

油菜气动射播排种器设计与试验

廖庆喜^{1,2} 邓承诺¹ 杨恒¹ 刘凯文¹ 李晓冉¹ 王磊¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对常规油菜联合精量播种机触土部件易粘附土壤和双圆盘开沟器等导致开种沟装置开种沟深度不稳定、出苗不均匀等问题, 本文设计了一种负压吸种、正压高速射种的油菜气动射播排种器。确定了喷嘴半径、加速管半径、加速管长度、加速管与喷嘴距离等关键参数, 分析了喷射器结构与种子速度对流场总压力损失的影响因素; 构建了种子与射播排种器第2次碰撞方程和动力学方程, 分析了射播排种器混合腔内涡流面积对种子第2次碰撞后轨迹的影响; 应用 CFD-DEM 耦合仿真开展了三因素三水平正交试验, 分别构建喷射系数、射出平均速度、混合腔涡流面积比回归模型, 得到最优结构参数为: 喷嘴半径 6.9 mm、嘴管距 13.8 mm、加速管半径 10.36 mm, 此时喷射系数为 0.314, 种子射出平均速度为 20.92 m/s, 混合腔涡流面积比为 21.15%; 台架验证试验结果表明, 较优结构参数下, 未出现种子滞留现象, 同时确定了土壤含水率为 30% 和 45% 时, 风机速度为 35 m/s、射播排种器距离土壤高度为 150 mm 时, 排种性能较优; 当土壤含水率为 35% 和 40% 时, 风机速度为 40 m/s 和射播排种器距离土壤高度为 150 mm, 排种性能较优。田间试验结果表明, 当土壤含水率为 38.5% 时, 油菜各行植株分布在种行宽度为 120 mm 内的平均概率为 80.12%, 植株密度为 66 株/m², 满足油菜精量播种要求。

关键词: 油菜; 气动射播排种器; 喷嘴; 加速管; 二次碰撞; CFD-DEM

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)10-0044-13

OSID:



Design and Experiment of Pneumatic Shooting Seeder for Rapeseed

LIAO Qingxi^{1,2} DENG Chengnuo¹ YANG Heng¹ LIU Kaiwen¹ LI Xiaoran¹ WANG Lei¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering the problem that the inconsistent furrow depths generated by soil contact parts plugging and double disc openers of existing precision planter for rapeseed in the furrows, resulting in uneven emergence, a pneumatic shooting seeder for rapeseed with seed extraction with negative pressure suction and positive pressure high-speed seeding was designed. The key parameter ranges of nozzle radius, accelerating pipe radius, accelerating pipe length and distance between accelerating pipe and nozzle were determined. The effects of seeder structure and seed velocity on the total pressure loss of flow field were also analyzed. The dynamic model and the corresponding collision equations for the second collision between seeds and seeder was established. The influence of the vortex area in the mixing chamber of the seeder on the trajectory of seeds after their second collision was analyzed. A three-factor and three-level orthogonal experimental study was conducted using CFD-DEM coupled simulation. Regression models were established for the ejection coefficient, seed average shooting velocity, and vortex area ratio in the mixing chamber. It was determined that when the nozzle radius was 6.9 mm, distance between accelerating pipe and nozzle was 13.8 mm, and accelerating pipe radius of 10.36 mm were the optimal structural parameters, The injection coefficient was 0.314, the seed average shooting velocity was 20.92 m/s, and the vortex area ratio in the mixing chamber was 21.15%. It was verified by bench test that there was no seed retention phenomenon under the optimal structural parameters of the seeder. And it also determined the following optimal operating conditions: with soil moisture contents of 30% and 45%, the fan speed was set to be 35 m/s and the height of the seeder above the soil surface was 150 mm; with

收稿日期: 2025-01-27 修回日期: 2025-03-12

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目 (CASR-12-27)

作者简介: 廖庆喜 (1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

soil moisture contents of 35% and 40%, the fan speed was set to be 40 m/s and the seeder height was maintained at 150 mm. Field experiment results showed that when the soil water content was 38.5%, the average probability of each line of rapeseed distributed within 120 mm seed row width was 80.12%, and the plant density was 66 plants/m², which met the requirements of precision sowing of rapeseed.

Key words: rapeseed; pneumatic shooting seeder; nozzle; accelerating pipe; second collision; CFD - DEM

0 引言

长江流域是我国主要的冬油菜种植区,土壤具有黏重板结等特点^[1-4]。常规的油菜联合精量直播机在田间工作时,触土部件堵土和开种沟装置由于机具振动、上下起伏导致种沟深浅不一,内层土壤暴露后经阳光照射水分蒸发后,种沟内土壤含水状态不一致,造成后续种沟内种子过淹、过早,进一步导致油菜长势差异较大等问题,制约了油菜机械化播种发展^[5-6]。使用非接触式气动射播播种的短程油菜播种形式,减少触土部件使用,是解决粘重土壤影响播种质量的一个关键方向^[7]。

近年来,国内外学者在射播排种器方面进行了研究。TOGASHI 等^[8]研制了一种水稻机械式射播排种器,径向进种并由高速旋转的齿状排种轮甩入排种管排出,解决了稻种播种深度不一致的问题;何伟灼等^[9]研制了一种无人机点射式水稻播种装置,解决了无人机携带高压气瓶射种效率较低的问题;李汉青等^[10]研制了一种双轨道弹射式水稻精量直播排种器,利用与弹簧配合的强制投种机构将水稻射入种沟,满足水稻精量直播要求;王英博等^[11]研制了一种非接触式小麦机械射播排种器,解决了小麦播种机覆土后种子深度均匀性差的问题,同时也简化了播种工艺流程。为解决机械式射播排种器破损率高的问题,气动射播排种器是关键,WANG 等^[12]针对小麦机械射播排种器内部小麦与排种器内部碰撞问题进行改进,研制了一种自吸式小麦射播排种器,减少了麦种在排种器内部碰撞;Dendra Systems 公司研制了一种搭载气动射播排种器的无人机,搭载高压气瓶为射播动力源,可实现将种子高速射出,适用于漏播补种;王超等^[13]开展了入射角度对气力射播小麦种粒入土参数影响的试验研究,得出随着入射角度增加,相同加速气压下小麦种粒射播速度垂直分量和射播深度不断增加,小麦种粒触土后产生水平滑移和弹跳的几率变小;基于小麦射种原理,WANG 等^[14]研制了一种小麦气动射播排种器,使用高压气体将麦种喷射而出,平均播种深度为 19.15 mm。综上,目前学者针对水稻、小麦等较为硬质和质量较大种子开展了一系列射播排种器深入研究,可较好地实现播种深度稳定可控,但鲜见针

对粒径小、质量轻、易破损油菜种子气动射播排种器研究。气动射播排种器相较于传统油菜机械式排种器,减少了种子与刚性零件接触及零部件对种子主动机械破坏作用,进而减少油菜种子破损率。同时气动射播排种器不需要开种沟装置,可根据不同土壤含水率匹配工作参数,稳定将油菜种子射入土壤中,消除了开种沟装置对土壤扰动连带作用,进一步提高油菜播种深度稳定性。

针对现有常规油菜联合精量直播机触土易粘附土壤导致开种沟装置种沟深度不稳定的问题,本文设计一种气动射播排种器,基于多相流喷射器原理,阐述气动高速射种原理,开展充种阶段种子与射播排种器碰撞前后的运动学和动力学分析,并结合 CFD - DEM 仿真和台架试验研究种子在射播器内部运动轨迹和种子射播效果,明确对射种性能影响的主要因素,并确定最优结构参数和最优工作参数,以期对油菜播种方式提供一种新思路。

1 结构和工作原理

1.1 总体结构

油菜气动射播精量联合直播机结构如图 1 所示,主要由旋耕装置、排肥装置、肥箱、排种电机、机械离心式供种装置、油菜气动射播排种器等组成,其中油菜气动射播排种器是实现油菜播种深度稳定的核心装置(图 2),主要由涵道风机、风机固定架、上气道主体、加速管、夹盖等组成。其中涵道风机、上气道主体和加速管是实现油菜射播高速稳定射出和射播入土深度稳定可控的关键部件。

1.2 工作原理

油菜气动射播排种器工作过程主要包括充种、吸种、混种、加速射种 4 个环节。

根据喷射器多相流原理,供种离心式排种器与射播排种器工作时,风机产生的射播气流通过渐缩段时,由于渐缩段截面不断减小,输送气流的静压转变为动压,气流速度不断增加;种子由离心式供种装置导种管充入射播器入种口,完成充种阶段;高速气流进入混合腔后,混合腔内部和渐缩式供种道由上至下压力逐渐降低,种子在重力与负压吸力作用下进入混合腔,完成吸种阶段;风机产生的射播气流经渐缩式气道、喷气嘴与种子在混合腔混合后,逐渐进

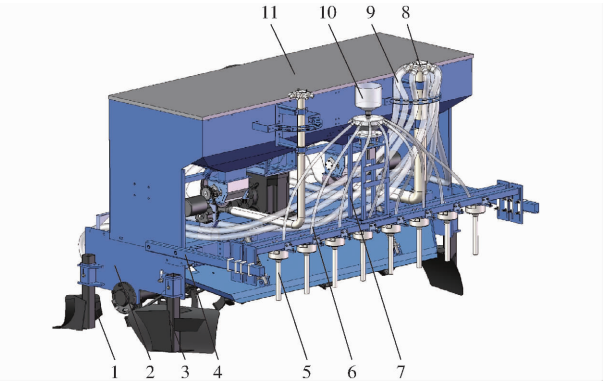


图 1 油菜气动射播精量联合直播机结构示意图

Fig.1 Structural diagram of precision pneumatic shooting planter for rapeseed

1. 开畦沟前犁 2. 旋耕装置 3. 开畦沟后犁 4. 机架 5. 气动射播排种器 6. 导种管 7. 机械离心式供种装置 8. 排肥器 9. 导肥管 10. 机械离心式供种装置 11. 肥箱

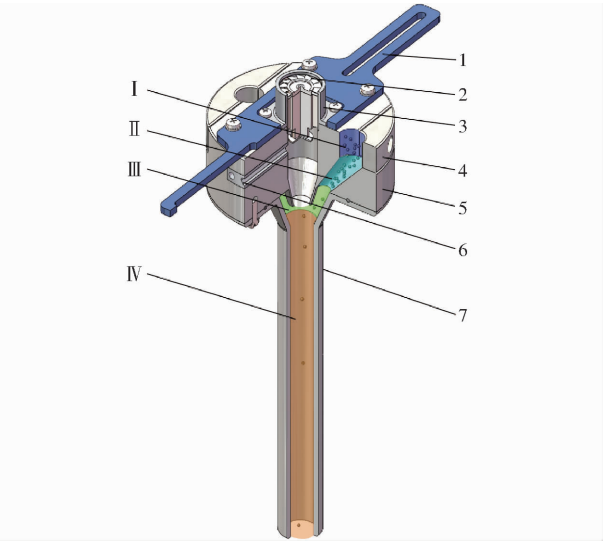


图 2 射播排种器工作原理图

Fig.2 Working principle of shooting seeder

1. 可调架 2. 涵道风机 3. 风机固定架 4. 夹盖 5. 夹线器 6. 上气道主体 7. 加速管 I. 充种区 II. 吸种区 III. 混种区 IV. 加速射种区

入高速气流并被带入加速管中,完成混种阶段;由于加速管截面大于喷嘴,气流速度降低,静压升高,种子在加速输送气流作用下速度不断增加直到被喷出射入土壤内,完成加速射种阶段和整个排种过程,排种器结构如图 3 所示。

2 关键部件设计

2.1 喷嘴

气室是油菜射播排种器核心部件,参照文献[15],并结合油菜种子物理特性及其播量确定主要结构参数。其中喷嘴是射播排种器关键结构,是加速并稳定风机气流、使混合腔和射播器入种口产生负压实现吸种功能的关键。

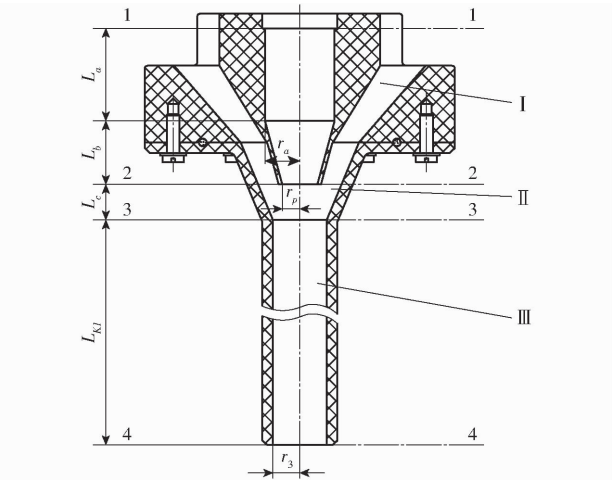


图 3 射播排种器剖视结构图

Fig.3 Structure diagram of cutaway view for shooting seeder

I. 渐缩式供种道 II. 混合腔 III. 加速管气道

油菜播量 m 为 $3.75 \sim 7.5 \text{ kg/hm}^2$, 机具幅宽 L 为 2.3 m , 播种行数 a 为 8 行, 在田间机组前进速度 v 约为 4.32 m/s , 每行每秒播量 m_t 即为每个油菜射播排种器油菜种子流量, 其计算式为

$$m_t = \frac{mLv}{666.67a} \tag{1}$$

射播排种器工作气体为空气,取工作气体绝热指数 k_p 为 1.4 。工作气体动力由涵道风机提供,其一直处于亚临界膨胀比状态,工作喷嘴定用锥状喷嘴^[16-17],喷嘴出口截面积 f_{p1} 计算式为

$$f_{p1} = \frac{G_p a_{p*}}{k_p \Pi_{p*} p_p q_{pH}} \tag{2}$$

其中
$$\frac{1}{\Pi_{p*}} = \frac{1}{\left(\frac{2}{k_p + 1}\right)^{\frac{k_p}{k_p - 1}}} \tag{3}$$

$$a_{p*} = \sqrt{\frac{2k_p}{k_p + 1} p_p v_p} \tag{4}$$

$$v_p = \frac{R_p T_p}{p_p} \tag{5}$$

式中 Π_{p*} ——工作气体临界相对压力
 G_p ——工作气体流量, kg/s
 a_{p*} ——工作气体临界速度,取 313.219 m/s
 p_p ——工作气体压力, Pa
 q_{pH} ——工作气体折算质量速度
 v_p ——工作气体比容, m^3/kg
 R_p ——工作气体常数,取 $287 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
 T_p ——工作气体热力学温度,取 293 K

风机直径为 29 mm , 经过 Fluent 仿真得到工作气体速度 w_p 为 $30 \sim 40 \text{ m/s}$ ^[18] 时相应的工作气体压力 p_p 、工作气体流量 G_p , 参照文献[15]可得折算相对压力 Π_{pH} 、等熵速度 λ_{pH} 、折算质量速度 q_{pH} 、相对

密度 ε_{pH} 如表 1 所示。

表 1 工作气体速度为 30 ~ 40 m/s 时参数

Tab.1 Working gas parameters of velocity at 30 ~ 40 m/s

$w_p/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$p_p/$ MPa	$G_p/$ ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	Π_{pH}	λ_{pH}	q_{pH}	ε_{pH}
30	0.109	20.9	0.927	0.36	0.538	0.947
35	0.111	24.4	0.910	0.38	0.564	0.918
40	0.115	27.9	0.878	0.48	0.687	0.872

由式(3)~(5)可知,工作气体流量、压力、工作气体折算质量速度是喷嘴压缩工作气体过程中决定喷嘴出口面积的重要因素,由表 1 和式(5)可得出风机风速 30、35、40 m/s 时工作气体比容 v_p , 计算得满足工作气体速度 w_p 为 30 ~ 40 m/s 的喷嘴半径 r_p 为 6.90 ~ 7.24 mm。

2.2 加速管

加速管是保证种子在射种气流中高速定向射出播种的关键部件,可影响射种气流速度均匀度和压力分布,并影响射播排种器射种速度。为进一步提高射种速度使用无扩散器式加速管,射种排种器最佳截面比计算式为

$$\left(\frac{f_3}{f_{p1}}\right)_B = \frac{2\varepsilon_{p*}q_{pH}\left[(1+u)^2\frac{v_e}{v_p} - nu^2(\varphi_K\varphi_c - 0.5)\frac{v_H}{v_p}\right]}{\varphi_p\varphi_K\lambda_{pH}}$$

(6)

其中

$$\begin{cases} v_H = v_{H,r}\frac{u_r}{u_r + u_T} + v_T\frac{u_T}{u_r + u_T} \\ v_e = v_{e,r}\frac{1 + u_r}{1 + u_r + u_T} + v_T\frac{u_T}{1 + u_r + u_T} \\ n = \frac{f_3/f_{p1}}{f_3/f_{p1} - 1} \\ u = u_T + u_r \end{cases} \quad (7)$$
$$\begin{cases} u_T = \frac{G_T}{G_p} \\ G_p = Aw_1\frac{1}{v_p} \end{cases} \quad (8)$$

式中 f_3 ——加速管截面积, mm^2
 ε_{p*} ——工作气体临界相对密度
 u ——总喷射系数
 v_e ——喷射器气体和种子混合比容, m^3/kg
 $v_{e,r}$ ——喷射器出口气体比容, m^3/kg
 v_T ——引射油菜种子比容, 取 $0.0009\text{ m}^3/\text{kg}$
 w_1 ——1-1 截面进风口速度, m/s
 A ——进风口截面积
 n ——加速管截面积与引射流体在加速管入口截面所占面积之比
 φ_p ——喷嘴速度系数

φ_K ——加速管速度系数
 φ_c ——混合腔速度系数
 v_H ——引射介质比容, m^3/kg
 $v_{H,r}$ ——引射气体比容, 取 $0.83\text{ m}^3/\text{kg}$
 u_r ——按气体计喷射系数
 u_T ——按固体计喷射系数
计算得 u_T 为 0.004 ~ 0.007。

气体计喷射系数目标 $u_r = 0.2$, 目标喷射排种器出口处气压为 $p_{c,r} = 1.02p_H$, 由上述数据得到 v_Tu_T/v_p 均极小于 $v_{c,r}(1 + u_r)/v_p$ 和 $v_{H,r}/v_p$, 即可忽视 v_Tu_T/v_p , 由式(6)和式(7)可得

$$\begin{cases} \frac{f_3}{f_{p1}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ a = \varphi_p\varphi_K \\ b = -\left\{\varphi_p\varphi_K + 2\varepsilon_{pH}\left[(1+u)\frac{v_{e,r}(1+u_r)}{v_p} - u(\varphi_K\varphi_c - 0.5)\frac{u_rv_{H,r}}{v_p}\right]\right\} \\ c = 2\varepsilon_{pH}(1+u)\frac{v_{c,r}(1+u_r)}{v_p} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知, f_3/f_{p1} 截面积比主要与 u 、 u_r 、 $v_{e,r}$ 、 v_p 、 φ_p 、 φ_K 和 φ_c 相关。由式(3)、(8)可计算得加速管半径 r_3 为 10 ~ 12 mm。

为检验目标喷射排种器出口气压为 $p_{e,r} = 1.02p_H$ 的正确性, 射种排种器基本性能方程为

$$\begin{cases} \frac{\Delta p_{K,r}}{p_H} = \frac{B\varphi_p^2\varphi_K^2\lambda_{pH}^2}{\left[\frac{v_e}{v_p}(1+u)^2 - (\varphi_K\varphi_c - 0.5)\frac{v_H}{v_p}nu^2\right]} \\ B = \frac{k_p}{2(k_p + 1)}\frac{1}{\Pi_{pH}} \\ \Delta p_{K,r} = p_{e,r} - p_H \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\Delta p_{K,r}$ ——加速管变压, Pa
 p_H ——种子入口处压力, Pa
 B ——性能系数

结合式(7)、(9)得射种排种器基本性能系数为 0.023 ~ 0.042, 得出射种排种器出口气压 $p_{e,r}$ 为 $(1.023 \sim 0.042)p_H$, 符合目标射种排种器出口气压。

加速管长度通常取为 6 ~ 10 倍加速管直径^[19], 即取 L_K 为 120 ~ 240 mm。

$$L_K = (6 \sim 10)d_3 \quad (11)$$

式中 d_3 ——加速管直径, mm

为得到较高的种子射出速度, 即种子于加速管内部加速时间更长, 取加速管长度最大值, 为

240 mm。

加速管与喷嘴距离 L_e 通常取为 1~2 倍喷嘴半径^[19], 取 L_e 为 13.8~28.9 mm。

2.3 喷射器结构对流场的影响

喷射器结构主要影响喷射气流的压力损失, 总压力损失主要由渐缩式喷嘴段压力损失、喷嘴至混合腔扩大压力损失、加速管沿程压力损失组成。根据伯努利方程和功能原理^[20-21], 可得渐缩式喷嘴段、混合腔段、加速管段各截面间的压降方程。

进风口与渐缩式喷嘴段压力损失为

$$\begin{cases} \Delta p_{ab} = p_1 - p_2 \\ Y_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = Y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_{2P}^2}{2g} + h_a + h_b \\ h_a = \lambda_a \frac{L_a}{d_a} \frac{w_1^2}{2g} \\ h_b = \xi_b \frac{w_{2P}^2}{2g} \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\Delta p_{ab} = \rho g Y_2 - \rho g Y_1 + \left(\lambda_a \frac{L_a}{d_a} - 1 \right) \frac{\rho w_1^2}{2} + (1 + \xi_b) \frac{\rho w_{2P}^2}{2} \quad (13)$$

式中 Δp_{ab} ——进风口至渐缩式喷嘴段压降, Pa

p_1 ——1-1 截面进风口压力, Pa

p_2 ——2-2 截面喷嘴口压力, Pa

Y_1 ——1-1 截面进风口高度, mm

Y_2 ——2-2 截面喷嘴口高度, mm

w_{2P} ——2-2 截面喷嘴口风速, m/s

h_a ——进风段沿程摩擦损失, mm

h_b ——渐缩式喷管段损失, mm

λ_a ——进风段沿程摩阻系数

L_a ——进风管长度, mm

d_a ——进风管半径, mm

ξ_b ——渐缩式喷管段损失系数

ρ ——工作气体密度

喷嘴至混合腔扩大压力损失方程为

$$\begin{cases} \Delta p_{bc} = p_2 - p_3 \\ Y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} = Y_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{w_3^2}{2g} + H_c \\ H_c = h_c + h_{sc} + h_t \\ h_b = \left(1 - \frac{A_2}{A_3} \right)^2 \frac{w_{2P}^2}{2g} \\ h_{sc} = \left(1 - \frac{w_{2H}^2}{w_3^2} + u_{sc} \frac{w_{s3}^2}{w_3^2} - u_{sc} \frac{w_{s2}^2}{w_3^2} \right) \frac{w_3^2}{2g} \\ h_t = \xi_t \frac{w_{2P}^2}{2g} \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\Delta p_{bc} = \rho g Y_3 - \rho g Y_2 + \left[\left(1 - \frac{A_2}{A_3} \right)^2 + \xi_t \right] \frac{\rho w_{2P}^2}{2} + \left[u_{sc} \left(\frac{w_{s3}^2}{w_3^2} - \frac{w_{s2}^2}{w_3^2} \right) + 1 - \frac{w_{2H}^2}{w_3^2} \right] \frac{\rho w_3^2}{2} \quad (15)$$

式中 Δp_{bc} ——喷嘴至混合腔扩大压降, Pa

p_3 ——3-3 截面加速管入口压力, Pa

Y_3 ——3-3 截面加速管入口高度, mm

w_2 ——2-2 截面加速管入口风速, m/s

w_3 ——3-3 截面加速管入口风速, m/s

H_c ——混合腔内损失和, mm

h_c ——混合腔内扩大损失, mm

h_{sc} ——混合腔内种子加速损失, mm

h_t ——混合腔内四通管损失, mm

A_2 ——2-2 截面喷嘴面积, mm²

A_3 ——3-3 截面加速管入口面积, mm²

w_{2H} ——2-2 截面引射气流速度, m/s

u_{sc} ——混合腔内种子与气流流量比

w_{s2} ——2-2 截面混合腔内种子速度, m/s

w_{s3} ——3-3 截面混合腔内种子速度, m/s

ξ_t ——四通管损失系数

加速管入口至加速管出口段压力损失为

$$\begin{cases} \Delta p_K = p_3 - p_4 \\ Y_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{w_3^2}{2g} = Y_4 + \frac{p_4}{\rho g} + \frac{w_4^2}{2g} + h_{sK} + h_K \\ h_{sK} = \left(u_{sK} \frac{w_{s4}^2}{w_3^2} - u_{sK} \frac{w_{s3}^2}{w_3^2} \right) \frac{w_3^2}{2g} \\ h_K = \lambda_K \frac{L_K}{d_4} \frac{w_3^2}{2g} \end{cases} \quad (16)$$

$$\Delta p_K = \frac{\rho w_3^2}{2} \left(\lambda_K \frac{L_K}{d_4} + u_{sK} \frac{w_{s4}^2}{w_3^2} - u_{sK} \frac{w_{s3}^2}{w_3^2} \right) + \frac{\rho w_4^2}{2} + \rho g Y_4 - \rho g Y_3 \quad (17)$$

式中 Δp_K ——加速管压降, Pa

p_4 ——4-4 截面喷嘴口压力, Pa

Y_4 ——4-4 截面加速管出口高度, mm

w_4 ——4-4 截面加速管入口风速, m/s

h_{sK} ——加速管内种子加速损失, mm

h_K ——加速管沿程摩擦损失, mm

u_{sK} ——加速管内种子与气流流量比

w_{s4} ——4-4 截面加速管出口种子速度, m/s

λ_K ——加速管段沿程摩阻系数

d_4 ——4-4 截面加速管直径, mm

由式(12)~(17)可得到射播排种器中总压损失为

$$\begin{aligned} \Delta p_{all} = & \rho g Y_4 - \rho g Y_1 + \left(\lambda_a \frac{L_a}{d_a} - 1 \right) \frac{\rho w_1^2}{2} + \\ & \left[\left(1 - \frac{A_2}{A_3} \right)^2 + (1 + \xi_b) + \xi_i \right] \frac{\rho w_{2p}^2}{2} + \\ & \left[u_{sc} \left(\frac{w_{s3}^2}{w_3^2} - \frac{w_{s2}^2}{w_3^2} \right) + 1 - \frac{w_{2H}^2}{w_3^2} \right] \frac{\rho w_3^2}{2} + \\ & \left[u_{sK} \left(\frac{w_{s4}^2}{w_3^2} - \frac{w_{s3}^2}{w_3^2} \right) + \lambda_K \frac{L_K}{d_4} \right] \frac{\rho w_3^2}{2} + \frac{\rho w_4^2}{2} \quad (18) \end{aligned}$$

由式(18)可知,射播排种器总压损失与各结构压损系数、各处结构气流速度、种子速度、各结构长度、种子速度与气流速度比和种子与气流流量比呈正相关,与引射气流速度呈负相关。当射播排种器结构一定时,种子与气流流量比越大,射播排种器压力损失越大。

2.4 喷射器结构对种子运动轨迹作用分析

种子在射播排种器内部运动主要有 2 个碰撞位置,分别是渐缩式供种道和混合腔。种子由导种管进入渐缩式供种道,受重力作用向倾斜壁面进行斜碰撞后^[22-23],同时受到逐渐变大的负压吸力和重力作用斜向下进行抛物线运动。种子随后进入混合腔室受混合腔负压、混合腔涡流力、重力、腔壁摩擦力作用进行第 2 次斜碰撞,再次随着负压和重力作用斜向下进行抛物线运动,直到种子运动至喷嘴口高速气流,同时受到高速气流和重力共同作用转向并向下高加速度运动,直至被高速射出。种子运动轨迹如图 4 所示。

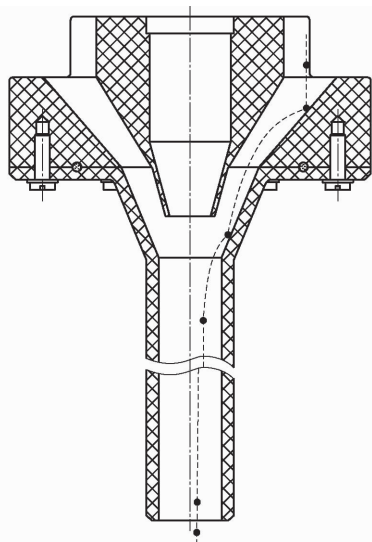


图 4 种子运动轨迹

Fig. 4 Schematic of seed motion path

喷射器在结构参数不能满足种子稳定运动时,混合腔室内部会产生较大的涡流区域,导致种子在混合腔室内产生回转滞留现象,主要分析第 2 次碰撞后受力。第 2 次碰撞后种子受力与碰撞轨迹如图 5 所示。

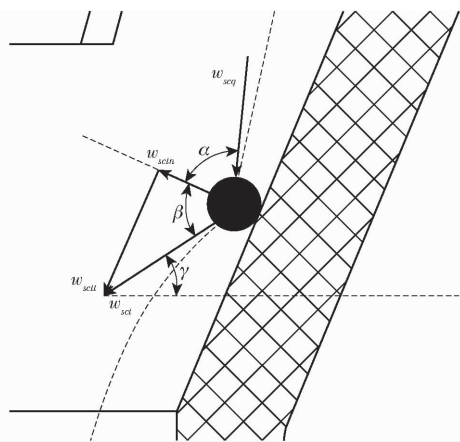


图 5 种子第 2 次碰撞前后速度

Fig. 5 Seed velocity before and after the second collision

由于油菜种子较小,将其碰撞运动状态简化为完全滑动状态,碰撞后速度方程为

$$\begin{cases} w_{sct} = \frac{2}{7} \left(\frac{5}{2} - e_{sAt} \right) w_{scq} \sin \alpha - \\ \quad f_{sA} (1 + e_{sAn}) w_{scq} \cos \alpha \\ w_{sctn} = w_{scq} e_{sAn} \cos \alpha \\ w_{sct} = \sqrt{w_{sctt}^2 + w_{sctn}^2} \end{cases} \quad (19)$$

式中 w_{sct} ——种子碰撞后速度, m/s

w_{sctt} ——种子碰撞后切向速度, m/s

w_{sctn} ——种子碰撞后法向速度, m/s

w_{scq} ——种子碰撞前速度, m/s

f_{sA} ——种子与 ABS 材料滑动摩擦因数

α ——种子碰撞前速度与法向夹角, (°)

e_{sAt} ——种子与 ABS 材料切向碰撞恢复系数

e_{sAn} ——种子与 ABS 材料法向碰撞恢复系数

碰撞后种子附近流场和受力如图 6 所示,建立其动力学方程为

$$\begin{cases} m_s a_{sn} = \sum F_{wc} n + \sum F_{fc} n + m_s g \\ m_s a_{s\tau} = \sum F_{wc} \tau + \sum F_{fc} \tau \\ t_{s\tau} = \frac{w_{sct}}{a_{s\tau}} \cos \gamma \\ t_{sn} = \frac{w_{sct}}{a_{sn}} \sin \gamma \end{cases} \quad (20)$$

式中 m_s ——油菜种子质量, g

a_{sn} ——油菜竖直方向加速度, m/s²

$a_{s\tau}$ ——油菜水平方向加速度, m/s²

$\sum F_{fc}$ ——油菜种子受到负压力, N

$\sum F_{wc}$ ——油菜种子受到涡流升力, N

n ——重力方向单位向量

τ ——水平方向单位向量

$t_{s\tau}$ ——水平方向减速时间, s

t_{sn} ——重力方向减速时间, s

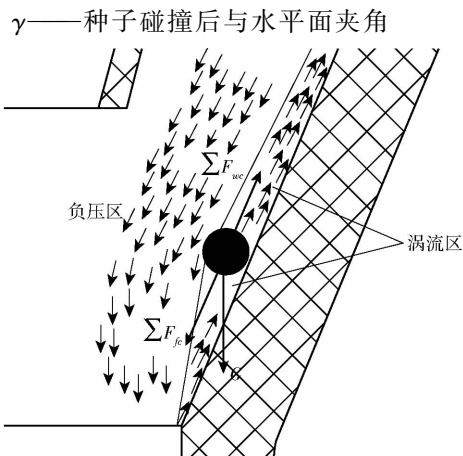


图6 第2次碰撞后种子受力与种子附近流场
Fig.6 Stress on seeds and flow field near seeds
after the second collision

在水平与重力方向减速时间内,若种子未弹出涡流区,会在混合腔室内打转;若未出现打转现象,也会影响到种子射出速度及其变异系数。为避免这一现象,需尽量减小涡流区面积。

3 仿真试验

为研究射播排种器关键结构参数对排种性能的影响,开展 Box - Behnken 响应面试验,应用 CFD - DEM 耦合仿真分析喷嘴半径、加速管与喷嘴距离和加速管半径,对气体计喷射系数、种子射出平均速度、混合腔涡流面积比及种子迁移轨迹的影响,并分别构建各指标回归模型。

3.1 模型建立

应用 ANSYS Fluent 19.2 和 EDEM 2020 软件开展射播排种器气室中喷射气流和种子耦合仿真,采用四面体非结构化方法自动划分气室网格^[24]。仿真与接触参数^[25]如表 2 所示。

表 2 仿真与接触参数
Tab.2 Parameters of simulation and contact

项目	参数	数值
种子	密度/(kg·m ³)	1 060
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10 ⁷
ABS 工程塑料	密度/(kg·m ³)	1 060
	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10 ⁸
种子-种子	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.01
种子- ABS 工程塑料	碰撞恢复系数	0.75
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01

气动射播排种器在排种过程,本身和供种排种

器均与大气相通,仿真模型略去供种装置部分。进种段入口设置为种子入口,并同时设置为大气气流入口;工作气体入口设置为输送气流入口;辅助入气口设置为辅助气流入口;射种出口设置为射种气流出口和种子出口,仿真模型如图 7 所示。

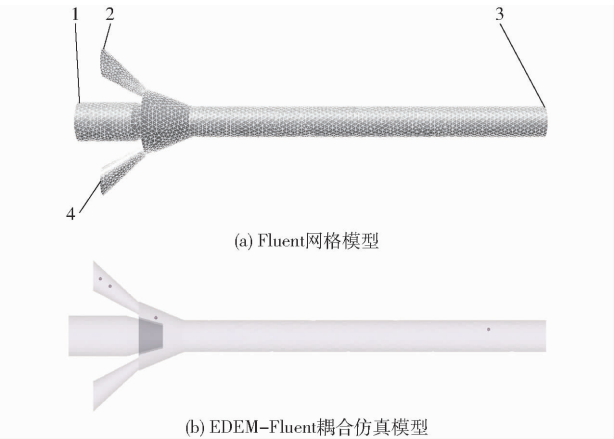


图 7 油菜射播排种器仿真模型

Fig.7 Simulation model of shooting seeder for rapeseed
1. 工作气体入口 2. 种子入口 3. 种子与射种气流出口 4. 辅助气流入口

3.2 试验方法

基于涵道风机额定工作参数、油菜机械物理特性参数,设置工作气流入口速度为 40 m/s。在实际播种作业中,种子在供种装置导种管中随重力作用加速进入射播排种器内部,设置种子颗粒速度为 0.5 m/s。

EDEM 每秒生成颗粒数量计算式为

$$m_E = \frac{1\,000m_t}{m_k} \tag{21}$$

式中 m_E ——EDEM 种子入口生成颗粒量,粒/s
 m_k ——油菜种子千粒质量,kg

为保证颗粒流量满足油菜射播排种系统实际播量需求,根据油菜千粒质量^[26]和式(21)计算得到每个气动射播排种器单体入种口生成油菜种子为 23~48 粒/s。同时考虑颗粒在射播排种器气场内流动的随机性,为保证仿真颗粒在流场到达位置的充分性,提供更多颗粒运移轨迹模型样本数量同时减少偶然性,选取生成最大颗粒量为 48 粒/s。

总仿真时长为 5 s。仿真结束后,在 Fluent 中统计气体计流量,并计算出气体计喷射系数;在 EDEM 后处理界面 Setup Selection 中加速管底部添加 Grid Bin Group,统计仿真时间内所有种子速度,并计算种子射出平均速度。

气体计喷射系数计算式为

$$u_r = \frac{G_{H,r1} + G_{H,r2}}{G_p} \tag{22}$$

式中 $G_{H,r1}$ ——进种口引射气流流量,kg/s

$G_{H,r2}$ ——辅助入气口引射气流流量,kg/s

混合腔涡流面积比计算式为

$$I=\frac{A_{wc}}{A_c}\times 100\% \tag{23}$$

式中 A_{wc} ——二维截面中涡流面积,mm²

A_s ——二维截面中混合腔面积,mm²

3.3 试验结果与分析

试验因素编码如表 3 所示。仿真试验设计与结果如表 4 所示。利用 Design-Expert 软件进行数据分析和回归拟合,建立喷射系数 u 、种子射出平均速度 L 、混合腔涡流面积比 I 回归方程,对影响试验指标的 3 个因素进行显著性检验与分析,模型方差分析及显著性检验结果如表 5 所示。

表 3 试验因素编码			
Tab.3 Factors and coding of experiment			
编码	因素		
	喷嘴半径 A/mm	嘴管距 B/mm	加速管半径 C/mm
-1	6.90	13.80	10
0	7.07	21.35	11
1	7.24	28.90	12

表 4 仿真试验设计与结果						
Tab.4 Experimental design and results						
序号	因素			u	$L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$I/\%$
	A/mm	B/mm	C/mm			
1	7.07	21.35	11	0.311	19.42	26.39
2	6.90	21.35	12	0.347	16.45	34.92
3	7.07	28.9	12	0.324	16.84	39.37
4	6.90	28.90	11	0.321	19.68	36.16
5	7.07	21.35	11	0.312	19.18	27.78
6	6.90	13.80	11	0.339	19.57	21.81
7	7.24	28.90	11	0.289	18.93	35.89
8	7.07	13.80	10	0.283	22.21	18.14
9	7.24	21.35	12	0.313	16.24	31.93
10	7.07	21.35	11	0.313	18.93	29.33
11	7.07	21.35	11	0.315	19.52	28.61
12	7.07	21.35	11	0.314	19.30	28.57
13	7.07	28.90	10	0.266	21.23	32.09
14	7.07	13.80	12	0.336	16.53	22.27
15	7.24	13.80	11	0.303	19.11	19.07
16	7.24	21.35	10	0.256	21.09	30.74
17	6.90	21.35	10	0.296	22.94	29.78

表 5 试验结果方差分析结果												
Tab.5 Analysis of experimental results												
方差来源	喷射系数 u				种子射出平均速度 L				混合腔涡流面积比 I			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	0.009 5	9	439.13	<0.000 1 **	59.82	9	85.68	<0.000 1 **	577.01	9	53.67	<0.000 1 **
A	0.002 5	1	1 053.34	<0.000 1 **	1.33	1	17.17	0.004 3 **	3.18	1	2.66	0.147 0
B	0.000 5	1	194.38	<0.000 1 **	0.007 02	1	0.904 5	0.373 2	483.92	1	405.12	<0.000 1 **
C	0.006 0	1	2 505.43	<0.000 1 **	57.26	1	738.06	<0.000 1 **	39.34	1	32.93	0.000 7 **
AB	4.00×10^{-6}	1	1.67	0.237 1	0.020 9	1	0.27	0.619 4	1.53	1	1.28	0.295 7
AC	9.00×10^{-6}	1	3.76	0.093 6	0.676 3	1	8.72	0.021 3 *	3.90	1	3.27	0.113 7
BC	6.25×10^{-6}	1	2.61	0.150 1	0.408 8	1	5.27	0.055 3	2.48	1	2.08	0.192 8
A^2	5.92×10^{-7}	1	0.2474	0.6341	0.000 9	1	0.011 9	0.916 2	16.60	1	13.9	0.007 4 **
B^2	5.92×10^{-7}	1	0.247 4	0.634 1	0.006 6	1	0.084 9	0.779 2	15.03	1	12.58	0.009 4 **
C^2	0.000 5	1	189.41	<0.000 1 **	0.047 9	1	0.617 2	0.457 9	12.47	1	10.44	0.014 4 *
残差	0.000 0	7			0.543 1	7			8.36	7		
失拟	6.75×10^{-6}	3	0.9	0.515 1	0.331 5	3	2.09	0.244 4	3.35	3	0.890 2	0.518 8
误差	1.00×10^{-5}	4			0.211 6	4			5.01	4		
总和	0.009 5	16			60.36	16			585.37	16		

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

由表 5 可知,气体计喷射系数、种子射出平均速度和混合腔涡流面积比失拟项 P 均大于 0.05,回归模型失拟项不显著,说明在试验范围内,实际射种性能与各响应函数的回归模型较为相符。对喷射系数, A 、 B 、 C 、 C^2 影响极显著,其余各项影响不显著;对种子射出平均速度, A 、 C 影响极显著, AC 影响显著,其余各项不显著;对混合腔涡流面积比, B 、 C 、 A^2 、 B^2 影响极显著, C^2 影响显著,其余各项不显著。剔除不显著交互项得到回归模型为

$$\left\{\begin{aligned} u &= 1 - 0.4A - 0.008B + 0.19C + 0.013A^2 - 6.57\times 10^{-6}B^2 - 0.01C^2 \\ L &= 268.49 - 35.04A - 0.11B - 18.33C + 2.42AC + 0.51A^2 + 0.0007B^2 - 0.11C^2 \\ I &= 3\,280.93 - 921.66A - 2.1B + 3.2C + 68.71A^2 - 0.033B^2 + 1.72C^2 \end{aligned}\right. \tag{24}$$

由表 5 可得,试验因素对喷射系数影响由大到小为加速管半径、喷嘴半径和嘴管距;对种子射出平

均速度影响由大到小为加速管半径、喷嘴半径和嘴管距;对混合腔涡流面积比影响由大到小为嘴管距、加速管半径和喷嘴半径。

为寻求油菜气动射播排种器在约束条件下各结构因素的最佳组合,以气体计喷射系数、种子平均射出速度和混合腔涡流面积比为评价指标,以喷嘴半径、嘴管距和加速管半径为约束条件,对构建的二次回归模型进行多目标优化求解。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max u \\ \max L \\ \min I \\ 6.90\text{ mm} \leq A \leq 7.24\text{ mm} \\ 13.8\text{ mm} \leq B \leq 28.9\text{ mm} \\ 10\text{ mm} \leq C \leq 12\text{ mm} \end{cases} \quad (25)$$

将数据代入求解得最优参数组合:喷嘴半径为 6.9 mm、嘴管距为 13.8 mm、加速管半径为 10.36 mm,此时风机风速为 40 m/s 时,喷射系数为 0.320、种子射出平均速度为 21.87 m/s、混合腔涡流面积比为 20.86%。以此最优参数组合进行仿真试验得到喷射系数为 0.314、种子射出平均速度为 20.92 m/s、混合腔涡流面积比为 21.15%。同时当风机风速为 30 m/s 时,喷射系数为 0.312、种子射出平均速度为 16.09 m/s、混合腔涡流面积比为 20.87%;当风机风速为 35 m/s 时,喷射系数为 0.313、种子射出平均速度为 18.43 m/s、混合腔涡流面积比为 20.98%。

为进一步验证喷射器内流场对种子轨迹影响,分析上述仿真试验条件下最优与非最优结构射播排种器内气流流场和种子轨迹。如图 8i 所示,在混合

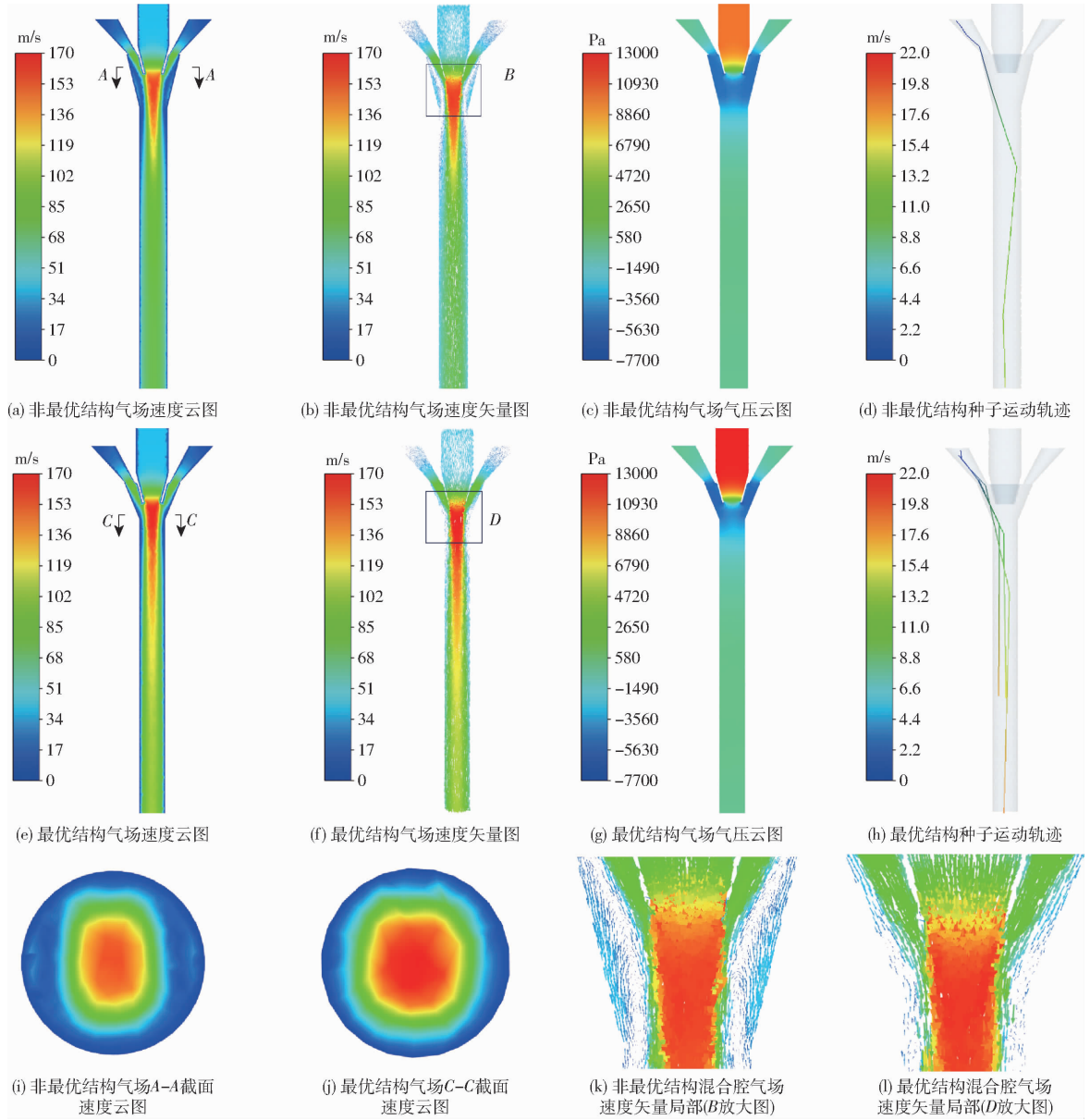


图 8 最优结构与非最优结构仿真对比

Fig. 8 Simulation comparison between optimal structure and non-optimal structure

腔 A-A 截面中,蓝色低速区面积较大,绿色中速区和红色高速区呈椭圆形。如图 8b 所示,非最优结构气场速度云图混合腔内存在大面积紊流和涡流,导致种子在混合腔内加速效果较差,经斜碰撞进入加速管后,与管壁碰撞 2 次后被喷出,未出现滞留现象。如图 8f 所示,蓝色低速区面积较小,绿色中速区和红色高速区呈圆形,且速度均大于非最优结构速度。如图 8e、8h 所示,最优结构速度矢量图中,紊流和涡流面积较小,种子经斜碰撞和负压吸种后与喷嘴下高速气流相遇,种子轨迹方向改变进入加速直至被加速射出,对于种子加速效果优于非最优结构。非最优结构渐缩供种道段气场产生负压与最优结构基本一致,但由渐缩供种道至混合腔内绿色吸种气流面积小于最优结构,吸种效果弱于最优结构。

4 台架验证试验

4.1 射播排种器较优结构参数验证试验

为验证上述仿真结果合理性,应用透明材料 3D 打印气动射播排种器,选择华油杂 62 油菜种子为试验材料,并采用自制的试验台架开展排种性能试验。主要试验装置包括气动射播排种器、86 伺服电机、供种离心式排种器、12 V 开关电源、直流电机、舵机,Phantom V 2640 型高速摄影仪(美国 Vision Research 公司),试验装置如图 9 所示。

4.1.1 较优结构参数验证试验方法

结合实际加工条件,选取喷嘴半径为 6.9 mm、嘴管距为 13.8 mm、加速管半径为 10.4 mm 的油菜气动射播排种器,设置风机风速为 30、35、40 m/s,进行 20 次重复排种试验。设置高速摄影仪按帧采集模式,选取 6 000 f/s。

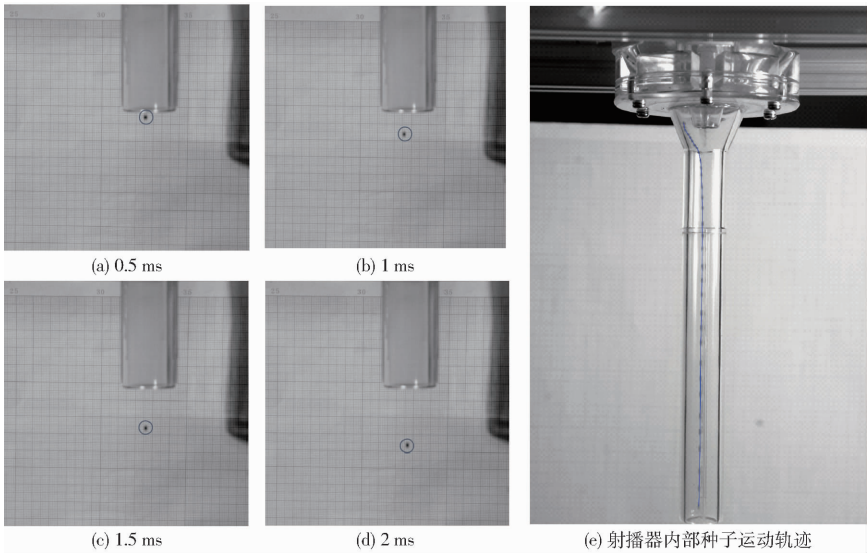


图 10 高速摄影种子运动图

Fig. 10 High-speed photographs of seed motion

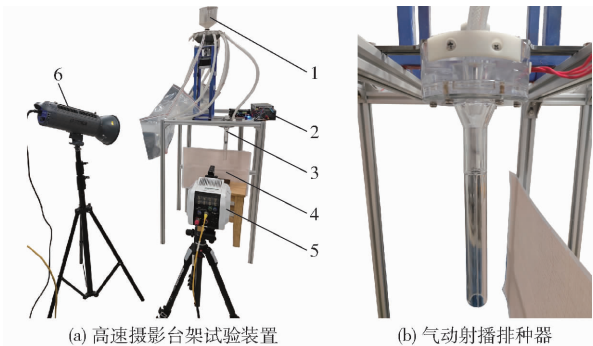


图 9 台架试验装置

Fig. 9 Bench test device

1. 机械离心式供种装置 2. 开关电源 3. 气动射播排种器 4. 坐标纸 5. 高速摄影仪 6. 太阳灯

试验前使用皮托管风速仪测量进种口引射气流流量、辅助入气口引射气流流量和加速管射种口气体流量,并计算喷射系数。考虑到高速气流于加速管出口喷出后的非稳定流场,以及气体和土壤作用后所产生的紊流,将射出加速管后种子运动近似为匀速运动。高速摄影种子运动如图 10 所示,试验结束后,提取种子从加速管出口下 20 ~ 40 mm 位置图像,平均射种速度计算式为

$$L = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \frac{Y_s F_{PS}}{1\,000 X} \tag{26}$$

式中 Y_s ——种子射播运动距离,mm
 F_{PS} ——高速摄影仪拍摄帧率,f/s
 X ——射播过程图像数量

4.1.2 试验结果与分析

试验测得:当风机风速为 30、35、40 m/s 时,排种器喷射系数为 0.303、0.305、0.308,平均射种速度为 14.1、16.8、19.8 m/s。在 3 个风机速度中排种器混合腔内均未出现种子滞留打转现象,种子在混

合腔内完成斜碰撞后,运动至喷嘴下加速进入加速管直至被射出,试验结果与仿真结果基本一致,仿真结果合理可信。

4.2 射播排种器较优工作参数台架试验

为获得不同含水率下射播排种器较优工作参数,选取风机风速、加速管出口与土壤距离、土壤含水率为试验因素,以种子入土深度、入土深度变异系数和弹跳率为性能评价指标开展排种性能台架试验。

4.2.1 较优工作参数台架试验方法

试验土壤样品取自华中农业大学现代农业科学试验基地,取样时间为2024年6月,试验田为稻油轮作,土壤类型为黏质土。采集适合油菜播种深度0~20 mm的土样,根据《土工试验方法标准》(GB/T

50123—2019),将土壤经去杂、自然风干、碾散、过筛并将其平铺放置于塑料土槽中,使用喷雾器配置不同含水率土样,并使用保鲜膜密封后静置24 h供试验备用。

分别配置含水率为30%、35%、40%、45%的土样,在加速管出口与土壤距离分别为50、75、100、125、150 mm工作状态下,探究喷射器在不同风机风速和射管距土壤高度下射播性能。每组试验40次,分别统计弹跳次数,并计算弹跳率,同时为了测量播种深度取种时土样不破坏,将土样干燥定型处理后,使用镊子把种子取出,并使用三维激光扫描仪扫描取种后土样,使用3Dmax软件测量射播深度,射种后土样、干燥后土样与干燥后取种土样如图11所示。

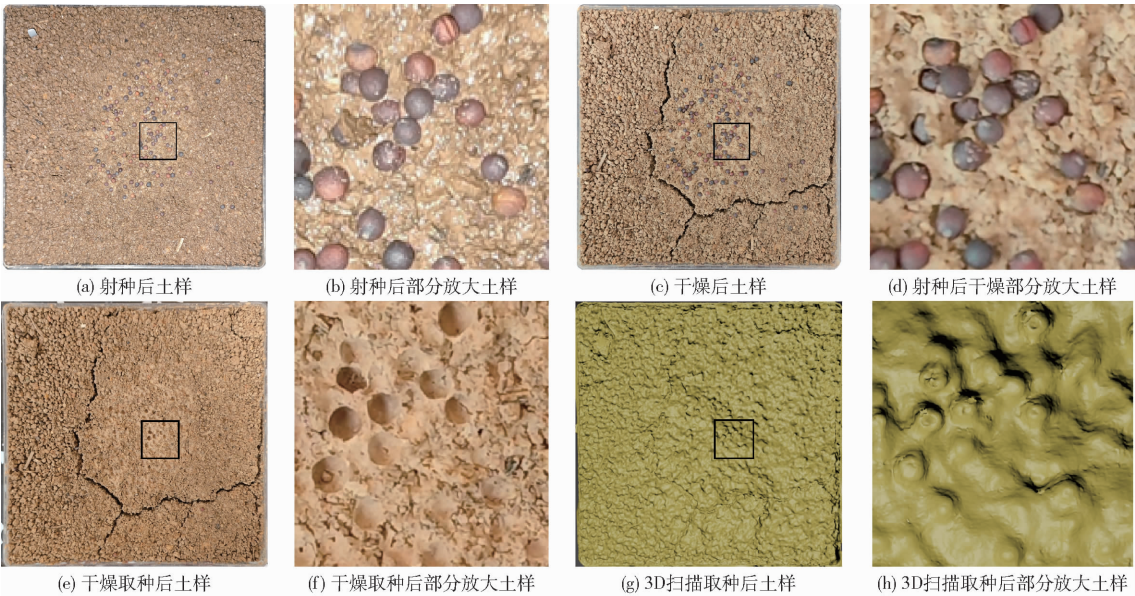


图 11 射种后土样对比

Fig. 11 Comparison maps of soil samples after seeding

4.2.2 试验结果及分析

由表6可知,土壤含水率、风机风速和射管距土壤高度对射播平均深度、射播深度变异系数和弹跳率均有影响。当土壤含水率与风机风速一定,除含水率为30%和风机风速为30 m/s时,射管距土壤高度越高,射播平均深度越低,变异系数越高,弹跳率越高;而当含水率为30%时,风机风速为30 m/s,土壤距土壤高度越高时,弹跳率先变大再变小;当土壤含水率与射管距土壤高度一定时,风机风速越高,射播平均深度越高,射播深度变异系数越高,弹跳率越高;当风机风速与射管距土壤高度一定时,土壤含水率越高,射播平均深度越高,射播深度变异系数越低,弹跳率越低。在较高射播平均深度、较小射播深度变异系数和较低弹跳率下,当含水率为30%、35%、40%、45%时最佳工作参数为:风机风速为35、40、40、35 m/s、射管距土壤高度均为150 mm。

5 田间试验

为进一步验证油菜气动射播排种器台架试验效果,验证机器田间播种性能,于2024年10月11日在华中农业大学现代农业科学试验基地开展田间播种试验,如图12a所示。以华油杂62为播种对象,配套动力为雷沃M100-4型拖拉机,2BYMQ-8型油菜精量联合直播机为平台,田间取样含水率为38.2%,按照台架试验较优因素水平组合以风机风速40 m/s,射播排种器距地高度150 mm进行田间试验。试验中,播种行数为8行,行距为219 mm,播量为6.298 kg/hm²,整机作业速度为2.57 km/h,播种后30 d长势如图12b所示。

播种后36 d对播种区域油菜出苗数量进行测定,随机选取5处,每处选取1 m,即5处2.3 m×1 m播种区域,统计面积范围内8行油菜总数,测得油菜

表 6 台架试验结果

Tab. 6 Test design scheme and results

土壤含水率/%	风机风速/ (m·s ⁻¹)	射管距土壤高度/ mm	射播平均深度/ mm	射播深度变异系数/%	弹跳率/%	土壤含水率/%	风机风速/ (m·s ⁻¹)	射管距土壤高度/ mm	射播平均深度/ mm	射播深度变异系数/%	弹跳率/%
30	30	50	0.72	14.47	35.0	35	30	50	0.94	12.46	25.0
		75	0.63	16.36	37.5			75	0.86	16.45	27.5
		100	0.55	18.22	40.0			100	0.77	16.55	20.0
		125	0.53	18.96	37.5			125	0.79	17.89	22.5
		150	0.48	22.82	35.0			150	0.65	20.32	12.5
	35	50	0.76	13.72	35.0		35	50	0.92	12.36	22.5
		75	0.71	17.85	35.0			75	0.87	16.89	15.0
		100	0.68	18.11	32.5			100	0.84	19.67	15.0
		125	0.57	18.67	32.5			125	0.74	18.50	12.5
		150	0.53	20.38	27.5			150	0.74	20.92	10.0
	40	50	0.81	12.26	35.0		40	50	0.95	10.57	17.5
		75	0.77	15.79	35.0			75	1.04	13.12	20.0
		100	0.75	16.86	35.0			100	0.60	16.93	17.5
		125	0.69	17.59	32.5			125	0.99	15.28	12.5
		150	0.65	21.76	27.5			150	0.62	15.44	7.5
40	30	50	0.88	9.65	17.5	45	30	50	0.90	7.83	10.0
		75	0.72	10.01	15.5			75	0.96	8.53	15.0
		100	0.76	10.73	12.5			100	0.76	9.45	15.0
		125	0.64	15.06	12.5			125	0.86	12.94	10.0
		150	0.73	15.13	10.0			150	0.82	14.60	7.5
	35	50	0.91	6.35	20.0		35	50	1.12	7.23	15.0
		75	0.93	10.90	17.5			75	1.05	10.09	10.0
		100	0.97	16.79	15.0			100	0.98	12.58	10.0
		125	0.79	18.37	15.0			125	0.90	13.37	10.0
		150	0.77	15.14	12.5			150	0.83	16.51	5.0
	40	50	1.07	7.31	25.0		40	50	0.91	7.58	20.0
		75	0.98	10.74	22.5			75	1.03	8.36	15.0
		100	0.95	11.15	17.5			100	1.02	9.18	15.0
		125	0.80	13.74	17.5			125	1.00	11.69	10.0
		150	0.90	14.81	10.0			150	0.98	15.56	10.0

平均出苗数为 66 株/m²,各行植株变异系数为 11.06%;同时对油菜成行性进行测定,随机选取 8 处,长度为 2 m 的单行油菜植株,结果散点图如图 13 所示,植株分布在种行宽度为 12 cm 内的平均概率为 80.12%,满足油菜田间播种要求。



图 12 田间播种试验

Fig. 12 Field seeding experiment

6 结论

(1)结合气动喷射原理和油菜播种农艺要求,

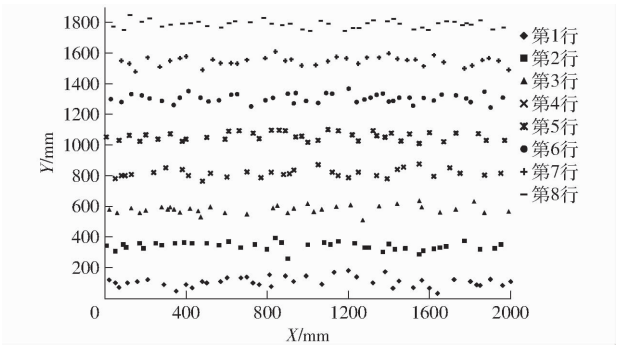


图 13 油菜分布散点图

Fig. 13 Scatter diagram of rape distribution

设计了一种油菜气动射播排种器,并确定了关键结构参数。

(2)气动射播排种器结构参数正交试验结果表明,较优参数组合为:喷嘴半径 6.9 mm、嘴管距 13.8 mm、加速管半径 10.36 mm,当风机风速为

40 m/s 时,喷射系数为 0.314,种子射出平均速度为 20.92 m/s,混合腔涡流面积比为 21.35%。台架试验结果表明,喷射系数为 0.308、种子射出平均速度为 19.8 m/s,种子在射播排种器内未出现滞留打转现象。

(3) 台架试验结果表明,当含水率为 30%、

35%、40%、45% 时,最优工作参数:风机风速为 35、40、40、35 m/s、射管距土壤高度均为 150 mm;以较优结构参数和工作参数进行田间试验,试验结果表明,油菜平均出苗数为 66 株/m²,植株分布在种行宽度为 12 cm 内的平均概率为 80.12%,满足油菜田间播种要求。

参 考 文 献

[1] 廖庆喜,谢昊明,张青松,等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99 – 110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99 – 110,195. (in Chinese)

[2] 廖庆喜,林建新,张青松,等. 稻油轮作区铲锹式油菜直播种床整备机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 26 – 35.
LIAO Qingxi, LIN Jianxin, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of shovel type seedbed preparation machine suitable for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 26 – 35. (in Chinese)

[3] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 24 – 44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24 – 44. (in Chinese)

[4] 张青松,廖庆喜,肖文立,等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 702 – 711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702 – 711. (in Chinese)

[5] 赵淑红,杨罗罗,张鑫,等. 大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 74 – 84.
ZHAO Shuhong, YANG Luoluo, ZHANG Xin, et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 74 – 84. (in Chinese)

[6] 谭贺文. 一种组合式播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.
TAN Hewen. Design and experiment of a combined seeding furrow opener[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[7] 刁培松,杜瑞成,杨自栋,等. 气动射种理论研究[J]. 农机化研究, 2005, 27(1): 94 – 96.
DIAO Peisong, DU Ruicheng, YANG Zidong, et al. Theoretical research on pneumatic seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005, 27(1): 94 – 96. (in Chinese)

[8] TOGASHI T, SHIMOTSUBO K, YOSHINAGA S. Performance of seed-shooting seeder of rice combined with a paddy harrow and the growth characteristics of rice[J]. Japanese Journal of Farm Work Research, 2001, 36(4): 195 – 203.

[9] 何伟灼,刘威,姜锐,等. 无人机点射式水稻播种装置控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 51 – 61.
HE Weizhuo, LIU Wei, JIANG Rui, et al. Control system design and experiments of UAV shot seeding device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(18): 51 – 61. (in Chinese)

[10] 李汉青,颜丙新,武广伟,等. 双轨道弹射式水稻精量直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 60 – 72.
LI Hanqing, YAN Bingxin, WU Guangwei, et al. Design and experiment of double-track ejection rice precision direct seeding metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 60 – 72. (in Chinese)

[11] 王英博,李洪文,王庆杰,等. 机械式小麦射播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 73 – 84.
WANG Yingbo, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat mechanical shooting seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 73 – 84. (in Chinese)

[12] WANG Y, HE M, YAN Q, et al. DEM – CFD simulation and seed orientation evaluation of a self-suction wheat shooting device[J]. Powder Technology, 2023, 427: 118746.

[13] 王超,李洪文,何进,等. 入射角度对气力射播小麦种粒入土参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 32 – 39.
WANG Chao, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effect of incident angle on wheat soil-ripping parameters by pneumatic seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 32 – 39. (in Chinese)

[14] WANG C, LI H, HE J, et al. Optimization design of a pneumatic wheat-shooting device based on numerical simulation and field test in rice-wheat rotation areas[J]. Agriculture, 2022, 12(1): 56.

[15] 索科洛夫 Е Я,津格尔 Н М. 喷射器[M]. 黄秋云,译. 北京:科学出版社,1977.

Chinese)

- [27] 于海里, 孙立超, 左胜, 等. 基于双激光雷达的带式输送机煤流量检测系统[J]. 工矿自动化, 2023, 49(7): 27–34, 59.
YU Haili, SUN Lichao, ZUO Sheng, et al. Coal flow detection system for belt conveyor based on dual LiDAR[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(7): 27–34, 59. (in Chinese)
- [28] 苑进, 刘勤华, 刘雪美, 等. 多肥料变比变量施肥过程模拟与排落肥结构优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 81–87.
YUAN Jin, LIU Qinhua, LIU Xuemei, et al. Granular multi-flows fertilization process simulation and tube structure optimization in nutrient proportion of variable rate fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 81–87. (in Chinese)
- [29] DING X, WANG B, HE Z, et al. Fast and precise DEM parameter calibration for *Cucurbita ficifolia* seeds[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 258–276.
- [30] SHI Q, WANG B, MAO H, et al. Calibration and measurement of micrometre-scale pollen particles for discrete element method parameters based on the Johnson–Kendal–Roberts model[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 83–91.
- [31] LIU J S, GAO C Q, NIE Y J, et al. Numerical simulation of fertilizer shunt-plate with uniformity based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105737.
- [32] 刘晓东, 王绪坪, 陈礼源, 等. 油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 1–10.
LIU Xiaodong, WANG Xuping, CHEN Liyuan, et al. Design and experiments of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 1–10. (in Chinese)

(上接第 56 页)

- [16] 陈亮, 刘敬辉, 陈江平, 等. 两相流喷射器流动模型研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 26–31.
CHEN Liang, LIU Jinghui, CHEN Jiangping, et al. Model investigation of jet flow inside two-phase ejector[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(2): 26–31. (in Chinese)
- [17] 向清江, 杜春伟, 张贡赫, 等. 气固喷射器的干粉喷洒试验及喉嘴距尺寸[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(5): 493–498.
XIANG Qingjiang, DU Chunwei, ZHANG Gonghe, et al. Dry powder spraying experiment of gas-solid ejector and size of nozzle-throat distance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(5): 493–498. (in Chinese)
- [18] 王宝山. 小粒径种子兼用精量穴播集排系统设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
WANG Baoshan. Design and experiment of precision hill-seeding centralized metering system for small particle size seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [19] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [20] 刘鹤年, 刘京. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [21] 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)
- [22] 王庆朋, 刁凯欣, 郑淑月, 等. 球体与平板斜碰撞后运动状态的研究[J]. 机械设计, 2022, 39(12): 31–38.
WANG Qingpeng, DIAO Kaixin, ZHENG Shuyue, et al. Research on motion state of sphere oblique impact with planar surface[J]. Journal of Machine Design, 2022, 29(12): 31–38. (in Chinese)
- [23] 路晓鹏. 斜碰撞现象的非线性动力学研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
LU Xiaopeng. Research on dynamics of oblique collision phenomenon[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [24] 王磊. 油麦兼用型宽幅高速气送式播种机关键部件设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
WANG Lei. Design and experiment on broad width and high speed air-assisted planter for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [25] 廖庆喜, 沈文惠, 王磊, 等. 油菜高速机械离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 154–167.
LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, WANG Lei, et al. Design and experiment of high-speed mechanical centrifugal centralized seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 154–167. (in Chinese)
- [26] 王宝山, 王磊, 廖宜涛, 等. 小粒径种子精量穴播集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 64–75, 119.
WANG Baoshan, WANG Lei, LIAO Yitao, et al. Design and test of seeding wheels of precision hill-seeding centralized metering device for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 64–75, 119. (in Chinese)