

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.03.007

绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验

张胜伟¹ 张瑞雨¹ 陈天佑¹ 付君^{1,2} 袁洪方^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 为提高绿豆精密排种过程离散元仿真模拟试验所用仿真参数的准确度, 进一步优化排种部件, 基于绿豆种子的本征参数, 采用 Hertz Mindlin with bonding 粘结模型建立种子仿真模型, 分别采用自由落体碰撞法、斜面滑动法、斜面滚动法对绿豆种子与接触材料(有机玻璃、Somos8000 树脂)间仿真参数进行标定, 结果表明: 绿豆与有机玻璃碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.445、0.458、0.036, 与 Somos8000 树脂碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.434、0.556、0.049。以种间接触参数为因素, 以实测堆积角与仿真堆积角相对误差为指标, 进行了最陡爬坡试验、三因素五水平旋转组合设计试验, 以最小相对误差为优化目标, 对试验数据寻优分析得到: 绿豆种间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.3、0.23、0.03。对标定结果进行排种验证试验, 结果表明: 仿真试验漏吸率与台架试验漏播率最大相对误差为 4.71%、重吸率与重播率最大相对误差为 4.94%、单粒率与合格率最大相对误差为 0.98%, 证明标定结果可靠。该研究结果可为绿豆精密排种装置的设计与仿真优化提供理论参考。

关键词: 绿豆; 离散元; 仿真参数; 标定; 排种试验

中图分类号: S522; S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)03-0071-09

OSID:



Calibration of Simulation Parameters of Mung Bean Seeds Using Discrete Element Method and Verification of Seed-metering Test

ZHANG Shengwei¹ ZHANG Ruiyu¹ CHEN Tianyou¹ FU Jun^{1,2} YUAN Hongfang^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the simulation parameters used in the discrete element simulation test of mung bean precision metering process, and further optimize the metering structure, based on the intrinsic parameters of mung bean seeds, the Hertz Mindlin with bonding model was used to establish the seed simulation model, the simulation parameters between the mung bean seeds and the contact material (plexiglass plate, Somos8000 resin) were calibrated by the free fall collision method, inclined sliding method, and inclined rolling method, respectively. The statistical results showed the collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient between mung bean and plexiglass were 0.445, 0.458 and 0.036, respectively; the collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient between mung bean and Somos8000 resin were 0.434, 0.556 and 0.049, respectively. Steep climbing test, three-factor and five-level horizontal rotation combinations were designed and tested respectively, involving factors of contact parameters between seeds, and the indices of the relative error between the measured accumulation angle and the simulated accumulation angle. Then, the minimum relative error was taken as the optimization objective, and the test data were optimized and analyzed, the collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient between mung bean seeds were 0.3, 0.23 and 0.03, respectively. Seeding verification tests were carried out on the calibration results, the statistical results showed that the

收稿日期: 2021-03-16 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0701102)、吉林省科技发展项目(20200403153SF)和吉林省教育厅“十三五”科技项目(JJKH20201009KJ)

作者简介: 张胜伟(1996—),男,博士生,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: zhangsw0825@163.com

通信作者: 袁洪方(1984—),男,副教授,博士,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: yhf1984828@163.com

maximum relative error between the leakage rate of the simulation test and the missing rate of the bench test was 4.71%, the maximum relative error between the reabsorption rate and the multiple rate was 4.94%, and the maximum relative error between the single particle rate and the qualified rate was 0.98%, which proved that the calibration results were reliable. It can provide important reference significance for the design and simulation optimization of mung bean precision metering device.

Key words: mung bean; discrete element; simulation parameter; calibration; seeding test

0 引言

长期以来,绿豆作为小宗农作物,由于其种植地区分散、集中种植面积较小、机械化种植水平较低等问题,严重制约了我国绿豆产业发展^[1]。为提高绿豆机械化种植水平,近年来国内学者对绿豆精密排种器进行了相关研究^[2-3]。但与主粮作物排种器的研究相比,绿豆精密排种器设计及理论研究仍较少,且实际生产中多采用勺轮或窝眼轮等机械式排种器进行播种,存在播种精度低、伤种率高等问题,而气力式排种器可有效克服上述问题^[2]。

近年来 EDEM-Fluent 气固耦合仿真方法在气力式精密排种器研究中已被广泛运用,可直观分析种子在复杂环境中的受力及运动规律,从而对排种器结构或工作参数予以优化^[4-10]。在利用气固耦合仿真法对精密排种器进行仿真研究时,需定义仿真模型的本征参数(密度、剪切模量、泊松比等)和接触参数(滚动摩擦因数、静摩擦因数、碰撞恢复系数等)^[11-16],其本征参数与实际试验测量值基本一致,而接触参数难以通过实际试验获得,且接触参数是影响种子的流动特性与仿真准确性的重要因素,因此有必要对其接触参数进行标定^[17-18]。

国内外学者已对玉米^[19]、水稻^[20]、小麦^[21]、马铃薯^[22]、三七^[23]等种子的离散元仿真参数进行了标定,结果表明不同种子之间的接触参数具有较大差异,而对绿豆种子离散元仿真参数的标定鲜有报道。因此为应用离散元法优化设计气力式绿豆精密排种器,克服现有绿豆机械式排种器播种精度低、伤种率高等问题,以绿豆种子为研究对象,基于其物理本征参数,采用 Hertz Mindlin with bonding 粘结模型建立种子仿真模型,标定得到气力式绿豆精密排种器气固耦合仿真所需的离散元仿真参数,并利用台架试验验证其仿真模型与仿真参数的可靠性,从而为气力式绿豆精密排种装置的设计与仿真研究提供参考。

1 模型建立

1.1 绿豆种子物理模型

本文绿豆种子选取白绿9号,该品种具有抗病性强、质量好等优点。选取1000粒种子平均分成5组,通过试验测得其含水率为 $(11 \pm 0.32)\%$,千粒

质量为 (60.14 ± 0.429) g;密度为 $(1\ 245.9 \pm 1.946)$ kg/m³;泊松比为0.2;弹性模量为126 MPa^[24];根据公式^[25]

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1)$$

式中 G ——绿豆种子剪切模量,MPa
 E ——绿豆种子弹性模量,MPa
 μ ——绿豆种子泊松比

计算得绿豆的剪切模量为52.5 MPa。

为建立绿豆种子的仿真模型,提高仿真精确度,本文随机选用150粒种子,通过游标卡尺测量其三轴尺寸(长度 l 、宽度 w 、厚度 t),并根据公式计算其等效直径 d_p 与球形率 φ 。

$$d_p = \sqrt[3]{lwt} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{\sqrt[3]{lwt}}{l} \times 100\% \quad (3)$$

测量与计算结果如下:绿豆的平均长度为5.19 mm,平均宽度为3.89 mm,平均厚度为3.93 mm,球形率为82.8%,等效直径为4.29 mm。

依据尺寸分布均值在CATIA中进行三维建模,将建好的三维模型导入EDEM软件,并运用API颗粒替换法建立仿真颗粒粘结模型(粘结颗粒半径为0.3 mm,数量为207个,单位法向刚度为 1×10^{10} N/m³,单位切向刚度为 1×10^{10} N/m³,临界法向应力为 5×10^{10} Pa,临界切向应力为 2×10^8 Pa,颗粒间粘结半径为0.6 mm),绿豆实物图与模型图如图1所示。

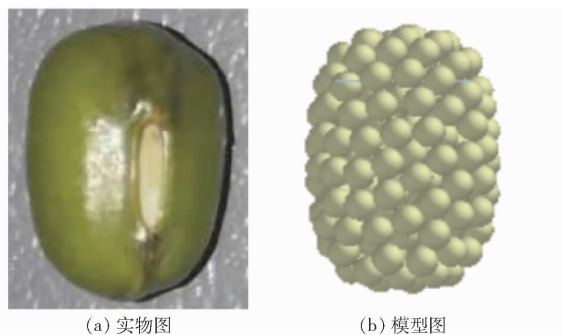


图1 绿豆种子实物及仿真模型

Fig.1 Physical model and simulation model of mung bean seeds

1.2 接触模型选取

试验过程中,除颗粒与颗粒间接触,还会有颗粒

与其他材料之间的作用力。本文中与绿豆接触的材料选择有机玻璃与 Somos8000 树脂,其参数如表 1 所示^[26]。

表 1 接触材料仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of contact materials

材料	参数	数值
有机玻璃	泊松比	0.33
	剪切模量/Pa	8.2×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 218.9
Somos8000 树脂	泊松比	0.35
	剪切模量/Pa	1.2×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 454.7

由于实际试验中绿豆种子与材料表面光滑且几乎无粘附力,因此 EDEM 仿真时选用 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型。

2 种子与材料间接触参数标定

2.1 种子与材料间碰撞恢复系数

如图 2a 所示,采用自由落体碰撞法进行种子与材料间的碰撞恢复系数标定,试验时,在距碰撞材料板 $H = 150 \text{ mm}$ 的高度将种子释放,种子碰到材料板进行反弹,通过高速摄像系统测定最高反弹高度 h 。碰撞恢复系数 e_x 可表示为种子与材料碰撞前后在碰撞接触点处的法向瞬时分离速度 v_1 与瞬时接触速度 v_0 之比,即种子与材料碰撞反弹最大高度 h 与初始下落高度 H 之比,计算公式为

$$e_x = \frac{v_1}{v_0} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (4)$$

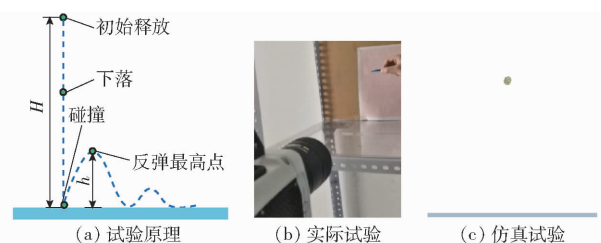


图 2 种子-材料碰撞恢复系数标定试验

Fig.2 Calibration test of seed - material coefficient of restitution

试验重复 5 次,并通过式(4)计算恢复系数,结果取平均值。实际试验得到种子与有机玻璃碰撞最高反弹高度均值为 27.42 mm,恢复系数为 0.428;与 Somos8000 树脂碰撞最高反弹高度均值为 24.26 mm,恢复系数为 0.402。

仿真试验时,把除碰撞恢复系数以外的其他接触参数设为 0。以碰撞恢复系数 e_x 为因素,以最高反弹高度 h 为指标,选取绿豆与接触材料的碰撞恢复系数为 0.1 ~ 0.9,间隔均取 0.1,每组试验重复 5

次取均值。将试验结果绘制成散点图并拟合曲线(图 3)。

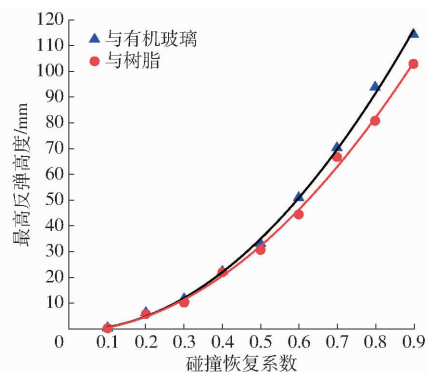


图 3 碰撞恢复系数与最高反弹高度拟合曲线

Fig.3 Fitting curves of restitution coefficient and maximum springing height

拟合方程分别为

$$h_1 = 145.98e_{x1}^2 - 1.83e_{x1} - 0.67 \quad (R^2 = 0.99) \quad (5)$$

$$h_2 = 123.25e_{x2}^2 + 5.39e_{x2} - 1.35 \quad (R^2 = 0.99) \quad (6)$$

式中 h_1, h_2 ——绿豆与有机玻璃、Somos8000 树脂碰撞最高反弹高度

e_{x1}, e_{x2} ——绿豆与有机玻璃、Somos8000 树脂碰撞恢复系数

将实际试验所得的种子与材料间反弹高度均值代入式(5)、(6),得 e_{x1} 为 0.445、 e_{x2} 为 0.434,将其分别代入 EDEM 仿真实验验证,仿真时最高反弹高度与实测最高反弹高度相对误差较小,因此将 e_{x1} 定为 0.445、 e_{x2} 定为 0.434。

2.2 种子与材料间静摩擦因数

种子与材料间静摩擦因数标定采用斜面滑动法,即质量为 m 的物体在角度为 α 的斜面上静止时,其重力可分解为平行于斜面的力 F_1 和垂直于斜面的力 F_2 , F_1 随着 α 增大而增大,当 α 大于物体滑动临界角时,则 F_1 大于物体与斜面间的静摩擦力 f ,物体开始向下滑动。其中静摩擦因数计算式为

$$\mu_f = f/F_2 = mg\sin\alpha / (mg\cos\alpha) = \tan\alpha \quad (7)$$

实际试验时将 4 粒绿豆种子粘结在一起(为防止种子滚动)放置于图 4a 所示接触材料的斜面左端,缓慢匀速提升放置种子的斜面端,当种子开始滑动时,记录斜面与水平面之间的夹角 α ,试验重复 5 次,结果取平均值。得到绿豆与有机玻璃、Somos8000 树脂的滑动摩擦角均值分别为 23.9° 、 30.8° ,静摩擦因数分别为 0.443、0.596。

仿真时在 EDEM 中以种子与材料间静摩擦因数 μ_f 为因素,斜面倾角 α 为指标进行试验(采用已标定完的碰撞恢复系数,其他接触参数设为 0,选取

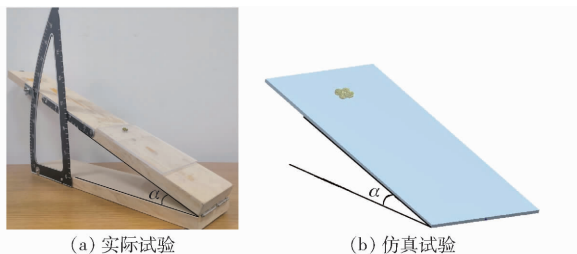


图4 种子-材料静摩擦系数标定试验

Fig. 4 Calibration test of seed-material coefficient of static friction

静摩擦系数为 0.1 ~ 0.9, 试验水平间隔为 0.1)。为避免种子在斜面上滚动, 将 4 个粘结的颗粒替换模型放置在斜面一端, 设置与实际试验相同的转速进行仿真, 当种子开始滑动时, 记录斜面倾角 α , 试验重复 5 次, 结果取平均值。将试验结果绘制成散点图并拟合曲线(图 5)。

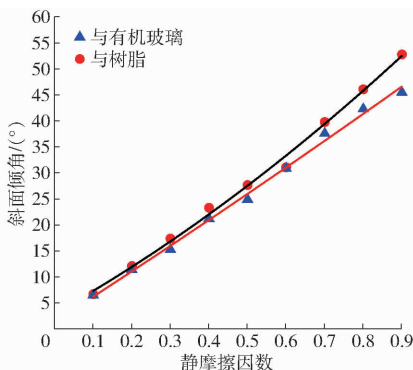


图5 静摩擦系数与斜面倾角拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of static friction coefficient and inclination angle

拟合方程分别为

$$\alpha_1 = 2.71\mu_{n1}^2 + 47.79\mu_{n1} + 1.42 \quad (R^2 = 0.99) \quad (8)$$

$$\alpha_2 = 14.83\mu_{n2}^2 + 41.67\mu_{n2} + 3.02 \quad (R^2 = 0.99) \quad (9)$$

式中 μ_{n1} 、 μ_{n2} ——绿豆与有机玻璃、Somos8000 树脂的静摩擦系数

α_1 、 α_2 ——有机玻璃板、Somos8000 树脂板与水平面的夹角

把实际试验所测倾角分别代入式(8)、(9), 得 μ_{n1} 为 0.458、 μ_{n2} 为 0.556, 将其分别代入 EDEM 验证, 得到仿真滑动摩擦角与实际滑动摩擦角基本一致, 因此将 μ_{n1} 定为 0.458、 μ_{n2} 定为 0.556。

2.3 种子与材料间滚动摩擦系数

如图 6 所示, 种子与材料间滚动摩擦系数测定采用斜面滚动法。即在倾角为 β 的斜面板上以零初速度释放种子, 种子沿斜面向下滚动一段距离 S , 由于受到滚动摩擦, 种子最终滚落至水平板上并静止, 设种子水平滚动距离为 L , 假设种子为理想球

体, 在纯滚动过程中只受到滚动摩擦力影响, 则通过能量守恒定律可得

$$mgS\sin\beta = mg(Scos\beta + L)\mu_s \quad (10)$$

式中 μ_s ——滚动摩擦系数

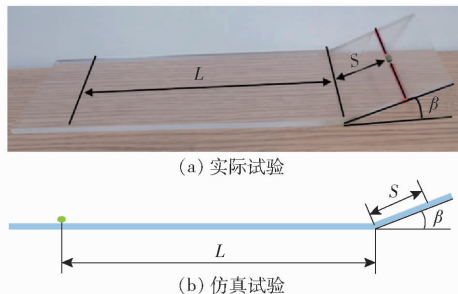


图6 种子-材料滚动摩擦系数标定试验

Fig. 6 Calibration test of seed-material coefficient of rolling friction

由于绿豆种子并非理想球体, 当倾角 β 与斜面滚动距离 S 较大时, 会导致种子在滚动过程中发生弹跳, 影响试验结果准确性, 当 β 与 S 较小时, 种子滚动距离较小, 不利于试验测量, 因此经大量预试验调整, 设定倾角 β 为 20° 、斜面滚动距离 S 为 30 mm, 以零初速度释放种子, 使种子沿斜面向下滚动, 待种子静止, 测量种子水平滚动距离 L 。为减小试验误差, 试验重复 30 次, 结果取平均值。试验测得绿豆在有机玻璃、Somos8000 树脂上的滚动距离均值分别为 193、141 mm, 滚动摩擦系数分别为 0.046、0.061。

仿真试验采用相同的方法, EDEM 中设置已标定完毕的碰撞恢复系数与静摩擦系数, 其它接触参数设为 0, 以滚动摩擦系数 μ_s 为因素, 选取因数范围 0.01 ~ 0.09, 试验水平间隔为 0.01, 以水平滚动距离 L 为评价指标, 将试验结果绘制成散点图并拟合曲线(图 7)。

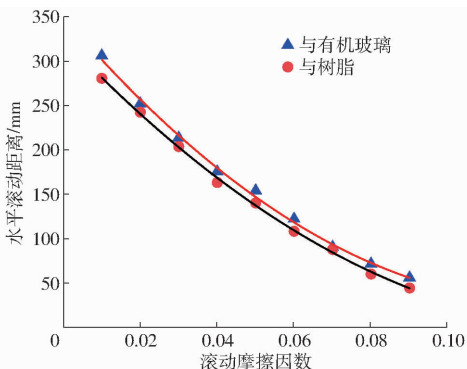


图7 滚动摩擦系数与水平滚动距离拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of rolling friction coefficient and horizontal rolling distance

拟合方程分别为

$$L_1 = 19\,814\mu_{s1}^2 - 5\,047.1\mu_{s1} + 349.96 \quad (R^2 = 0.99) \quad (11)$$

$$L_2 = 15\ 847\mu_{s2}^2 - 4\ 545.2\mu_{s2} + 325.18 \quad (R^2 = 0.99) \quad (12)$$

式中 μ_{s1} 、 μ_{s2} ——绿豆与有机玻璃、Somos8000 树脂的滚动摩擦因数

L_1 、 L_2 ——种子在有机玻璃板、Somos8000 树脂板上的水平滚动距离

将实际测得绿豆在有机玻璃、Somos8000 树脂上的水平滚动距离均值分别代入式(11)、(12), 得 μ_{s1} 为 0.036、 μ_{s2} 为 0.049, 将其分别代入 EDEM 验证, 得到仿真水平滚动距离与实际水平滚动距离相对误差较小, 因此 μ_{s1} 为 0.036、 μ_{s2} 为 0.049。

3 种间接触参数标定

采用上述试验中自由落体碰撞法、斜面滑动法、斜面滚动法对种子之间的接触参数标定时, 需将种子粘结成种子板, 由于粘结的底板材料不同、种子板表面凹凸不平, 对试验结果会产生较大影响。因此本文采用堆积角试验方法, 以种间接触参数为因素, 以实测堆积角与仿真堆积角的相对误差为指标, 进行最陡爬坡试验、三因素五水平旋转组合设计试验, 对试验结果优化得到种子之间的仿真实接触参数。

3.1 实际堆积角试验

采用传统抽板法进行试验时, 由于底部材料的不同, 会导致种子堆积角产生较大差异, 因此底面设置一直径为 140 mm、高度为 30 mm 的圆筒, 圆筒中先填满种子并刮平, 距离圆筒上端 80 mm 处设置一漏斗, 用挡板挡住漏斗下端, 漏斗中装适量种子, 迅速抽掉挡板, 在圆筒上端形成堆积锥角, 装置材料分别采用有机玻璃、Somos8000 树脂, 厚度均为 2 mm, 经预试验发现两材料对堆积角影响无显著差别, 因此选用有机玻璃进行堆积角试验。实际试验与仿真试验如图 8 所示。

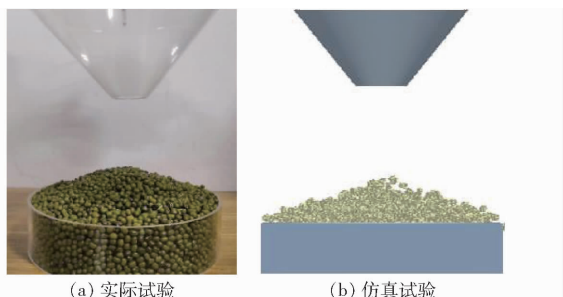


图 8 堆积角试验

Fig. 8 Stacking angle test

试验结束后用 Matlab 软件读取颗粒堆边缘图像(图 9a), 对图像进行灰度化、二值化处理并提取二值化图像边界轮廓(图 9b), 扫描轮廓边缘点并进行线性拟合, 拟合直线(图 9c)与水平面夹角即为实

测堆积角 θ 。

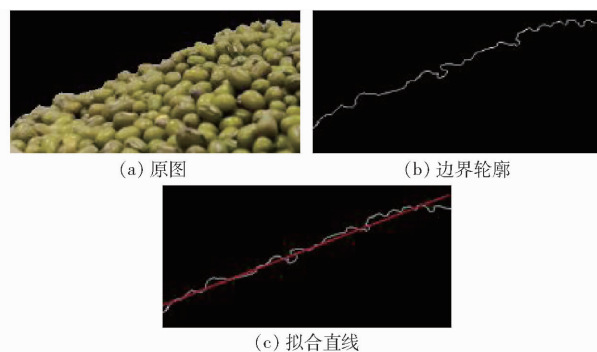


图 9 Matlab 软件图像处理

Fig. 9 Image processed by Matlab

每组试验重复 5 次, 结果取平均值, 实际测得绿豆种子堆积角 θ 均值为 22.1°。

3.2 最陡爬坡试验

为确定三因素五水平二次正交旋转组合设计试验的零水平及因素水平的最优值区间, 进行最陡爬坡试验。在 EDEM 中设置已标定的种子与有机玻璃间的接触参数, 以颗粒间碰撞恢复系数 e 、静摩擦因数 μ_n 、滚动摩擦因数 μ_r 为因素, 以实测堆积角 θ 与仿真堆积角 θ' 相对误差 σ 为指标进行试验。

经查阅文献[1, 14 - 16, 21] 发现, 大部分粮谷类种子之间的碰撞恢复系数在 0.15 ~ 0.85 之间, 静摩擦因数在 0.1 ~ 0.6 之间, 滚动摩擦因数在 0.01 ~ 0.08 之间, 因此方案设计与试验结果如表 2 所示。

表 2 最陡爬坡试验方案设计与结果

Tab. 2 Scheme and results of the steepest ascent experiment

序号	试验因素			试验结果	
	e	μ_n	μ_r	$\theta' / (^\circ)$	$\sigma / \%$
1	0.15	0.1	0.010	15.2	31.22
2	0.30	0.2	0.025	21.7	1.81
3	0.45	0.3	0.040	24.1	8.30
4	0.60	0.4	0.055	32.9	32.83
5	0.75	0.5	0.070	34.2	35.38
6	0.90	0.6	0.085	34.6	36.13

由表 2 可知, 采用第 2 组组合试验仿真得到堆积角与实测堆积角相对误差最小, 为 1.81%, 因此分别选用第 1 组、第 2 组、第 3 组作为三因素五水平旋转组合设计试验编码值。

3.3 二次正交旋转组合设计试验

以颗粒间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数为试验因素, 以实测堆积角 θ 与仿真堆积角 θ' 相对误差 Y 为指标, 进行三因素五水平二次正交旋转组合设计试验, 并利用 Design-Expert 软件对试验数据进行回归分析, 利用响应面法寻找最佳参数组

合。其因素编码如表3所示。试验方案与结果如表4所示, A、B、C为因素编码值。

表3 试验因素编码

Tab.3 Experiment factors and codes

编码	因素		
	e	μ_n	μ_r
-1.682	0.15	0.10	0.010
-1	0.21	0.14	0.016
0	0.30	0.20	0.025
1	0.39	0.26	0.034
1.682	0.45	0.30	0.040

表4 试验方案与结果

Tab.4 Experiment scheme and results

序号	因素			Y/%
	A	B	C	
1	-1	-1	-1	30.32
2	1	-1	-1	25.02
3	-1	1	-1	10.82
4	1	1	-1	14.53
5	-1	-1	1	20.50
6	1	-1	1	18.55
7	-1	1	1	6.07
8	1	1	1	10.69
9	-1.682	0	0	21.95
10	1.682	0	0	15.61
11	0	-1.682	0	29.59
12	0	1.682	0	12.14
13	0	0	-1.682	18.04
14	0	0	1.682	9.00
15	0	0	0	8.36
16	0	0	0	8.53
17	0	0	0	5.88
18	0	0	0	3.17
19	0	0	0	4.52
20	0	0	0	5.43
21	0	0	0	4.98
22	0	0	0	10.26
23	0	0	0	5.96

各参数对堆积角相对误差的方差分析如表5所示。由表5可知,3个试验因素中,颗粒间静摩擦因数、滚动摩擦因数对试验指标影响均极显著,而颗粒间碰撞恢复系数对试验指标无显著影响,分析其原因可能是:①试验前为排除底部碰撞材料的影响,底部圆筒中先充满颗粒,而颗粒形成的表面凹凸不平,试验时颗粒碰撞在颗粒群表面上更易受其形状影响,限制了其碰撞后反弹运动。②由于颗粒群内部孔隙率较大,且呈现松散状态,相比密度均匀无孔隙的材料板,颗粒群的吸能性更好,颗粒碰撞在颗粒群上能量耗散会更快,颗粒碰撞后运动速度急剧下降。

表5 堆积角相对误差的方差分析

Tab.5 Analysis of variance for the relative error in stacking angle

来源	自由度	均方	F	P
模型	9	152.0367	29.35715	<0.0001**
A	1	6.723773	1.29831	0.2751
B	1	487.8879	94.20751	<0.0001**
C	1	117.6464	22.71664	0.0004**
AB	1	30.34205	5.858824	0.0309*
AC	1	2.26845	0.438021	0.5196
BC	1	7.41125	1.431057	0.253
A ²	1	269.3496	52.0094	<0.0001**
B ²	1	374.434	72.30042	<0.0001**
C ²	1	80.97968	15.63657	0.0016*
失拟	5	5.337486	1.050743	0.4513

注:*表示差异显著,**表示差异极显著。

去除对指标影响的不显著项后,通过 Design-Expert 软件得拟合回归方程为

$$Y = 6.37 - 5.98B - 2.94C + 1.95AB + 4.12A^2 + 4.85B^2 + 2.26C^2 \quad (13)$$

由表5可知,该回归模型极显著,且模型的失拟项不显著,说明拟合的回归方程具有高度可靠性,能够准确反映各显著因素与堆积角相对误差之间的关系。

根据上述试验结果及回归方程,将非显著因素——颗粒间碰撞恢复系数设为中间水平,以相对误差最小为目标,寻找颗粒间静摩擦因数与滚动摩擦因数的最优组合,其设定目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y(A, B, C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} A = 0 \\ -1.682 \leq B \leq 1.682 \\ -1.682 \leq C \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

最终得到当颗粒间碰撞恢复系数为0.3、静摩擦因数为0.23、滚动摩擦因数为0.03时,堆积角实测值与仿真值相对误差为3.91%。将上述参数代入 EDEM 仿真验证后,结果表明与实际试验误差较小,因此将上述3个参数值作为其初步标定结果。

4 验证试验

4.1 试验装置

为验证上述标定的仿真参数能够应用于排种器的仿真模拟中,进行验证试验,实际试验采用文献[2]所设计的自吸式绿豆精密排种器(种腔为有机玻璃,种盘为 Somos8000 树脂),选取含水率为11%的白绿9号种子。试验台选择吉林大学农机实验室的 JPS-12 型排种器试验台(图10)。

由于该排种器利用机械结构产生负气压进行

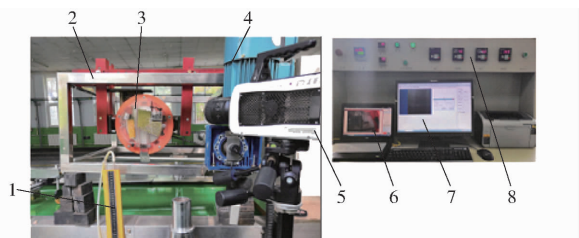


图 10 排种器试验台

Fig. 10 Test bed of seed-metering device

1. 真空计 2. 台架 3. 自吸式排种器 4. 驱动电机 5. 高速摄像机 6. 摄像机控制系统 7. 试验台数据采集显示器 8. 试验控制台

吸种,因此仿真试验采用 EDEM – Fluent 流固耦合方式进行仿真,为提高流体域网格划分质量与耦合仿真速度,将排种器结构简化,省略种腔内部不规则结构,与实际种腔(图 11a)相对比,简化模型只保留种盘、种腔、负压吸气口 3 部分,所建立的排种器简化模型如图 11b 所示。仿真时当种子被吸附在型孔中转过吸气口掉落时,仍可回到种腔继续应用于仿真,目的是为了生成少量的种子而提高仿真速度。

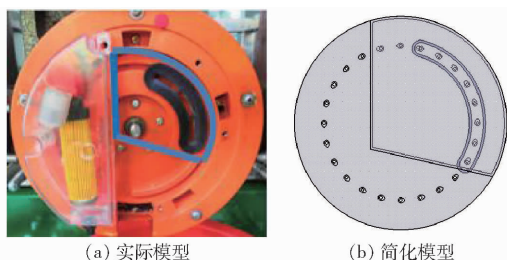


图 11 排种器模型

Fig. 11 Model of seed-metering device

利用 ICEM 软件对图 11b 对应的流体域进行网格划分,其中种腔与负压吸气口对应流体域采用结构化网格划分,型孔流体域采用非结构四面体网格,将种腔流体一侧壁面设为 inlet,负压吸气口流体一侧壁面设为 outlet,种腔流体与型孔流体接触面、型孔流体与负压吸气口流体接触面均设置 interface 面,结果如图 12 所示。

4.2 试验方法

实际试验以排种盘转速为因素,以漏播率、重播

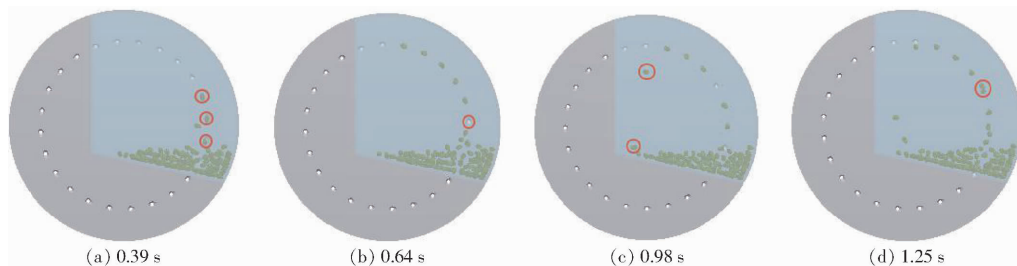


图 13 仿真过程图

Fig. 13 Diagram of simulation process

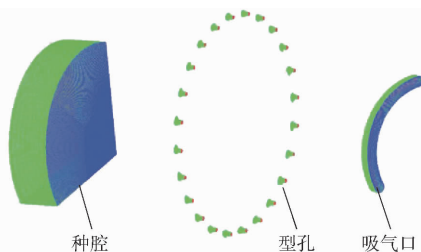


图 12 流体域网格划分图

Fig. 12 Diagram of grid of fluid area

率、合格率为指标,进行单因素试验,确定排种轴转速分别为 90、100、110、120、130 r/min,其对应的排种盘转速分别为 27.8、30.9、34、37、40.1 r/min。每组试验重复 3 次,结果取均值。

仿真试验将图 11b 排种器简化模型保存为 stp 格式导入 EDEM,种腔材料设置为有机玻璃,种盘设置为树脂,其相关材料及接触参数参照上述标定结果进行设置,随后在种腔内生成 120 粒颗粒模型,并保存成 0 s 时刻的文件。颗粒替换成功,打开保存好的 0 s 时 dem 文件,并启动耦合按钮 Show Coupling Server,将划分的网格文件导入 Fluent 17.0 软件中,根据不同的种盘转速及负压进行相关参数设置。仿真试验以种盘转速为因素(排种盘转速分别为 27.8、30.9、34、37、40.1 r/min 时,利用真空计测得相对应的实际负压分别为 -1.84、-2.62、-3.36、-4.15、-4.93 kPa),以漏吸率(未充填种子的型孔数除以 120)、重吸率(充填两粒及以上的型孔数除以 120)、单粒率(充填一粒种子的型孔数除以 120)为指标(由于仿真速度与时长的限制,本次试验只统计 120 个型孔),进行单因素试验,每组试验重复 3 次,结果取均值。

4.3 试验结果

如图 13 所示,截取仿真过程中的一些时刻,0.39 s 时 3 个型孔已经分别成功充填 3 粒种子,无产生漏吸与重复吸种现象,仿真进行到 0.64 s 时开始出现漏吸,仿真 0.98 s 时,种子已经转过负压区产生掉落现象,1.25 s 时,型孔中已经产生种子重复吸种的现象。

仿真与台架试验对比结果如图 14 所示。

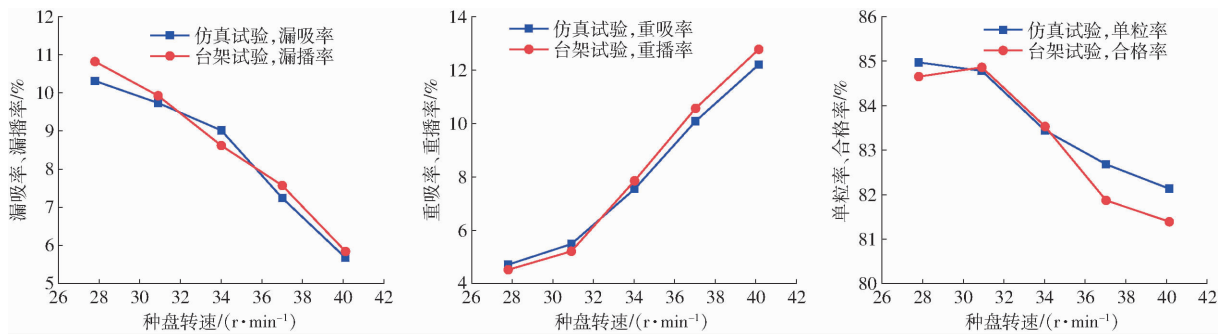


图14 仿真与台架试验对比结果

Fig. 14 Comparison result of simulation test and bench test

从图14中可以看出,随着种盘转速的提升,仿真试验与台架试验的3个指标变化趋势基本一致。漏吸率、漏播率均随着种盘转速加快而下降,两者最大相对误差为4.71%;重吸率、重播率均随着种盘转速加快而上升,最大相对误差为4.94%;单粒率、合格率均随着种盘转速加快而下降,最大相对误差为0.98%。台架试验的性能指标总体上均劣于仿真试验,由于仿真试验比较理想,台架试验存在振动、种子在种管中碰撞等因素,因此存在一定差距是合理的,但性能指标总体变化趋势一致,且误差不大于5%,说明标定试验结果可靠。

5 结论

(1)运用离散元仿真软件EDEM,分别采用自由落体碰撞法、斜面滑动法、斜面滚动法对绿豆种子与接触材料(有机玻璃、Somos8000树脂)间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数进行了标定。绿豆与有机玻璃碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为0.445、0.458、0.036,绿豆与

Somos8000树脂碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为0.434、0.556、0.049。

(2)采用堆积角试验方法,以种间接触参数为因素,以实测堆积角与仿真堆积角的相对误差为指标,进行最陡爬坡试验、三因素五水平旋转组合设计试验,以实测堆积角与仿真堆积角相对误差最小为约束条件,取非显著因素——颗粒间碰撞恢复系数为0.3,对试验结果寻优得到绿豆种间静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为0.23、0.03。

(3)选用自吸式绿豆精密排种器为试验装置,以种盘转速为试验因素,台架试验以漏播率、重播率、合格率为指标,仿真试验以漏吸率、重吸率、单粒率为指标,在EDEM中设置已标定的仿真参数,进行单因素对比验证试验,结果表明:仿真试验漏吸率与台架试验漏播率最大相对误差为4.71%,重吸率与重播率最大相对误差为4.94%,单粒率与合格率最大相对误差为0.98%,性能指标总体变化趋势一致,且误差均不大于5%,说明标定的仿真参数可用于离散元仿真试验。

参 考 文 献

- [1] 李玉环,魏亚男,杨丽,等. 扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1):50-60. LI Yuhuan, WEI Ya'nan, YANG Li, et al. Design and experiment of mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed fling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 50-60. (in Chinese)
- [2] 贾洪雷,张胜伟,陈天佑,等. 丘陵坡地自吸式绿豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3):51-60. JIA Honglei, ZHANG Shengwei, CHEN Tianyou, et al. Design and experiment of self-suction mung bean precision seed metering device for hilly slope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):51-60. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(11):55-64. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):55-64. (in Chinese)
- [5] 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):48-56. 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):48-56. (in Chinese)

- [6] LEI X, HU H, WU W, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 203(22):22–33.
- [7] 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):51–58.
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):51–58. (in Chinese)
- [8] WU Z, LI M, LEI X, et al. Simulation and parameter optimisation of a centrifugal rice seeding spreader for a UAV[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192:275–293.
- [9] 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)
- [10] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2):109–114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2):109–114. (in Chinese)
- [11] MARTIN C L, BOUVARD D, SHIMA S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51(4):667–693.
- [12] 徐泳,李红艳,黄文彬. 耕作土壤动力学的三维离散元建模和仿真方案策划[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2):34–38.
XU Yong, LI Hongyan, HUANG Wenbin. Modeling and methodological strategy of discrete element method simulation for tillage soil dynamics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2):34–38. (in Chinese)
- [13] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3):49–56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3):49–56. (in Chinese)
- [14] CUNHA R N, SANTOS K G, LIMA R N, et al. Repose angle of monoparticles and binary mixture: an experimental and simulation study[J]. *Powder Technology*, 2016, 303:203–211.
- [15] WEI H, NIE H, LI Y, et al. Measurement and simulation validation of DEM parameters of pellet, sinter and coke particles [J]. *Powder Technology*, 2020, 364:593–603.
- [16] COETZEE C J, LOMBARD S G. The destemming of grapes: experiments and discrete element modelling[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(3):232–248.
- [17] WANG X, YU J, LV F, et al. A multi-sphere based modelling method for maize grain assemblies[J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(2):584–595.
- [18] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4):1–20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4):1–20. (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] 鹿芳媛,马旭,谭穗妍,等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2):93–99.
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2):93–99. (in Chinese)
- [21] 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12):247–253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(12):247–253. (in Chinese)
- [22] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(5):125–135.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5):125–135. (in Chinese)
- [23] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2):123–132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2):123–132. (in Chinese)
- [24] 辛海丽,金峰. 基于概率接触算法的椭圆离散元及料仓试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(11):109–114.
XIN Haili, JIN Feng. Probability-based contact algorithm for ellipsoidal particles in DEM and silo tests[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(11):109–114. (in Chinese)
- [25] 王扬,吕凤妍,徐天月,等. 大豆籽粒形状和尺寸分析及建模[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2018, 48(2):507–517.
WANG Yang, LÜ Fengyan, XU Tianyue, et al. Shape and size analysis of soybean kernel and modeling[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2018, 48(2):507–517. (in Chinese)
- [26] 陈玉龙. 气吸机械复合式大豆高速精密排种器研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.
CHEN Yulong. Research of air-suction mechanical combined soybean high-speed and precision seed metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)