

正负气压组合滚轮式油菜精密排种器设计与试验

廖宜涛^{1,2} 刘嘉诚¹ 廖庆喜^{1,2} 郑娟¹ 李甜¹ 蒋杉¹

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

摘要: 针对油菜种子粒径小、质量轻,单粒排种难度较大的问题,设计了一种正负气压组合滚轮式精密排种器。阐明了排种器工作原理,开展排种器吸种、携种和卸种环节受力分析和排种滚轮对种群拖带过程解析;提出了通过控制充种区种层高度和种群压力的防拖带堆积机理,设计了一种侧向充种、拖带种子自由回落的充种室结构,利用离散元仿真研究了充种种层高度和充种室结构对排种器充种区内充种性能的影响及对种群拖带堆积的解决情况;仿真结果表明,排种器内种子随着充种种层高度的增大,种群平均动能均值逐渐增大,对种群平均扰动能力逐渐增强;在充种种层高度 50 mm 条件下,设计的防拖带堆积充种室降低了充种区域底部种群所受的压力,未出现种群拖带堆积现象,且保持了对充种区域种群的扰动作用。在 JPS-12 型排种器检测试验台上进行了排种器性能试验,结果表明,当排种转速为 15~30 r/min、吸种负压为 1.0~1.2 kPa 时,排种器合格指数均保持在 90% 以上;设计装配正负气压组合滚轮式精密排种器的播种机开展播种试验,田间实测出苗后株距稳定性变异系数为 4.4%,各行苗数一致性变异系数为 8.14%;研究结果表明设计的排种器满足精密播种要求。

关键词: 油菜;精密排种器;正负气压组合;滚轮式

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)05-0063-14

OSID:



Design and Test of Positive and Negative Pressure Combination Roller Type Precision Seed-metering Device for Rapeseed

LIAO Yitao^{1,2} LIU Jiacheng¹ LIAO Qingxi^{1,2} ZHENG Juan¹ LI Tian¹ JIANG Shan¹

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

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

Abstract: Considering at the problem of small particle size and light quality of rapeseed, which makes it difficult to displace individual seeds, a positive and negative pressure combination roller type precision seed-metering device was designed. The working principle of the seed-metering device was clarified, and the force analysis of the seed absorbing, seed carrying and seed discharging links of the seed-metering device was carried out, as well as the analysis of the dragging process of the seed discharging roller on the seed population. The mechanism of preventing dragging accumulation by controlling the height of the seed layer in the seed filling area and the pressure of the seed population was proposed, and a seed filling chamber structure with lateral seed filling and free fall of the dragging seed was designed. The influence of the height of the seed layer and the structure of the seed filling chamber on the performance of the seed filling in the seed filling area of the seed-metering device and the solution of the dragging accumulation of the seed population were investigated by using the discrete element simulation. The simulation results showed that the average kinetic energy of the seed population inside the seed dispenser was increased with the increase of the filling seed layer height, and the average disturbance capacity of the seed population was gradually increased. Under the condition of 50 mm seed filling layer height, the designed anti-drag strip accumulation seed filling chamber reduced the pressure on the seed population at the bottom of the seed filling area, and the phenomenon of population drag strip accumulation did not occur, and the disturbing effect on the seed population in the seed filling area was maintained. Seed metering tests were

收稿日期: 2024-02-25 修回日期: 2024-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)、国家自然科学基金项目(51975238)、湖南省智能农机装备创新研发项目(HN202308)和国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

conducted on the JPS-12 seed-metering device inspection test bench, the test results showed that in the roller speed at 15~30 r/min, suction seed negative pressure in the range of 1.0~1.2 kPa seed-metering device qualified index could reach more than 90%. The results of the field test showed that the coefficient of variation of plant spacing stability was 4.4% and the coefficient of variation of seedling number consistency in each row was 8.14% in the actual field operation of the planter equipped with positive and negative pneumatic pressure combination roller-type small-size seed single-seed precision planter, which met the requirements of precision sowing.

Key words: rapeseed; precision seed-metering device; positive and negative pressure combination; roller type

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,且兼具菜用、饲用、绿肥等多功能利用价值,其种植方式主要以人工播种或机械播种后间苗为主,人工播种劳动强度大、效率较低,机械化播种能降低劳动强度,提高播种效率与播种质量。单粒排种是提高油菜播种质量的关键之一^[1-3]。

机械窝眼轮式排种器是目前应用较广的单粒排种器^[4],主要依靠重力和种群流动性完成充种,种子受窝眼轮拖拽力作用脱离种群,随后在护种装置作用下,跟随窝眼轮旋转至卸种口,最后在重力或强制卸种装置作用下完成卸种^[5]。当排种油菜等小粒径种子时,由于种子流动性好,窝眼易充入多粒种子,仅通过结构上的改进来实现单粒充种排种功能难度较大^[6-9],采取刮种器、护种器等清种装置易造成种子表皮破损、窝眼轮堵塞等问题。因此对种子适应性强、排种精度高、对种子无挤压剪切损伤的气吸式排种技术成为研究重点^[10-14]。

气吸式排种器中应用较多的是垂直圆盘式和滚筒式。如美国 MONOSEM、意大利 MASCHIO、英国 STANHAY 等公司生产的气吸式排种器以垂直圆盘式为主,其工作原理是通过负压气流将种子吸附在排种盘型孔上,跟随排种盘运移至卸种区后隔断负压使种子在重力的作用下完成卸种;针对小粒径种子质量轻,难以靠自身重力及时卸种的问题,在卸种区设计与吸种负压气室隔离的正压气室,利用正压气吹可实现及时卸种^[15-17]。但这类排种器是采用侧向卸种,种子侧向运移易影响种子流有序状态^[18]。

气力滚筒式排种器常应用于穴盘苗育种等,将种子通过吸种负压吸附于滚筒表面,运移至卸种区后垂直落种^[19-21]。但采用滚筒式排种元件,种子会在滚筒的摩擦力作用下沿滚筒转动方向作爬升运动,种群在排种滚筒的扰动下不断填充至排种器携种区,进而影响排种器排种质量,多数排种器使用清种刮板或毛刷等结构强制防拖带,在

机械式排种器中此种结构较为有效,能清除未进入窝眼或种槽的多余种子,但在气力式排种器中使用清种刮板或毛刷会使已吸附在排种元件上的种子脱落,且易造成种子破损,同时使得排种器整体结构较复杂^[22-23]。

针对油菜等小粒径种子在播种时实现单粒排种难度较大、排种均匀性较差、易堵塞型孔等问题,结合气吸式排种器优点,本文设计一种负压吸种、携种,正压卸种的正负气压组合滚轮式精密排种器,通过充种室结构设计,控制种仓内种子对充种室内种子的压力,以保证排种元件对种群扰动作用的同时解决种群拖带问题。

1 排种器结构与工作原理

正负气压组合滚轮式精密排种器结构如图1所示,主要由种子仓、充种室、气室、排种滚轮、驱动轴和卸种板等部件组成。如图1a~1c所示,种子仓、充种室和气室构成排种器壳体,滚轮安装在壳体一侧通过卡簧进行轴向定位,轴端轴承与轴承端盖安装在另一侧,卸种板安装在外壳体后部用于完成作业后卸种多余的种子,气室外侧的通气孔用于连接通气管为排种器提供吸种负压与卸种正压。

如图1d所示,整体气室呈类马蹄状,该形状能增大气室横截面与滚轮内侧吸种孔的重叠面积,提高气室空间的利用率。排种器气室分为吸种区、携种区、卸种区和过渡区4个区域,其中吸种区与携种区为负压区域,卸种区为正压区域,过渡区无气压。滚轮内侧的内外两圈阶梯结构分别与气室阶梯结构及薄壁轴承相互配合以保证气密性^[24-25],如图1e所示。

排种器在工作时,滚轮在驱动轴带动下开始转动,种子由种子仓填充至滚轮附近的吸种区,在负压作用下滚轮上的吸种孔单粒吸种,并经过携种区进入卸种区,在种子自重与卸种正压的共同作用下完成卸种,随后经过过渡区再次到达吸种区进行吸种。排种器连续工作,吸种滚轮上均布的吸孔即将吸种区内无序种子群转变为有序单粒种子,实现单粒精

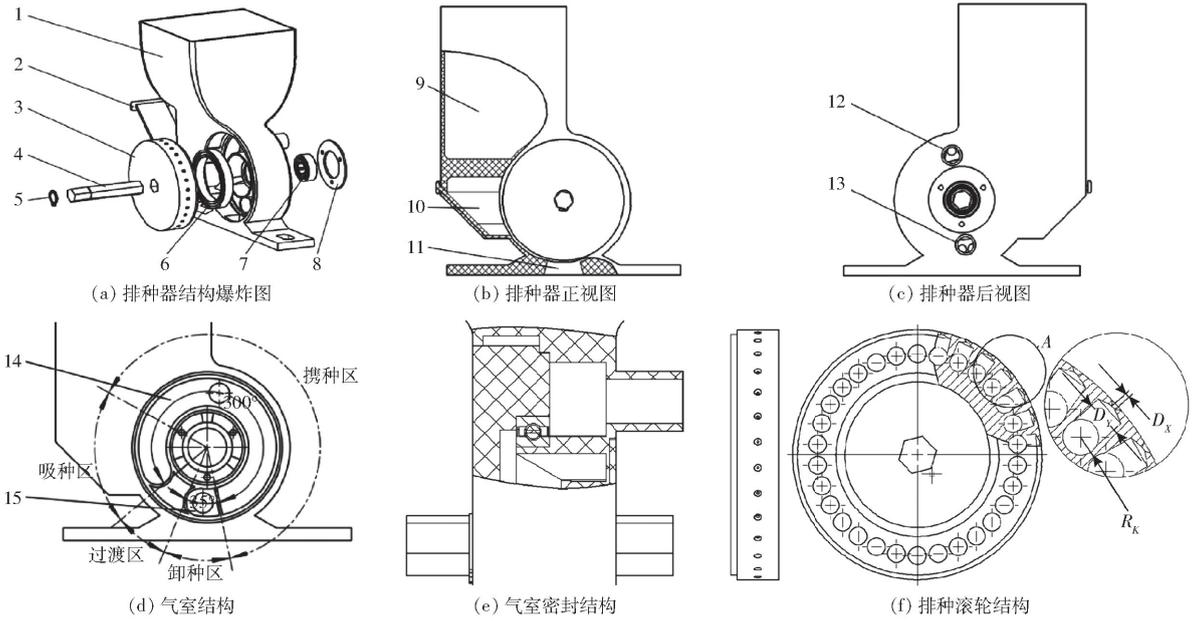


图1 正负气压组合滚轮式精密排种器结构示意图

Fig. 1 Schematics of structure of positive and negative pressure combined roller type precision seed-metering device

1. 外壳体 2. 卸种板 3. 卸排种滚轮 4. 驱动轴 5. 轴用挡圈 6. 薄壁轴承 7. 轴端轴承 8. 轴承端盖 9. 种子仓 10. 充种室 11. 落种口 12. 负压进气口 13. 正压进气口 14. 负压气室 15. 正压气室

密排种。

2 排种器工作过程

由排种器结构和工作过程可知,排种过程有吸种、携种和卸种3个环节。吸种环节是排种过程的初始环节,在滚轮作用下种子由种群定量分离形成连续有序的种子流;携种环节是排种过程的中间环节,种子流跟随滚轮有序进行运移而不提前脱落;卸种环节是排种过程的末端环节,种子保持均匀有序的状态入土。为保证排种器性能,需开展排种过程的种子运动规律研究,为排种器关键部件结构与尺寸设计提供依据。

2.1 吸种过程

吸种过程中理想情况为位于滚轮表面的种子受到吸种负压的作用,并与滚轮上的吸种孔接触并随之转动,对种子吸种过程的运动和受力进行分析,将油菜种子看作球体,种子受力情况如图2所示。种子被吸种负压吸附在吸种孔上,下一瞬间进入携种

区,此时被吸附的种子满足

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{Q1} + F_{N2} \sin \alpha + F_{S2} \cos \alpha + G \sin \theta - F_{N1} - F_L = 0 \\ \sum F_y = F_{N2} \cos \alpha + F_{S1} - G \cos \theta - F_{S2} \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = \mu_1 F_{N1} \\ F_{S2} = \mu_2 F_{N2} \\ F_L = m \omega^2 R_l \\ G = mg \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_{Q1} ——吸种瞬间种子所受吸附力, N

G ——单粒种子重力, N

F_L ——种子受到的离心力, N

F_{N1} ——种子受到滚轮的支持力, N

F_{N2} ——种子受到种群的支持力, N

F_{S1} ——种子受到滚轮的摩擦力, N

F_{S2} ——种子受到种群的摩擦力, N

ω ——滚轮角速度, rad/s

R_l ——滚轮半径, mm

g ——重力加速度, m/s^2

θ ——吸种角, ($^\circ$)

α —— F_{N2} 与Y轴夹角,与种层高度有关, ($^\circ$)

m ——种子质量, kg

μ_1 ——种子与滚轮之间静摩擦因数,取0.3

μ_2 ——种群之间静摩擦因数,取0.5

由式(1)、(2)可得

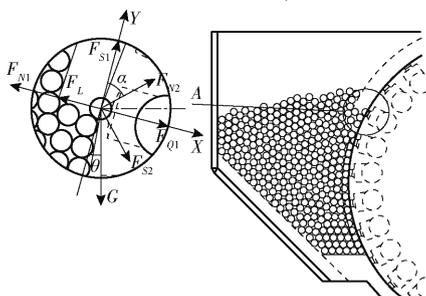


图2 吸种环节种子受力分析

Fig. 2 Force analysis of sucking seed progress

$$F_{Q1} = m\omega^2 R_l + mg \frac{\mu_1 \sin\theta + \cos\theta}{\mu_1} + F_{N2} \left[\left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) \sin\alpha - \frac{1 + \mu_1 \mu_2}{\mu_1} \cos\alpha \right] \quad (3)$$

由式(3)可知,单粒种子受到的吸附力 F_{Q1} 与种子自重、滚轮半径 R_l 、滚轮角速度 ω 、种子与吸种孔之间静摩擦因数 μ_1 、种群之间静摩擦因数 μ_2 、吸种角 θ 、种层高度等有关。同时实际工作时种子被吸种孔吸附,在跟随排种滚轮旋转至进入携种区的过程中还会受到来自外部种群扰动时产生的运移阻力,种子在运移的过程中可能会脱离吸种孔导致排种滚轮漏吸,为保证排种器排种性能,排种滚轮对种群的扰动作用十分重要。

2.2 携种过程

携种过程中,被吸附的单粒种子随着滚轮转动直至卸种区,油菜等类球形小粒径种子由于球形度较高,配合圆形截面的吸种型孔可以较好地实现1孔1粒的精准吸种,因此在携种过程中,无需设计相应的清种机构,即可实现单粒携种^[26-27]。在运动过程中被单粒吸附的种子受力分析如图3所示。

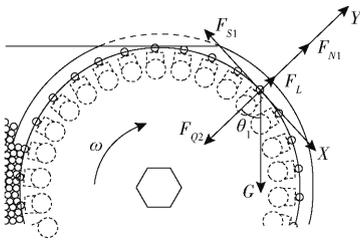


图3 携种环节种子受力分析

Fig. 3 Force analysis of carrying seed progress

运动过程中需要保证单粒种子吸附在滚轮上不会中途脱落,所需的吸附力需满足

$$\begin{cases} \sum F_x = G \sin\theta_1 - F_{S1} = 0 \\ \sum F_y = F_{N1} + F_L - F_{Q2} - G \cos\theta_1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = \mu_1 F_{N1} \\ F_L = m\omega^2 R_l \\ G = mg \end{cases} \quad (5)$$

式中 F_{Q2} ——携种过程中种子所受吸附力, N

θ_1 ——种子自重方向与 Y 轴夹角, ($^\circ$)

由式(4)、(5)可得

$$F_{Q2} = m\omega^2 R_l + mg \left(\frac{\sin\theta_1}{\mu_1} - \cos\theta_1 \right) \quad (6)$$

由式(6)可知,为保证单粒种子始终吸附在吸种孔上并随滚轮旋转至卸种区所需的吸附力 F_{Q2} 与种子自重、种子与滚轮之间静摩擦因数 μ_1 、滚轮半径 R_l 、滚轮角速度 ω 、种子所旋转至的位置等有关。

2.3 卸种过程

卸种过程为单粒种子随滚轮转动至卸种区后,吸种孔内的负压转变为正压,单粒种子在自身重力和正压的共同作用下离开滚轮,种子在离开吸种孔的瞬间受力分析如图4所示。此时种子应满足

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{S1} - G \sin\beta = 0 \\ \sum F_y = F_{N1} + F_{Q3} + G \cos\beta + F_L = ma_n \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = \mu_1 F_{N1} \\ F_L = m\omega^2 R_l \\ G = mg \end{cases} \quad (8)$$

式中 F_{Q3} ——卸种瞬间种子所受吸附力, N

β ——投种角, ($^\circ$)

a_n ——法向加速度, m/s^2

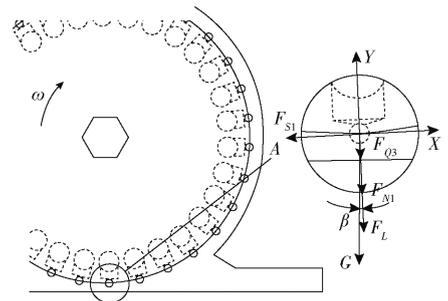


图4 卸种过程受力分析

Fig. 4 Force analysis of unloading progress

由式(7)、(8)可得

$$F_{Q3} = m \left[(a_n - \omega^2 R_l) - g \left(\cos\beta + \frac{\sin\beta}{\mu_1} \right) \right] \quad (9)$$

由式(9)可知,卸种瞬间种子所受的吸附力 F_{Q3} 与种子自重、投种角 β 、种子与滚轮之间静摩擦因数 μ_1 、滚轮半径 R_l 、滚轮角速度 ω 等有关。

2.4 种群拖带

当排种滚轮在吸种、携种和卸种的连续工作过程中,充种室内排种滚轮附近的种群会在排种滚轮摩擦力作用下产生一个带动层,带动层种群的扰动性越强,排种器充种性能越好。以带动层内的一粒种子为对象,分析其带动过程:初始状态下,与滚轮接触的种子在滚轮表面的摩擦力作用下产生扰动作用,并脱离带动层,此时种子在排种滚轮表面的受力如图5所示,由于种子直径远小于吸种滚轮直径,故将此处摩擦视为滑动摩擦。若种子所受摩擦力大于种子重力沿滚轮表面切向方向的分力,此时种子受力满足

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{S3} - G \cos\gamma = ma > 0 \\ \sum F_y = F_N - G \sin\gamma = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} G = mg \\ F_{S3} = \mu_1 F_N \end{cases} \quad (11)$$

式中 F_{S3} ——种子在滚轮表面所受的摩擦力, N
 F_N ——种子在滚轮表面所受的支持力, N
 γ ——种子重力方向与 X 轴的夹角, ($^\circ$)
 a ——种子沿滚轮爬升运动加速度, m/s^2

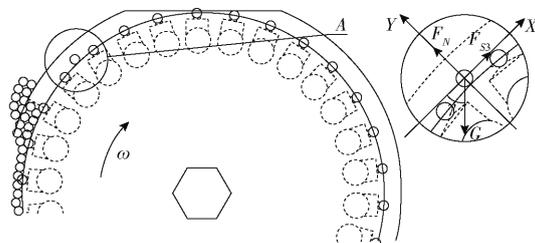


图5 种子拖带现象受力分析

Fig. 5 Force analysis of seed towing

若种子所受摩擦力小于种子重力沿滚轮表面切向方向的分力, 此时种子受力满足

$$\begin{cases} \sum F_X = F_{S3} - G \cos \gamma = ma \leq 0 \\ \sum F_Y = F_N - G \sin \gamma = 0 \end{cases} \quad (12)$$

当 γ 满足式(10)时, 种子将在摩擦力的作用下直接越过滚轮的最高点, 从卸种口流出, 影响排种性能, 当 γ 满足式(12)时, 种子沿着滚轮的转动方向作爬升运动, 随后会在惯性的作用下继续向上爬升一段距离, 但此时摩擦力不足以支持种子越过滚轮最高点, 最终在重力的作用下落回至带动层。

将 $\mu_1 = 0.3$ 代入式(12), 求得 $\gamma = 73.3^\circ$, 由受力分析可知, 当 $\gamma > 73.3^\circ$ 时, 种子会在滚轮的摩擦力作用下直接越过最高点; 当 $0^\circ < \gamma \leq 73.3^\circ$ 时, 种子会沿滚轮作爬升运动, 产生拖带, 但不会越过滚轮最高点, 会落回带动层; 当 $\gamma = 0^\circ$ 时, 种子会沿垂直方向轻微扰动后垂直落回。

在实际工作中, 种子是以群体的形式进入排种器充种室, 在充种室内带动层的种群受拖带后, 向排种滚轮转动方向作爬升运动, 后续种群可能会在种仓内种群的压力下迅速填补进入充种室, 导致产生拖带的种子无法回落到原始位置, 而是在带动层上方逐渐堆积, 直至越过排种滚轮最高点从卸种口流出, 因此种群拖带现象会影响排种器工作效果。

3 排种器关键结构设计

3.1 滚轮结构设计

目前国内外生产应用的气吸式播种机排种元件直径多为 140 ~ 260 mm, 但作用对象多为大、中粒径种子, 而本文设计的排种器针对油菜等小粒径种子, 故滚轮直径选择 120 mm^[28]。所设计滚轮如图 1f 所示, 在滚轮外圆表面沿圆周方向均匀开设吸种孔, 吸种孔根据油菜种子类球形的特征设计成倾斜角度为 45° 的锥形吸种孔, 有利于种子准确地被型孔吸附,

并降低携种阻力^[26,29]。吸种孔直径对排种性能有着直接影响, 吸种孔直径过大会导致重播增加且造成吸种孔堵塞; 吸种孔直径过小会导致漏播增加。因此, 需根据油菜种子形状和尺寸选择滚轮吸种孔直径, 油菜种子外形类球形, 且长、宽、高尺寸差异不显著, 可以按照经验公式^[30]确定吸种孔底部直径为

$$d = (0.64 \sim 0.66)b \quad (13)$$

式中 b ——油菜种子平均粒径, 取 1.5 ~ 2.0 mm

d ——吸种孔底部直径, mm

按式(13)计算出吸种孔底部直径在 0.96 ~ 1.32 mm 之间, 取 1.0 mm。

滚轮上吸种孔排布数量与滚轮半径、滚轮转速有关, 过密的吸种孔排布会导致充种时间缩短, 造成漏播指数升高, 而过疏的吸种孔排布会使排种频率大幅减少, 大大降低了排种器作业效率。滚轮线速度计算式为

$$V_l = 2\pi nR_l \quad (14)$$

式中 V_l ——滚轮线速度, m/s

n ——滚轮转速, r/min

吸种孔排布数量与滚轮半径、种子播种株距和排种器前进速度关系为

$$Z = \frac{2 \times 10^3 \pi R_l V_m}{S V_l} \quad (15)$$

式中 Z ——吸种孔数量

V_m ——排种器前进速度, m/s

S ——种子播种株距, mm

根据油菜播种相关农艺要求, 油菜种子播种株距为 60 ~ 90 mm, 将滚轮半径、排种器前进速度、油菜种子播种株距代入, 综合油菜播量要求, 设定滚轮吸种孔数量为 30。

滚轮上吸种孔通过针管型通道与水平盲孔同气室相通。当吸种孔对应的水平盲孔与气室负压区域连通时为吸种孔提供吸种负压, 与气室正压区域连通时为吸种孔提供卸种正压。水平盲孔直径、针管型通道直径、吸种孔种子吸附面直径比 $2R_k : D_R : D_X$ 为 8.6 : 8 : 1.1, 满足水平盲孔直径大于吸种孔种子吸附面过流面积的要求^[24-25]。

3.2 充种室结构设计

3.2.1 充种室防拖带堆积机理

根据前述种群拖带分析可知, 充种室内排种滚轮附近的带动层种群会在排种滚轮摩擦力作用下产生扰动, 沿滚轮转动方向作爬升运动, 进而不断堆积, 直至种子越过滚轮的最高点, 从卸种口流出, 影响排种器的作业性能。现有的滚轮式与滚筒式排种器多采用种层调节板和清种刷等控制充种室的种层高度、强制清理拖带的种子, 以防止拖带影响排种性

能^[23-24]。机械式排种器依靠种子自重和排种元件的拖拽力充种,种子填充在种槽内,清种装置清除未进入种槽的种子,同时防止多余的种子跟随排种元件运动脱离充种区,但气力式排种器中使用清种装置易造成已吸附在排种元件上的种子脱落,对小粒径种子通过对吸种孔的结构设计可以精简针对多粒吸种清种装置,但根据种群拖带分析仍存在拖带堆积问题,因此需对充种室结构进行设计。

理想的充种室结构能保持排种滚轮对种群的扰动能力,使种群在种群间作用力、自身重力、滚轮扰动力等复合作用力下被吸种负压吸附在滚轮的锥形孔上,解决种群拖带问题,使排种器具有良好的充种性能,同时避免安装式种层控制装置,使排种器结构简单化。根据散粒体原理^[31]可知,充种室内排种滚轮附近的种群在受到滚轮摩擦力作用时会变得松散,带动层的种子沿滚轮旋转方向作爬升运动,后续种群在种群压力下迅速填补进入带动层,导致爬升的种子不能落回原位,形成堆积,需要设计合理的充种室结构,保证充种室内种群的扰动作用,使排种滚轮与种群稳定接触,同时保证被拖带种子有回落的空间,避免产生持续堆积进而影响排种效果,图 6a 为设计的防拖带堆积充种室结构,由种层控制块与充种室扩容板组成,种层控制块改变充种方向并降低种子仓内种群对充种室内种群的的压力,充种室扩容板则用于保证被拖带种子有回落的空间,种群在排种器内的堆积状态如图 6b 所示。

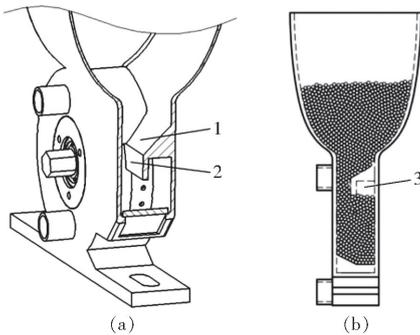


图 6 防拖带堆积充种室结构和充种效果图

Fig. 6 Schematics of seed filling chamber structure

1. 种层控制块 2. 充种室扩容板 3. 种子回落空间

根据“粮仓效应”,当粮仓内颗粒堆深度超过一定值后,底部压力将不随颗粒堆深度的变化而变化。将排种器的内部看作为粮仓,把种子仓与充种室看作两个独立部分,分别对有无设置防拖带堆积充种室结构的排种器内种群进行受力分析,如图 7 所示^[32]。

考虑防拖带堆积充种室结构并未改变充种室的容积,即充种室内部种群数量未发生改变,两种结构下充种室部分种群单位面积的垂直压力 P_h 、作用于

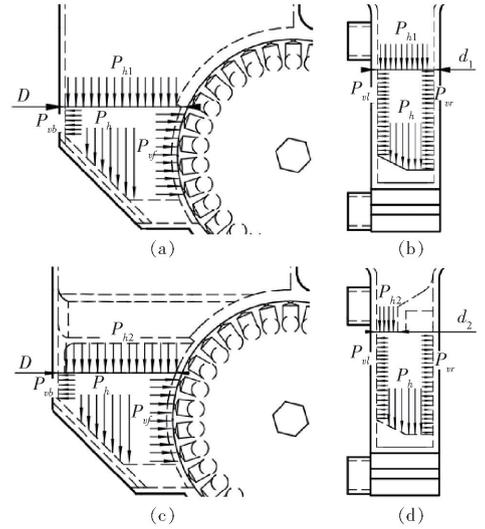


图 7 种群受力分析示意图

Fig. 7 Schematics of seed population force analysis

排种滚轮侧单位面积水平压力 P_v 一致;导致两种结构充种室内种群压力不同的主要原因是种仓部分种群引起。

图 7a、7b 为无防拖带堆积充种室结构时排种器内种群的受力情况,由散粒体力学特性可知,此时种仓内种群在自重作用下产生竖直向下压力 P_{h1} ,根据力的传递原理,在水平方向会形成一个垂直于排种滚轮侧压力 P_{v1} ,其中 P_{v1} 满足

$$P_{v1} = kP_{h1} \quad (16)$$

$$\text{其中} \quad k = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (17)$$

式中 k ——主动侧压力系数

φ ——种群内摩擦角, ($^\circ$)

此时排种滚轮侧单位面积水平总压力为

$$P_{vw} = P_{v1} + kP_{h1} \quad (18)$$

$$\text{其中} \quad P_{h1} = \frac{10^{-6} \rho r_1}{\mu g} (1 - e^{-\mu kh/r_1}) \quad (19)$$

$$r_1 = \frac{Dd_1}{2(D + d_1)} \quad (20)$$

式中 P_{vw} ——无防拖带堆积充种室结构时排种滚轮侧所受单位面积的水平总压力, N

ρ ——种群密度, kg/m^3

r_1 ——无防拖带堆积充种室结构时充种室顶部等效半径, mm

μ ——种子与种子仓壁之间摩擦系数

h ——充种室顶部至种仓顶部的垂直距离, mm

d_1 ——无防拖带堆积充种室结构时充种室顶端宽, mm

D ——充种室顶端长, mm

图 7c、7d 为有防拖带堆积充种室结构时排种器内种群的受力情况,在添加充种室结构后种群的填

充方向发生了改变,由竖直向下直接填充变为了侧向填充,充种室外的种群对充种室内种群力进行了二次传递^[33],此时在水平方向会形成一个垂直于排种滚轮侧的压力 P_{v2} ,满足

$$P_{v2} = \varepsilon k P_{h2} \quad (21)$$

式中 ε ——应力转向比

此时排种滚轮侧单位面积水平总压力为

$$P_{vy} = P_{v2} + \mu k P_{h2} \quad (22)$$

其中

$$P_{h2} = \frac{10^{-6} \rho r_2}{\mu g} (1 - e^{-\mu k h / r_2}) \quad (23)$$

$$r_2 = \frac{D d_2}{2(D + d_2)} \quad (24)$$

式中 P_{vy} ——有防拖带堆积充种室结构时排种滚轮侧所受单位面积的水平总压力,N

r_2 ——有防拖带堆积充种室结构时充种室顶部等效半径,mm

d_2 ——有防拖带堆积充种室结构时充种室顶端宽,mm

由式(16)~(24)及图7可知, $r_1 > r_2$,故 $P_{h1} > P_{h2}$,而 ε 小于1,所以可得 $P_{vy} < P_{vw}$ 。排种器种仓内的防拖带堆积充种室结构改变了充种区内种群的填充方向及受力,同时保证作爬升运动的种子有回落的空间。为验证充种室结构对排种滚轮扰种性能及种群拖带现象的影响,随机开展离散元仿真试验验证充种室结构的可行性。

3.2.2 仿真试验

3.2.2.1 模型建立

为提高仿真效率,将仿真模型简化,仅保留外壳体、排种滚轮、卸种插板等关键部件,将简化后模型文件导入 EDEM 2021 前处理模块中,在种仓上方建立颗粒工厂,使种子自由下落至排种器内。

根据测定的油菜种子三轴尺寸,确定油菜种子仿真模型三轴尺寸为 1.94 mm × 1.94 mm × 1.94 mm,种子模型尺寸呈正态分布,标准差为 0.05 mm。种子与种子、种子与排种器模型间采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,排种器模型材料为 ABS 工程塑料,仿真参数^[34-35]如表 1 所示。

在理论分析中可得,当 $\gamma = 0^\circ$ 时,种子会沿竖直方向轻微扰动后垂直落回,而在实际工作中种子以群体的形式进入排种器内,由于油菜颗粒具有散粒体特点,即使 $\gamma = 0^\circ$ 时仍可能出现拖带现象,故将排种器充种高度设为 30、40、50 mm 进行仿真试验,对应的充种区最高点与滚轮中心的垂直距离为 0、10、20 mm。

设定总仿真时间为 10 s,0 ~ 1 s 为种子生成阶段,在种仓上方生成油菜种子数量为 5×10^4 ,使种

表 1 仿真与接触参数

Tab. 1 Parameters of simulation and contact

项目	参数	数值
油菜种子	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1060
ABS 工程塑料	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1060
种子-种子	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.01
种子-ABS 工程塑料	恢复系数	0.75
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01

子自由下落至排种器内部。1 s 后滚轮开始转动,设置滚轮转速为 30 r/min,仿真完成后应用 EDEM 后处理模块提取仿真数据进行分析,试验重复 3 次。

为验证有无防拖带堆积充种室结构对排种器充种性能的影响及种群拖带问题的影响,在排种器内建立不同的选区,在滚轮未开始旋转时对比有无防拖带堆积充种室结构时的充种区种群受力情况,提取种群填充稳定后任意时刻选区内种子的受力数据进行对比;提取 1 ~ 10 s 所建立的对选区内油菜种子种群平均动能均值与种群势能最大值;种群平均动能均值反映排种滚轮对种群的扰动能力,用于衡量充种区内种群的运动状态;种群势能最大值反映种子颗粒在选区内的相对位置关系,用于衡量种群拖带现象。

3.2.2.2 仿真结果与分析

(1) 种群高度对种群运动的影响

种群离散程度越高,其平均动能越大,选择充种室内所建立选区内的种群平均动能作为衡量滚轮对种群扰动能力的评价指标。在仿真模型没有设置防拖带堆积充种室的条件下,分别截取充种种层高度为 30、40、50 mm 3 种条件下所建立选区内的种群运动动能分布图,如图 8 所示。

在种群进入充种区域后,位于滚轮表面的种子在摩擦力作用下受到扰动作用,通过 EDEM 后处理模块提取 1 ~ 10 s 所建立选区内油菜种子种群平均动能均值,得到不同充种高度时种群平均动能随时间的变化曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,在无防拖带堆积充种室结构条件下,充种种层高度不同会影响滚轮对种群的扰动作用,种层高度越大,种群平均动能越大,表示滚轮对种群的扰动性越好。

在种群进入充种区域后,位于滚轮表面的种子在摩擦力作用下受到扰动作用,建立如图 10 所示的

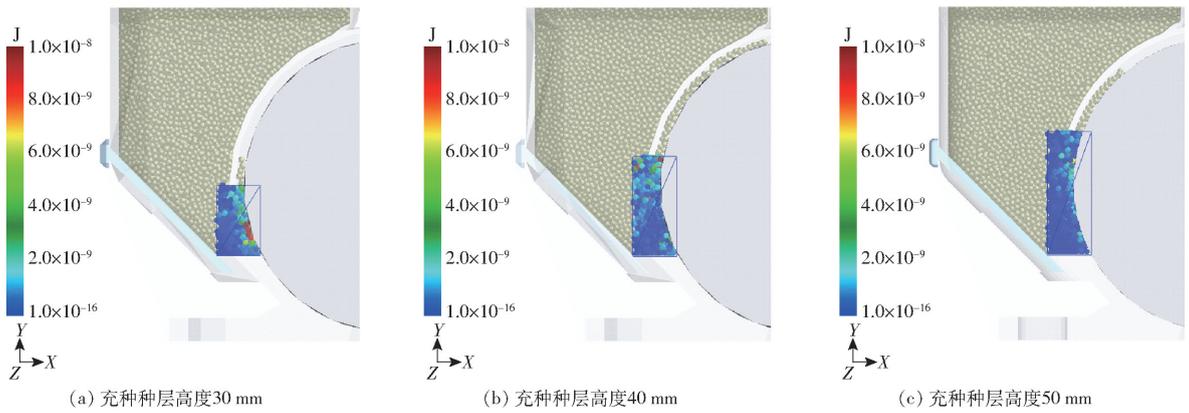


图8 不同充种种层高度时种群动能分布

Fig. 8 Diagrams of seed population kinetic energy distribution under different seed layer heights

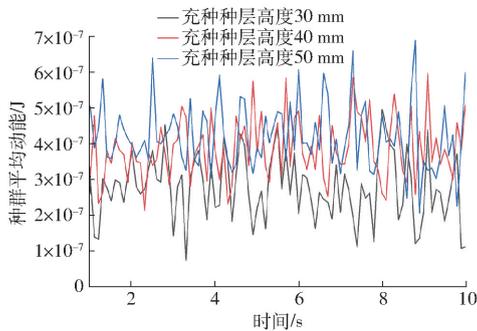


图9 不同充种种层高度时种群平均动能对比

Fig. 9 Comparison of seed population average kinetic energy under different seed layer heights

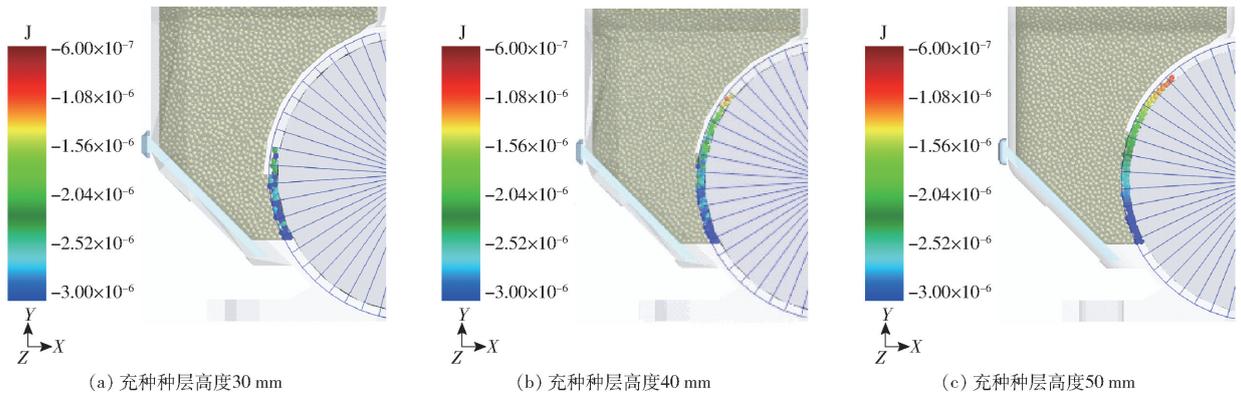


图10 不同充种种层高度时种群势能分布

Fig. 10 Diagrams of seed population potential energy distribution under different seed layer heights

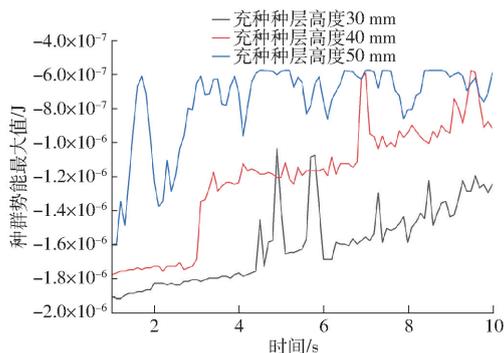


图11 不同充种种层高度时种群势能最大值变化曲线

Fig. 11 Diagrams of variation of maximum value of seed population potential energy under different seed layer heights

选区,通过 EDEM 后处理模块提取 1 ~ 10 s 选区内油菜种子种群势能最大值得到如图 11 所示的不同充种高度时选区内种群势能最大值随时间的变化曲线。由图 11 可知,随着时间的推移,不同充种高度下所建立选区内的种群势能最大值均为增大趋势,存在峰值,表示此时种子颗粒已越过滚轮最高点。由此可见,不同充种种层高度下的种群均会在排种滚轮的摩擦力作用下不断产生拖带并堆积进入携种区内,与种群拖带分析一致,且种层高度越大拖带现象越显著,在种层高度为 50 mm 条件下,仅在仿真试验的 1 ~ 2 s 内便出现了种子颗粒越过排种滚轮

最高点的现象。

(2) 充种室结构对充种区种群受力的影响

综合前文仿真试验的种群平均动能及种群势能最大值变化结果,将防拖带堆积充种室结构的内部高度设置为 50 mm,并进行后续仿真试验验证防拖带堆积充种室结构的合理性与可行性。种群在仿真时间 0 ~ 1 s 内在仿真模型中填充完毕,此时滚轮未开始旋转,种群还未受到滚轮的扰动作用,如图 12 所示,将所建立选区范围调整至充种室范围,应用 EDEM 后处理模块提取选区内种群填充稳定后的受力状态。

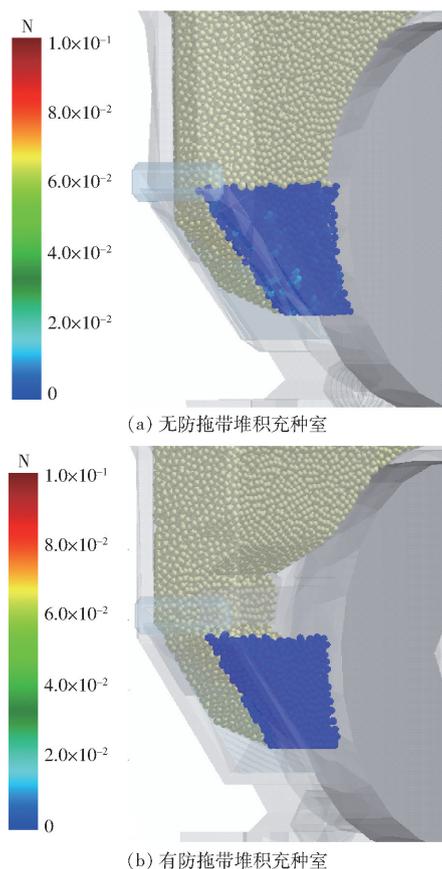


图 12 有无防拖带堆积充种室结构的种群受力分布

Fig. 12 Diagrams of seed population force distribution with and without seed-filled chamber structures

提取在充种种层高度 50 mm 条件下所建立选区内种群在不同方向上的受力,在充种种层高度相等的条件下,设置防拖带堆积充种室后选区内种群竖直方向受力为 3.7×10^{-3} N,未设置防拖带堆积充种室时选取内种群竖直方向受力为 1.28×10^{-2} N;设置防拖带堆积充种室后选区内种群水平方向(朝向排种滚轮)受力为 3.64×10^{-4} N,未设置防拖带堆积充种室时选取内种群水平方向(朝向排种滚轮)受力为 1.39×10^{-2} N。

防拖带堆积充种室结构改变了排种器内种群的填充方向与堆积状态,在竖直方向与水平方向(朝向排种滚轮)上均大大降低了种群受力,与前文中充种室防拖带堆积机理分析一致。

(3) 充种室结构对种群运动的影响

由于种群在排种滚轮摩擦力的作用下逐渐填充进入携种区,后部种群迅速补充至滚轮表面附近,导致种子没有回落空间,产生了与理论分析中一致的种群拖带现象,影响后续的作业过程,降低了排种器作业性能,故对设置充种室结构的仿真模型进行仿真试验,通过 EDEM 后处理模块提取 1~10 s 所建立选区内种群平均动能均值,并与未设置防拖带堆积充种室的仿真试验结果进行对比。

图 13 为设置防拖带堆积充种室结构的仿真模型内种群平均动能分布及变化曲线,在仿真模型设置防拖带堆积充种室结构后,排种滚轮对种群仍有较强的扰动作用。

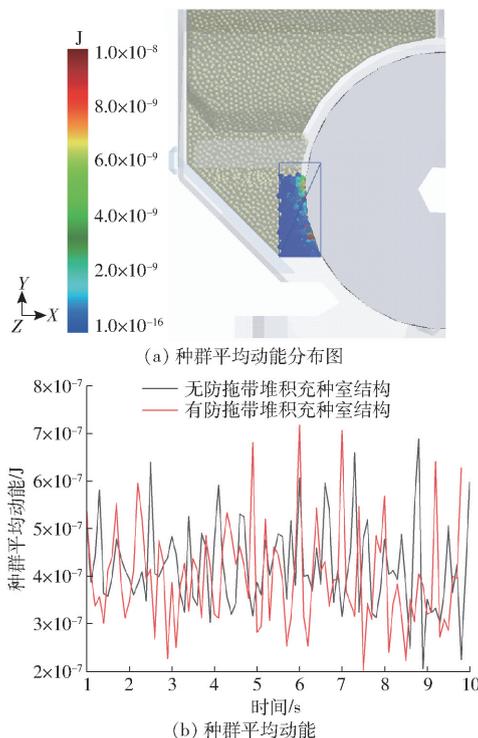


图 13 设置防拖带堆积充种室后的种群平均动能

Fig. 13 Seed population mean kinetic energy with addition of seed-filled chamber

将设置防拖带堆积充种室后所建立选区内种群的势能最大值变化曲线与未设置充种室时的结果进行对比,如图 14 所示。可以看出在排种器内设置防拖带堆积充种室后种群在排种滚轮的扰动下不再堆积进入携种区,种群势能最大值较稳定,排种器内的种群不再出现拖带问题。根据理论分析与仿真试验验证,证明了防拖带堆积充种室结构的合理性与可行性,既能保持对种群的扰动作用,同时在不需强制清种或设置辅助清种装置条件下解决了种群拖带问题。

4 排种性能试验

4.1 台架试验材料与方法

试验材料选用华油杂 62 油菜种子,种子含水率为 8%,千粒质量为 4.64 g。主要试验装置有:正负气压组合滚轮式精密排种器、86 步进电机、JPS-12 型排种器性能检测试验台,试验装置如图 15 所示。

由排种预试验可知,卸种正压为 0.1~0.5 kPa 时对排种器性能影响较小,合格指数变化量在 1% 以内,根据前期研究^[27]综合考虑确定卸种正压为

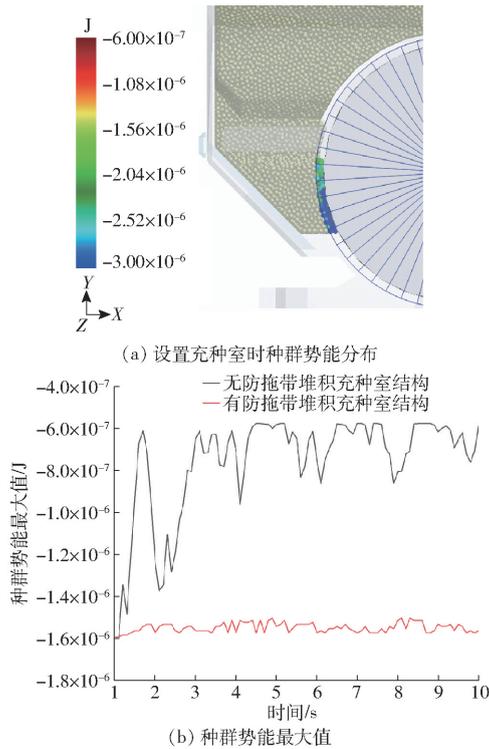


图 14 设置防拖带堆积充种室后种群势能最大值
Fig. 14 Maximum potential energy of seed populations with addition of seed-filling chamber

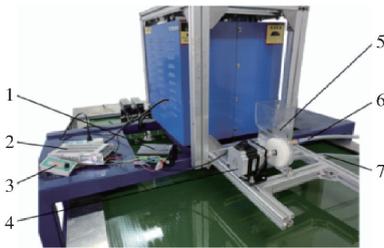


图 15 排种性能试验装置

Fig. 15 Experiment device of seeding performance

1. 驱动器 2. 开关电源 3. 脉冲发生器 4. 电机 5. 排种器
6. 负压气管 7. 正压气管

0.3 kPa,且排种过程中种子未出现破损情况,故选择滚轮转速与吸种负压作为试验因素,进行两因素全因子试验,滚轮转速为 15 ~ 35 r/min 设一个水平,吸种负压为 0.6 ~ 1.4 kPa,每隔 0.2 kPa 设一个水平;根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》选择排种合格指数 Y_1 、重播指数 Y_2 、漏播指数 Y_3 为试验评价指标,每组试验重复 5 次,取平均值为试验结果,每组试验统计排种器稳定工作状态连续排出的 251 粒种子。

4.2 台架试验结果与分析

根据全因子试验方案,共开展 25 组试验,试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,合格指数均不小于 82.96%,表明排种器在试验过程中作业性能稳定,未出现前文中所述的种群拖带堆积现象,验证了仿真试验的结论。

表 2 试验结果

Tab. 2 Test result

因素		合格指数	重播指数	漏播指数
滚轮转速 X_1 / ($r \cdot \min^{-1}$)	吸种负压 X_2 /kPa	Y_1 /%	Y_2 /%	Y_3 /%
15	0.6	86.93	3.27	9.82
	0.8	90.95	2.37	6.69
	1.0	92.28	2.49	5.27
	1.2	93.00	2.48	3.90
	1.4	90.07	4.11	5.82
20	0.6	85.73	2.74	9.88
	0.8	89.00	2.55	8.45
	1.0	90.45	4.25	5.31
	1.2	91.59	3.60	4.81
	1.4	89.66	5.26	5.08
25	0.6	84.47	4.97	10.56
	0.8	86.80	4.48	8.72
	1.0	90.16	4.75	5.09
	1.2	90.25	5.06	5.71
	1.4	89.25	6.23	4.51
30	0.6	83.68	4.58	11.74
	0.8	85.37	5.81	8.82
	1.0	91.47	4.57	4.65
	1.2	90.99	5.21	3.79
	1.4	90.31	6.53	3.16
35	0.6	82.96	4.48	12.56
	0.8	86.17	6.68	7.15
	1.0	87.05	6.50	6.45
	1.2	87.80	8.53	4.98
	1.4	85.75	9.72	4.53

运用数据处理软件 Design-Expert 8.0.6.1 对试验数据进行多元回归拟合,对试验结果进行回归分析,建立合格指数、重播指数和漏播指数与滚轮转速、吸种负压之间的回归方程,并对试验结果和回归方程进行方差分析,结果如表 3 所示。

通过对试验数据的分析,多元回归拟合得到各因素影响合格指数 Y_1 的回归模型为

$$Y_1 = 69.26139 - 0.14863X_1 + 45.0405X_2 + 0.0619X_1X_2 - 0.00239429X_1^2 - 20.4X_2^2 \quad (25)$$

由表 3 可得,该模型拟合度极显著 ($P < 0.01$)。滚轮转速 X_1 、吸种负压 X_2 、吸种负压的二次方项 X_2^2 的 P 均小于 0.01,说明以上各项对合格指数影响极显著;其余项对合格指数影响不显著。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 69.26139 - 0.14863X_1 + 45.0405X_2 - 20.4X_2^2 \quad (26)$$

通过对表 3 中 F 值检验,得到影响合格指数因素主次顺序为:吸种负压、滚轮转速。

通过对试验数据的分析,多元回归拟合得到各

表3 回归方程方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

方差来源	合格指数 Y_1				重播指数 Y_2				漏播指数 Y_3			
	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	167.52	5	26.88	<0.000 1**	71.28	5	25.71	<0.000 1**	154.71	5	50.23	<0.000 1**
X_1	53.27	1	42.74	<0.000 1**	51.37	1	92.63	<0.000 1**	0.97	1	1.58	0.224 4
X_2	67.00	1	53.76	<0.000 1**	14.16	1	25.54	<0.000 1**	126.60	1	205.52	<0.000 1**
X_1X_2	0.38	1	0.31	0.585 7	3.35	1	6.03	0.023 8*	5.68	1	9.22	0.006 8**
X_1^2	0.25	1	0.20	0.658 8	0.38	1	0.69	0.416 1	0.004 013	1	0.006 515	0.936 5
X_2^2	46.61	1	37.40	<0.000 1**	2.02	1	3.64	0.071 6	21.46	1	34.84	<0.000 1**
残差	23.68	19			10.54	19			11.7	19		
总和	191.2	24			81.82	24			166.42	24		

注: *表示显著(0.01 ≤ P < 0.05); **表示极显著(P < 0.01)。

因素影响重播指数 Y_2 的回归模型为

$$Y_2 = 7.301 01 - 0.128 18X_1 - 10.404 36X_2 + 0.182 9X_1X_2 + 0.002 96X_1^2 + 4.246 43X_2^2 \quad (27)$$

由表3可得,该模型拟合度极显著(P < 0.01)。滚轮转速 X_1 、吸种负压 X_2 的 P 小于 0.01,说明该项对重播指数影响极显著; X_1X_2 的 P 小于 0.05,说明该项对重播指数影响显著;其余各项对重播指数影响不显著。剔除不显著因素后回归模型为

$$Y_2 = 7.301 01 - 0.128 18X_1 - 10.404 36X_2 + 0.182 9X_1X_2 \quad (28)$$

通过表3中 F 值,得到影响重播指数因素主次顺序为:滚轮转速、吸种负压。

通过对试验数据的分析,多元回归拟合得到各因素影响漏播指数 Y_3 回归模型为

$$Y_3 = 20.560 79 + 0.281 32X_1 - 29.684 21X_2 - 0.238 3X_1X_2 - 0.000 302 857X_1^2 + 13.842 86X_2^2 \quad (29)$$

由表3可得,该模型拟合度极显著(P < 0.01)。吸种负压 X_2 、吸种负压的二次方项 X_2^2 、 X_1X_2 的 P 均小于 0.01,说明以上各项对漏播指数影响极显著;其余项对漏播指数影响不显著。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3 = 20.560 79 + 0.281 32X_1 - 29.684 21X_2 - 0.238 3X_1X_2 + 13.842 86X_2^2 \quad (30)$$

通过对表3中 F 值检验,得到影响漏播指数因素主次顺序为:吸种负压、滚轮转速。

通过 Design-Expert 8.0.6.1 对试验数据进行分析处理,可得到滚轮转速 X_1 、吸种负压 X_2 对合格指数、重播指数、漏播指数的影响,响应曲面如图 16 所示。

由图 16 可得,当卸种正压为 0.3 kPa 时,吸种负压一定时,随着滚轮转速的增大,合格指数先上升后下降,重播指数先下降后上升,漏播指数先下降后上升;滚轮转速一定时,随着吸种负压增大,合格指

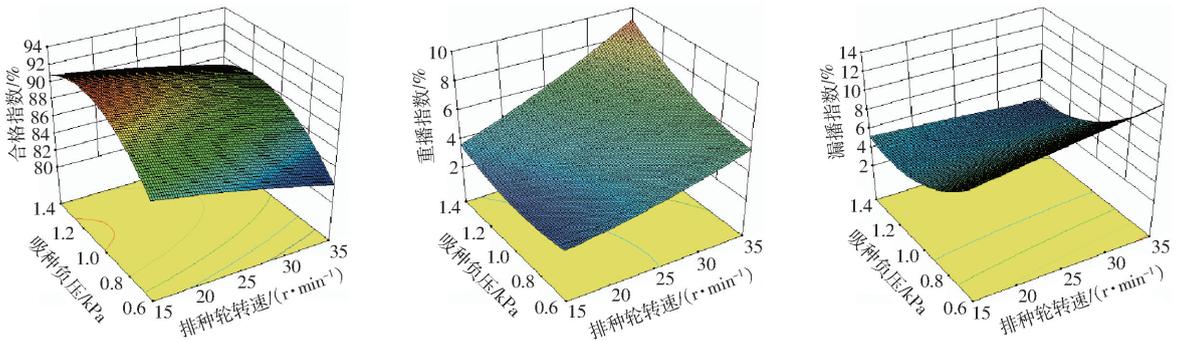


图 16 试验结果响应曲面图

Fig. 16 Response surface diagrams of test results

数上升,重播指数上升,漏播指数下降。综合考虑各项评价指标以及实际应用中的需求,当排种转速为 15 ~ 30 r/min、吸种负压为 1.0 ~ 1.2 kPa 时,排种器合格指数均保持在 90% 以上,满足精密播种要求。

4.3 排种性能验证田间试验

为进一步验证排种试验结果,将正负气压组合

滚轮式精密排种器搭载至自主研发的旋耕起垄播种机上开展田间试验。

于 2023 年 9 月 29 日在湖北省天门市多宝镇开展田间试验,播种对象为油菜“华油杂 62”,如图 17 所示。试验配套动力为雷沃 804 型拖拉机,设置排种器转速为 20 r/min、吸种负压为 1.0 kPa,卸种正



(a) 试验现场

(b) 出苗效果

图 17 田间播种试验

Fig. 17 Field seeding experiment

压为 0.3 kPa, 播种粒距为 75 mm, 对应试验机组前进速度为 2.6 km/h, 调节播种单体开沟深度为 10 mm, 并调整镇压轮镇压力度。播种行数为 6, 播种行距为 250 mm。所采用播种机为自主研发的旋耕起垄播种机; 整机幅宽为 1.7 m, 有效垄面宽 1.45 m, 播种部件采用单体形式, 排种单体为平行四杆机构, 具有仿形功能, 每个单体上均设有滑刀式开沟器与镇压轮, 播种行距可调, 播种深度可调范围为 0~50 mm。

播种 20 d 后, 参考 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》, 随机选取 5 段 1 m 长的作业区域测定种子出苗情况, 测定平均株距为 79.1 mm, 株距稳定性变异系数为 4.4%, 各行苗数一致性变异系数为 8.14%, 满足精密播种要求。

5 结论

(1) 针对油菜种子粒径小、质量轻, 单粒排种难

度较大的问题, 设计了一种正负气压组合滚轮式精密排种器, 阐明了排种器工作原理, 构建了吸种、携种、卸种 3 个阶段中种子力学模型; 针对种群拖带现象进行了理论分析, 阐明了种群拖带机理, 设计了防拖带堆积充种室结构。

(2) 应用 EDEM 软件构建仿真几何模型, 对比了排种器在无防拖带堆积充种室时充种区域高度对种群扰动作用及种群拖带现象的影响, 对比了有无防拖带堆积充种室结构充种室内种群受力情况, 对比了排种器在设置防拖带堆积充种室前后对种群拖带现象的影响, 结果表明无防拖带堆积充种室时充种高度越高, 滚轮对种群扰动越大, 拖带现象越显著, 设置防拖带堆积充种室结构降低了充种区种群各个方向上的受力, 保证了对种群的扰动作用的同时有效解决种群拖带堆积问题, 验证了防拖带堆积充种室结构的可行性。

(3) 利用 JPS-12 型排种器性能检测试验台进行排种器性能试验, 得出影响排种器合格指数、重播指数与漏播指数的因素主次顺序为吸种负压、滚轮转速。利用 Design-Expert 8.0.6.1 软件对试验结果进行分析与优化处理, 当排种转速为 15~30 r/min、吸种负压为 1.0~1.2 kPa 时, 排种器合格指数均保持在 90% 以上。以自主研发的旋耕起垄播种机为载体开展田间试验, 结果表明, 测定平均株距为 79.1 mm, 株距稳定性变异系数为 4.4%, 各行苗数一致性变异系数为 8.14%, 满足精密播种要求。

参 考 文 献

- [1] 王汉中, 殷艳. 我国油料产业形势分析与对策建议[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 414-421.
WANG Hanzhong, YIN Yan. Analysis and strategy for oil crop industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(3): 414-421. (in Chinese)
- [2] 万星宇, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 24-44.
WANG Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24-44. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- [5] 赵月霞. 机械式精密排种器关键技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
ZHAO Yuexia. Study on key technology of mechanical precision metering device[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [6] 袁文胜, 吴崇友, 金诚谦. 异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 72-75.
YUAN Wensheng, WU Chongyou, JIN Chengqian. Design and experiment on seed-metering device with special cells for cole seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 72-75. (in Chinese)

- [7] 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)
- [8] 赖庆辉,曹秀龙,于庆旭,等.三七压穴精密排种装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(1):85-95.
LAI Qinghui, CAO Xiulong, YU Qingxu, et al. Design and experiment of precision seeding device for hole-drop planter for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 85-95. (in Chinese)
- [9] 丁力,豆宇飞,王万章,等.组合孔内充式油莎豆排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(12):100-115.
DING Li, DOU Yufei, WANG Wanzhang, et al. Design and experiment of seed metering device with combination hole and inner filling for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 100-115. (in Chinese)
- [10] SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting of groundnut (*Arachis hypogaea*) seeds[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2007, 77(1): 40-42.
- [11] 王业成,靳亚东,罗嗣博,等.集排式大豆精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(6):112-118.
WANG Yecheng, JIN Yadong, LUO Sibao, et al. Design and experiment of centralised precision soybean seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 112-118. (in Chinese)
- [12] PRASANAKV, SRVASTAVAB, NAGESH D S, et al. Modeling and optimization of parameters of low rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(1): 26-35.
- [13] YAZGI A, DEGIRMENCIOLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56(10): 128-135.
- [14] GAIKWAD B B, SIROHIN P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems:Engineering, 2008, 99(4): 322-329.
- [15] 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)
- [16] 周军平,刘立晶,刘忠军,等.精密播种机株距均匀性影响因素分析[J].农机化研究,2014,36(7):49-53.
ZHOU Junping, LIU Lijing, LIU Zhongjun, et al. Influence factors analysis of the plants distance uniformity of precision planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 49-53. (in Chinese)
- [17] 刘海,廖宜涛,王磊,等.小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):54-65.
LIU Hai, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for pakchoi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 54-65. (in Chinese)
- [18] 廖宜涛,孙迈,廖庆喜,等.油菜精量播种导种环节种子流有序性分析[J].农业工程学报,2023,39(23):23-35.
LIAO Yitao, SUN Mai, LIAO Qingxi, et al. Ordering of seed flow in seed guiding of precision sowing for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23): 23-35. (in Chinese)
- [19] 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. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11-19. (in Chinese)
- [20] 李明,刘晓辉,廖宜涛,等.气力滚筒式油菜精量集排器[J].农业机械学报,2013,44(12):68-73.
LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68-73. (in Chinese)
- [21] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 58-67. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 杜俊,夏俊芳,张居敏,等.稻麦兼用型气力滚筒式精量排种器设计与试验[J].华中农业大学学报,2020,39(3):127-134.
DU Jun, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of pneumatic drum type metering device for rice and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 127-134. (in Chinese)
- [24] 廖宜涛,郑娟,廖庆喜,等.正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):46-57.
LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46-57. (in Chinese)
- [25] 廖宜涛,张百祥,郑娟,等.气力针式行星轮系窄行密植精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(11):86-99.

- LIAO Yitao, ZHANG Baixiang, ZHENG Juan, et al. Design and experiment of pneumatic needle planetary gear narrow-row close planting precision seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 86–99. (in Chinese)
- [26] 高丽萍, 施彬彬, 廖庆喜, 等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 22–33. GAO Liping, SHI Binbin, LIAO Qingxi, et al. Seeding performance of conical-hole seeding plate of the positive and negative pressure combination precision seed metering device for rapeseed [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 22–33. (in Chinese)
- [27] 廖宜涛, 廖庆喜, 王磊, 等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 10–17. LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10–17. (in Chinese)
- [28] 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] // 北京: 中国农业工程学会, 2006.
- [29] 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)
- [30] ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and indoor simulated experiment of pneumatic rice seed metering device [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 10–18.
- [31] 马继军, 朱红. 散粒体流体力学与农业工程 [J]. 山东工程学院学报, 1997(3): 61–63. MA Jijun, ZHU Hong. Bulk flow dynamics and agricultural engineering [J]. Journal of Shandong Engineering Institute, 1997(3): 61–63. (in Chinese)
- [32] 王录民. 浅圆仓粮食侧压力理论分析与实测研究 [D]. 上海: 同济大学, 2003. WANG Lumin. Theoretical analysis and empirical research on the lateral pressure of grain in shallow round silo [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [33] 王璐珠. 粮仓应力转向比和稳定性行为研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012. WANG Luzhu. A study of stress steering ratio and stability behavior of grain silos [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [34] 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)
- [35] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68–79, 97. WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68–79, 97. (in Chinese)