

油莎豆窝眼排种轮低位集穴排种器设计与试验

丁力 郭海钦 王万章 吕志军 吕严柳 张润锴

(河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002)

摘要: 结合油莎豆物料特性和黄淮海区域油莎豆种植农艺要求, 针对油莎豆种子表面凹凸不平、形状不规则导致的流动性差、充种性能不佳和每穴3粒种子投种时轴向分散等问题, 设计了一种油莎豆V形凹槽窝眼排种轮低位集穴排种器。通过对窝眼排种轮直径、型孔以及其表面增设的V形凹槽进行设计, 提高了精量分离充种性能; 在窝眼排种轮下方加设低位投种集穴装置, 既可降低投种高度, 又可将分散下落的种子向中间聚集, 提高了成穴效果。利用EDEM软件对排种器进行了运动特性仿真, 分析了不同结构参数对充种效果的影响, 确定了窝眼排种轮的结构参数; 以窝眼排种轮转速、种层高度和型孔宽度为试验因素, 以合格指数、漏播指数和重播指数为试验指标, 进行了二次回归正交旋转组合仿真试验。仿真试验结果表明: 影响合格指数的主次顺序为窝眼排种轮转速、型孔宽度、种层高度; 当窝眼排种轮转速为22.10 r/min、型孔宽度为14.23 mm、种层高度为52.59 mm时, 合格指数为92.11%、漏播指数为2.24%、重播指数为5.65%。最后进行了台架试验, 对仿真结果进行了验证, 得出油莎豆低位集穴排种器的充种和集穴性能较好, 满足油莎豆精密播种要求。

关键词: 油莎豆; 窝眼式排种器; 低位投种轮; V形凹槽

中图分类号: S225.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)10-0086-12

OSID:



Design and Test of *Cyperus esculentus* Cell-wheel Seed-metering Device with Low-position Seeding and Cavitation Function

DING Li GUO Haiqin WANG Wanzhang LÜ Zhijun LÜ Yanliu ZHANG Runkai
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Combining the characteristics of *Cyperus esculentus* seeds and the requirements of planting in Huang-Huai-Hai Plain, in order to solve the problems of poor fluidity, poor filling-seed performance and three seeds per hole scattered and falling due to the uneven surface and irregular shape of the *Cyperus esculentus* seeds, a *Cyperus esculentus* cell-wheel seed-metering device with low-position seeding and cavitation function and V-shaped groove was designed. Through the design of the diameter and the type hole of the metering wheel and the additional V-shaped groove on its surface, the precision separation, and filling-seed performance was improved; a low-position seeding and cavitation device was added under the metering wheel, which can be used to lower the height of seeding and it can also gather the scattered and falling seeds in the middle, which improved the effect of cavitation. The movement characteristics of the seed metering device were simulated through the EDEM, the influence of different structural parameters on the filling-seed performance was analyzed, and the structural parameters of the metering wheel were determined. The speed of the metering wheel, the height of the seed layer and the width of the type hole were taken as the test factors, and the three factors of the seeding qualified index, missing index, and multiple index were used as test indicators, and the quadratic rotation orthogonal combination test was carried out. The simulation test results showed that the primary and secondary order that affected the qualified index of the number of seeds was the speed of the metering wheel, the width of the type hole, and the height of the seed layer; when the speed of the metering wheel was 22.10 r/min, the width of the type hole was 14.23 mm and the height of the seed layer was 52.59 mm, the qualified index was

收稿日期: 2021-10-24 修回日期: 2021-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1002600)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系专项(CARS-03)和河南省科技攻关项目(222102110032)

作者简介: 丁力(1989—),男,讲师,博士,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: 604295294@qq.com

通信作者: 王万章(1963—),男,教授,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: wangwz@henau.edu.cn

92.11%，the missing index was 2.24%，and the multiple index was 5.65%。Finally, a bench test was carried out to verify the simulation results, and it was concluded that the *Cyperus esculentus* metering device with low-position seeding and cavitation function had better filling-seed and cavitation performance, which met the requirements of precise seeding of *Cyperus esculentus*.

Key words: *Cyperus esculentus*; cell-wheel seed-metering device; low-position seeding wheel; V-shaped groove

0 引言

油莎豆粮、油、牧、饲兼用,其出油率高达 25%，有望成为大豆的替代品,大大缩减我国油料对国外进口的依赖性。河南省油莎豆主要种植于黄河故道沙化土地,其中示范田种植经测产,平均单产鲜豆 152.8 kg/hm²,折合干豆 77.32 kg/hm²。油莎豆播种农艺要求为每穴 3 粒精密播种。目前油莎豆播种一般采用改进的机械式花生播种机,其排种精度较低,很难实现精量及半精量播种,严重阻碍了油莎豆生产。排种器作为精量播种机的核心部件,对提高产量、节约良种、提高种植收益尤为重要。

油莎豆种子表面凹凸不平、形状不规则,导致其无法与吸孔紧密贴合,限制了传统气力式排种器在油莎豆精密播种中的应用^[1]。基于我国小农户普遍并长期存在,机械式排种器仍将广泛使用,结构简单,造价低廉,维修方便,且能实现精密播种的窝眼式油莎豆精密排种器成为首选。目前窝眼式精密排种器在油菜、玉米和大豆等种子形状较为规则作物的单粒精确播种中已得到广泛使用^[2-4]。国内外专家针对排种器充种性能不佳,成穴效果较差等问题也做了大量研究^[5-16],但未对油莎豆种子因形状不规则导致的流动性差、充种性能不佳和 3 粒精播集穴效果差做针对性研究。

因此,本文提出一种降低投种高度,促进种子集穴的方法。基于此方法,设计油莎豆低位集穴排种器,通过理论计算结合 EDEM 离散元仿真试验分析确定结构和工作参数,通过台架试验对排种器的充种性能和工作性能进行验证,以期达到油莎豆种子每穴 3 粒精密播种的要求。

1 油莎豆种植农艺

黄淮海地区油莎豆垄作种植农艺要求如图 1 所示。4 月底 5 月初播种,垄底宽 60 cm,垄间距 60 cm,垄高不低于 13 cm,垄上双行单穴 3 粒种植,垄上行距 20 cm,穴距 15 cm。其中每穴播种粒数和穴距为型孔的分布及周向型孔个数的设计提供依据。

2 排种器总体结构与工作原理

油莎豆低位集穴排种器结构如图 2 所示。主要

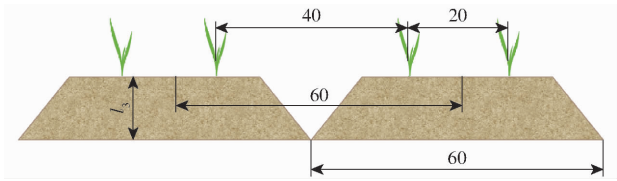


图 1 油莎豆种植农艺
Fig. 1 Agronomy of *Cyperus esculentus*

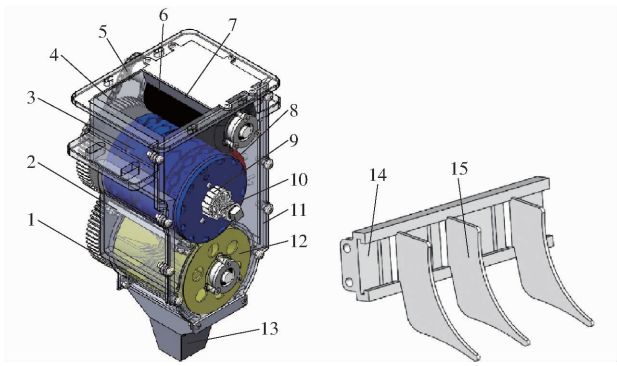


图 2 油莎豆低位集穴排种器结构示意图
Fig. 2 Schematic of structure of *Cyperus esculentus* metering device with low-position seeding and cavitation function

1. 尼龙齿轮 2. 清种机构 3. 窝眼排种轮 4. 链条 5. 链轮
6. 清种刷 7. 刮种板 8. 柔性护种板 9. 调节螺母 10. 调节螺栓
11. 壳体 12. 低位投种轮 13. 导种槽 14. 清种片固定架
15. 清种片

由壳体、窝眼排种轮、清种刷、刮种板、柔性护种板、清种机构、低位投种轮、导种槽、调节螺母、调节螺栓、齿轮、链条、链轮等组成。

排种器的工作过程如图 3 所示。动力从窝眼排种轮端输入,通过链条传动和齿轮传动分别带动清种刷和低位投种轮转动,其中低位投种轮与窝眼排种轮同步逆向转动。窝眼排种轮转动,使油莎豆种子在自身重力和种间作用力合力作用下充入型孔,其表面的凸包和 V 形凹槽可以扰动种群,从而使种子更容易充入型孔;清种刷与窝眼排种轮同向转动,清除未完全充入型孔的种子,清种刷斜上方的刮种板可将小概率卡在清种刷表面的较小种子清掉,防止其进入清种刷与壳体间形成的间隙中,影响排种器正常工作。充入型孔的油莎豆种子随窝眼排种轮转动经过护种区到达投种位置,靠重力作用落入与窝眼排种轮同步的低位投种轮上对应的储种槽内,卡在型孔内较大的种子,可在清种机构的作用下强制清种;随后,种子可在低位投种轮转动的过程中向

中间聚集,到达投种点时投出,在重力作用下经过导种槽落入种沟,从而提高排种器的集穴效果。

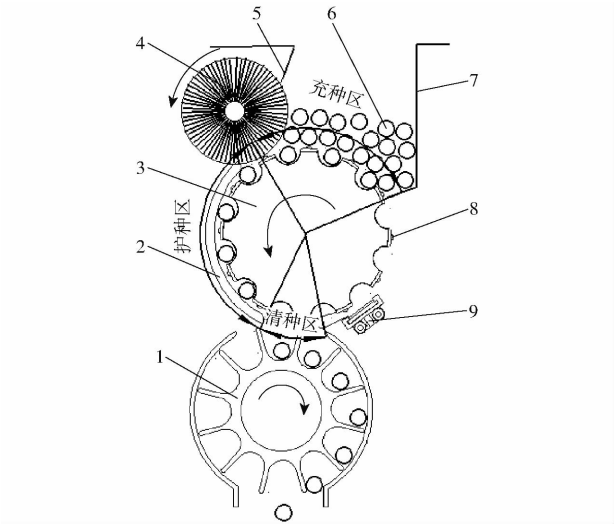


图3 油莎豆排种器工作过程区域示意图
Fig.3 Schematic of working process area of *Cyperus esculentus* seed metering device
1.低位投种轮 2.护种板 3.窝眼排种轮 4.清种刷 5.刮种板 6.油莎豆种子 7.壳体 8.凸包结构 9.清种机构

3 关键部件设计与参数分析

3.1 油莎豆种子三轴尺寸

以中油莎1号为研究对象,随机抽选100粒油莎豆种子,用精度为0.01 mm的电子游标卡尺测量种子的三轴尺寸,根据公式求出油莎豆种子的等效直径(D),并计算出球形率(Φ)。油莎豆种子的长(L)、宽(W)、厚(T)与等效直径的关系式为

$$D = \sqrt[3]{LWT} \tag{1}$$

球形率公式为

$$\Phi = \frac{D}{L} \tag{2}$$

对油莎豆种子尺寸测量结果求平均值,其结果见表1。

表1 油莎豆种子三轴尺寸					
Tab.1 Three-axis size of <i>Cyperus esculentus</i> seeds					
统计参数	长度/ mm	宽度/ mm	厚度/ mm	等效直径/ mm	球形率
平均值	13.64	12.18	9.12	11.47	0.84
最大值	16.78	14.24	11.18		
最小值	10.62	9.31	6.52		

对油莎豆种子三轴尺寸测量结果进行分析,结果表明种子的长、宽、厚近似服从正态分布。

3.2 窝眼排种轮设计

窝眼排种轮是油莎豆低位集穴排种器的核心部件,其结构与参数的确定是否合理,是决定排种

器排种性能优良的关键。根据油莎豆种植农艺每穴3粒精密播种的要求,对窝眼排种轮进行结构设计,如图4所示。整体主要由轮体、型孔、连杆、弹簧、调节螺栓、调节螺母和轮体表面的凸包、V形凹槽、强制投种槽等组成,其中轮体由6部分嵌套连接,形成轴向3排型孔,且通过旋转调节螺母可以调节其宽度。本文窝眼排种轮的主要设计参数包括窝眼排种轮直径、型孔尺寸与排布、V形凹槽与凸包设计与排布等,这些参数是保证排种器具有良好充种、携种和投种性能的关键。

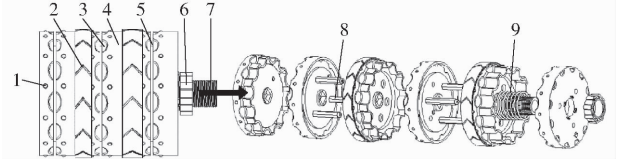


图4 窝眼排种轮结构示意图
Fig.4 Schematic of metering wheel structure
1.凸包 2.V形凹槽 3.型孔 4.轮体 5.强制投种槽 6.调节螺母 7.调节螺栓 8.连杆 9.弹簧

3.2.1 窝眼排种轮直径确定

转速一定的情况下,窝眼排种轮直径过大会造成线速度过大,减小直径能够降低线速度,但会增加窝眼排种轮曲率,充种效果差,出现漏充现象。同时,窝眼排种轮直径过小,分布的型孔个数减小,为了保证播量则必须增加转速,而转速过高又会降低排种性能。因此,考虑油莎豆精密播种的农艺要求及排种性能等因素,参考常用窝眼排种轮直径80~140 mm,本文选用窝眼排种轮直径 d 为120 mm。

3.2.2 窝眼排种轮型孔参数设计

型孔是排种器充种的关键结构,其形状、尺寸以及排布直接影响排种器性能^[17]。为减少种子损伤,提高型孔与种子的适应度,设计带有倒角的型孔,其形状为类椭圆形,长度、宽度和深度与种子相适应,如图5所示,其中 A 、 B 、 C 为型孔长度、宽度、深度。

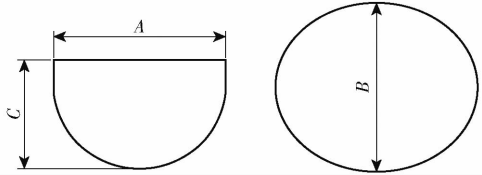


图5 型孔形状示意图
Fig.5 Schematic of type hole shape

为了保证每个型孔顺利充入1粒种子,使排种器可达到每穴3粒精确播种,型孔尺寸设计公式为

$$\begin{cases} L_{\max} < A < 2L_{\min} \\ W_{\max} < B < W_{\min} + T_{\min} \\ T_{\max} < C < 2T_{\min} \\ C < B < A \end{cases} \tag{3}$$

式中 $L_{\max}$ ——油莎豆种子长度最大值, mm
 $L_{\min}$ ——油莎豆种子长度最小值, mm
 $W_{\max}$ ——油莎豆种子宽度最大值, mm
 $W_{\min}$ ——油莎豆种子宽度最小值, mm
 $T_{\max}$ ——油莎豆种子厚度最大值, mm
 $T_{\min}$ ——油莎豆种子厚度最小值, mm

其中, 型孔长度大于油莎豆种子最大颗粒长度, 小于最小颗粒长度的 2 倍, 既要满足单个种子充入, 又要防止两个颗粒前后相接充入; 型孔宽度要大于最大油莎豆种子宽度, 小于最小颗粒宽度与最小颗粒厚度之和, 既要满足单个种子充入, 又要防止两个颗粒左右相接充入; 型孔深度大于油莎豆种子最大颗粒厚度, 小于最小颗粒厚度的 2 倍, 型孔的深度要满足油莎豆种子完全充入型孔内, 使单粒种子能够不被清种刷带出型孔, 又利于清除多余种子。根据 3.1 节测得油莎豆种子数据, 结合预试验, 确定型孔长度 A 、宽度 B 、深度 C 分别为 18、15、11.4 mm, 为半椭圆状型孔。

相同播量下, 窝眼排种轮上型孔的数量越多, 排种轮转速降低, 有利于改善型孔的充种性能, 但型孔数量受到窝眼排种轮直径和粒距的限制。型孔组数的计算公式为

$$Z = \frac{\pi d v_m}{s v} = \frac{60 \pi d v_m}{s \pi n d (1 - \delta)} = \frac{60 v_m}{s n (1 - \delta)} \quad (4)$$

式中 Z ——型孔组数

v_m ——播种机作业速度, m/s

v ——窝眼排种轮线速度, m/s

n ——窝眼排种轮转速, r/min

s ——播种穴距, cm

δ ——地轮滑移率, %

由式(4)可知, 型孔数量与作业速度成正比, 与窝眼排种轮线速度成反比, 增加型孔组数可以提高播种作业速度, 降低窝眼排种轮转速, 有利于提高作业效率和改善排种质量。根据精密排种的粒距要求, 本文以穴距 s 为 15 cm、 v_m 取 0.83 m/s、 n 一般取 20 ~ 60 r/min、 δ 一般取 5%, 得到型孔数量在 6 ~ 17 之间取值。综合考虑, 型孔排布受到窝眼排种轮半径、穴距以及型孔尺寸的限制, 本文设计 12 组型孔。

3.2.3 V 形凹槽设计

如图 6a 所示, V 形凹槽可使充种区种子导向型孔位, 起到顺种作用, 可提高排种器的充种性能。V 形凹槽布置于窝眼排种轮嵌套处外层。其结构尺寸如图 6b 所示。排种器工作过程中, 如图 6c 所示, 油莎豆种子下落接触充种区最高点, 受重力 G 和窝眼排种轮对其支持力 F_n 、前方种子对其推力 F_1 和窝眼排种轮对其摩擦力 F_f , 故有

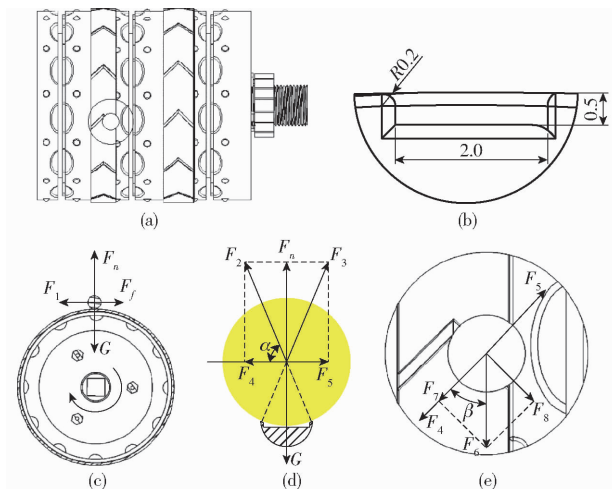


图 6 V 形凹槽结构与受力分析图

Fig. 6 Schematics of V-shaped groove structure and force analysis

$$\begin{cases} G = F_n \\ F_1 > F_f \end{cases} \quad (5)$$

如图 6d 所示, 油莎豆种子位于 V 形凹槽上受重力 G 、V 形凹槽两边对油莎豆种子支持力 F_2 和 F_3 , 其合力为窝眼排种轮对油莎豆种子支持力 F_n , 其分力为 F_4 和 F_5 。故有

$$\begin{cases} G = F_n = F_2 \sin \alpha + F_3 \sin \alpha \\ F_4 = F_2 \cos \alpha \\ F_5 = F_3 \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中 α —— F_2 与 F_4 的夹角, ($^\circ$)

如图 6e 所示, F_6 为油莎豆种子受前方种子对其推力 F_1 与窝眼排种轮对其摩擦力 F_f 的合力, 合力 F_6 的分力为 F_7 和 F_8 , 当分力 F_7 与分力 F_4 之和等于分力 F_5 时, 有

$$\begin{cases} F_7 = F_6 \cos \beta \\ F_5 = F_4 + F_7 = F_4 + F_6 \cos \beta \\ F_8 = F_6 \sin \beta \end{cases} \quad (7)$$

式中 β —— F_6 与 F_4 的夹角, ($^\circ$)

联立式(5) ~ (7) 可知, 在分力 F_8 的作用下, V 形凹槽可使充种区种子导向型孔位, 起到顺种作用, 可提高排种器的充种性能。

3.2.4 低位投种轮设计

通过前期试验, 由于所设计窝眼排种轮轴向排布 3 排大小可调节的型孔, 使种子下落轴向过于分散, 再加上油莎豆种子形状大小差异较大, 且播种时窝眼排种轮转速较高, 致使种子由窝眼排种轮下落难以达到同步^[18-20]。基于上述问题设计了低位投种轮, 如图 7 所示。

为了保证油莎豆种子顺利从窝眼排种轮型孔内下落到低位投种轮储种槽内, 且可使分散的种子向中间聚集, 随着低位投种轮旋转形成二次投种, 使

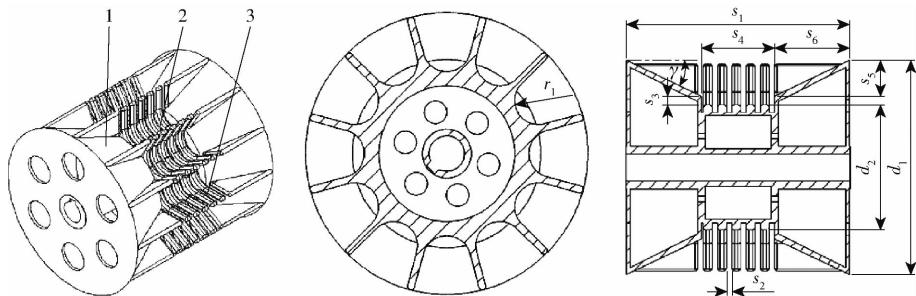


图 7 低位投种轮结构示意图

Fig.7 Schematics of low-position seed wheel structure

1. 导种位 2. 储种槽 3. 定向导种槽

种子顺利投出,达到较好集穴效果,则低位投种轮尺寸设计公式为

$$\begin{cases} 2r_1 = L_{\max} + \Delta x \\ \tan\gamma = \frac{s_5}{s_6} > \mu_2 \\ s_5 = \frac{d_1 - d_2 - 2s_3}{2} \\ s_6 = \frac{s_1 - s_4}{2} \\ s_2 < \frac{H_{\min}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 r_1 ——储种槽圆弧半径,mm
 Δx ——油莎豆种子与储种槽间隙,mm
 d_1 ——低位投种轮直径,mm
 d_2 ——低位投种轮储种槽最低处所在圆直径,mm
 μ_2 ——动摩擦因数
 s_1 ——低位投种轮长度,mm
 s_2 ——定向导种槽宽度,mm
 s_3 ——导种位最低处与储种槽最低处距离,mm
 s_4 ——储种槽宽度,mm
 s_5 ——导种位最低处与最高处竖直距离,mm
 s_6 ——导种位最低处与最高处水平距离,mm
 γ ——导种位倾角, (°)

其中,为使低位投种轮与窝眼排种轮同步,种子可顺利从窝眼排种轮型孔落入低位投种轮储种槽内,低位投种轮直径 d_1 选择与窝眼排种轮相同,为 120 mm;型孔长度最大值 $L_{\max}$ 为 16.78 mm,可防止卡种, Δx 为 3.62 mm,则储种槽圆弧半径 r_1 为 10.2 mm,可得低位投种轮储种槽最低处所在圆直径 d_2 为 70 mm,为了保证从窝眼排种轮型孔内分散下落的种子向中间聚集,导种位采用由内到外倾斜设计,防止向中间聚集的种子反弹再向两边分散,选择导种位最低处与储种槽最低处距离 s_3 为 5 mm,则导种位最低处与最高处竖直距离 s_5 为 20 mm,根据

壳体设计,低位投种轮长度 s_1 取 124 mm,根据开沟器空间要求,储种槽宽度 s_4 取 41 mm,则导种位最低处与最高处水平距离 s_6 为 41.5 mm;则可得 $\tan\gamma$ 为 0.48,远大于油莎豆种子与树脂动摩擦因数 μ_2 ,可保证从窝眼排种轮型孔内分散下落的种子向储种槽位聚集;为防止油莎豆种子随着低位投种轮转动向两边分散,在储种槽位设置定向导种槽,防止卡种,根据种子尺寸及公式,取其宽度为 3 mm。

4 EDEM 离散元仿真试验

4.1 仿真试验模型建立与仿真参数确定

4.1.1 仿真试验模型建立

随机挑选 1 000 粒油莎豆种子,依据外形特征大体分为类圆球形、类椭球形、类扁圆球形 3 种,结合前文测量的中油莎 1 号种子数据,采用多球面组合填充方式,使其堆叠成与种子轮廓相接近的颗粒体,作为油莎豆种子的模拟颗粒体,如图 8 所示。从上到下依次为种子的真实图像、三维模型和多球面聚合颗粒模型。本文颗粒-颗粒和颗粒-排种器的接触模型均选用 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型。

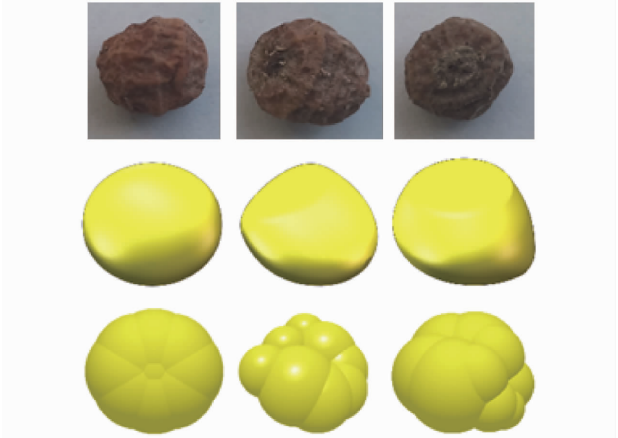


图 8 种子仿真模型

Fig.8 Seed simulation model

在 EDEM 中建立排种器仿真试验模型时,为减少仿真试验计算量,需要简化模型去除无接触部件,在 SolidWorks 软件中创建排种器的三维模型,生成

igs 格式文件并导入 EDEM 软件,如图 9 所示。

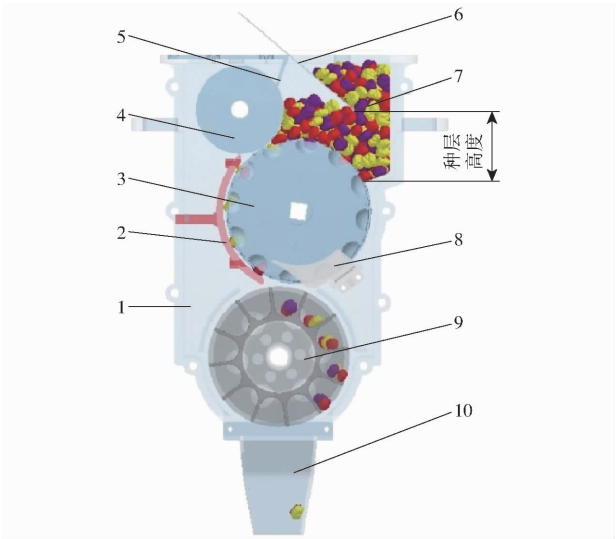


图 9 仿真简化模型

Fig. 9 Simplified model diagram of simulation

1. 壳体 2. 柔性护种板 3. 窝眼排种轮 4. 清种刷 5. 刮种板
6. 种层高度调节板 7. 颗粒工厂 8. 颗粒 9. 清种机构 10. 低位投种轮 11. 导种槽

4.1.2 仿真参数

排种器中与种子接触的部件有壳体、窝眼排种轮、清种刷、护种板、清种片和低位投种轮,其中除清种刷刷毛采用尼龙材料外,均采用光固化 3D 打印技术,由树脂材料打印而成,清种刷的刷毛为尼龙材料。为提高仿真试验的可靠性,采用东莞智取精密仪器有限公司生产的 ZQ-890B 型专业电子试验机对油莎豆种子的泊松比和剪切模量进行试验测定计算,采用实验室自主设计制造的物料特性综合测试装置^[21],对油莎豆种子与接触材料的碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数进行测定。最后通过堆积角测定与仿真验证,并参考文献[22-23]确定离散元仿真参数如表 2 所示。

4.2 低位投种轮仿真

设定一般作业时窝眼排种轮转速 29.2 r/min,如图 10 所示,通过单穴种子运动轨迹可以观察到 3 粒油莎豆种子并未从窝眼排种轮同时下落,但仍顺利进入低位投种轮储种槽内,且较好完成了使轴向分散的种子向中间聚集,随着低位投种轮旋转形成二次投种,使种子顺利投出,且达到较好集穴效果,故所设计低位投种轮能够解决由于窝眼排种轮轴向排布 3 排宽度可调节的型孔,使种子下落轴向过于分散,以及油莎豆种子形状大小差异较大,且播种时窝眼排种轮转速较高,致使种子由窝眼排种轮下落难以达到同步。

进一步对单穴种子运动进行分析,标记单穴种子分别为左边、中间和右边种子,得到其运动速度随

表 2 离散元仿真参数

Tab. 2 Discrete element simulation contact parameters

项目	参数	数值
油莎豆种子	泊松比	0.37
	剪切模量/Pa	2.77×10^7
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 186
树脂	泊松比	0.35
	剪切模量/Pa	1.20×10^8
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 455
尼龙毛刷	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.02×10^8
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 150
油莎豆种子-油莎豆种子	碰撞恢复系数	0.31
	静摩擦因数	0.43
	动摩擦因数	0.108
油莎豆种子-树脂	碰撞恢复系数	0.40
	静摩擦因数	0.46
	动摩擦因数	0.196
油莎豆种子-尼龙毛刷	碰撞恢复系数	0.36
	静摩擦因数	0.41
	动摩擦因数	0.183
其他参数	重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.81

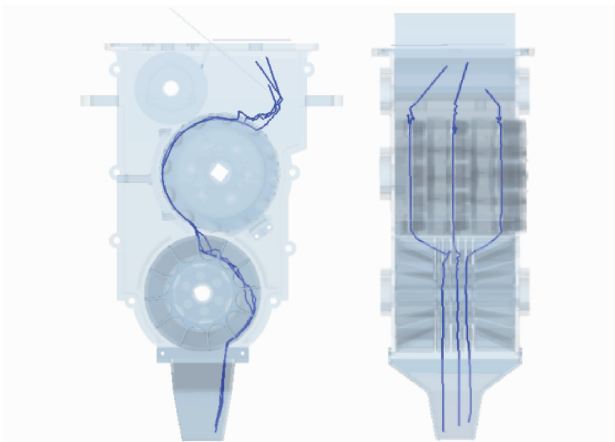


图 10 单穴种子运动轨迹

Fig. 10 Single hole seed movement trajectory

时间的变化曲线,如图 11 所示。结合种子运动轨迹和速度变化曲线可知,左边、中间和右边种子颗粒分别在 0.60、0.85、0.97 s 由颗粒工厂产生,从 1.56、1.70、1.63 s 进入型孔中随窝眼排种轮转动,分别在 1.92~1.97 s、2.05~2.14 s 和 1.90~1.99 s 经过清种刷,在 1.97~2.69 s、2.14~2.64 s 和 1.99~2.62 s 经过护种板,在 2.69~2.91 s、2.64~2.82 s 和 2.62~2.89 s 脱离护种板护种落入低位投种轮储种槽内,在 3.27~3.42 s、3.33~3.41 s 和 3.27~3.40 s 由低位投种轮内侧在重力分力作用下向外侧移动,在 3.58、3.57、3.54 s 离开低位投种轮进入导种槽,在 3.75、3.75、3.74 s 离开导种槽在自身重力下进行投种。由此可知,种子在窝眼排种轮上可平稳顺利落入投种轮,并且最终投种时间较为接近。

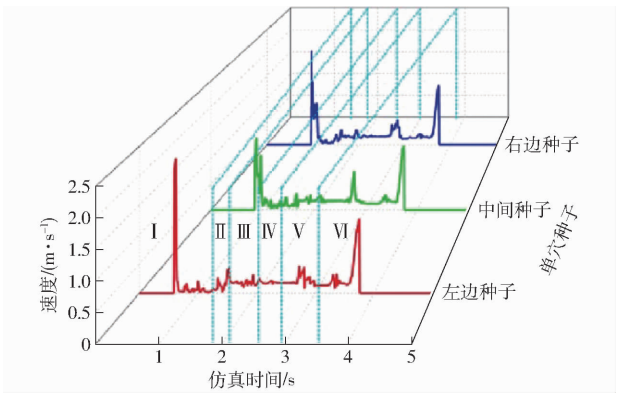


图 11 单穴种子速度变化曲线

Fig. 11 Single hole seed speed change curves

I. 窝眼排种轮充种区 II. 窝眼排种轮清种区 III. 护种板护种区 IV. 窝眼排种轮投种区 V. 低位投种轮携种区 VI. 低位投种轮投种区

4.3 单因素仿真试验

为提高排种器的工作性能,采用单因素仿真试验方法选取最优参数,主要对 V 形导种槽分布组数和窝眼排种轮线速比进行确定。以合格率(3 粒/穴)和漏播率(小于 3 粒/穴)为试验指标。仿真设定一般作业时窝眼排种轮转速为 29.2 r/min,待排种器稳定工作后开始计时,记录 18 s 试验数据。本文记录数据选取时间区间为 3 ~ 21 s,每组采用在 EDEM 后处理中 0.1 倍速播放,统计 100 穴种子。

4.3.1 V 形凹槽分布组数

V 形凹槽可以将两排窝眼间的种子向型孔充种位推动,其分布组数是对充种区种群起到稳定而连续扰动的关键因素。按照前文设计结果,设定 V 形凹槽分布组数为 8、12、16 组和无 V 形凹槽(0 组)时对充种性能的影响,试验结果如表 3 所示。

表 3 不同 V 形凹槽分布组数的仿真结果

Tab.3 Population state with different vshaped groove distribution groups

分布组数	试验序号	充种合格 率/%	充种漏播 率/%	充种合格 率/%	充种合格 率变异 系数/%	充种漏播 率/%	充种漏播 率变异 系数/%
8	1	83	8				
	2	89	11	85.33	2.24	9.33	13.83
	3	84	9				
12	1	90	5				
	2	91	4	90.33	0.90	4.67	17.46
	3	90	5				
16	1	85	6				
	2	88	7	86.67	1.48	6.33	12.8
	3	87	6				
0	1	83	9				
	2	85	12	83.33	1.55	10.33	12.49
	3	82	10				

由表 3 可知,随着 V 形凹槽分布组数增多,充种合格率先增大后减小,漏播率先减小后增大,合格率变异系数与漏播率变异系数均相对稳定。结合 EDEM 软件的后处理功能,在充种区建立检测器,如图 12 所示。通过检测器监测,得到 V 形凹槽分布组数对种群状态的影响,如图 13 所示。通过图 13 分析其原因,当分布组数为 8 组和 16 组时,监控区种子法向力出现多个波峰,较不稳定,V 形凹槽对种群的作用处于不平衡状态,不利于 V 形凹槽导种,导致漏播率较高;无 V 形凹槽时监控区种子,种群离散程度较小,法向力出现多个波峰,较不稳定,处于型孔间的种子无向型孔位的导向作用,使漏充率增加。当分布组数为 12 组时,监控区种子法向力稳定,种群离散程度大,充种合格率高,故确定 V 形凹槽分布组数为 12 组。

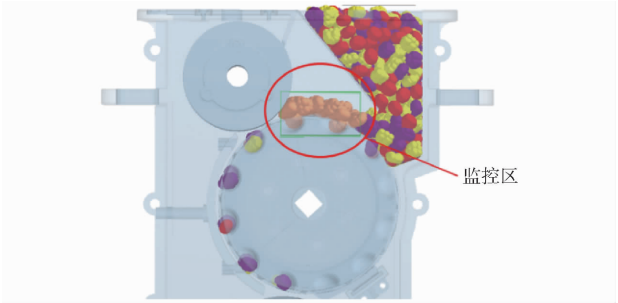


图 12 仿真试验建立的监测器

Fig. 12 Monitor built by simulation test

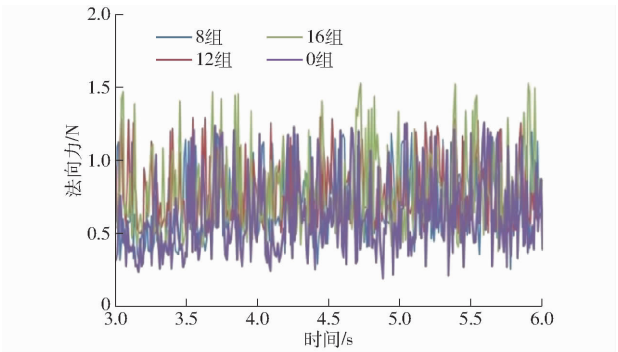


图 13 不同 V 形凹槽分布组数时种群状态

Fig. 13 Population status with different V-shaped groove distribution group number

4.3.2 清种刷与窝眼排种轮线速比

合理的清种刷与窝眼排种轮线速比有利于精量有效分离种子,提高充种性能。选用清种刷直径为 75 mm,采用波纹刷毛,其刷毛直径为 0.15 mm。结合 3.2.1 节中的参数设计并参考《农业机械设计手册》,毛刷轮与窝眼排种轮的线速比为 1.0 ~ 2.0,故确定线速比分别为 1.0、1.4、1.7 和 2.0 时进行仿真试验,结果如表 4 所示。由试验结果可知,当线速比过小时,易在清种刷与窝眼排种轮相切处形成种子堆积;当线速比过大时,易将清种刷与窝眼排种轮相

表 4 不同线速比的仿真结果

Tab.4 Simulation results of different line speed ratios

线速比	试验序号	合格 率/%	漏播 率/%	合格率	合格率	漏播率	漏播率
				平均 值/%	变异系 数/%	平均 值/%	变异系 数/%
1.0	1	85	7				
	2	86	5	84.33	1.81	7.33	22.2
	3	82	10				
1.4	1	92	5				
	2	91	5	91.00	1.10	4.67	17.4
	3	90	4				
1.7	1	84	6				
	2	89	5	86.00	2.01	6.33	20.36
	3	85	8				
2.0	1	84	5				
	2	83	8	82.67	1.56	6.33	20.36
	3	81	6				

切处的种层刷飞,对种群扰动过大,以上均不利于充种。参照《农业机械设计手册》并结合仿真试验结果,确定线速比为 1.4。

4.4 二次回归正交旋转组合仿真试验

4.4.1 试验方案与结果

为研究窝眼排种轮转速、型孔宽度和种层高度对排种器工作性能的影响,基于单因素试验所确定的设计参数进一步研究各因素对排种器工作性能的影响。在前期大量试验的基础上,确定排种轮转速范围为 10 ~ 44 r/min,型孔宽度范围为 12 ~ 16 mm,种层高度范围为 30 ~ 70 mm。试验因素编码如表 5 所示,试验设计方案与结果如表 6 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为窝眼排种轮转速、型孔宽度、种层高度的编码值。

表 5 试验因素编码

Tab.5 Factors and codes of test

编码	因素		
	窝眼排种轮 转速/($r \cdot \min^{-1}$)	型孔宽度/ mm	种层高度/ mm
-1.682	10.00	12.00	30.00
-1	16.89	12.81	38.11
0	27.00	14.00	50.00
1	37.11	15.19	61.89
1.682	44.00	16.00	70.00

4.4.2 试验结果分析

根据表 7 数据,运用数据处理软件 Design-Expert 8.0.6 进行多元回归拟合,建立合格指数、漏播指数、重播指数与三因素的二次多项式回归模型。

回归模型方差分析和显著性检验结果如表 7 所示。由表 7 可知,合格指数、漏播指数、重播指数模型的拟合度极显著($P < 0.01$)。且回归方程失拟不

表 6 试验设计与结果

Tab.6 Experiment design and result

试验 序号	因素			合格指数	漏播指	重播指数
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	数 $Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	80.95	10.12	8.93
2	1	-1	-1	65.48	31.55	2.98
3	-1	1	-1	81.55	10.71	7.74
4	1	1	-1	75.00	20.24	4.76
5	-1	-1	1	82.74	7.14	10.12
6	1	-1	1	67.86	28.57	3.57
7	-1	1	1	83.93	5.36	10.71
8	1	1	1	75.60	18.45	5.95
9	-1.682	0	0	82.74	7.14	10.12
10	1.682	0	0	63.10	35.12	1.79
11	0	-1.682	0	75.00	19.05	5.95
12	0	1.682	0	83.33	9.52	7.14
13	0	0	-1.682	81.55	16.07	2.38
14	0	0	1.682	83.33	5.95	10.71
15	0	0	0	89.29	5.95	4.76
16	0	0	0	91.07	4.76	4.17
17	0	0	0	92.26	4.17	3.57
18	0	0	0	91.07	4.17	4.76
19	0	0	0	89.88	4.76	5.36
20	0	0	0	91.67	4.76	3.57
21	0	0	0	91.07	6.55	2.38
22	0	0	0	89.29	8.33	2.38
23	0	0	0	90.48	6.55	2.98

显著,与实际情况拟合较好。

对于合格指数回归方程, X_1X_3 和 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,影响不显著,其它各项的影响均显著或极显著。失拟项 $P = 0.6975$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。对于漏播指数回归方程, X_1X_3 和 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,影响不显著,其它各项的影响都是极显著。失拟项 $P = 0.5390$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。对于重播指数回归方程, X_2 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,影响均不显著,其它各项的影响均显著或极显著。失拟项 $P = 0.2131$,说明不存在其它影响响应指标的主要因素。剔除不显著的回归项,在保证回归模型显著、失拟项不显著的前提下,对合格指数、漏播指数和重播指数的回归方程进行重新拟合,回归方程为

$$Y_1 = 90.69 - 5.73X_1 + 2.42X_2 + 0.74X_3 + 1.93X_1X_2 - 6.44X_1^2 - 4.23X_2^2 - 3.07X_3^2 \quad (9)$$

$$Y_2 = 5.55 + 8.24X_1 - 2.83X_2 - 2.21X_3 - 2.53X_1X_2 + 5.60X_1^2 + 3.18X_2^2 + 2.02X_3^2 \quad (10)$$

$$Y_3 = 3.76 - 2.51X_1 + 1.46X_3 + 0.84X_1^2 + 1.05X_2^2 + 1.05X_3^2 \quad (11)$$

通过对式(9)~(11)回归系数的检验得出,影响合格指数和漏播指数的主次因素为:窝眼排种轮转速、型孔宽度、种层高度。影响重播指数的主次因

表 7 方差分析
Tab.7 Variance analysis

方差来源	合格指数				漏播指数				重播指数			
	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	1 646. 54	9	203. 32	<0. 000 1	1 871. 59	9	112. 34	<0. 000 1	167. 36	9	12. 23	<0. 000 1
X_1	448. 47	1	498. 41	<0. 000 1	927. 33	1	500. 97	<0. 000 1	85. 89	1	56. 50	<0. 000 1
X_2	80. 03	1	88. 94	<0. 000 1	109. 37	1	59. 08	<0. 000 1	2. 26	1	1. 49	0. 243 9
X_3	7. 53	1	8. 37	0. 012 6	66. 43	1	35. 89	<0. 000 1	29. 14	1	19. 17	0. 000 7
X_1X_2	29. 92	1	33. 25	<0. 000 1	51. 21	1	27. 66	0. 000 2	2. 83	1	1. 86	0. 195 4
X_1X_3	0. 18	1	0. 20	0. 664 7	1. 58	1	0. 86	0. 371 8	0. 71	1	0. 47	0. 506 9
X_2X_3	0. 18	1	0. 20	0. 664 7	0. 17	1	0. 094	0. 764 0	0. 71	1	0. 47	0. 506 9
X_1^2	658. 75	1	732. 12	<0. 000 1	497. 90	1	268. 98	<0. 000 1	11. 29	1	7. 43	0. 017 3
X_2^2	284. 43	1	316. 10	<0. 000 1	160. 45	1	86. 68	<0. 000 1	17. 57	1	11. 56	0. 004 7
X_3^2	150. 05	1	166. 76	<0. 000 1	64. 82	1	35. 02	<0. 000 1	17. 57	1	11. 56	0. 004 7
残差	11. 70	13			24. 06	13			19. 76	13		
失拟	3. 22	5	0. 61	0. 697 5	8. 49	5	0. 87	0. 539 0	10. 54	5	1. 83	0. 213 1
误差	8. 48	8			15. 57	8			9. 22	8		
总和	1 658. 24	22			1 895. 65	22			187. 12	22		

素为:窝眼排种轮转速、种层高度、型孔宽度。

4.5 各因素对排种合格指数的影响

通过 Design-Expert 8.0.6 对数据进行处理,可得到窝眼排种轮转速、型孔宽度和种层高度对合格

指数的影响,其响应曲面如图 14 所示。分别固定种层高度、型孔宽度和窝眼排种轮转速因素为零水平,根据响应曲面图,分析其余 2 个因素间的交互作用对排种合格指数的影响。

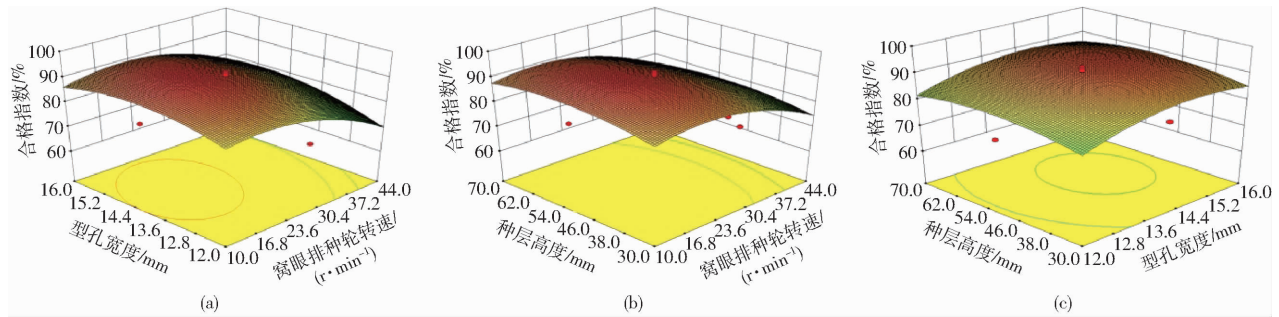


图 14 因素交互作用对合格指数影响的响应曲面
Fig.14 Response surface of influence of factors interaction on qualified index

由图 14a 可知,型孔宽度一定时,随着窝眼排种轮转速的增大,排种合格指数先上升后下降。窝眼排种轮转速一定时,随着型孔宽度的增大,排种合格指数同样先上升后下降。

由图 14b 可知,窝眼排种轮转速一定时,随着种层高度的增大,排种合格指数先上升后下降。种层高度一定时,随着窝眼排种轮转速的增大,排种合格指数同样先上升后下降。

由图 14c 可知,型孔宽度一定时,随着种层高度的增大,排种合格指数先上升后下降。种层高度一定时,随着型孔宽度的增大,排种合格指数同样先上升后下降。由上述内容可知,各因素以及各因素之间的交互作用对排种器工作性能影响较大,为了获得最佳排种作业参数,优化窝眼排种轮转速、型孔宽度和种层高度,实现因素间参数的合理匹配是提高合格指数的关键。

以合格指数为最终优化目标,根据 JB/T 10293—2001《单粒(精密)播种机技术条件》中的要求,播种合格指数大于等于 80.0%,重播指数小于等于 15.0%,漏播指数小于等于 8.0%。结合各因素边界条件,建立参数化数学模型,进行优化求解,其目标函数和约束条件为

$$F_{\max} = Y_1 - Y_2 - Y_3 \tag{12}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} Y_1 \geq 80.0\% \\ Y_2 \leq 8.0\% \\ Y_3 \leq 15.0\% \\ -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \tag{13}$$

运用 Design-Expert 8.0.6 软件的优化模块,对约束目标优化求解,得到窝眼排种轮转速为 22.10 r/min,型

孔宽度为 14.23 mm,种层高度为 52.59 mm 时,排种合格指数最高。合格指数为 92.11%、漏播指数为 2.24%、重播指数为 5.65%。

5 排种器台架试验

5.1 试验条件

本文试验分别为单窝眼排种轮试验、验证试验和低位集穴排种试验,采用的试验装置分别为中国农业大学研发的排种器性能检测仪^[24-25]和 STB-700 型播种试验台,油莎豆种子为河南省农业科学院提供的中油莎 1 号,含水率为 8.27%,试验地点为河南农业大学现代农业装备工程研究中心。

5.2 单窝眼排种轮排种器试验

低位集穴排种器主要由上半部窝眼排种轮排种器和下半部集穴低位投种轮组成,窝眼排种轮能否对种子起到精量有效分离将直接影响后续低位集穴机构的工作性能,因此有必要对单窝眼排种轮性能进行研究。试验将低位集穴排种器上半部窝眼排种轮安装至中国农业大学研发的排种器性能检测仪上,如图 15 所示。因为所设计窝眼排种轮为三排并联型孔,因此每排型孔落种部位用软管连接至检测导种管,分别进行统计。设置仿真优化后的最佳参数窝眼排种轮转速为 22.10 r/min,型孔宽度为 14.23 mm,种层高度为 52.59 mm 进行试验。



图 15 排种器性能检测仪

Fig. 15 Performance tester for seed-metering device

单窝眼排种轮 3 排型孔排种合格率差别不大,分别为 92.7%、93.1%、92.0%,3 排型孔指标差异不显著,说明窝眼排种轮可以对种子起到较好的单粒分离效果。

5.3 验证试验

以 STB-700 型播种试验台为载体,如图 16a 所示。油莎豆排种器按照仿真试验优化后的参数,动力由 6RK140RGU-CFM 型迈力减速电机提供,搭配 UX-52 型交流减速电机调速器结合速为 SW6234C 型激光转速仪控制电机转速,为便于试验之后对播种效果的观察,在传送带上涂抹黄油。其中已成穴直径为每穴种子与最远两粒种子间的距离。

受传送带长度限制,每次统计 26 穴,4 次为 1 组试验,进行 3 组重复台架试验。试验结束后对传送带上的种子进行统计记录。试验台实际播种效果如图 16b 所示。试验结果平均值见表 8。可见在最优参数作用下,结果与仿真结果近似,仿真试验可信。

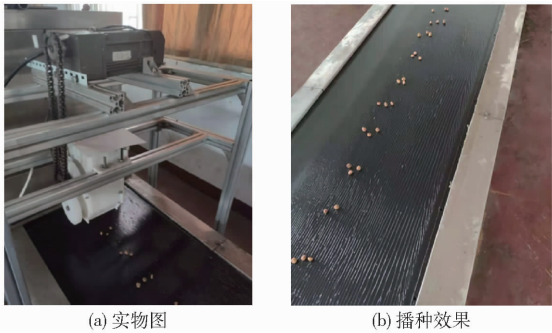


图 16 排种器性能试验装置实物图与播种效果

Fig. 16 Physical map of seed-metering device performance test device and sowing effect

表 8 试验验证结果

Tab. 8 Test verification results %

试验序号	合格率	漏播率	重播率
1	90.38	2.88	6.73
2	93.27	1.92	3.85
3	91.35	3.85	4.81
均值	91.67	2.88	5.13

5.4 集穴性能试验

当种层高度为 52.59 mm,型孔宽度 14.23 mm 时,选取排种器窝眼轮转速 10~50 r/min,试验选取穴粒数合格率、漏播率、重播率、破碎率(排种器连续工作 3 min,进行统计)和成穴直径平均值为试验指标,评价排种器工作性能。试验结果如表 9 所示。

表 9 排种器台架性能试验结果

Tab. 9 Bench performance test results of seed-metering device

参数	转速/(r·min ⁻¹)				
	10	20	30	40	50
合格率/%	86.54	88.46	90.38	85.58	80.77
漏播率/%	3.85	2.88	5.77	12.5	18.27
重播率/%	9.62	8.65	3.85	1.92	0.96
破碎率/%	0.36	0.45	0.62	0.95	1.34
已成穴直径平均值/mm	56.29	58.05	64.93	70.50	79.57

根据表 9 可得,当型孔宽度为 14.23 mm、种层高度为 52.59 mm 时,未出现空穴现象,排种器合格率随转速的增加先增大后减小,在 30 r/min 时,合格率达到 90.38%,且合格率始终不小于 80.77%,破碎率均低于 1.35%,可以满足播种要求。成穴直径平均值随转速的增加而增大,其中窝眼排种轮转速

在 50 r/min 时,成穴直径平均值最大,为 79.57 mm。

为进一步考察试验中低位集穴排种器集穴性能,对不同转速下 3 组试验数据进行显著性分析,如图 17 所示。在排种器 10 r/min 下,种子成穴后最大分散间距(已成穴直径平均值)处于较低水平,集穴效果最佳,3 组试验数据差异不显著;在转速 20 r/min 下,种子成穴后最大分散间距有些波动,但整体集穴较好;当转速在 30 r/min 下,种子成穴后最大分散间距波动范围较大,第 1 组试验数据和其他 2 组试验差异显著,说明转速的提高影响了种子集穴效果;当转速为 40 r/min 和 50 r/min 时,种子成穴后最大分散间距每组试验数值互相差异显著,说明种子集穴效果波动较大,种子落地后会随机弹跳、滚动,但从整体来看,种子分散间距满足设计要求。

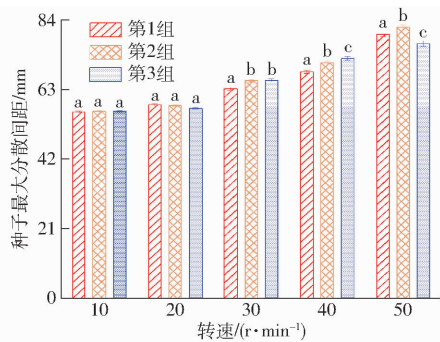


图 17 不同转速下种子最大分散间距

Fig. 17 Maximum seed dispersion spacing at different speeds

6 结论

(1)设计了一种油莎豆低位集穴排种器,解决了油莎豆种子因表面凹凸不平、形状不规则导致的

流动性差、充种性能不佳和每穴 3 粒精播种子投种时轴向分散的问题。阐述了排种器的整体结构和工作原理,通过对油莎豆物料特性进行测量,设计了窝眼排种轮直径、型孔以及其表面增设的 V 形凹槽,以提高充种性能;设计了低位集穴投种装置,优化了结构参数,既可降低投种高度,又可将分散下落的种子向中间聚集,提高成穴效果。

(2)通过构建油莎豆种子及排种器 EDEM 离散元仿真模型,对一穴 3 粒种子运动轨迹进行了分析,从速度变化曲线中可以得出 3 粒种子投种一致性较好;分析了 V 形槽分布组数,得出分布组数为 12 组时,监控区种子法向力稳定,种群离散程度大,充种合格率高;仿真确定了清种刷与窝眼排种轮线速比为 1.4;通过设计二次回归正交旋转组合仿真试验,得出了影响合格指数主次因素为:窝眼排种轮转速、型孔宽度、种层高度;并运用响应面法分析了试验因素对响应指标的影响。采用多目标优化方法,确定了排种器最佳参数组合:窝眼排种轮转速为 22.10 r/min、型孔宽度为 14.23 mm、种层高度为 52.59 mm 时,排种合格指数最高。合格指数为 92.11%、漏播指数为 2.24%、重播指数为 5.65%。

(3)对设计的低位集穴排种器进行了台架试验,分别为单窝眼排种轮试验和低位集穴排种试验,从单窝眼排种轮排种试验得出 3 排型孔排种合格率差别不大,3 排型孔指标差异不显著;从集穴性能试验得出转速的提高影响了种子集穴效果;转速提高成穴直径波动越大,种子落地后会随机弹跳、滚动,但从整体来看,种子分散间距满足设计要求。在 30 r/min 时,合格率达到 90.38%,满足精密播种要求。

参 考 文 献

- [1] 李泽后. 型孔式油莎豆精量播种机排种装置的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2020.
LI Zehou. Research on the shaped hole type *Cyperus esculentus* seeder for seeding apparatus[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):75-84.
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75-84. (in Chinese)
- [4] 王胜. 基于自动送种系统的电驱动大豆小区播种机研究设计[D]. 郑州:河南农业大学,2019.
WANG Sheng. Research and design of electric derive soybean plot seeder based on automatic seeding system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [5] 衣淑娟,陈涛,李衣菲,等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):83-94.
YI Shujuan, CHEN Tao, LI Yifei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 83-94. (in Chinese)
- [6] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(22):1-11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1-11. (in Chinese)
- [7] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(4):75-86, 139.
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering

- device for soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75 – 86, 139. (in Chinese)
- [8] KOSTIĆ M, RAKIĆ D, RADOMIROVIĆ D, et al. Corn seeding process fault cause analysis based on a theoretical and experimental approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 207 – 218.
- [9] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8 – 15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8 – 15. (in Chinese)
- [10] 刘全威. 高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
LIU Quanwei. Design and experiment of seed precise delivery mechanism for high-speed planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [11] LIU Q, HE X, YANG L, et al. Effect of travel speed on seed spacing uniformity of corn seed meter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 99 – 106.
- [12] 王金武, 唐汉, 王奇, 等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 43 – 50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 43 – 50. (in Chinese)
- [13] 刘月琴, 赵满全, 刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65 – 72.
LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 65 – 72. (in Chinese)
- [14] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 11 – 19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11 – 19. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 DEM – CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 50 – 60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Optimization design and experiment of corn air suction seed metering device seed plate based on DEM – CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50 – 60. (in Chinese)
- [17] 李玉环, 魏亚男, 杨丽, 等. 扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 43 – 53.
LI Yuhuan, WEI Ya'nan, YANG Li, et al. Design and experiment of mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 43 – 53. (in Chinese)
- [18] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1 – 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1 – 14. (in Chinese)
- [19] 颜丙新, 武广伟, 付卫强, 等. 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 47 – 54.
YAN Bingxin, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 47 – 54. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 杨立权. 切流横轴流玉米脱粒系统设计及试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
YANG Liquan. Design and experiment research based on tangential flow transverse axial flow corn threshing system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [22] 张恒榜, 赵健, 胡广锐, 等. 窝眼轮式小麦排种器参数优化试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(9): 139 – 144.
ZHANG Hengbang, ZHAO Jian, HU Guangrui, et al. Parameter optimization of wheat seeding device with nest round wheel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(9): 139 – 144. (in Chinese)
- [23] 陈玉龙. 气吸机械复合式大豆高速精密排种器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
CHEN Yulong. Research of air-suction mechanical combined soybean high-speed and precision seed metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [24] HAO Y, CUI T, BORA G, et al. Development of an instrument to measure planter seed meter performance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(1): 31 – 40.
- [25] 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 19 – 27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19 – 27. (in Chinese)