

种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验

杨薇^{1,2} 方宪法² 李建东¹ 李雷霞¹

(1. 中机美诺科技股份有限公司, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为满足玉米育种试验的播种需要,设计了一种种腔自净型气吸式精量排种器,该排种器的充种腔与清种腔相互独立,排种与清种过程互不干扰,自净率达100%。通过考察育种试验用种子的形状,并结合育种试验的特点,确定了排种器关键结构参数。对种子吸附的过程进行动力学分析,并利用 EDEM 软件仿真验证了种量较少时搅种盘的种群扰动作用。利用 Fluent 软件模拟验证了当剩余种子不超过10粒、清种时间不超过1s的情况下,清种真空度大于3kPa时,可保证剩余种子全部清出。对育种试验用种子进行分级处理,在真空度3~4kPa范围内进行单因素试验,结果表明,清种阶段已吸附在吸孔上的任一规格种子均能正常播种。排种器架架试验结果显示,播种机作业速度小于3.6km/h,真空度6~8kPa,刮种板工作面距离吸孔中心2~4mm范围内时,排种器的漏播率小于1%,重播率小于4%,合格指数大于95%,各项指标符合国家标准要求,能有效实现排种,同时保证清种率达到100%。排种器田间试验证明,出苗效果符合育种试验的播种要求。

关键词: 玉米; 育种; 排种器; 气吸式

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0064-10

Design and Experiment of Air-suction Precision Seed Meter with Self-clearing Seed Chamber for Corn Plot Test

YANG Wei^{1,2} FANG Xianfa² LI Jiandong¹ LI Leixia¹

(1. Menoble Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to meet the needs of corn breeding test, an air-suction precision seed meter with self-clearing seed chamber was designed, whose seed chamber and seed clearing chamber were independent of each other. The process of metering and clearing did not interfere with each other. The self-purification rate could achieve 100%. The shape of breeding seeds was analyzed, and the key structural parameters of seed meter were determined according to the characteristics of breeding experiment. Dynamics analysis of the process of seed adsorption was carried out, and EDEM software was used to verify the disturbance of churn plate to the fewer population. Fluent software was used to simulate the seed clearing process. It was proved that when the remaining seeds were not more than 10 and the clearing time was not more than 1 s, the vacuum of clearing seeds was greater than 3 kPa, the remaining seeds could be cleared completely. Seeds used in breeding experiments were graded, single factor experiments were carried out in the vacuum range of 3 ~ 4 kPa. The results showed that seeds adsorbed on suction holes in the clearing stage could still be sown normally regardless of their specifications. Experiments of the normal seeding stage were carried out on the JPS-12 test bench. When the vacuum was between 6 kPa and 8 kPa, the operation speed of the seeder was less than 3.6 km/h, and the working face of the scraper was within 2 ~ 4 mm from the suction hole center, the qualified index of seed spacing exceeded 95%, the missing-seeding rate and the reseeding rate were less than 1% and 4%, respectively. Each index met the national standard. The performance of seed metering device was effective while the clearance rate could reach 100%. The field experiment of seeder proved that the seedling emergence effect met the seeding requirement of breeding experiment.

Key words: corn; breeding; seed meter; air-suction

收稿日期: 2019-02-19 修回日期: 2019-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701200-2017YFD0701201)

作者简介: 杨薇(1984—),女,高级工程师,博士生,主要从事农业机械设计及应用研究,E-mail: yangw@maen.com.cn

通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化和农业工程技术研究,E-mail: fangxf@caams.org.cn

0 引言

随着种业发展,育种公司和科研单位对于玉米育种试验的小区播种机的需求也越来越迫切。玉米育种试验是将试验地分割成若干小区,每个小区播种的种子品种不同,播种时需要将试验种子按照小区排列顺序,依次投入到排种器的充种腔内,而在每个小区的终点都要将种腔内剩余的种子全部清出,以保证不与下一小区的种子发生混杂,这也是小区播种机与传统大田播种机的最大不同。

国外对气吸式小区播种机的研究始于 20 世纪 60 年代,并且形成了成熟的系列产品,奥地利 Wintersteiger 公司研制的气吸式精量播种机采用带有可转动闸门 的精量排种器,使排种和清种阶段互不干扰,确保小区间的种子分配精确^[1];美国 Almaco 公司生产的 SeedPro 精播机采用可转动种腔的气吸式排种器,在清种时种腔向下转动将剩余种子倒入清种腔内,再由负压将余种收集至回收筒内,使清种和排种过程互不干扰,确保不发生混种^[2];美国 SRES 公司、德国 haldrup 公司以及法国 Baural 公司等生产专用小区播种机,也都是采用带有清理剩余种子功能的气吸式排种器^[3],以适应育种试验的播种作业要求。

国内对于玉米小区播种机的研究处于起步阶段^[4],而排种器作为玉米小区播种机的核心部件,国内相关研究基本处于空白^[5],虽然气吸式排种器在大田播种机上得到了广泛应用,但由于清种不便等原因并不适合进行育种试验的播种作业,因此,研究适用于玉米育种试验的气吸式排种器尤为重要。

本文设计一种带有自净功能的气吸式排种器,保证在上一个小区完成播种后,通过负压将充种腔内的剩余种子清出,不与下一小区即将投入到充种腔的种子发生混杂,从而满足育种试验的要求。

1 结构与工作原理

玉米育种小区试验时,需要排种器具有自净功能,即在每个小区的结束处都要将剩余的种子自动清出并回收至固定容器中,自净率必须达到 100%,以此为首要前提条件设计具有种腔自净功能的气吸式排种器,总体结构如图 1 所示,主要由前壳体、刮种板、排种盘、搅种盘及后壳体等组成,充种腔与清种腔之间由清种闸门隔开,相互独立。

种腔自净型气吸式精量排种器的工作过程如图 2 所示。种子由充种口落入充种腔内,排种盘与后壳体紧密贴合组成气室,由风机提供负压将种子吸附在排种盘的吸孔上,随着排种盘的转动沿顺时

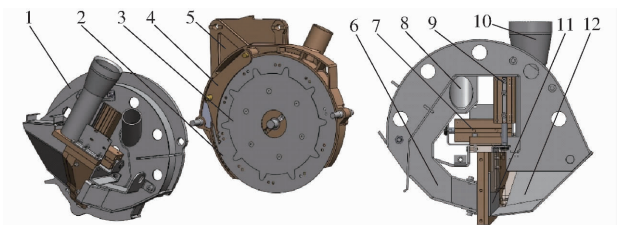
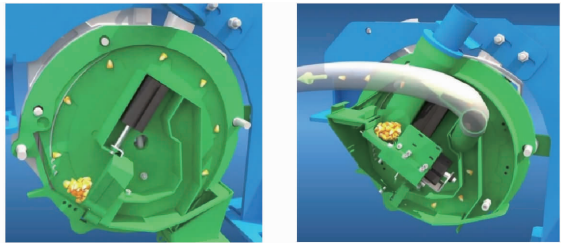


图 1 种腔自净型气吸式精量排种器结构图

Fig.1 Structure diagram of air-suction precision seed-metering device with self-clearing seed box

1. 前壳体 2. 排种盘 3. 搅种盘 4. 刮种板 5. 后壳体 6. 清种腔 7. 充种气缸 8. 清种口 9. 清种气缸 10. 充种口 11. 清种闸门 12. 充种腔



(a) 排种过程

(b) 清种过程

图 2 种腔自净型气吸式精量排种器工作过程示意图

Fig.2 Working process diagrams of air-suction precision seed-metering device with self-clearing seed box

针方向旋转到落种区,此时负压消失,种子靠自重落入播种单体完成播种,当到达小区终点需要清种时,由程序控制清种气缸带动清种闸门打开,此时清种腔与充种腔联通,剩余种子靠自重及风机提供的负压被吸入清种腔,清种完成后清种闸门关闭,充种气缸打开,下一小区的种子落入充种腔,至此完成一个循环,以此类推直至完成所有小区的播种作业。

如图 2a 所示,排种器安装在播种单体上时,充种腔底面与水平方向呈一夹角,该角度大于玉米种子的休止角,保证当清种闸门打开时,充种腔内的剩余种子在重力作用下会滑向清种腔,并借助负压的作用经过清种腔被吸出排种器,完成清种过程,即使有个别种子由于某些原因又滑落回清种腔,也不会再进入充种腔造成混种,这种设计可以保证充种和清种过程互不干扰,满足育种试验小区间不得混种的要求。

2 关键部件设计

此排种器是应用于育种试验的播种作业,而育种试验所播种的种子与实际粮食生产中所播种的种子在形状大小上有差异。首先对不同熟期、不同种业公司以及不同育种试验阶段的种子进行考察,发现同一片试验地中不同小区所播种的种子性状差异较大(表 1),排种器关键部件技术参数的确定需要考虑这一因素。

表 1 不同试验阶段的种子形状规格

Tab.1 Seed shape specification for different test stages

试验阶段	粒形	mm		
		长度	宽度	高度
材料选育试验	圆粒	6~8	6~8	6~8
	扁平粒	7~10	5~8	3~6
品比试验	圆粒	8~9	6~11	5~9
	扁平粒	10~14	5~11	5~7
生产试验	扁平粒	10~14	5~11	4~7
早熟期	圆粒	6~10	6~10	6~10
	扁平粒	7~10	5~8	3~6
中晚熟期	圆粒	6~9	6~11	5~9
	扁平粒	10~14	5~11	5~7

2.1 刮种板

刮种板的作用是将排种盘吸孔上吸附的多余种子刮去,降低重播率,为避免在清种过程完成后仍有刮落的种子落回充种腔造成混种,刮种位置要尽量靠近充种腔;刮种板选用凹凸形曲线工作面,可以对种子产生间断撞击力,并经多次作用,保证刮种效果;采用偏心圆调节机构^[6],可调节刮种板工作面与种子之间的距离,刮种板工作面外沿与吸孔中心线之间的距离在 0~4 mm 之间可调。

2.2 排种盘

按照国家品种试验的要求^[7]及育种单位的需求(采用一穴双粒或多粒播种后期间苗的方式以保证试验小区的出苗率,降低播种质量、土壤条件及环境因素等客观条件对小区试验的影响,降低试验小区的报废率),分别设计了单粒和双粒两种排种盘形式,由于播种后要间苗,为方便间苗,双粒种子要先后落下,要有 5~10 cm 的间距,因此采用同分度圆前后排列的双吸孔布置形式,双吸孔间隔角度选取 5°(图 3)。

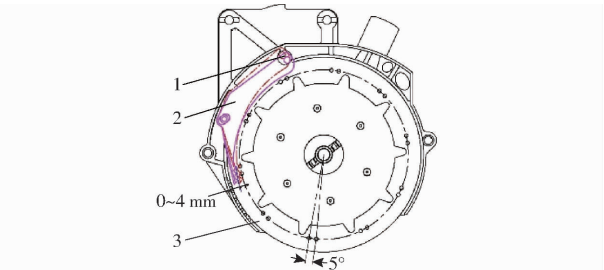


图 3 排种器刮种板及排种盘结构图
Fig.3 Structure diagram of scraping device and metering plate
1. 偏心圆调节轴 2. 刮种板 3. 排种盘

吸孔直径需要根据种子尺寸来确定,由试验方法确定的吸孔直径公式为^[8]

$$d = (0.64 \sim 0.66)b \tag{1}$$

式中 b ——种子平均宽度,mm
结合表 1,最终选定吸孔直径为 4.5 mm。

吸孔数量与播种速度、株距等因素有关,通常设计中要求在不影响吸种、刮种和落种的前提下,吸孔数量尽量多,但由于小区播种的特殊性,每一小区单行内播种的种子数量非常少,种子数量与小区行长、播种密度有关,在 5 m 行长、60 000 株/hm²密度的单粒播种小区试验中,单行播种量只有 18 粒,由于要保证清种效果,小区播种机的作业速度通常小于 3.6 km/h,综合以上因素,吸孔数量选定为 10 个。

2.3 搅种盘

2.3.1 种子吸附过程的动力学分析

在育种试验中,每一行的播种量非常少,吸孔对种子的吸附效果决定了漏播率。

从吸孔的吸附力作用在种子的瞬间开始,种子与旋转的种盘之间便产生了牵连运动,因此可将种子看作动点,旋转的种盘看作动系,进行种子吸附过程的动力学分析,假设种子开始被吸孔吸附时具有沿排种盘切向的初速度,种子的速度、加速度及受力分析如图 4 所示。

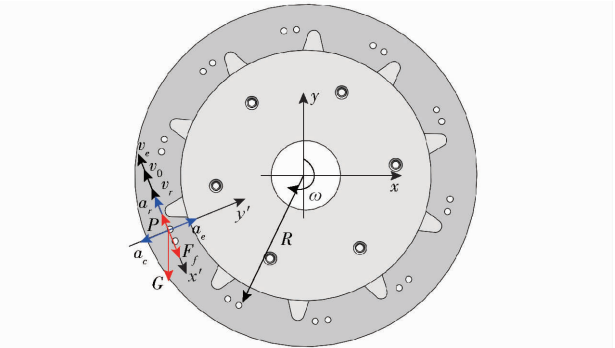


图 4 种子速度、加速度及受力分析图
Fig.4 Diagram of seed velocity, acceleration and force analysis

当牵连运动为转动时,种子的绝对加速度为相对加速度、牵连加速度和科氏加速度的矢量和,相对加速度是由吸附力作用在种子上产生的,因此假设吸附力作用在种子的时间为 t ,相对加速度 a_r 可表示为

$$a_r = \frac{v_r}{t} \tag{2}$$

其中
$$v_r = v_e - v_0 \tag{3}$$

式中 v_r ——相对速度,m/s
 v_e ——牵连速度,m/s
 v_0 ——初始速度,m/s

牵连加速度为动系的加速度,即排种盘的转动加速度,因此牵连加速度 a_e 可表达为

$$a_e = R\omega^2 \tag{4}$$

式中 R ——排种盘半径,m
 ω ——排种盘转动角速度,rad/s

种子的牵连角速度与相对速度呈 90° ，因此科氏加速度表达为

$$a_c = 2\omega v_r \tag{5}$$

结合式(2)、(4)、(5)可得出种子绝对加速度 a_a 的表达式为

$$a_a = \sqrt{\left(\frac{v_e - v_0}{t}\right)^2 + (R\omega^2)^2 + [2\omega(v_e - v_0)]^2} \tag{6}$$

种子受到的合力 F_a 为吸孔的吸附力 P 、种子受到种群内的摩擦力 F_f 以及种子重力 G 的矢量和,即

$$\boldsymbol{F}_a = \boldsymbol{P} + \boldsymbol{F}_f + \boldsymbol{G} \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{F}_a = m\boldsymbol{a}_a \tag{8}$

式中 m ——种子质量,kg

结合式(6)~(8),种子绝对加速度 a_a 会随着种子初始速度 v_0 的增大而减小,种子所受到的合力 F_a 也会减小,在摩擦力 F_f 与重力 G 不变的情况下,吸附力 P 也会减小,也就使得吸附种子所需的负压减小。因此适当提高种子的初始速度 v_0 有利于种子吸附,可降低漏播的可能性。

鉴于以上分析,设计了一种齿形搅种盘,紧贴排种盘安装,并与排种盘同步旋转,沿排种盘旋转方向,每个齿位于吸种孔的前方,保证吸孔在到达种腔进行充种时,种群已经被搅动起来,使种子获得初始速度,同时种群离散化也可以减小种群内的摩擦力

F_f ,提高充种性能^[9-11]。

为验证齿形搅种盘的种群扰动效果,本文借助离散元仿真软件 EDEM 进行种群扰动效果的仿真分析。

2.3.2 玉米籽粒建模及运动仿真

根据表 1 选取长、宽、高为均值的扁平粒为研究对象,利用 SolidWorks 建立玉米籽粒的三维模型,导入 EDEM 软件中,通过多球面组合的填充方式,完成一个与种子模型外轮廓较为吻合的表面组作为一个颗粒,模拟颗粒如图 5 所示。



图 5 玉米籽粒仿真模型
Fig. 5 Simulation model of corn seed

为了提高仿真速度,将排种器简化为前壳体、搅种盘、排种盘 3 部分,导入 EDEM 软件,相关参数设置参考文献[12],如表 2 所示。根据小区播种机的作业速度不超过 3.6 km/h,排种盘与搅种盘转速设置为 22 r/min。

表 2 玉米种子与搅种盘物性参数
Tab. 2 Physical parameters of corn seed and seed churning plate

项目	泊松比	剪切模量/ Pa	密度/(kg·m ⁻³)	弹性恢复系数 (与玉米)	滑动摩擦因数 (与玉米)	滚动摩擦因数 (与玉米)
玉米	0.40	1.37×10 ⁸	1 197	0.284	0.342	0.054 5
搅种盘	0.28	7.50×10 ¹⁰	8 000	0.615	0.467	0.031 7

仿真采用 Hertz - Mindlin 接触模型,根据小区播种的特点,将仿真颗粒数量设为 100 粒,时间步长设置为 1×10^{-6} s,总时间设置为 8 s,对有搅种盘和无搅种盘两种情况进行仿真,仿真过程如图 6 所示。

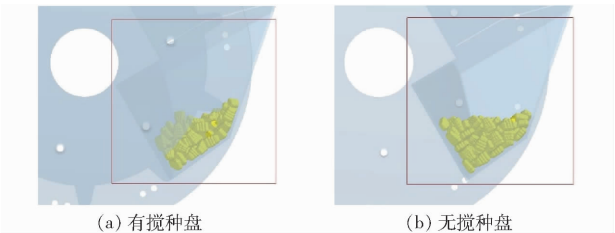


图 6 种群扰动仿真模型
Fig. 6 Simulation models of churning corn seeds

充种区内的种子群形成的圆心角为充填角 γ ,在充种量一致时,充填角越大,则充种弧段越长,说明种群此时的厚度越小,种子流动性相对越好^[13],

由图 6 可看出,有搅种盘的充填角明显大于无搅种盘时,为了更准确描述搅种盘对种群的扰动性,对仿真数据进行进一步分析。

2.3.3 仿真结果分析

搅种盘对种群的扰动会增大颗粒的离散程度,使得种子与种子、种子与种盘间不断碰撞,产生不规则运动,因此种群颗粒与种盘的平均距离可以反映种群的扰动强度^[14]。提取 2~8 s 的时间步长下对种群颗粒与种盘的平均距离进行考察,如图 7 所示。

由图 7 可知,在无搅种盘的情况下,种群与排种器的平均距离几乎没有变化,有搅种盘的情况下,种群与种盘的平均距离波动较为明显,说明搅种盘对种群的离散具有持续和剧烈的作用,能对种群起到持续有效的扰动,有助于种子吸附于种盘上。

为进一步证明搅种盘扰动种群有助于种子吸

附,对双粒排种盘的运种过程进行了仿真模拟,如图 8 所示,在有搅种盘的情况下,排种盘型孔吸附种子的情况明显好于无搅种盘的情况。

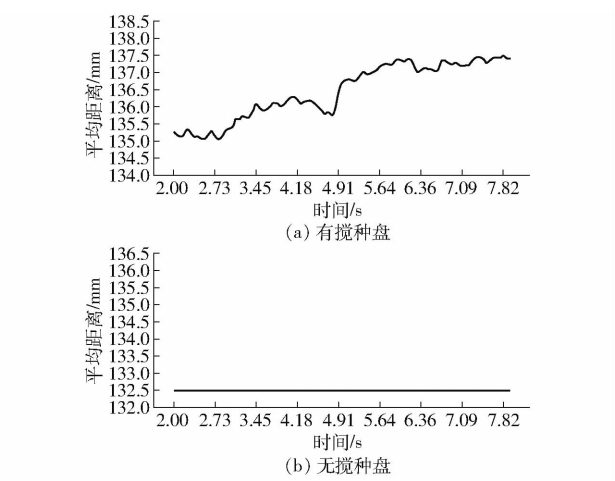


图 7 种子与排种盘平均距离随时间步长的变化曲线
Fig. 7 Changing curves of average distance between seed and seed metering plate with time

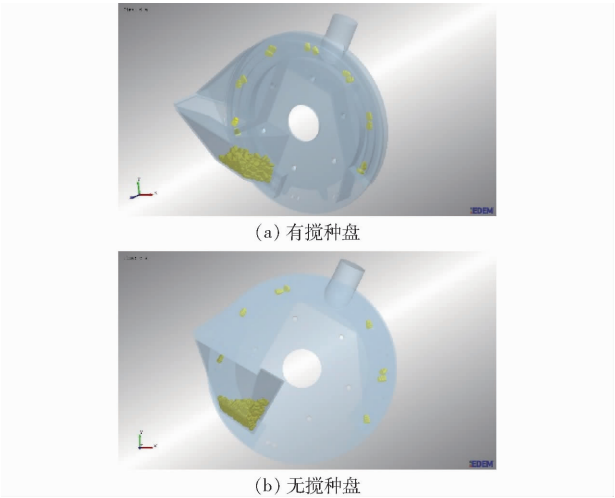


图 8 排种过程仿真模型
Fig. 8 Simulation models of seeding process

3 试验因素选择与分析

影响气吸式排种器工作性能的因素除了吸孔数量、刮种板位置、吸孔直径外,还包括排种盘转速和气吸室真空度,结合小区播种作业的特点选择排种盘转速和气吸室真空度,在 JPS-12 型排种器性能检测试验台上进行试验,以确定排种器的最佳工作参数组合。

3.1 排种盘转速

种子在脱离吸孔后的运动如图 9 所示,根据文献[15],排种盘转速与机器前进速度、吸种盘直径具有相关性。不同于大田播种机,相对于播种效率,小区播种机更注重播种质量,因此为保证吸种和清种质量,机器前进速度通常不超过 3.6 km/h,即 $v \leq 1$ m/s,清种时间与小区间隔道长度有关,即

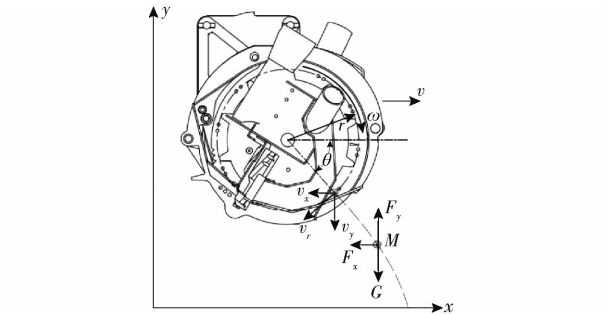


图 9 种子运动与受力分析
Fig. 9 Seeds motion and force analysis

$$t_c = \frac{s}{v}$$
 (9)

式中 t_c ——清种时间
 s ——小区间隔道长度
 v ——机器前进速度

育种试验中小区间隔道长度通常设置为 0.8 ~ 1 m,取 $v = 1$ m/s 时,清种时间 t_c 为 0.8 ~ 1 s,若 $v > 1$ m/s,小区间隔道为 0.8 m,清种时间 t_c 则不足 0.8 s,无法保证清种率达到 100%。

按照机器前进速度 1 m/s 安排排种器试验,播种密度与排种器转速的关系为

$$\begin{cases} D = \frac{10\,000}{\rho L} \times 10\,000 \\ n = \frac{100v}{Da} \times 60 \end{cases}$$
 (10)

式中 D ——株距,cm
 ρ ——播种密度,株/hm²
 L ——行距,cm
 n ——排种器转速,r/min
 a ——吸孔数量,个

行距 L 取 60 cm、吸孔数量 a 取 10 时,得到播种密度与排种盘转速的关系如表 3 所示。

表 3 播种密度与排种盘转速的关系			
Tab. 3 Relationship between sowing density and speed of metering plate			
序号	密度/(株·hm ⁻²)	株距/cm	排种盘转速/(r·min ⁻¹)
1	60 000	27.5	21.8
2	67 500	25.0	24.0
3	75 000	22.5	26.7
4	82 500	20.0	30.0
5	90 000	17.5	34.3
6	97 500	15.0	40.0
7	105 000	12.5	48.0

3.2 真空度

3.2.1 清种真空度

为了保证 100% 的清种率,因此先确定可满足播种作业要求的清种真空度。一般种子剩余量会小

于 10 粒,因此先在排种器试验台上进行清种试验,种子粒数 10 粒,清种时间设定为 1 s,最后确定清种真空度 $p_c \geq 3 \text{ kPa}$ 。

清种的过程可以看作是类似于风力输送的气固两相流问题,由于剩余种子数量很少,即颗粒相在流场所占比例较小,颗粒间的相互作用对流场影响较小,流场对颗粒的作用主要为曳力,因此本文利用 Fluent 软件的离散相模型对清种阶段进行仿真分析。

首先在 SolidWorks 中绘制清种腔流场模型并导入 GAMBIT 软件中划分网格,定义边界类型,压力入口为种腔最左侧上边界面,压力出口为清种腔右侧圆管上边界,检查网格质量,等角失真低于 0.5 的网格数为 99.32% (图 10),表明网格划分质量很好。

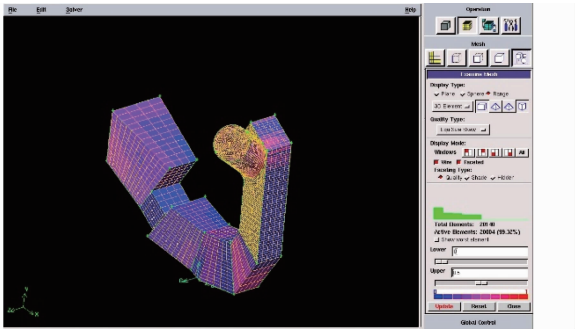


图 10 清种腔流体区域网格划分

Fig. 10 CFD mesh region

将网格导入 Fluent 中,参考 Fluent 软件帮助及文献[16-19],选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,选择默认的湍动能 k 和湍动耗散率 ε ,压力入口边界中设置相对压力为零,压力出口边界中设置相对压力为所需真空度,即 3 kPa;同时启动 Discrete Phase Model,添加 injections,类型选择 single,输入初始坐标值创建 10 个颗粒,由于玉米为非圆面颗粒,因此选用 nonspherical 的物理模型,玉米颗粒的球形度 φ 可表达为

$$\varphi = \left(\frac{d_s}{d_v} \right)^2 \tag{11}$$

式中 φ ——球形度

d_s ——等表面积直径, m

d_v ——等体积直径, m

利用 2.3.2 节中的玉米籽粒三维模型,根据式(11)计算出 $\varphi = 0.878$,对清种过程进行仿真模拟 (图 11a)。

按播种机行走速度 1 m/s,区间道长度 1 m 来计算,为保证不发生混种,即需要在 1 s 内将剩余种子清出。最终得出仿真结果 (图 11b),在出口压力 3 kPa 的初始条件下,考察 10 粒种子从出口逃逸的

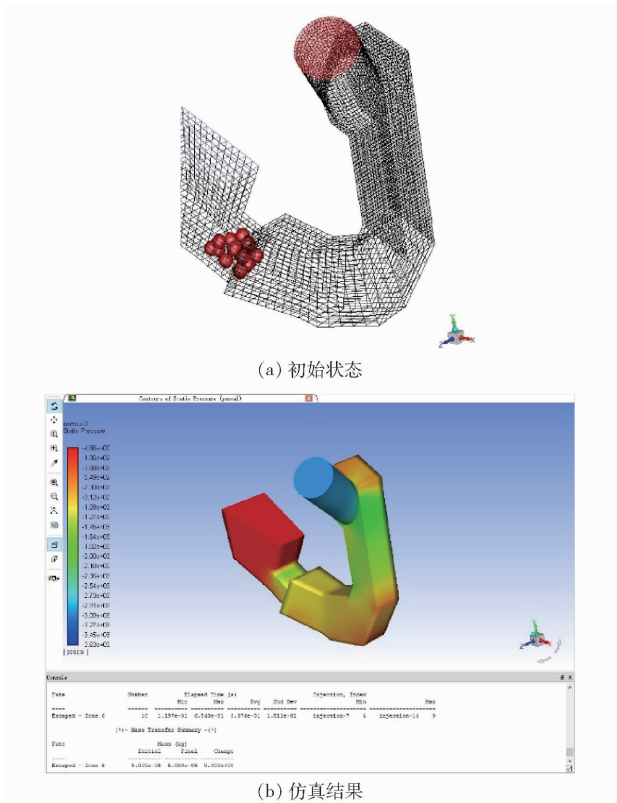


图 11 清种过程仿真模拟

Fig. 11 Simulation of clearing seed

时间,最长为 0.654 s,小于 1 s,即 1 s 内就可将剩余种子从种腔中全部清出,也就是在两试验小区间隔道内就可清净余种,保证不发生混种。

3.2.2 吸种真空度

吸室所需真空度^[20]最大值为

$$H_{\max} = \frac{80K_1K_2mgC}{\pi d^3} \left(1 + \frac{v_p^2}{gr} + \lambda \right) \tag{12}$$

其中

$$\lambda = (6 \sim 10) \tan \alpha \tag{13}$$

式中 d ——排种盘吸孔直径, m

C ——种子重心与吸种盘之间的距离, m

v_p ——排种盘吸孔中心处的线速度, m/s

r ——排种盘吸孔分布圆半径, m

g ——重力加速度, m/s²

λ ——种子的摩擦阻力综合系数

α ——种子的自然休止角, rad

K_1 ——吸种可靠性系数

K_2 ——外界条件系数

考虑种子架空或相互碰撞而影响吸种效果, K_1 取 1.8 ~ 2 (一般种子千粒质量小,形状近似球形, K_1 选择较小值),考虑外界振动或冲击对种子吸附的影响, K_2 取 1.6 ~ 2 (种子千粒质量大时, K_2 选大值)。

从式(12)可以看出, $H_{\max}$ 与种子物理特性 (质量、形状及自然休止角)、吸孔直径、排种盘转速、吸孔旋转半径密切相关。由于清种时候清种闸门打

开,使得风机提供的风量会一分为二,吸种负压腔的负压会瞬间减小约 50%(已经试验台试验验证),为了使得已经吸在种盘上的种子不掉落,必须使减小后的负压值亦能满足吸种的需要。综上所述,结合式(12)、排种器设计参数及其他试验因素,先确定真空度范围 6~8 kPa,在试验中进一步分析对排种性能的影响。

4 试验

4.1 试验材料与设备

根据表 1,品比试验种子的规格差异最能代表育种试验中的种子规格范围,因此选用由安徽隆平高科种业公司提供的去年品比试验剩余种子进行试验,将种子分 4 级,1 为大圆粒种子;2 为小圆粒种子;3 为大扁平粒种子;4 为小扁平粒种子(图 12)。

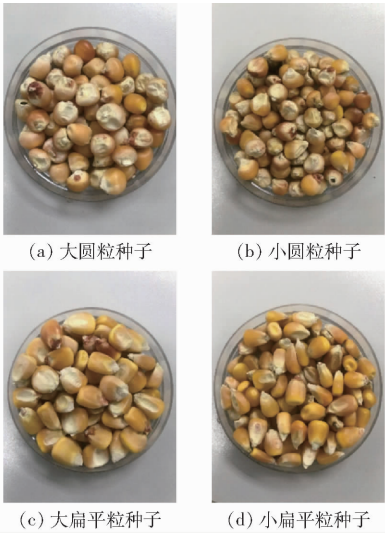


图 12 分级后种子外观图

Fig. 12 Effect diagrmas of seed grading

本试验在 JPS-12 型排种器性能检测试验台上进行(图 13),该试验台可实时监测排种性能,提供精确的种子粒距(测量平均误差 ± 2 mm)、漏播指数、重播指数和合格指数等检测指标,该试验台可自由调节排种器转速、风机真空度以及传送带行进速度。将风机的风管接到自制的二分管上,一头接负压腔的入口,另一头接余种收集筒出口,余种收集筒入口与清种腔入口用风管相连,清种与排种阶段的切换靠人工操作电磁阀来控制,即电磁阀通电时,清种气缸动作,带动清种闸门打开。首先经过试验台架的重复试验验证,当清种闸门打开时,吸种负压腔的压力会减少约一半,为后面试验参数的选择提供了依据。

4.2 试验方法与结果分析

每个小区的播种作业可以分成两个阶段,正常的排种阶段和清种阶段。对每个阶段的排种器工作



图 13 排种器试验现场

Fig. 13 Seed meter testing site

性能分别进行试验验证。试验台测得的试验数据均按照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》的统计方法进行处理。

4.2.1 清种阶段

在清种阶段,清种闸门打开,风机提供的负压将剩余种子清出种腔,此时风机提供的总风量将一分为二,一半用来清种,一半用来维持已吸附在种盘上的种子不掉落,因而此时已经吸附在种盘上的种子所受的负压约为正常排种阶段的 50%,而且运种过程中已无刮种板作用,因此可将此阶段简化为负压减半且无刮种的排种阶段进行试验。

选取真空度为因素,分别对 4 种规格的种子进行单因素试验(3 次重复取平均值),排种器转速选择表 3 中的最大值即 48 r/min,单孔盘,选取吸孔直径 4.5 mm,吸孔数 10,考察漏播率、重播率和粒距合格指数。试验结果如表 4 所示。

表 4 排种器性能指数

Tab. 4 Qualified index of air-suction seeder %

分级规格	真空度/kPa	漏播率	重播率	合格指数
小扁平粒	3.0	4.47 $\pm$ 0.54	4.32 $\pm$ 0.29	91.21 $\pm$ 0.16
	3.3	4.33 $\pm$ 0.52	4.38 $\pm$ 0.25	91.29 $\pm$ 0.14
	3.5	3.97 $\pm$ 0.44	4.57 $\pm$ 0.37	91.46 $\pm$ 0.12
	3.8	3.24 $\pm$ 0.67	5.00 $\pm$ 0.34	91.76 $\pm$ 0.18
	4.0	3.15 $\pm$ 0.58	5.49 $\pm$ 0.26	91.36 $\pm$ 0.10
小圆粒	3.0	3.16 $\pm$ 0.46	1.46 $\pm$ 0.31	95.38 $\pm$ 0.34
	3.3	3.05 $\pm$ 0.53	2.01 $\pm$ 0.22	94.94 $\pm$ 0.26
	3.5	2.69 $\pm$ 0.51	2.89 $\pm$ 0.23	94.42 $\pm$ 0.31
	3.8	2.27 $\pm$ 0.42	3.42 $\pm$ 0.29	94.31 $\pm$ 0.22
	4.0	1.89 $\pm$ 0.57	3.79 $\pm$ 0.32	94.32 $\pm$ 0.25
大圆粒	3.0	10.43 $\pm$ 0.34	1.15 $\pm$ 0.12	88.42 $\pm$ 0.28
	3.3	8.98 $\pm$ 0.29	1.26 $\pm$ 0.20	89.76 $\pm$ 0.36
	3.5	8.56 $\pm$ 0.32	1.27 $\pm$ 0.16	90.17 $\pm$ 0.43
	3.8	6.97 $\pm$ 0.43	1.31 $\pm$ 0.23	91.72 $\pm$ 0.29
	4.0	6.12 $\pm$ 0.51	1.32 $\pm$ 0.11	92.56 $\pm$ 0.19
大扁平粒	3.0	12.12 $\pm$ 0.26	1.33 $\pm$ 0.10	86.55 $\pm$ 0.33
	3.3	11.23 $\pm$ 0.34	1.41 $\pm$ 0.13	87.36 $\pm$ 0.45
	3.5	9.56 $\pm$ 0.37	1.56 $\pm$ 0.18	88.88 $\pm$ 0.51
	3.8	8.94 $\pm$ 0.29	1.61 $\pm$ 0.26	89.45 $\pm$ 0.26
	4.0	7.75 $\pm$ 0.32	1.77 $\pm$ 0.20	90.48 $\pm$ 0.44

对试验结果进行方差分析,用 F 检验法进行显著性检验,得到真空度因素对漏播率、重播率和合格

指数的影响。

结果表明,真空度在 3 ~ 4 kPa 的范围内,对小扁平粒和小圆粒而言,真空度对重播率影响显著,对漏播率影响不显著,而且小扁平粒与小圆粒相比,真空度对小圆粒的重播率影响更显著,对大扁平粒和大圆粒而言,真空度对漏播率影响极显著,对重播率影响不显著,真空度对这几种粒型种子的合格指数影响都显著。结合试验数据分析原因发现,在此范围内,随压力变化,真空度越小,大粒种子更易漏播,而随着真空度增大,小粒种子更易重播。在保证 100% 清种的前提下,清种阶段的吸种腔真空度在 3 ~ 4 kPa 之间时,已吸附在吸孔上的种子仍能正常播种,且各项指标均符合国家标准^[21]要求,因此在实际作业时,尽量保证风机提供的真空度大于 6 kPa。

4.2.2 排种阶段

由于小区播种机的作业速度较慢,排种盘转速对播种效果的影响优先级不高,因此根据表 3 选取最大的排种器转速作为试验参数;在育种试验中,对漏播率的要求要优先于重播率和合格率,因此根据表 4,选取漏播率较高的大扁平粒种子作为考察对象,进一步测试排种器在正常排种阶段的性能。

为满足清种阶段的清种效果,结合 4.2.1 节的试验结果,吸种负压腔的真空度选择范围为 6 ~ 8 kPa,选取 6、7、8 kPa 作为因素水平;同时根据表 4 的试验结果可知,此时吸室真空度较清种阶段增大一倍,因此刮种板位置在正常排种阶段对排种器的各项性能指数影响较大,将刮种板位置按照刮种板凸齿距离吸孔分布圆的 2 ~ 4 mm 范围内划分为 3 个等级,即 2、3、4 mm 作为因素水平。试验结果如表 5 所示。



图 14 排种器田间试验
Fig. 14 Field trial

配套拖拉机是约翰迪尔 484 型和约翰迪尔 554 型,行走速度分别为 2.7、3 km/h,PTO 转速均采用 540 r/min,在铁岭市采用单粒精播(82 500 株/hm²),在济源市采用双粒精播(67 500 株/hm²)。

压力表测量吸种腔真空度,在正常排种阶段,真空度为 8 kPa,在清种阶段,真空度下降到约 4 kPa,与台架试验情况吻合。

出苗情况如图 15 所示,2018 年春季铁岭地

表 5 排种器性能指数

Tab. 5 Qualified index of air-suction seeder %				
真空度/ kPa	刮种板 位置/mm	漏播率	重播率	合格指数
8	4	0.66	3.88	95.46
	3	0.60	3.06	96.34
	2	0.98	1.74	97.28
7	4	0.60	3.69	95.71
	3	0.71	2.21	97.08
	2	0.80	1.14	98.06
6	4	0.72	3.12	96.16
	3	0.81	1.52	97.67
	2	0.99	0.44	98.57

试验结果表明,在真空度 6 ~ 8 kPa、刮种板工作面距离吸孔中心 2 ~ 4 mm 范围内时,排种器漏播率小于 1%,重播率小于 4%,合格指数大于 95%,满足国家标准^[21]要求。在真空度逐渐增大时,刮种板工作面距离吸孔中心越近,重播率越低,但漏播率略有升高,反之趋势相同;同一真空度条件下,刮种板位置对漏播率的影响较小,对重播率的影响较大,符合育种试验的特点:即漏播率越小越好,重播率只要不超过国家标准则可接受,该试验结果为实际播种作业中调试机具提供了参考。

5 田间试验

为验证排种器在实际播种作业中的效果,将一台进口小区条播机进行改装,使用本文设计的排种器进行播种作业(图 14),试验用种子由安徽隆平高科种业有限公司提供,用于该公司 2018 年玉米品比试验,试验设计及播种方式由该公司制定,试验地点分别为辽宁省铁岭市和河南省济源市。

区旱情严重,虽然对出苗率略有影响,但隆平公司对两块试验地的出苗情况考察之后表示,各个小区缺苗率均小于 15%,苗期未发生缺苗数量超过试验要求而造成的试验报废情况,说明排种器的漏播率满足设计要求。但在试验中也发现,由于各小区种子大小差异较大,而播种过程中的真空度以及刮种板位置无法调整,有些小区重播率高。



图15 出苗效果

Fig. 15 Emergence effect

6 结论

(1)设计了用于玉米育种试验的种腔自净型气吸式精量排种器,该排种器具有充种腔与清种腔分离的结构形式,保证排种与清种过程相互独立,自净率达到100%。

(2)结合动力学分析及仿真模拟手段,验证了搅种盘的种群扰动作用,验证了在种腔内种子数量较少的情况下,搅种盘具有提高吸孔对种子吸附能力的作用;对清种过程进行仿真模拟,证实了在播种机作业速度小于3.6 km/h、剩余种子量小于10粒、清种真空度大于3 kPa的情况下,在两试验小区间隔道内即可将余种清净,不发生混

种。

(3)试验台试验结果表明,在清种阶段,当负压腔真空度大于3 kPa时,已吸附在种盘上的种子仍能正常完成播种,且无论种子形状大小,排种器性能指标均达标;在播种机作业速度小于3.6 km/h、真空度6~8 kPa、刮种板工作面距离吸孔中心2~4 mm的条件下,排种器的漏播率小于1%,重播率小于4%,合格指数大于95%,表明排种器各项指标均符合国家标准,能实现有效排种,刮种板位置的调整对排种器性能影响最显著。

(4)田间试验表明,在播种机作业速度不超过3.6 km/h的条件下,本文设计的种腔自净型气吸式精量排种器满足育种试验的播种要求。

参 考 文 献

- [1] 奥地利 Wintersteiger 公司. 产品介绍[EB/OL]. (2016-01-01)[2018-12-27]. <https://www.wintersteiger.com/zh/植物育种和研究/产品/产品范围/小区单粒播种机/60-Dynamic-Disc-3-point-frame>.
- [2] 美国 Almaco 公司. 产品介绍[EB/OL]. (2016-01-01)[2018-12-27]. <https://www.almaco.com/store/c1/row-crop-planting-systems/p4/seedpro-planter/>.
- [3] 杨薇,李建东,方宪法,等. 玉米育种播种机械化的国内外现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2018, 8(6):9-15.
YANG Wei, LI Jiandong, FANG Xianfa, et al. Domestic and foreign current situation and development trend of seeding mechanization in maize breeding[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(6):9-15. (in Chinese)
- [4] 刘曙光,尚书旗,杨然兵,等. 小区播种机的发展分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(3):237-241.
LIU Shuguang, SHANG Shuqi, YANG Ranbing, et al. Analysis of plot seeder development[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3):237-241. (in Chinese)
- [5] 周家鹏. 小区玉米单粒精密点播机的设计与试验研究[D]. 青岛:青岛农业大学,2016.
ZHOU Jiapeng. Design and test of corn grain precision jukeboxes[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [6] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,1998:360.
- [7] 中华人民共和国农业部. NY/T 1209—2006 农作物品种区域试验技术规程 玉米[S]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [8] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,1998:358.
- [9] 张涛,刘飞,赵满全,等. 基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22):27-35.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22):27-35. (in Chinese)
- [10] 刘月琴,赵满全,刘飞,等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7):65-73.
LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):65-73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160710&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.010. (in Chinese)
- [11] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):62-69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):62-69. (in Chinese)
- [12] 王美美,王万章,杨立权,等. 基于 EDEM 的玉米子粒建模方法的研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(1):80-84.
WANG Meimei, WANG Wanzhang, YANG Liquan, et al. Research of discrete element modeling method of maize kernel

- based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018,52(1):80–84. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 刘文忠,赵满全,王文明,等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(9):133–138. LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9):133–138. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 刘俊杰,杨存志,杨旭,等. 玉米精量排种器性能分析与对比试验[J]. 农业科技与装备,2015(5):44–47,51. LIU Junjie, YANG Cunzhi, YANG Xu, et al. Performance analysis of maize precision seed metering device and contrast test [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2015(5):44–47,51. (in Chinese)
- [18] 杨善东,张东兴,刁培松,等. 侧正压玉米排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊1):8–13. YANG Shandong, ZHANG Dongxing, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of side positive pressure seed metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(Supp.1):8–13. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,1998:357.
- [21] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 10293—2013 单粒(精密)播种机技术条件[S]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [22] 张昆,衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):78–86. ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):78–86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170710&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 刘佳,崔涛,张东兴,等. 玉米种子分级处理对气力式精量排种器播种效果的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(9):109–113. LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9):109–113. (in Chinese)
- [25] KARAYEL D, BARUT Z B, ÖZMERZI A. Mathematical modelling of vacuum pressure on precision seeder[J]. Biosystems Engineering,2004,87(4):437–444.
- [26] 陈立东. 气吸式排种器性能参数设计及其对排种质量影响的试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2006. CHEN Lidong. Design of performance parameters of air-suction seed metering device and experimental study on seed metering quality[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2006. (in Chinese)
- [27] 丁力,杨丽,武德浩,等. 基于 DEM – CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):48–57. DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM – CFD coupling method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11):48–57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006. (in Chinese)
- [28] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):75–86,139. JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):75–86,139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [29] 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/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):112–118. WANG Yecheng, JIN Yadong, LUO Sibao, et al. Design and experiment of centralized precision soybean seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):112–118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180613&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.013. (in Chinese)