

曾山, 文智强, 刘伟健, 等. 气吸式小粒蔬菜种子精量穴播排种器优化设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 52-59.
ZENG Shan, WEN Zhiqiang, LIU Weijian, et al. Optimal design and experiment of air-suction precision hole sowing seed metering device for small-grain vegetable seed[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 52-59.

气吸式小粒蔬菜种子精量穴播排种器优化设计与试验

曾 山，文智强，刘伟健，徐 卓，何思禹，汪 沛

(华南农业大学 工程学院/南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室，广东 广州 510642)

摘要:【目的】小粒种子具有尺寸小、质量轻、形状不规则的特征，采用传统排种器作业时常常发生吸种孔堵塞、种子损伤、播种均匀性差的问题；因此本研究在种子丸粒化技术的基础上设计了一种气吸式小粒种精量穴播排种器。【方法】通过测量种子的尺寸大小和摩擦角等相关参数，采用 Rocky 离散元仿真软件对进种过程进行仿真模拟。为获得该排种器的最佳性能因素组合，进行了二次回归旋转正交试验，应用多目标优化方法对排种器性能影响因素进行优化。【结果】通过回归系数的检验得知，影响排种器单粒率与空穴率的因素主次顺序为气压、排种器转速。当转速一定时，随着负压的增加，单粒率随之增加，空穴率随之降低，当负压一定时，随着转速的增加，单粒率随之降低，空穴率随之增加，当负压大于-2 800 Pa 时，转速在 5~30 r/min 的范围内对排种器单粒率和空穴率影响不明显，且此时单粒率均在 90% 以上、空穴率均在 10% 以下。【结论】通过优化求解，最优工作参数组合为转速 15 r/min、负压-2 300 Pa、正压 500 Pa。经试验验证，在此条件下该排种器的性能指标为单粒率合格指数平均值 96%、漏播指数平均值 3.37%、重播指数平均值 0.267%，符合国家标准要求。

关键词: 小粒蔬菜种子; 气吸式排种器; 精量穴播; Rocky 软件; 单粒率; 空穴率
中图分类号: S223.2+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)06-0052-08

Optimal design and experiment of air-suction precision hole sowing seed metering device for small-grain vegetable seed

ZENG Shan, WEN Zhiqiang, LIU Weijian, XU Zhuo, HE Siyu, WANG Pei

(College of Engineering, South China Agricultural University/Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】The small-grain seed has the characteristics of small size, light weight and irregular shape. The problems of blockage of seed suction hole, seed damage and poor seeding uniformity often occur in the operation of traditional seed metering device. Therefore, on the basis of seed pelleting technology, an air-suction precision hole sowing seed metering device for small seeds was designed. 【Method】The seeding process was simulated by Rocky discrete element simulation software by measuring relevant parameters such as seed size and friction angle. In order to obtain the best performance factor combination of the seed metering device, the quadratic regression rotation orthogonal experiment was carried out, and a multi-objective optimization method was used to optimize the factors affecting the performance of seed metering device. 【Result】Through the test of regression coefficients, the primary and secondary order of the factors affecting single grain rate and leak seeding rate of the seed metering device was air pressure and rotation speed of seed

metering device. When the rotation speed was constant, with the increase of the negative pressure, the single grain rate increased, and the leak seeding rate decreased; When the negative pressure was constant, with the increase of the rotation speed, the single grain rate decreased, and the leak seeding rate increased. When the negative pressure was greater than $-2\ 800\text{ Pa}$, the rotation speed of $5\text{--}30\text{ r/min}$ had less obvious influence on single grain rate and leak seeding rate of the seed metering device, and the single grain rate was all above 90% , the leak seeding rate was all below 10% . 【Conclusion】 Through optimization, the optimal working parameter combination is the rotation speed of 15 r/min , the negative pressure of $-2\ 300\text{ Pa}$, and the positive pressure of 500 Pa . The performance indicators of the seed metering device under these conditions are as following: The average single grain rate qualified index is 96% , the average leak seeding index is 3.37% , and the average replay seeding index is 0.267% , which conforms to the national standard requirements.

Key words: small-grain vegetable seed; air-suction seed metering device; precision hole sowing; Rocky software; single grain rate; leak seeding rate

播种是蔬菜生产的基础环节之一。播种机是实现高效、高质量播种作业的重要机具,其关键零部件为排种器。精密排种器的作用是按照农艺要求将种子从种箱成穴有序地排出,实现精密播种,提高播种精度及效率,有利于作物的后期管理以及收获,不仅可以节省种子、减少人工劳动成本,还能够提高作物产量;其性能直接决定播种机的作业质量。为适应小葱等不同密植蔬菜的种植要求^[1],需要排种器的结构尺寸较小。

目前,国内外对小粒种排种器均有研究与应用,国外学者 Panning 等^[2]研制了一种气吸式甜菜排种器, Karayel 等^[3]研制了应用于黄瓜、西瓜和甜菜等作物的气吸式精密穴播器,但作业效率较低。德国 LEMKEN 公司生产的 Solitaire 9 气吸式精量播种机^[4],可播种谷物、油菜、草籽和豆类等,实现整地、播种、施肥作业。英国 Ferguson 公司^[5]生产的 MF543 型气吹式播种机,采用高速气流吹掉重吸的种子,并使用气压差辅助吸种。华中农业大学廖庆喜教授研究团队研制了气吸圆盘式排种器^[6]、气吸滚筒式排种器^[7]和气压集排式排种器^[8-9],可实现油菜的精量播种。曹秀龙等^[10]研制了气吸滚筒式油菜穴盘育苗精密排种器,能够满足油菜和部分蔬菜穴盘育苗的要求。东北农业大学李杞超^[11]和 Wang 等^[12]研制了舀勺式小粒径蔬菜种子精量排种器,可实现小粒种蔬菜的播种作业,但田间作业时易受机具振动影响播种质量。以上研究均不能完全满足小粒种蔬菜的精量穴播要求;因此,需要研制一种小粒种精量穴播的排种器。

针对小粒种子不规则、难吸附的问题,种子丸粒化技术可对此进行改善;而且该技术对蔬菜种植业具有明显的促进作用^[13],丸粒化材料当中的营养物质和杀虫杀菌成分可为种子提供良好的萌芽环

境,对提高田间发芽率,增强植株的抗病虫、抗自然灾害能力有明显的积极作用^[14-15]。此外,丸粒化技术可以填充不规则种子的粗糙表层,形成规则形状,有利于气力式排种器的引导播种^[16]。因此,本文的排种器设计以丸粒化种子作为依据。

离散元仿真技术已经较多地应用于对气吸式排种器的工作原理分析,可以研究排种器进种、搅种等过程。目前,离散元仿真软件主要包括 EDEM 软件和 Rocky 软件。相对于 EDEM 软件, Rocky 软件设置简单,计算效率高,可实现较大的颗粒尺寸分配,颗粒与边界几何模型导入流程简单,并且与 ANSYS 软件集成,无需设置耦合接口等优点;因此,本文采用 Rocky 软件对排种器进种过程进行仿真分析。

根据小粒种排种器设计过程中遇到的种子不规则、难吸附、排种不稳定等问题^[17],本文使用 SolidWorks2020 建模设计,采用 Rocky 离散元仿真软件虚拟试验的方法对外壳体种箱结构、进种管结构进行优化设计,并通过试验求解最佳工作参数,以期气吸式小粒种精量穴播排种器结构设计与优化提供参考。

1 排种器结构与工作原理

气吸式小粒种精量穴播排种器为负压吸种、正压投种的圆盘循环式排种器,其结构包括底壳、轴承端盖、转轴、链轮压盖、链轮、滚针轴承、背板、排种盘、排种盘压盖、外壳体等零部件。排种器通过底壳上的法兰座与机架螺栓连接,由链轮带动转轴使排种盘转动,种子由种箱经过进种管进入充种区,装配结构图见图 1。工作时,种子由种箱经过进种管进入到储种室,在负压作用下吸附在吸种孔上,由转轴带动排种盘转动,将种子携带至落种口处。

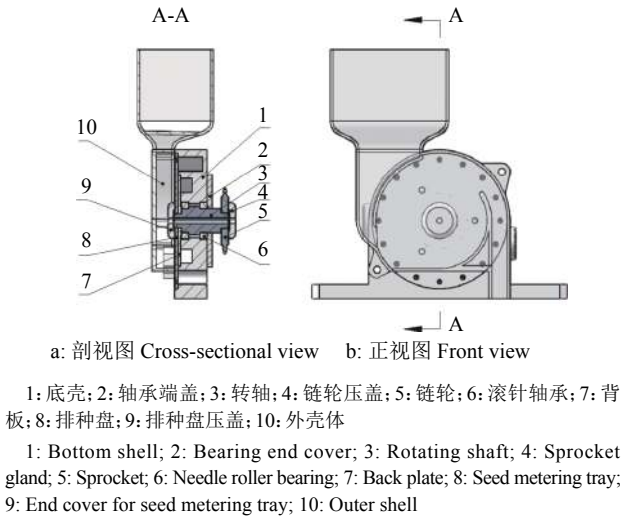


图 1 气吸式小粒种蔬菜精量穴播排种器结构

Fig. 1 Structure of air-suction precision hole sowing seed metering device for small-seeds vegetables

种子在正压气体作用下落入开沟器开出的播种沟中^[18], 并通过镇压轮覆土镇压。

2 种子物料特性测定

种子物料特性是排种器设计的重要依据; 因此, 必须准确测量研究对象的各项物料特性, 为排种器种箱、进种管、储种室等提供设计依据^[19]。由于 2020 年广东白菜类蔬菜累计种植面积超过 21 万公顷, 年产量超过 590 万吨, 其种植面积和产量在广东蔬菜种植中占有较大的比例, 机械化种植需求日益增长。菜心等白菜类蔬菜种子具有相似的力学和物理特性, 其丸粒化处理后的相关特性也取决于包衣材料和技术。因此本文选用 ‘四九菜心’ 种子为研究对象, 对种子进行丸粒化处理并染红色, 为十字花科蔬菜排种器的研究提供参考。

2.1 丸粒化种子尺寸

由于种子的形状和尺寸差异, 其在排种器内的流动情况和填充状态也有所不同。种子尺寸一般采用三轴尺寸来表示。小粒种丸粒化处理后为球形, 因此测量其直径表示尺寸特征。采用东莞三量量具有限公司生产的 JD017 型数字式测厚仪 (量程: 0~10 mm) 测量, 随机抽取测量 1 000 粒, 绘制粒径频率分布图见图 2。由图 2 可知, 种子直径分布在 2.3~3.3 mm 之间; 其中, 约 65% 分布在 2.7~3.0 mm 之间, 约 80% 分布在 2.5~3.1 mm 之间, 最大频次分布区间为 2.80~2.88 mm, 符合正态分布规律。

2.2 滑动摩擦角和休止角

种子的滑动摩擦角和休止角直接关系种子在排种器内的流动和相互之间的作用关系。对于缺乏

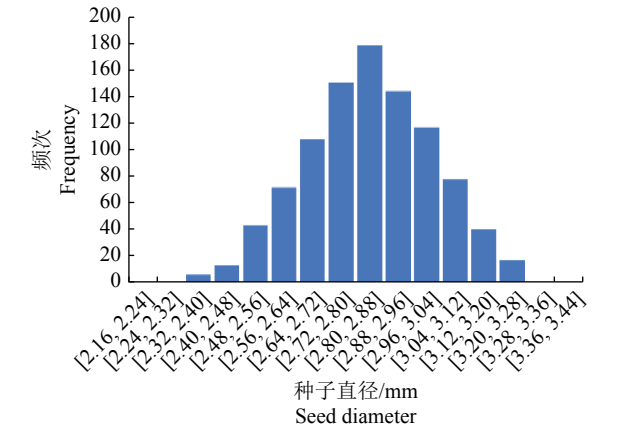


图 2 种子尺寸分布

Fig. 2 The distribution of seed size

黏聚力的散粒物料, 其休止角等于内摩擦角^[20], 则摩擦系数为摩擦角的正切值。在 Rocky 软件中需要对种子的摩擦参数进行输入标定, 以获得接近真实状态的仿真效果。

试验采用自制的滑动摩擦角测试装置对种子的摩擦参数进行测量, 如图 3 所示。采用倾斜法^[21]对休止角参数进行测量。每项测量重复 5 次, 取平均值, 结果见表 1。



图 3 滑动摩擦角测试装置

Fig. 3 Sliding friction angle test device

表 1 种子摩擦参数		
Table 1 Seed friction parameter		
项目 Item	角度/(°) Angle	摩擦系数 Coefficient of friction
种子休止角 Seed angle of repose	22.24	0.408 9
种子与不锈钢板的滑动摩擦角 Sliding friction angle between seed and stainless steel plate	29.62	0.568 5
种子与光敏树脂板的滑动摩擦角 Sliding friction angle between seed and photosensitive resin plate	28.15	0.535 0

2.3 千粒质量与容重

千粒质量和容重关系种箱大小的设计。根据千粒质量和容重, 结合农艺要求和播种机的设计要求确定种箱大小。采用成都倍赛克仪表研究所生产的 XH30001 型号电子天平和 100 mL 量杯进行测量, 重复 5 次, 取平均值计算千粒质量 (T): 13.07 g, 容重 (R): 0.586 9 g/mL。

3 排种器外壳体方案设计

外壳体主要包括种箱、进种管等。由于小粒种蔬菜种植密度较大, 对播种均匀性要求高, 需要对排种器结构尺寸进行紧凑化设计。排种器种箱至储种室之间的进种管布置在外壳体内部。

3.1 种箱容积

配套播种机设计为 6 行排种器, 垄宽 (W) 为 1.1 m, 单侧垄沟宽 (V) 为 0.3 m, 则行距 (M) 为 0.2 m, 穴距 (N) 按照最小农艺要求, 为 0.1 m, 则 666.67 m^2 用种量 ($Z_{\text{总}}$) 为:

$$Z_{\text{总}} = \frac{6 \times 666.67}{(W + V)N}, \tag{1}$$

$Z_{\text{总}}=28\,572$ 粒, 则单个排种器每 666.67 m^2 用种量 ($Z_{\text{单}}$)=4 762 粒。

以每公顷加 1 次种子计算, 根据种子的千粒质量和容重参数。种箱容积 ($B_{\text{单}}$) 为:

$$B_{\text{单}} = \frac{0.015Z_{\text{单}}T}{R}, \tag{2}$$

$B_{\text{单}}=1\,590\text{ mL}$, 取 $B_{\text{单}}=1\,600\text{ mL}$ 。

3.2 进种管出口大小仿真优化

采用离散元软件对排种器的性能仿真分析, 对试验研究具有指导意义, 也可以解释试验结果与现象内在的动力学机理^[22]。本文采用 Rocky 软件对排种器外壳体的种子堆积过程进行仿真, 以解决和优化进种过程中出现的种子卡顿问题。

在 SolidWorks 软件中绘制并装配排种盘与外壳体, 首先设置排种盘旋转轴与世界坐标系某一轴重合, 并且在导出 STL 文件时勾选“不要转换 STL 输出数据到正的坐标系”, 保证导入的模型在 Rocky 软件中的坐标系与建模装配时的坐标系一致, 能在 Rocky 软件中准确设置排种盘的旋转运动和颗粒工厂的位置等。

在 Rocky 软件中导入边界模型, 新建颗粒入口、颗粒工厂, 根据之前的测量结果设置颗粒大小形状与分布, 各实体之间的摩擦参数等。

根据较小尺寸的设计目标, 设计了垂直式和侧下式 2 种外壳体进种管方案, 分别在 Rocky 软件中对其进种过程进行仿真 (图 4、图 5)。

在仿真动画中可以看到, 垂直式进种方式中, 由于进种管间隙较小, 种子流具有明显的卡顿现象 (图 4); 而侧下式进种方式中, 种子流动效果良好, 从进种管出口处形成明显的斜坡, 吸种孔处的种子层厚度较大, 有利于充种 (图 5)。

根据改进后的进种效果, 确定侧下式进种管为优选方案, 采用光敏树脂打印加工改进后的外壳体, 经过试验, 卡种现象没有出现。优化的侧下式进种管进种效果如图 6 所示。

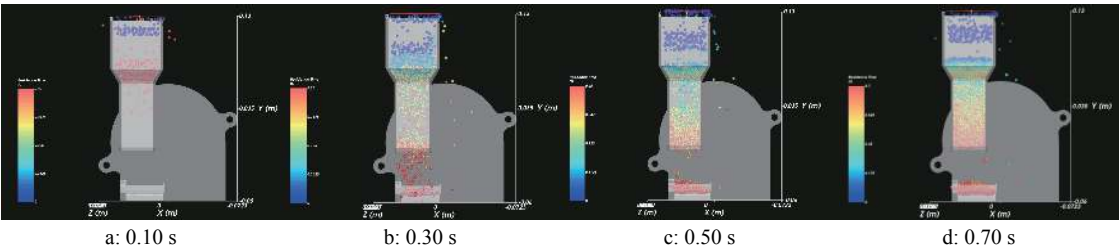


图 4 垂直式进种管不同时刻进种仿真

Fig. 4 Simulation of vertical feed mode at different time

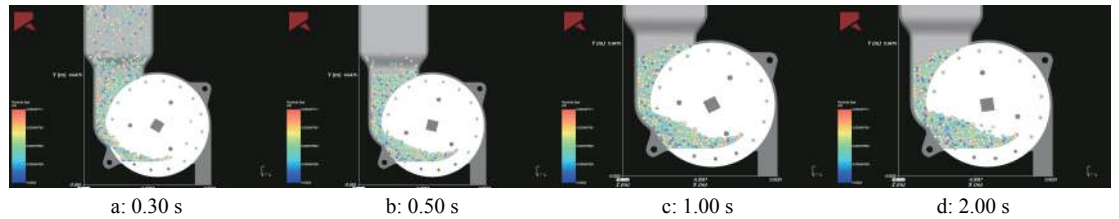


图 5 侧下式进种管不同时刻进种仿真

Fig. 5 Simulation of side-down feed mode at different time

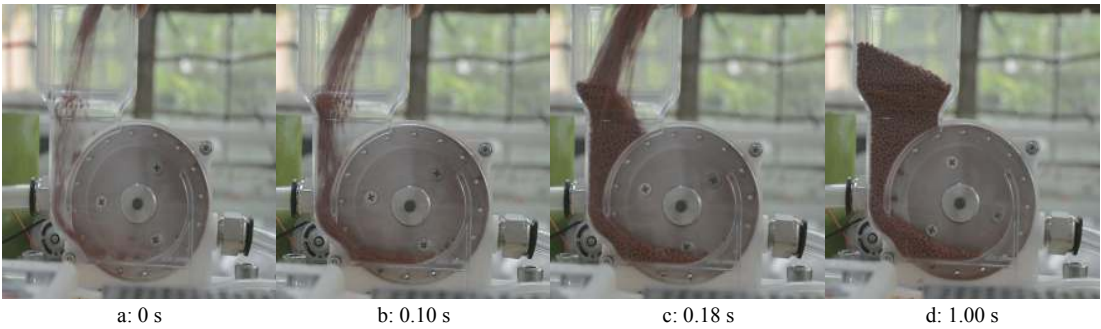


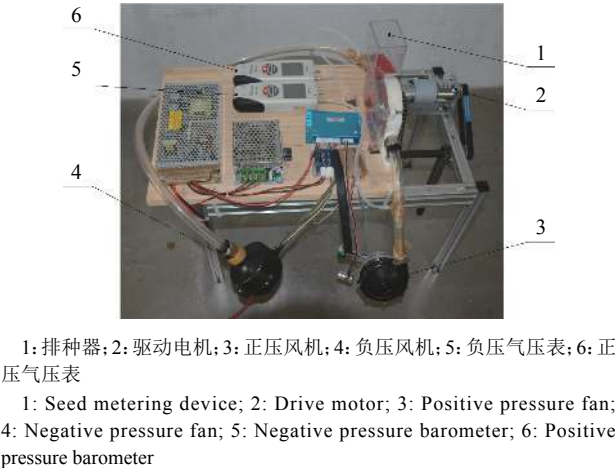
图 6 优化的侧下式进种管不同时刻的进种效果

Fig. 6 Effects of optimized side-down feed mode at different time

4 二次旋转正交组合试验

4.1 排种器性能试验条件

采用自制排种器试验台，试验台由 ZX-42GA775F-3500 型直流减速电机 (减速比 115、转速 55 r/min)，盛科电子 CCM6DS 型直流电机调速器，Hti 鑫思特 HT-1890 型数字微压压差计 (测量范围±13.79 kPa)，宁波奉化伟成电机厂的 WM7060-24V 型无刷直流风机，台湾明纬 24 v-500 W 开关电源和待测排种器等组成，见图 7。



1: 排种器; 2: 驱动电机; 3: 正压风机; 4: 负压风机; 5: 负压气压表; 6: 正压气压表

1: Seed metering device; 2: Drive motor; 3: Positive pressure fan; 4: Negative pressure fan; 5: Negative pressure barometer; 6: Positive pressure barometer

图 7 排种器试验台

Fig. 7 Testing platform for seed metering device

根据 GB/T 6973—2005《单粒 (精密) 播种机试验方法》^[23]，每次试验采集 250 穴统计单粒穴数、空穴数和重播穴数，重复 3 次，取平均值进行分析。统计单粒率 (Z_1)、空穴率 (Z_2)、重播率 (Z_3)，计算公式如下：

$$Z_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\%, \tag{3}$$

$$Z_2 = \frac{n_2}{N} \times 100\%, \tag{4}$$

$$Z_3 = \frac{n_3}{N} \times 100\%, \tag{5}$$

式中， N 为理论排种总数， n_1 为单粒穴数， n_2 为空穴数， n_3 为重播穴数。

4.2 试验方案

影响排种器性能的因素之间相互影响与约束，为了研究各因素对排种器性能的影响效果，需确定各因素之间的主次关系和最优组合。采用广东省良种引进有限公司生产、丸粒化处理并染色的‘四九菜心’种子进行试验，根据初步试验结果选择转速范围为 5~34 r/min，气压范围为-800~-4 300 Pa，对排种器进行二因素二次旋转正交组合试验，每组试验取 250 穴，重复 3 次，取平均值，表 2 为试验因素编码表。

4.3 结果与分析

4.3.1 回归分析与显著性检验 根据二次旋转正交组合试验，使用自行搭建的排种器试验台测试得

表 2 排种器试验因素编码表

Table 2 Seed metering device test factor and code table

变量x范围 Range of variable x	标准化后X(编码) Normalized X(coding)		实际变量值 Actual value of variable	
	X_1	X_2	$x_1/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	x_2/Pa
上水平 Upper level	1	1	30.00	-3 800.00
零水平 Baseline level	0	0	20.00	-2 550.00
下水平 Lower level	-1	-1	10.00	-1 300.00
距零水平上r点 r above the reference baseline level	1.414 2	1.414 2	34.14	-4 317.75
距零水平下r点 r below the reference baseline level	-1.414 2	-1.414 2	5.86	-782.25
标准差 Standard deviation	1	1	10.00	1 250.00

到各试验组排种器单粒率、空穴率、重播率指数, 试验结果见表 3。采用 Design-expert10.0 软件对试验数据进行多元回归拟合, 得到单粒率的回归方程, 并采用 F 检验验证其显著性。

多元回归拟合得到各因素影响排种器单粒率 (Z_1) 和排种器空穴率 (Z_2) 的回归模型分别为:

$$Z_1 = 95.1 - 6.6x_1 + 12.96x_2 + 8.27x_1x_2 - 9.22x_2^2, \quad (6)$$

$$Z_2 = 4.82 + 6.68x_1 - 13.14x_2 - 8.19x_1x_2 + 9.14x_2^2, \quad (7)$$

式中, x_1 为排种器转速, x_2 为气压。

回归模型的显著性检验与方差分析表见表 4。由表 4 可知, 该模型的拟合度极显著 ($P<0.0001$), 其中排种器转速 (x_1)、气压 (x_2) 以及两者交互项 (x_1x_2)、气压平方项 (x_2^2) 的 P 值均小于 0.01; 因此这些因素与排种器单粒率、空穴率均显著相关。

通过回归系数的检验得知, 影响排种器单粒率与空穴率的因素主次顺序为气压、排种器转速。

4.3.2 响应曲面分析 排种器转速与负压以及两者的交互作用对排种器的性能指标均有显著影响, 根据响应曲面图 (图 8) 可以分析其对单粒率和空穴

表 3 二次旋转正交组合试验设计与结果
Table 3 Quadratic orthogonal rotation combination design and experimental results

序号 Test number	转速(x_1) Rotation speed	气压(x_2) Air pressure	单粒率(Z_1)/% Single grain rate	空穴率(Z_2)/% Leak seeding rate	重播率(Z_3)/% Replay seeding rate
1	-1	-1	94.93	5.07	0.00
2	1	-1	60.67	39.33	0.00
3	-1	1	98.00	1.33	0.67
4	1	1	96.80	2.80	0.40
5	-1.414	0	97.73	2.00	0.27
6	1.414	0	85.47	14.53	0.00
7	0	-1.414	52.13	47.87	0.00
8	0	1.414	97.73	2.00	0.27
9	0	0	94.93	5.07	0.00
10	0	0	95.73	4.27	0.00
11	0	0	95.73	4.27	0.00
12	0	0	95.47	4.53	0.00
13	0	0	97.20	2.80	0.00

表 4 回归方程方差分析
Table 4 Variance analysis of regression equation

指数 Index	来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P
单粒率(Z_1) Single grain rate	模型 Model	2 567.93	4	641.98	30.45	<0.000 1
	X_1	348.66	1	348.66	16.54	0.003 6
	X_2	1 343.90	1	1 343.90	63.75	<0.000 1
	X_1X_2	273.35	1	273.35	12.97	0.007 0
	X_2^2	602.01	1	602.01	28.56	0.000 7
	残差 Residual	168.64	8	21.08		
	失拟误差 Lack of fit	165.81	4	41.45	58.59	0.000 8
	误差 Error	2.83	4	0.71		
	总和 Total	2 736.58	12	641.98	30.45	
空穴率(Z_2) Leak seeding rate	模型 Model	2 598.49	4	649.62	31.53	<0.000 1
	X_1	357.22	1	357.22	17.34	0.003 1
	X_2	1 381.59	1	1 381.59	67.05	<0.000 1
	X_1X_2	268.96	1	268.96	13.05	0.006 9
	X_2^2	590.72	1	590.72	28.67	0.000 7
	残差 Residual	164.84	8	20.60		
	失拟误差 Lack of fit	162.01	4	40.50	57.24	0.000 9
	误差 Error	2.83	4	0.71		
	总和 Total	2 763.33	12			

率的影响。由于试验中重播率均小于 0.8%，满足实际农艺要求，因此对其不再进行讨论。

依据图 8A、8B，当转速一定时，随着负压的增加，单粒率也随之增加；当负压一定时，随着转速的增加，单粒率随之降低。当负压大于-2 800 Pa 时，转速在 5~30 r/min 的范围内对排种器单粒率影响不明显，且此时单粒率均在 90% 以上。

依据图 8C、8D，当转速一定时，随着负压的增加，空穴率也随之降低；当负压一定时，随着转速的增加，空穴率随之增加。当负压大于-2 800 Pa 时，速度在 5~30 r/min 的范围内对排种器空穴率影响不明显，且此时空穴率均在 10% 以下。

4.3.3 参数优化与试验验证 为了得到排种器的最优工作参数组合，采用目标函数优化的方法，得到最优的单粒率(Z_1)。依据提高单粒率、降低气压和提高转速的目标，设置各因素的边界条件：

$$\begin{cases} \max Z_1 \\ \min Z_2 \\ \min Z_3 \\ \text{s.t} \begin{cases} 15 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq x_1 \leq 34 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ -3\,175 \text{ Pa} \leq x_2 \leq -1\,300 \text{ Pa} \end{cases} \end{cases}, \quad (8)$$

利用 Design-Expert 软件进行参数优化并分析求解，结果表明，当吸种负压为-2 316 Pa、转速为 15 r/min 时，排种器单粒率合格指数(单粒率评价指标)达到 96.428%，漏播指数(空穴率评价指标)为 3.499%，重播指数(重播率评价指标)为 0.089%。根据实际应用情况，选择负压为-2 300 Pa，转速为 15 r/min。根据预试验选择正压 500 Pa 作辅助清种，试验在相同条件下重复 3 次；单粒率、空穴率和重播率理论值分别为 96.43%、3.49%、0.089%，实际值分别为 96.00%、3.37%、0.267%。验证试验结果表明，单粒率合格指数平均值为 96%，漏播指数平均

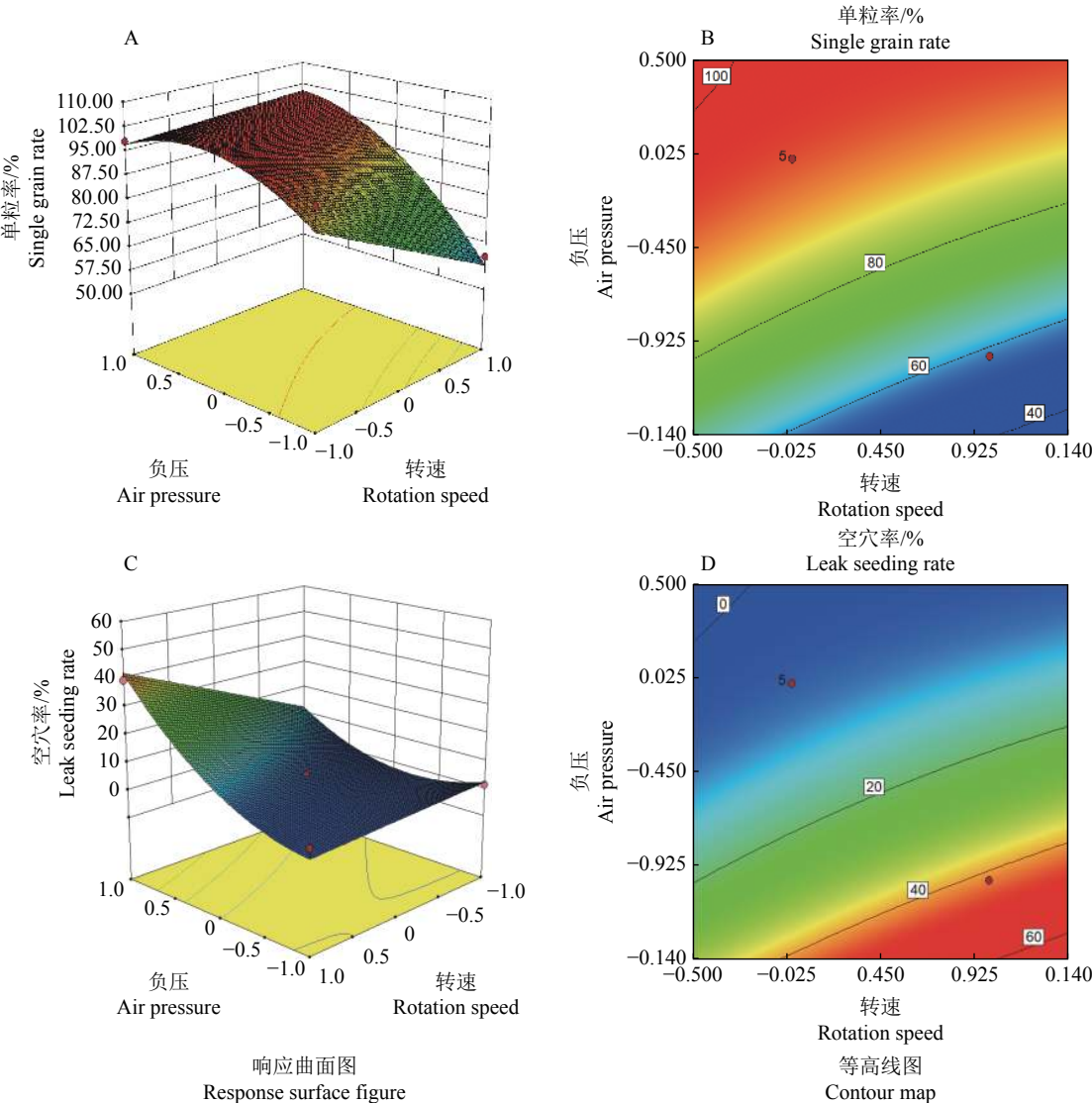


图 8 转速-负压对单粒率和空穴率影响的响应曲面图和等高线图

Fig. 8 Response surface figure and contour map of influences of rotation speed-negative pressure on single grain rate and leak seeding rate

值为3.37%,重播指数平均值为0.267%,试验结果与理论值的差值在0.45%以下,证明在该工作条件下,排种器性能满足《单粒(精密)播种机试验方法》GB/T 6973—2005^[23]的要求。

5 结论

1) 设计了一种气吸式小粒种精量穴播排种器,采用负压吸种与正压投种的原理,由底壳、外壳体、排种盘、转轴等组成,结构尺寸相对紧凑,可以实现小粒种蔬菜的精量穴播要求。

2) 通过 Rocky 离散元仿真软件分析垂直式和侧下式2种进种管的进种过程;仿真结果表明垂直式进种方式中,由于进种管间隙较小,种子流具有明显的卡顿现象,而侧下式进种方式种子流动效果良好,从进种管出口处形成明显的斜坡,吸种孔处的种子层厚度较大,有利于充种。

3) 排种器二次旋转正交试验结果表明,影响排种器单粒率合格指数与漏播指数的因素主次顺序为气压、排种器转速。当转速一定时,随着负压的增加,单粒率随之增加,空穴率随之降低;当负压一定时,随着转速的增加,单粒率随之降低,空穴率随之增加。当负压大于-2 800 Pa时,转速在5~30 r/min 的范围内对排种器单粒率和空穴率影响不明显,且此时单粒率均在90%以上,空穴率均在10%以下。本研究最优参数组合为吸种负压-2 300 Pa、转速15 r/min、正压500 Pa。经验证此时的排种器单粒率合格指数平均值为96%,漏播指数平均值为3.37%,重播指数平均值为0.267%,符合《单粒(精密)播种机试验方法》(GB/T 6973—2005)^[23]的要求。

参考文献:

[1] 王琪琛,张寒波,孙月星,等.广东菜心、油麦菜在蔬菜播种机不同播种密度下的试验研究[J]. *农业开发与装备*, 2016(11): 107-108.

[2] PANNING J W, KOCHER M F, SMITH J A, et al. Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugarbeet planters[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000, 16(1): 7-13.

[3] KARAYEL D, OZMERZI A. Effect of tillage methods on sowing uniformity of maize[J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2002, 44(2): 23-26.

[4] KUDRA G, AWREJCEWICZ J. Approximate modeling of resulting dry friction forces and rolling resistance for elliptic contact shape[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2013(42): 358-375.

[5] PROVINI P, VAN WASSENBERGH S. Hydrodynamic performance of suction feeding is virtually unaffected by variation in the shape of the posterior region of the

pharynx in fish[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(9): 181249. doi: 10.1098/rsos.181249.

[6] 廖庆喜,李继波,覃国良.气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7): 78-82.

[7] 吴福通,廖庆喜,田波平.新型气力式油菜籽精量排种器的设计研究[C]//中国农业工程学会会议论文集. 2006 中国科协年会农业分会场论文专集[]. 2006: 2743-2748.

[8] 张猛,余佳佳,刘晓辉,等.气力集排式油菜精量排种器的排种过程分析[J]. *华中农业大学学报*, 2012, 31(1): 116-120.

[9] 李兆东,李姗姗,曹秀英,等.油菜精量气压式集排器排种性能试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 17-25.

[10] 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.

[11] 李杞超.舀勺式小粒径蔬菜种子精量排种器机理分析与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.

[12] WANG J W, LI Q C, ZHOU W Q, et al. Optimal design and experiment of spoon-disc type rice precision hill-direct-seed metering device[J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2020, 29(2): 113-126.

[13] 张琛.种子引发与丸粒化对油菜萌发及生长发育的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.

[14] 常瑛,魏廷邦,臧广鹏,等.种子丸粒化技术在小粒种子中的应用[J]. *中国种业*, 2020(11): 18-21.

[15] 陈凯,韩柏和,陆岱鹏,等.甘蓝种子丸粒化包衣加工工艺及其对品质的影响[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(8): 82-88.

[16] 郑述东,史志明,曹亮,等.小粒种子丸粒化包衣技术的推广应用研究[J]. *农业开发与装备*, 2019(11): 56.

[17] WANG L, LIAO Y T, LIAO Q X. Design and experiment of remote control precision planter for Chinese cabbage vegetable[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2018. doi: 10.2316/Journal.206.2018.2.206-5536.

[18] RYOSUKE M, CHENG J, TAKETERU T, et al. Absence of suction feeding in ichthyosaurs and its implications for triassic mesopelagic paleoecology[J]. *PLoS One*, 2018, 8(12): e66075.

[19] 李金凤.小粒径蔬菜种子气吸式精密排种器的设计与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.

[20] Г К 克列因.散粒体结构力学[M]. 陈万佳,译.北京: 中国铁道出版社, 1983: 42.

[21] 马云海.农业物科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 92-96.

[22] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等.离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 1-20.

[23] 全国农业机械标准化技术委员会.单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973—2005[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2005.