

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.006

变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验

张开兴¹ 李金凤¹ 宋正河² 刘贤喜^{1,3} 刘磊¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对现有气吸式圆盘型精量播种机播种不同尺寸种子需要更换排种圆盘的缺陷, 为节约成本、提高排种器通用性, 基于现有圆盘型排种器, 设计了一种变粒径双圆盘气吸式精量排种器, 无需更换圆盘便可实现不同粒径种子的精量播种。阐述了排种器基本结构与工作原理, 并对其工作过程及关键部件进行了理论分析, 确定了型孔排布、型孔形状、型孔锥角等关键结构参数, 运用 Fluent 仿真分析了 5 种组合型孔对气室流场的影响, 通过仿真分析获得了最佳组合型孔参数, 并在 JSP-12 排种试验台上进行了排种均匀性试验及正交试验, 得到排种性能较好时的负压、排种盘转速等参数的合理范围。结果表明: 当排种器圆盘型孔为 60° 锥角的倒角型型孔, 转速为 34.5 r/min、负压为 4.1 kPa 时, 其合格率为 90.46%、漏播率为 2.59%、重播率为 6.94%, 排种性能较优, 满足播种要求。通过田间试验跟踪观察种子后续生长情况, 试验得出排种器的平均合格率 90.16%、漏播率 2.77%、播种各行排量一致性变异系数 5.34%、总排量稳定性变异系数 4.86%, 与传统排种器相比作业质量显著提升。

关键词: 变粒径; 排种器; 气吸式; 双圆盘

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)06-0052-12

Optimum Design and Test of Variable Diameter Double Disc Air Suction Precision Seeder

ZHANG Kaixing¹ LI Jinfeng¹ SONG Zhenghe² LIU Xianxi^{1,3} LIU Lei¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Tai'an 271018, China)

Abstract: Aiming at the defect that the existing air-suction disc precision seeder needs to replace the seed metering disc for seeding seeds of different sizes, and in order to save cost and improve the versatility of the seed metering device, a variable-size double disc air-suction precision seeder was developed, which can realize the precision seeding of seeds of different sizes without changing the disc. Based on the existing disc-type metering device, a double disc structure with variable particle size was designed, its basic structure and working principle were expounded, theoretical analysis of the working process and key components of the metering device were made, the key structural parameters such as hole layout, hole shape and hole cone angle were determined, and Fluent simulation was used to analyze the influence of five combined holes on the flow field in the chamber. The optimum combination hole parameters were obtained by real analysis, and the uniformity test and orthogonal test of seeding were carried out on JSP-12 seeding test-bed. The reasonable ranges of negative pressure and rotational speed of seeding plate were obtained when the seeding performance was better. The results showed that the qualified rate was 90.46%, the missing rate was 2.59%, and the replaying rate was 6.94% when the disc hole of the metering device was a chamfered hole with conical angle of 60 degrees, the rotational speed was 34.5 r/min and the negative pressure was 4.1 kPa. The metering performance was better and the seeding requirement was satisfied. During the verification process of field experiment, the average

收稿日期: 2018-12-19 修回日期: 2019-04-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)、山东省重点研发计划项目(2017NC212008)和山东省“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD14)

作者简介: 张开兴(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业 CAD 和农业信息化研究, E-mail: kaixingzhang@139.com

通信作者: 刘贤喜(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业 CAD/CAM 和虚拟现实技术研究, E-mail: wjblu@sdau.edu.cn

qualified rate was 90.16%, the seeding leakage rate was 2.77%, the consistency coefficient of variation of seeding row displacement was 5.34%, and the stability coefficient of total displacement was 4.86%. Compared with traditional metering device, the operation effect was significantly improved.

Key words: variable particle size; seed metering device; air suction; double disc

0 引言

排种器作为播种机的关键核心部件,其性能直接影响播种质量^[1-2]。气吸式排种器具有不伤种子、对种子外形尺寸要求不严、作业速度高等优点,已成为精量播种机的主要研究方向^[3]。丁力等^[4]设计了一种具有辅助充种作用的玉米气吸式高速精量排种器,在充种区利用型孔凸台对种子进行扰动和托持,在卸种区能够实现均匀排种,大大提高了合格指数。耿端阳等^[5]设计了一种倾斜圆盘式排种器,并通过试验对圆盘结构进行优化,确定圆盘锥角为 39° 、型孔数为30个,充种效果好、可适应高速作业要求。颜丙新等^[6]设计了一种排种盘和负压腔室同步旋转的气吸式排种器,通过固定连接排种盘与负压腔室在作业时同步旋转,达到低气压损失、高排种精度的效果。DIZAJI等^[7]设计了一种气力式精密排种器的喷气投种装置,研究了排种盘转速、投种装置的气流速度对种子破损率、充种率和出苗率的影响。SINGH等^[8]运用电子控制计量系统对精量排种器排种过程进行实时监测与反馈,降低漏播,提高了播种质量精度。雷小龙等^[9]设计了一种充种搅拌装置,解决了油菜小麦种子排种器充种能力不足的问题。

上述研究虽在排种器结构和排种方式上有所创新,但针对圆盘型排种器播种不同粒径种子仍需更换排种圆盘,尚未实现多粒径种子的播种^[10-12]。基于此,本文设计一种型孔可调的变粒径双圆盘气吸式精量排种器,通过双圆盘旋转组合变换出不同的型孔直径,以实现针对不同粒径种子的播种;对圆盘上型孔排布及型孔形状进行合理设计,通过仿真试验获取最优型孔组合参数;通过台架试验和正交试验获得排种器作业参数,并借助田间试验验证排种器可靠性。

1 结构与原理

1.1 整体结构

变粒径双圆盘气吸式精量排种器主要由气室壳、气吸垫、旋转圆盘、固定圆盘、清种器、种箱、传动轴等部件组成,如图1所示。双圆盘的一侧是气室,它通过气室壳出口与风机管道相连,另一侧是种室,作业时圆盘旋转,足够的负压使圆盘上的型孔在充种区吸附种子,然后经过清种器刮掉多余的种子,进

而保证播种量精确。种子随着圆盘转动离开负压区,型孔对种子失去吸附力,种子靠自重掉入导种管,最终落入种床,完成排种过程^[13-16]。

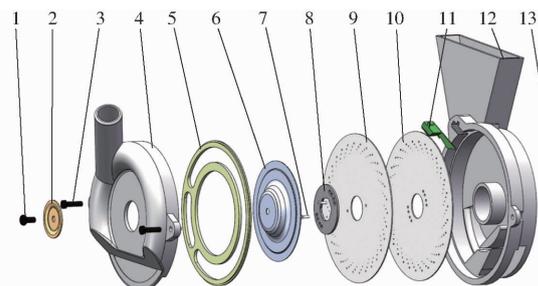


图1 排种器结构示意图

Fig. 1 Schematic of seeder structure

1. 盖盘螺母 2. 气室壳盖盘 3. 固定螺栓 4. 气室壳 5. 气吸垫
6. 气吸垫压盘 7. 插盘螺栓 8. 固定插盘 9. 旋转圆盘
10. 固定圆盘 11. 清种器 12. 后壳 13. 传动轴

1.2 变粒径双圆盘结构设计

双圆盘结构如图2a所示,排种器设置有旋转圆盘和固定圆盘,二者通过同轴相向旋转,使两圆盘上相同直径的型孔重合,通过插盘螺栓进行固定,可以对不同粒径的种子进行播种工作。当种子受到自身重力均匀流至充种区时,在充种区形成种堆,固定圆盘朝向种室的一面设置有扰种辊,对贴近排种圆盘的种子起搅动、梳理作用,使种子不断产生运动并向上涌动,以降低种子间的摩擦力与粘附力,提高充种能力^[17]。

现有排种圆盘直径范围为140~260 mm,通过理论计算和经验参考,选取双圆盘直径为240 mm,制作材料采用1 mm厚的不锈钢钢板。圆盘型孔分布情况如图2b所示,两圆盘上设置有A、B、C、D 4种不同大小的型孔,根据型孔直径公式 $d = (0.64 \sim 0.66)B_l$, B_l 为种子平均宽度,以油菜种、菠菜种、高粱种、大豆种4种具代表性种子为例,测得平均粒径为1.2、1.9、2.8、5.4 mm,计算后选择4种型孔直径为0.8、1.2、1.8、3.5 mm。当同类籽粒的不同品种在尺寸差别不大的情况下,依然可以采用相应的型孔,若差距大,可更换圆盘上其他型孔或对种子进行丸化处理,然后进行播种。型孔一般设置在排种盘边缘15~20 mm,且型孔所在圆周直径范围为100~230 mm,考虑到圆盘设置有4种型孔,故将最外侧孔径设置在距离排种盘边缘15 mm处,各排型孔所在圆周相距5 mm,所以型孔A、B、C、D所在圆周半径分别为105、100、95、90 mm。由于排种器能够对

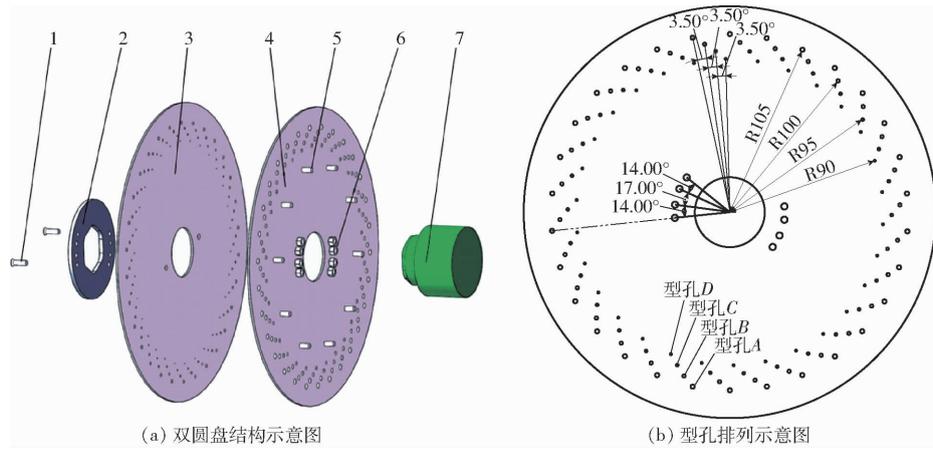


图2 圆盘结构示意图

Fig.2 Schematic of disk structure

1. 插盘螺栓 2. 固定插盘 3. 旋转圆盘 4. 固定圆盘 5. 扰种辊 6. 固定螺母 7. 传动轴

不同粒径的种子进行播种, 排种圆盘的型孔数极其重要, 在型孔直径确定的情况下, 型孔越多, 排种器转速越低, 利于提高充种率、降低破损率; 反之, 型孔越少, 在保证播种株距前提下, 排种器转速将越高。排种圆盘的型孔数量计算公式为

$$M = \frac{\pi D_w v_c (1 + \delta)}{v_l k} \quad (1)$$

式中 D_w ——圆盘直径, m

v_c ——播种机作业速度, m/s

δ ——地轮滑移率, 一般为 0.05 ~ 0.12

v_l ——种子脱落时的线速度, m/s

k ——株距, m

考虑到最外侧大粒径种子株距和排种器性能因素, 排种器的线速度一般不应大于 0.35 m/s, 取 0.32 m/s, 地轮滑移率取 0.08。型孔 A 以大豆种子为例, 作业速度为 2.5 ~ 3.0 m/s, 株距为 0.20 ~ 0.40 m, 由式(1)得 $15.90 \leq M_A \leq 35.63$; 型孔 B 以高粱种子为例, 选择作业速度为 2.8 ~ 3.6 m/s, 株距为 0.30 ~ 0.40 m, 则 $17.81 \leq M_B \leq 30.53$; 型孔 C 以菠菜种子为例, 作业速度为 1.6 ~ 2.2 m/s, 株距为 0.08 ~ 0.15 m, 则 $27.14 \leq M_C \leq 69.98$; 型孔 D 以油菜种子为例, 作业速度为 1.5 ~ 2.0 m/s, 株距为 0.06 ~ 0.10 m, 则 $38.17 \leq M_D \leq 84.82$ 。综合上述 4 种型孔数量范围可知, 种子粒径越小, 则内侧型孔数越多, 外侧型孔越容易发生重叠, 不利于圆盘增添

多排孔径, 为保证 4 种型孔不发生重叠, 型孔分布更紧凑, 故每种型孔的周向数量设为 30 个, 每个孔径组合中两相邻孔径间夹角均为 3.5° 。型孔 A ~ D 依次由圆盘外侧向内侧排布, 为确保每次有且仅有一种型孔相通, 在固定圆盘上设有 4 对沿对角线分布的固定圆孔, 其夹角依次为 14° 、 17° 、 14° , 每对固定圆孔对应一种型孔。

型孔组合图示如图 3 所示, 外侧 4 排型孔中, 型孔呈黑色表明两圆盘孔径相通, 灰色表明不相通。旋转圆盘顺时针转动依次从图 3a 变换到图 3d, 对应型孔相通顺序为 A、C、B、D。在 4 排型孔中, 型孔 A 可以播种大豆、豌豆等较大粒径种子; 型孔 B 可以播种高粱、香菜等中等粒径种子; 型孔 C 可以播种菠菜、空心菜等中小粒径种子; 型孔 D 可以播种油菜、娃娃菜等较小粒径种子。在固定插盘中, 固定圆孔呈黑色表示插盘螺栓所固定位置。

2 吸排种过程运动学分析

2.1 吸种过程分析

在忽略播种过程中播种机振动的情况下, 将种子近似视为球体, 以种子的质心为原点建立三轴笛卡尔坐标系, 以种子所受摩擦力的方向为 x 轴正向, 所受离心力的方向为 y 轴正向, 所受负压吸附力的方向为 z 轴正向, 对双圆盘气吸式排种器的吸种过程和排种过程进行运动学分析, 如图 4a 所示。

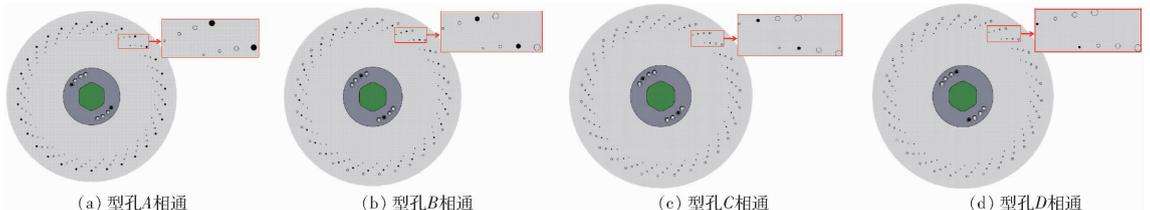


图3 4种型孔组合图示

Fig.3 Diagrams of four types of hole combinations

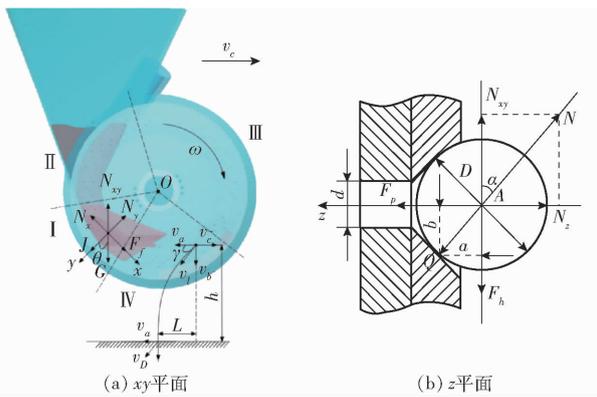


图4 排种过程种子运动学分析

Fig. 4 Stress analysis of seeds during filling process

如图4a所示,在吸种圆盘吸附种子后,建立种子平衡方程

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow N_x - F_f - G \cos \theta = 0 \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow N_y - J - G \sin \theta = 0 \\ \sum F_z = 0 \Rightarrow N_z - F_p = 0 \\ \sum M_Q = 0 \Rightarrow F_p b - F_h a = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)所得种子在 xy 平面所受的支持力为

$$N_{xy} = \sqrt{N_x^2 + N_y^2} =$$

$$\sqrt{J^2 + G^2 + F_f^2 + 2G \sqrt{J^2 + F_f^2} \sin(\theta + \phi)} \quad (3)$$

式中 G ——种子重力, N

θ ——种子所受离心力与种子重力之间的夹角, ($^\circ$)

J ——种子所受离心力, N

F_f ——种子所受摩擦力, N

F_p ——种子所受负压吸附力, N

N_x —— x 轴的支持力分力, N

N_y —— y 轴的支持力分力, N

N_{xy} —— N_x 和 N_y 的合力, N

N_z —— z 轴支持力分力, N

a ——吸种作用点到合力 F_h 的距离, m

b ——吸种作用点到型孔轴线的距离, m

F_h —— G 、 J 和 F_f 的合力, N

ϕ ——公式变换得到的辅助角, ($^\circ$)

在吸种过程中,型孔处的种子受力平衡,则

$$F_p = F_h \frac{a}{b} = F_h \tan \alpha = N_{xy} \tan \alpha =$$

$$\frac{4 \sqrt{J^2 + G^2 + F_f^2 + 2G \sqrt{J^2 + F_f^2} \sin(\theta + \phi)} \tan \alpha}{\pi D^2 \cos^2 \alpha} \quad (4)$$

在型孔处的负压为

$$P = \frac{F_p}{S} =$$

$$\frac{4 \sqrt{J^2 + G^2 + F_f^2 + 2G \sqrt{J^2 + F_f^2} \sin(\theta + \phi)} \tan \alpha}{\pi D^2 \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

式中 P ——型孔处压力, kPa

α —— $1/2$ 型孔锥角, ($^\circ$)

S ——型孔截面面积, m^2

在实际工况下,考虑影响种子吸种过程中的整机振动、摩擦阻力等因素,查机械设计手册得外界条件系数 K_1 为 1.8 ~ 2.0,吸种可靠性系数 K_2 为 1.8 ~ 2.0。则式(5)转换为

$$P = K_1 K_2 \frac{F_p}{S} =$$

$$\frac{4K_1 K_2 \sqrt{J^2 + G^2 + F_f^2 + 2G \sqrt{J^2 + F_f^2} \sin(\theta + \phi)} \tan \alpha}{\pi D^2 \cos^2 \alpha} =$$

$$\frac{4K_1 K_2 \sqrt{(m\omega r)^2 + (mg)^2 + (\mu mg)^2 + 2mg \sqrt{(m\omega r)^2 + (\mu mg)^2} \sin(\theta + \phi)} \tan \alpha}{\pi D^2 \cos^2 \alpha} \quad (6)$$

由式(6)可知,在吸种过程中,种子在型孔处压强与圆盘的旋转角速度 ω 、种子的质量 m 、型孔所在圆周半径 r 、离心力与重力夹角 θ 、种子与型孔间摩擦因数 μ 、 $1/2$ 型孔锥角 α 、种子的直径 D 有关。以大豆种子为例, K_1 取 2.0, K_2 取 2.0, 播种机作业速度为 2.5 ~ 3.0 m/s, 大豆种子的千粒质量为 0.1 ~ 0.25 kg, 型孔 A 所在圆周半径为 105 mm, 平均粒径为 5.4 mm, 型孔半锥角 $\alpha = 30^\circ$, 夹角 $\theta = 60^\circ$, 摩擦因数取 0.2, 可求得排种器工作时型孔处压强 P 为 4.89 ~ 16.21 kPa。

2.2 排种过程分析

在排种过程中,圆盘携带种子转出负压区,种子所受的负压吸附力消失,种子受到自身重力和离心力的作用,以一定的初速度沿投种点的切线方向做抛物线运动^[18]。因种子颗粒较小,忽略空气阻力对种子的作用,对图4a中的IV区(投种区)进行排种过程运动学分析。

在投种区,种子离开排种器时的速度为

$$\begin{cases} v_a = v_l \cos \gamma \\ v_b = v_l \sin \gamma \end{cases} \quad (7)$$

种子离开排种器到接触种床过程的运动轨迹为

$$\begin{cases} L = \int_0^t v_a dt \\ h = \int_0^t v_b dt \end{cases} \quad (8)$$

种子着床时的分速度为

$$\begin{cases} v'_a = v_a - v_c \\ v'_b = v_b + gt \end{cases} \quad (9)$$

式中 v_a ——种子脱落时水平分速度, m/s

γ —— v_l 与 v_a 的夹角, ($^\circ$)

v_b ——种子脱落时竖直分速度, m/s

v'_a ——种子着床时水平分速度, m/s
 v'_b ——种子着床时竖直分速度, m/s
 h ——种子散落高度, m
 L ——种子水平位移, m
 t ——种子从离开排种器到接触种床过程的运动时间, s
 g ——重力加速度, m/s²

将 v_a 和 v_b 代入方程(8), 整理可得种子着床时的总速度为

$$v_D = \sqrt{v_a'^2 + v_b'^2} = \sqrt{v_l^2 + v_c^2 + (gt)^2 + 2v_l(gt\sin\gamma - v_c\cos\gamma)} \quad (10)$$

可查《农业机械设计手册》得播种机的前进速度和型孔所在圆周上的线速度

$$\begin{cases} v_c = \frac{nMk}{60} \\ v_l = \frac{\pi nR}{30} \end{cases} \quad (11)$$

式中 n ——排种圆盘转速, r/min

将方程(11)代入方程(10), 整理为

$$v_D = \sqrt{v_a'^2 + v_b'^2} = \sqrt{v_l^2 + v_c^2 + (gt)^2 + 2v_l \sqrt{(gt)^2 + \left(\frac{Mk}{2\pi R}v_l\right)^2} \sin(\gamma + \psi)} \quad (12)$$

式中 ψ ——公式变换得到的辅助角, (°)

当种子落到种床时, 种子与种床接触碰撞产生回弹, 无法保证株距。由公式可知, 种子着床时速度与排种器转速、落种高度成正比, 与型孔所在圆周半径成反比; 种子着床时速度越大, 种子回弹现象越严重, 株距变异系数越大。为降低种子着床时的弹跳和散射, 选择具有合适曲线的导种管, 使种子到达出口时具有较大的水平分速度, 以抵

消播种机前进速度。为减小排种器的株距变异系数, 在满足种子播种要求的情况下, 可适当降低排种器转速, 型孔 A 以大豆种子为例, 作业速度为 2.5 ~ 3.0 m/s, 株距为 0.20 ~ 0.40 m, 排种器转速为 12.5 ~ 30 r/min; 型孔 B 以高粱种子为例, 作业速度为 2.8 ~ 3.6 m/s, 株距为 0.30 ~ 0.40 m, 排种器转速为 14 ~ 24 r/min; 型孔 C 以菠菜种子为例, 作业速度为 1.6 ~ 2.2 m/s, 株距为 0.08 ~ 0.15 m, 排种器转速为 21.3 ~ 55 r/min; 型孔 D 以油菜种子为例, 作业速度为 1.5 ~ 2.0 m/s, 株距为 0.06 ~ 0.10 m, 排种器转速为 30 ~ 66.7 r/min。

3 仿真分析

结合吸排种过程运动学分析, 针对压强、型孔锥角等影响因素进行基于 Fluent 的单因素气流场仿真分析, 以探明适合播种的型孔形状和最佳负压、转速。

3.1 型孔形状及网格划分

在播种作业中, 小粒径种子具有粒径小、质量轻、易破损的物理特征, 故小粒径种子的精量播种较为困难, 为验证本排种器可靠性, 本文针对圆盘上播种小粒径种子的最小孔径进行仿真分析^[19]。

型孔尺寸对气室流场的真空度、流速稳定性及风机功率消耗影响较大, 通过理论计算和经验参考, 初步确定型孔最小截面直径为 0.8 mm, 单个圆盘厚度为 1 mm, 故组合型孔导程为 2 mm。不同型孔形状对流场稳定性有较大影响, 本文对比研究了基于双圆盘结构的直筒型型孔、空竹型型孔、倒角型型孔、锥角型型孔、沉头型型孔对气流场压力、速度分布的影响, 型孔形状及网格划分情况如图 5 所示。

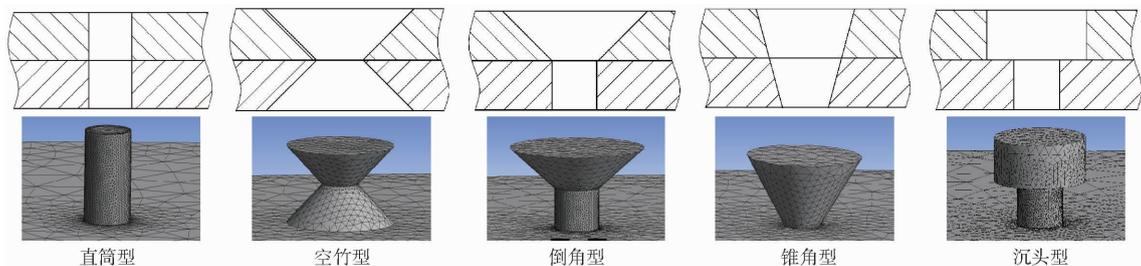


图 5 型孔形状及网格划分

Fig. 5 Hole shape and mesh division

在 Fluent 中进行单因素仿真试验, 分析不同型孔条件下气室内压强及速度分布情况, 在 Fluent 参数设置中选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 standard 模型, 在 Cell Zone Condition 选项里设置进口压力为 0 kPa, 设置出口压力为 -5 kPa。为反映各型孔下

的气室流场特征, 需要在气室中接近型孔底面处选择一个合适的输出面, 试验发现距离型孔底面 0 ~ 10 mm 区间内各输出面都能明显表达气流压强特征, 故本次输出面选择为排种器型孔底面 $z = 5$ mm 处^[20-22]。

3.2 不同型孔形状对气室流场压力分布的影响

由图 6 各型孔下气室压力分布云图(由左向右依次为静压云图、动压云图、总压云图)可以看出,气流从进气口进入负压气室后,在环形区域中间位置出现高压带,然后迅速向四周递减,将负压蔓延到其他位置处。为了减少排种器所占空间,提高紧凑性,在负压吸管的设置中,吸管入口斜对右半边气室,故右侧压力比左侧稍大,从静压图可以看出,因负压吸管的位置分布及朝向问题,导致右半边气室中间高压带宽度较大,而左半边气室中间高压带宽度较小。在静压部分中,直筒型型孔、倒角型型孔的压力扩散程度优于其他 3 种,因气流到达气压环形气室两端时压力较弱,且气流在此处碰壁减缓后折返,导致气流输出气室时此

处气流速度也最慢,气压环形气室两端则会出现黄色甚至是红色区域。在动压云图中,几种型孔处压强的差别并不明显,而气室动压中,空竹型和沉头型较其他 3 种而言气压分布不均匀,在倒角型型孔动压云图中气压分布较集中均匀,深蓝色区域主要集中在型孔位置区域,且其动压值达到了最大负压 0.717 Pa,该值为 $0.5\rho v^2$ (ρ 为密度, v 为速度),因此得知:在倒角型型孔中,气室流速、动压皆超过其余 4 个。总压云图中,负压最大值均在 $-5.02 \times 10^3 \sim -5.01 \times 10^3$ Pa 之间,差别不明显,但空竹型和沉头型在几处型孔处多次出现黄色甚至是红色区域,因为型孔形状设置不合理,在型孔处出现较低压强,而较低压强会使型孔处吸力不集中,造成漏播现象。

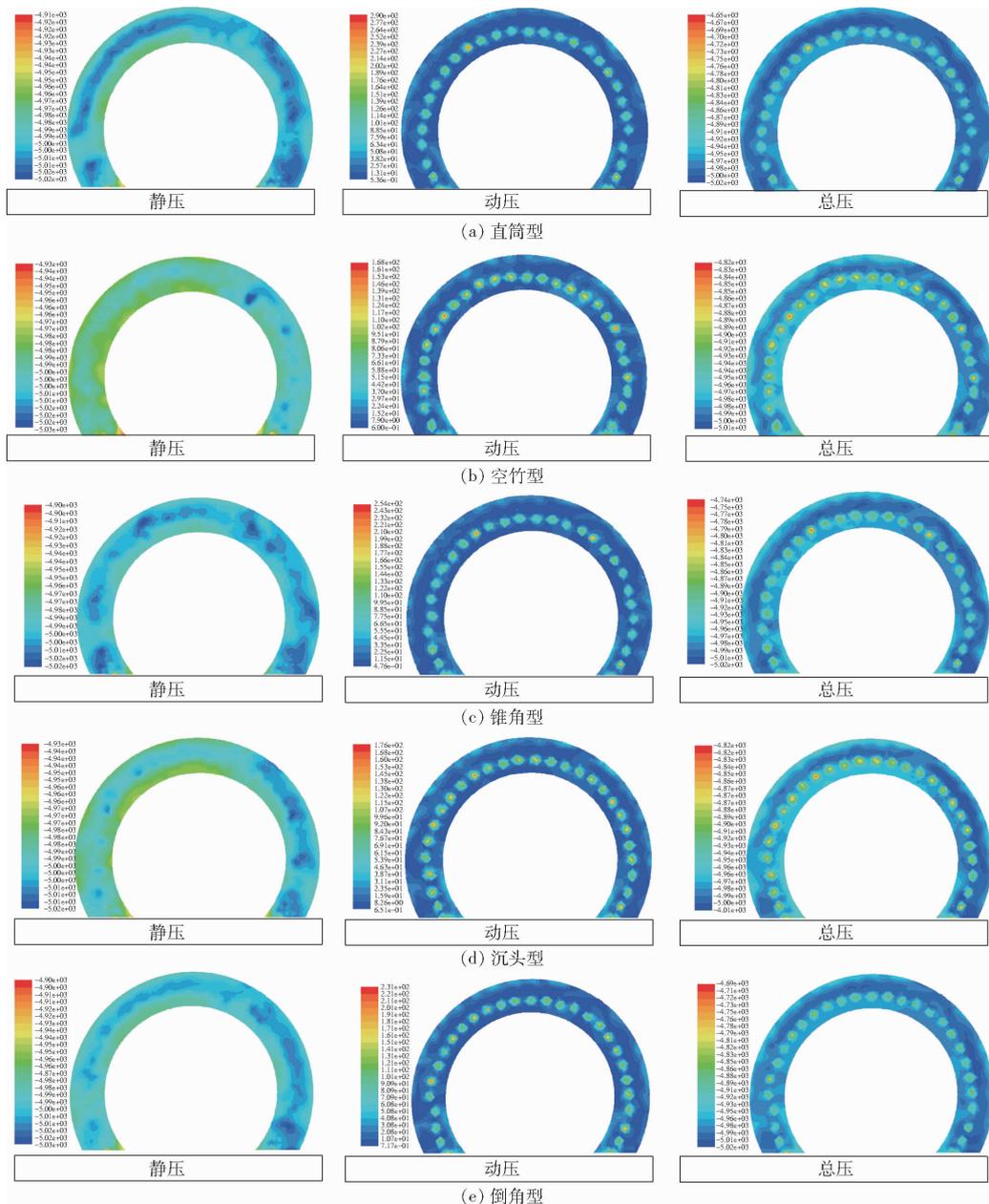


图 6 各型孔下气室压力分布云图

Fig. 6 Nebulograms of pressure distribution in air chambers under various types of holes

3.3 不同型孔形状对气室流场速度分布的影响

由图7可知,在整体气室速度云图中(由左向右依次为直筒型、空竹型、锥角型、沉头型、倒角型型孔云图),流速最大部位均处于型孔处,沉头型与空竹型型孔的最大速度分别是1.59、1.60 m/s,而锥角型、直筒型和倒锥角型均处于1.80 m/s以上。在型孔局部云图中,因气流流道未发生改变,整个直筒型型孔中流速都较大;空竹型和锥角型

的最大流速发生在型孔最小直径处,型孔最外侧流速较小,仅为1.91 m/s左右。倒角型型孔外侧流速高于沉头型型孔。在型孔部位的矢量图中,空竹型型孔因入口端锥角的存在,气流顺着锥面流入,在最小直径处发生气流交叉,气流在最小端面处产生力的相互作用,不利于吸种。综合考虑压强、流速及种子受力分析情况,选择倒角型型孔、直筒型孔作为较优型孔。

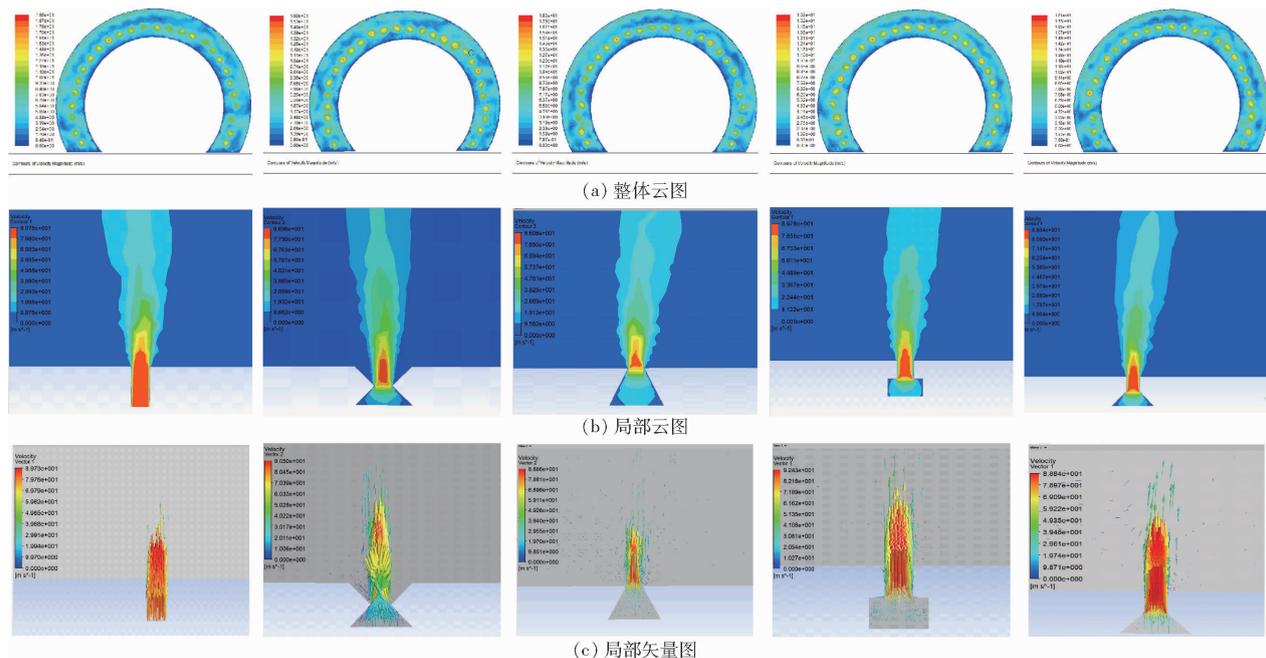


图7 各型孔下气室速度分布云图

Fig. 7 Cloud diagrams of velocity distribution of air cavity under each type of hole

综上所述,倒角型型孔作为较优型孔之一,为获得最佳锥角,针对其不同锥角进行分析,选择 60° 、 90° 、 120° 3类常用锥角作为变量,在Fluent中进行单因素试验仿真分析,仿真结果如图8所示(由左向右依次为压力云图、速度云图、速度矢量图)。在3类锥角的仿真结果中可以发现:在压力云图中 60° 锥角型型孔在型孔处高压区域的占比明显高于其他两种;速度云图分布中, 60° 锥角型型孔倒角区域的速度整体最高;速度矢量图中, 60° 锥角型型孔在锥角区域的速度分布较为集中,速度矢量分布明显优于其他两种。故选择 60° 锥角为倒角型型孔最佳锥角。

4 台架试验与田间试验

4.1 台架试验

在理论分析及仿真分析后,为验证变粒径双圆盘气吸式精量排种器可靠性与可行性,在山东农业大学排种性能实验室进行了排种性能试验,将变粒径双圆盘气吸式精量排种器安装在JSP-12型排种器性能试验台上,如图9a所示。台架试验采用的小粒径种子为上海青油菜种,直径约为1.3 mm,千粒

质量为2.317 g,含水率为4.21%。

考虑到排种盘转速、负压对播种过程有较大影响,在进行台架试验前进行预试验。负压要求越大所需能耗越大,合适的负压在满足正常的吸排种要求下,应尽可能降低负压能耗。因小粒径种子体积小、质量轻,其排种试验负压要求较低,预试验从1 kPa开始进行,并以0.5 kPa进行逐次递增,本次预试验在5 r/min的较低转速下,研究排种器在负压为1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5 kPa情况下的吸排种性能。经预试验发现,在负压低于2.5 kPa时,排种盘在转速较低的情况下吸种不稳定,漏播严重,随着负压增强,吸种逐渐稳定,压力预试验分析结果如表1所示。综合考虑,本次排种器性能试验负压选择为2.5、3、3.5、4、4.5 kPa。在转速预试验中,选取压强预试验的负压中间值3.5 kPa,因排种盘固定型孔夹角较大,当排种盘转速低于15 r/min时,因搅种不充分出现种子架空现象,当转速高于45 r/min时,漏播现象较严重,转速预试验分析结果如表2所示。综合考虑,本次排种器性能试验选择转速为15、25、35、45 r/min。试验开始时因风机启动产生的负压不

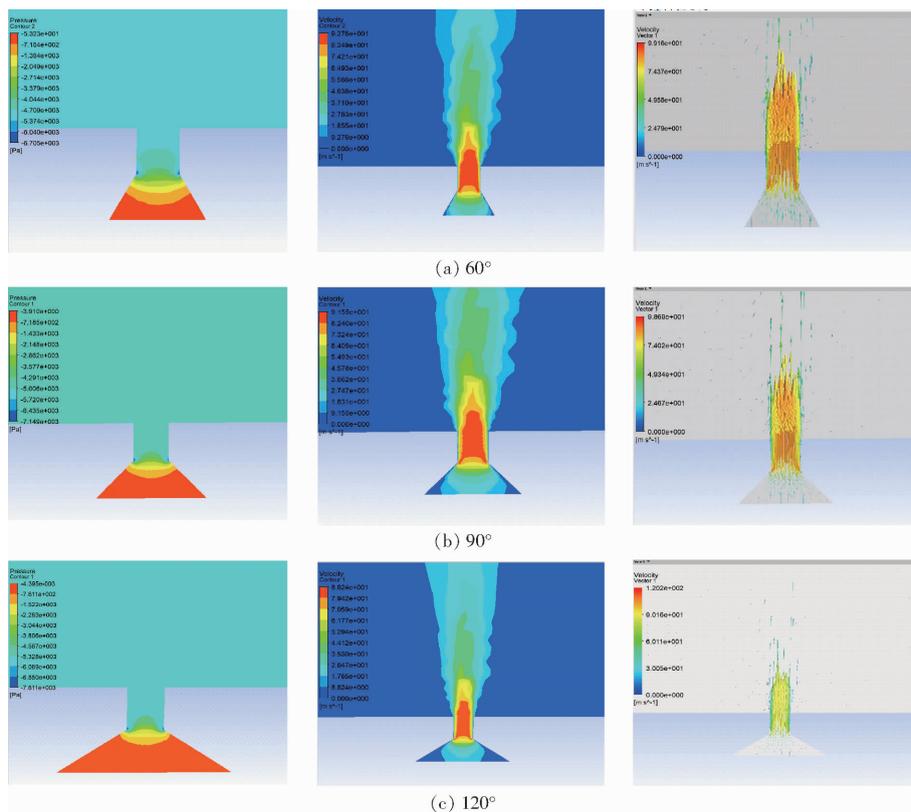


图 8 各倒角型孔的气室压强及速度分布

Fig. 8 Pressure and velocity distribution of air cavity under chamfered holes

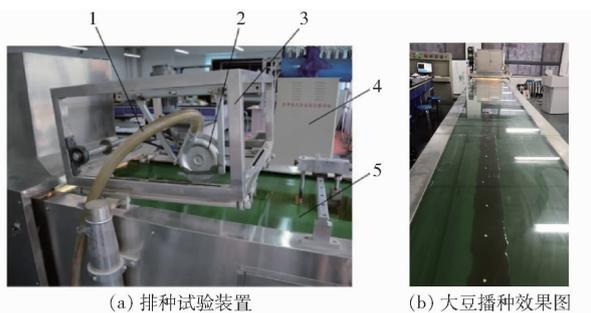


图 9 台架试验
Fig. 9 Bench test

- 1. 吸气管道 2. 排种器 3. 支架 4. 排种器试验台综合操作柜
- 5. 试验台传送带

稳定,出现了短暂的高漏播率,气室内负压未达到吸种要求,随着负压趋于平衡,排种器性能逐渐稳定,此时开始记录数据。

表 1 压力预试验分析结果

Tab. 1 Pre-test analysis results of pressure %

参数	负压/kPa							
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
漏播率	17.91	16.45	14.31	9.49	9.54	8.21	7.06	8.61
重播率	4.86	5.01	6.97	8.81	8.69	10.42	11.17	13.16

在完成小粒径种子台架试验后,进行了大粒径种子的台架试验,选择大豆为播种对象,大豆种子表面圆润光滑,且吸种型孔较大,型孔堵塞现象较少发生,其播种效果如图 9b 所示。为测试排种器对于球

表 2 转速预试验分析结果

Tab. 2 Pre-test analysis results of rotational speed %

参数	转速/(r·min ⁻¹)					
	5	15	25	35	45	55
漏播率	4.88	6.12	5.58	5.26	9.83	13.03
重播率	13.65	9.96	5.90	8.59	6.74	6.27

形种子和异形种子的吸排种性能,针对丸化后的甜菜种子与未丸化的甜菜种子进行了对比试验,试验表明未丸化甜菜种子的漏播率和重播率皆高于丸化甜菜种子。试验表明,该排种器对于球形及类球形种子播种效果明显优于异形种子,且对大、小粒径种子都具有较好的播种效果。

4.2 直筒型型孔圆盘与 60° 锥角型型孔圆盘对比分析

在 JSP-12 型排种器性能试验台上进行排种器性能试验,旨在考察排种器的排种性能,根据 GB/T 6793—2005《单粒(精密)播种机试验方法》的要求,选择合格率 A、漏播率 D、重播率 M 作为排种器的排种性能指标。

表 3 为直筒型型孔圆盘排种器的试验结果,表 4 为 60° 锥角型型孔圆盘排种器的试验结果。整体来看,60° 锥角型型孔圆盘排种器排种性能优于直筒型型孔圆盘排种器。

表3 直筒型型孔圆盘排种器试验结果

Tab.3 Experimental results of straight cylindrical hole disc seeder

排种器 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	负压/kPa														
	2.5			3.0			3.5			4.0			4.5		
	A	D	M	A	D	M	A	D	M	A	D	M	A	D	M
15	79.63	9.52	9.85	80.20	9.98	9.82	80.05	8.33	11.62	82.80	7.06	10.14	81.13	8.61	10.26
25	82.45	10.83	6.72	81.67	9.01	9.32	83.56	8.07	7.37	85.18	5.65	9.17	83.48	7.05	9.47
35	81.45	10.69	7.86	84.25	8.17	7.58	85.88	6.76	7.36	87.01	4.51	9.58	84.73	5.76	9.51
45	79.41	11.96	8.63	79.26	10.53	10.21	81.92	7.62	10.46	81.76	8.89	9.35	80.47	7.98	11.55

表4 60°锥角型型孔圆盘排种器试验结果

Tab.4 Experimental results of chamfered hole disc seeder

排种器 转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	负压/kPa														
	2.5			3.0			3.5			4.0			4.5		
	A	D	M	A	D	M	A	D	M	A	D	M	A	D	M
15	82.31	8.96	8.73	84.20	7.78	8.02	83.92	6.12	9.96	85.29	8.55	6.16	85.45	3.91	10.64
25	84.55	8.76	6.69	83.29	8.36	7.45	89.52	5.58	5.90	91.27	2.65	6.08	90.63	2.05	7.32
35	83.17	10.32	5.61	87.11	7.06	5.83	86.15	5.26	8.59	88.91	3.47	7.62	87.61	4.98	9.41
45	83.02	10.47	6.51	82.77	9.31	7.92	83.43	9.83	6.74	86.82	4.81	8.37	84.06	7.83	8.11

4.3 正交试验及结果分析

通过上述研究分析,以转速和负压作为排种器性能影响因素,探究基于60°锥角型型孔圆盘排种器的最佳压强、转速值,在相同的试验环境下,设计一组正交试验,选择试验压强范围为3~5 kPa,转速范围为20~40 r/min,试验因素编码如表5所示。根据中心组合试验设计原理,进行回归正交旋转组合设计^[23], X_1 、 X_2 为因素编码值。每组试验重复3次取平均值作为试验结果,试验方案及结果如表6所示。

表5 试验因素编码

Tab.5 Experimental factors and codes

编码	因素	
	排种器转速/($r \cdot \min^{-1}$)	负压/kPa
1.414	44.14	5.41
1	40.00	5.00
0	30.00	4.00
-1	20.00	3.00
-1.414	15.86	2.59

表6 试验方案与结果

Tab.6 Experimental scheme and results

试验 编号	X_1	X_2	评价指标/%		
			A	D	M
1	1.414	0	84.88	1.96	13.16
2	0	1.414	88.16	4.07	7.77
3	-1	1	85.71	6.57	7.72
4	-1.414	0	81.67	10.27	8.06
5	1	1	87.57	4.39	8.04
6	1	-1	82.28	8.25	9.47
7	0	-1.414	86.59	7.15	6.26
8	0	0	90.03	2.92	7.05
9	-1	-1	80.96	10.16	8.88
10	0	0	89.12	3.31	7.57
11	0	0	91.27	2.65	6.08
12	0	0	89.97	3.49	6.54
13	0	0	90.53	4.02	5.45

将试验数据导入 Design-Expert 软件进行回归拟合,排种器合格率、漏播率和重播率的响应函数分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 ,以各影响因素编码为自变量建立回归数学模型。通过对试验数据进行回归拟合,得到各因素水平对排种合格率、漏播率和重播率影响的回归模型

$$\begin{cases}
 Y_1 = 90.18400 + 0.96495X_1 + 1.53254X_2 + \\
 \quad 0.013500X_1X_2 - 3.75325X_1^2 - 1.70325X_2^2 \\
 Y_2 = 3.27800 - 1.98026X_1 - 1.47572X_2 - \\
 \quad 0.067500X_1X_2 + 1.78850X_1^2 + 1.53600X_2^2 \\
 Y_3 = 6.53800 + 1.01531X_1 - 0.056817X_2 - \\
 \quad 0.067500X_1X_2 + 1.96475X_1^2 + 0.16725X_2^2
 \end{cases} \quad (13)$$

根据表7可知,排种器的排种合格率回归模型 $P = 0.0005$ ($P < 0.05$),影响显著;失拟项 $P = 0.1145$ ($P > 0.05$),影响不显著。表明在一定的参数范围内,合格率的回归模型与实际的播种情况拟合度较高。进一步可知回归项 X_1 、 X_2 、 X_1^2 以及 X_2^2 的 $P < 0.1$,影响显著;回归项 X_1X_2 的 $P > 0.1$,影响不显著。漏播率回归模型的 $P = 0.0002$ ($P < 0.05$),影响显著,失拟项的 $P = 0.0635$ ($P > 0.05$),影响不显著,表明在一定的参数范围内,漏播率的回归模型与实际的播种情况拟合度较高。进一步可知回归项 X_1 、 X_2 、 X_1^2 以及 X_2^2 的 $P < 0.1$,影响显著,回归项 X_1X_2 的 $P > 0.1$,影响不显著。重播率回归模型的 $P = 0.0077$ ($P < 0.05$),影响显著,失拟项的 $P = 0.1810$ ($P > 0.05$),影响不显著,表明在一定的参数范围内,漏播率的回归模型与实际的播种情况拟合度较高。进一步可知回归项 X_1 以及 X_1^2 的 $P < 0.1$,

表7 回归方程方差分析

Tab.7 Analysis of variance of regression equation

方差来源	合格率				漏播率				重播率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
X_1	7.45	1	5.41	0.053 0	39.79	1	47.38	0.000 2	12.81	1	10.91	0.013 1
X_2	23.37	1	16.96	0.004 5	36.37	1	43.31	0.000 3	1.43	1	1.22	0.306 1
X_1X_2	0.073	1	0.053	0.8247	1.29	1	1.53	0.255 4	0.75	1	0.64	0.451 0
X_1^2	94.76	1	68.76	<0.000 1	16.07	1	19.13	0.003 3	32.79	1	27.92	0.001 1
X_2^2	24.87	1	18.05	0.003 8	23.61	1	28.11	0.001 1	0.016	1	0.014	0.909 4
模型	139.71	5	20.28	0.000 5	112.65	5	26.83	0.000 2	48.17	5	8.20	0.007 7
残差	9.65	7			5.88	7			8.22	7		
失拟	7.15	3	3.81	0.114 5	4.76	3	5.67	0.063 5	5.50	3	2.70	0.181 0
误差	2.50	4			1.12	4			2.72	4		
总和	149.36	12			118.53	12			56.39	12		

影响显著,回归项 X_2 、 X_1X_2 以及 X_2^2 的 $P > 0.1$, 影响不显著。在剔除不显著回归项后合格率、漏播率和重播率的回归模型可表示为

$$\begin{cases} Y_1 = 90.184\ 00 + 0.964\ 95X_1 + 1.532\ 54X_2 - \\ \quad 3.753\ 25X_1^2 - 1.703\ 25X_2^2 \\ Y_2 = 3.278\ 00 - 1.980\ 26X_1 - 1.475\ 72X_2 + \\ \quad 1.788\ 50X_1^2 + 1.536\ 00X_2^2 \\ Y_3 = 6.538\ 00 + 1.015\ 31X_1 + 1.964\ 75X_1^2 \end{cases} \quad (14)$$

4.4 试验因素影响效应分析与最佳参数优化验证

为更加直观地分析各影响因素与排种器排种性

能之间的关系,对正交试验数据处理获得排种器转速和负压对合格率、漏播率、重播率影响的响应曲面图,如图10所示。从图中可以看出,排种器转速和排种器负压之间存在交互作用:当排种器负压一定时,随着转速的上升,合格率表现出先增大后减小的趋势,而漏播率和重播率均表现出先减小后增大的趋势;当排种器转速一定时,随排种器负压增加,合格率表现出先增大后减小的趋势,而漏播率和重播率都表现出先减小后增大的趋势。当排种器转速处于30~40 r/min范围内,负压处于3.8~4.5 kPa范围内时,排种器的排种合格率较高,漏播率和重播率较低。

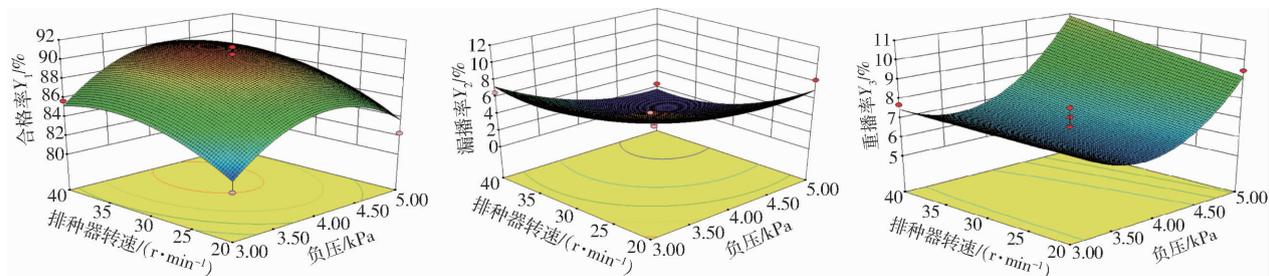


图10 各因素对评价指标的影响曲面

Fig.10 Influence of each factor on evaluation index

合格率先取最大值,漏播率与重播率取最小值,在排种器转速为20~40 r/min、负压为3~5 kPa之间进行优化求解^[24],得到排种器最佳优化参数为:转速为34.37 r/min,负压为4.10 kPa,此时排种器的合格率为90.63%,漏播率为2.45%,重播率为6.90%。

在排种器性能试验台上对优化后的理论结果进行试验验证,在其他条件相同的情况下,将排种器转速设置为34.5 r/min,排种器负压设置为4.10 kPa,进行3次重复试验,得到排种合格率平均值为90.46%,漏播率平均值为2.59%,重播率平均值为6.94%,试验结果与理论结果基本相符。

4.5 田间试验

选择山东农业大学试验田南区(117°09'5.01"~117°09'22.55"E,36°09'30.88"~36°09'41.48"N)为试验地点,海拔126~128 m,温带季风气候,夏季高温多雨、冬季寒冷干燥,雨热同季,对作物生长发育十分有利。2018年9月在试验田进行播种试验,选取的种子为10倍丸化后的萝卜种,风机叶轮转速为4500~5200 r/min,作业时风机负压表显示4.5 kPa,田间试验情况及种苗生长效果如图11所示。

对排种器播种性能进行综合性能测试,选定株距为65 mm,作业行数为3行。采用五点取样法对种苗进行采样,每个采样点测定1 m内苗间距,重复



图 11 田间试验及种苗生长情况

Fig. 11 Field test and seedling growth

测量 3 次并求取平均值,计算播种总排量稳定性变异系数、各行排量一致性变异系数、漏播率、平均合格率,结果如表 8。

表 8 样机试验结果

Tab. 8 Prototype test results %

参数	合格指标	试验值
总排量稳定性变异系数	≤5	4.86
各行排量一致性变异系数	≤10	5.34
漏播率	≤3.0	2.77
平均合格率	≥90	90.16

由田间和台架试验对比表明,在田间试验中,因受到机器颠簸振动,导致田间试验的合格率低于台架试验。单组仿形减振部件精密播种机对田间随机振动有明显的降低效果,进行播种作业时,可以根据土地状态和作业要求提高仿形部件仿形减振,从而

提高合格指数。

5 结论

(1) 针对圆盘型排种器仅能实现同粒径种子播种的问题,研制了变粒径双圆盘气吸式精量排种器,采用一种可旋转组合变换出不同型孔直径的双圆盘结构,运用负压吸种的方式,实现了不同粒径种子的精量播种,提高了排种器的通用性,节约了生产成本。设计的圆盘仅设置有 4 种不同尺寸型孔,可根据需要,按照相同的组合方式增减型孔的圈数及数量。

(2) 基于双圆盘结构提出了 5 种双圆盘组合型孔形状,进行了 Fluent 仿真选型和 JSP-12 台架试验,通过正交试验确定排种器排种性能最佳时转速为 34.5 r/min、负压为 4.1 kPa、型孔为 60° 锥角的倒角型型孔,其合格率为 90.46%、漏播率为 2.59%、重播率为 6.94%,排种性能满足国标要求。

(3) 田间试验表明,在播种常规球形、类球形种子时,相较于传统排种器,变粒径双圆盘气吸式精量排种器的作业性能显著提升,漏播率为 2.77%,播种质量较优,为种子的生长提供了良好的条件,满足播种要求。

参 考 文 献

- [1] 张敏,吴崇友,张文毅,等.吸盘式水稻育秧播种器吸孔气流场仿真分析[J].农业工程学报,2011,27(7):162-167. ZHANG Min, WU Chongyou, ZHANG Wenyi. Airflow field simulation on suction nozzle of cupule-type disseminator for rice seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 162-167. (in Chinese)
- [2] JIANG Xinlu, LI Xuyi, CHI Zhongzhi, et al. Research on potted-tray grown rice seedling transplanting by machine[J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(11):1923-1927.
- [3] 于建群,王刚,心男,等.型孔轮式排种器工作工程与性能仿真[J].农业机械学报,2011,42(12):83-87. YU Jianqun, WANG Gang, XIN Nan, et al. Simulation analysis of working process and performance of cell wheel metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 83-87. (in Chinese)
- [4] 丁力,杨丽,刘守荣,等.辅助充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)
- [5] 耿瑞阳,张明源,何珂,等.倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(1):68-76. GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):68-76. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.008. (in Chinese)
- [6] 颜丙新,张东兴,崔涛,等.排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J].农业工程学报,2017,33(23):15-23. YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15-23. (in Chinese)
- [7] DIZAJI H Z, TAHERA M R Y, MINAEI S. Air-jet seed knockout device for pneumatic precision planters[J]. AMA-Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2010, 41(1):45-50.
- [8] SINGH T, MANE D. Development and laboratory performance of an electronically controlled metering mechanism for okra seed[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2011, 42(2): 63-69.
- [9] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等.油菜小麦兼用气送式集排器搅种装备设计及充种性能试验[J].农业工程学报,2016, 32(18):26-34. LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for

- rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26-34. (in Chinese)
- [10] KARAEEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 121-125.
- [11] 倪向东,徐国杰,王琦,等.气吸滚筒阵列式棉花精密排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(12):58-67. NI Xiangdong, XU Guojie, WANG Qi, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder array precision seed-metering device for cotton[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 58-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.007. (in Chinese)
- [12] KHOBRAGADE H M, KAMBLE A K, DAVE A K. Performance evaluation of pneumatic seed metering device for paddy in puddle[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2012, 5(1): 98-102.
- [13] 张顺,夏俊芳,周勇,等.气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(1):11-19. ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Field experiment and seeding performance analysis of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11-19. (in Chinese)
- [14] YAZGI A, DEGIRMENCIOLU A. Optimization of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347-356.
- [15] 祁兵,张东兴,刘全威,等.集排式精量排种器清种装置设计与性能试验[J].农业工程学报,2015,31(1):20-27. QI Bing, ZHANG Dongxing, LIU Quanwei, et al. Design and experiment of cleaning performance in a centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 20-27. (in Chinese)
- [16] SIGN R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimization of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cotton seeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.
- [17] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等.油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J].农业工程学报,2014,30(8):30-39.
- [18] 陈美舟,刁培松,张银平,等.大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J].农业工程学报,2018,34(21):8-16. CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 8-16. (in Chinese)
- [19] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [20] KARAYEL D, BARUT Z B, ÖZMERZI A. A mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.
- [21] 史嵩.气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D].北京:中国农业大学,2015. SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [22] YU Jiajia, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 1-12.
- [23] 辛涛.回归分析与实验设计[M].北京:北京师范大学出版社,2010.
- [24] KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 121-125.