doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.02.007

玉米大豆兼用腔盘组合孔式排种盘设计与充种性能试验

任定林[1]　刘　涛[1]　夏守浩[1]　陈永新[1,2]　王韦韦[1,2]　李兆东[1,2]
(1.安徽农业大学工学院,合肥 230036;2.安徽省智能农机装备工程研究中心,合肥 230036)

摘要:针对玉米大豆带状复合种植条件下传统机械式排种器不易实现二者兼用精量排种要求、现有气力式排种器排种速度提高因型孔漏充存在漏播断条等问题,设计了一种具有腔盘组合孔结构的排种盘,分析确定了排种盘关键结构参数,构建了吸附过程和吸运过程力学模型。应用 EDEM 离散元仿真与台架试验相结合的方法进行了排种盘型式优选试验,结果得出:腔盘组合孔式排种盘具有提高充种室种群定向运移平均速度和增大拖拽充种角的作用,有效抑制了型孔漏充率。以安装优选种盘的玉豆兼用排种器为对象,以机组前进速度和工作负压为试验因素,以漏充率和充种合格率为试验指标,采用二因素全因子试验设计开展了充种性能试验,结果表明:当机组前进速度为 4.0~7.0 km/h、工作负压在 3.0~4.0 kPa 时,玉米和大豆种子漏充率均小于 3.6%、充种合格率均不小于 96%。田间验证试验表明,在机组前进速度为 4.0~7.0 km/h、工作负压为 3.0~4.0 kPa 条件下,腔盘组合孔式排种盘的排种器播种玉米和大豆漏充率分别不大于 3.8%、4.2%;当工作负压为 3.0 kPa、机组前进速度为 7.0 km/h 时,自扰动腔盘组合孔式排种盘相比无扰动平面排种盘,播种玉米和大豆漏充率分别下降 14.8、12.6 个百分点。

关键词:玉米大豆兼用;腔盘组合孔;气力盘式排种器;充种性能
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)02-0073-17　　**OSID**:

Design and Seed Filling Performance Test of Cavity Plate Combination Hole Type Seeding Plate for Corn and Soybean

REN Dinglin[1]　LIU Tao[1]　XIA Shouhao[1]　CHEN Yongxin[1,2]　WANG Weiwei[1,2]　LI Zhaodong[1,2]
(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Province Engineering Research Center of Intelligent Agricultural Machinery*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: For corn and soybean belt compound planting conditions under the traditional mechanical seed metering device is not easy to realize both precision seed discharge requirements, the existing pneumatic seed metering device seed discharge speed due to leakage of holes leakage charging exists leakage sowing broken stripes and other issues, a cavity plate combined hole structure of the seeding plate was designed and analyzed to determine the key structural parameters of the seeding plate, and the adsorption process and suction and transportation process mechanics model was constructed. EDEM discrete element simulation and bench test were combined to carry out the seeding plate type selection test, and the results concluded that the cavity plate combined hole seeding plate had the effect of improving the average speed of directional transport of seed populations in the seed filling chamber and increasing the dragging angle of seed filling, which effectively suppressed the leakage rate of the hole. With the installation of the preferred seed plate of the jade and soybean hybrid seed metering device as the object, with the unit forward speed and negative pressure as the test factors, with the leakage rate and the seed filling rate as the test indexes, the two-factor full factorial experimental design was done to carry out the seed filling performance test, and the results showed that when the unit forward speed was 4.0~7.0 km/h, the work of the negative pressure was 3.0~4.0 kPa, the leakage rate of maize and soybean seeds was less than 3.6%, and the qualified rate of seed filling was not less than 96%. Field verification test showed that under the conditions of unit forward speed of 4.0~7.0 km/h and working negative pressure of 3.0~4.0 kPa, the leakage rate of corn and soybean seeds sown by the seed metering device of cavity plate

收稿日期:2023-11-10　修回日期:2023-12-08
基金项目:国家自然科学基金项目(52275229)和安徽省自然科学基金项目(1908085MC91)
作者简介:任定林(1999—),男,硕士生,主要从事机械化种植关键技术及装备研究,E-mail:3256075405@qq.com
通信作者:李兆东(1987—),男,副教授,主要从事现代农业精准种植关键技术研究,E-mail:Lizd@ahau.edu.cn

combination hole-type seed metering device was no more than 3.8% and 4.2%, respectively. When the working negative pressure was 3.0 kPa and the forward speed of the unit was 7.0 km/h, the leakage rate of sowing corn and soybeans was decreased by 14.8 and 12.6 percentage points, respectively, compared with that of the undisturbed flat seeding plate with the combination of holes in the self-disturbing cavity plate.

Key words: corn-soybean concurrent use; cavity plate combination holes; pneumatic plate seed metering device; seed filling performance

0 引言

玉米和大豆是中国重要的粮油饲兼用作物,而两作物争地矛盾是长期困扰粮食安全的一大难题[1]。玉米大豆带状复合种植模式充分利用高位作物玉米边行优势,扩大低位作物大豆种植空间,实现二者协同共生[2]。玉米大豆带状复合播种技术具有省工时、节本增效、稳产高产等优点,当前玉米大豆复合播种机械化程度较低,为提高玉米大豆一机多用的机械化播种水平,亟需研究一款玉米大豆兼用型排种器,以期实现玉米大豆在复合播种作业下均达到精量播种,降低播种成本,提高播种效率。

排种器是实施玉米大豆带状复合播种的核心装置,其中气力式排种器对种子形状适用性广、伤种率低、排种精度高、满足高速排种作业,已得到广泛应用[3-7]。为提高气力式排种器工作性能,国内外学者进行了相关研究。DU 等[8]为提高玉米充种性能,设计了一种利用内置辅助气压的排种装置,通过单粒充种时种子与型孔壁面互作改变种子充填姿态,减少了排种器漏吸率。YAZGI 等[9]进行了气吸式玉米排种器转速和种盘型孔数目对排种性能影响研究,优化了关键参数。为解决玉米高速精量排种器排种性能差的问题,丁力等[10]设计了一种具有辅助充种结构的排种盘,借助 EDEM 仿真分析和力学模型进行相关优化研究。为解决内充气吹式排种器对圆形种子播种效果差的问题,韩丹丹等[11]采用 DEM-CFD 耦合方法优化设计了内吹式排种器,进一步提升了排种器对圆形种子的适应性。德国 Horsch 公司研发的 Maestro 气吸式排种器[12],采用渐开线型的型孔设计并在型孔边缘开倒角,有利于对种子的吸附,作业速度可达 15 km/h。陈玉龙等[13]针对气吸式排种器播种扁平形状玉米种子时存在充种性能不稳定且排种效果不佳的问题,设计了一种具有倾斜凸台式取种结构的排种盘。高筱钧等[14]为满足玉米精量排种器的工作要求,借助型孔辅助件和护种板结构,解决了高速排种引起的充种困难和结构复杂的问题。赵佳乐等[15]设计了一种偏置双盘气吸式大豆精量排种器,有效抑制了高速播种作业下大豆漏播率高的难题。李玉环等[16]为解决豆类作物窄行密值种植模式下高速精量播种问题,设计了一种“一器双行”气吸式高速精量排种器,该排种器采用单流道单体式排种盘实现双行豆类作物的播种作业。上述研究表明,通过对气力式排种器结构改进与优化,可有效提高其充种性能,为改善玉米或大豆单一作物种子排种性能提出了可行方案,但玉米大豆兼用播种作业速度提高,因充种时间短存在漏充率偏高,排种性能下降仍是需要解决的难题。

本文以气力盘式玉米大豆兼用精量排种器为对象,采用自扰动与气吸组合技术,设计一种具有腔盘组合孔的排种盘,应用质点动力学理论、离散元数值模拟和高速摄像相结合的方法,开展排种盘与种群互作数值模拟和排种盘充种性能试验,并进行田间试验验证,旨在提升玉米大豆兼用排种器充种性能,为研制玉米大豆带状复合种植专业播种机提供参考。

1 玉米大豆带状复合种植农艺模式和排种器结构及工作原理

1.1 玉米大豆带状复合播种模式

玉米大豆带状复合种植采用窄行密植的播种模式,该播种模式下可充分利用土地资源。根据江淮地区制定的玉米大豆带状复合种植技术方案,主要有四行玉米+六行大豆、二行玉米+四行大豆 2 种农艺种植模式,实际执行二行玉米+四行大豆种植模式居多。玉米行距从传统种植模式下的 60 cm 改为 40 cm、株距从传统模式下的 25 cm 变成 12 cm,大豆行距从传统模式下的 50 cm 变为 30 cm,株距从传统模式下的 20 cm 变为 10 cm,如图 1 所示。

1.2 排种器结构及工作原理

气力腔盘组合式排种器主要由排种盘、气室腔体、左/右种室、左/右落种管、排种轴、种箱等部件组成,如图 2 所示。该排种器采用负压吸种与正压吹种组合式排种原理,气室腔体由隔板分成负压气室和正压气室,其左、右侧可安装 2 个排种盘同时进行排种作业。排种盘是排种器的核心工作部件,沿轴向开有自扰种凹槽,排种盘与吸室腔体的内壁台阶精密贴合后自然形成腔盘组合型孔,整个排种盘可

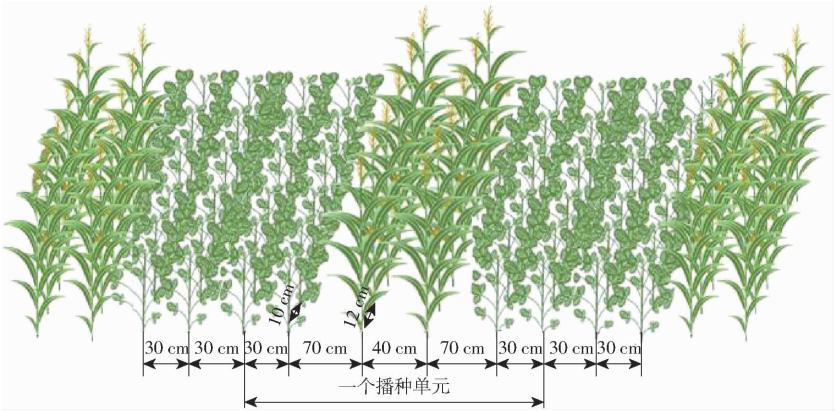


图 1　玉米大豆复合种植农艺图

Fig. 1　Agronomic map of corn and soybean composite planting

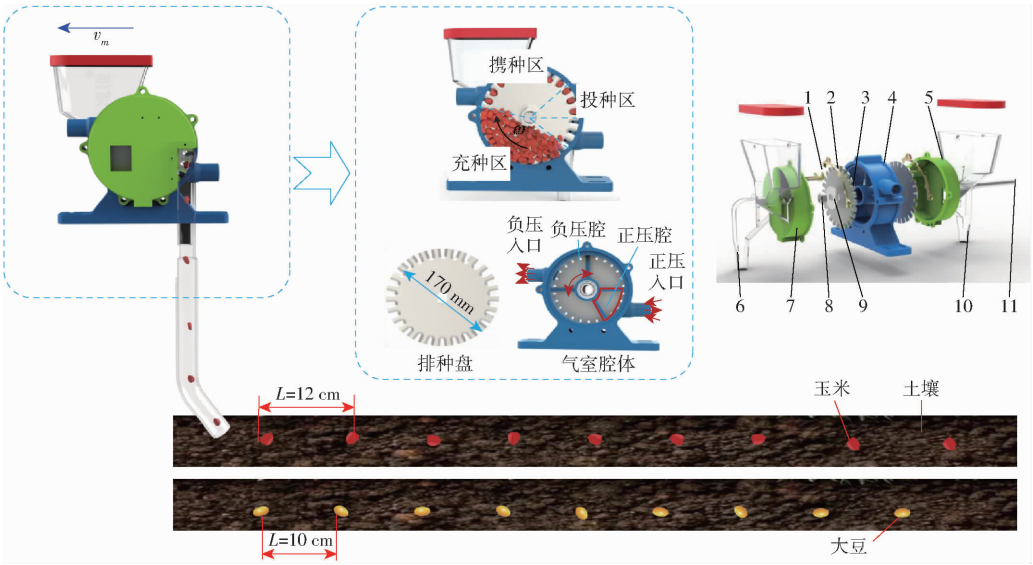


图 2　总体结构及工作原理图

Fig. 2　Overall structure and working principle

1. 下清种刀　2. 上清种刀　3. 排种盘　4. 气室腔体　5. 右种室　6. 左落种管　7. 左种室　8. 固定螺母　9. 放松装置　10. 右落种管　11. 排种轴

分为充种区、携种区、投种区 3 个区域。排种器工作时，种箱内种子在重力作用进入充种区，利用风机产生的负压吸力经腔盘组合型孔将种子吸附在种盘上，吸附在排种盘上的种子随排种盘同步转动经过携种区运送至正压投种区，在投种区型孔的负压吸种转为正压吹种，此时种子受到正压吹力和重力作用下离开型孔进入落种管，实现种子定量拾取，完成一个排种过程。

2　排种盘结构参数设计与充种性能机理分析

2.1　排种盘型孔数与排种盘直径确定

排种盘是实现玉米大豆兼用排种的关键部件，排种盘型孔数、机组前进速度和排种盘转速直接影响玉米和大豆的播种穴距。根据玉米大豆带状复合种植模式农艺要求，大豆播种穴距为 100 mm 为宜，玉米播种穴距为 120 mm 为宜，行走地轮滑移率为 10%，理论设计排种盘转速小于等于 50 r/min，机组前进速度 v_m 小于等于 7 km/h，根据文献[17]可得型孔数为

$$Z=\frac{\pi D_p v_m}{s v_p(1-\delta)} \tag{1}$$

式中　Z——型孔数

D_p——排种盘直径，mm

δ——行走地轮滑移率，%

s——穴距，mm

v_p——排种盘线速度，m/s

由式(1)可得 $24.08 \leqslant Z \leqslant 28.76$，为方便加工，设计型孔数 Z 为 26。

由文献[17]可得

$$\begin{cases} ZT < \pi D_p \\ T > 2d_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中　T——相邻型孔间距，mm

d_{max}——种子最大粒径,mm

常用郑单 958 玉米种子最大粒径 d_{max} 为 12.6 mm,D_p 大于 240 mm;常用中黄 37 大豆种子最大粒径 d_{max} 为 8.5 mm,D_p 大于 162.4 mm。为考虑玉米和大豆兼用排种需要,同时兼顾排种器整体结构设计,设计排种盘直径为 170 mm。

2.2 腔盘组合式型孔设计

现阶段应用的排种器为齿孔组合式排种盘,前期将齿孔组合结构的排种盘安装在气力式排种器上进行性能测试,结果表明:当工作负压一定,随着作业速度提高,型孔漏充和种子吸附不稳,均导致排种性能明显下降,难以满足玉米大豆复合种植的农艺要求。已有研究表明,改变型孔结构、增大型孔对种群扰动以及从种群中摄取种子的能力、增加种群与型孔的接触时间是改善排种性能的有效途径[18-19]。设计方案为,利用气室腔体与排种盘组合的型孔取代排种盘上独立开设的型孔,使得腔室相向运动的负压气流均匀分布在组合孔区域,借助均匀分布的组合孔对充种室种群辅助扰动,有助于种子获取与组合孔一致的初始速度,延长种子与组合孔接触时间并被稳固吸附,则可降低高速复合排种下种子漏充率。本文设计的型孔是气室腔体与排种盘贴合自然形成,而非人为在排种盘上开设,工作时为确保良好气密性,采用止口密封结构设计思路,将排种盘嵌入至气室腔体开设的环槽内,如图 3 所示。

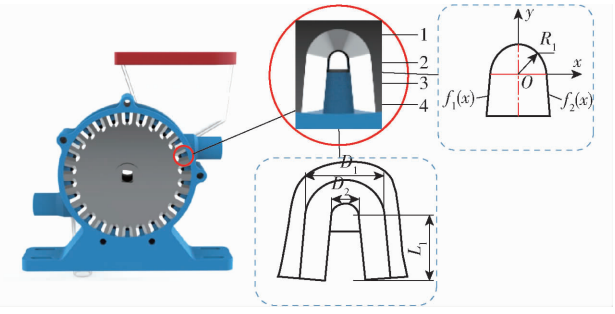


图 3 腔盘组合式型孔视图

Fig. 3 Cavity plate combination hole view

1. 排种盘 2. 腔盘组合孔 3. 扰种凹槽 4. 气室腔体环槽

种子外形尺寸和形状是排种器排种盘型孔设计的重要依据,在设计排种器型孔时需测定种子三轴尺寸,选取中黄 37 大豆种子和郑单 958 玉米种子,随机各选取 1 000 粒测量其三轴尺寸,即长度 L、宽度 W 和厚度 H。图 4 为玉米、大豆种子尺寸概率图。

由图 4 可得,大豆种子长、宽、厚均值为 7.42、6.6、5.65 mm,玉米种子长、宽、厚均值为 12.6、8.2、5.2 mm,玉米种子外形呈扁平状,大豆种子外形呈椭球状,经测量玉米种子球形度为 75.2%,大豆种子球形度为 87.7%,大豆种子球形度优于玉米种子球形度,则大豆种子对排种器的适应性也优于玉米种子,因此本文型孔参数设计主要根据玉米三轴尺寸设计为主,同时兼顾大豆种子排种要求。以点 O 为原点建立坐标系,如图 3 所示。根据《农业机械设计手册》[20],腔盘组合孔面积和排种盘型孔直径计算式为

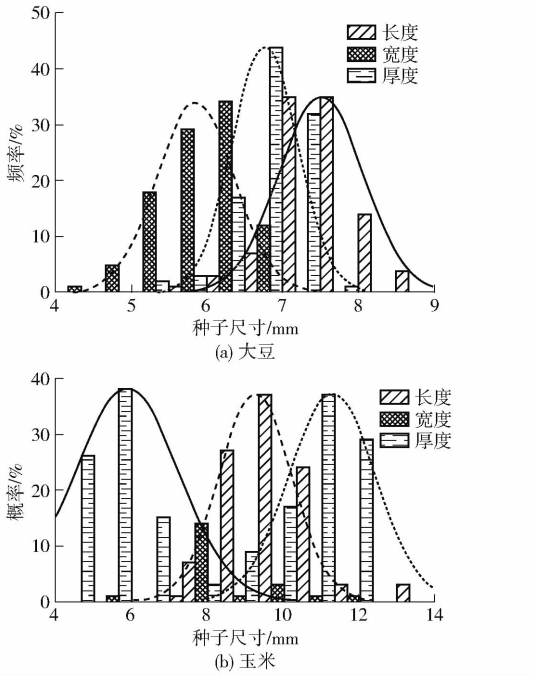


图 4 种子三轴尺寸概率分布图

Fig. 4 Seed triaxial size probability distribution plots

$$\begin{cases} S = \dfrac{\pi R_1^2}{2} + \displaystyle\int_0^{L_1} (f(x_1) - f(x_2))\,\mathrm{d}y \\ D_2 = (0.64 \sim 0.66)\,\bar{b} \end{cases} \tag{3}$$

其中

$$\bar{b} = \sqrt[3]{\bar{L}\bar{W}\bar{T}}$$

式中 S——腔盘组合孔面积,mm^2

D_2——种盘型孔直径,mm

$\bar{b}$——种子平均粒径,mm

$\bar{L}$——种子平均长度,mm

$\bar{W}$——种子平均宽度,mm

$\bar{T}$——种子平均厚度,mm

R_1——型孔半径,mm

L_1——型孔凹槽长度,mm

由式(3)可得,$S = 20$ mm^2,$D_2 = 5.2 \sim 5.5$ mm。玉米种子吸附姿态主要以平躺姿态为主,平躺种子比例越高,合格指数越高[21]。因此本文型孔设计以种子平躺姿态作为理论分析,为保证种子完全贴附于型孔凹槽内,则扰种凹槽外径 D_1 应大于种子最大长度,通过测量的 1 000 粒种子可知,种子最大长度为 13.5 mm,则凹槽外径 D_1 为 14 mm。为保证排种过程使得种子完全充入凹槽,同时保证扰种齿有良

好的扰种效果，则设计型孔凹槽总长度 L_1 为种子最大长度的 1.5 倍，则有

$$L_1 + \frac{D_2}{2} > 1.5L_{\max} \tag{4}$$

式中　$L_{\max}$——种子最大长度，mm

由式(4)可得，型孔凹槽总长度 L_1 为 12.5 mm。

设计凹槽斜面开度 α 时，为保证凹槽与种子有足够的接触面积，使种子在型孔凹槽得到一定的拖持力，减少种子再次脱离型孔造成漏充，则需种子陷入凹槽部分应大于自身厚度的 1/3，同时为避免清种过程出现卡种现象，种子陷入凹槽的部分应不超过种子厚度的 1/2。吸附在型孔上的种子示意图如图 5 所示。

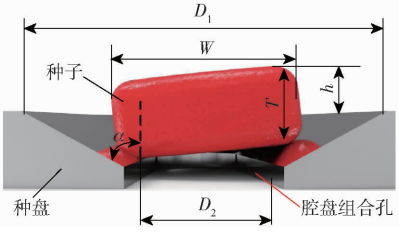


图 5　吸附在腔盘组合孔上的种子示意图

Fig. 5　Schematic of seeds attached to grooves

根据种子吸附状态可得

$$\begin{cases} \dfrac{T}{2} < h < \dfrac{2T}{3} \\ h = T - \dfrac{D_1 - D_2}{2\tan\alpha} + \dfrac{W_{\min} - D_2}{2\tan\alpha} \end{cases} \tag{5}$$

式中　h——种子宽度方向超出凹槽深度的长度，mm

$W_{\min}$——种子最小宽度，取 7.5 mm

由式(5)可得

$$58.2° < \alpha < 67.4° \tag{6}$$

2.3　种子吸附状态力学分析

根据文献[22]可知，可以将充种过程分为 2 个阶段：①种子临近型孔吸附过程阶段。在型孔附近的种子在气流吸附作用下，会随排种盘发生滑移拖动。②脱离种群阶段。被吸附的种子克服种间阻力直至完全贴附型孔，随排种盘转动脱离种群。临近吸种区被型孔吸附前种子受力分析如图 6 所示，根据动能定理可得

$$\begin{cases} (F_s - F_f) S_1 = \dfrac{1}{2} m v_e^2 - \dfrac{1}{2} m v_o^2 \\ F_s = p \dfrac{D_2^2}{4} \mu_1 \\ F_f = N_t \mu_2 \end{cases} \tag{7}$$

式中　F_s——型孔吸附力，N

F_f——种子受到的种间摩擦力，N

N_t——种群压力，N

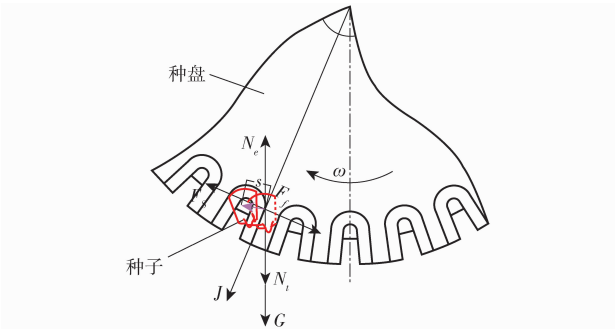


图 6　种子吸附过程受力分析

Fig. 6　Mechanical analysis of seeds adsorption process

μ_1——种子与种盘摩擦因数

μ_2——种子种间摩擦因数

p——吸室腔负压，kPa

v_e——种盘型孔线速度，m/s

v_o——种子受到扰动作用后与排种盘转速相同方向的分速度，m/s

m——种子质量，kg

S_1——型孔附近种子受到型孔吸附力作用下从型孔附近到型孔的距离，mm

化简式(7)可得

$$p = \frac{2m(v_e^2 - v_o^2) + 4N_t\mu_2}{\mu_1 \pi d^2} \tag{8}$$

由式(8)可知，其他条件一定时，负压 p 随种群受扰动后初速度 v_0 的增大而减小，排种盘扰动使种群产生与种盘运动方向一致的速度，种群运动有助于减少排种盘型孔转速与种子速度的相对速度差，使种子尽快达到捕获状态的临界速度，提高种子贴附几率和吸种效率。

为阐明单粒种子在脱离种群阶段的充种性能，以完全贴附于型孔即将脱离种群随排种盘转动的单粒种子为研究对象，对单粒种子受到种群间的接触力、负压气流和自重重力作用建立吸种力学模型，如图 7 所示。

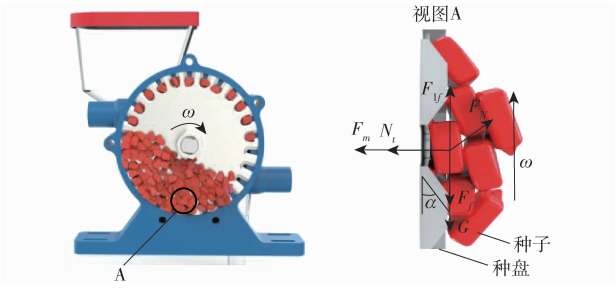


图 7　种子脱离种群阶段受力图

Fig. 7　Force diagram for stage of seed separation from population

为防止吸附在型孔上的种子脱离型孔，则需满足

$$\begin{cases} F_{1f} + F_N\sin\alpha \geqslant F_f + G \\ F_{1f} = \left(p\dfrac{\pi}{4}d^2 + N_t\right)\mu_2 \\ F_f = N_t\mu_1 \\ F_m = p\dfrac{\pi}{4}^2 D_2^2 \end{cases} \tag{9}$$

式中 F_N——凹槽对种子的托持力,N

F_{1f}——吸附种子与排种盘之间的摩擦力,N

G——种子重力,N

F_m——种子受到型孔吸附力

由式(9)可得

$$p > 4\frac{N_t(\mu_1 - \mu_2) + G - F_N\sin\alpha}{\pi d^2\mu_2} \tag{10}$$

由式(10)可知,在其他条件不变时,型孔负压 p 随托持力 F_N 的增大而减少,种子吸附后随排种盘转动过程中,增加了一个托持力,随托持力的增大更有益于防止种子吸附时再次脱离型孔,降低漏充率、提高充种性能。由式(6)可得凹槽斜面开度在 58.2°~67.4°之间,凹槽斜面开度越小,在排种过程中型孔凹槽提供种子的托持力越大。因此夹角 α 应尽量小,为方便实际加工,α 取 60°。

2.4 种子吸运状态力学分析

为定量得到型孔直径 D_2,单粒种子完成充种过程后进入携种过程,随排种盘一起做匀速圆周运动,其受力分析如图 8 所示,将种子所受的力分解为平行于排种盘与垂直于排种盘的力,种子受力方程为

$$\begin{cases} F_R = F_f + F_i + G \\ F_m K_i\dfrac{D_2}{2} = F_R C \\ F_s = pS \\ N_R = N_1 + N_2 \\ W = |G + F_i| = \sqrt{G^2 + F_i^2 + 2GF_i\cos\gamma} \\ Q = |T + F_f| = \sqrt{W^2 + F_f^2 + 2TF_f\cos\beta} \\ F_i = m\omega^2 R \\ F_f = \lambda(F_m + F_N) \end{cases} \tag{11}$$

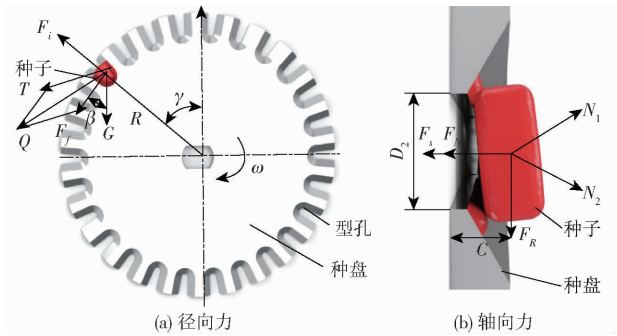


图 8 吸运状态力学分析

Fig. 8 Mechanical analysis of suction transport states

式中 C——种子重心与种盘距离,m

γ——G 与 F_i 之间的夹角,(°)

β——G 与 F_f 之间的夹角,(°)

K_i——吸种可靠性系数

F_i——种子受到的离心力,N

N_R——合力 ω——种盘角速度,rad/s

R——种子重心与种盘中心的距离,m

由式(11)可得

$$p = \frac{80K_1G}{\pi D_2^3}\left(1 + \lambda + \frac{\omega^2}{g}R\right) \tag{12}$$

由式(12)可知,其他条件不变时,排种盘型孔所需负压与型孔直径的三次方成反比,一定条件下,型孔直径越大将增加型孔对种子的吸附力 F_s,增大型孔对种子的支撑力,降低漏充率,同时达到减少吸室腔体真空度的作用。但型孔直径过大会导致型孔多粒重播,过小导致型孔不能较好吸附种子,使种子易在携种过程中因振动掉落,经计算型孔直径在 5.2~5.6 mm 之间。取直径为 5.2、5.4、5.6 mm 试制排种盘进行台架对比预试验,得出型孔直径为 5.2 mm 时种子吸附合格率最高,故本文设计的腔盘组合孔式型孔直径 D_2 为 5.2 mm。

3 仿真试验

排种盘是排种器从种群中定量拾取种子进行播种的核心部件。增大排种盘转速时,种子与型孔接触时间急剧下降,易造成漏充。前期研究观察,在平面排种盘上增设辅助部件可有效打破充种室中种群无序堆积状态,拖带贴近种盘表面的种群跟着排种盘定向迁移,增加种子与型孔接触时间,利于型孔对种子实施捕获并吸附。为探究排种盘结构型式对充种室种群的扰动性能,应用 EDEM 离散元数值模拟方法进行腔盘组合孔型(A 型)、渐开线齿型(B 型)、直线齿型(C 型)、平面型(D 型)4 种排种盘种群扰动对比仿真试验,为较好约束变量对试验结果的影响,4 种排种盘直径、厚度、型孔数目均一致,其中排种盘直径 170 mm、排种盘厚度 3.5 mm、型孔数目 26,A 型与 B 型排种盘齿数 26、齿厚3.5 mm,C 型排种盘齿数 13、齿厚 1 mm,4 种排种盘结构如图 9 所示。

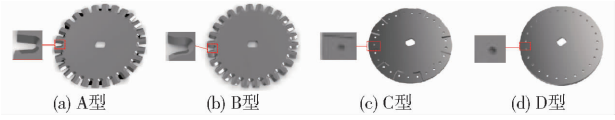


图 9 4 种不同型式排种盘

Fig. 9 Four different types of seeding plates

3.1 仿真模型

为减少运算时间,EDEM 仿真将模型简化为气

室腔体、排种壳体、排种盘和导种管 4 部分，如图 10 所示。籽粒建模以江淮地区大面积使用品种郑单 958 玉米种子和中黄 37 大豆种子为试验材料，大豆种子球型度高而玉米种子形状不规则，建模前随机选取 1 000 粒玉米种子进行形状分类，结果如图 11 所示，马齿形、棱锥形、类球形、球锥形和不规则形分别占比为 62.2%、17.2%、13.8%、3.8%、3%，而马齿形、棱锥形和类球形 3 种形状玉米粒之和约占总粒数的 93.2%。

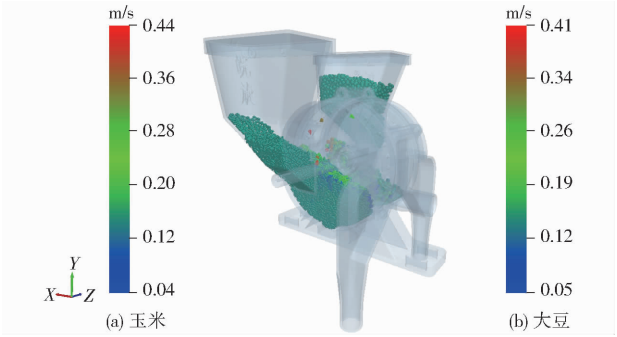


图 10　EDEM 仿真模型

Fig. 10　EDEM simulation models

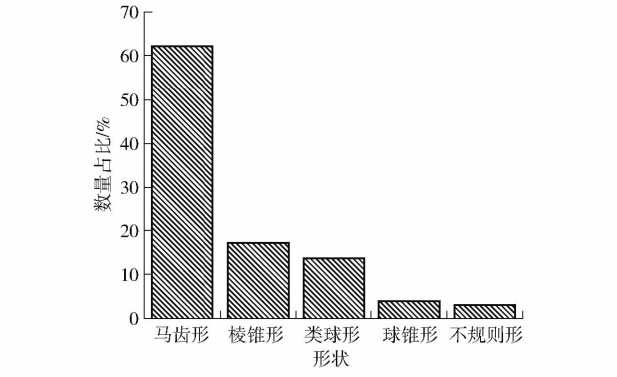


图 11　玉米种子不同形状占比

Fig. 11　Percentage of different shapes of corn seeds

为简化玉米种子颗粒的建模过程，选择马齿形、棱锥形和类球形这 3 种有代表性的形状进行颗粒建模。为使玉米种子颗粒建模更为准确，对实际 3 种不同形状种子进行特征尺寸测量，如表 1 所示。

表 1　玉米种子特征尺寸

Tab. 1　Characteristic dimensions of maize seeds

mm

种子形状	上宽 W_1	下宽 W_2	上厚 T_1	下厚 T_2	高度 H
马齿形	6.9	9.5	5.2	5.2	13.3
棱锥形	4.8	8.2	4.6	5.6	12.5
类球形			8.4	8.0	

颗粒接触模型选用 Hertz－Mindlin(no slip)接触模型，马齿形种子厚度较为均为，下端 3 排采用直径 d_1 为 5.2 mm 小球填充，其直径与马齿形厚度相等，上端 2 排采用直径 d_2 为 4 mm 和 d_3 为 2 mm 小球填充；类球形种子采用 d_4 为 4 mm、d_5 为 8.4 mm 小球进行填充；棱锥形玉米种子，由于厚度从底部到上部逐渐较小，底部 2 排采用 d_6 为 3 mm 小球进行填充，上宽和上厚尺寸比较接近，因此，采用直径 d_8 为 5.3 mm 小球填充，中间采用 d_7 为 4.6 mm 小球进行过渡，上方则采用直径 d_9 为 4.5 mm 和 d_{10} 为 2.3 mm。大豆种子外形尺寸单一，呈椭球状，根据上文大豆三轴尺寸建立颗粒模型。种子颗粒建模如图 12 所示。

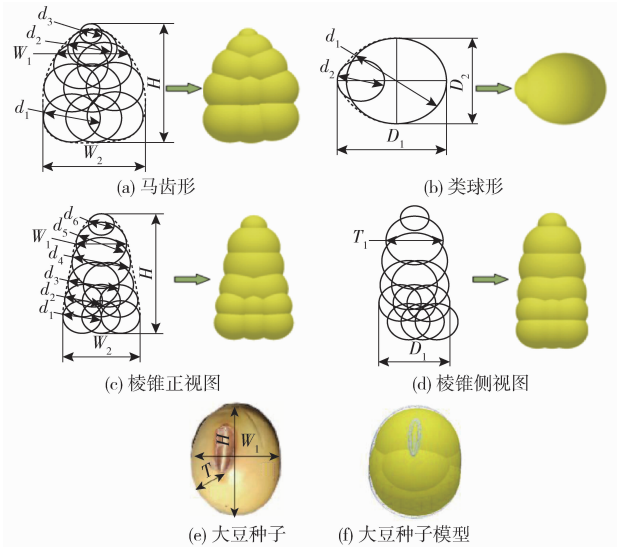


图 12　种子颗粒建模

Fig. 12　Seed particle modeling

根据排种器生产加工材料，气室腔体、排种壳体和导种管的材料设定为有机玻璃，排种盘材料设定为铝合金。种子和排种盘材料参数及种子与排种盘接触参数设置参照文献[23－25]，如表 2 所示。

表 2　种子颗粒与排种盘接触仿真参数

Tab. 2　Parameters for simulation of seed particles in contact with seeding plate

材料	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	剪切模量/Pa
玉米	1.197×10^3	0.400	1.37×10^8
大豆	1.271×10^3	0.250	1.04×10^6
铝合金	2.660×10^3	0.300	7.00×10^{10}
有机玻璃	1.100×10^3	0.394	3.189×10^8
碰撞形式	**恢复系数**	**静摩擦因数**	**动摩擦因数**
玉米与玉米	0.182	0.431	0.078
大豆与大豆	0.435	0.280	0.010
玉米与铝合金	0.620	0.360	0.051
玉米与有机玻璃	0.520	0.450	0.093
大豆与铝合金	0.450	0.480	0.010
大豆与有机玻璃	0.640	0.410	0.010

3.2　排种盘结构对种群扰动强度数值模拟

3.2.1　试验方法

选取上述 4 种排种盘进行仿真，根据玉米-大豆复合种植农艺要求，一般机组前进速度为 4～7 km/h，

排种盘转速取 25、30、35、40 r/min 可满足实际需要。仿真中颗粒工厂 0 ~ 2 s 内生成 5 000 粒,2 s 后种盘开始转动,10 s 时种盘停止转动,固定时间步长为 20%[26-27]。仿真结束后,在 EDEM 的 Analyst 模块使用 Clipping 工具将充种室种群沿平行于种盘表面切开,仿真观察贴近排种盘处种群速度变化大,远离排种盘种群速度变化小,以种群速度将充种室种群划分为 2 个区域:强制拖拽区和摩擦带种区[28],如图 13 所示。强制拖拽区为贴近种盘区域,强制拖拽区以外区域为摩擦带种区,该区域种群无法直接受到种盘的扰动;结合前期预试验发现,种子被型孔捕获并吸附是在强制拖拽区完成的,因此开展了排种盘对强制拖拽区种群扰动强度研究。根据式(8)可得出,排种盘对强制拖拽区种群定向扰动,有助于贴近排种盘表面的种子获得与排种盘运动方向一致的初速度,延长了种子与型孔接触时间,相同负压条件下易被型孔吸附,结合文献[29 - 30],应用种群平均速度作为排种盘对强制拖拽区种群扰动强度的评价指标。

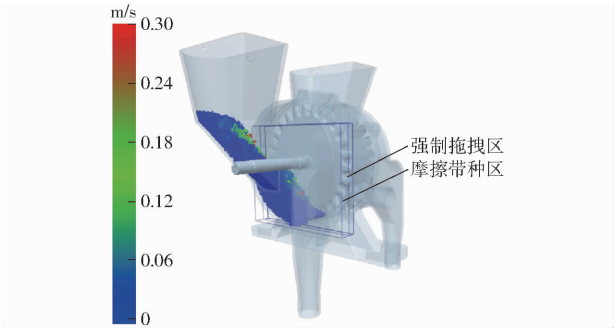


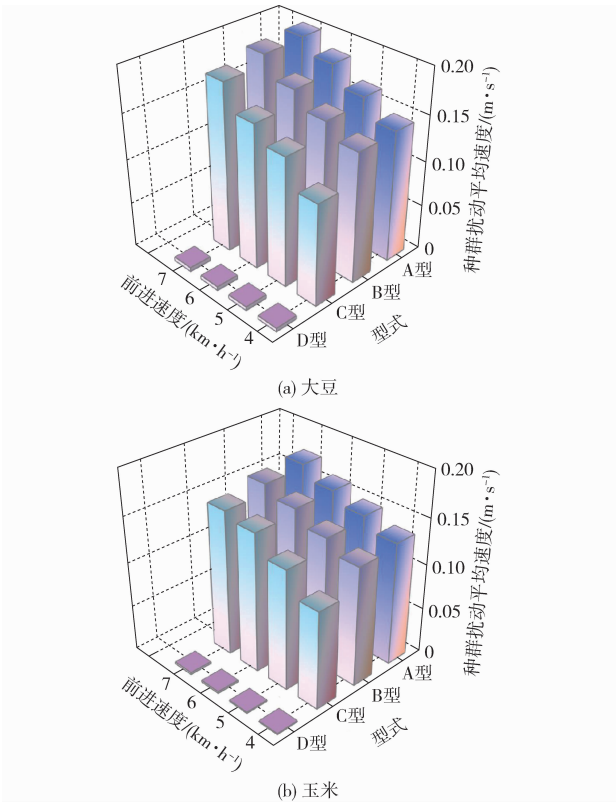
图 13 充种室种群区域划分

Fig. 13 Regional division of populations in seed-filling chambers

3.2.2 仿真结果

图 14 为 4 种排种盘在不同前进速度下强制拖拽区种群平均速度。随着排种盘前进速度增加,种群扰动平均速度随之上升,但平面排种盘增长较缓,因种盘没有槽齿不能与种群发生接触扰动,靠排种盘与种群间摩擦力拖带种群扰动受排种盘前进速度影响较小。在 4 种不同前进速度下,腔盘组合孔对种群扰动平均速度均是最大,表明腔盘组合孔式排种盘对强制拖拽区种群的扰动强度最大。

为验证腔盘组合孔扰种性能最佳,随机选取排种盘转速 30 r/min 下种子种群的速度变化趋势,如图 15 所示。对比 4 种排种盘临近强制拖拽区的种群平均速度可知,腔盘组合孔式排种盘相较于其他排种盘有效提高了对种群的扰动效果,因腔盘组合孔式排种盘相较于其他排种盘增加了腔盘孔与种群接触的有效面积和深度,增大了对种群的扰动作用力,所以腔盘组合孔式排种盘对种群扰动的平均速度更高。综上所述,腔盘组合孔式排种盘具有较强的扰种作用。



(a) 大豆

(b) 玉米

图 14 不同种盘的种群平均速度与前进速度关系

Fig. 14 Relationships between mean population velocity and forward velocity for different seeding plates

3.3 排种盘结构对拖拽充种角影响

3.3.1 仿真试验方法

为更好研究不同排种盘对种群的扰动作用,本文将强制拖拽区扰动前、后种群的边界状态进行对比。种群受扰动前种群边界与排种盘圆心的连线(图 16a),种群受扰动后种群边界与排种盘圆心的连线(图 16b)。通过提取排种盘在相同转速同一时刻的拖拽充种角,探究种群扰动与拖拽充种角的关系。由文献[31]可知,充种区种群由自然休止状态至种盘拖拽后形成的圆心角称为拖拽充种角 φ,在一定数量种群下,拖拽充种角与拖拽充种弧段呈正相关,即拖拽充种角越大,拖拽充种弧段越长,表明种群受排种盘定向扰动越剧烈。

3.3.2 仿真结果

不同排种盘在相同转速下同一时刻的拖拽充种角如图 17 所示,由图 17 可知,种群运移过程中平面型排种盘上种群的拖拽充种角最小,而腔盘组合孔式排种盘上种群拖拽充种角最大。主要原因是腔盘组合式型孔对种子有辅助托持作用,型孔下侧壁对种子具有支撑力,型孔上壁侧减轻种群对种子的挤压和摩擦作用,而平面型排种盘对种子的囊括性较

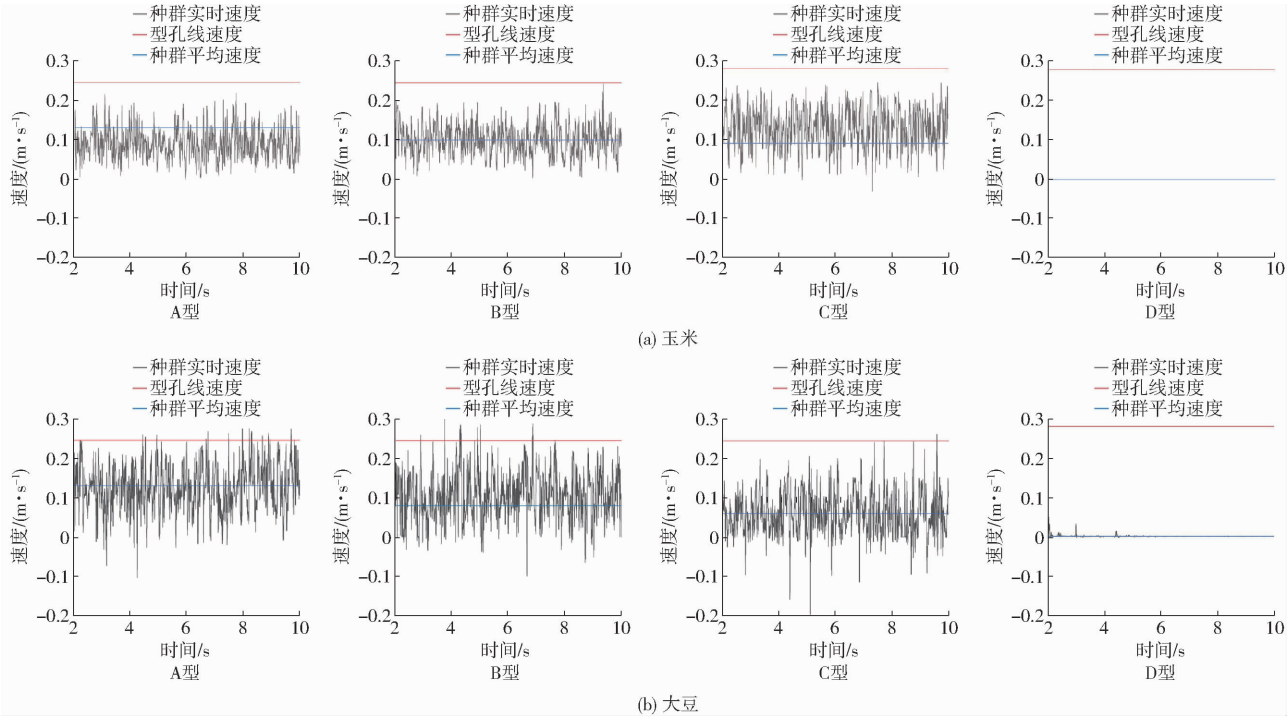


图 15　4 种种盘种群速度随时间变化曲线

Fig. 15　Curves of population velocity over time for four seeding plates

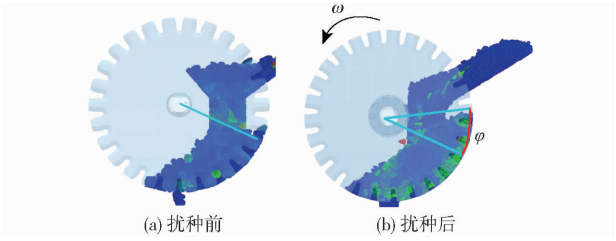


图 16　拖拽充种角示意图

Fig. 16　Dragging seed filling angle

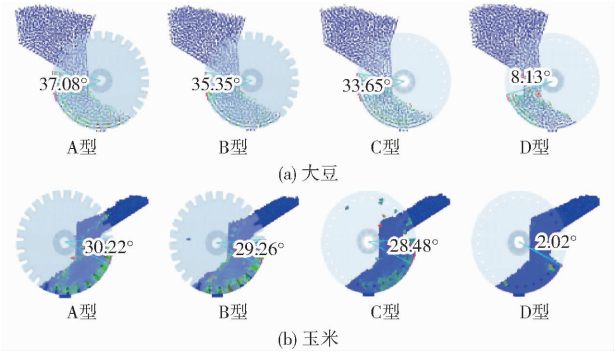


图 17　相同时刻下提取的群拖拽角

Fig. 17　Drag angle extraction for populations at the same moment

差，种子运移时易受到种群间的摩擦挤压，腔盘组合孔对种子有较好的囊括性，减轻了种群对型孔内种子作用力，使得种子不易因种群内种子的摩擦碰撞而掉落。由大豆仿真结果可知，腔盘组合孔式排种盘相比其他 3 个排种盘的拖拽充种角分别大于 1.73°、3.43°、28.95°，同理由玉米仿真结果可得，腔盘组合孔式排种盘相较于其他排种盘的拖拽充种角分别大于 0.96°、2.05°、28.2°。上述仿真结果表明，腔盘组合孔式排种盘对强制拖拽区种群的扰动强度最大。

图 18 为玉米和大豆种群的拖拽充种角和种群平均速度的关系。从图 18 可以看出，排种盘扰动种群平均速度和产生的拖拽充种角呈正相关。当前进速度一定时，拖拽充种角越大产生的推拽弧长越大，从而使得型孔停留在充种区的时间越长，即可认为充种可靠性越高，充种性能越好[32]。腔盘组合孔式排种盘相较于其他排种盘，种群产生的拖拽充种角均大于其他排种盘，表明腔盘组合孔式排种盘具有较好的囊种性能，有效改善排种盘在播种作业下充种性能不佳的问题。

4　台架试验

4.1　试验设备

试验台包括 HG－2200C2 型漩涡式风泵（最大真空度 －24 kPa，浙江森森集团）、I－Speed3 型高速摄像机（日本 Olympus 公司）、玉豆兼用排种器、驱动电机（深圳天晨时代技术有限公司）、风压风速风量仪（SG－312 型，量程为 10 kPa）、转速表，如图 19 所示。

4.2　试验方法

试验材料为郑单 958 玉米种子，含水率 13%，千粒质量 375 g，中黄 37 大豆种子，含水率 11.2%，千粒质量 289.2 g。根据仿真模型加工试制排种盘，

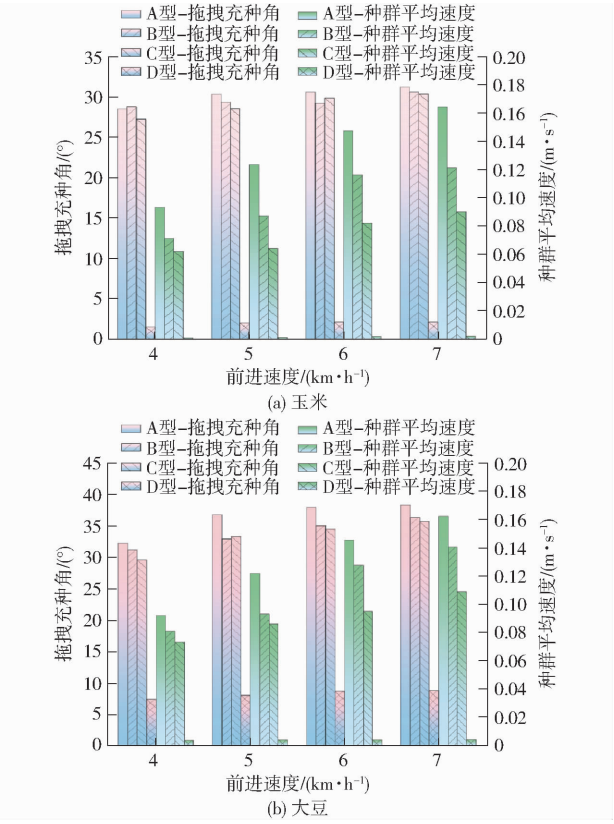


图 18 不同前进速度下的拖拽充种角与种群平均速度

Fig. 18 Relationships between dragged seed filling angle and mean population velocity at different rotational speeds

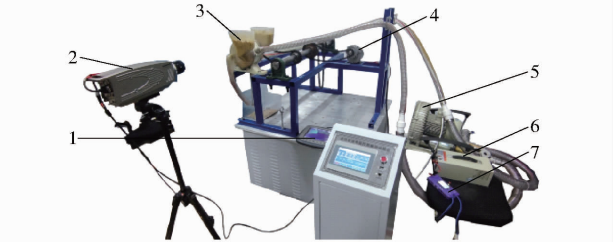


图 19 充种性能试验台架

Fig. 19 Test bench of seed filling performance

1. 高速摄像控制器 2. 高速摄像机 3. 玉豆兼用排种器 4. 驱动电机 5. 漩涡式风泵 6. 调压电源 7. 驱动电机调速器

并安装于排种器上,排种器外壳采用透明外壳,以便高速摄像机进行拍摄。为获得较优种盘结构型式,验证 EDEM 仿真的合理性,固定工作负压 3 kPa,开展以排种盘型式和机具前进速度为试验因素,漏充率和拖拽充种角为评价指标的二因素四水平试验,优选出最佳排种盘,试验因素水平如表 3 所示。参照 GB/T 9478—1988《穴播种机试验方法》[33],用高速摄像机对排种器的透明壳体进行拍摄,每组检测 500 个连续型孔,每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果进行记录,计算排种盘漏充率。

根据以上试验优选出的排种盘开展以机组前进速度、工作负压为试验因素,以漏充率、充种合格率为试验指标,进行二因素五水平全因素充种性能试验,探究该排种盘充种性能,试验因素水平如表 4 所示,试验时每个条件下重复 3 次取平均值,每次试验选取 500 穴,排种盘漏充率、充种合格率计算式为

表 3 排种盘型式优选试验因素水平

Tab. 3 Test factors for optimal selection of different seeding plate types

水平	因素	
	排种盘型式	v_m/(km·h^{-1})
1	A 型	4
2	B 型	5
3	C 型	6
4	D 型	7

$$X_k = \frac{x_1}{x_n} \times 100\% \tag{13}$$

$$X_h = \frac{x_2}{x_n} \times 100\% \tag{14}$$

式中 X_k——漏充率,%

X_h——充种合格率,%

x_1——没有充上种子的型孔数

x_2——充入 1 粒或 2 粒种子的型孔数

x_n——总型孔数

表 4 充种性能试验因素水平

Tab. 4 Factors levels of seed filling performance test

水平	因素	
	v_m/(km·h^{-1})	p/kPa
1	4	2.0
2	5	2.5
3	6	3.0
4	7	3.5
5		4.0

4.3 模型验证与充种性能试验结果

为验证 EDEM 仿真的合理性,随机选取 4 种排种盘在机组前进速度 7 km/h 同一时刻下仿真拖拽充种角与台架试验拖拽充种角对比,如图 20 所示,模型验证结果如表 5 所示,仿真模拟与试验结果之间的偏差小于 8%,这些偏差可以认为实际试验条件相比忽略一些因素,包括玉米种子三轴尺寸分布,风机产生的压力梯度和排种盘加工表面粗糙度。数据显示,仿真结果与试验结果比较吻合。因此,使用 EDEM 仿真模型和参数对充种室内种群扰动行为的数值模拟是准确可信的。

4 个排种盘漏充率具有相似变化趋势,如图 21 所示,漏充率均随种盘转速增加呈上升趋势,但腔盘组合孔式排种盘的漏充率显著低于渐开线型排种盘、直线齿型排种盘、平面型排种盘。随着排种盘转速增加,腔盘组合孔式种盘的优势越明显。在机组

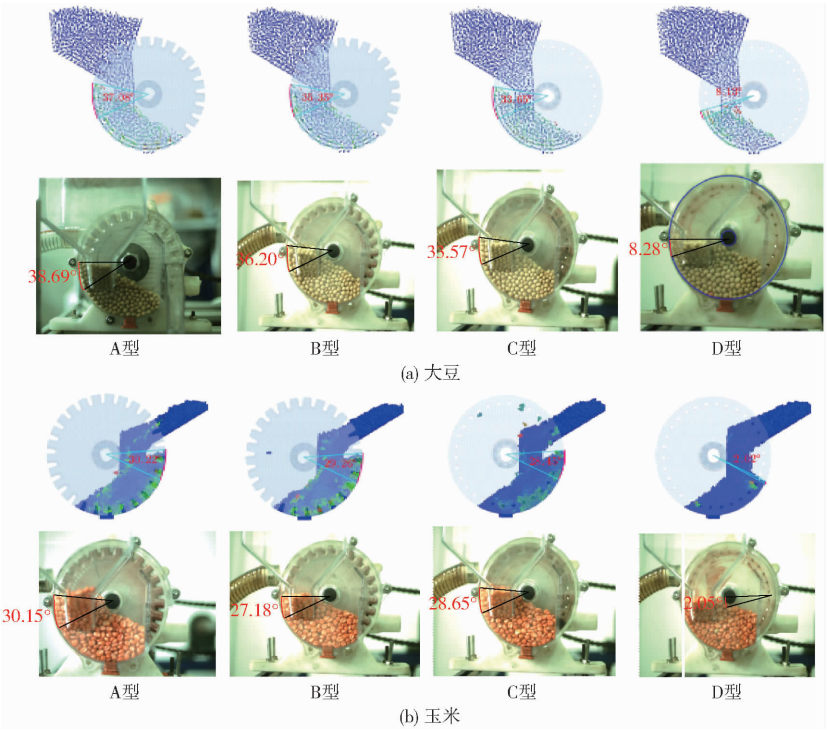


图 20　仿真拖拽充种角与试验拖拽充种角

Fig. 20　Simulated drag seed filling angle and experimental drag seed filling angle

表 5　拖拽充种角模型验证结果

Tab. 5　Drag-and-drop seed filling angle model validation results

种子	种盘结构	模拟值/(°)	试验值/(°)	偏差/%
玉米	A 型排种盘	30. 22	30. 15	0. 2
	B 型排种盘	29. 26	27. 18	7. 7
	C 型排种盘	28. 45	28. 65	0. 7
	D 型排种盘	2. 02	2. 05	1. 5
大豆	A 型排种盘	37. 08	38. 69	4. 3
	B 型排种盘	35. 35	36. 20	2. 4
	C 型排种盘	33. 65	33. 57	0. 2
	D 型排种盘	8. 13	8. 28	1. 8

前进速度为 7 km/h 条件下，腔盘组合孔式排种盘玉米和大豆漏充率分别为 3. 1%、3. 6%，明显优于其他排种盘。

漏充率越低，充种合格率越高，排种器排种性能越好[34-35]，通过台架试验结果对比 4 种排种盘漏充率与拖拽充种角的关系，如图 22 所示，随着机组前进速度的增加拖拽充种角随之降低，漏充率随之增加，由此得到机组前进速度与拖拽充种角、漏充率分别呈负相关、正相关。在相同条件下排种盘对种群产生的拖拽充种角越大，台架试验漏充率越低，充种性能越好。通过仿真试验与台架试验提取的拖拽充种角可以直观反映排种盘的充种性能，由图 22 可得，腔盘组合孔式排种盘的充种性能最佳。

4.4　试验结果分析

腔盘组合孔式排种盘充种性能试验结果如表 6

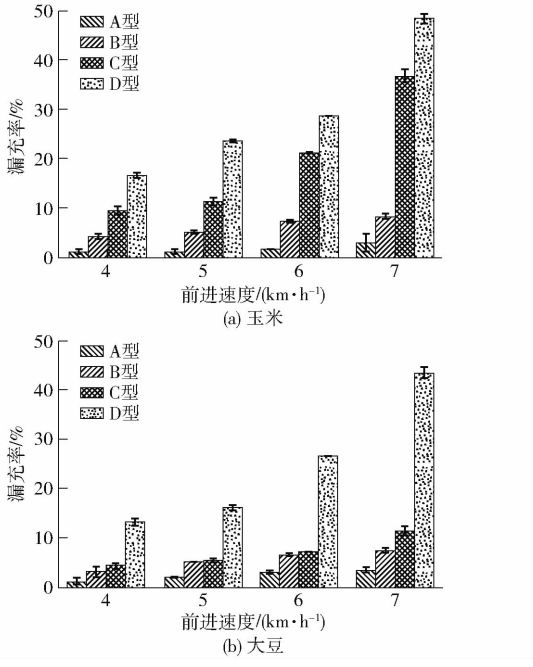


图 21　不同排种盘结构形式对漏充率的影响

Fig. 21　Influence of different seeding plates structure forms on leakage filling rate

所示，将所得数据导入 Design-Expert 12. 0 进行数据分析，得出漏充率、充种合格率与机组前进速度、工作负压的回归模型，对模型进行方差分析，结果如表 7 所示。

由表 7 可知，玉米大豆的漏充率、充种合格率的回归模型显著，玉米种子充种性能试验方差分析中工作负压对漏充率、充种合格率的影响极显著，机组

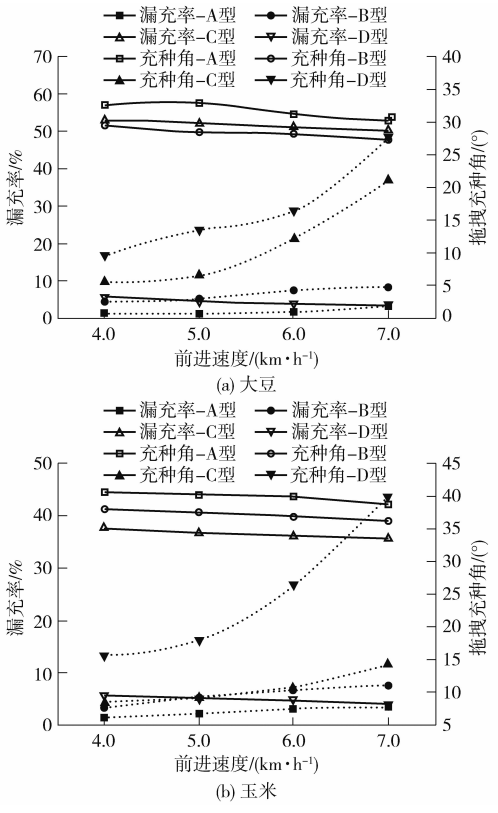


图 22 不同型式排种盘漏充率与拖拽充种角关系

Fig. 22 Relationships between leakage rate of different types of seeding plates and drag seed filling angle

表 6 玉米大豆充种性能试验结果

Tab. 6 Corn soybean seed filling performance test results %

种子	指标	p/kPa	v_m/(km·h^{-1})			
			4	5	6	7
玉米	漏充率	2.0	4.9	7.6	17.0	32.0
		2.5	0.8	1.3	3.4	5.2
		3.0	1.2	1.1	1.7	3.1
		3.5	0	1.5	1.6	2.5
		4.0	0	0.4	1.1	1.7
	充种合格率	2.0	95.1	92.4	83.0	68.0
		2.5	98.0	91.1	95.8	94.8
		3.0	97.5	97.8	97.4	96.9
		3.5	98.6	97.3	97.3	96.9
		4.0	98.5	98.3	97.7	98.4
大豆	漏充率	2.0	5.2	7.4	19.0	48.0
		2.5	2.4	2.7	6.7	8.1
		3.0	1.4	2.2	3.2	3.6
		3.5	1.4	1.9	2.1	2.7
		4.0	0	0	0	0.4
	充种合格率	2.0	93.8	91.8	81.0	52.0
		2.5	97.6	96.8	93.3	91.9
		3.0	97.2	96.5	96.8	96.4
		3.5	96.8	96.7	97.9	97.3
		4.0	96.5	98	97.6	97.6

表 7 方差分析

Tab. 7 Analysis of variance

种子类型	方差来源	漏充率 Y_1				充种合格率 Y_2			
		平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
玉米	模型	685.81	3	9.32	0.000 8 **	623.88	3	9.01	0.001 0 **
	v_m	158.00	1	6.44	0.021 9 *	107.74	1	4.67	0.046 2 *
	p	370.27	1	15.10	0.001 3 **	355.22	1	15.40	0.001 2 **
	$v_m p$	157.53	1	6.43	0.022 1 *	160.92	1	6.97	0.017 8 *
	误差	392.28	16			369.15	16		
	总和	1 078.09	19			993.03	19		
大豆	模型	1 460.91	3	10.31	0.000 5 **	1 261.81	3	8.33	0.001 5 **
	v_m	302.76	1	6.41	0.022 2 *	235.01	1	4.66	0.046 5 *
	p	724.20	1	15.33	0.001 2 **	572.29	1	11.34	0.003 9 **
	$v_m p$	433.95	1	9.18	0.008 0 **	454.51	1	9.00	0.008 5 **
	误差	755.95	16			807.65	16		
	总和	2 216.85	19			2 069.46	19		

注：** 为极显著($P<0.01$)，* 为显著($P<0.05$)。

前进速度、机组前进速度与工作负压交互对漏充率、充种合格率的影响显著；大豆种子充种性能试验方差分析中工作负压、机组前进速度与工作负压交互对漏充率、充种合格率的影响极显著，机组前进速度对漏充率、充种合格率的影响显著。

排种盘各试验工况下充种性能变化趋势的等高线图如图 23 所示，排种盘的充种性能受工作负压和机组前进速度的影响，其变化规律相似。当工作负压固定时，随机组前进速度的增大，充种合格率逐渐减小，漏充率逐渐增大，原因在于机组前进速度提高，型孔不能及时吸附种群中脱离的单粒种子，造成漏充率增加，充种合格率降低，漏充率与机组前进速度呈正相关。当机组前进速度固定时，随工作负压的增大，充种合格率随之增加，漏充率降低，原因在于型孔接触面积不变时，负压增大型孔吸附力随之增大，能有效克服种子重力与种群间作用力而精准

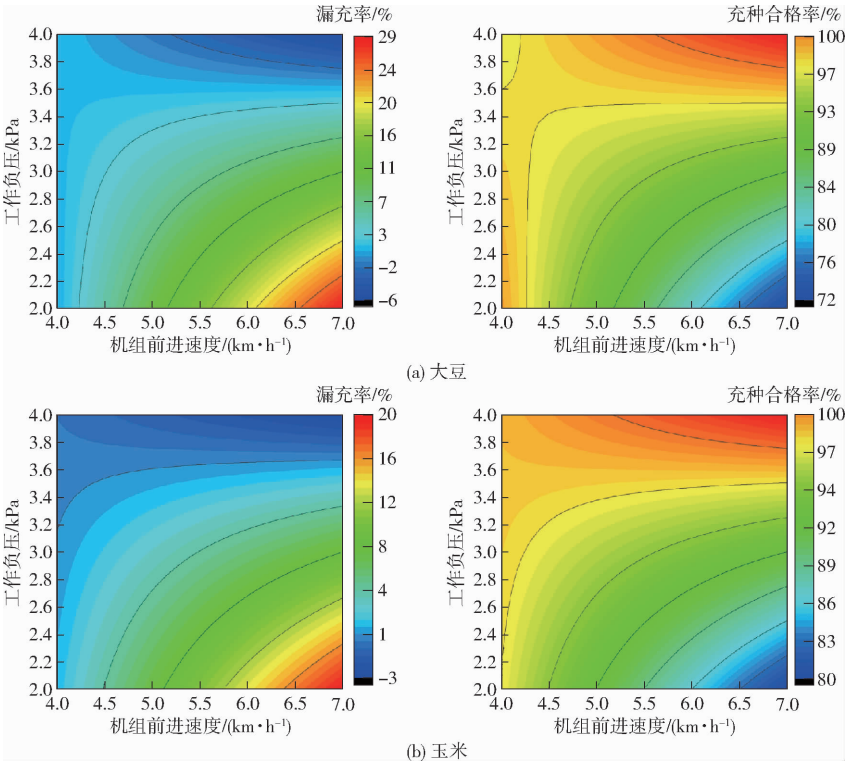


图 23　排种盘各试验工况下充种性能变化趋势

Fig. 23　Trends of seed filling performance of seeding plate under each test condition

吸附种子。工作负压不低于 3.0 kPa 时，玉米漏充率低于 3.1%，大豆漏充率低于 3.6%；玉米和大豆充种合格率均达到 96% 以上。机具前进速度为 7 km/h、工作负压为 2.0 kPa 时，玉米和大豆漏充率达 32% 和 48%，对应的充种合格率仅为 68% 和 52%。结合前述理论分析其原因在于：转速较高且工作负压较低时，型孔吸附力不足，易出现漏充，导致充种合格率下降。因此在播种生产时排种器工作负压应达到 3.0 kPa 以上。

5　田间试验

5.1　试验设备及试验方法

为进一步验证腔盘组合孔式排种盘田间作业性能，在马鞍山市含山县中庄村进行田间试验，如图 24 所示，试验材料为郑单 958 玉米种子和中黄 37 大豆种子，将搭载腔盘组合孔式排种盘的排种器安装在 2BQG－8 型气力式播种机平台上，播种机具由安徽农业大学和安徽宏翔机械有限公司联合研发，牵引动力为东方红 CFF1004 型轮式拖拉机，HG－2200C2 型试验工具风压计、PCB356A32 型三轴加速度传感器、米尺、转速表等。借助 SHL－500W 型高清摄像机拍摄排种器透明壳体，开展二因素四水平的充种性能试验，以漏充率和充种合格率为试验指标，试验因素水平见表 8。



图 24　田间试验

Fig. 24　Field trial

表 8　田间充种性能试验因素水平

Tab. 8　Field filling performance test factors and levels

水平	因素	
	v_m/(km·h^{-1})	p/kPa
1	4	2
2	5	3
3	6	4
4	7	

5.2　试验结果与分析

充种性能试验结果如表 9 所示，将表中试验数据使用 Design-Expert 12.0 进行拟合，得到漏充率与充种合格率的等高线图，如图 25 所示。

由表 9、图 25 可知，当工作负压为 2.0 kPa 时，随着机组前进速度增大，玉米和大豆种子的漏充率随之增加，在机组前进速度为 6 km/h 时，玉米和大豆种子漏充率分别为 12.6%、12.4%，当机组前进速度为 7 km/h 时，玉米和大豆种子漏充率分别为 24.6%、22.4%。工作负压3.0kPa时，在不同机

表 9 田间充种性能试验结果

Tab. 9 Field seed filling performance test results

p/kPa	v_m/(km·h^{-1})	大豆		玉米	
		漏充率/%	充种合格率/%	漏充率/%	充种合格率/%
2	4	6.4	93.6	5.4	92.9
	5	8.5	91.1	7.7	92.1
	6	12.6	87.4	12.4	87.6
	7	22.4	77.6	24.6	75.4
3	4	1.5	97.9	1.4	97.8
	5	1.7	97.7	2.2	97.4
	6	2.1	97.4	2.4	97.2
	7	4.2	95.8	3.8	96.2
4	4	1.0	98.4	0	98.2
	5	1.3	98.2	0	98.4
	6	1.4	98.2	0	98.6
	7	1.6	97.8	1.4	98.2

组前进速度条件下,玉米和大豆种子的漏充率都比较低,机组前进速度为 7 km/h 时,玉米和大豆种子漏充率仅为 3.8%、4.2%。上述分析表明,工作负压为 2.0 kPa 时无法满足排种器在田间的工作要求,工作负压达到 3.0 kPa 时,排种器充种合格率均高于 95.8%。因此,田间作业时工作负压应选择 3.0 kPa 以上,验证了台架试验结果的合理性,满足行业标准要求。

为检验自扰动排种盘与无扰动排种盘在实际作业条件下的充种性能,选用腔盘组合孔式排种盘与无扰动平面排种盘进行对比,如图 26 所示,给定负压 3.0 kPa,选取机组前进速度为 4 ~ 7 km/h 进行田间试验,以漏充率为评价指标,结果如图 27 所示。

由图 27 可知,2 种排种盘漏充率变化趋势相

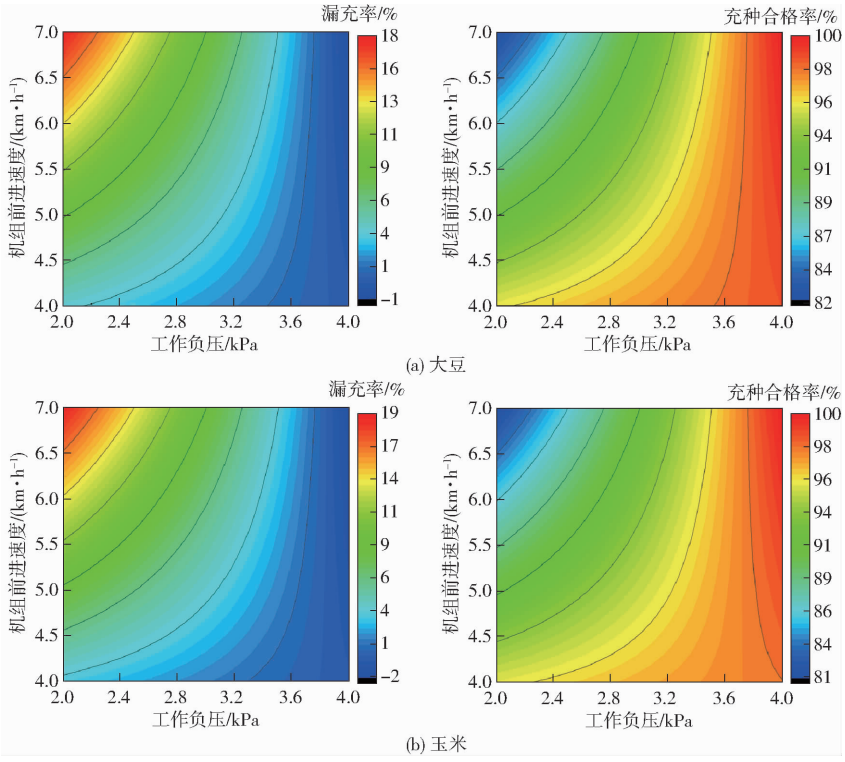


图 25 漏充率与充种合格率等高线图

Fig. 25 Contour plots of leakage rate *vs* seeding pass rate

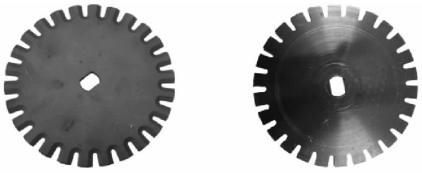


图 26 自/无扰动排种盘

Fig. 26 Self/non-disturbance seeding plate

似,自扰动排种盘漏充率明显比无扰动排种盘低,随着机组前进速度的增加,2 种排种盘的漏充率差距加大:机组前进速度为 4 km/h 时,玉米和大豆自扰动种盘比无扰动排种盘漏充率分别低 5.2、4.1 个百分点;当机组前进速度增大到 7 km/h 时,玉米和大豆自扰动排种盘比无扰动排种盘漏充率分别低 14.8、12.6 个百分点。综上试验结果可知,无扰动平面排种盘在机组前进速度为 4 km/h,玉米和大豆漏充率分别为 6.7%、5.5%,当机组前进速度增加到 6 km/h 时,玉米和大豆漏充率分别为 14.5%、12.5%;自扰腔盘组合孔式排种盘在机组前进速度 7 km/h 时,玉米大豆漏充率均低于 4.2%,参照 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》[36],无扰动排种盘在机组前进速度达到 6 km/h 时不易满足玉米和大豆农艺播种要求,而自扰动排种盘在机组

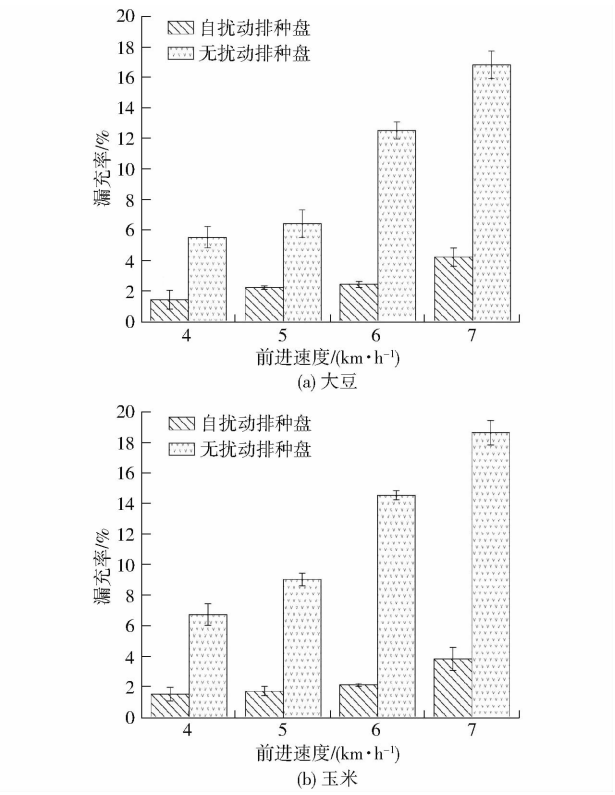


图 27　排种盘漏充率对比试验结果

Fig. 27　Comparative test results of seeding plate leakage rate

前进速度为 7 km/h 时仍然可满足玉米和大豆农艺播种要求。结合上述理论和仿真分析其原因在于：机组前进速度增大，种子与型孔接触时间变短，对种群具有定向扰动的腔盘组合孔式排种盘可有效打破种室内种群堆积状态，利于贴近排种盘表面的种子获得与排种盘转动方向一致的初速度，与无扰动排种盘相比，延长了种子与型孔的接触时间，在相同负压下更易被型孔吸附，从而缓解了因排种器作业速度提高时漏充率高导致穴播排种性能下降的难题。

6　结论

（1）设计了一种玉米大豆兼用的腔盘组合孔式排种盘，分析确定了其关键结构参数，构建了吸附过程和吸运过程力学模型，运用 EDEM 软件进行了排种盘扰种性能数值模拟，建立了可划分强制拖拽区与摩擦带种区的种子与排种盘运动接触仿真模型，提出了充种室强制拖拽区种群平均速度与拖拽充种角为扰种性能的评价指标，明确了腔盘组合孔式排种盘具有较好扰种性能。

（2）利用仿真所用的 4 种排种盘进行台架优选试验，以排种盘型式和机组前进速度为试验因素，以漏充率和拖拽充种角为评价指标开展二因素四水平试验，试验得出腔盘组合孔式排种盘充种性能最佳并与仿真结果一致，在工作负压 3.0 ~ 4.0 kPa、机组前进速度 4.0 ~ 7.0 km/h 条件下，玉米和大豆的漏充率均小于 3.6%，充种合格率均大于 96%，表明腔盘组合孔式排种盘对种群定向扰动可提升排种器充种性能。

（3）田间充种性能试验结果表明，在工作负压 3.0 ~ 4.0 kPa、机组前进速度 4.0 ~ 7.0 km/h 条件下，玉米和大豆的漏充率均小于 4.2%，充种合格率均大于 95%；当固定工作负压 3.0 kPa、机组前进速度 7 km/h 时，自扰动腔盘组合孔式排种盘相比无扰动平面排种盘，玉米和大豆漏充率分别下降 14.8、12.6 个百分点。

参　考　文　献

[1] 杨文钰，杨峰. 发展玉豆带状复合种植，保障国家粮食安全[J]. 中国农业科学，2019，52(21)：3748 - 3750.
YANG Wenyu, YANG Feng. Developing maize-soybean strip intercropping for demand security of national food[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(21): 3748 - 3750. (in Chinese)

[2] 程彬，刘卫国，王莉，等. 种植密度对玉米-大豆带状间作下大豆光合、产量及茎秆抗倒的影响[J]. 中国农业科学，2021，54(19)：4084 - 4096.
CHENG Bin, LIU Weiguo, WANG Li, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics, yield and stem lodging resistance of soybean in maize-soybean strip intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(19): 4084 - 4096. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 陈玉龙，贾洪雷，王佳旭，等. 大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：95 - 104.
CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 95 - 104. (in Chinese)

[5] 杨丽，史嵩，崔涛，等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J]. 农业机械学报，2012，43(增刊)：48 - 53.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48 - 53. (in Chinese)

[6] YANG A, DEGIRMENCIOGLU A, ONALY I, et al. Mathematical modeling and optimization of the a metering unit for precision corn seeding[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences the United States of America, 2010, 95(10): 5801 - 5806.

[7] ONAL I, DEGIRMENCIOGLU A, YAZGI A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiments[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2012, 36(2): 133 - 144.
[8] DU Xin, LIU Cailing. Design and testing of the filling-plate of inner-filling positive pressure high-speed seed-metering device for maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 1 - 17.
[9] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2017, 97(3): 347 - 356.
[10] 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)
[11] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM - CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):43 - 51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43 - 51. (in Chinese)
[12] Horsch seed meter[EB/OL]. (2016 - 01 - 12). http://www.horsch.com/us/produkte/sae.
[13] 陈玉龙,刘泽琪,韩杰,等. 气吸式排种器扁平种子吸附姿态调节机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(23):1 - 11.
CHEN Yulong, LIU Zeqi, HAN Jie, et al. Design and experiments of the flat seed-adsorbing posture adjustment mechanism for the air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 1 - 11. (in Chinese)
[14] 高筱钧,徐杨,张东兴,等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(23):9 - 20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9 - 20. (in Chinese)
[15] 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(8):78 - 83.
ZHAO Jiale, JIA Honglei, JIANG Xinming, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 78 - 83. (in Chinese)
[16] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):61 - 73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61 - 73. (in Chinese)
[17] 张德文,李林,王惠民. 精密播种机械[M]. 北京:农业出版社,1981.
[18] 张明华,王在满,罗锡文,等. 组合型孔排种器双充种室结构对充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(12):8 - 15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Effect of double seed-filling chamber structure of combined type-hole metering device on filling properties[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 8 - 15. (in Chinese)
[19] 臧英,何思禹,王在满,等. 气力式包衣杂交稻单粒排种器研制[J]. 农业工程学报,2021,37(1):10 - 18.
ZANG Ying, HE Siyu, WANG Zaiman, et al. Development of pneumatic single seed metering device for coated hybrid rice [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 10 - 18. (in Chinese)
[20] 中国农业机械科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[21] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报,2021,52(7):40 - 50.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 40 - 50. (in Chinese)
[22] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):61 - 70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61 - 70. (in Chinese)
[23] 张学军,程金鹏,史增录,等. 摆动夹取式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4):38 - 50.
ZHANG Xuejun, CHENG Jinpeng, SHI Zenglu, et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing-clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 38 - 50. (in Chinese)
[24] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):50 - 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50 - 59. (in Chinese)
[25] 武尧尧. 大豆双盘扰动气力式精量穴播排种器设计与性能试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
WU Yaoyao. Design and performance test of soybean double-disk disturbing pneumatic precision hole seeder[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[26] 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)
[27] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14):32 - 39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32 - 39. (in Chinese)
[28] 何顺. 油菜扰动气力式精量排种器吸附机理分析与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2021.
HE Shun. Analysis and test of adsorption mechanism of oilseed rape disturbed pneumatic precision seed metering device[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[29] 李兆东, 何顺, 钟继宇,等. 油菜扰动气力盘式穴播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2021,37(17):1 - 11.
LI Zhaodong, HE Shun, ZHONG Jiyu, et al. Parameter optimization and experiment of the disturbance pneumatic plate hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 1 - 11. (in Chinese)
[30] 刘涛,何瑞银,陆静,等. 基于 EDEM 的窝眼轮式油菜排种器排种性能仿真与试验[J]. 华南农业大学学报,2016,37(3):126 - 132.
LIU Tao, HE Ruiyin, LU Jing, et al. Simulation and verification on seeding performance of nest hole wheel seed-metering device based on EDEM[J]. Journal of South China Agricultural University,2016,37(3):126 - 132. (in Chinese)
[31] 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.
CONG Jinling, LIAO Qingxi, CAO Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 30 - 39. (in Chinese)
[32] 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):43 - 47.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43 - 47. (in Chinese)
[33] GB/T 9478—1988 穴播种机试验方法[S]. 1988.
[34] 邢赫,王在满,罗锡文,等. 气力式水稻穴播机播种精度与田间成苗率关系的试验研究[J]. 农业工程学报,2018,34(9):42 - 48.
XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Experimental study on relationship of seeding precision and germination rate in field of pneumatic rice hill-drop drilling planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 42 - 48. (in Chinese)
[35] 李姗姗,廖庆喜,王都,等. 油菜气力滚花滚筒式精量集排器充种性能仿真分析与试验[J]. 华中农业大学学报,2017,36(5): 99 - 107.
LI Shanshan, LIAO Qingxi, WANG Du, et al. Simulation analyses and experiment of filling performance of pneumatic knurled cylinder-type centralized precision metering device rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(5): 99 - 107. (in Chinese)
[36] NY/T 1143—2006 播种机质量评价技术规范[S]. 2006.

(上接第 35 页)

[22] LIM S,CHI S. XGBoost application on bridge management systems for proactive damage estimation[J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 41: 100922.
[23] CHEN T Q, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system[C]// Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016:785 - 794.
[24] ZOPLUOGLU C. Detecting examinees with item preknowledge in large-scale testing using extreme gradient boosting (XGBoost)[J]. Educ. Psychol. Meas.,2019, 7:931 - 961.
[25] ZHANG X, LUO A. XGBoost based stellar spectral classification and quantized feature[J]. Spectrosc. Spectr. Anal.,2019, 39:3292 - 3296.
[26] BESKOPYLNY A, STELMAKH S, SHCHERBAN E, et al. Concrete strength prediction using machine learning methods catBoost, K-nearest neighbors, support vector regression[J]. Applied Sciences, 2022, 12(21): 10864.
[27] 崔佳旭,杨博. 贝叶斯优化方法和应用综述[J]. 软件学报,2018,29(10):3068 - 3090.
CUI Jiaxu, YANG Bo. Survey on Bayesian optimization methodology and applications[J]. Journal of Software,2018,29(10): 3068 - 3090. (in Chinese)
[28] 何亮,侯英雨,赵刚,等. 基于全局敏感性分析和贝叶斯方法的 WOFOST 作物模型参数优化[J]. 农业工程学报,2016,32(2):169 - 179.
HE Liang, HOU Yingyu, ZHAO Gang, et al. Parameters optimization of WOFOST model by integration of global sensitivity analysis and Bayesian calibration method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 169 - 179. (in Chinese)
[29] 许丽佳,黄建国,王厚军,等. 混合优化的贝叶斯网络结构学习[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(5):633 - 639.
XU Lijia, HUANG Jianguo, WANG Houjun, et al. Hybrid optimized algorithm for learning Bayesian network structure[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics,2009,21(5):633 - 639. (in Chinese)