种子类型对气流输送性能具有显著影响。马齿型种子表现最佳,平均速度最高(5.9 m/s),碰撞次数最少,速度波动最小;糯质型种子则表现最弱,平均速度最低(4.8 m/s),碰撞次数高且速度波动大;半马齿型与硬粒型种子的性能介于二者之间。因此种子形状特性是影响气流输送稳定性的关键因素。

4 类种子在平均速度上差异较小,95% CI 大幅重叠,ANOVA 显示差异不显著($P \geq 0.05$);而在碰撞次数上存在显著差异($P < 0.05$)。硬粒型平均碰撞次数显著低于马齿型与半马齿型,糯质型处于中间水平。结果表明形状/球形度差异主要体现与壁面的相互作用次数,而对目标出口水平速度的影响较弱,与 CFD-DEM 中“不同形状颗粒的曳力差异主要影响轨迹贴壁性而非轴向加速”相一致。

通过引入形状修正的拖曳力模型并考虑接触与滚动阻力,所获得的结构设计规律展现出良好普适性:同一参数调整对不同种子类型出口速度稳定性与碰撞次数均产生同向影响,且全样本仿真与台架试验验证最大相对误差小于 8%。马齿型颗粒的随流性与稳定性最优,在相同条件下出口速度最高(约 5.9 m/s)且碰撞次数最少;而糯质型因角棱显著、球形度低,表现最差,出口速度最低(约 4.8 m/s)且

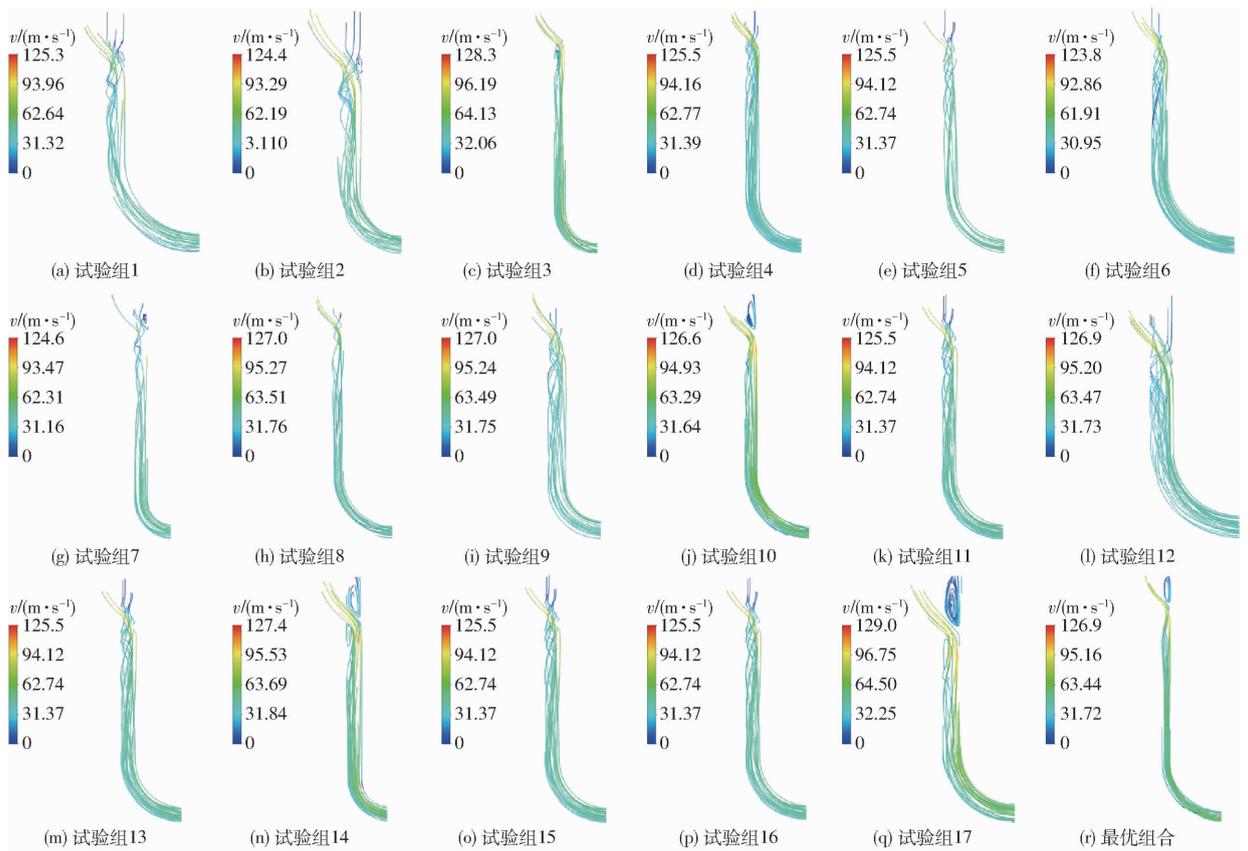


图 11 基于 FLUENT 的导种结构内部气流流线分布

Fig. 11 Airflow streamline distribution inside seed-guiding structure based on Fluent

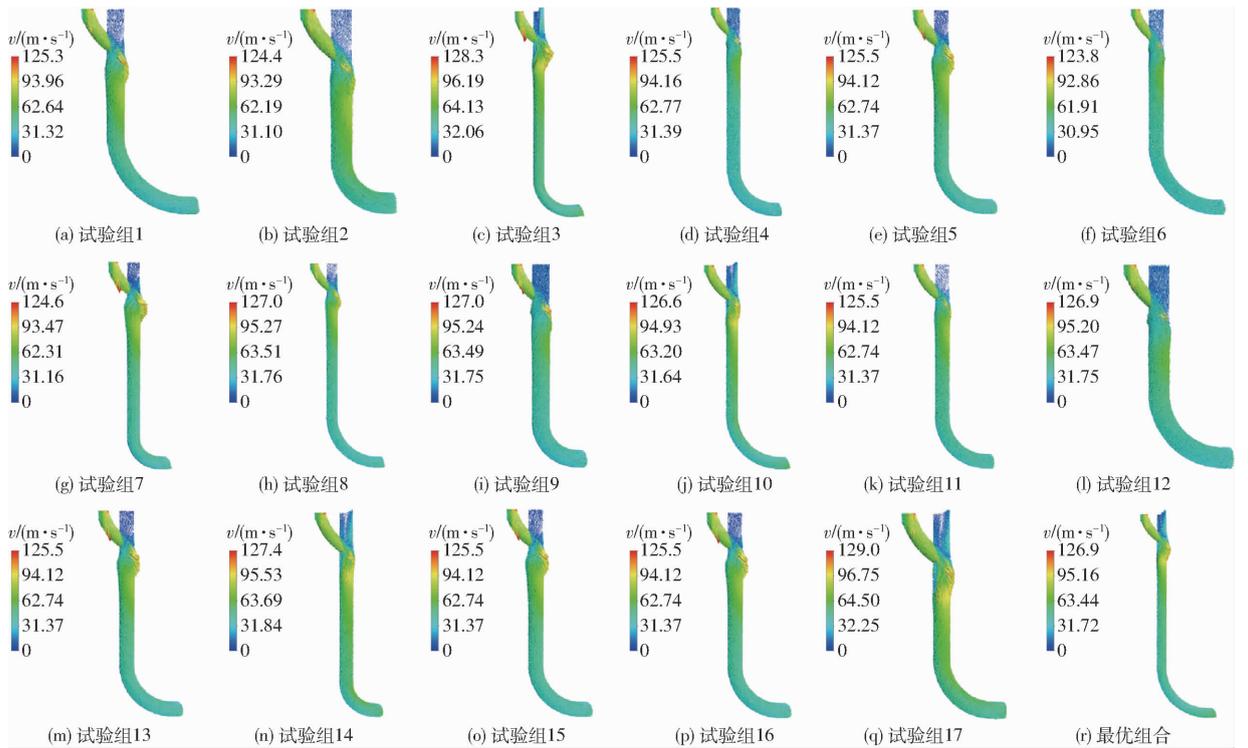


图 12 导种管 CFD 仿真气流速度矢量分布图

Fig. 12 CFD simulated airflow velocity vector distribution in seed-guiding tube

碰撞次数较高。

图 15 为 BBD 试验设计 17 组平均速度和碰撞次数结果。试验组 6 (5.6 m/s) 和试验组 10 (5.5 m/s) 在

速度上表现最佳,且碰撞次数较少,表明这 2 组设计在气流导种过程表现出较好的加速效率和稳定性。而试验组 2 (4.3 m/s) 和试验组 12 (4.1 m/s) 显示出

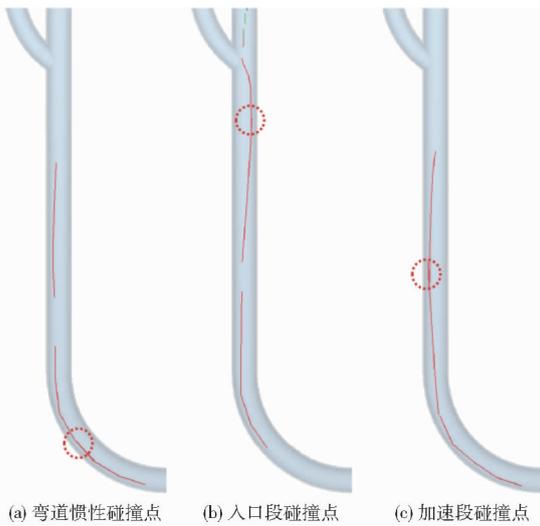


图 13 EDEM 仿真中颗粒运动轨迹对比

Fig. 13 Comparison of particle motion trajectories in EDEM simulation

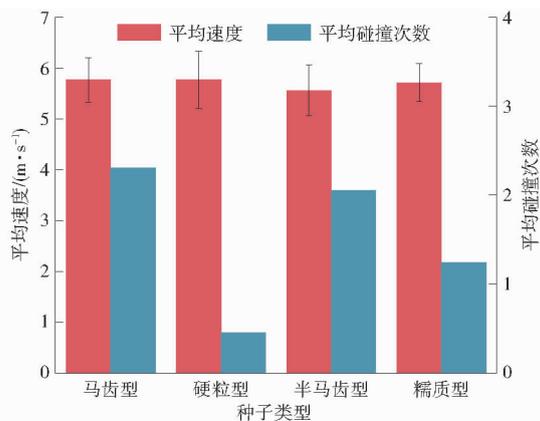


图 14 不同类型种子平均速度与碰撞次数统计

Fig. 14 Mean seed velocity and collision frequency for different kernel types

较低的速度和较高的碰撞次数,表明这些设计的气流导向效率较低,种子易与管壁发生碰撞,导致稳定性差。试验组 4 和试验组 8 表现出较大的速度波动和较高的碰撞次数,显示出结构设计中的气流不稳定性。

由图 15 可知,多数组别间速度的置信区间存在明显重叠,说明在当前设计域内主效应为连续渐变、交互作用较弱;与此对应,碰撞次数在少数组合(第 7 组)表现出较短或较长的 CI,提示这些组合在“弯曲比 r/d 与管径 d ”的搭配上对壁面相互作用的抑制/放大更为敏感。结合回归与残差诊断, $B(r/d)$ 与 $C(d)$ 为显著主效应,而交互项不显著,与图中“大范围 CI 重叠”的可视化结论一致。

3 台架性能试验

3.1 试验装置

为验证 CFD-DEM 仿真模型预测准确性,分析

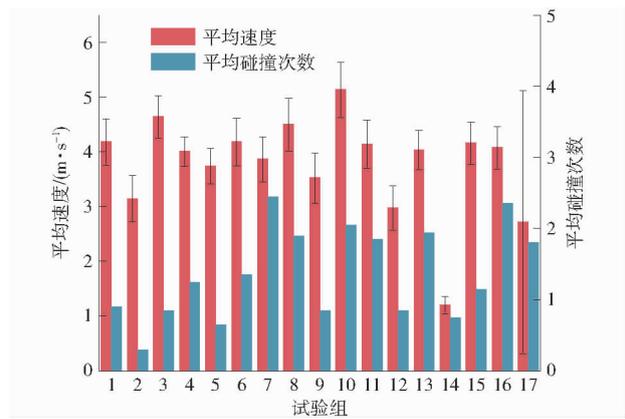


图 15 BBD 试验各组玉米种子平均速度与碰撞次数统计结果

Fig. 15 Mean velocity and collision frequency of maize kernels for all BBD runs

不同结构参数对种子输送特性的影响规律,搭建了导种过程可视化试验台架,如图 16 所示,主要由高速成像单元、图像采集与处理模块、气流输送单元、可调导种结构、种子供给模块及照明构成。

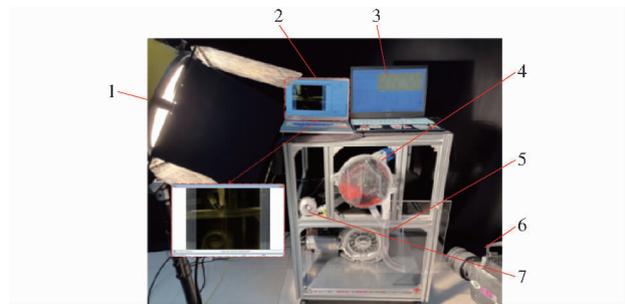


图 16 试验台架组成

Fig. 16 Layout of bench-test system

1. 补光装置 2. 高速摄像计算机 3. 排种器控制计算机 4. 精密排种器 5. 气力式导种管 6. 高速摄像机 7. 电动风机

气流输送单元由电动风机与导气管组成。为满足导种出口水平速度与碰撞约束条件,依据 CFD-DEM 结果确定工作参数体积流量 Q_{req} 为 $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$ 、压差 Δp_{req} 为 3.0 kPa ,选取 C80-2 型电驱式涡轮风机(12 V DC),其 $Q-\Delta p$ 与效率 $\eta(Q)$ 曲线显示在目标工作参数下可提供 $\Delta p \geq \Delta p_{req}$,效率 η 约为 0.55,同时外形尺寸(最大长度 82.2 mm 、厚度 60.9 mm)满足安装空间约束。综合考虑气动性能与布置条件,该型号风机能够满足导种系统供风需求。

C80-2 型电动风机性能曲线如图 17 所示,在上述工作参数下,功率为 $P_h = Q\Delta p = 0.020 \times 3000 = 60 \text{ W}$,考虑效率 η 为 0.55,风机电功率 $P = \eta Q\Delta p \approx 109 \text{ W}$ 。

对 8 行配置,总功率 $P \approx 0.87 \text{ kW}$ 。以作业宽度 w 为 6.0 m 、作业速度 v 为 12 km/h 、田间效率 η_{field} 为 0.75 估算单位面积能耗: E_{ha} 为 $0.026 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{hm}^2$ 。相对于整机油耗可忽略不计。与“无气流”对照相

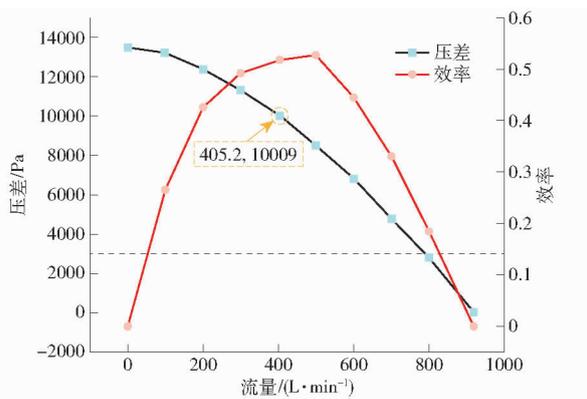


图 17 电动风机性能曲线

Fig. 17 Performance curves of electric blower

比,本方案出口水平速度提升 0.9 ~ 1.1 m/s、碰撞次数降低 30% ~ 45%。

电动风机采用压差闭环控制,目标压差为 Δp 设为 3.0 kPa,在 $\Delta p \pm 15\%$ 范围内,导种管出口水平速度变化小于 8%,表明系统对供风波动具有一定鲁棒性。风机总成满足 IP54 防护等级,工作温度 -10 ~ 50℃,连续额定功率下外壳温升小于 40 K;噪声小于 70 dBA(1 m)。整机供电为 12 V DC,拖拉机发电能力不小于 1.5 kW 可满足 8 行同步运行。

在现有结构参数 (l 、 d 、 r/d 、 θ) 优化基础上,风机新增功率 0.87 kW 可换取投种速度与稳定性显著提升,单位面积能耗 0.026 kW·h/hm²,加入电动风机不仅能够既定能耗约束内显著提升导种性能,且通过闭环控制保证田间应用的稳定性与可靠性。

如图 18 所示,使用数字式压差计和热敏式风速仪对气力式导种管入口风压和出口风速进行检测。



图 18 检测传感器示意图

Fig. 18 Schematic of detection sensors

3.2 试验设计与方法

为了验证基于 CFD-DEM 耦合的气流导种模型准确性及导种装置性能,设计了系列台架试验,主要考察在不同作业条件下,气流与种子颗粒之间的相互作用,尤其是气流对种子加速和稳定性的影响。试验使用郑单 958 玉米种子,选取 4 种类型种子:马齿型、硬粒型、半马齿型和糯质型。种子类型按一定比例混合,确保数据代表性。

台架试验设备包括电动精密排种器与电动风机,在试验中,作业速度和气流速度是主要控制变量。作业速度设置为 4 个不同的水平,分别为 6、8、10、12 km/h。气流速度分为 3 个不同水平,分别为 3.0、4.0、5.0 m/s。每个试验条件下,重复进行 3 次测量,以确保数据可靠性。

在试验过程中,主要测量种子在导种管出口处水平方向速度和碰撞次数。种子速度测量通过高速摄影技术进行,捕捉种子运动的轨迹与速度;而碰撞次数则通过统计种子与管壁的碰撞事件以及种子之间的相互碰撞进行计算。在每个试验条件下,误差棒被用于表示数据的标准差,反映结果离散程度。

采用单因素或双因素方差分析 (ANOVA) 方法评估不同作业速度、气流速度和种子类型对试验结果的影响。此外,对试验结果平均值和标准差进行计算,分析不同试验条件下种子运动规律性与稳定性。

在试验设计与实施过程中,确保每个试验条件准确性与可重复性。所有设备在每次试验前都经过严格的校准,气流速度通过风速仪进行测量与校正,作业速度通过排种器的电机控制进行调节和验证。试验样本量在每个条件下保持一致,以确保结果的统计有效性。

3.3 试验结果与分析

如图 19 所示,由图像识别软件 Tracker 提取对高速摄影视频进行慢动作分析,统计分析颗粒的位置信息,并得到种子颗粒的轨迹分布和水平方向速度。在关闭气流的条件下,保持导种结构与排种工况一致,分别以机具前进速度 (6、8、10、12 km/h) 开展高速摄像测量,提取种子在导种末端水平方向分速度 v_{out} 。

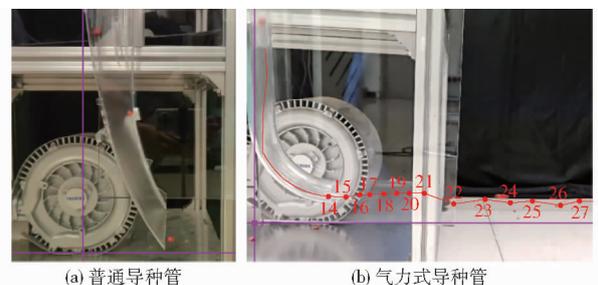


图 19 种子轨迹

Fig. 19 Comparison of seed trajectories

由表 7 可得,当作业速度为 6 km/h 时,组内均值为 0.233 ~ 0.318 m/s;跨组均值 $\bar{u} = 0.279$ m/s,平均标准差为 0.104 m/s,变异系数为 37%。“零速投种”速度贴比值 \bar{u}/v 为 0.17,速度偏差为 1.39 m/s;当作业速度为 8 km/h 时,组内均值为 1.129 ~ 1.436 m/s;跨组均值为 1.279 m/s,平均标准差为

0.366 m/s, 变异系数为 28.6%。速度贴合比 \bar{u}/v 为 0.58, 速度偏差为 0.94 m/s; 当作业速度为 10 km/h 时, 组内均值为 1.481 ~ 1.766 m/s; 跨组均值为 1.649 m/s, 平均标准差为 0.477 m/s, 变异系数为 28.9%。速度贴合比 \bar{u}/v 为 0.59, 速度偏差为 1.13 m/s; 当作业速度为 12 km/h 时, 组内均值为 1.392 ~ 1.751 m/s; 跨组均值 \bar{u} 为 1.576 m/s, 平均标准差为 0.296 m/s, 变异系数为 18.8%。速度贴合比 \bar{u}/v 为 0.47, 速度偏差为 1.76 m/s。

表 7 不同作业速度下种子排出导种管水平方向分速度

Tab.7 Horizontal exit-velocity component of seeds from guide tube at different travel speeds m/s

作业速度 6 km/h		作业速度 8 km/h		作业速度 10 km/h		作业速度 12 km/h	
速度平 均值	标准 差	速度平 均值	标准 差	速度平 均值	标准 差	速度平 均值	标准 差
0.291	0.122	1.411	0.248	1.697	0.533	1.392	0.307
0.280	0.109	1.436	0.459	1.766	0.178	1.751	0.276
0.271	0.085	1.129	0.458	1.661	0.551	1.568	0.226
0.233	0.138	1.140	0.298	1.481	0.616	1.685	0.284
0.318	0.068			1.642	0.505	1.485	0.388

综合分析, 在无气流条件下, 末端水平速度随作业速度 6 ~ 10 km/h 变化总体上升, 当作业速度为 12 km/h 时呈下降趋势, 表明仅依赖重力与管壁滑移所能获得的轴向动量十分有限且不稳定。4 种作业速度下“速度贴合比”均远低于 1, 且出口水平速度偏差均大于 0.9 m/s (12 km/h 时偏差最大达 1.76 m/s), 说明无气流时难以满足“零速投种”的要求。与此同时, 变异系数为 18.8% ~ 37%, 作业速度 6 km/h 离散性最大, 反映靠壁面摩擦获得的水平动量受入射姿态与壁面条件影响较大、重复性较差。颗粒运动受重力、空气阻力及壁面摩擦/碰撞的耦合作用, 其出口水平速度对初始位姿、表面粗糙度与给种节奏高度敏感, 难以通过工况实现稳定设定; 非球形颗粒的阻力系数与投影面积随姿态变化, 导致终端速度分散, 速度可控性差。弯管处为获得向心加速度必须依赖与壁面接触, 碰撞频率随 v/r 增大而升高, 轨迹易近壁漂移并产生“黏-滑-跳”式随机振荡; 在较高投种频率下还易出现颗粒堆积与瞬时堵塞。表明引入气流加速是必要的。

在与仿真一致的结构与工况条件下, 对导种管出口水平速度作为主要评价指标开展台架试验比对。结果表明, 试验测得的出口水平速度与 CFD-DEM 预测具有良好一致性, 最大相对误差小于 8%, 多数工况下两者的 95% 置信区间存在重叠; 同时, 高速成像所见的弯管近壁扰动与偶发接触与仿真中

高梯度区域空间分布相吻合, 证实了模型对该阶段复杂动力学过程的描述能力。

二者仍存在细微差异, 主要来源于试验中初始位姿与瞬时投种负荷的随机波动、成像标定与时间分辨率导致的测量不确定度、风机流量/压差的瞬态起伏, 以及模型在形貌等效与湍流 (RANS) 处理。上述因素不改变主要规律与因素排序, 但可解释个别工况的轻微偏移。综合而言, 台架试验在量化层面验证了模型的预测能力, 并在机理层面对仿真结论形成补充, 以确保论证的完整性与严谨性。

图 20 为台架试验各试验组平均出口水平速度及其方差。结果显示, 各组平均速度均稳定在 4 m/s 附近, 方差较小, 表明气流输送过程具有良好稳定性和重复性。各组间速度差异较小, 表明优化后的导种管结构在实际应用中能保持稳定性能, 证实了基于仿真优化的结构设计工程适用性。各组实测均值均落在 CFD-DEM 预测曲线的 95% 预测区间内, 仅极少数组别接近区间边界; 组间最大相对误差小于 8%。这表明所建耦合模型对出口水平速度的预测具有良好的一致性与外推能力。同时, 各组 CI 幅度与仿真预测速度波动趋势相吻合, 说明台架试验的离散来源已被模型主要物理量所捕获。

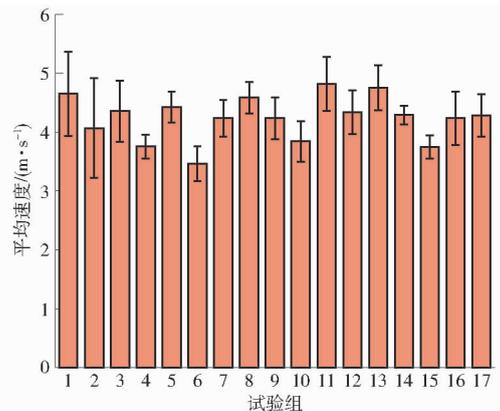


图 20 台架试验结果

Fig. 20 Bench-test results

4 结论

(1) 面向气力式导种工况, 建立了气固两相的 CFD-DEM 耦合模型与台架试验体系, 系统揭示了导种管内“启动加速、稳定输送、结构干扰与末端投”4 阶段的动力学特征。模型与试验在出口水平速度等关键指标上吻合良好 (最大相对误差小于 8%), 验证了所建模型用于结构参数分析与方案优选的有效性。

(2) 在考察参数范围内 (加速段长度 150 ~ 350 mm、弯曲比 2 ~ 4 倍、内径 25 ~ 35 mm), 导种性能主要受弯曲比与内径控制: 弯曲比增大可显著抑

制弯段二次流与壁面碰撞,内径减小可提升轴向气流但会增加沿程/局部阻力;加速段长度的作用次之。交互作用总体不显著。基于响应面得到最优组合:加速段长度 350 mm、弯管半径与内径比 4、导管内径 25 mm,对应出口水平速度 5.082 m/s,台架验证结果与之相符。

(3)对比“无气流”工况(作业速度 6~12 km/h 下,出口水平速度仅 0.29~1.76 m/s 且离散性大)

表明,引入气流可显著提高出口水平速度稳定性并降低异常碰撞,证明气力辅助对高速精量排种的必要性。

(4)在设计中优先确保弯曲比 $r/d \geq 3$,在满足通过性要求的前提下选用较小内径(25~30 mm),并配合足够长度的加速段(250~350 mm)。同时,宜将气流入口夹角控制于 30°以减弱入口流动分离。

参 考 文 献

- [1] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision maize planting technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- [2] 张东兴. 玉米全程机械化生产技术与装备[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2014.
- [3] 赖庆辉,高筱钧,张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 27-37.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27-37. (in Chinese)
- [4] 刘瑞,刘云强,刘忠军,等. 玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 156-166.
LIU Rui, LIU Yunqiang, LIU Zhongjun, et al. Research on positive pressure airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 156-166. (in Chinese)
- [5] XIAO T, YANG L, ZHANG D, et al. Early detection of nicosulfuron toxicity and physiological prediction in maize using multi-branch deep learning models and hyperspectral imaging [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 474: 134723.
- [6] 丁力,杨丽,张东兴,等. 基于DEM-CFD的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 50-60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50-60. (in Chinese)
- [7] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM-CFD 模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 23-31.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. EDEM-CFD simulation and experimental study on the operating performance of an internally pneumatic blowing maize seed metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 23-31. (in Chinese)
- [8] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 12-22.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design of fertilizer spraying device of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12-22. (in Chinese)
- [9] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 164-170.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, LIN Shuyun, et al. EDEM-CFD simulation and experimental study on the operating performance of an internally pneumatic blowing maize seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 164-170. (in Chinese)
- [10] 王利民,邱小平,李静海. 气固两相流介尺度 LBM-DEM 模型[J]. 计算力学学报, 2015, 32(5): 685-692.
WANG Limin, QIU Xiaoping, LI Jinghai. Meso-scale LBM-DEM model for gas-solid two-phase flow [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(5): 685-692. (in Chinese)
- [11] 臧英,张美林,黄子顺,等. 基于CFD-DEM的气送式稻麦兼用型高速播种机种子减速器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 222-234.
ZANG Ying, ZHANG Meilin, HUANG Zishun, et al. Design and test of seed reducer for air-fed rice-wheat high-speed seeder based on CFD-DEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 222-234. (in Chinese)
- [12] LI H, YANG L, ZHANG D, et al. Design and optimization of a high-speed maize seed guiding device based on DEM-CFD coupling method [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109604.
- [13] 刘彩玲,王亚丽,都鑫,等. 摩擦复充种型孔带式水稻精量排种器充种性能分析与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 29-36.

- LIU Cailing, WANG Yali, DU Xin, et al. Filling performance analysis and verification of cell-belt rice precision seed-metering based on friction and repeated filling principle[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 29–36. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 张蕾蕾, 陈延信, 赵博, 等. 一种新型下排气旋风分离器的数值模拟[J]. 流体机械, 2021, 49(10): 50–58.
- ZHANG Leilei, CHEN Yanxin, ZHAO Bo, et al. Numerical simulation of a new type of cyclone with down exhaust outlet[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(10): 50–58. (in Chinese)
- [16] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54–66.
- SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54–66. (in Chinese)
- [17] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48–57.
- DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48–57. (in Chinese)
- [18] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 29–39.
- LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29–39. (in Chinese)
- [19] 史嵩, 周纪磊, 刘虎, 等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 61–70.
- SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61–70. (in Chinese)
- [20] 崔涛, 韩丹丹, 殷小伟, 等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 8–16.
- CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of an internally pneumatic blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8–16. (in Chinese)
- [21] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 47–56.
- DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47–56. (in Chinese)
- [22] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 92–100.
- GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of Venturi feeding tube based on DEM-CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 92–100. (in Chinese)
- [23] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43–51.
- HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43–51. (in Chinese)
- [24] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57–68.
- LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57–68. (in Chinese)
- [25] MILLER D S. Internal flow systems[M]. BHRA Fluid Engineering, 1978: 290:120–180.
- [26] 任冰, 钟文琪, 金保昇, 等. 喷床气固流动特性的三维 CFD-DEM 数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(8): 1341–1344.
- REN Bing, ZHONG Wenqi, JIN Baosheng, et al. Three-dimensional CFD-DEM numerical simulation of gas-solid flow characteristics in a spouted bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(8): 1341–1344. (in Chinese)
- [27] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62–69.
- SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and validation of filling performance of a pneumatic combined-hole seed metering device based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62–69. (in Chinese)