

小粒径种子精量穴播集排器型孔轮设计与试验

王宝山^{1,2} 王磊^{1,2} 廖宜涛^{1,2} 吴崇^{1,2} 曹梅^{1,2} 廖庆喜^{1,2}

(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: 针对传统小粒径种子型孔轮式排种器充种稳定性差、易卡种的问题, 设计了具有倾斜抛物线型孔和环槽凸台搅种结构的型孔轮, 可实现油菜、芝麻和小白菜种子(2±1)粒/穴精量穴播。基于种子物料特性与种植农艺要求, 构建了种子充种和投种过程的力学模型, 分析确定了型孔轮结构参数对充种和投种性能的影响规律及其取值范围; 利用 EDEM 仿真和高速摄像台架试验获得了型孔抛物线顶点至型孔轮中心距离、焦距距、抛物线倾斜角、宽度系数、侧边倾角及环槽凸台深度的较优值, 确定了避免型孔卡种与环槽凸台拖带种子的临界条件, 得出了种子物料特性与型孔轮较优结构参数的量化关系。利用 JPS-12 型试验台开展较优结构参数下华油杂 62、航天新芝 T31-8 和五月慢的排种性能试验, 3 种类型种子穴粒数合格率为 92.00%、90.00%、90.67%, 穴距合格率为 83.67%、81.83%、82.50%。田间试验表明, 华油杂 62 平均出苗数为 1.16 株/穴, 穴株数合格率 89.67% ((2±1) 株/穴), 穴距合格率 81.54%; 航天新芝 T31-8 平均出苗数为 1.15 株/穴, 穴株数合格率 85.77% ((2±1) 株/穴), 穴距合格率 75.51%; 满足油菜、芝麻精量穴播要求, 为小粒径种子型孔轮式集排器关键部件的设计提供了参考。

关键词: 小粒径种子; 精量播种; 穴播; 型孔轮; EDEM 仿真

中图分类号: S223.2+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0064-12 OSID: 

Design and Test of Seeding Wheels of Precision Hole-seeding Centralized Metering Device for Small Particle Size Seeds

WANG Baoshan^{1,2} WANG Lei^{1,2} LIAO Yitao^{1,2} WU Chong^{1,2} CAO Mei^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2}

(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: Aiming at the problems of poor seed-filling performance and seeds were easily stuck in the seeding wheels of metering device for small particle size seeds, seeding wheels with inclined parabolic holes and stirring structure were designed which could plant 2±1 seeds of rapeseed sesame and pakchoi in one hole. Mechanical models for seed-filling and seed-casting were constructed. The range of main structural parameters of seeding wheels and how the parameters influence on seed-filling and seed-casting were analyzed, based on the mechanical and physical properties and precision hole-seeding requirements of rapeseed sesame and pakchoi. The influence of the main structural parameters on seed-filling was verified by using EDEM software, and high-speed camera. The optimal value of distance from parabolic vertex to circular center, focal distance, parabolic tilt angle, width coefficient, side tilt angle and churning structure height were determined. The critical conditions for avoiding seeds stuck in holes or dragged by churning structure were determined. The empirical formulas for calculating the optimal structure parameters by physical properties of seeds were presented. The JPS-12 test-bed was used to study the seeding performance of seeding wheels with the optimal structure for Huayouza 62, Hangtianxinshi T31-8 and Wuyueman. The qualified rates of seeds per hole were 92.00%, 90.00% and 90.67%, and the qualified rates of hole spacing were 83.67%, 81.83% and 82.50%, respectively. Field tests showed that the average number of Huayouza 62 seedlings per hole was 1.16, the qualified rate of 2±1 seedlings per hole was 89.67%, and the qualified rate of hole spacing was 81.54%; the average number of Hangtianxinshi T31-8 seedlings per hole was 1.15, the qualified rate

收稿日期: 2022-01-14 修回日期: 2022-02-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)

作者简介: 王宝山(1992—), 男, 博士生, 主要从事油菜播种技术与装备研究, E-mail: wangbaoshanworks@126.com

通信作者: 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

of 2 ± 1 seedlings per hole was 85.77%, and the qualified rate of hole spacing was 75.51%. The metering device could meet the requirements of precision hole-seeding for rapeseed and sesame. The research result can provide a reference for the design and research of seeding wheels of metering device for small particle size seeds.

Key words: small particle size seed; precision seeding; hole-seeding; seeding wheel; EDEM simulation

0 引言

油菜、芝麻、小白菜是广泛种植的小粒径种子作物,其中油菜是第一大国产植物油来源和第二大饲用蛋白来源^[1],芝麻、小白菜是重要的特色油料作物和蔬菜。油菜、芝麻、小白菜等小粒径种子球形度差异大、粒径小、质量轻,品种兼用及播种粒数精量控制难度大且易卡种。油菜、芝麻、小白菜中油菜机播率相对较高,截至 2020 年油菜机播率仅为 35.65%,油菜、芝麻、小白菜机械化播种水平亟待提高。因此,开展适用于油菜、芝麻、小白菜的兼用、精量、集排播种关键技术研究是提高播种机具利用率、改善播种质量、提升作业效率和机播率的有效途径^[2]。

小粒径种子精量排种器主要分为气吸式排种器和型孔轮式排种器。气吸式排种器排种性能主要受型孔结构、吸种负压、转速等因素影响^[3-5],通过增设搅种结构能够提高其高速作业性能^[6-7],气力集排器能够实现多行排种,作业效率较高,广泛用于育苗播种^[8-9]。气吸式排种器具有吸种稳定、播种精度高等优点,现有的气吸式排种器多针对单一作物种子或单行排种;气力滚筒式集排器对芝麻等非球形小粒径种子的适应性及不同种子兼用性有待进一步提高。型孔轮式排种器可依据不同种类种子设计不同结构型孔轮,更换型孔轮易于实现兼用与精量排种;采用并列配置多个型孔轮可简化传动和整体结构、实现多行集排播种。型孔轮结构是影响排种性能的关键因素,通过优化型孔轮型孔结构参数^[10]、设置搅种结构^[11]或采用组合型孔^[12-13],能够实现水稻、大豆和人参等中大粒径种子精量及兼用排种,排种性能良好。适用于油菜、芝麻、小白菜等小粒径种子的型孔轮式精量集排器研究较少^[14],主要原因为:小粒径种子千粒质量小,型孔设计不合理时种子难以依靠自重顺畅投种、易卡种;同时,因小粒径种子易破损,中大粒径种子排种器常用的卸种结构易导致种子破损率增加。通过合理设计型孔轮结构实现对油菜、芝麻、小白菜等小粒径种子稳定充种、无卸种装置条件下顺畅投种,是提高小粒径种子型孔轮式排种器排种性能的关键。

针对油菜、芝麻、小白菜精量穴播排种过程中充种稳定性差、易卡种的问题,设计一种采用倾斜抛物

线型孔充种、环槽凸台搅种结构的型孔轮和精量穴播集排器,利用力学计算、EDEM 仿真与高速摄影技术分析型孔轮结构参数对充种性能的影响规律及其较优值,确定种子物料特性与型孔轮较优结构参数的量化关系,通过台架试验与田间试验验证集排器的排种性能,以期小粒径种子型孔轮式集排器关键部件的设计提供参考。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构

小粒径种子精量直播机结构如图 1 所示,由地轮驱动装置、排种电机、集排器、导种管、开种沟装置、排肥装置、旋耕装置、机架、开畦沟装置等组成,可实现旋耕、开沟、施肥、6 或 8 行播种等功能。

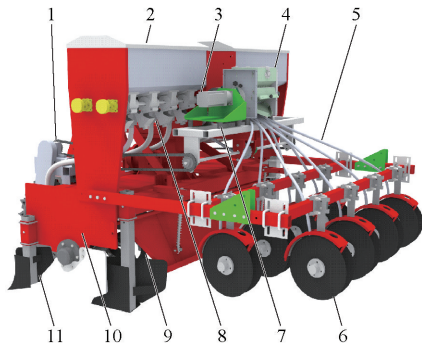


图 1 小粒径种子精量直播机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of precision hole-metering planter for small particle size seeds

1. 地轮驱动装置 2. 肥箱 3. 排种电机 4. 集排器 5. 导种管
6. 开种沟装置 7. 集排器减振块 8. 排肥装置 9. 旋耕装置
10. 机架 11. 开畦沟装置

型孔轮式集排器是直播机的核心装置,集排器结构如图 2 所示,主要由种箱、型孔轮、储种室、排种轴、卸种集种槽、集排器壳体、落种口、风机等组成。型孔轮是决定集排器排种性能的关键部件,其主要结构为抛物线型孔和环槽凸台。

1.2 集排器工作过程

集排器工作过程及原理见图 3,种子由种箱进入储种室,形成具有一定种层高度的种群,排种轴带动型孔轮转动扰动储种室种群,种子因种群作用力、自身重力、型孔作用力充入型孔,型孔轮携带种子转过一定角度后,种子因重力及离心力脱离型孔,种子沿切向进入落种口引导槽,在引导槽的约束下进入

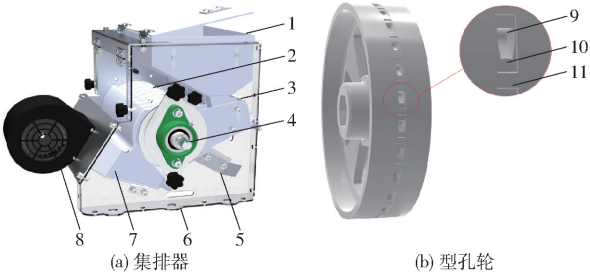


图 2 型孔轮式集排器与型孔轮结构示意图

Fig. 2 Structural diagrams of centralized metering device and seeding wheel

1. 种箱 2. 型孔轮 3. 储种室 4. 排种轴 5. 卸种集种槽 6. 集排器壳体 7. 落种口 8. 风机 9. 型孔 10. 环槽 11. 凸台

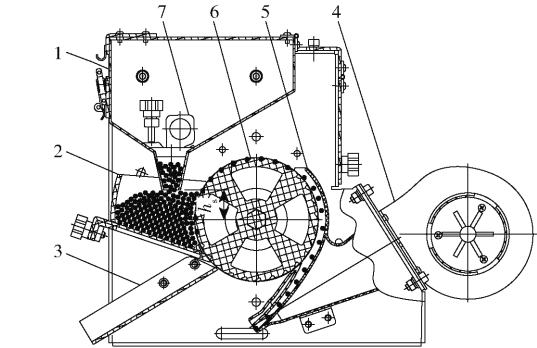


图 3 集排器排种原理图

Fig. 3 Seeding principle sketch of centralized metering device

1. 种箱 2. 储种室 3. 卸种集种槽 4. 风机 5. 落种口 6. 型孔轮 7. 行数调节堵头

导种管,经导种管落入种沟完成排种过程。落种口由圆弧形导槽和气流通道构成,当排种芝麻等球形度低、流动性差种子时,风机输送气流能够提高种子在导种管内的运移速度,避免种子滞留导种管。集排器壳体与种箱连接处设置槽口,通过调整种箱安装高度可以调节储种室种层高度,以改善充种性能;种箱出种口与储种室隔板使型孔轮对应种群相互独立,依据不同作物行距要求拆装行数调节堵头,实现 6~8 行排种。

2 型孔轮设计与参数分析

2.1 型孔轮结构

型孔轮是决定集排器排种性能的重要部件,其主要设计参数包括型孔数、型孔与环槽凸台搅种结构参数等,型孔数受种植农艺、机具作业速度等影响;型孔结构由径向截面和轴向截面确定,合理设计型孔结构是实现稳定充种和避免型孔卡种的关键;环槽凸台搅种结构有利于增加种群流动,改善充种性能。

2.1.1 型孔数确定

农艺种植参数是型孔轮设计的重要依据,油菜、

芝麻、小白菜种植农艺参数^[15-17]见表 1。

表 1 种植农艺参数				
Tab. 1 Parameters of growing agronomic				
品种	种植密度/ (株·hm ⁻²)	穴距/ mm	行距/mm	行数
华油杂 62	3 × 10 ⁵ ~ 6 × 10 ⁵	60 ~ 150	150 ~ 300	6 ~ 8
航天新芝	1. 50 × 10 ⁵ ~	110 ~ 170	300 ~ 400	6
T31-8	2. 25 × 10 ⁵			
五月慢	2. 5 × 10 ⁵ ~ 5 × 10 ⁵	100 ~ 200	100 ~ 250	8

排种频率由农艺种植密度要求及出苗率决定,穴距及型孔数计算式为

$$l_h = \frac{10^7 k Nu}{B Q_f} \tag{1}$$

$$Z = \frac{5 \times 10^4 v_m}{3 n l_h} \tag{2}$$

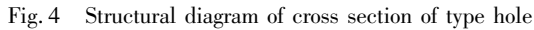
式中 l_h ——穴距,mm
 k ——每个型孔平均充种数量,取 2
 N ——播种行数
 u ——出苗率,%
 B ——播种机幅宽,取 1. 8 m
 Q_f ——种植密度,株/hm²
 Z ——单个型孔轮型孔数
 v_m ——播种机前进速度,取 3. 5 km/h
 n ——型孔轮转速,取 25 r/min

机具前进速度为 2~5 km/h,型孔轮转速为 10~40 r/min,型孔轮直径为 120 mm^[18],直播机幅宽为 1. 8 m,可采用 225 mm 等行距播种 8 行油菜、小白菜或 300 mm 等行距种植 6 行芝麻。油菜出苗率取 43%^[15,19],田间预试验得出芝麻、小白菜出苗率分别为 38%、50%,采用(2±1)粒/穴精量穴播,取表 1 种植密度范围均值,计算得平均穴距为 84. 94、135. 11、118. 52 mm,计算并圆整得油菜、芝麻、小白菜型孔轮型孔数 Z 为 27、17、20。

2.1.2 型孔径向截面结构

抛物线各点斜率连续均匀变化并在最低点处斜率为零,有利于保证充种、投种过程种子平稳运移及将种子稳定在型孔底部;通过设置倒角、引种槽或采用倾斜型孔可以提高充种时间、改善充种效果^[10,13,20-21],因此设计一种径向截面为倾斜抛物线结构的型孔,以抛物线对称轴和顶点分别为 y 轴和原点建立直角坐标系,(0, - H)为型孔轮圆心,见图 4,抛物线倾斜前后与圆交点坐标关系满足

$$\begin{cases} x^2 = 2py \\ x^2 + (y + H)^2 = (R - r)^2 \\ x = x_1 \cos \theta_1 - y_1 \sin \theta_1 \\ y = y_1 \cos \theta_1 + x_1 \sin \theta_1 \end{cases} \tag{3}$$



Tab. 2 Parameters of physical properties of seeds

为保证型孔深度能够有效约束种子、型孔长度应能够至少容纳一粒最大粒径种子并避免充入3粒以上种子,型孔深度及长度应满足

$$\left\{ \begin{aligned} h_1 &= \frac{|(y_{A_1} - y_{B_1})x_{C_1} - (x_{A_1} - x_{B_1})y_{C_1} - y_{A_1}x_{B_1} + y_{B_1}x_{A_1}|}{\sqrt{(y_{A_1} - y_{B_1})^2 + (x_{A_1} - x_{B_1})^2}} \\ \frac{\bar{a} + 3\sigma_a}{2} &\leq h_1 \leq \bar{a} + 3\sigma_a \\ \bar{a} + 3\sigma_a &\leq l_{A_1B_1} \leq 3\bar{b} \\ l_{A_1B_1} &= \sqrt{2[(R-r)^2 + y_{A_1}H + y_{B_1}H - H^2 - x_{A_1}x_{B_1} - y_{A_1}^2 - y_{B_1}^2]} \\ l_{A_1B_1} &\leq 2R \sin \frac{180}{Z} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中 h_1 ——抛物线倾角为 θ_1 时型孔深度, mm
 x_{A_1} 、 y_{A_1} ——点 A_1 横、纵坐标, mm
 x_{B_1} 、 y_{B_1} ——点 B_1 横、纵坐标, mm
 x_{C_1} 、 y_{C_1} ——最低点 C_1 横、纵坐标, mm
 $\bar{a}$ ——种子长度均值, mm

式中 x, y ——未旋转抛物线与圆交点坐标, mm
 x_1, y_1 ——抛物线旋转后与圆交点坐标, mm
 p ——抛物线焦距距, mm
 H ——抛物线顶点至圆心距离(顶点距), mm
 R ——型孔轮半径, 取 60 mm
 r ——环槽凸台深度, mm
 θ_1 ——抛物线倾斜角, ($^\circ$)

种子物料特性是型孔设计的依据,每种作物随机选取 250 粒种子,统计结果见表 2。种子三轴尺寸最大和最小值可依据“ 3σ ”原理用均值和 3 倍标准差近似表示^[8]。

 σ_a ——种子长度标准差, mm $l_{A_1B_1}$ ——抛物线旋转后型孔长度, mm $\bar{b}$ ——种子宽度均值, mm

当抛物线倾斜角 θ_1 为 0 时, 满足

$$\begin{cases} H + r + h = R \\ l_{AB} = 2 \sqrt{2p[\sqrt{p^2 + (R-r)^2} + 2Hp - H - p]} \end{cases} \quad (5)$$

式中 h ——抛物线倾斜角为 0 时型孔深度, mm

 l_{AB} ——抛物线倾角为 0 时型孔长度, mm

由式(3)~(5)知,当型孔轮半径 R 一定时,型孔长 $l_{A_1B_1}$ 由环槽凸台深度 r 、抛物线顶点至圆心距离(顶心距) H 、焦距距 p 及抛物线倾斜角 θ_1 确定,随 H 增大而减小,随 p 和 θ_1 增大而增大。当 r 取仿真较优值0.5、0.2、0.4 mm时,依据式(4)、(5)及表2中种子三轴尺寸计算得型孔长度 $l_{A_1B_1}$ 及抛物线顶点至圆心距离(顶心距) H ,并借助SolidWorks软件抛物线参数化设计方法分析确定焦距距 p 和抛物线倾斜角 θ 取值范围,各参数取值范围见表3。

Tab.3 Parameters of cross section of type hole

注: θ_1 取值范围随 H 、 p 取值不同变化,当 H 取最大值、 p 取最小值时 θ_1 取上限值,当 H 取最小值、 p 取最大值时 θ_1 取下限值。

粒卡种及漏充;因此,型孔宽度应略大于种子最大长度以便于充种并控制充种数量;型孔轴向截面以单粒充种为主,结构如图5所示。增大型孔侧边倾斜

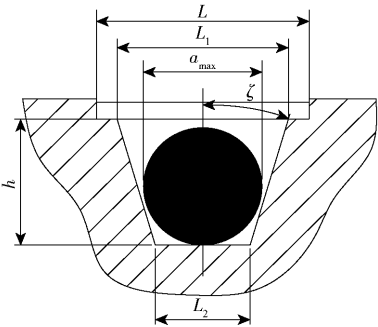


图5 型孔轴向截面示意图
Fig. 5 Structural diagram of longitudinal section
of type hole

角有利于顺利卸种,华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢与 ABS 型孔轮静摩擦角分别为 16.7°、26.1°、14.7°,侧边倾角系数 K_ζ 初始值取 1.0。为保证型孔两侧种子因翻转力矩进入型孔,型孔两侧环槽宽度应不大于种子最大长度一半,当环槽凸台宽度取较大值有利于将更多种子引导进入型孔,因此取型孔两侧环槽宽度为种子最大长度一半;当宽度系数 K_w 初始值取 1.1 时,华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢型孔顶宽 L_1 分别为 3.39、4.02、2.33 mm,环槽凸台宽度 L 分别为 6.47、7.67、4.45 mm,型孔轴向截面结构参数几何关系为

$$\begin{cases} a_{\max} = \bar{a} + 3\sigma_a \\ L_1 = K_w a_{\max} \\ L_2 = L_1 - 2h \tan \zeta \\ \zeta = K_\zeta \varphi \\ L = L_1 + a_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $a_{\max}$ ——种子长度最大值,mm
 L_2 ——型孔底宽,mm
 ζ ——型孔侧边倾角,(°)
 φ ——种子与型孔轮静摩擦角,(°)

2.1.4 搅种结构设计

增大环槽凸台深度 r (图 4) 可以增强搅种效果,但 r 不应过大,以避免环槽凸台拖带种子造成重播率增加, r 应不大于种子最小高度一半,华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢对应环槽凸台深度 r 上限分别为 0.61、0.30、0.56 mm。两型孔中间位置设置凸台,凸台长度 l (图 4) 取两型孔中间弦长的 1/3,型孔数 Z 分别取 27、17、20,当取表 3 型孔长度均值时,由

$$l = \frac{R \sqrt{2 - 2 \cos \left(\frac{360}{Z} - \arccos \left(1 - \frac{l_{A_1 B_1}^2}{2R^2} \right) \right)}}{3} \quad (7)$$

计算并圆整得华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢凸台长度 l 分别为 3、6、5 mm。

2.2 充种过程力学分析

2.2.1 充种过程

充种是排种过程首要环节,采用穴播方式每次囊取 (2 ± 1) 粒种子,为简化分析过程将被囊取种子视为整体,并且以型孔长度方向分布 2 粒种子、宽度方向 1 粒种子为例进行分析,充种过程种子受力示意图如图 6 所示,受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_f \cos \delta + F_c + (F_z + G) \sin \alpha - F_N \sin \delta - F_H \cos \alpha = 0 \\ F_N \cos \delta + F_f \sin \delta - F_H \sin \alpha - (F_z + G) \cos \alpha = 0 \\ F_f = \mu F_N \\ F_c = k \frac{m_0 \pi^2 n^2}{900\,000} R \\ F_H = S \frac{\gamma R_h}{f_s} \left(1 - e^{-\frac{K f_s H_s}{R_h}} \right) \\ F_z = S \frac{\gamma R_h}{K f_s} \left(1 - e^{-\frac{K f_s H_s}{R_h}} \right) \\ K = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right) \\ G = \frac{k m_0 g}{1\,000} \end{cases} \quad (8)$$

式中 F_f ——型孔与被囊取种子的摩擦力,N
 F_c ——被囊取种子的惯性离心力,N
 F_z ——被囊取种子受种群垂直压力^[22],N
 G ——被囊取种子重量,N
 α ——起始充填角,(°)
 F_N ——型孔对被囊取种子的支持力,N
 δ ——抛物线型孔右侧壁切线角(型孔和环槽底部圆弧右侧交点(参照图 4 中点 A_1)处抛物线切线与被囊取种子质心和型孔轮圆心连线夹角),(°)
 F_H ——被囊取种子受到种群水平压力,N
 μ ——型孔与被囊取种子的摩擦因数
 m_0 ——种子千粒质量,g

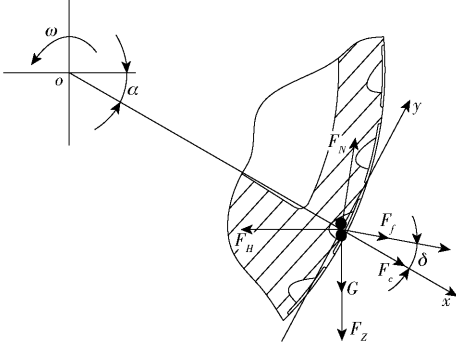


图6 充种过程受力分析

Fig. 6 Mechanics analysis of seeds in filling process

S ——被囊取种子截面积, m^2
 γ ——物料重度, N/m^3
 R_h ——被囊取种子液力半径, m
 K ——侧压系数
 f_s ——种子与储种室静滑动摩擦因数
 H_s ——被囊取种子与种层上表面距离, m
 φ_i ——物料的内摩擦角, $(^\circ)$
 g ——重力加速度, 取 $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$

整理式(8)得

$$\begin{cases} (1 + \mu^2) F_N - 2F_c(\sin\delta - \mu\cos\delta) F_N + \\ F_c^2 - (G + F_z)^2 - K^2 F_z^2 = 0 \\ \alpha = \arcsin \frac{F_N(\cos\delta + \mu\sin\delta)}{KF_z} \end{cases} \quad (9)$$

根据受力平衡方程可知, 起始充填角 α 受被囊取种子截面积 S 、重度 γ 、千粒质量 m_0 、内摩擦角 φ_i 、种子与储种室系静滑动摩擦因数 f_s 、种子与型孔轮摩擦因数 μ 、型孔轮半径 R 和转速 n 、储种室种层高度 h_s 及抛物线型孔右侧壁切线角 δ 共同影响。当种子类别、型孔轮与储种室材质、型孔轮转速 n 确定后, 起始充填角 α 主要受型孔右侧壁切线角 δ 影响, 对 α 关于 δ 求导, 并借助 SolidWorks 软件抛物线参数化设计方法分析确定 δ 随焦距距 p 、抛物线倾斜角 θ_1 变化规律及取值范围, 可知型孔长度一定时, 适当减小焦距距 p , 增大 θ_1 能够增大右侧壁切线角 δ 及起始充填角 α , 延长充种时间, 有利于改善充种性能^[23], 但增大 δ 同时会降低种群扰动量, 有降低充种性能趋势^[24], 拟借助仿真和试验确定上述因素对充种性能的影响规律。

2.2.2 投种过程

被囊取种子转过一定角度进入投种区, 种子应能顺利投种, 种子脱离型孔瞬间受力如图 7 所示。

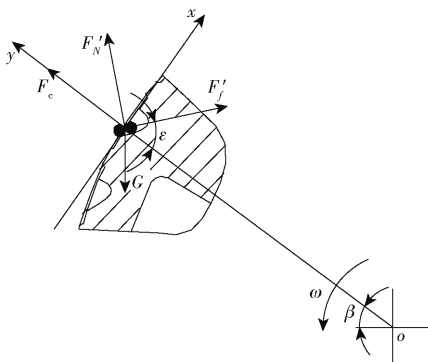


图 7 投种过程受力分析

Fig. 7 Mechanics analysis of seeds in throwing process

投种过程受力方程为

$$\begin{cases} G\cos\beta - F'_N\cos\varepsilon - F'_f\sin\varepsilon = 0 \\ F_c + F'_N\sin\varepsilon - G\sin\beta - F'_f\cos\varepsilon = 0 \\ F'_f = \mu F'_N \end{cases} \quad (10)$$

式中 β ——初始投种角, $(^\circ)$

F'_N ——投种时被囊取种子受型孔支持力, N

ε ——型孔左侧壁切线角(型孔与环槽底部圆弧左侧交点(参照图 4 中点 B_1)处抛物线切线与被囊取种子质心和型孔轮圆心连线夹角), $(^\circ)$

F'_f ——投种时被囊取种子受型孔摩擦力, N

由式(8)、(10)整理可得

$$\beta = \arctan \frac{F_c + F'_N\sin\varepsilon - \mu F'_N\cos\varepsilon}{G(F'_N\cos\varepsilon + \mu F'_N\sin\varepsilon)} \quad (11)$$

$$n = \sqrt{\frac{900\,000g(\sin(\beta - \varepsilon) + \mu\cos(\beta - \varepsilon))}{\pi^2 R(\cos\varepsilon + \mu\sin\varepsilon)}} \quad (12)$$

由式(11)可知, 当型孔左侧壁切线角 ε 一定时, 初始投种角 β 随惯性离心力 F_c 增大而增大, 随型孔与被囊取种子摩擦因数 μ 增大而减小; 由式(12)可知, 当型孔轮转速 n 一定时, 初始投种角 β 随型孔左侧壁切线角 ε 增大而增大; 借助 SolidWorks 软件抛物线参数化设计方法分析得出, 在表 3 设计参数范围内, 当型孔长度一定时, 随焦距距 p 减小和抛物线倾斜角 θ_1 增大, 型孔左侧壁切线角 ε 呈增大趋势, 因此增大转速 n 、抛物线旋转角 θ_1 或者减小型孔与种子摩擦因数 μ 、焦距距 p , 使初始投种角 β 增大, 增加投种时间, 促进顺利投种。

由充种和投种过程力学理论分析可知, 起始充填角 α 、初始投种角 β 受焦距距 p 和抛物线倾角 θ_1 共同影响, 型孔长度一定时, 适当减小 p 、增大 θ_1 , 有利于增大起始充填角和初始投种角, 改善充种和投种性能; 但减小 p 、增大 θ_1 使型孔右侧壁切线角 δ 增大, 型孔对种子约束能力增加, 充种粒数及重充率有增大趋势, 拟借助 EDEM 离散元仿真分析得出焦距距 p 和抛物线倾角 θ_1 较优值。

3 充种性能仿真

3.1 仿真模型建立

利用 EDEM 软件仿真分析型孔轮结构参数对充种性能的影响规律, 采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型, 油菜、小白菜种子粒径分布选用“normal”正态分布模型, 使用均值和 3 倍标准差计算粒径上下限; 芝麻采用“fixed”模型, 由 14 个半径 0.45 mm 小球填充, 三轴尺寸参照表 2 设置。充种过程种子仅与 ABS 工程塑料材质的储种室、型孔轮、落种口接触, ABS 密度为 $1\,060 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、泊松比为 0.394、剪切模量为 $8.96 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。油菜、芝麻、小白菜分别选用华油杂 62、航天新芝 T31 - 8、五月慢, 芝麻、小白菜仿真参数参照文献[25 - 26]试验方法, 借助卓精

BSM-520.3 型电子天平、游标卡尺、TMS-PRO 型质构仪、Phantom v1840 型高速摄影仪等测定,油菜^[14]、芝麻、小白菜仿真参数见表 4,芝麻仿真模型见图 8。

表 4 仿真参数

Tab.4 Computational parameters used in simulations

参数	油菜	芝麻	小白菜
密度/(kg·m ⁻³)	1 060	930	1 030
泊松比	0.25	0.481	0.25
剪切模量/Pa	1.1×10 ⁷	2.495×10 ⁶	1.1×10 ⁷
颗粒与颗粒恢复系数	0.6	0.278	0.6
颗粒与颗粒静摩擦因数	0.5	0.57	0.5
颗粒与颗粒动摩擦因数	0.01	0.01	0.01
颗粒与 ABS 塑料恢复系数	0.75	0.36	0.75
颗粒与 ABS 塑料静摩擦因数	0.30	0.49	0.26
颗粒与 ABS 塑料动摩擦因数	0.01	0.03	0.01

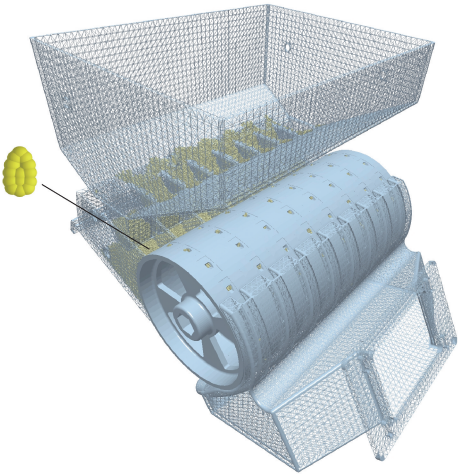


图 8 芝麻充种性能 EDEM 仿真模型

Fig.8 EDEM simulation model for filling sesame

3.2 型孔结构对充种性能影响

型孔结构包括型孔径向截面与轴向截面,开展 EDEM 仿真以确定型孔径向截面与轴向截面结构尺寸对充种性能与卡种的影响规律及其较优值。仿真预试验得适宜种层高度 h_s (图 3)为 20~40 mm,取均值 30 mm;创建颗粒工厂分别生成华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢种子 80 000、80 000、180 000 粒;转速取 25 r/min,每次统计 60 个型孔的充种粒数,(2±1)粒/穴为合格,0 粒/穴为漏充,超过 3 粒/穴为重充,计算充种合格率、重充率、漏充率。

3.2.1 型孔径向截面结构对充种性能影响

由充种、投种过程力学分析可知,型孔径向截面尺寸决定型孔能否稳定充种与顺利投种,仿真分析了横截面 3 个主要设计参数:顶心距 H 、焦距距 p 、抛物线倾斜角 θ_1 (图 4)对充种性能的影响规律。因抛物线倾斜角 θ_1 取值范围随顶心距 H 、焦距距 p 取值变化,首先分析顶心距 H 、焦距距 p 对充种性能的影响

规律及其较优组合,将表 3 华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢的顶心距 H 、焦距距 p 取值范围 4 等分,宽度系数 K_w 取 1.1,侧边倾角系数 K_s 取 1.0,环槽凸台深度 r 分别取 0.5、0.2、0.4 mm。预试验发现型孔长度较小时漏充偏高,因此均取型孔长度上限值(式(4)中 $l_{A_1B_1}=3\bar{b}$)对应型孔开展仿真分析,仿真结果见表 5。

由表 5 可知,顶心距 H 、焦距距 p 对充种性能影响因品种不同存在差异:顶心距 H 对华油杂 62 充种合格率影响极显著($P<0.01$)、对重充率影响显著($P<0.05$),焦距距 p 对华油杂 62 漏充率影响极显著($P<0.01$);顶心距 H 对航天新芝 T31-8 充种性能指标影响均极显著($P<0.01$);焦距距 p 对五月慢漏充率与充种合格率影响极显著($P<0.01$),对重充率影响显著($P<0.05$);其余各项不显著。

由试验数据可知,当顶心距 H 取最小值、焦距距 p 取最大值时重充率或漏充率普遍较高,合格率较低,由充种过程理论分析可知,当型孔长度为定值,减小顶心距 H 或增大焦距距 p 时抛物线倾角 θ_1 取值变小,使型孔右侧壁切线角 δ 和起始充填角 α 减小,充种时间和支持力 F_A 沿型孔轮圆心方向分力减小(图 6),充种性能降低;当焦距距 p 较小,如华油杂 62 焦距距 p 分别为 0.78、1.04、1.30 mm 时,型孔右侧壁能够有效约束种子实现顺利充种,此时型孔充种性能主要受顶心距 H 影响,顶心距 H 减小使型孔深度及容积增大,重充率增加;当焦距距 p 为 1.56 mm 时,型孔右侧壁切线角 δ 过小,型孔无法有效约束种子实现顺利充种,当顶心距 H 减小型孔右侧壁切线角 δ 进一步减小,充种性能降低,漏充率较高。由极差分析确定华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢顶心距 H 较优水平值为 58.0、58.0、58.6 mm,焦距距 p 较优值为 0.78、0.93、0.81 mm,结合式(5)得出顶心距 H 较优值为

$$H=R-r-\frac{\bar{a}+3\sigma_a}{2}\tag{13}$$

当顶心距 H 、焦距距 p 取上述较优值时,进一步分析抛物线倾角 θ_1 对充种性能影响规律。华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢抛物线倾角 θ_1 上限值分别为 50.41°、41.07°、53.43°。因抛物线倾角 θ_1 过小时,型孔对种子约束能力降低,充种性能下降;仿真预试验得出为实现良好充种,抛物线倾角 θ_1 下限值可取 0.75 倍上限值,并将抛物线倾角 θ_1 范围 4 等分,仿真结果见表 6。由表 6 可知,当顶心距 H 、焦距距 p 取定值时,随抛物线倾角 θ_1 增大,型孔长度和容积增大,且型孔右侧壁对种子约束能力增强,充种时

间延长,重充率有升高趋势、漏充率有降低趋势。以

油杂 62、航天新芝 T31 - 8、五月慢型孔抛物线倾角

充种合格率最高、漏充率与重充率均较低为标准,华

θ_1 较优值分别为 46. 21°、37. 65°、48. 98°。

表 5 顶心距和焦距距对充种性能影响规律

华油杂 62					航天新芝 T31 - 8					五月慢				
顶心距/	焦距距/	漏充率/	充种合	重充率/	顶心距/	焦距距/	漏充率/	充种合	重充率/	顶心距/	焦距距/	漏充率/	充种合	重充率/
mm	mm	%	格率/%	%	mm	mm	%	格率/%	%	mm	mm	%	格率/%	%
56. 4	0. 78	0	65. 00	35. 00	56. 2	0. 93	16. 67	83. 33	0	57. 6	0. 54	0	66. 67	33. 33
56. 9	0. 78	0	91. 67	8. 33	56. 8	0. 93	10. 00	90. 00	0	57. 9	0. 54	0	85. 00	15. 00
57. 4	0. 78	0	96. 67	3. 33	57. 4	0. 93	6. 67	91. 67	1. 67	58. 3	0. 54	0	90. 00	10. 00
58. 0	0. 78	0	96. 67	3. 33	58. 0	0. 93	0	96. 67	3. 33	58. 6	0. 54	0	95. 00	5. 00
56. 4	1. 04	1. 67	70. 00	28. 33	56. 2	0. 99	18. 33	81. 67	0	57. 6	0. 81	6. 67	68. 33	25. 00
56. 9	1. 04	0	85. 00	15. 00	56. 8	0. 99	15. 00	85. 00	0	57. 9	0. 81	1. 67	91. 67	6. 67
57. 4	1. 04	0	95. 00	5. 00	57. 4	0. 99	3. 33	91. 67	5. 00	58. 3	0. 81	0	95. 00	5. 00
58. 0	1. 04	0	96. 67	3. 33	58. 0	0. 99	0	96. 67	3. 33	58. 6	0. 81	0	96. 67	3. 33
56. 4	1. 30	1. 67	81. 67	16. 67	56. 2	1. 05	20. 00	80. 00	0	57. 6	1. 09	3. 33	93. 33	3. 33
56. 9	1. 30	1. 67	88. 33	10. 00	56. 8	1. 05	13. 33	86. 67	0	57. 9	1. 09	5. 00	95. 00	0
57. 4	1. 30	1. 67	91. 67	6. 67	57. 4	1. 05	5. 00	91. 67	3. 33	58. 3	1. 09	11. 67	86. 67	1. 67
58. 0	1. 30	1. 67	93. 33	5. 00	58. 0	1. 05	1. 67	96. 67	1. 67	58. 6	1. 09	18. 33	81. 67	0
56. 4	1. 56	26. 67	73. 33	0	56. 2	1. 10	48. 33	51. 67	0	57. 6	1. 37	86. 67	13. 33	0
56. 9	1. 56	15. 00	83. 33	1. 67	56. 8	1. 10	15. 00	85. 00	0	57. 9	1. 37	73. 33	26. 67	0
57. 4	1. 56	11. 67	86. 67	1. 67	57. 4	1. 10	11. 67	86. 67	1. 67	58. 3	1. 37	61. 67	38. 33	0
58. 0	1. 56	8. 33	90. 00	1. 67	58. 0	1. 10	8. 33	90. 00	1. 67	58. 6	1. 37	33. 33	66. 67	0
F	顶心距	1. 28	16. 42 **	4. 56 *			10. 13 **	7. 56 **	12. 57 **			0. 54	2. 78	3. 61
	焦距距	14. 53 **	0. 91	2. 27			3. 36	2. 91	1. 39			22. 55 **	17. 06 **	5. 79 *

注: ** 表示极显著($P < 0. 01$), * 表示显著($P < 0. 05$),下同。

表 6 型孔抛物线倾角 θ_1 对充种合格率影响规律

华油杂 62				航天新芝 T31 - 8				五月慢			
抛物线	漏充率/	充种合格	重充率/	抛物线	漏充率/	充种合格	重充率/	抛物线	漏充率/	充种合格	重充率/
倾角/(°)	%	率/%	%	倾角/(°)	%	率/%	%	倾角/(°)	%	率/%	%
37. 81	10. 00	90. 00	0	30. 80	10. 00	90. 00	0	40. 07	8. 33	91. 67	0
42. 01	3. 33	95. 00	1. 67	34. 22	5. 00	93. 33	1. 67	44. 53	3. 33	95. 00	1. 67
46. 21	1. 67	98. 33	0	37. 65	1. 67	96. 67	1. 67	48. 98	1. 67	96. 67	1. 67
50. 41	0	96. 67	3. 33	41. 07	0	96. 67	3. 33	53. 43	0	96. 67	3. 33

3. 2. 2 型孔轴向截面结构对充种性能影响

为研究型孔轴向截面参数对充种性能及卡种的影响规律,参照式(6)宽度系数 K_w 分别取 1. 1、1. 2、1. 3,侧边倾角系数 K_{ζ} 分别取 0、0. 5、1. 0;型孔径向截面参数取 3. 2. 1 节较优值,仿真结果见表 7。由结果可知,随宽度系数 K_w 增大和侧边倾角系数 K_{ζ} 减小,因型孔容积增大,充种粒数及重充率有增大趋势;当侧边倾角系数 K_{ζ} 为 0、宽度系数 K_w 取 1. 3 时华油杂 62 和五月慢型孔均因卡种造成漏充;主要原因为:设计参数范围内随宽度系数 K_w 增大、侧边倾角系数 K_{ζ} 减小,型孔宽度增大,充种时粒径较小的两粒种子并排充入型孔概率增大,因充种时种群作用力、种子重力及惯性力使种子产生微小形变卡入型孔,投种过程当离心力与重力无法克服型孔侧边

的摩擦力阻碍作用时产生卡种现象;当宽度系数 K_w 取 1. 1、侧边倾角系数 K_{ζ} 取 1. 0 时,充种合格率较高,此时,宽度方向种子以单粒形式充入型孔,因型孔宽度略大于种子粒径,型孔侧边对种子挤压及摩擦作用较小,且型孔倾斜侧边对种子支持力的径向分力有利于种子脱离型孔,避免卡种。因此宽度系数 K_w 、侧边倾角系数 K_{ζ} 较优值分别为 1. 1、1. 0,此时型孔能够实现(2 ± 1)粒/穴精量充种,且能够避免卡种。

3. 3 搅种结构对充种性能影响

合理设计型孔轮搅种结构能够促进种群扰动、改善充种性能,为探究搅种结构参数对充种性能的影响规律及其较优值,以华油杂 62 型孔轮为例开展分析。选取 3. 2 节较优型孔结构,保证型孔结构不

表 7 型孔轴向截面参数对充种性能影响规律

Tab. 7 Effects of longitudinal section of type hole on seed filling performance										
因素		华油杂 62			航天新芝 T31-8			五月慢		
宽度系数	侧边倾角系数	漏充率/%	充种合格 率/%	重充率/%	漏充率/%	充种合格 率/%	重充率/%	漏充率/%	充种合格 率/%	重充率/%
1.1	0	1.67	93.33	5.00	0	93.33	6.67	0	91.67	8.33
1.1	0.5	0	96.67	3.33	0	96.67	3.33	0	95.00	5.00
1.1	1.0	1.67	98.33	0	1.67	96.67	1.67	1.67	96.67	1.67
1.2	0	0	90.00	10.00	0	85.00	15.00	0	86.67	13.33
1.2	0.5	0	93.33	6.67	0	88.33	11.67	0	88.33	11.67
1.2	1.0	0	95.00	5.00	0	91.67	8.33	0	88.33	11.67
1.3	0	5.00	85.00	10.00	0	76.67	23.33	1.67	80.00	18.33
1.3	0.5	0	88.33	11.67	0	81.67	18.33	0	85.00	15.00
1.3	1.0	0	90.00	10.00	0	85.00	15.00	0	86.67	13.33

变的前提下,研究无搅种、仅环槽且 r 为 0.5 mm 以及环槽凸台深度 r 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mm 时充种性能,充种性能统计结果见表 8,充种效果及充种区种子平均速度见图 9、10。

表 8 不同搅种结构时充种性能

Tab. 8 Effects of bump height on seed filling performance			
搅种结构	漏充率	充种合格率	重充率
%			
无搅种	11.67	88.33	0
仅环槽, $r=0.5$ mm	10.00	90.00	0
环槽凸台, $r=0.1$ mm	10.00	90.00	0
环槽凸台, $r=0.2$ mm	10.00	90.00	0
环槽凸台, $r=0.3$ mm	8.33	91.67	0
环槽凸台, $r=0.4$ mm	3.33	95.00	1.67
环槽凸台, $r=0.5$ mm	1.67	98.33	0
环槽凸台, $r=0.6$ mm	0	91.67	8.33

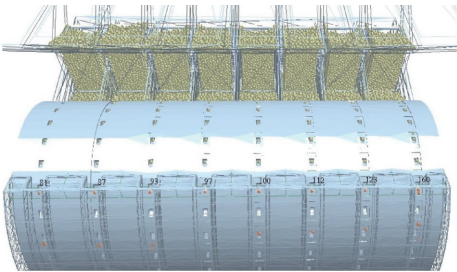


图 9 充种效果仿真图

Fig. 9 Seed-filling performance of rapeseed in EDEM simulation

由表 8 可知,当采用无搅种、仅环槽且 r 为 0.5 mm 及环槽凸台深度 r 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 mm 时漏充率较高,结合图 10 可知,此时型孔轮搅种能力不足,充种区种群平均速度较小,种子与型孔相对速度较大,充种时间短导致漏充率偏高;当环槽凸台深度 r 为 0.6 mm 时,充种区种子平均速度最大,型孔平均充种粒数增大且存在种子被环槽凸台拖带现象,造成重充率增大;华油杂 62 型孔环槽凸台适宜深度 r 为 0.5 mm,此时充种合格率为

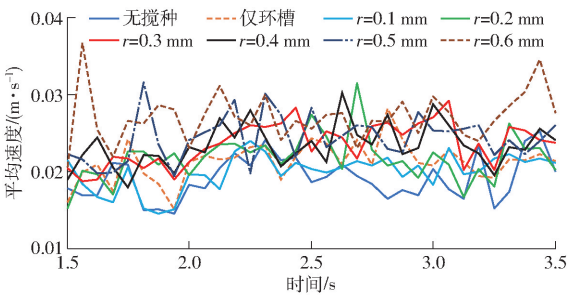


图 10 搅种结构对充种区种子平均速度影响规律

Fig. 10 Effects of churning structure on average velocity of seeds

98.33%。采用相同方法得出航天新芝 T31-8、五月慢的环槽凸台深度 r 分别为 0.2、0.4 mm 时充种合格率较高,均为 96.67%。

分析可知,环槽凸台结构参数主要受种子三轴尺寸及球形度影响,避免环槽凸台拖带种子的前提下,环槽凸台深度 r 取较大值能够改善充种性能。结合表 2 可知,环槽凸台深度 r 较优值计算式为

$$r = \frac{\bar{d}\psi}{4}$$

(14)

式中 $\bar{d}$ ——种子几何平均粒径,mm

ψ ——球度,%

3 品种预测值依次为 0.47、0.24、0.39 mm,与仿真结果基本一致。

3.4 种层高度和转速对充种性能影响

种层高度和转速是影响充种性能的重要因素,在确定型孔轮结构较优参数基础上,选取排种轮转速 n 、种层高度 h_s (图 3)为试验因素,转速取值范围 10~40 r/min,种层高度 20~40 mm,两因素均等间隔设置 4 个水平;以充种合格率、重充率、漏充率为试验指标,开展双因素全面仿真试验,每组试验统计 60 穴,试验方案与仿真结果见表 9。

在试验条件下排种轮转速 n 、种层高度对充种合格率影响均不显著($P>0.05$),集排器充种性能

表 9 种层高度和转速对充种性能影响仿真结果
Tab.9 Effects of seed height and rotational speed on seed filling performance

因素		华油杂 62			航天新芝 T31-8			五月慢		
转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	种层高度/ mm	漏充率/ %	充种合格 率/%	重充率/ %	漏充率/ %	充种合格 率/%	重充率/ %	漏充率/ %	充种合格 率/%	重充率/ %
10	20	5.00	93.33	1.67	5.00	95.00	0	3.33	93.33	3.33
10	26.7	1.67	95.00	3.33	0	95.00	5.00	1.67	91.67	6.67
10	33.4	0	93.33	6.67	0	91.67	8.33	0	90.00	10.00
10	40	0	85.00	15.00	0	81.67	18.33	0	80.00	20.00
20	20	5.00	93.33	1.67	10.00	90.00	0	6.67	93.33	0
20	26.7	1.67	96.67	1.67	3.33	96.67	0	0	98.33	1.67
20	33.4	0	96.67	3.33	0	95.00	5.00	0	95.00	5.00
20	40	0	93.33	6.67	0	93.33	6.67	0	91.67	8.33
30	20	6.67	93.33	0	11.67	88.33	0	8.33	91.67	0
30	26.7	1.67	98.33	0	5.00	95.00	0	3.33	96.67	0
30	33.4	0	98.33	1.67	1.67	96.67	1.67	1.67	96.67	1.67
30	40	0	96.67	3.33	0	93.33	6.67	0	95.00	5.00
40	20	18.33	81.67	0	21.67	78.33	0	15.00	85.00	0
40	26.7	13.33	86.67	0	13.33	86.67	0	11.67	88.33	0
40	33.4	5.00	95.00	0	10.00	88.33	1.67	5.00	95.00	0
40	40	1.67	93.33	5.00	6.67	91.67	1.67	3.33	93.33	3.33
F	转速	8.36 **	3.00	6.40 *	30.69 **	2.13	4.16 *	12.36 **	2.15	10.32 **
	种层高度	7.91 **	1.49	9.11 **	25.27 **	1.17	5.91 *	11.76 **	0.97	8.10 **

稳定。转速对 3 种作物漏充率影响均极显著 ($P < 0.01$), 对华油杂 62、航天新芝 T31-8 重充率影响显著 ($P < 0.05$), 对五月慢重充率影响极显著 ($P < 0.01$); 种层高度对 3 种作物漏充率影响均极显著 ($P < 0.01$), 对华油杂 62、五月慢品种的重充率影响极显著 ($P < 0.01$), 对航天新芝 T31-8 重充率影响显著 ($P < 0.05$); 较优参数为转速 20 ~ 30 r/min, 种层高度 26.7 ~ 33.4 mm, 3 品种合格率为 95.00% ~ 98.33%。

4 集排器性能台架试验

4.1 充种性能台架试验

为验证 EDEM 仿真的准确性及台架试验条件下实际充种效果, 根据华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢较优结构参数: 顶心距分别为 58.0、58.0、58.6 mm, 焦距距 p 分别取 0.78、0.93、0.81 mm, 抛物线倾角 θ_1 分别为 46.21°、37.65°、48.98°, 型孔宽度系数 K_w 取 1.1、侧边倾角系数 K_s 取 1.0, 环槽凸台深度 r 分别为 0.5、0.2、0.4 mm, 3D 打印各型孔轮; 参照表 9 取华油杂 62、航天新芝 T31-8 排种轮转速 n 为 30 r/min、种层高度 h_s 为 33.4 mm, 五月慢排种轮转速 n 为 20 r/min、种层高度 h_s 为 26.7 mm; 借助 Phantom v1840 型高速摄影仪拍摄充种过程, 每个型孔轮统计 60 型孔, 每个品种统计 8 个型孔轮共计 480 型孔, 试验过程见图 11, 试验结果见表 10。

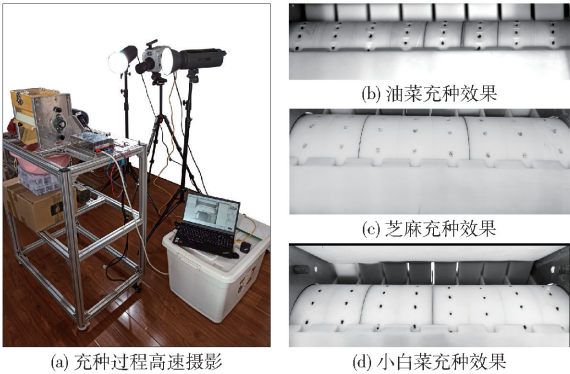


图 11 充种性能验证试验

Fig. 11 Test to verify simulation results of seed filling

表 10 各品种较优型孔充种性能试验

Tab. 10 Seed filling performance of optimal type hole

作物品种	仿真合格率	试验合格率
华油杂 62	98.33	96.88
航天新芝 T31-8	96.67	94.58
五月慢	98.33	95.83

由结果可知, 华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢仿真与台架充种合格率相差分别为 1.45、2.09、2.50 个百分点, 实际充种性能与仿真基本一致, 仿真结果可用于预测实际充种效果, 集排器充种性能良好。

4.2 排种性能台架试验

为验证集排器排种性能, 使用 JPS-12 型排种性能试验台开展排种性能试验, 以破损率、漏播率、

穴粒数合格率、重播率与穴距合格率为评价指标。统计破损率时,试验前人工剔除破损种子,以 25 r/min 排种 5 min,取样不少于 50 g,人工挑选出破碎种子并称量,每组重复 3 次,统计得出各品种平均破损率分别为 0.31%、0.41%、0.34%,均满足国标要求。穴粒数合格率与穴距合格率每次统计 120 穴,均重复测试 5 次取均值, (2 ± 1) 粒/穴为合格,华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢理论穴距分别为 100、135、100 mm,排种性能试验台种带速度 v_m 计算式为

$$1\,000v_m=\frac{Znl_h}{60}$$

(15)

试验效果见图 12,试验结果见表 11。分析可知,因种子投种时间存在差异,落种过程种子与落种口、导种管碰撞等,造成穴粒数合格率均低于 4.1 节高速摄影得出的充种合格率,差值分别为 4.88、4.58、5.16 个百分点,穴距合格率分别为 83.67%、81.83%、82.50%。

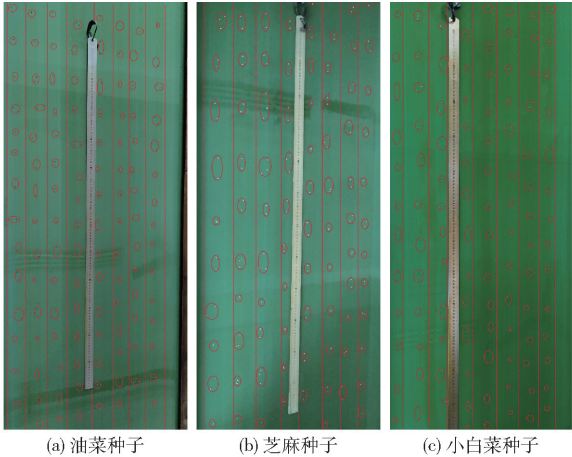


图 12 排种性能试验种子分布

Fig. 12 Seeds distribution in seeding performance test

表 11 排种性能试验结果

Tab. 11 Test results of seeding performance %				
作物品种	漏播率	穴粒数 合格率	重播率	穴距合格 率
华油杂 62	3.73	92.00	4.27	83.67
航天新芝 T31-8	5.10	90.00	4.90	81.83
五月慢	4.33	90.67	5.00	82.50

5 田间试验

为验证小粒径种子精量直播机田间作业性能,分别于 2021 年 6 月 2 日、9 月 27 日在华中农业大学现代农业科技试验田开展芝麻、油菜播种试验,选用航天新芝 T31-8、华油杂 62 品种,种层高度 30 mm,直播机牵引动力为东方红 LX-954 型拖拉机,采用慢 2 挡,额定速度 3.36 km/h,分别采用 300、225 mm 等行距播种 6 行芝麻和 8 行油菜,理论穴距分别为

135、100 mm,试验过程及出苗效果见图 13。



图 13 田间播种试验

Fig. 13 Field experiments of seeding sesame and rapeseed

参照 NY/T1143—2006《播种机质量评价技术规范》、NY/T2709—2015《油菜播种机作业标准》,在播种 20 d 后随机选取 5 厢,每厢随机选取 1 m,测得航天新芝 T31-8 平均出苗数为 1.15 株/穴,穴株数合格率 85.77% $((2 \pm 1)$ 株/穴),穴距合格率 75.51% (68 ~ 203 mm);华油杂 62 平均出苗数为 1.16 株/穴,穴株数合格率 89.67% $((2 \pm 1)$ 株/穴),穴距合格率 81.54% (50 ~ 150 mm),满足芝麻、油菜精量穴播要求。

6 结论

(1) 基于华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢种子物料特性与 (2 ± 1) 粒/穴精量穴播农艺要求,设计一种采用倾斜抛物线型孔充种、环槽凸台搅种型孔轮,完成精量穴播集排器和直播机整机结构设计。

(2) EDEM 仿真分析了型孔和搅种结构参数对充种性能的影响规律,确定了型孔轮主要结构参数的较优值,得出了依据种子物料特性确定抛物线顶点至型孔轮中心距离、型孔侧边倾角及环槽凸台深度较优值的计算方法。借助高速摄影仪与 JPS-12 型排种性能试验台开展台架验证试验,得出较优结构和运行参数条件下华油杂 62、航天新芝 T31-8、五月慢充种合格率分别为 96.88%、94.58%、95.83%,穴粒数合格率分别为 92.00%、90.00%、90.67%,穴距合格率分别为 83.67%、81.83%、82.50%。

(3) 田间试验表明,航天新芝 T31-8 平均出苗数为 1.15 株/穴,穴株数合格率 85.77% $((2 \pm 1)$ 株/穴),穴距合格率 75.51% (68 ~ 203 mm);华油杂 62 平均出苗数为 1.16 株/穴,穴株数合格率 89.67% $((2 \pm 1)$ 株/穴),穴距合格率 81.54% (50 ~ 150 mm),满足芝麻、油菜精量穴播要求。

参 考 文 献

- [1] 刘成,冯中朝,肖唐华,等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485–489.
LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(4): 485–489. (in Chinese)
- [2] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1–16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1–16. (in Chinese)
- [3] 林翩,廖庆喜,王磊,等. 芝麻精量穴播排种器吸种性能分析与试验[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 195–206.
LIN Pian, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Seed suction performance and experiment of sesame precision hole seeding metering device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 195–206. (in Chinese)
- [4] 尹文庆,赵璐,李骅,等. 气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 68–76, 136.
YIN Wenqing, ZHAO Lu, LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 68–76, 136. (in Chinese)
- [5] GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322–329.
- [6] 李兆东,何顺,钟继宇,等. 油菜扰动气吸式穴播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 1–11.
LI Zhaocong, HE Shun, ZHONG Jiyu, et al. Parameter optimization and experiment of the disturbance air-suction hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 1–11. (in Chinese)
- [7] 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 Zhaocong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12–22. (in Chinese)
- [8] 曹秀龙,马旭,李宏伟,等. 气吸滚筒式油菜穴盘育苗精密排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 51–60.
CAO Xiulong, MA Xu, LI Hongwei, et al. Design and experiments of pneumatic roller type precision seed-metering device for rapeseed plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 51–60. (in Chinese)
- [9] 杨文彩,阚成龙,张效伟,等. 气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 95–105.
YANG Wencai, KAN Chenglong, ZHANG Xiaowei, et al. Design and test of precision seed metering device for *Panax notoginseng* seedling and seeding by air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 95–105. (in Chinese)
- [10] 顿国强,于春玲,杨永振,等. 大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 62–73.
DUN Guoqiang, YU Chunling, YANG Yongzhen, et al. Parameter simulation optimization and experiment of seed plate type hole for soybean breeding[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 62–73. (in Chinese)
- [11] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 60–71.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of ginseng precision special-hole type seed-metering device with convex hull[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 60–71. (in Chinese)
- [12] 王在满,黄逸春,王宝龙,等. 播量无级调节水稻精量排种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 9–16.
WANG Zaiman, HUANG Yichun, WANG Baolong, et al. Design and experiment of rice precision metering device with sowing amountstepless adjusting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 9–16. (in Chinese)
- [13] 张明华,罗锡文,王在满,等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 29–36.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 29–36. (in Chinese)
- [14] 雷小龙,杨文浩,杨龙君,等. 油菜精量穴播集中排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 54–64.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, YANG Longjun, et al. Design and experiment of seed hill-seeding centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 54–64. (in Chinese)
- [15] 蒯婕,王积军,左青松,等. 长江流域直播油菜密植效应及其机理研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(24): 4625–4632.
KUAI Jie, WANG Jijun, ZUO Qingsong, et al. Effects and mechanism of higher plant density on directly-sown rapeseed in the Yangtze River basin of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(24): 4625–4632. (in Chinese)
- [16] 刘海,张青松,廖宜涛,等. 小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 40–48, 77.
LIU Hai, ZHANG Qingsong, LIAO Yitao, et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 40–48, 77. (in Chinese)
- [17] 林翩. 油菜芝麻兼用型精量排种器试验与分析[D]. 武汉:华中农业大学, 2021.

- based on high-speed photography and virtual simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 13–19. (in Chinese)
- [19] 臧英, 邢赫, 王在满, 等. 水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 33–38.
ZANG Ying, XING He, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of shield device on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 33–38. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] SHEN H, ZHANG J, CHEN X, et al. Development of a guiding-groove precision metering device for high-speed planting of soybean[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(3): 1113–1122.
- [22] XUE P, HAO Y, JIAO W, et al. Design and test of a double-curved guiding groove for a high-speed precision seed-metering device[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(5): 1349–1360.
- [23] XUE P, XIA X, GAO P, et al. Double-setting seed-metering device for precision planting of soybean at high speeds[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(1): 187–196.
- [24] LIU Hongxin, GUO Lifeng, FU Lulu, et al. Study on multi-size seed-metering device for vertical plate soybean precision planter[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(1): 1–8.
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册上[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [26] 周勇, 胡梦杰, 夏俊芳, 等. 内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 59–67.
ZHOU Yong, HU Mengjie, XIA Junfang, et al. Design and experiment of inside-filling adjustable precision seed-metering device with combined hole for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 59–67. (in Chinese)
- [27] 胡梦杰, 夏俊芳, 郑侃, 等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 73–85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73–85. (in Chinese)

(上接第 75 页)

- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [19] 蒯婕, 孙盈盈, 左青松, 等. 机械收获模式下直播冬油菜密度与行距的优化[J]. 作物学报, 2016, 42(6): 898–908.
KUAI Jie, SUN Yingying, ZUO Qingsong, et al. Optimization of plant density and row spacing for mechanical harvest in winter rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(6): 898–908. (in Chinese)
- [20] 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 108–112.
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108–112. (in Chinese)
- [21] 李兆东, 王晴晴, 张亚兰, 等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 116–124.
LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 116–124. (in Chinese)
- [22] 马云海. 农业物科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 100–101.
- [23] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 组合型孔排种器双充种室结构对充种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 8–15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Effect of double seed-filling chamber structure of combined type-hole metering device on filling properties[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 8–15. (in Chinese)
- [24] 李兆东, 杨文超, 武尧尧, 等. 油菜气力盘式精量排种器槽齿辅助充种性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 57–66.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, WU Yaoyao, et al. Performance analysis and experiments of seed filling assisted by groove-tooth of pneumatic disc precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 57–66. (in Chinese)
- [25] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35–42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35–42. (in Chinese)
- [26] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123–132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123–132. (in Chinese)