

重力辅助充种盘室同步气吸式排种器性能分析

颜丙新 张东兴 杨 丽 崔 涛 钟翔君 李玉环

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为探究重力辅助对盘室同步气吸式精量排种器充种性能的影响,以盘室同步气吸式精量排种器为载体,对其充种过程进行了受力分析,建立了重力辅助充种受力数学模型,结果表明:型孔充填过程中,待充种子重力在排种盘径向的分量与气流曳力方向一致;已充种子脱离种群过程中,种子重力沿径向分量与压力梯度力方向一致,种子重力对充种有辅助作用。运用 EDEM (Engineering discrete element method) 软件仿真分析了 300、600、900、1 200 粒种群数量条件下,待充种子对排种盘平均法向力随低、中、高 3 种不同充种区域变化的影响,仿真结果表明:种群数量 300 粒时,各区域平均法向力随区域位置的变化不明显,种群数量为 600、900、1 200 粒时,平均法向力随区域位置的变化规律一致,此时种群数量对充种效果影响可忽略。对仿真结果进行试验验证的结果表明,盘室同步气吸式精量排种器台架试验 3 个区域漏充率由大到小为:低位、中位、高位。通过盘室同步气吸式精量排种器重力辅助充种和无重力辅助充种对比试验表明:重力辅助充种下,排种器作业风压 3 ~ 5.5 kPa 时,合格指数均高于 94%;无重力辅助充种情况下,排种器作业风压 6 kPa 才开始满足国标需要,重力辅助充种显著降低了排种器作业风压需求,提高了作业质量。

关键词: 玉米; 气吸式排种器; 盘室同步; 重力辅助; 充种性能

中图分类号: S223.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0117-08

Performance Analysis of Gravity Assist Filling Precision Seed-metering Device with Synchronously Rotating Seed Plate and Vacuum Chamber

YAN Bingxin ZHANG Dongxing YANG Li CUI Tao ZHONG Xiangjun LI Yuhuan

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the influence of gravity assist on the filling performance of the vacuum precision seed-metering device with synchronously rotating seed plate and vacuum chamber, taking the vacuum precision seed-metering device as the carrier, stress analysis of filling process was carried out, and mathematical model of gravity-assisted filling was shown. The results showed that gravity radial component along the seed tray was consistent with direction of dragging force, during the filling process; gravity radial component along the seed tray was consistent with direction of pressure gradient force, during filled seeds detachment process from population. Effects of different numbers of seeds to be filled seed on average normal force of seed tray under low, medium and high states were analyzed by simulation using engineering discrete element method (EDEM) software. Simulation results showed that average normal force was not changed significantly within low, medium and high states under population of 300; the average normal force was varied within low, medium and high states under population of 600, 900 and 1 200, the influence of the population on the filling effect can be neglected. Laboratory tests results showed that missing index of seed-metering device from big to small was satisfied as low condition, medium condition and high condition. Comparison test between gravity-assisted filling and non-gravity-assisted filling of the seed-metering device showed that qualified index was above 94% under operating pressure of 3 ~ 5.5 kPa with gravity-assisted filling, which met national standard under operating pressure

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700703)、现代农业产业技术体系建设项目(CARS-02)和农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室项目

作者简介: 颜丙新(1988—),男,博士生,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: ybx0122@126.com

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail: yangli@cau.edu.cn

above 6 kPa with no gravity-assisted. Gravity-assisted filling significantly reduced operating pressure demand and improved the quality of work.

Key words: maize; air-suction metering device; synchronous seed plate and chamber; gravity-assisted; filling effect

0 引言

玉米精量播种技术作为提高玉米产量的重要手段被广泛应用^[1-2],精量播种机是实现精量播种作业的重要工具,排种器作为精量播种机的核心部件,其工作性能直接影响播种质量^[3]。目前国内玉米播种常用的排种器有机械式排种器和气力式排种器。机械式排种器因存在作业速度不高、对种子形状和尺寸要求严格、播种单粒率有待改善等问题,在规模化生产中逐渐被气力式排种器取代^[4]。气力式排种器主要有气吸式、气吹式、气压式和中央集排式等,其中气吸式排种器相对其他排种器在国内应用最为广泛。

气吸式排种器作业效果主要体现在:充分充种、有效清种和准确投种。其中充分充种是排种器作业的基本保障^[5-6]。

国内外学者对影响气力式排种器充种性能的因素进行了大量研究,李林^[7]对气吸式排种器种子吸附条件进行了理论研究,并确定了影响垂直圆盘型气吸式排种器性能的因素为空气室真空度,而空气室真空度与种子自身的物理特性、排种盘吸孔处线速度和吸种孔径等因素有关;刘彩玲等^[8]发现水平吸盘式水稻育秧播种装置的吸种真空度与吸附力和压力梯度呈线性相关关系,吸种最小吸附力取决于吸孔结构和吸种距离。GUARELLA 等^[9]发现型孔吸附种子的最大距离取决于型孔直径、型孔处压力以及种子的形状和尺寸。王朝辉等^[10-11]通过对气吸滚筒式水稻育秧播种机的研究发现,转速对吸种合格率影响最大,真空度和吸孔直径次之;陈丽梅等^[12]发现真空度不变的条件下,孔径增大,排种性能提高,当孔径达到一定值后,因漏气量的增加,排种性能下降,对水稻种子而言最佳孔径为 2.3 mm。

除对上述排种器结构及工作风压影响排种性能的研究外,近几年相关学者开展了大量借助机械辅助方式改善充种性能的研究^[13-17]。虽在一定程度上改善了气吸式排种器充种效果,但均未在降低充种风压方面有所突破。本文以降低工作风压,提高充种效果为目的,提出一种降低充种过程作业风压需求的重力辅助充种方法,将种子重力由充种阻力转化为充种动力,避免传统机械振动提供额外充种

动力源的结构复杂性问题。

本文以改进设计的周向圆盘排种器为载体,对排种器充种过程进行受力分析,借助 EDEM 仿真手段和台架试验,验证不同充种区域排种器充种性能差异,探明重力辅助对充种性能的影响机理。

1 盘室同步气吸式精量排种器结构和工作原理

如图 1 所示,盘室同步气吸式精量排种器(以下简称排种器)主要由进种口、清种刀、外壳体、周向排种盘(不同于气吸式垂直圆盘排种器,该排种器排种盘型孔均布于圆周方向,如图 2 所示)、卸种刀、进气口、轴承、链轮、排种盘安装壳和前壳体等组成,主要工作区域依次为充种区 I、清种区 II、携种区 III、卸种区 IV 和过渡区 V。

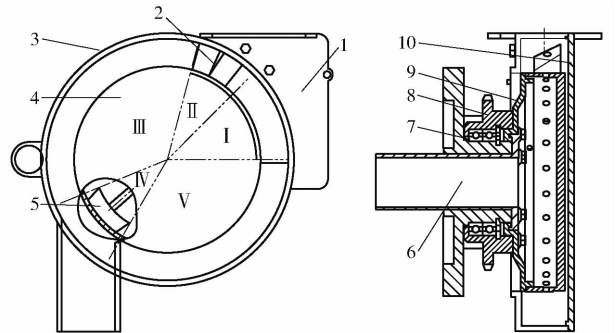


图 1 盘室同步气吸式精量排种器结构图

Fig.1 Structure diagram of precision seed-metering device with synchronously rotating seed plate and vacuum

1. 进种口 2. 清种刀 3. 外壳体 4. 周向排种盘 5. 卸种刀
6. 进气口 7. 轴承 8. 链轮 9. 排种盘安装壳 10. 前壳体
I. 充种区 II. 清种区 III. 携种区 IV. 卸种区 V. 过渡区

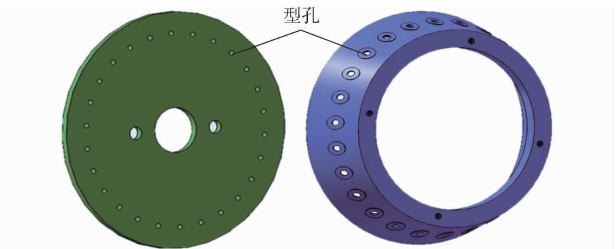


图 2 垂直圆盘与周向圆盘结构简图

Fig.2 Structure diagrams of vertical disc and circumferential disc

排种器工作过程主要由流场运动和颗粒场运动组成。进气口与风机连通,为排种器提供负压,并在排种盘型孔内外形成压差,构成流场运动。种群经

过进种口进入充种区,一粒或多粒种子在重力的作用下填充到型孔处或分散在型孔周边,型孔周围待充种子在流场曳力作用下向型孔运动,并在压力梯度力作用下被吸附,完成充种;随后,种子随排种盘到达清种区,在清种区,沿排种盘侧面圆周方向安装有圆弧清种刀,型孔处种子经过清种刀时受到碰撞干扰,吸附力不占优势的种子离开型孔,在重力作用下克服摩擦,落回充种区,吸附力占优势的种子被保留下来,保证了排种单粒性;单粒种子在持续负压气流的作用下通过携种区,到达投种区。卸种刀从负压腔室内侧封闭型孔,阻断气流,种子失去吸附力,在重力作用下被释放,完成投种,该过程为颗粒场运动过程。排种盘继续旋转经过过渡区,返回充种区,进入下一个工作循环^[18]。

2 充种过程受力分析

排种器充种区种群位于型孔侧上方,有效充种区域发生在与排种盘接近的种层,如图3所示。种子从种群分离可视为两个阶段:待充种子被吸附到型孔;被吸附的种子随排种盘转离种群。分别对上述两种情况进行受力分析。

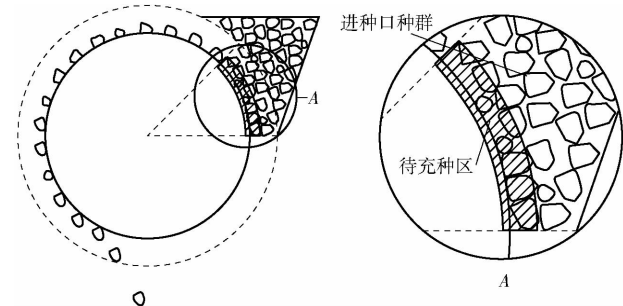


图3 排种器充种区域示意图

Fig.3 Schematic diagram of filling area

待充种子被吸附到型孔过程受力分析:根据流体动力学原理,待充种子主要受气流曳力 F_d 、种群阻力 F_f 、种子重力 G 、上层种群压力 N_t 、下层种群支持力 N_b 和气流浮力作用,由于型孔附近种群集中,空气密度较低,故忽略种子所受浮力。

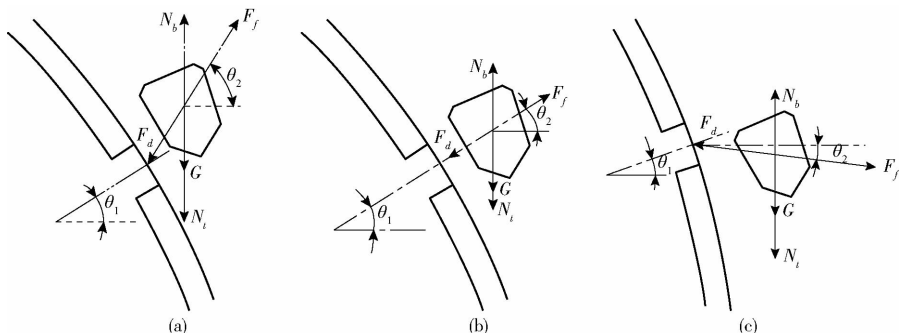


图4 待充种子与型孔位置关系示意图

Fig.4 Positional relationship diagram between seed to be filled and cells

待充种子填充过程初期与型孔位置关系如图4所示,根据其运动方向与排种盘圆周径向夹角的关系可分为3种:运动方向位于径向上侧(图4a)、与径向重合(图4b)和位于径向下侧(图4c)。3种状态在种子充填过程中均为气流曳力克服种群阻力的过程,因此,种子向型孔移动的条件为

$$F_d \geq F_f \quad (1)$$

其中 F_f 是待充种子向型孔移动过程中,上下层种群对待充种子的摩擦力造成的。

$$F_f = \mu(N_t + N_b) \cos \theta_2 \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad N_b = N_t + G \quad (3)$$

气流曳力可表示为

$$F_d = C_d S_A \frac{\rho_q v_q^2}{2} \quad (4)$$

式中 C_d ——阻力因数,与种子形状、表面状态及雷诺数有关

θ_2 ——种群阻力方向与水平线夹角

S_A ——种子迎风面积

ρ_q ——气流密度

v_q ——气流速度

μ ——种子间摩擦因数

整理式(1)~(4)可得

$$\rho_q v_q^2 \geq \frac{2\mu(2N_t + G) \cos \theta_2}{C_d S_A} \quad (5)$$

由式(5)可知,待充种子靠近型孔过程中,种群处气流速度越快,气流密度越大越有利于充种;随种群间相对压力的增加,种群阻力增大,充种难度增大。待充种子所受种群阻力随 θ_2 的增加而减小,种群覆盖排种盘圆周的角度越大越有助于充种。在3种状态下, θ_2 均随型孔中心与排种盘中心连线与水平线夹角 θ_1 的增加而增大,此时,待充种子重力及所受种群压力沿排种盘径向的分量与曳力方向一致,即种群压力及待充种子重力分量对充种起到辅助作用。

当种子被成功吸附后,随排种盘转离种群,如图5所示,此时种子受力有压力梯度力 F_p 、型孔对

种子的支持力 N 、上层种群对种子的压力 N_t 、型孔对种子的摩擦力 F_c 、重力 G 、下层种群对种子的支持力 N_b ，种子随排种盘运动过程中， $N_b = 0$ 。

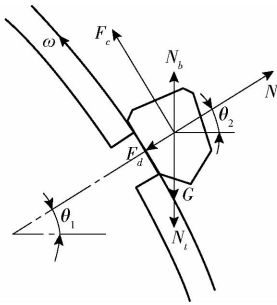


图 5 被吸附种子脱离种群受力分析
Fig.5 Force analysis of filled seeds detachment process from population

此时

$$F_p + (N_t + G) \sin \theta_2 - N = m \omega^2 R = \frac{G \omega^2 R}{g} \quad (6)$$

$$F_c = (N_t + G) \cos \theta_2 \quad (7)$$

$$F_c = \mu_{cp} N \quad (8)$$

式中 μ_{cp} ——型孔与种子之间的摩擦因数

ω ——排种盘角速度

R ——排种盘半径

g ——重力加速度

因此有

$$F_p = \frac{G \omega^2 R}{g} + N - (N_t + G) \sin \theta_2 = \frac{G \omega^2 R}{g} + \frac{(N_t + G) \cos \theta_2}{\mu_{cp}} - (N_t + G) \sin \theta_2 \quad (9)$$

在排种盘恒定转速条件下等式右侧第 1 项保持不变，随着排种盘的转动，排种器充种区域位于第一象限 ($\theta_1 = \theta_2 \in (0, \pi/4)$)， θ_2 逐渐增大，等式右侧第 2 项逐渐减小，等式右侧第 3 项逐渐增加，所以 F_p 随 θ_2 的增大而减小，已充种子重力在径向分量与压力梯度力方向一致，减小了种子脱离种群时的压力梯度力需求。

上述分析表明，待充种子重力的径向分量对充种过程的两个阶段均有辅助作用。待充种子在种群中运动，其受力情况复杂且随排种盘运动变化，无法直接测量其受力。可采用 EDEM 软件根据标定的种子和排种器物理参数，采用离散单元法对种子随排种器的运动和受力情况进行仿真。在 EDEM 仿真中玉米种子为颗粒体集合，玉米种子受力为组成玉米种子各颗粒受力之和，可被分解为切向力和法向力。待充种子作为仿真颗粒集合向排种盘运动，待充种子所受法向力方向与运动方向一致，与曳力方向及压力梯度力方向一致，因此以颗粒间法向力作为仿真观测值。

3 充种过程数值模拟

3.1 接触力模型

离散单元法将离散体看作具有形状和质量的离散颗粒单元的集合，在 EDEM 仿真中玉米种子为颗粒体集合，玉米种子之间的碰撞视为颗粒与颗粒的相互作用。目前常用的颗粒简化模型有：软球模型和硬球模型。为了更好地模拟种子之间的碰撞，以及之后的相互运动，本研究选用软球模型。软球模型将颗粒间的接触简化为弹簧振子的阻尼振动，颗粒所受恢复力和位移成正比，所受粘滞阻力与速度成正比，方向相反，运动方程可表示为

$$m_i \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \quad (10)$$

式中 x ——偏离平衡位置的位移

m_i ——振子质量

c ——弹簧阻尼系数

k ——弹簧弹性系数

在该模型中(图 6)，a、b 两球发生接触碰撞，虚线为 a 球的起始位置， i 点为接触起始点， i_1 点为接触过程中的一点，为了描述接触力，在这个模型中将对两球接触运动分解为法向重叠量和切向重叠量。右侧部分表示法向力，下侧部分表示切向力。对于三维球体颗粒，根据 Hertz 理论，法向力表示为

$$F_{nab} = (-k_n \alpha^{\frac{3}{2}} - C_n v_{ab} n) n$$

切向力表示为

$$F_{tab} = -k_t \delta - C_t v_{ab}$$

式中 α ——法向重叠量

v_{ab} ——两球相对运动速度

n ——从颗粒 a 到颗粒 b 的单位矢量

k_n ——颗粒的法向弹性系数

C_n ——颗粒的法向阻尼系数

δ ——接触点的切向位移

k_t ——颗粒的切向弹性系数

C_t ——颗粒的切向阻尼系数

在数值上， $|F_{tab}| \geq \mu_{ab} |F_{nab}|$ ， μ_{ab} 为 a、b 间动摩

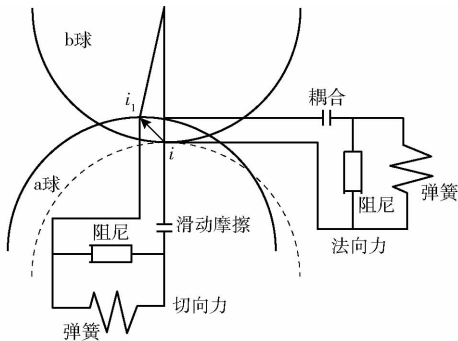


图 6 软球碰撞模型

Fig.6 Soft ball collision model

擦因数。切向力即种子间内摩擦力,是阻碍种子彼此相对运动或有相对运动趋势的主要因素^[19],而法向力是切向力的主要来源。

3.2 仿真方法

为获取待充种子随充种角度 θ_1 的变化,以及所受法向力变化规律,运用 EDEM 提取待充种子对排种盘的法向力。

为简化仿真过程,将排种器结构简化为排种盘、壳体 and 种箱 3 部分。将排种器充种区域等角划分为低位、中位和高位 3 个区域,以过圆心的水平线为起始线,划分区域范围依次是:低位 ($0^{\circ}, 15^{\circ}$)、中位 ($15^{\circ}, 30^{\circ}$)、高位 ($30^{\circ}, 45^{\circ}$)。运用三维软件进行几何建模,并通过 EDEM 多球面填充组成最后的仿真颗粒,如图 7 所示,玉米籽粒采用郑单 958,为提高仿真精度,将 1 000 粒郑单 958 籽粒种子,根据外形和尺寸大小分为类球型、圆扁型和细长型,如图 7 所示。3 类种子所占比重分别是:36.3%、52.1%、11.6%。仿真过程中分别建立 3 个颗粒工厂,根据种子比例分别产生 3 种不同外形的玉米籽粒。

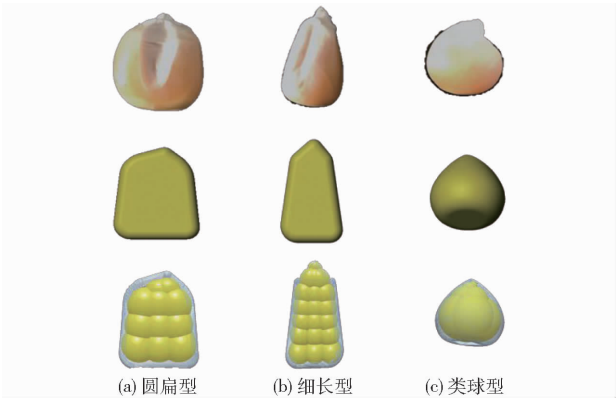


图 7 玉米种子分类

Fig. 7 Maize classification

种箱内种群数量不同对待充种子压力不同,从而导致待充种子对排种盘的法向力变化,故将种群数量作为仿真过程中的一个因素,设置为 4 个梯度,分别为 300、600、900、1 200 粒。排种盘角速度设置为 2 rad/s。

玉米和排种盘的表面特性及碰撞参数如表 1 所示^[16]。

表 1 玉米和排种盘的表面特性及碰撞参数

Tab. 1 Surface characteristics and collision parameters of corn and seed meter

材料	密度/(g·cm ⁻³)	泊松比	剪切模量/Pa	接触关系	静摩擦因数	动摩擦因数	碰撞恢复系数
排种盘	1.180	0.5	1.77×10^8	排种盘-玉米	0.482	0.093 1	0.621
玉米	1.197	0.4	1.37×10^8	玉米-玉米	0.431	0.078 2	0.182

3.3 数据提取范围确定

根据 ONAL 等^[20]的研究,籽粒距离型孔中心 4 mm 范围内的种子可被吸附,故将该区域内种子视为待充种子。取厚度 5 mm,外圆周距离型孔 4 mm,内圆周与排种盘重叠量 1 mm,跨度为 15°的扇形作为框选区域。在颗粒产生且处于稳定状态后,提取不同区域范围处,待充种子对排种盘的平均法向力,并绘制充种区域及种群数量对平均法向力影响的曲线图(图 8)。

3.4 仿真结果与分析

为考量平均法向力的变化趋势,计算各曲线上数据点的标准差,分别是 $S_{300} = 0.001\ 1$ 、 $S_{600} = 0.010\ 4$ 、 $S_{900} = 0.014\ 6$ 、 $S_{1\ 200} = 0.014\ 3$ 。综合图 8 和标准差数据可知,种群数量在 300 粒时,由于待充种子平均法向力随区域的变化与其在竖直方向上所受压力随种群数量的变化抵消,平均法向力在低、中、高 3 个区域的标准差值相对较小,变化不显著。种群数量在 600、900、1 200 粒时,平均法向力在 3 个区域,标准差数值较大,变化显著,趋势一致。当种群数量大于 600 粒时,种群数量对平均法向力的影响可以忽略。平均法向力的变化由区域位置的变化引起,在

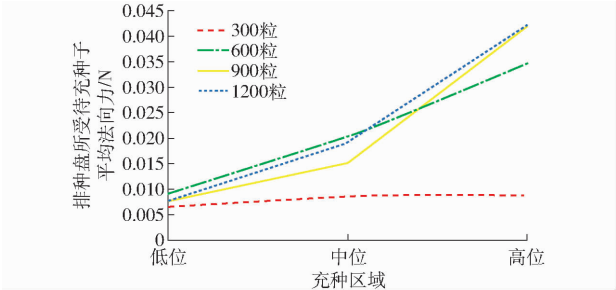


图 8 充种区域及种群数量对平均法向力的影响

Fig. 8 Effect of filling area and population on average normal force

充种区低位、中位和高位,平均法向力逐渐增大。

4 台架试验

4.1 重力辅助下不同充种区域的对比试验

4.1.1 试验设计

为验证 EDEM 仿真效果,并进一步探究作业速度和风压对充种性能的影响,对排种器进行试验。将充种区按仿真过程分为低位、中位、高位 3 个区域,分别在 3 个区域进行充种性能试验,保证各充种区种群所在范围为 15°。试验中排种株距设置为 25 cm,作业速度设置为 2、4、6 km/h,排种器真空度

设置为 2、2.5、3、3.5、4 kPa。分别对 45 组试验充种效果进行统计,连续记录 251 个型孔的充种效果,定义漏充率

$$M_c = \frac{M_s}{250} \times 100\%$$

式中 M_s ——漏充数
当漏充率 $M_c \leq 10\%$ 时,视为充种性能良好。

4.1.2 试验结果与分析

由图 9 可知,相同作业风压下,速度为 2 km/h 时,漏充率明显低于速度为 4 km/h 和 6 km/h,而 4 km/h 作业速度时漏充率低于相同条件下 6 km/h 时的漏充率。速度为 2、4、6 km/h 时,漏充率变化范

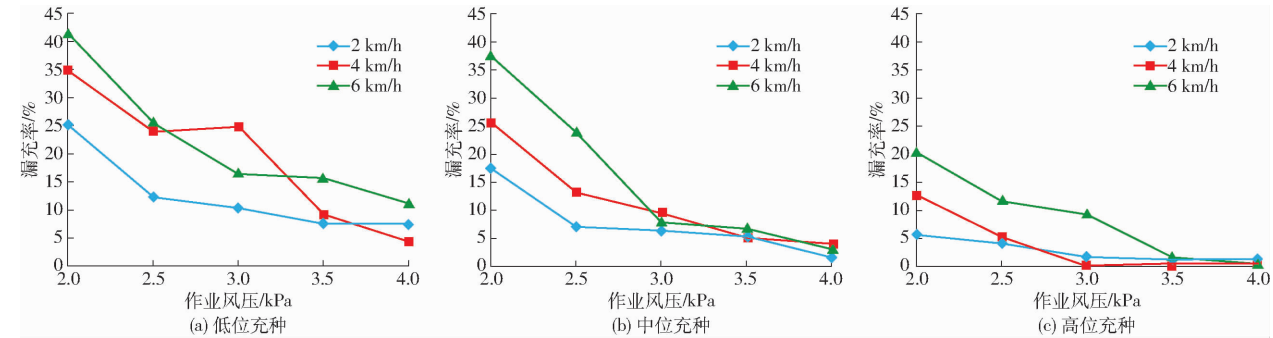


图 9 不同区域充种性能曲线
Fig.9 Filling performance curves of different areas

随着角度和风压的增加,速度对排种器充种性能的影响减小。为描述这一变化,设置相同风压下漏充率在不同作业速度下的跳动量为: $R_1 = \frac{M_{cmax} - M_{cmin}}{2}$, M_{cmax} 、 M_{cmin} 分别为漏充率最大值和最小值。整理数据并进行归一化处理,结果如表 2 所示。

表 2 漏充率跳动量						
Tab.2 Data volatility of missing index		风压/kPa				
充种区域		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
低位		0.812 500	0.645 833	0.708 333	0.375 000	0.312 500
中位	1		0.833 333	0.125 000	0.041 667	0.083 333
高位		0.729 167	0.354 167	0.354 167	0.020 833	0

跳动量越接近 0,说明漏充率变动越小;越接近 1,说明漏充率变动越大。跳动量最小值出现在工作风压为 4 kPa 高位充种状态下,跳动量最大值出现在工作风压 2 kPa 中位充种状态下。所以,作业时适当增加风压并采用高位充种,可提高排种器作业速度。

4.2 重力与无重力辅助对比试验

4.2.1 试验设计

实际作业中,排种器充种区全部填充有待充种子,不区分低位、中位和高位,为了验证重力辅助有助于减小风压需求,提高充种性能,对排种器重力辅

围分别是:1.2% ~ 25.2%、0.4% ~ 34.8%、0.4% ~ 41.6%。说明速度越小漏充率越低,充种效果越稳定。2 km/h 时,低、中、高位 3 种状态下达到良好充种效果所需风压为 3 kPa;4 km/h 时为 3.5 kPa;6 km/h 时,当风压达到 4 kPa 时,只有中、高位两种状态达到良好充种效果,低位未能达到良好充种效果,说明随着作业速度的增加,排种器所需风压增大。对 3 幅图进行纵向比较,相同作业速度和风压条件下,低、中、高位漏充率由大到小顺序为:低位、中位、高位。说明在充种区随着位置角度的增加,充种效果逐渐改善,与前文理论分析和仿真结果一致。

助充种状态下的作业情况与无重力辅助充种下的作业情况进行对比试验。图 10a 所示待充种子全部位于重力辅助充种区域,图 10b 所示待充种子重力对充种无辅助作用。在 6 km/h 作业速度下进行试验,预试验确定了重力辅助状态试验所取作业风压梯度为:3、3.5、4、4.5、5、5.5 kPa 共 6 个梯度。无重力辅助状态下,所取作业风压梯度为:5.5、6、6.5、7、7.5、8 kPa 共 6 个梯度。按照 GB/T 6973—2005 规定,试验指标选取合格指数 A、重播指数 D 和漏播指数 M。

选用中国农业大学工学院自主研发的排种性能检测试验台进行排种性能检测。每组试验进行 3 次,取平均值作为最终试验结果。

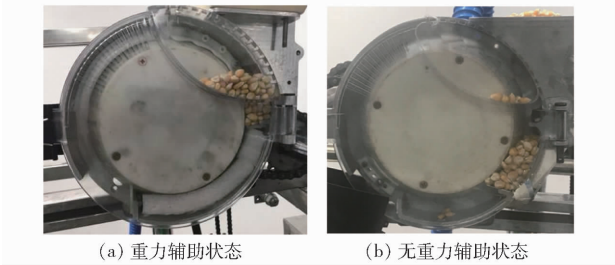


图 10 重力辅助与无重力辅助对比试验
Fig.10 Comparison test between gravity-assisted filling and non-gravity-assisted filling

4.2.2 试验结果与分析

重力辅助充种和无重力辅助充种情况下的台架

试验结果如图 11 所示,中间竖直虚线为重力辅助充种和无重力辅助充种试验风压分界线,左侧表示重力辅助充种试验结果,右侧为无重力辅助充种结果。6 km/h 速度下,重力辅助充种在作业风压 3~5.5 kPa 之间合格指数均高于 94%;无重力辅助充种时,当风压达到 5.5 kPa 合格指数才开始满足国标要求,而此时的漏播指数为 15.6%,大于国标的 8%。无重力辅助充种时,该排种器风压达到 6 kPa 时,各指标开始满足国标作业要求,满足播种需求。说明重力辅助充种显著降低排种器作业风压需求,提高作业质量。

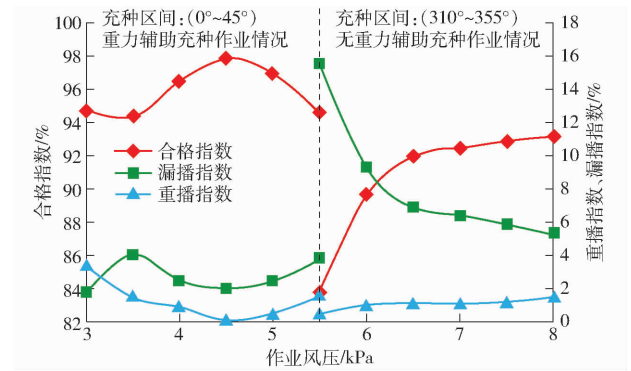


图 11 试验结果
Fig. 11 Test results

5 结论

(1) 盘室同步气吸式精量排种器充种过程被分为两个阶段:待充种子被吸附到型孔的过程和被吸附的种子随排种盘转离种群的过程。受力分析表

明,第 1 阶段待充种子自重及所受种群压力沿排种盘径向的分量与曳力方向一致,即种群压力及待充种子重力分量对充种起到辅助作用;第 2 阶段已充种子重力在径向的分量与压力梯度力方向一致,减小了种子脱离种群时的压力梯度力需求。盘室同步气吸式精量排种器重力对充种过程有辅助作用。

(2) EDEM 仿真结果表明:充种区种子数量少于 300 粒时,待充种子平均法向力大小随区域的变化值与其在竖直方向上所受压力随种群数量的变化抵消,导致平均法向力在低位、中位、高位 3 个区域变化不显著;当种群数量大于 600 粒时,种群数量对平均法向力的影响可以忽略。平均法向力的变化由区域位置的变化引起,且随着位置的升高,平均法向力增大。

(3) 台架试验表明作业速度越小,漏充率越低,充种效果越稳定。2 km/h 时,低位、中位、高位 3 种状态下达到良好充种效果所需风压为 3 kPa;4 km/h 时为 3.5 kPa;6 km/h 时,当风压达到 4 kPa 时,只有中、高位两种状态达到良好充种效果,低位未能达到良好充种效果。随着作业速度的增加,排种器所需风压增大,相同作业速度和风压条件下,低、中、高位漏充率由大到小顺序为:低位、中位、高位。说明在充种区随着位置角度的增加,充种效果逐渐改善。

(4) 重力与无重力辅助对比试验表明,重力辅助充种显著降低排种器作业风压需求,提高了作业质量。

参 考 文 献

- 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 11. 006.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- GRIEPENTROG H W. Seed distribution over the area [C]. Oslo: EurAgEng, 1998, 98-A-059.
- YANG Li, YAN Bingxin, YU Yiming, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(1): 9-26.
- 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 43-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120209&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 02. 009.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43-47. (in Chinese)
- 赖天辉,高筱钧,张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 27-37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160505&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 05. 005.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng* [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27-37. (in Chinese)
- 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)
- 7 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究[J]. 农业机械学报,1979,10(3):56–63.
- 8 刘彩玲, 宋建农. 种盘振动对气吸振动式精量播种装置工作性能的影响[J]. 中国农业大学学报, 2004,9(2):12–14.
LIU Cailing, SONG Jiannong. Influence of seed tray vibration on work performance of suction-vibration type precision seed device [J]. Journal of China Agricultural University, 2004,9(2):12–14. (in Chinese)
- 9 GUARELLA P, PELLERANO A, PASCUZZI S. Experimental and theoretical performance of a vacuum seeder nozzle for vegetable Seeds[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 64(1):29–36.
- 10 王朝辉. 气吸滚筒式超级稻育秧播种器的基本理论及试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2010.
WANG Zhaohui. Research of theory and experiment on air suction cylinder device for tray nursing seeding of super-rice[D]. Changchun:Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 11 王朝辉, 马旭, 贾瑞昌. 工作参数对超级稻育秧播种部件吸种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2009,25(8):88–92.
WANG Zhaohui, MA Xu, JIA Ruichang. Effects of working parameters on seed suction performance of seeder device for super hybrid rice seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8):88–92. (in Chinese)
- 12 陈丽梅, 袁月明, 尹海燕, 等. 水稻芽种气吸式直播排种器充种过程的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2005,27(4):464–467.
CHEN Limei, YUAN Yueming, YIN Haiyan, et al. Study on seed-filling process of direct air-sucking seed-metering device in rice bud-sowing[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2005,27(4):464–467. (in Chinese)
- 13 杨明金, 邱兵, 杨玲, 等. 振动气吸式精密穴播机的排种性能[J]. 农业工程学报. 2010,26(9):139–143.
YANG Mingjin, QIU Bing, YANG Ling, et al. Metering performance of the vibrational vacuum precision tray seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9):139–143. (in Chinese)
- 14 陈晨, 赵满全, 张涛, 等. 基于离散元的排种器振动对大粒径作物种群的影响[J]. 农机化研究, 2016,38(11):214–218.
CHEN Chen, ZHAO Manquan, ZHANG Tao, et al. Based on the discrete element method of gas suction seed metering device vibration on the influence of the large size crop species: soybeans[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11):214–218. (in Chinese)
- 15 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器吸种性能数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2008,39(10):95–99.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Numerical simulation and experiment on the seeds pickup performance of precision air-suction Seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):95–99. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014,30(5):10–18.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(5):10–18. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016,32(22):36–42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(22):36–42. (in Chinese)
- 20 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.