

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.003

# 荞麦播种机气力集排系统螺旋式增压管设计与试验

付作立 李贵川 李海宇 李旋 宫志超 黄玉祥

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 针对播种机气力集排系统中种子流沿输种管侧壁进入分配器时,产生气种混合均匀性低、各行排量一致性差的问题,提出了螺旋式增压管,阐述了总体结构和工作原理,并对输种管和螺旋式增压管进行了设计,以荞麦为对象,开展了螺旋式增压管内种子群受力、运动及压损分析。基于 CFD-DEM 耦合仿真方法,通过单因素试验、最陡爬坡试验和中心复合设计试验研究了叶片数、扭转角、螺旋式增压管长度和输送气流速度对荞麦种子各行排量一致性变异系数的影响,仿真试验结果表明:当叶片数为3、螺旋式增压管长度为210 mm、扭转角为383°、输送气流速度29.30 m/s时,荞麦各行排量一致性变异系数为9.83%,达到最优。通过气力集排系统试验台架开展了不同型式增压管性能验证试验,结果表明:采用螺旋式、波纹式和窝眼式增压管的荞麦气力集排系统各行排量一致性变异系数分别为5.58%、6.85%和9.65%,最优参数组合条件下螺旋式增压管的仿真结果与台架验证试验结果相差4.25个百分点。提出的螺旋式增压管较传统增压管,增强了气种混合均匀性,提高了气力集排系统的作业质量,可为气力集排系统设计提供技术支撑。

**关键词:** 荞麦播种机; 气力集排系统; 螺旋式增压管; CFD-DEM

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)12-0037-09

OSID:



## Design and Test of Spiral Booster Pipe for Pneumatic Collecting and Discharging System of Buckwheat Seeder

FU Zuoli LI Guichuan LI Haiyu LI Xuan GONG Zhichao HUANG Yuxiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** When the seed flow in the pneumatic centralized drainage system enters the distributor along the side wall of the seed pipe, the mixing uniformity of the gas and the seed is low, and the consistency of the displacement of each row is poor. The spiral booster pipe was proposed, and the overall structure and working principle were expounded. The design and calculation of the seed pipe and the spiral booster pipe were carried out. Taking buckwheat as the object, the force, motion, and pressure loss analysis of the seed group in the spiral booster pipe was carried out. Based on the CFD-DEM coupling simulation method, the effects of blade number, torsion angle, spiral booster tube length, and conveying airflow velocity on the consistency coefficient of variation of each row displacement of buckwheat seeds were studied by single factor test, steepest climbing test, and central composite design test. The simulation results showed that when the number of blades was 3, the length of the spiral booster tube was 210 mm, the torsion angle was 383°, and the conveying airflow velocity was 29.30 m/s, the consistency coefficient of variation of each row of buckwheat was 9.83%, which was optimal. The performance verification tests of different types of booster tubes were carried out on the test bench of the pneumatic collecting and discharging system. The results showed that the variation coefficients of the consistency of each row of the buckwheat pneumatic collecting and discharging system with spiral, corrugated, and eyelet booster tubes were 5.58%, 6.85%, and 9.65%, respectively. The difference between the simulation results and the bench verification test results under the optimal parameter combination condition was 4.25 percentage points. Compared with the traditional booster tube, the spiral booster tube proposed enhanced the uniformity of gas mixing, improved the operation quality of the pneumatic collection system, and provided technical support for the design of the pneumatic collection system.

**Key words:** buckwheat seeder; pneumatic collecting and discharging system; spiral booster pipe; CFD-DEM

收稿日期: 2023-08-28 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)和陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY02-03)

作者简介: 付作立(1987—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: fuzuoli@nwsuaf.edu.cn

## 0 引言

荞麦是我国重要的小杂粮作物和经济作物,具有较高的营养、保健和药用价值<sup>[1-2]</sup>。目前我国荞麦机械化种植程度较低,机械式荞麦播种机在高速的情况下播种不稳定,均匀性差,不适宜精播,容易造成种子的破损,工作幅宽小<sup>[3]</sup>。气力集排式播种机具有整机重量小,成本低,播种空间宽度大,运输尺寸小,气流输送种子的破碎率较低,适应性强等优点,可以满足在大型农田播种时宽幅、高速的要求<sup>[4-7]</sup>。

目前气力集排式机械装备广泛应用于小麦、油菜、水稻、蔬菜等农作物播种和施肥作业上<sup>[8-13]</sup>。国内外学者关于气力集排系统的研究主要集中于供种装置<sup>[14-15]</sup>、混合器<sup>[16-18]</sup>、输种管<sup>[19]</sup>、波纹式增压管<sup>[20]</sup>、分配器<sup>[21-23]</sup>和导种管<sup>[24]</sup>等单体,应用CFD仿真、CFD-DEM耦合仿真方法进行内部流场数值模拟和结构优化设计,进行台架验证试验与样机田间验证试验研究。增压管是气力集排系统中连接输种管和分配器的核心部件,能够将气种两相流在进入分配器之前进行扰流,起到打散种子和促进气种两相流均匀分布的作用,对气力集排式播种机的播种质量有重要影响,主要有波纹式、窝眼式和普通圆管3种结构<sup>[25-26]</sup>。普通圆管由于其内部空间较大,无导流结构,导致气种两相流沿管壁集中分布,进入分配器造成分配不均等现象,分配效果最差;窝眼式增压管的工艺比较复杂,试制困难,应用较少;波纹式增压管研究广泛,但混合效果有待提高。因此需对增压管的结构形式展开研究,得到较优结构的增压管,以期提高气力集排系统的工作性能。

针对播种机气力集排系统中种子流沿输种管侧壁进入分配器时,产生气种混合均匀性低、各行排量一致性差的问题,设计一种螺旋式增压管,分析输送气流速度、螺旋式增压管结构对荞麦种子的受力与运动和压力损失的影响。基于CFD-DEM耦合仿真方法,通过单因素试验、最陡爬坡试验和中心复合设计试验确定叶片数、扭转角、螺旋式增压管长度和输送气流速度对荞麦各行排量一致性变异系数的影响,以为播种机气力集排系统设计提供技术支持。

## 1 总体结构与工作原理

### 1.1 总体结构

气力集排系统主要包括供种装置(种箱、外槽轮排种器和调速电机)、调速风机、混合器、输种管、螺旋式增压管、分配器和导种管等部分。其中螺旋式增压管主要由过渡段和螺旋段组成。气力集排系

统及螺旋式增压管结构如图1所示。

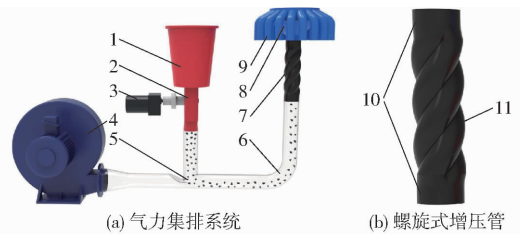


图1 气力集排系统及螺旋式增压管结构示意图  
Fig.1 Pneumatic collecting and discharging system and spiral booster pipe structure diagram

1. 种箱 2. 外槽轮排种器 3. 调速电机 4. 调速风机 5. 混合器 6. 输种管 7. 螺旋式增压管 8. 分配器 9. 导种管 10. 过渡段 11. 螺旋段

### 1.2 工作过程与原理

气力集排系统工作时,种子通过调速电机带动外槽轮排种器均匀定量地从种箱中排出,自由下落到混合器中;调速风机产生的高速气流和落下来的种子在混合器中混合形成气种两相流;气种两相流在输种管与增压管内壁上摩擦和碰撞,进一步混合,均匀地进入分配器;在分配器中完成均匀分配工作;分配均匀的种子流沿着导种管运输到各行开沟器中进入土壤,完成播种。

气种两相流经输种管进入螺旋式增压管内,在低压旋流输送中,由于旋流的脉动速度、涡流影响以及颗粒间的摩擦碰撞和气动力不均匀等因素,使靠近输种管壁的种子群受到水平方向的力,而引起水平方向的运动,结果导致颗粒群作不规则的相互交错的曲线上升螺旋运动,种子在螺旋式增压管内一面呈悬浮状态作不规则运动,一面反复与管壁碰撞或摩擦滑动,进一步混合均匀,进入分配器中。

## 2 螺旋式增压管设计与分析

### 2.1 输送空气流量和排种系统输种管直径计算

输种管是连接混合器与增压管的关键部件,保证气种两相流在气力集排系统中稳定连续输送,影响分配器的安装位置、管道压力损失和种子速度等,进而可能影响排种均匀性等,输种管直径决定增压管直径。根据陕西地区对于荞麦等主要粮食作物播种的相关技术要求,确定荞麦气力集排式播种机的主要技术参数为:播种机最大工作幅宽为6 m,播种行数为20,根据荞麦不同种植区域地表工况,确定播种机作业速度控制范围为4~12 km/h,输种管中单位时间内荞麦输送质量为0.08~0.12 kg/s。

输种管将气种两相流从混合器输送到螺旋式增压管中,输送空气流量计算式为

$$Q_a = \frac{W_a}{\rho_a} = \frac{W_f}{\mu\rho_a} \quad (1)$$

其中

$$W_a = W_f / \mu$$

式中  $Q_a$ ——输送空气流量,  $\text{m}^3/\text{s}$

$W_a$ ——单位时间输送气流质量,  $\text{kg}/\text{s}$

$\rho_a$ ——空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$W_f$ ——单位时间输送种子颗粒质量,  $\text{kg}/\text{s}$

$\mu$ ——单位时间种子质量与气流质量混合比

气力集排系统为低压稀相流输送, 单位时间种子质量与气流质量混合比范围为  $1 \sim 10^{[27]}$ , 取  $\mu = 1.3$ , 根据式(1)得  $Q_a = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

排种系统输种管直径与输送空气流量之间关系满足

$$D = \sqrt{\frac{4Q_a}{\pi v_a}} \quad (2)$$

式中  $D$ ——输种管直径,  $\text{m}$

$v_a$ ——输送气流速度, 取  $26 \text{ m}/\text{s}$

根据式(2)计算得输种管直径  $D$  为  $0.06 \text{ m}$ , 取输种管直径  $D$  为  $60 \text{ mm}$ 。

## 2.2 螺旋式增压管设计

增压管是气力集排系统中连接输种管和分配器的核心部件, 能够将气种两相流在进入分配器之前进行扰流, 起到打散种子和促进气种两相流均匀分布的作用, 对气力集排式播种机的播种质量有重要影响。本研究采用一种新型的螺旋式增压管, 主要由过渡段和螺旋段组成; 过渡段是螺旋式增压管向输种管和分配器过渡的部分, 两段长度均设计为  $40 \text{ mm}$ ; 螺旋段是螺旋式增压管的主体, 其结构如图 2 所示, 螺旋式增压管的横截面由正多边形和以正多边形边长为直径的半圆构成, 其主要几何参数包括叶片数  $N$ 、螺旋式增压管长度  $L_p$ 、螺距  $P$ 、螺旋角  $\beta$ 、扭转角  $\beta_1$ 、叶片半径  $r_l$ 。

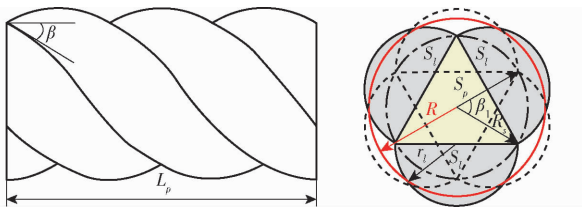


图 2 螺旋式增压管结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of spiral booster pipe

扭转角  $\beta_1$  定义为螺旋式增压管出口截面相对于入口截面的夹角 (顺时针为正), 螺距  $P$  定义为叶片旋转  $360^\circ$  时所经过的轴向距离。螺旋角  $\beta$  为螺旋式增压管上一点的切线相对于螺旋式增压管轴线的夹角, 是影响种子流在螺旋式增压管均匀分布的重要参数。叶片数  $N$  是决定叶片半径  $r_l$  的重要参数; 扭转角  $\beta_1$  和螺旋式增压管长度  $L_p$  是决定螺距  $P$  的重要参数, 初步取  $\beta_1$  为  $360^\circ$ ,  $L_p$  为  $180 \text{ mm}$ ; 螺距  $P$  是决定螺旋角  $\beta$  的重要参数, 其关系为

$$\left\{ \begin{aligned} P &= \frac{360^\circ}{|\beta_1|} L_p \\ \tan \beta &= \frac{2\pi R_s}{P} \\ R_s &= \frac{r_l}{\sin \frac{360^\circ}{2N}} \\ S_p + S_l &= S_t \\ \frac{r_l^2}{\tan \frac{360^\circ}{2N}} N + \frac{\pi r_l^2}{2} N &= \pi R^2 \\ r_l &= \sqrt{\frac{2\pi \tan \frac{360^\circ}{2N} R^2}{2N + \pi N \tan \frac{360^\circ}{2N}}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中  $R_s$ ——正多边形外接圆半径,  $\text{mm}$

$S_p$ ——正多边形面积,  $\text{mm}^2$

$S_l$ ——叶片面积,  $\text{mm}^2$

$S_t$ ——输种管截面面积,  $\text{mm}^2$

$R$ ——输种管半径,  $\text{mm}$

根据螺旋式增压管截面积与输种管截面积相等, 得到不同叶片数的几何参数如表 1 所示。

表 1 不同叶片数的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of different

参数	leaf number								mm
	叶片数 $N$								
$r_l$	3	4	5	6	7	8	9	10	
	20.95	16.58	13.85	11.94	10.52	9.42	8.53	7.80	
$R_s$	24.19	23.45	23.56	23.88	24.25	24.62	24.94	25.24	

## 2.3 螺旋式增压管内荞麦种子的受力与运动分析

螺旋式增压管中种子群的运动机理很复杂, 本研究假设将种子群当作一种特殊流体以研究其运动, 种子群受重力  $G$ 、管壁对种子群的摩擦力  $T_f$ 、流体阻力  $F_R$  的作用, 取螺旋式增压管长度  $\Delta L$  内种子群为受力质点, 受力如图 3 所示。

各项作用力计算式为

$$\left\{ \begin{aligned} F_R &= \frac{W_f}{v_s} g \Delta L \left( \frac{v_a - v_s}{v_n} \right)^2 \\ T_f &= W_f \frac{\lambda_s v_s \Delta L}{2D_1} \\ G &= W_f \frac{\Delta L}{v_s} g \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中  $v_s$ ——种子群速度,  $\text{m}/\text{s}$

$v_n$ ——种子群悬浮速度,  $\text{m}/\text{s}$

$\lambda_s$ ——种子群阻力系数

$D_1$ ——螺旋增压管当量直径, 即输种管直径,  $\text{m}$

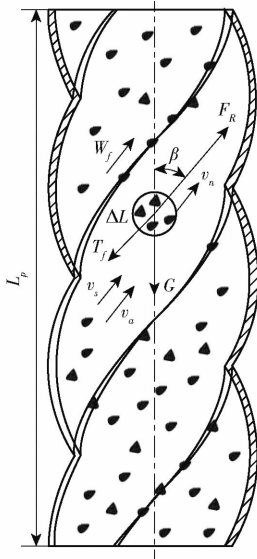


图3 螺旋式增压管内荞麦种子群运动与受力  
Fig. 3 Movement and force of buckwheat seed group  
in spiral booster pipe

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$

根据牛顿第二定律,建立轴向种子群运动微分方程为

$$\frac{G}{g} \frac{dv_s}{dt} = F_R \cos\beta - T_f \cos\beta - G \quad (5)$$

式中  $t$ ——时间,  $\text{s}$

将式(4)代入式(5),得到

$$\frac{1}{g} \frac{dv_s}{dt} = \left( \frac{v_a - v_s}{v_n} \right)^2 \cos\beta - \frac{\lambda_s v_s^2}{2gD_1} \cos\beta - 1 \quad (6)$$

由式(6)可知,输送气流速度  $v_a$  和螺旋角  $\beta$  为影响螺旋式增压管内种子群运动与受力的重要参数。

## 2.4 螺旋式增压管内压损分析

在气种两相流进入螺旋式增压管的过程中,螺旋式增压管壁面结构会对气种两相流产生扰动,影响增压管内气流场分布和种子分布。压损为螺旋式增压管气流运动的典型特征,为确定螺旋式增压管内的压损,采用达西摩擦因数描述为

$$\Delta p = \left( 1 + \mu \frac{\lambda_s v_s}{\lambda_a v_a} \right) \lambda_a \rho_a \frac{v_a^2 L_p}{2D_1} \quad (7)$$

式中  $\Delta p$ ——螺旋增压管气种两相流摩擦压损,  $\text{Pa}$   
 $\lambda_a$ ——纯气流达西摩擦因数

由式(7)可知,输送气流速度  $v_a$  和螺旋式增压管长度  $L_p$  为影响螺旋式增压管压损的重要参数。

## 3 螺旋式增压管参数优化试验

为探究不同结构的螺旋式增压管对荞麦气力集排系统排种均匀性和气种两相流分布规律的影响,应用 CFD-DEM 耦合仿真方法分析叶片数、螺旋式增压管长度、扭转角和输送气流速度对荞麦各行排

量一致性的影响。

### 3.1 模型建立

基于 CFD-DEM 耦合仿真方法,应用 EDEM 2021.2 和 ANSYS Fluent 2021R1 软件开展气力集排系统中荞麦种子流和输送气流耦合仿真。如图 4a 所示,使用 ANSYS 软件的 Space Claim 模块进行气力集排系统流体域抽取并导入 Fluent Meshing 模块进行非结构化方法自动划分,得到气力集排系统多面体网格模型。为了提高仿真计算效率和收敛性,气力集排系统的供种装置和风机简化为圆管。供种装置圆管入口设置为种子入口和压力出口,风机圆管入口设为输送气流速度入口,分配器出口设置为种子出口和压力出口,CFD-DEM 耦合仿真模型如图 4b 所示。根据文献[28]和荞麦播种技术要求,确定 CFD-DEM 仿真计算参数如表 2 所示。

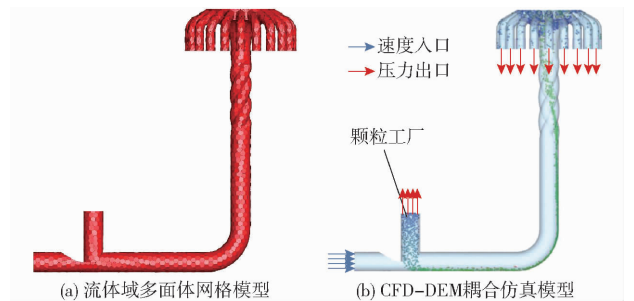


图4 气力集排系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of pneumatic collecting and discharging system

### 3.2 试验方法

试验总仿真时长为 6 s,试验过程中分别统计分配器 20 个出口 2~4 s、3~5 s 和 4~6 s 的排种粒数,计算各行排量一致性变异系数,求平均值。计算式为

$$Y_1 = \frac{S_n}{X_n} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $Y_1$ ——各行排量一致性变异系数, %

$S_n$ ——导种口排量标准差,  $\text{g}$

$X_n$ ——导种口排量平均值,  $\text{g}$

### 3.3 参数优化仿真试验

#### 3.3.1 单因素试验

由式(3)~(7)可知,叶片数  $N$ 、输送气流速度  $v_a$ 、扭转角  $\beta$  和螺旋式增压管长度  $L_p$  决定螺旋式增压管的结构,影响气力集排系统排种均匀性,以各行排量一致性变异系数  $Y_1$  为试验指标,通过单因素仿真试验判断各因素影响显著性及最陡爬坡试验取值范围。

由图 5 可知,不同叶片数的螺旋增压式气力集排系统中从混合器输出的荞麦种子在输种管中均沿底部和右侧管壁分布;不同叶片数的螺旋式增压管

表 2 CFD - DEM 仿真计算参数  
Tab.2 CFD - DEM simulation calculation parameters

项目	参数	数值/类型		
CFD	材料	流体(空气)	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 1.225	
			粘度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) $1.7894 \times 10^{-5}$	
	固体(PLA)	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 1250		
	速度入口	速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 26 ~ 34		
边界条件	湍流	湍流模型	k-omega SST	
		湍流强度/%	4	
	水力直径/mm	60		
	压力出口	出口类型	Pressure-outlet	
壁面	壁面类型	Stationary wall		
	剪切条件	No slip		
DEM	荞麦种子	泊松比	0.42	
		弹性模量/MPa	5.32	
		密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1146.84	
		泊松比	0.35	
	PLA	弹性模量/MPa	3500	
		密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1250	
	接触参数	荞麦种子-荞麦种子	恢复系数	0.17
			静摩擦因数	0.65
滚动摩擦因数			0.40	
荞麦种子-PLA		接触模型	Hertz - Mindlin (no slip) Standard Rolling Friction	
		恢复系数	0.38	
		静摩擦因数	0.17	
	滚动摩擦因数	0.13		
	接触模型	Hertz - Mindlin (no slip) Standard Rolling Friction		
颗粒模型	颗粒三轴尺寸/( $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$ )	$6.46 \times 4.28 \times 4.01$		
	颗粒工厂	颗粒工厂类型	Dynamic/unlimited number	
		颗粒生成量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.12	

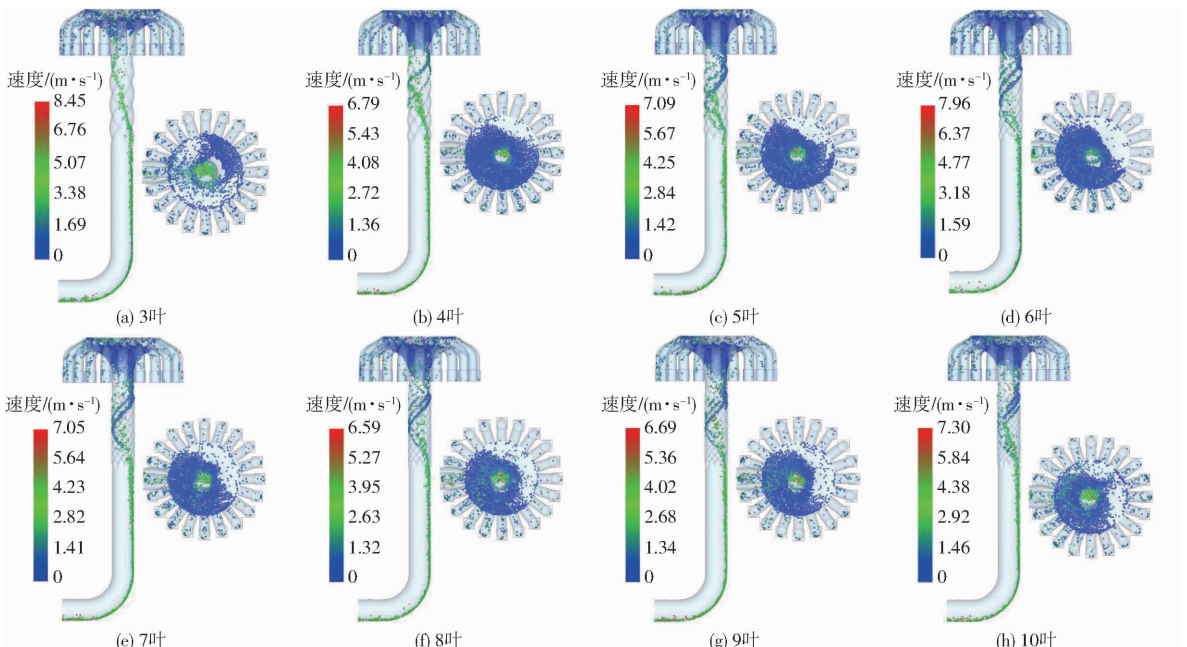


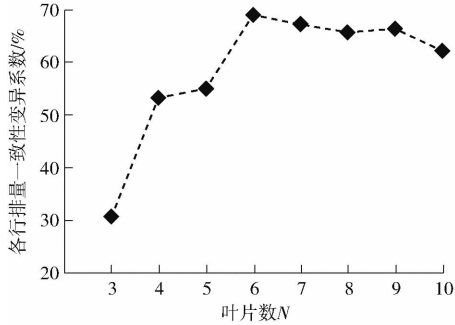
图 5 不同叶片数的螺旋增压式气力集排系统荞麦种子分布图

Fig. 5 Buckwheat seed distribution maps of spiral pressurized pneumatic collection system with different numbers of leaves

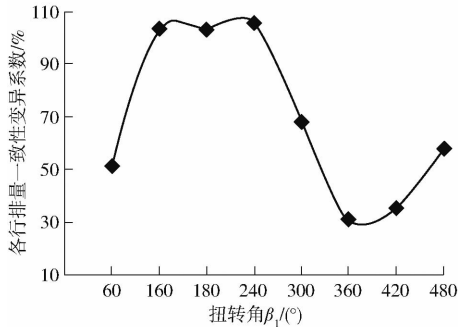
对从输种管输出的荞麦种子具有导流和减速作用；随着叶片数的增加，荞麦种子逐渐在螺旋式增压管

管壁积聚；不同叶片数的螺旋增压式气力集排系统中的分配器存在荞麦种子堆积现象；3 叶螺旋增压

式气力集排系统中荞麦种子速度高于其他结构,在分配器中的种子堆积低于其他结构,具有较好的种子分布。由 YAN 等<sup>[29]</sup>关于不同叶片数螺旋管旋流衰减强度的研究可知,3 叶螺旋管的旋流强度低于其他叶片数的螺旋管。旋流强度越大,荞麦种子的轴向速度减小,径向速度增加,导致荞麦种子在管内的滞留时间增加,进入分配器的荞麦种子速度减小,形成堆积。图 6a 为在不同叶片数下对螺旋增压式气力集排

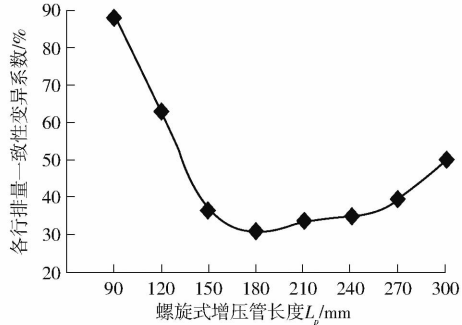


(a)  $L_p=180\text{ mm}$ ,  $\beta_1=360^\circ$ ,  $v_a=26\text{ m/s}$

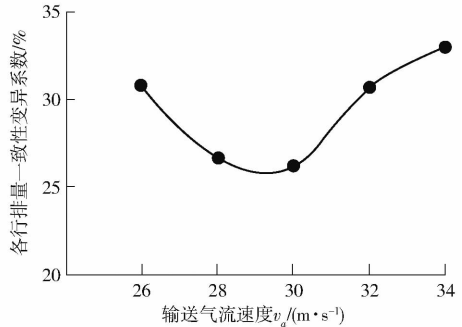


(c)  $N=3$ ,  $L_p=180\text{ mm}$ ,  $v_a=26\text{ m/s}$

系统播种均匀性的量化,3 叶螺旋增压式气力集排系统各行排量一致性变异系数相对于其他结构是最小的,故选择对 3 叶螺旋式增压管进行结构优化。由图 6 可知,叶片数、输送气流速度、扭转角和螺旋式增压管长度的变化使各行排量一致性变异系数发生了改变;叶片数为 3、输送气流速度为 28 ~ 30 m/s、扭转角为 360° ~ 420° 和螺旋式增压管长度为 180 ~ 240 mm 时,荞麦各行排量一致性变异系数最小。



(b)  $N=3$ ,  $\beta_1=360^\circ$ ,  $v_a=26\text{ m/s}$



(d)  $N=3$ ,  $L_p=180\text{ mm}$ ,  $\beta_1=360^\circ$

图 6 单因素试验中各因素对各行排量一致性变异系数的影响

Fig. 6 Influence of each factor on coefficient of variation of displacement consistency in single factor test

### 3.3.2 最陡爬坡试验

基于响应面法的中心复合设计试验不能精确地考察大范围数据,通常采用最陡爬坡试验确定响应面中心和所在最优范围。在单因素试验的基础上,对螺旋式增压管长度  $L_p$ 、扭转角  $\beta_1$  和输送气流速度  $v_a$  进行最陡爬坡试验,以各行排量一致性变异系数  $Y_1$  为试验指标,确定仿真试验参数最优范围区间。最陡爬坡试验设计方案及结果如表 3 所示,可以得

表 3 最陡爬坡试验设计及结果

Tab. 3 Steepest climbing test design and results

序号	因素			$Y_1/\%$
	$L_p/\text{mm}$	$\beta_1/(\text{degrees})$	$v_a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
1	180	300	26	67.92
2	190	320	27	54.94
3	200	340	28	62.40
4	210	360	29	32.90
5	220	380	30	10.98
6	230	400	31	20.57
7	240	420	32	43.86

出;5 号试验的各行排量一致性变异系数  $Y_1$  最小,确定最优参数范围在 5 号附近,由此将 5 号作为中心点,4 号、6 号作为低、高水平进行后续的中心复合设计试验。

### 3.3.3 中心复合设计试验

以最陡爬坡试验中 5 号试验参数作为中心点(0),4 号和 6 号试验分别作为低水平(-1)、高水平(1)设计中心复合设计试验,试验因素及编码如表 4 所示。具体试验方案和结果如表 5 所示,其中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为因素编码值。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Experimental factors and codes

编码	因素		
	$L_p/\text{mm}$	$\beta_1/(\text{degrees})$	$v_a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
-1.682	203.18	346.36	28.32
-1	210.00	360.00	29.00
0	220.00	380.00	30.00
1	230.00	400.00	31.00
1.682	236.82	413.64	31.68

表 5 试验设计方案与结果  
Tab. 5 Test design and results

试验序号	因素			$Y_1/\%$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
1	-1	-1	-1	32.90
2	1	-1	-1	60.03
3	-1	1	-1	16.15
4	1	1	-1	50.46
5	-1	-1	1	34.18
6	1	-1	1	47.07
7	-1	1	1	20.42
8	1	1	1	20.57
9	-1.682	0	0	16.13
10	1.682	0	0	21.54
11	0	-1.682	0	51.46
12	0	1.682	0	42.11
13	0	0	-1.682	13.65
14	0	0	1.682	16.85
15	0	0	0	12.07
16	0	0	0	10.98
17	0	0	0	15.93

### (1) 试验结果回归分析

在 Design-Expert 10.0 软件中进行多元回归分析,通过试验结果的方差分析可得荞麦各行排量一致性变异系数  $Y_1$  的回归方程,回归方程的显著性检验如表 6 所示。各因素对荞麦各行排量一致性变异系数  $Y_1$  的回归方程为

$$Y_1 = 12.52 + 6.12X_1 - 6.03X_2 - 2.34X_3 - 0.70X_1X_2 - 6.05X_1X_3 - 1.74X_2X_3 + 3.71X_1^2 + 13.59X_2^2 + 2.44X_3^2 \quad (9)$$

表 6 回归方程方差分析

Tab. 6 Regression equation analysis of variance

方差来源	方差和	自由度	均方差	F	P
模型	3 516.95	9	390.77	4.27	0.034 5 *
$X_1$	511.49	1	511.49	5.58	0.050 1 *
$X_2$	496.02	1	496.02	5.41	0.052 9 *
$X_3$	74.60	1	74.60	0.81	0.396 9
$X_1X_2$	3.86	1	3.86	0.04	0.843 1
$X_1X_3$	292.82	1	292.82	3.20	0.117 0
$X_2X_3$	24.29	1	24.29	0.27	0.622 5
$X_1^2$	155.37	1	155.37	1.70	0.234 1
$X_2^2$	2 083.34	1	2 083.34	22.74	0.002 0 **
$X_3^2$	67.39	1	67.39	0.74	0.419 5
残差	641.35	7	91.62		
失拟项	627.82	5	125.56	18.56	0.051 9
纯误差	13.53	2	6.77		
总和	4 158.31	16			

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

由表 6 可知,该模型  $P < 0.05$ ,说明该模型的拟

合度显著, $X_2^2$ 对 $Y_1$ 影响极显著( $P < 0.01$ ), $X_1$ 、 $X_2$ 对 $Y_1$ 影响显著( $P < 0.05$ )。对回归方程进行失拟性检验, $P$ 值为 0.051 9,不显著,表明不存在其他影响荞麦各行排量一致性变异系数的主要因素。 $X_1^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_1X_3$ 的 $P$ 值均大于 0.1,说明螺旋式增压管长度和输送气流速度的交互作用对 $Y_1$ 影响不显著,两因素交互作用弱,不会对排种均匀性产生交互影响。将表 6 中螺旋式增压管长度、扭转角、输送气流速度不显著的交互作用项的自由度及回归方程并入残差项后荞麦各行排量一致性变异系数  $Y_1$  的回归方程为

$$Y_1 = 12.52 + 6.12X_1 - 6.03X_2 - 2.34X_3 + 13.59X_2^2 \quad (10)$$

由式(10)可知,各因素对荞麦各行排量一致性变异系数影响的主次顺序为扭转角、螺旋式增压管长度、输送气流速度。

### (2) 参数优化

以荞麦各行排量一致性变异系数  $Y_1$  最小为优化目标,在各试验因素的取值范围内,通过 Design-Expert 10.0 软件求解,设定目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(L_p, \beta_1, v_a) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 210 \text{ mm} \leq L_p \leq 230 \text{ mm} \\ 360^\circ \leq \beta_1 \leq 400^\circ \\ 29 \text{ m/s} \leq v_a \leq 31 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)求解得到螺旋式增压管最优结构参数组合为:螺旋式增压管长度为 210.00 mm、扭转角为 383.02°、输送气流速度为 29.30 m/s,荞麦各行排量一致性变异系数最小为 8.40%。

根据实际情况,将螺旋式增压管最优结构参数进行圆整,取螺旋式增压管长度为 210 mm,扭转角为 383°,输送气流速度为 29.30 m/s,进行 3 次重复试验,计算得到各行排量一致性变异系数为 9.83%,与优化目标值误差较小,验证了螺旋式增压管最优结构参数下仿真试验结果与优化结果的一致性。图 7 为最优结构螺旋式增压管的荞麦气力集排系统种子分布,其中分配器中的荞麦种子分布均匀,表明结构优化较为成功。

## 4 台架验证试验

为了验证仿真试验的最佳参数组合下螺旋增压式荞麦气力集排系统的工作性能,并与前人研究的波纹式增压管、窝眼式增压管进行对比,搭建试验台架,进行台架试验,验证其可行性和实用性。

### 4.1 试验设备

如图 8 所示,采用 PLA 材料进行 3D 打印得到荞麦气力集排系统的关键部件:混合器、输种管、螺

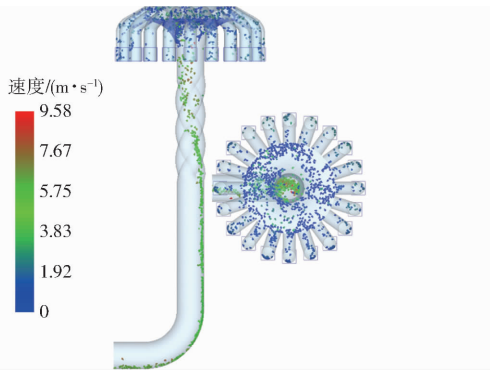


图7 最优结构螺旋式增压管的荞麦气力集排系统种子分布图

Fig.7 Seed distribution of buckwheat pneumatic collecting and discharging system with optimal structure spiral booster pipe

旋式增压管、波纹式增压管、窝眼式增压管、分配器。搭建试验台架如图9所示。

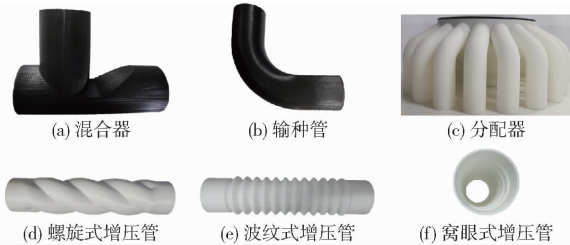


图8 荞麦气力集排系统关键部件

Fig.8 Key components of buckwheat pneumatic collecting and discharging system

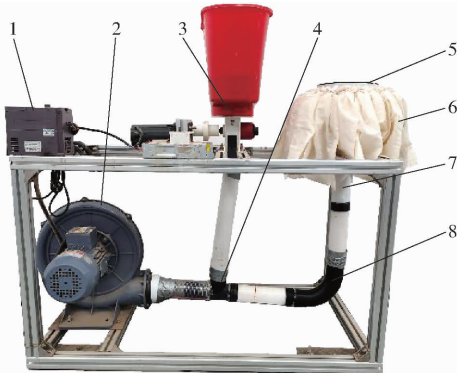


图9 试验台架

Fig.9 Test bed

1. 调速器 2. 风机 3. 供种装置 4. 混合器 5. 分配器 6. 收集袋 7. 螺旋式增压管 8. 输种管

#### 4.2 试验方案

在输送气流速度为  $29.3 \text{ m/s}$ 、外槽轮排种器转速为  $60 \text{ r/min}$  的情况下,进行排种性能试验,验证仿真试验结果的准确性。试验材料包括气力集排系统台架、荞麦种子(西农9976)、种子收集袋、电子天平、秒表、转速仪和风速仪等。试验开始,将风速调节为  $29.30 \text{ m/s}$ ,外槽轮排种器转速调节为  $60 \text{ r/min}$ ,在排种和风速稳定情况下,用收集袋在分

配器的20个出口接取30s排出的种子,收集结束,停止试验台运行。称其质量,重复5次试验,求平均值。利用式(8)计算各行排量一致性变异系数。

#### 4.3 试验结果与分析

不同结构形式增压管的荞麦气力集排系统台架试验结果如图10所示,计算得到螺旋式增压管的荞麦气力集排系统各行排量一致性变异系数为  $5.58\%$ ,波纹式增压管的荞麦气力集排系统各行排量一致性变异系数为  $6.85\%$ ,窝眼式增压管的荞麦气力集排系统各行排量一致性变异系数为  $9.65\%$ 。试验结果表明:①在螺旋式增压管扭转角为  $383^\circ$ 、长度为  $210 \text{ mm}$ 、输送气流速度为  $29.30 \text{ m/s}$  时,荞麦各行排量一致性变异系数为  $5.58\%$ ,螺旋增压式气力集排系统台架试验结果与仿真试验结果相差  $4.25$  个百分点,表明结构优化较为合理,CFD-DEM耦合仿真分析方法可以用于荞麦气力集排系统核心工作部件的结构优化。②螺旋式增压管的荞麦气力集排系统各行排量一致性变异系数较波纹式增压管、窝眼式增压管小,表明该结构适用于荞麦气力集排系统。

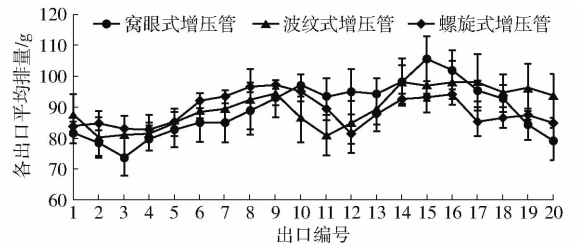


图10 台架试验结果

Fig.10 Bench experiment result

#### 5 结论

(1)设计了一种新型的用于气力集排系统的螺旋式增压管,确定了不同叶片数的螺旋式增压管和输种管的关键参数,确定输种管直径为  $60 \text{ mm}$ ;应用CFD-DEM耦合仿真方法,通过单因素试验确定叶片数为3、输送气流速度为  $28 \sim 30 \text{ m/s}$ 、扭转角为  $360^\circ \sim 420^\circ$  和螺旋式增压管长度为  $150 \sim 180 \text{ mm}$  时,荞麦各行排量一致性变异系数最小;通过最陡爬坡试验确定了中心复合设计试验因素编码范围。

(2)应用CFD-DEM耦合仿真方法,通过中心复合设计试验建立了螺旋式增压管长度、扭转角、输送气流速度与荞麦各行排量一致性变异系数的回归方程。仿真试验表明:扭转角对各行排量一致性变异系数影响最显著;各行排量一致性较优参数组合为:螺旋式增压管长度  $210 \text{ mm}$ 、扭转角  $383^\circ$ 、输送气流速度  $29.30 \text{ m/s}$ ;较优参数组合下荞麦各行排量一致性变异系数仿真值与计算值误差为  $1.43\%$ ,验证



了仿真试验结果与优化结果的一致性。

(3)通过气力集排系统试验台架开展了不同型式增压管性能验证试验,台架试验表明:采用螺旋式、波纹式和窝眼式增压管的荞麦气力集排系统各行排量一致性变异系数分别为 5.58%、6.85% 和

9.65%,最优参数组合条件下螺旋式增压管的仿真结果与台架验证试验结果相差 4.25 个百分点。本文提出的螺旋式增压管较传统增压管,增强了气种混合均匀性,提高了气力集排系统的作业质量,可为气力集排系统设计提供技术支撑。

### 参 考 文 献

- [1] 柴岩,王鹏科,冯佰利. 中国小杂粮产业发展指南[M]. 杨凌:西北农林科技大学出版社,2007.
- [2] 王兆辉. 荞麦的生长习性及其高产种植技术[J]. 现代畜牧科技,2021(5):47-48.
- [3] 李明生,叶进,李登,等. 基于离散单元法的荞麦播种机排种器设计与试验[J]. 西南大学学报(自然科学版),2019,41(4):78-85.  
LI Mingsheng, YE Jin, LI Deng, et al. Design and test of a seed metering device for buckwheat seeder based on the discrete element method[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41(4): 78-85. (in Chinese)
- [4] LEI X, HU H, WU W, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203(1): 22-33.
- [5] MUDARISOV S, BADRETDINOV I, RAKHIMOV Z, et al. Numerical simulation of two-phase "Air-Seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105151.
- [6] LU B, NI X, LI S, et al. Simulation and experimental study of a split high-speed precision seeding system[J]. Agriculture, 2022, 12: 1037.
- [7] 杨慧,刘立晶,周军平,等. 气流输送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究,2013,35(12):216-220.  
YANG Hui, LIU Lijing, ZHOU Junping, et al. Analysis of air seed drill current situations and using situation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 216-220. (in Chinese)
- [8] 雷小龙,廖宜涛,丛锦玲,等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12):16-26.  
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16-26. (in Chinese)
- [9] HU H, ZHOU Z, WU W, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD-DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246-259.
- [10] 戴亿政,罗锡文,张明华,等. 气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(10):1-8.  
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and experiments of the key components for centralized pneumatic rice dry direct seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 1-8. (in Chinese)
- [11] 鲍余峰,王方艳,江景涛,等. 蔬菜种子精密播种装备研究进展与发展趋势[J]. 农机化研究,2021,43(4):247-254.  
BAO Yufeng, WANG Fangyan, JIANG Jingtao, et al. Research progress and development trend of precision seeding equipment for vegetable seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 247-254. (in Chinese)
- [12] 曾山,郑振晖,杨洲,等. 水稻直播机气流式分层施肥系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(4):1-9.  
ZENG Shan, ZHENG Zhenhui, YANG Zhou, et al. Design and test of airflow layered fertilizer system for rice direct seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 1-9. (in Chinese)
- [13] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(13):1-10.  
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Structural optimization and experiment of pneumatic centralized fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 1-10. (in Chinese)
- [14] GAO X, XIE G, XU Y, et al. Application of a staggered symmetrical spiral groove wheel on a quantitative feeding device and investigation of particle motion characteristics based on DEM[J]. Powder Technology, 2022, 407: 2-13.
- [15] 王磊,廖宜涛,廖庆喜,等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):75-85.  
WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75-85. (in Chinese)
- [16] LEI X, LIAO Y, LIAO Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29-39.
- [17] 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)
- [18] 王磊,廖宜涛,万星宇,等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):68-79,97.  
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68-79, 97. (in Chinese)

- agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 313–322. (in Chinese)
- [24] WANG Lijun, WU Baoxin, WU Zhenchao, et al. Experimental determination of the coefficient of restitution of particle-particle collision for frozen maize grains[J]. Powder Technology, 2018, 338: 263–273.
- [25] HAMZAH M, BEAKAWI A H, OMAR S, et al. A review on the angle of repose of granular materials [J]. Powder Technology, 2018, 330: 397–417.
- [26] XIA Rui, LI Bo, WANG Xuewen, et al. Measurement and calibration of the discrete element parameters of wet bulk coal[J]. Measurement, 2019, 142: 84–95.
- [27] 王美美, 王万章, 杨立权, 等. 基于 EDEM 的玉米子粒建模方法的研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(1): 80–84. WANG Meimei, WANG Wanzhang, YANG Liquan, et al. Research of discrete element modeling method of maize kernel based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(1): 80–84. (in Chinese)
- [28] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294–300. LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 294–300. (in Chinese)
- [29] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 227–235. ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 227–235. (in Chinese)

(上接第 45 页)

- [19] YUAN W, JI C, LIU Z, et al. Influencing factors of the distribution accuracy and the optimal parameters of a pneumatic fertilization distributor in a fertilizer applicator[J]. Agronomy, 2022, 12: 2222.
- [20] 雷小龙, 廖宜涛, 王磊, 等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 67–75. LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation of gas–solid two-phase flow and parameter optimization of pressurized tube of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67–75. (in Chinese)
- [21] YATSKUL A, LEMIERE J, COINTAULT F. 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.
- [22] 王磊, 廖宜涛, 王星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 43–53. WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on distributor device of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43–53. (in Chinese)
- [23] 李衍军, 赵金辉, 赵佳乐, 等. 基于鲫鱼流线的气送式排种系统分配器仿生设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 80–87. LI Yanjun, ZHAO Jinhui, ZHAO Jiale, et al. Biomimetic design and experiment of distributor of pneumatic seeding system based on crucian curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 80–87. (in Chinese)
- [24] 李衍军, 刘瑞, 刘春晓, 等. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 54–61, 133. LI Yanjun, LIU Rui, LIU Chunxiao, et al. Simulation and test of seed velocity coupling in seed tube of pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 54–61, 133. (in Chinese)
- [25] ELYYAN M, ROZATI A, TAFTI D. Investigation of dimpled fins for heat transfer enhancement in compact heat exchangers [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2008, 51(11–12): 2950–2966.
- [26] WANG Y, HE Y, LEI Y, et al. Heat transfer and hydrodynamics analysis of a novel dimpled tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1273–1281.
- [27] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [28] LI G, LI H, LI X, et al. Establishment and calibration of discrete element model for buckwheat seed based on static and dynamic verification test[J]. Agriculture, 2023, 13: 1024.
- [29] YAN T, QU J, SUN X, et al. Numerical evaluation on the decaying swirling flow in a multi-lobed swirl generator[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14: 1198–1214.