doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.005

油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验

陈　永[1]　高晓勋[1]　金　鑫[2,3]　马晓然[1]　胡　斌[4]　张秀丽[1]

(1.河南农业大学机电工程学院,郑州 450002;2.龙门实验室成套装备科创中心,洛阳 471003;
3.河南科技大学农业装备工程学院,洛阳 471003;4.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003)

摘要:油莎豆种球形状不规则,表面凹凸不平,国内油莎豆播种装置多数是基于大粒种球排种器进行改进,由于离散元模拟试验过程中缺乏准确的仿真参数,导致对排种器进行仿真优化分析时产生误差。针对此问题,本文测量油莎豆种子的本征参数和与排种装置间的接触参数,利用逆向工程技术构建油莎豆种子颗粒填充模型。依据方形壳体和圆筒的仿真堆积试验结果,采用 Plackett-Burman 试验筛选出对种群堆积角有显著影响的种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数,建立以这两种显著影响因子为自变量、种群堆积角为响应值的二元回归方程。用 Matlab 对方程组求解后得到标定后的种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数分别为 0.246、0.083。为检验标定后参数的可靠性,在 EDEM 中进行仿真验证试验,结果显示方形壳体装置仿真和物理堆积角的误差为 0.43%,圆筒装置仿真和物理堆积角的误差为 0.55%。为进一步验证标定后参数的准确性,采用气力式精量排种器,并选取 3 个关键特征尺寸和堆积截面积占比率,待种群稳定后将仿真和物理试验做对比,最后得到进种口种群上边界最大凸点处与排种盘水平中心线距离 H_1、种群轮廓边界与透明观察窗左侧竖线的交点到排种盘水平中心线距离 H_2 和堆积截面积占比率 r 等参数的相对误差均在 8.33% 以内。

关键词:油莎豆种子;接触参数;Plackett-Burman 试验;离散元;标定

中图分类号:S223.2*3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)12-0058-12　　**OSID**:

Calibration and Analysis of Seeding Parameters of *Cyperus esculentus* Seeds Based on Discrete Element Simulation

CHEN Yong[1]　GAO Xiaoxun[1]　JIN Xin[2,3]　MA Xiaoran[1]　HU Bin[4]　ZHANG Xiuli[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*
2. *Science and Technology Innovation Center for Completed Set Equipment, Longmen Laboratory, Luoyang* 471003, *China*
3. *College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471003, *China*
4. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: The shape of *Cyperus esculentus* seeds is irregular and the surface is uneven. Most of the domestic seed equipment of the seed ball is improved based on the large seed ball seed feeder. Due to the lack of accurate simulation parameters during the discrete element simulation experiment, this results in errors in the simulation and optimization analysis of the seed dispenser. To solve this problem, the intrinsic parameters and the contact parameters between seeds and seeding device were measured, and the seed particle filling model was constructed by reverse engineering technology. According to the results of simulation accumulation test of square shell and cylinder, Plackett-Burman test was used to screen out the interspecific static friction coefficient and interspecific rolling friction coefficient which had significant influence on population accumulation angle. A binary regression equation was established with these two significant influence factors as independent variables and population accumulation angle as response value. After solving the equations with Matlab, the calibrated interspecific static friction coefficient and interspecific rolling friction coefficient were 0.246 and 0.083, respectively. To verify the

收稿日期:2023-08-31　修回日期:2023-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52005167、52165036)、河南省博士后科研项目(202102061)、河南省科技攻关项目(232102111122)、现代农业机械兵团重点实验室项目(BTNJ2021001)和河南省重大科技专项(231100110200)

作者简介:陈永(1987—),男,讲师,博士,主要从事现代智能农业机械装备设计研究,E-mail:chenyong@henau.edu.cn

通信作者:金鑫(1986—),男,副教授,博士生导师,主要从事种苗高速栽插装备与农机状态检测技术研究,E-mail:jx.771@haust.edu.cn

reliability of parameters after calibration, simulation verification test was carried out in EDEM, and the results showed that the error between simulation and physical accumulation angle of square shell device and physical accumulation angle of cylinder device was 0.43%, and the error between simulation and physical accumulation angle of cylinder device was 0.55%. To further verify the accuracy of parameters after calibration, the pneumatic precision seed disperser was used and the three key feature sizes and the ratio of stack cross-sectional area were selected. After *Cyperus esculentus* seeds was stabilized, the simulation and physical test were compared, finally, the relative errors of the parameters H_1 from the maximum convex point of the upper boundary of the population to the horizontal center line of the seed platen, H_2 from the intersection point of the population profile boundary and the vertical line on the left side of the transparent observation window to the horizontal center line of the seed platen, and the ratio r of the accumulation cross-sectional area were all within 8.33%.

Key words: *Cyperus esculentus* seeds; contact parameters; Plackett – Burman test; discrete element; calibration

0　引言

油莎豆(*Cyperus esculentus*)是一种新型草本油料作物,营养丰富、抗旱节水、产油量高[1],可在贫瘠的边际地、沙化地种植。近几年来中国大豆和油料消费持续上升,但我国油料自给率仅为 30%,增加油料产能势在必行。而油莎豆单位面积产油量是大豆的 3 ~ 5 倍,在油料作物中其产值和经济效益均居首位[2-3],具有广阔的发展前景。

油莎豆种植是油莎豆推广生产的重要环节,机械化种植是提升油莎豆种植效益的关键一步,排种器作为播种机的核心,在播种过程中起到举足轻重的作用[4]。同时近年来,随着计算机技术的愈加成熟,选取离散元法(Discrete element method,DEM)研究散粒体物料的运动学特性越来越多地应用到农业机械装备领域中[5-8]。目前常用的排种器主要分为两大类,即机械式和气力式,机械式排种器对种子的形状特征要求严格,容易卡种、漏种。而气力式排种器对种子外形尺寸适应性强,易实现单粒精量播种,省种不伤种。无论以气力或机械式排种器为研究对象[9],采用基于离散元法的 EDEM 或 EDEM – Fluent 气固耦合的仿真试验方案时[10-12],都需要在 EDEM 软件中设置散粒体物料的本征参数(如颗粒泊松比、密度和剪切模量)和颗粒之间及颗粒与不同材料的接触参数(碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数)。物料颗粒的本征参数大多数为固定值,和真实测量值并无较大差异,而种子颗粒填充模型与真实颗粒几何特点和表面特性的不同,致使仿真试验时不能达到与物理试验相同的效果,需要重新对接触参数进行标定优化以满足试验要求。张胜伟等[13]运用 EDEM 离散元仿真软件,选用 Hertz Mindlin with bonding 粘结模型构建绿豆种子颗粒模型,对绿豆种子接触参数进行了标定,以仿真堆积角和实际堆积角的相对误差为指标对数据进行了处理优化。于庆旭等[14]采用逆向工程技术构建了三七种子的三维模型,对三七种子和 ABS 塑料间的的接触参数进行了标定,通过仿真和台架试验采用二次回归正交旋转组合试验对参数进行优化。LIANG 等[15]鉴于目前棉茎仿真模型简单,使用离散元软件 EDEM 构建仿真模型并进行数值模拟,建立了接触参数与休止角之间的二阶响应模型,具有较高的可靠性和预测性。GABRIEL 等[16]将多刚体动力学仿真和离散元法相结合,应用于描述高性能气体发生器。GHODKI 等[17]通过比较试验和数值仿真模拟结果,自制箱体装置校准了大豆 Hertz – Mindlin 模型的 DEM 输入参数,该结果可以用于后续大豆收获机械的模拟试验。HORABIK 等[18]基于小麦装卸循环试验数据对离散元接触模型参数进行了标定,用于谷物储存系统的建模,结果表明使用校准参数的试验数据与 DEM 模拟之间具有良好的对应关系。

本文以油莎豆种子为研究对象,对油莎豆种子的本征参数和接触参数进行测量。在 EDEM 仿真软件中构建油莎豆种子颗粒的填充模型,选用两种不同的装置模拟种群堆积角,通过 Plackett – Burman 筛选出对种群堆积角影响显著的因素,以堆积角为响应值建立两组回归方程,对种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数进行求解标定,选取气力式排种器进行验证试验,以期为油莎豆排种装置的离散元仿真优化提供参考。

1　材料和方法

1.1　油莎豆物理参数测定

1.1.1　油莎豆种子三轴尺寸和密度

油莎豆种子尺寸和形状会直接影响气力式精密排种器的吸附性能。试验中所用的圆粒油莎豆种子由定州市世和农业科技有限公司提供,具有产量高、绿色无污染等优点。随机选取圆粒油莎豆种子 300

粒,采用游标卡尺(精度 0.01 mm)测定其长度 L、宽度 W、厚度 T。油莎豆种子等效粒径 d 和球度 S_p 的计算式为

$$d = \sqrt[3]{LWT} \tag{1}$$

$$S_p = \frac{d}{L} \times 100\% \tag{2}$$

可得等效粒径 d 和球度 S_p 平均值分别为 11.00 mm、87%,球度 S_p 越接近 100%,种子形状越接近于圆形。采用 MTB1000D - B 型高精度电子天平(最小读数精度为 0.01 g)测量油莎豆种子千粒质量,试验重复 10 次。试验测得其 L、W、T 平均值分别为 12.60、11.30、9.38 mm,千粒质量平均值为 787.66 g。油莎豆种子三轴尺寸和千粒质量如表 1 所示。

表 1 油莎豆种子三轴尺寸和千粒质量

Tab.1 3D dimension and 1000-seed weight of *Cyperus esculentus* seeds

项目	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	体积/cm^3	千粒质量/g
最大值	15.92	14.98	12.5	1.329	788.65
最小值	10.00	8.86	6.80	0.352	786.95
平均值	12.60	11.30	9.38	0.712	787.66
标准差	1.164	1.077	1.058	0.183	0.540

对油莎豆种子的三轴尺寸利用 Origin 2021 进行分析,基本均呈正态分布,如图 1 所示。

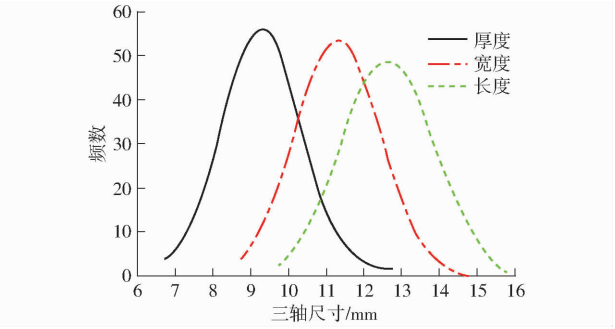


图 1 油莎豆种子三轴尺寸分布

Fig.1 Three-axis size distribution of *Cyperus esculentus* seeds

为了使模拟试验中油莎豆籽粒种群分布特性与实际情况近似,本文以其物理体积分布规律进行仿真设置。因为油莎豆种子近似为椭球形,故采用椭球体公式计算种子体积,求其平均值和标准差。对油莎豆种子的体积进行统计分析,其基本呈正态分布,如图 2b 所示,试验测得种子体积平均值和标准差分别为 0.712、0.183 cm^3。

使用高精度电子天平(最小读数精度为 0.01 g)随机测量 3 ~ 10 粒油莎豆颗粒,读出数值后依次放入有一定倾斜角的 250 mL 量筒中。量筒预先放入 140 mL 的清水,等到种子完全浸入水中并无空气水

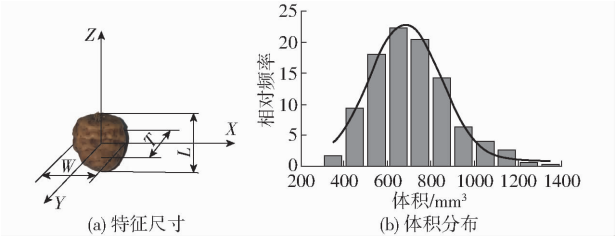


图 2 油莎豆种子的特征尺寸和体积分布

Fig.2 Characteristic size and volume distribution of *Cyperus esculentus* seeds

泡排出后记录放入若干粒种子后量筒液面读数,测量 12 组,得到密度 ρ 平均值为 1 102.39 kg/m^3。

1.1.2 泊松比

随机选取 12 粒油莎豆种子,采用 DF - 9000 型万能材料试验机以速度 0.1 m/s 沿油莎豆种子长度 L'方向(轴向)逐渐加载,当种子有破裂的迹象时停止加载,并记录此时种子长度方向的变形量,同时用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量种子宽度方向(横向)的变形量,泊松比计算式为

$$\mu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{(b - B')/B'}{(L' - l)/L'} \tag{3}$$

式中 μ——种子泊松比

ε'——种子横向应变,mm

ε——种子轴向应变,mm

L'——加载前种子长度,mm

l——种子破裂时长度,mm

B'——加载前种子宽度,mm

b——破裂时种子宽度,mm

计算种子泊松比,得平均值为 0.36。

1.1.3 弹性模量

选取压缩试验[19],采用 TA - XT plus 型质构仪,随机选取 12 粒油莎豆种子,分别用游标卡尺测量其长度 L、宽度 W、厚度 T。试验时种子轴向沿厚度方向放置,测得压缩前速度为 0.06 mm/s,压缩速度为 0.01 mm/s,压缩后速度为 1 mm/s,触发力为 3.30 N。

沿厚度方向压缩时,根据赫兹公式得弹性模量计算式为

$$E = \frac{0.338F(1-\mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}}\left[K_U\left(\frac{1}{R_U}+\frac{1}{R'_U}\right)^{\frac{1}{3}} + K_L\left(\frac{1}{R_L}+\frac{1}{R'_L}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{\frac{3}{2}} \tag{4}$$

$$\cos\theta = \frac{1/R'_U - 1/R_U}{1/R_U + 1/R'_U} \tag{5}$$

式中 E——油莎豆种子弹性模量,MPa

F——施加在油莎豆种子上的加载力,N

D——油莎豆种子变形量,mm

R_U、R'_U——油莎豆种子和上平板表面接触时的主、次曲率半径，mm

R_L、R'_L——油莎豆种子和下平板表面接触时的主、次曲率半径，mm

K_U、K_L——常数

θ——油莎豆种子上表面和压缩探头接触点处接触主平面的夹角，(°)

油莎豆种子球度 S_p 接近于 100%，则种子与上下平板接触时的曲率半径近似相同，所以可以将式(4)化简为

$$E=\frac{0.338F(1-\mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}}\left[2K_U\left(\frac{1}{R_U}+\frac{1}{R'_U}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{\frac{3}{2}} \tag{6}$$

其中 $R_U=[(L/2)^2+(T/2)^2]/T$

$R'_U=[(W/2)^2+(T/2)^2]/T$

剪切模量计算式为

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)} \tag{7}$$

式中 G——种子剪切模量，Pa

得到油莎豆种子剪切模量平均值为 3.09×10^7 Pa。

1.2 油莎豆种子与排种器接触参数测定

1.2.1 油莎豆相关静摩擦因数测定

静摩擦因数采用斜面法[20]测定。随机选取 12 粒油莎豆待测种子，测量装置如图 3 所示。

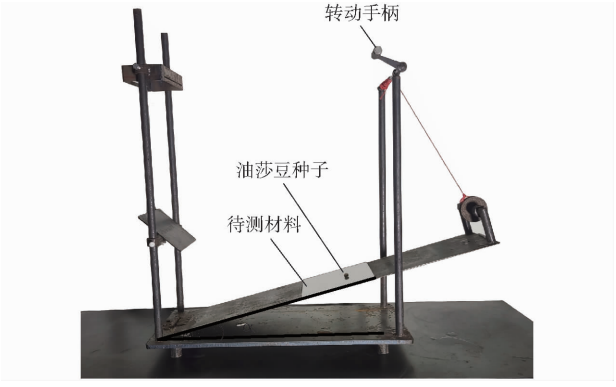


图 3　油莎豆与其他两种接触材料间的静摩擦因数测定装置

Fig. 3　Measurement of static friction coefficient between *Cyperus esculentus* seeds and other two contact materials

试验时先检查转动平台是否水平，把待测材料平放在平板后再将油莎豆种子沿长轴方向轻放在待测材料的表面，匀速缓慢转动手柄，随着倾角逐渐增大，当油莎豆种子具有开始向下运动的趋势时停止，并用量角器记录待测材料与水平面的夹角，每粒种子重复试验 3 次，求出其夹角 α 平均值。静摩擦因数计算式为

$$\mu'=\frac{F_f}{F_N}=\frac{mg\sin\alpha}{mg\cos\alpha}=\tan\alpha \tag{8}$$

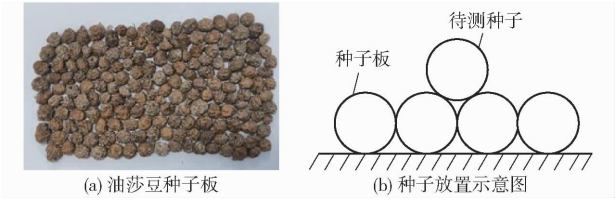
式中 F_f——两接触面间最大静摩擦力，N

F_N——待测材料对油莎豆种子的正压力，N

m——待测种子质量，kg

根据式(8)计算出油莎豆种子与钢板、油莎豆种子与有机玻璃间静摩擦因数 μ' 平均值分别为 0.42、0.37。

选择若干粒三轴尺寸接近的油莎豆种子(防止制成的种子板表面过于凹凸不平)，将其紧密排列并平铺于一张 A4 纸上，同时用强力胶水沿着缝隙滴入种子根部，静置后制成种子板如图 4 所示。再将油莎豆种子沿长轴方向放置在种子板的缝隙间，缓慢提升斜面倾角，当种子沿种子板有下滑的趋势时停止，记录种子板和水平面的角度。试验重复随机进行 10 次，得到油莎豆种间静摩擦因数平均值为 0.49。



(a) 油莎豆种子板　(b) 种子放置示意图

图 4　油莎豆种间静摩擦因数的测量

Fig. 4　Measurement of static friction coefficient between seeds of *Cyperus esculentus*

1.2.2 滚动摩擦因数

滚动摩擦因数与种子质量、形状特征、两物体接触表面特性有关[21-22]。采用斜面法进行测定，为使种子更好地处于滚动状态，选取球度 S_p 较高的 12 粒油莎豆种子(表 2)，待测材料分别为钢板、有机玻璃和种子板。

表 2　油莎豆种子等效粒径和球度

Tab. 2　Equivalent particle size and sphericity of *Cyperus esculentus* seeds

指标	长度/mm	等效粒径/mm	球度 S_p/%
平均值	12.11	11.37	94
标准差	0.765	0.760	1.1

实际试验时将待测材料放置在摩擦因数测试装置的平板上，缓慢转动手柄，使待测材料绕着另一侧慢慢转动，当种子沿着待测材料表面刚开始滚动时停止，记录待测材料倾角 α，每粒种子重复试验 3 次，并计算种子滚动摩擦因数 $\mu=\tan\alpha$，得出油莎豆种子和待测材料钢板、有机玻璃、种子板间滚动摩擦因数平均值分别为 0.195、0.213、0.268。

1.2.3 碰撞恢复系数

由牛顿运动定律，碰撞恢复系数的定义为碰撞后运动物体在碰撞点的法向分离速度与碰撞前法向接近速度的比值。本试验碰撞过程中有能量损失，为非弹性碰撞[23-24]。

测量碰撞恢复系数,通常选择自由落体或者平板碰撞这两种试验方法。油莎豆种子形状各异而且表面凹凸不平,采取自由落体试验方案时,在高速摄像机观察下种子会发生多点碰撞和快速旋转,使种子很难产生竖直向上的回弹,测量时则有较大的试验误差。为了更准确测量,试验采用平板碰撞的方法,将两个长×宽×厚分别为 20 mm×20 mm×4 mm 的有机玻璃板用亚克力板专用胶水粘结在一起,粘结后用同种规格(厚度为 4 mm)的透明有机玻璃垫在较短一边的下面,能刚好弥补短边的长度并使其对应的两边分别相等,粘结后有机玻璃板与水平面自然呈 45°倾角,装置如图 5 所示。随机选取 30 粒油莎豆种子进行碰撞试验(下落高度 h_0 为 250 mm),用高速摄像机记录其斜抛运动过程,逐帧观察后选取碰撞效果较好的 15 粒种子的运动轨迹进行测量点的选取和计算。

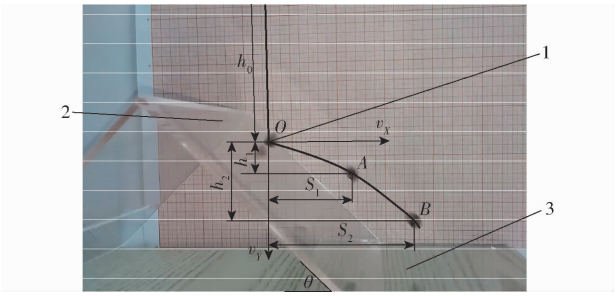


图 5 碰撞恢复系数测试原理图

Fig. 5 Test schematic of collision recovery coefficient

1. 油莎豆种子 2. 待测材料 3. 垫板

图中 O 为种子与待测材料的碰撞点;h_0 是种子从下落点到碰撞点 O 的距离,m;h_1、h_2 与 S_1、S_2 分别为种子在 A、B 两点相对于碰撞点 O 沿竖直和水平方向位移,m;v_X 和 v_Y 分别为种子碰撞后沿水平和竖直方向速度,m/s;斜板与水平面之间夹角 θ 为 45°。

油莎豆种子 1 从一定点自由下落与待测物体 2 发生碰撞,可得碰撞前法向接近速度为

$$v_n' = v_O \cos\theta' \tag{9}$$

其中

$$v_O = \sqrt{2gh_0} \tag{10}$$

式中 v_O——碰撞前瞬间的自由落体速度,m/s

θ'——待测材料在碰撞点的法线方向与种子自由落体方向的夹角,(°)

v_n'——碰撞前法向接近速度,m/s

种子在点 O 发生碰撞后作向下的斜抛运动。将其运动分解为沿水平方向初速度为 v_X 的匀速运动,和竖直方向初速度为 v_Y、加速度为 g 的匀变速运动。选取种子从碰撞点 O 到与垫板接触之间斜抛线运动轨迹中滞留点 A、B,并分别进行运动分析,得

$$\begin{cases} S_1 = v_X t_1 \\ h_1 = v_Y t_1 + \dfrac{1}{2} g t_1^2 \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} S_2 = v_X t_2 \\ h_2 = v_Y t_2 + \dfrac{1}{2} g t_2^2 \end{cases} \tag{12}$$

式中 t_1——种子从碰撞点 O 到测量点 A 的时间,s

t_2——种子从碰撞点 O 到测量点 B 的时间,s

根据碰撞恢复系数的定义,得到油莎豆种子的碰撞恢复系数为

$$C_r = \frac{v_n}{v_n'} = \frac{\sqrt{(v_X^2 + v_Y^2)\cos\left(45° + \arctan\dfrac{v_Y}{v_X}\right)}}{v_O \cos 45°} \tag{13}$$

式中 v_n——种子在碰撞点 O 发生碰撞后法向分离速度,m/s

C_r——种子碰撞恢复系数

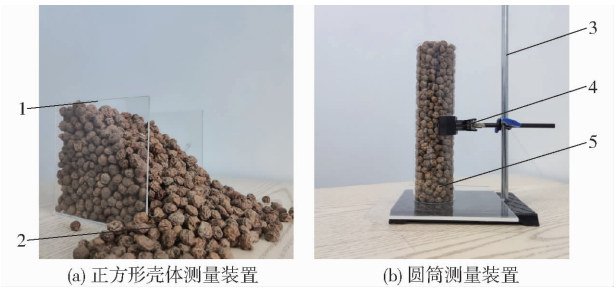
依据式(13)测得油莎豆种子和有机玻璃、钢板、种子板之间碰撞恢复系数平均值分别为 0.594、0.624、0.437。

2 堆积试验

2.1 物理堆积角测量

散粒体物料堆积角受颗粒自身特征和环境等影响,反映物料散落性能和摩擦特性[25-26]。采用抽板法选取两种不同测量装置对种子实际堆积角进行测定。测量装置选择自制无盖方形有机玻璃壳体如图 6a 所示,其长度×宽度×高度为 130 mm×130 mm×130 mm。先将油莎豆颗粒填满整个正方体,再缓慢抽拉其壳体一侧的挡板,使种群沿挡板开口方向在重力的作用下开始滑落,待种群稳定后种群斜坡与水平面的夹角即为油莎豆种群物理堆积角。采用空心圆筒法进行试验时,测量装置选择外直径 70 mm、内直径 66 mm、壁厚 2 mm、长 250 mm 的无上下底机玻璃圆筒如图 6b 所示,整个测量过程在微型铁架台上进行,在铁架台底座上放置一方形有机玻璃板,圆筒用万能爪夹夹持,将油莎豆种子充满整个圆筒并缓慢提升,种群在重力作用下从底部自然下落并逐渐堆积,待种群稳定后其坡面和水平面的夹角即为堆积角。

试验完成后,为减小人工测量的误差,选用高清摄像机正视于堆积角的采集图像信息,2 种装置各拍摄 10 组,并用 Matlab 软件对采集到的高清堆积角图像进行处理,如图 7 所示。首先读取图像信息并进行灰度处理(图 7b),再对灰度图选取合适的阈值进行二值化处理并选用 imfill 函数对图像进行填



(a) 正方形壳体测量装置　(b) 圆筒测量装置

图 6　物理堆积角测量试验

Fig. 6　Physical stacking angle measurement test

1. 有机玻璃壳体　2. 种子　3. 微型铁架台　4. 万能爪夹　5. 圆筒

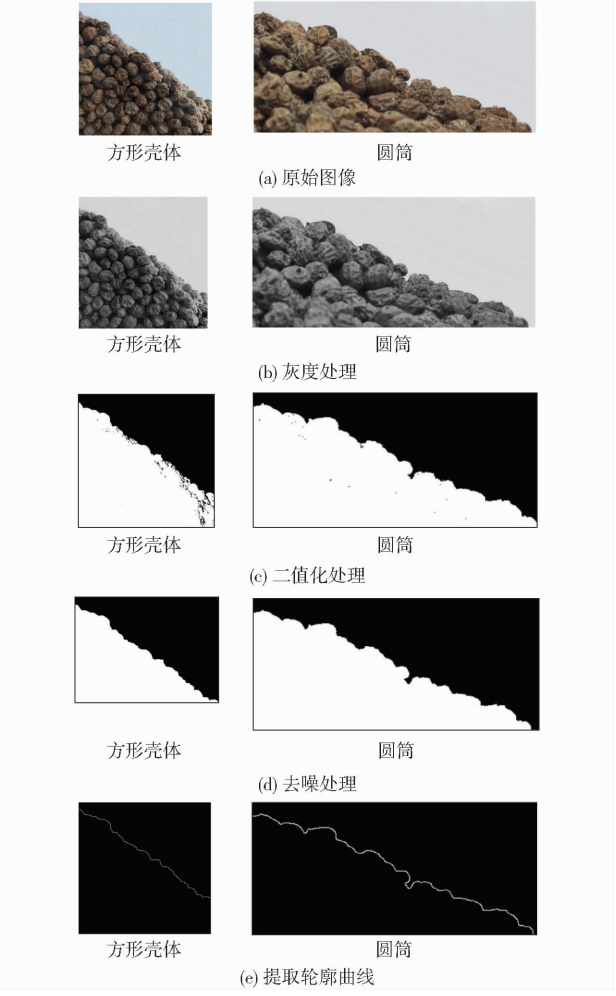


图 7　2 种不同方法对堆积角边缘轮廓的提取过程

Fig. 7　Extracting edge contour of repose angles with two types of methods

充，处理后图像会有很多噪点，为了提取理想的边缘轮廓曲线，选择合适的填充半径对其进行腐蚀或者膨胀处理，最后提取边界轮廓曲线并将图像信息导入 Origin 中，在 Origin 中手动提取堆积角边缘曲线的像素点，设置轴水平和竖直方向的坐标值并进行二维图绘制和线性拟合如图 8 所示，最后将拟合后直线的斜率转换为角度即为油莎豆种群的堆积角。各重复 10 次试验，如表 3 所示，得到方形壳体和圆筒两种装置种群堆积角正切值平均值分别为 0. 633、0. 562。

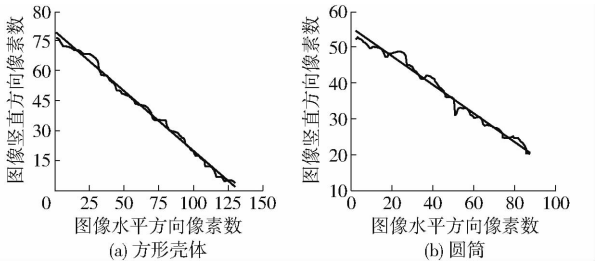


图 8　两种装置的直线拟合过程

Fig. 8　Straight-line fitting process for two devices

表 3　两种不同方法下堆积角的测量结果

Tab. 3　Measurement results of stacking angle under two different methods

试验序号	方形壳体堆积角正切值	圆筒堆积角正切值
1	0. 681	0. 403
2	0. 597	0. 635
3	0. 663	0. 613
4	0. 647	0. 639
5	0. 611	0. 552
6	0. 628	0. 552
7	0. 552	0. 592
8	0. 613	0. 535
9	0. 647	0. 537
10	0. 694	0. 564
平均值	0. 633	0. 562

2. 2　仿真堆积试验

2. 2. 1　油莎豆种子颗粒仿真模型建立

油莎豆种子表面凹凸不平且其形状不规则，采用 SolidWorks 或者 UG 等常规建模方法不能精确还原种子的外部轮廓特性。为了准确模拟种子的形状特征，选取种子长、宽、厚接近于 300 粒种子样本中的平均值，采用中观 RigelScan Elite 型手持式蓝色激光 3D 扫描仪（测量速率最大 480 000 次/s，分辨率最高 0. 01 mm，14 条蓝色激光线 + 1 束扫描深孔 + 5 条扫描细节）扫描油莎豆种子的外围轮廓，种子顶部和尾部分两次扫描，将扫描的点云数据导入到软件 Geomagic Warp2021，采用对齐命令拼接并进行去噪等操作。将两个点对象合并为新的多边形并进行孔洞填充、删除钉状物等，最后将生成的 . stl 格式的文件（图 9c）导入到 EDEM 2021 中进行颗粒的自动填充[27-28]。设置填充颗粒平滑值为 5，最小球体半径为 0. 8 mm，得到由 20 个不同粒径小球组合填充而成的油莎豆颗粒离散元模型。

2. 2. 2　仿真堆积角测量

在 EDEM 仿真试验中为了保证种群模拟堆积试验过程和实际堆积试验保持一致，在 SolidWorks 中建立和物理试验完全相同的两种堆积装置模型。将试验测得的油莎豆种子的本征参数和接触参数输

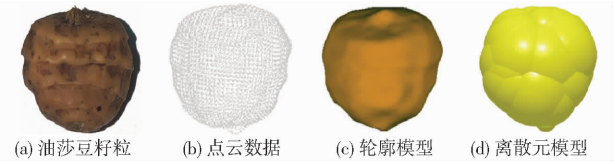


图 9 油莎豆种子颗粒及离散元模型构建过程

Fig. 9 Construction process of seed particle and discrete element model of *Cyperus esculentus* seeds

入 EDEM 中,其他参数见表 4[28-29]。模拟仿真中种群籽粒的粒径分布选择正态分布方式(Normal distribution)。颗粒生成方式选择静态生成,并统一沉积 1.35 s,使其充满整个装置内部,挡板或者圆筒以速度 0.039 m/s 缓慢提升,使得能在底部形成稳定的堆积角。仿真总时长为 5 s,步长为 5.25×10^{-6} s,网格尺寸为 3.5 倍的最小颗粒半径,选用 Hertz - Mindlin 接触模型,试验结束后采集图像(图 10)并用 Matlab 软件对种群仿真堆积角进行处理,记录其正切值。

表 4 其他材料仿真参数

Tab. 4 Other material simulation parameters

参数	数值
有机玻璃板泊松比	0.5
有机玻璃板密度/(kg·m^{-3})	1 180
有机玻璃板剪切模量/MPa	177
钢板泊松比	0.3
钢板密度/(kg·m^{-3})	7 865
钢板剪切模量/MPa	79 700

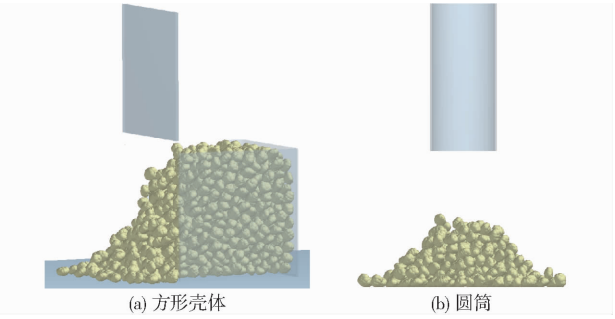


图 10 堆积角仿真试验

Fig. 10 Simulation tests for stacking angle

3 试验

3.1 Plackett - Burman 试验

应用 Design-Expert 软件,以油莎豆种群堆积角的正切值为响应值,进行 Plackett - Burman 试验,选取 8 个真实参数分别用 $A\sim H$ 表示,3 个虚拟参数分别用 J、K、L 表示,结合预试验和相关文献每个参数设置高低两个水平,编码分别用 1、-1 表示(表 5)。试验选择 1 个中心点,共 12 组,每组试验模拟后采集相应的堆积角图像,和物理堆积角一样,采用 Matlab 和 Origin 2021 测量其仿真堆积角并拟合求其正切值,试验方案和结果如表 6 所示。

表 5 Plackett - Burman 试验参数

Tab. 5 Parameters of Plackett - Burman test

因素	编码		
	-1	0	1
油莎豆种子泊松比 A	0.26	0.36	0.46
油莎豆种子剪切模量 B/MPa	26.0	30.9	36.0
油莎豆种间静摩擦因数 C	0.29	0.49	0.69
油莎豆种间滚动摩擦因数 D	0.22	0.27	0.32
油莎豆种子-有机玻璃板静摩擦因数 E	0.24	0.37	0.50
油莎豆种子-有机玻璃板滚动摩擦因数 F	0.18	0.21	0.24
油莎豆种间碰撞恢复系数 G	0.29	0.44	0.59
油莎豆种子-有机玻璃板碰撞恢复系数 H	0.39	0.59	0.79
虚拟参数 J、K、L			

表 6 Plackett - Burman 试验方案设计和结果

Tab. 6 Design and results of Plackett - Burman test

序号	因素											堆积角
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	正切值
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0.831 99
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1.082 75
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1.417 86
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	0.941 38
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1.171 72
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	0.772 54
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	0.859 87
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	0.744 98
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0.999 35
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1.297 83
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1.309 71
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.739 62

对试验结果进行方差分析,各个参数对响应值种子堆积角的影响如表 7 所示,模型 P 小于 0.05 表明此回归模型效果显著。A、B、E、F、G、H 对堆积角的影响较小,其 P 值均大于 0.05,表明其因子并不

表 7 Plackett - Burman 试验参数显著性分析

Tab. 7 Significance analysis of Plackett - Burman test parameters

参数	效应	平方和	贡献率/%	F	P
模型		0.61		15.60	0.022 6
A	0.026	2.078×10^{-3}	0.33	0.42	0.562 2
B	-0.062	0.012	1.84	2.36	0.222 4
C	0.4	0.48	75.60	96.60	0.002 2
D	0.16	0.079	12.54	16.03	0.027 9
E	0.038	4.228×10^{-3}	0.67	0.86	0.422 4
F	-0.021	1.321×10^{-3}	0.21	0.27	0.640 2
G	-3.683×10^{-3}	4.070×10^{-5}	6.470×10^{-3}	8.268×10^{-3}	0.933 3
H	0.12	0.041	6.45	8.24	0.064 0

显著。而油莎豆种间静摩擦因数(C)对种群堆积角的贡献率高达 75.6%，油莎豆种间滚动摩擦因数(D)为 12.54%，P 值均小于 0.05，表明这两个因子对响应值堆积角的影响大。剔除对堆积角影响较小的因子，在后续的全因素试验中选用对堆积角贡献率较大的显著因子油莎豆种间静摩擦因数(C)和油莎豆种间滚动摩擦因数(D)进行仿真标定，其余参数选取表 5 中的中间水平。

3.2　试验方案设计

依据 Plackett－Burman 试验，种间静摩擦因数和滚动摩擦因数对仿真堆积角的影响最大，以最接近实际堆积角的种间静摩擦因数、滚动摩擦因数为试验因素，堆积角为响应值，进行 3×3 的全因素试验(表 8)。仿真结束后同样用 Matlab 和 Origin 2021 软件对堆积图像进行处理，提取轮廓曲线并拟合后记录其正切值，堆积角测量结果如表 9 所示。

表 8　全因素试验设计

Tab. 8　Full-factorial design

编码	因素	
	油莎豆种间静摩擦因数	油莎豆种间滚动摩擦因数
－1	0.19	0.17
0	0.29	0.22
1	0.39	0.27

表 9　堆积角仿真试验结果

Tab. 9　Simulation test result of stacking angle

因素		堆积角正切值	
油莎豆种间静摩擦因数	油莎豆种间滚动摩擦因数	方形壳体	圆筒
0.19	0.17	0.666	0.481
	0.22	0.691	0.510
	0.27	0.728	0.542
0.29	0.17	0.771	0.638
	0.22	0.801	0.659
	0.27	0.829	0.712
0.39	0.17	0.862	0.766
	0.22	0.895	0.790
	0.27	0.922	0.819

3.3　回归分析

使用 Matlab 的图形用户界面程序分别对两种装置的仿真试验结果进行二元回归分析，拟合时分别采用完全二次、纯二次和交叉 3 种模型，当选择交叉模型进行回归分析时，求解方程组后得到的静摩擦因数、滚动摩擦因数并不能满足实际需求，故选择完全二次和纯二次两种模型进行回归分析，并得到相应回归模型的统计量：决定系数 R^2、F、F 对应的概率 P、剩余方差 S^2，由表 10、11 可知，其显著性和精确度整体上相差不大，其中纯二次回归模型的剩余方差略小于完全二次，最后选择剩余标准差较小的纯二次模型，同时也使其数学模型得到了进一步简化。最终以种间静摩擦因数 x_1、种间滚动摩擦因数 x_2 为自变量，种群堆积角为因变量的纯二次回归模型为

表 10　完全二次回归模型统计量

Tab. 10　Model statistics of complete quadratic regression

参数	方形壳体	圆筒
R^2	0.999 5	0.998 5
F	1 316.452	404.967
P	3.300×10^{-5}	1.930×10^{-4}
S^2	9.749×10^{-6}	6.156×10^{-5}

表 11　纯二次回归模型统计量

Tab. 11　Model statistics of pure quadratic regression

参数	方形壳体	圆筒
R^2	0.999 5	0.998 4
F	2 169.969	617.162
P	6.363×10^{-7}	7.842×10^{-6}
S^2	7.393×10^{-6}	5.049×10^{-5}

$$\begin{cases} Z_1 = 0.335\,3 - 0.632\,8x_1^2 + 0.144\,7x_2^2 + \\ \qquad 1.356\,2x_1 + 0.535\,2x_2 \\ Z_2 = 0.091\,1 - 1.820\,3x_1^2 + 2.550\,7x_2^2 + \\ \qquad 2.458\,3x_1 - 0.496\,5x_2 \end{cases} \tag{14}$$

完全二次回归模型为

$$\begin{cases} Z_1 = 0.331\,7 - 0.632\,8x_1^2 + 0.144\,7x_2^2 + \\ \qquad 1.368\,8x_1 + 0.551\,7x_2 - 0.057\,0x_1x_2 \\ Z_2 = 0.064\,6 - 1.820\,3x_1^2 + 2.550\,7x_2^2 + \\ \qquad 2.549\,7x_1 - 0.376\,0x_2 - 0.415\,5x_1x_2 \end{cases} \tag{15}$$

式中　Z_1——方形壳体试验装置种群堆积角，(°)

Z_2——圆筒试验装置种群堆积角，(°)

将两种不同试验装置中种群平均物理堆积角正切值 $Z_1=0.633$、$Z_2=0.562$ 代入方程组(14)，并使用 Matlab 求解其方程组，进行精确计算后得到种间静摩擦因数和滚动摩擦因数分别为 0.246、0.083。

使用 Matlab 软件并结合得出的纯二次回归模型，绘制在两种不同测量装置下种群堆积角变化趋势的三维曲面图。由图 11 可得，随着种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数的逐渐增大，种群堆积角整体也均呈变大趋势，且无论是哪种测量装置，种间静摩擦因数都较滚动摩擦因数对堆积角的影响更加显著，随着种间静摩擦因数的进一步增大，堆积角继续呈增大趋势，但其增长幅度变小，较之前文的 Plackett－Burman 试验更加说明种间静摩擦因数和

滚动摩擦因数对油莎豆种群堆积角影响的显著性。

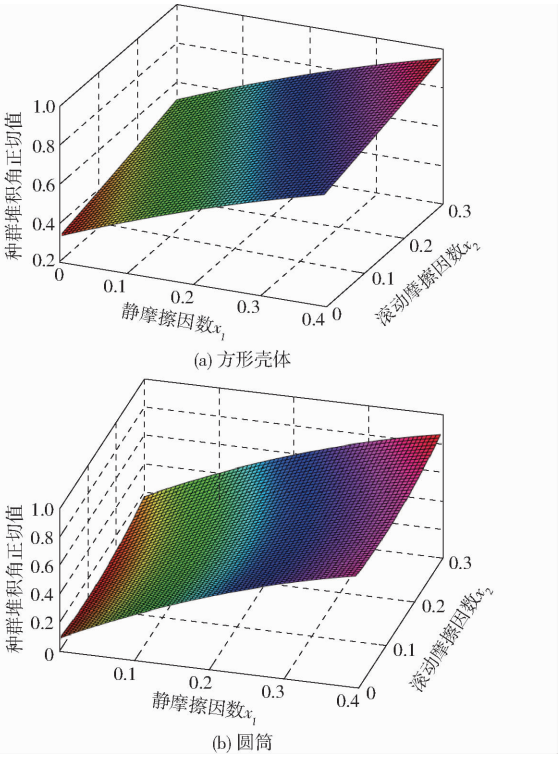


图 11 种群堆积角三维曲面图

Fig. 11 3D surface plots of stacking angle

4 验证试验

在 EDEM 中设置标定后种间静摩擦因数为 0.246、种间滚动摩擦因数为 0.083，并进行仿真试验，其他参数和 2.2.2 节中仿真参数保持一致，利用 Matlab 进行图像处理并得到油莎豆种群堆积角，最后标定前与标定后、实际物理试验的堆积角和边界轮廓曲线如图 12、13 所示。方形壳体测量装置得到标定后仿真堆积角为 32.46°，与实际物理试验堆积角 32.32°的相对误差为 0.43%。圆筒测量装置仿真标定后堆积角为 29.44°，与物理试验堆积角 29.28°的相对误差为 0.55%，试验结果表明，标定后仿真堆积角和实际堆积角无显著差异，此模型参数准确可靠。

选择气吸式油莎豆精量排种器进行试验验证。随机选取 280 粒油莎豆种子，从进种口（有机玻璃）倒入排种器内腔中并与钢制排种盘接触，如图 14 所示。待种子稳定不再滑落后，测量种群分布关键特征尺寸进种口种群上边界最大凸点处与排种盘水平中心线的距离 H_1、种群轮廓边界与透明观察窗左侧竖线的交点到排种盘水平中心线的距离 H_2 和轮廓边界与透明观察窗右侧竖线的交点到排种盘水平中心线的距离 H_3（图 14d），测量结果和误差如表 12 所示。

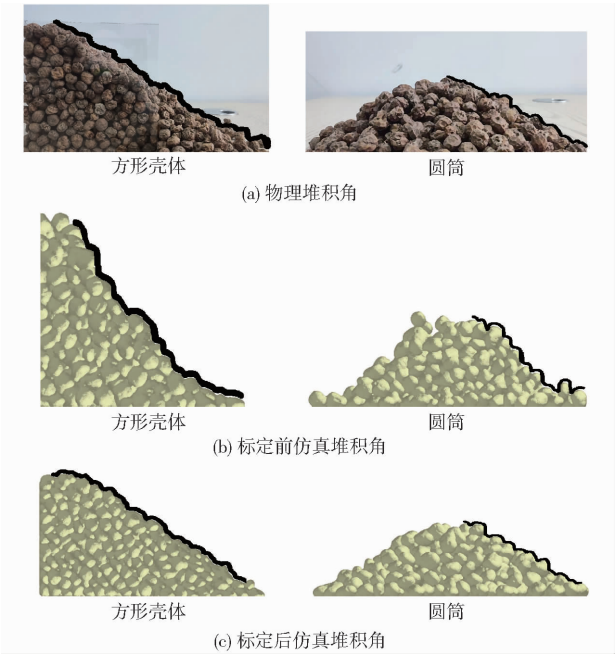


图 12 两种装置标定前后堆积角对比

Fig. 12 Comparison of stacking angle before and after calibration of two devices

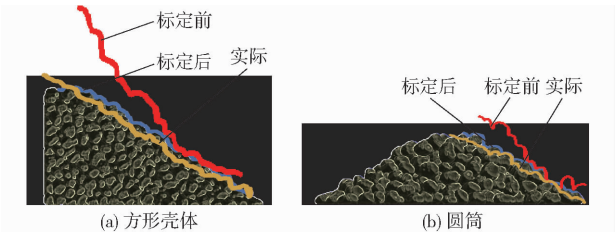


图 13 两种装置标定前后边缘轮廓曲线对比

Fig. 13 Comparison of edge contour curve before and after calibration of two devices

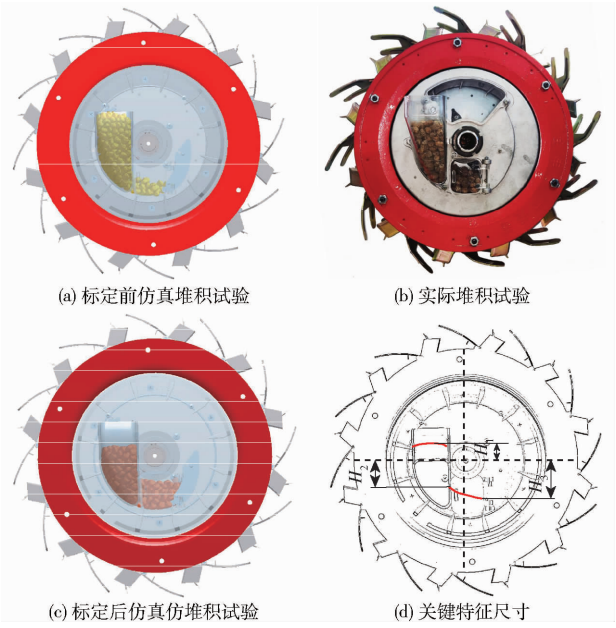


图 14 排种器标定前后物理与仿真试验

Fig. 14 Physical and simulation tests before and after seeding device was calibrated

表 12　仿真与物理试验种群特征尺寸对比

Tab. 12　Comparison of feature sizes between simulation and physical test

参数	仿真测量值/mm	物理测量值/mm	误差/%
H_1	33.23 ± 2.67	32.00 ± 1.20	3.84
H_2	37.21 ± 1.40	39.00 ± 2.35	4.60
H_3	49.50 ± 1.50	53.00 ± 2.20	6.60

稳定后的种群上边界轮廓与 L_1（种群轮廓边界与透明观察窗左侧竖线的交点到透明观察窗下边线的距离）、L_2（种群轮廓边界与透明观察窗右侧竖线的交点到透明观察窗下边线的距离）、和 L_3（透明观察窗水平边的长度）围成近似梯形的不规则形状（图 15），透明观察窗垂直边长度 L_4 与 L_3 都为固定值，分别为 55 mm 和 62 mm。为更加直观地表示种子在排种器底部的堆积情况，设种群与透明窗口接触截面积 S 占整个透明观察窗面积 S' 的比率为 r，计算式为

$$r = \frac{S}{S'} \tag{16}$$

其中

$$S = \frac{(L_1 + L_2)L_3}{2}$$

$$S' = L_3 L_4$$

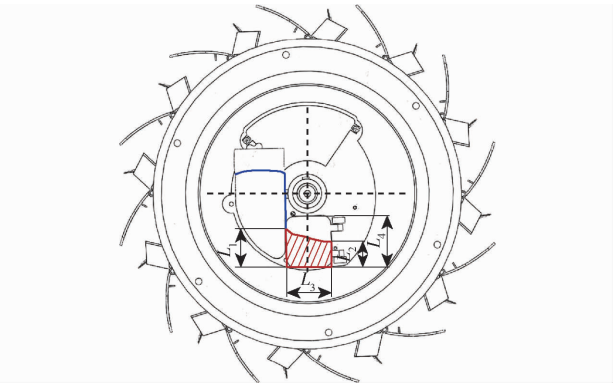


图 15　排种器底部种子堆积截面积示意图

Fig. 15　Schematic of seed accumulation area at bottom of seeding apparatus

分别对仿真试验和物理试验进行测量和统计，结果如表 13 所示。

结果表明，在用排种器对标定数据进行验证时：

表 13　物理和仿真试验堆积截面积相关参数

Tab. 13　Physical and simulation test stack cross-sectional area related parameters

参数	仿真测量值/mm	实际测量值/mm	相对误差/%
L_1	57.79 ± 1.40	56.00 ± 2.35	3.20
L_2	45.50 ± 1.50	42.00 ± 2.20	8.33
r	0.83 ± 0.02	0.79 ± 0.03	5.40

关键特征尺寸 H_1、H_2、H_3 和堆积截面积占比率 r 及相关参数 L_1、L_2 的仿真误差均在 8.33% 以内。标定后种群的流动更加顺畅，和标定前相比种子填充模型接触参数与真实接触参数更加接近。

5　结论

（1）应用逆向工程技术，采用三维立体激光扫描仪扫描油莎豆种子的外形轮廓，封装后在 EDEM 中采用自动填充方式构建种子颗粒仿真模型，并在离散元仿真过程中，依据测量得到的油莎豆体积正态分布数据，在 EDEM 中设置对应的种子粒径分布方式。

（2）在 EDEM 中进行离散元仿真试验，并用 Matlab 对种子堆积角进行图像处理，通过 Plackett－Burman 试验筛选得到对油莎豆种群堆积角影响较为显著的两个因素为种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数。

（3）通过仿真堆积试验，利用 Matlab 对两种不同装置（方形壳体和圆筒）的试验数据进行二元回归分析并建立方程组，求解后得到标定后种间静摩擦因数为 0.246、种间滚动摩擦因数为 0.083。

（4）基于标定后的参数进行验证试验，方形壳体堆积角测量装置仿真和物理试验的相对误差为 0.43%，圆筒装置仿真和物理试验的相对误差为 0.55%，在排种器中进一步验证，选择 3 个特征尺寸及堆积截面积占比率，其仿真和物理堆积试验相对误差均在 8.33% 以内，表明参数标定后，改善了油莎豆颗粒模型的流动性，有效避免了仿真时参数设置不当引起的失真问题，可为后续排种器离散元仿真提供参考。

参　考　文　献

[1] 郭婷婷，万楚筠，黄凤洪，等. 油莎豆主要营养成分及生理功能研究进展[J]. 中国油料作物学报，2021，43(6)：1174－1180.
GUO Tingting，WAN Chuyun，HUANG Fenghong，et al. Research progress on the main nutritional components and physiological functions of tiger nut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences，2021，43(6)：1174－1180.（in Chinese）

[2] 李志军，王绛，刘和，等. 油莎豆产业发展现状及建议[J]. 现代农业科技，2022(8)：225－231.
LI Zhijun，WANG Jiang，LIU He，et al. Status of development of *Cyperus esculentus* industry and its suggestion[J]. Modern Agricultural，Science and Technology，2022(8)：225－231.（in Chinese）

[3] MADUKA N，IRE F S. Tigernut plant and useful application of tigernut tubers（*Cyperus esculentus*）—a review[J]. Current Journal of Applied Science and Technology，2018，29(3)：1－23.

[4] XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178(5): 396 - 412.

[5] HAN Dandan, ZHANG Dongxing, JING Huirong, et al. DEM - CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,150(5): 426 - 438.

[6] 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)

[7] LEI Xiaolong, HU Hongji, WU Wencheng, 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(12): 22 - 33.

[8] MENG Xiangyi, JIA Fuguo, QIU Hualong, et al. DEM study of white rice separation in an indented cylinder separator[J]. Powder Technology, 2019, 345(3): 608 - 615.

[9] 王金武, 唐汉, 关睿, 等. 动定指勺夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 48 - 57.
WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 48 - 57. (in Chinese)

[10] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8 - 15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8 - 15. (in Chinese)

[11] 陈永, 王科杰, 罗昕, 等. 气吹悬浮供种滚筒式播种机吸附取种理论分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 21 - 26.
CHEN Yong, WANG Kejie, LUO Xin, et al. Theoretical analysis of cylinder seed-metering device and adsorption species based on the pneumatic suspension seed supply[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 21 - 26. (in Chinese)

[12] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 等. 基于 DEM - MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 91 - 104.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 91 - 104. (in Chinese)

[13] 张胜伟, 张瑞雨, 陈天佑, 等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 71 - 79.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CHEN Tianyou, et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71 - 79. (in Chinese)

[14] 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)

[15] LIANG Rongqing, CHEN Xuegeng, ZHANG Bingcheng, et al. Calibration and test of the contact parameters for chopped cotton stems based on discrete element method[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(5): 1 - 8.

[16] GABRIEL K P, LUI S. A preliminary model of high pressure roll grinding using the discrete element method and multi-body dynamics coupling[J]. International Joural of Mineral Processing, 2016, 156(11): 32 - 42.

[17] GHODKI B M, PATEL M, NAMDEO R, et al. Calibration of discrete element model parameters: soybeans[J]. Comput. Part. Mech., 2018, 6: 3 - 10.

[18] HORABIK J H, WIACEK J, PARAFINIUK P, et al. Calibration of discrete-element-method model parameters of bulk wheat for storage[J]. Biosyst. Eng., 2020, 200: 298 - 314.

[19] 孙静鑫, 杨作梅, 郭玉明, 等. 谷子籽粒压缩力学性质及损伤裂纹形成机理[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 306 - 314.
SUN Jingxin, YANG Zuomei, GUO Yuming, et al. Compression mechanical properties and crack formation law of millet grain [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 306 - 314. (in Chinese)

[20] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
CONG Jinling. Study on seeding system and mechanism of pneumatic precision metering device for wheat and rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[21] WANG Lijun, LI Rui, WU Baoxin, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particuology, 2018, 38: 185 - 195.

[22] 马云海. 农业物料学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.

[23] 王立军, 刘天华, 冯鑫, 等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 313 - 322.
WANG Lijun, LIU Tianhua, FENG Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in

agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 313 – 322. (in Chinese)
[24] WANG Lijun, WU Baoxin, WU Zhenchao, et al. Experimental determination of the coefficient of restitution of particle-particle collision for frozen maize grains[J]. Powder Technology, 2018, 338: 263 – 273.
[25] HAMZAH M, BEAKAWI A H, OMAR S, et al. A review on the angle of repose of granular materials[J]. Powder Technology, 2018, 330: 397 – 417.
[26] XIA Rui, LI Bo, WANG Xuewen, et al. Measurement and calibration of the discrete element parameters of wet bulk coal[J]. Measurement, 2019, 142: 84 – 95.
[27] 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)
[28] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294 – 300.
LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 294 – 300. (in Chinese)
[29] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 227 – 235.
ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 227 – 235. (in Chinese)

(上接第 45 页)

[19] YUAN W, JI C, LIU Z, et al. Influencing factors of the distribution accuracy and the optimal parameters of a pneumatic fertilization distributor in a fertilizer applicatorr[J]. Agronomy, 2022, 12: 2222.
[20] 雷小龙, 廖宜涛, 王磊, 等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 67 – 75.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation of gas – solid two-phase flow and parameter optimization of pressurized tube of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67 – 75. (in Chinese)
[21] YATSKUL A, LEMIERE J, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161: 120 – 134.
[22] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 43 – 53.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on distributor device of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43 – 53. (in Chinese)
[23] 李衍军, 赵金辉, 赵佳乐, 等. 基于鲫鱼流线的气送式排种系统分配器仿生设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 80 – 87.
LI Yanjun, ZHAO Jinhui, ZHAO Jiale, et al. Biomimetic design and experiment of distributor of pneumatic seeding system based on crucian curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 80 – 87. (in Chinese)
[24] 李衍军, 刘瑞, 刘春晓, 等. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 54 – 61, 133.
LI Yanjun, LIU Rui, LIU Chunxiao, et al. Simulation and test of seed velocity coupling in seed tube of pneumutic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 54 – 61, 133. (in Chinese)
[25] ELYYAN M, ROZATI A, TAFTI D. Investigation of dimpled fins for heat transfer enhancement in compact heat exchangers [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2008, 51(11 – 12): 2950 – 2966.
[26] WANG Y, HE Y, LEI Y, et al. Heat transfer and hydrodynamics analysis of a novel dimpled tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1273 – 1281.
[27] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
[28] LI G, LI H, LI X, et al. Establishment and calibration of discrete element model for buckwheat seed based on static and dynamic verification test[J]. Agriculture, 2023, 13: 1024.
[29] YAN T, QU J, SUN X, et al. Numerical evaluation on the decaying swirling flow in a multi-lobed swirl generator[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14: 1198 – 1214.