

玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究

张荣芳 周纪磊 刘 虎 史 嵩 位国建 何腾飞

(山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 在 CFD-DEM 气固耦合仿真中, 粘结颗粒模型被广泛用于排种器大颗粒种子模型建立, 但该模型受建模方法的限制, 与传统球面填充法相比, 其表面粗糙度与真实种子的差距更为明显。在应用响应面法对颗粒接触参数进行标定时, 会存在因因素零水平值选取不当造成仿真标定参数失真的问题, 影响气固耦合仿真精度。针对此问题, 本文建立因素标定时零水平值与实测值的线性函数, 选取 6 组不同修正系数求解标定时零水平值, 并应用响应面优化法对玉米颗粒粘结模型的种间静摩擦因数和滚动摩擦因数两个关键因素进行标定。将不同修正系数下标定的玉米种子接触参数输入 EDEM 中进行提升仿真试验, 拟合不同修正系数取值时堆积角正切值的线性函数, 通过拟合方程求得修正系数取值为 0.197 7 时标定的玉米种间接触参数值最为准确, 且标定参数的最佳组合为玉米-玉米静摩擦因数 0.031、玉米-玉米滚动摩擦因数 0.003 9。将最佳参数组合输入 EDEM 中进行抽板仿真试验和排种过程仿真试验, 试验结果分别与真实试验对比, 发现标定参数后的仿真试验与真实试验种群分布相近, 二者无显著性差异, 表明标定后的玉米离散元接触参数是可信的。研究结果可为后续气力式排种器仿真过程标定参数范围选取提供参考。

关键词: 玉米; 离散元; 粘结模型; 标定; 种间接触参数

中图分类号: S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0069-09

Determination of Interspecific Contact Parameters of Corn and Simulation Calibration of Discrete Element

ZHANG Rongfang ZHOU Jilei LIU Hu SHI Song WEI Guojian HE Tengfei

(Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China)

Abstract: In order to get the optimal solution by comparative tests, the simulation analysis was widely used during the development process of air suction seed metering device. The gas-solid coupling simulation method was compatible because the single grain rate of air suction seed metering device was reached by different air pressures, and the process was filled with variable flow field and moving particles. The difference of contacting parameters between the simulation particle and the real particle would be bigger when the bonding particle model was implied during the coupling of Fluent. In order to solve the problem, the reasonable variable range during the process of calibrating the discrete element parameters was reached with the measured values of contact parameters between maize species. The steps were as follows: the rolling friction and the static friction of corn-corn were measured by slope method and energy conservation method of high speed photography. The linear function between the zero level of variable range and the measured value was established (the best calibration range of zero level was equal to the measured coefficient value of coefficients). In order to find the optimal coefficient value, six groups of different coefficients were selected to solve the variable range, and the response surface optimization method was applied to optimize and calibrate the corn interspecific contact parameters with the real measurement of corn accumulation angle as the objective quantity. The accumulation angle of simulation was obtained by calibrations parameters and compared with the real accumulation angle got by

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-07-29

基金项目: 山东省重大科技创新项目(2019JZZY020622)、农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室开放项目(NJY2022QN04)和山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2022A31)

作者简介: 张荣芳(1985—),女,工程师,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: 523829575@qq.com

通信作者: 史嵩(1986—),男,高级工程师,主要从事精量播种技术与装备研究,E-mail: shisongfox@163.com

lifting tests. The relation between curve of accumulation angle was calculated by different coefficients values. The value of optimized parameter during the calibration range was the most accurate when the coefficient was 0.197 7. The best combination of fixed parameters was as follows: the static friction coefficient between corns was 0.031, the rolling friction coefficient between corns was 0.003 9. There was no significant difference between the simulation results of the simulation results of the best parameter with the real experiment. The results showed that the contact parameters of the calibrated discrete element of corn were reliable. Those parameters and calibration methods can be set as references for the selection of calibration parameter range in the simulation process of follow-up air suction seed metering device.

Key words: corn; discrete element; binding model; calibration; contact characteristics parameters

0 引言

近年来随着播种技术发展与农户对播种质量要求的提高,气力式排种器因其播种精度高、对种子机械损伤少、适宜高速作业等优点,得到广泛研究应用^[1-2]。气力式排种器在排种过程中,种子除受颗粒场和重力场的影响外,还与气流关系较大。EDEM-FLUENT耦合模拟方法能同时考虑气流场和颗粒运动的相互影响,是一种目前较优的模拟多相流数值分析的方法^[3-4]。

在 EDEM 中建立仿真模型需要大量的参数,主要包括本征参数(密度、泊松比、剪切模量)和接触参数(恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等)^[5-6]。物料本征参数和实际试验测量数值基本一致,而由于颗粒模型与真实颗粒在外形上存在一定差异,使得接触参数与真实测量值存在误差,因此,很多学者提出采用虚拟标定试验对离散元仿真中所需的微观参数进行确定。王云霞等^[7]建立一种数学回归模型,求解玉米种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数。刘凡一等^[8]应用 Box-Behnken 试验结果建立了休止角与显著性参数的二阶回归模型并对小麦间的接触参数进行优化。韩燕龙等^[9]应用离散元法研究了水稻颗粒滚动摩擦因数对堆积角及堆积体的影响,并对其滚动摩擦因数进行了标定。COETZEE 等^[10]采用剪切和侧限压缩试验对玉米颗粒的摩擦系数和刚度系数进行标定,并进行了试验验证;COETZEE 等^[11]和 PASHA 等^[12]通过研究表明在 EDEM 仿真时不同形状颗粒包括不同球组合的颗粒采用的参数不同,需要通过试验标定。

采用 Fluent 耦合时,为保证流场计算正确,要求颗粒体积小于网格体积,而实际上即使最小的玉米种子,用整体方法创建的颗粒,其体积也比网格大很多,因此采用颗粒粘结方法构建玉米颗粒仿真模型^[13]。粘结玉米颗粒模型与真实玉米种子及传统“叠加法”填充的颗粒模型在外形上存在一定差异,因此在 EDEM 仿真参数选取时差异较大。在对接触参数进行标定之前需进行大量的爬坡试验确定参

数的大致范围。目前,还没有关于对粘结模型仿真时种间接触参数选取范围的研究,而在用响应面法进行接触参数标定时已知因素的范围越小越精确,标定的精度会越高。本文在以上研究的基础上,基于斜面法和高速摄影技术的能量守恒法,应用物料特性测量装置测量玉米-玉米静摩擦因数和玉米-玉米滚动摩擦因数,并以测得值为参考,建立实测值与最佳标定范围零水平的线性方程,取 6 个不同修正系数求得标定参数范围,应用响应面法对玉米-玉米静摩擦因数和玉米-玉米滚动摩擦因数进行标定,寻找标定参数的最佳范围。以期为颗粒物料仿真标定时参数范围选取提供参考。

1 玉米种间接触参数真实测定

1.1 接触参数的选择

EDEM 仿真中颗粒参数众多,其中接触参数是影响种子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,查阅文献[7,14]发现,在用颗粒粘结仿真模型时颗粒-颗粒静摩擦因数、颗粒-颗粒滚动摩擦因数较其他参数对仿真结果影响更显著。因此为提高仿真试验的效率和精度,剔除相对不显著的影响因素,将玉米-玉米静摩擦因数、玉米-玉米滚动摩擦因数 2 个因素重点标定。

1.2 设备与材料

试验设备如图 1 所示,主要由试验台架、种间接触参数测量模块(图中 a)、抽板堆积角测量模块(图中 b)、提升堆积角测量模块(图中 c)、碰撞恢复系数测量模块(图中 d)、控制系统等组成。种间接触参数测量模块主要包括倾斜支撑板(角度 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 可调)和控制系统,可用于颗粒物料静摩擦因数和滚动摩擦因数的测定。提升堆积角测量模块包括亚克力无底圆筒和堆积测量控制系统,用于物料实际堆积过程测试。

试验用玉米种子为登海 605,千粒质量 406 g,试验时实测平均含水率 11.4%。因玉米种子外形对静摩擦因数和滚动摩擦因数影响较大^[15-18],因此本文从试验用种挑选 4 000 粒种子,分成扁平与类圆 2

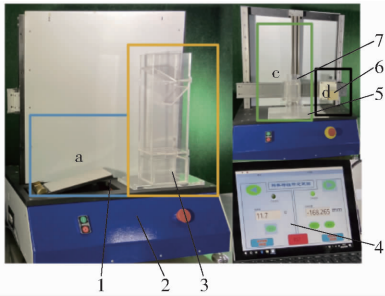


图 1 物料特性测试装置

Fig. 1 Material characteristics test devices

1. 倾斜支撑板 2. 试验台 3. 亚克力抽板装置 4. 操作界面
5. 亚克力板 6. 跌落抽板装置 7. 亚克力无底圆筒

类,数量比例为 4:1,分别对其外形尺寸进行测量,测量结果如表 1 所示。

表 1 试验用玉米种子主要参数

Tab.1 Main parameters of experimental corn seeds

种子 尺寸	静摩擦因数		滚动摩擦因数		堆积角	
	扁平	类圆	类圆	类圆	扁平	类圆
长	9.032	8.432	8.832	8.967	8.643	
宽	6.743	7.742	7.867	6.547	7.542	
厚	4.396	7.535	7.695	4.034	7.784	

1.3 种间静摩擦因数测定

1.3.1 静摩擦因数测定方法

如图 2 所示,种间静摩擦因数采用斜面滑动法进行测量。试验时,先把倾斜板调为水平,把选出的玉米种子放在导轨上,缓慢匀速提升角度,当倾斜板与水平面之间的夹角达到一定值使得种子有向下滑动的趋势时,该夹角 θ 即为静摩擦角,静摩擦因数为 $\tan\theta$ 。

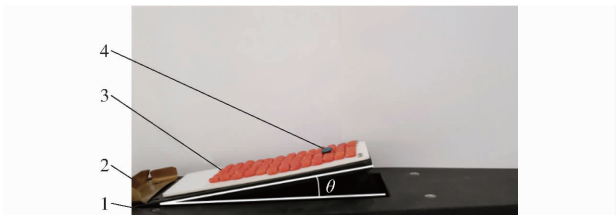


图 2 静摩擦因数测试试验

Fig. 2 Static friction coefficient test

1. 大理石板 2. 防护板 3. 种子板 4. 试验种子

1.3.2 静摩擦因数测试结果

静摩擦因数测试进行 30 次重复试验,测试结果如表 2。

表 2 玉米-玉米静摩擦因数

Tab.2 Static friction of corn seeds against corn seeds

材料	最小值	最大值	平均值	标准差
种子板	0.507	0.290	0.332	0.085

1.4 种间滚动摩擦因数测定

1.4.1 滚动摩擦因数测定方法

滚动摩擦因数的测量采用基于高速摄像技术的能量守恒方法^[19]。一般斜面与水平面夹角越大,种子从斜面上产生的滑动、弹跳机率越大,为保证试验顺利进行且数据可靠,本试验选取 18°~42°共 11 个角度,每个角度重复试验 20 次。试验过程中采用日本 Photron 公司生产的高速摄像机,Nikon 公司镜头。设置拍摄帧率为 1 000 f/s,采集区域 768 mm×768 mm,曝光时长 997 μs。玉米种子的运动轨迹通过高速摄像机采集(如图 3),运用数据线传输到 Phantom 操作软件,记录种子滚动结束时的速度,即第 n 帧的速度,因第 n 帧与 $n-1$ 帧之间的时间间隔为 0.001 s,假定在这期间种子是匀速滚动的。则小球滚动结束时的速度 V_s 为

$$V_s = \frac{k \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2} + \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}}{2\Delta t}$$

(1)

式中 V_s ——小球滚动结束时的速度,mm/s
 X_n ——第 n 帧时对应的小球横坐标,mm
 Y_n ——第 n 帧时对应的小球纵坐标,mm
 Δt ——第 n 帧与 $n-1$ 帧之间的时间间隔,s
 k ——实际尺寸与图像尺寸的比例系数
依据能量守恒定律算出滚动过程中损失的能量比例为

$$C_f = \frac{G - E_k}{G} = k_1 \cot\theta$$

(2)

式中 C_f ——滚动摩擦造成的能量损失占总能量的比例
 G ——小球滚动开始时的重力势能,J
 E_k ——滚动结束时的动能,J
 θ ——斜面倾角,(°) k_1 ——斜率

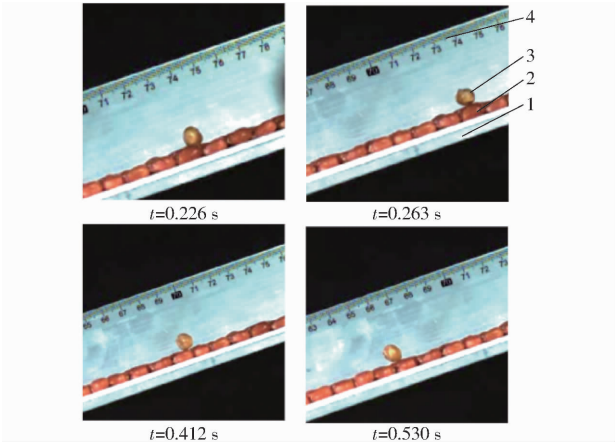


图 3 滚动摩擦因数测试试验

Fig. 3 Rolling friction coefficient test

1. 铝合金支撑板 2. 种子板 3. 试验种子 4. 刻度尺

由公式知 C_f 与斜面倾角的余切函数呈线性关系,其斜率 k_1 就是滚动摩擦因数。

1.4.2 滚动摩擦因数测试结果

整理滚动摩擦试验数据,得到 $18^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 范围内 11 种角度下小球在亚克力板与种子板滚动过程中的能量损失比例(C_f)如表 3 所示,依据表 3 的数据做 C_f 的散点图,在 Excel 2016 中直线拟合其与提升板倾斜角余切 $\cot\theta$ 之间的线性关系,如图 4 所示。

表 3 不同角度下各材料的 C_f

Tab.3 Static friction of corn seeds against different materials

角度/(°)	余切值	均值	标准差
18	3.078	0.710	0.135
20	2.747	0.683	0.119
23	2.356	0.649	0.104
25	2.145	0.618	0.092
28	1.881	0.647	0.083
30	1.732	0.645	0.053
33	1.540	0.623	0.092
35	1.428	0.608	0.102
38	1.280	0.585	0.110
40	1.192	0.556	0.127
42	1.111	0.502	0.118

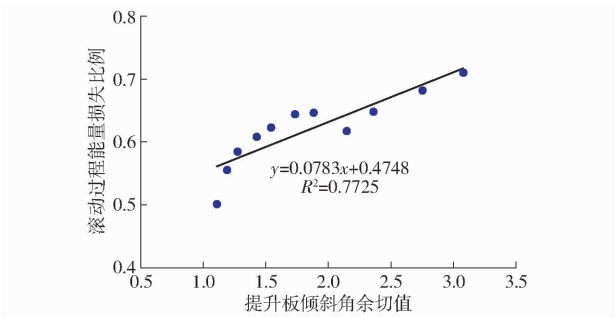


图 4 玉米种子与玉米种子间滚动摩擦因数

由图 4 看出:玉米种间滚动摩擦因数拟合方程为

$$y = 0.0783x + 0.4748 \quad (R^2 = 0.7725) \quad (3)$$

方程的斜率即为滚动摩擦因数,即玉米种子与种子间的滚动摩擦因数为 0.0783。

2 种间接触参数标定

2.1 实际堆积角试验

试验时,圆筒放置在水平固定的亚克力底板上,数出大约 1 000 粒玉米种子通过漏斗落入无底圆筒内,待玉米种子稳定后,通过电机以速度 0.033 m/s 提升圆筒,从而在底板上形成一个近似锥形的颗粒堆,如图 5 所示。



图 5 堆积试验

Fig.5 Accumulation test

1.亚克力板 2.玉米堆 3.亚克力圆筒 4.横梁 5.丝杠

试验结束后用 Matlab 软件进行灰度化、阈值分割、边界搜索获得边界像素点等一系列处理后^[20-21],线性拟合得到堆积角的正切值如表 4 所示。

表 4 提升法堆积角测量结果

Tab.4 Results of stacking angle measurement by lifting method

试验序号	左侧正切值	右侧正切值
1	0.412	0.465
2	0.497	0.473
3	0.448	0.500
4	0.460	0.511
6	0.385	0.403
7	0.440	0.472
8	0.435	0.449
9	0.383	0.390
10	0.371	0.406
平均值	0.426	0.457
标准差	0.0629	0.0633

2.2 玉米种子离散元模型

为建立玉米种子的仿真模型,提高仿真精度,根据试验用种子外形特点进行人工分级,分为扁平大粒、扁平小粒、扁平长粒、类圆 4 种。通过三维扫描仪扫描典型玉米种子,生成玉米种子 stl 模型,并在 EDEM 中采用颗粒聚合体的方法建立仿真颗粒粘结模型,得到玉米种子模型,如图 6。仿真试验时,设置 4 种玉米种子模型数量总量为 4 000 粒,扁平大粒、扁平小粒、类圆、扁平长粒比例为 6:2:1:1。

2.3 仿真方法与参数

仿真试验采用一种基于响应面法的通用旋转组合设计,以颗粒间静摩擦因数 x_1 、滚动摩擦因数 x_2 为试验因素,以实测堆积角正切值为指标,进行二因素五水平优化试验。仿真过程试验条件与真实试验相同,仿真参数种间静摩擦因数和滚动摩擦因数按实测值作为零水平得其因素编码如表 5 所示。其他参数参考文献[22-25],其值如表 6 所示。

2.4 通用旋转组合试验设计与结果

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行回归

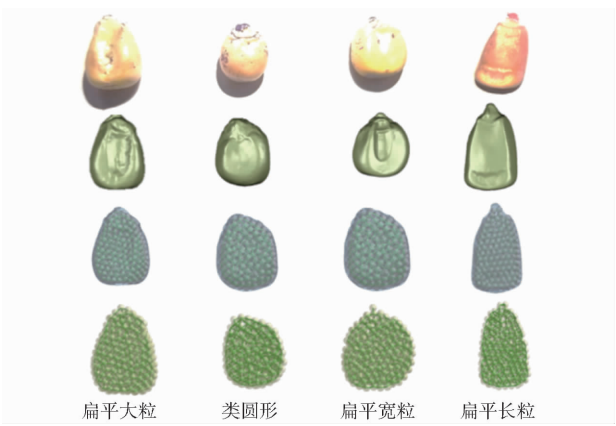


图 6 玉米种子模型

Fig. 6 Simulation model of corn seeds

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Experiment factors and codes

编码	因素	
	x_1	x_2
-1.414	0.053	0.013
-1	0.135	0.032
0	0.332	0.078
1	0.529	0.124
1.414	0.611	0.143

表 6 玉米种子与几何体的离散元模拟参数

Tab. 6 Physical property parameters of corn seeds and geometry

参数	数值
泊松比	0.4
剪切模量/Pa	1.37×10^8
玉米种子密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 197
玉米与玉米碰撞恢复系数	0.182
玉米与有机玻璃静摩擦因数	0.495
玉米与有机玻璃滚动摩擦因数	0.112

分析,利用响应面法寻找最佳参数组合。试验方案与结果如表 7 所示, A 、 B 为颗粒间静摩擦因数、滚动摩擦因数编码值。

表 7 通用旋转组合试验设计及结果

Tab. 7 Design and results of central composite test

序号	因素		堆积角正切值
	A	B	
1	0	0	0.492 4
2	0	0	0.466 2
3	0	0	0.473 4
4	0	0	0.471 3
5	0	0	0.482 5
6	1.414	0	0.499 9
7	-1	-1	0.496 5
8	0	1.414	0.527 9
9	1	1	0.566 4
10	-1.414	0	0.412 1
11	-1	1	0.497 5
12	0	-1.414	0.419 9
13	1	-1	0.498 2

通过 Design-Expert 软件得拟合回归方程为

$$\tan \theta = 0.48 + 0.024A + 0.028B \tag{4}$$

目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \tan \theta(A, B) = 0.426 \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1.414 \leq A \leq 1.414 \\ -1.414 \leq B \leq 1.414 \end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

求得颗粒间静摩擦因数为 0.090、滚动摩擦因数为 0.030,将上述参数代入 EDEM 得仿真堆积角为 30.17°,与堆积角实测值 23.07° 相对误差 30.78%。因此直接采用实测值作为因素零水平进行仿真标定后的仿真结果与真实试验相差较大。

3 因素零水平值设计与试验

3.1 试验设计

为确定仿真标定试验因素的零水平及因素水平的最优值区间,本研究以实测值为参考,假设最佳标定范围的零水平与实测值存在一定线性关系,以公式 $\delta = \varepsilon x_0$ 表示,其中 δ 表示最佳标定范围的零水平值, x_0 表示实测的变量值, ε 为要寻找的最佳修正系数。本文分别取 ε 为 0.1、0.125、0.25、0.3、0.5、0.8 进行大量仿真标定计算。 ε 取值不同时,因素编码如表 8。因数据较大,具体计算标定过程仅以 ε 为 0.125 时为例列出,其余 ε 取值时标定方法相同,因此只列出最后标定结果(表 9)。

表 8 不同 ε 取值下因素水平

Tab. 8 Factors and levels under different ε values

因素	ε	上水平	零水平	下水平	距离水平 平 r 点	距离水平 - r 点
玉米 - 玉米静摩擦因数	0.1	0.049 6	0.033 2	0.016 8	0.056 4	0.01
	0.125	0.063 8	0.041 5	0.019 2	0.073 0	0.01
	0.25	0.134 6	0.083 0	0.031 4	0.156 0	0.01
	0.3	0.163 0	0.099 6	0.036 2	0.189 2	0.01
	0.5	0.276 0	0.166 0	0.056 0	0.321 5	0.01
	0.8	0.446 6	0.265 6	0.084 6	0.521 5	0.009 7
玉米 - 玉米滚动摩擦因数	0.1	0.012 8	0.007 8	0.002 8	0.014 9	0.000 7
	0.125	0.015 7	0.009 7	0.003 7	0.018 2	0.001 2
	0.25	0.032 8	0.019 5	0.006 2	0.038 3	0.000 7
	0.3	0.039 5	0.023 4	0.007 3	0.046 2	0.000 6
	0.5	0.066 1	0.039 0	0.011 9	0.077 3	0.000 7
	0.8	0.106 0	0.062 4	0.018 8	0.124 0	0.000 7

3.2 仿真试验结果与分析

根据通用旋转组合设计及其结果(表 10),应用 Design-Expert 软件建立玉米种子堆积角正切值与种间接触参数的二阶回归模型,得到其二次多项式方程为

$$\tan \theta = 0.46 + 0.023A + 0.026B - 0.014A^2B \tag{6}$$

表 9 $\varepsilon = 0.125$ 通用旋转组合试验设计及结果

Tab.9 Design and results of central composite test

$\varepsilon = 0.125$

序号	因素		堆积角正切值
	A	B	
1	0	0	0.460 1
2	0	0	0.470 3
3	0	0	0.453 2
4	0	0	0.461 3
5	0	0	0.457 6
6	1.414	0	0.489 3
7	-1	-1	0.430 0
8	0	1.414	0.504 5
9	1	1	0.496 8
10	-1.414	0	0.417 7
11	-1	1	0.440 5
12	0	-1.414	0.430 5
13	1	-1	0.459 3

表 10 方差分析

Tab.10 ANOVA of quadratic polynomial model

of central composite test

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	7.678×10^{-3}	3	2.559×10^{-3}	37.86	$<0.000\ 1$
A	4.364×10^{-3}	1	4.364×10^{-3}	64.55	$<0.000\ 1$
B	2.738×10^{-3}	1	2.738×10^{-3}	40.50	0.000 1
AB	4.012×10^{-4}	1	4.012×10^{-4}	5.93	0.037 6
残差	6.085×10^{-4}	9	6.761×10^{-5}		
失拟项	4.499×10^{-4}	5	8.999×10^{-5}	2.27	0.223 5
纯误差	1.585×10^{-4}	4	3.963×10^{-5}		
总和	8.287×10^{-3}	12			

由模型方差分析结果可知,玉米-玉米静摩擦因数(A)、玉米-玉米滚动摩擦因数(B)对堆积角影响极其显著。该拟合模型的 P 值小于 0.000 1 ($P < 0.01$),说明该模型描述各参数与响应值之间的关系时,其因变量与全体自变量之间的关系极显著;失拟项 $P=0.223\ 5 > 0.05$,表明方程拟合良好。一般情况下,变异系数越低,试验可靠性越好,本试验中较低的变异系数(1.79%)说明试验可靠性良好;决定系数与校正决定系数一致性较高;精密密度测量的是信噪比,一般大于 4 的比例是可取的,本试验比率为 16.224,表示信号充足。

应用 Design-Expert 软件查看显著性因素与指标响应曲面图(图 7),随着两参数值的增大,堆积角正切值均呈现上升的趋势;玉米-玉米滚动摩擦因数增大时,堆积角的增大幅度比玉米-玉米静摩擦因数增大时堆积角的增大幅度略大。

根据上述试验结果及回归方程,将实测试验目标参数玉米堆积角正切值 0.426 代入回归方程,以

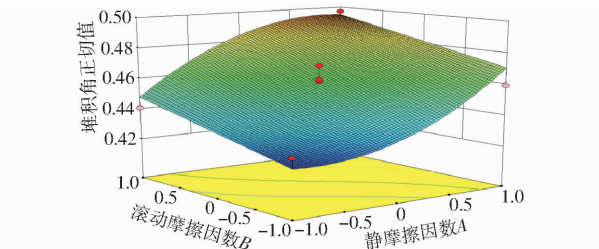


图 7 玉米种间接触参数对堆积角影响的响应面

Fig.7 Response surface and contour plot of effects of corn interspecific contact parameters

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如式(5)。求得玉米堆积角最优标定参数组合为:玉米-玉米静摩擦因数为 0.029,玉米-玉米滚动摩擦因数为 0.003 7。

3.3 最佳因素零水平确定试验

应用上述方法得到不同标定范围下最优参数组合结果如表 11 所示。

表 11 不同 ε 取值下标定参数

Tab.11 Optimal calibration parameters under different ε values

ε	玉米-玉米静摩擦因数	玉米-玉米滚动摩擦因数
1	0.090	0.030
0.8	0.085	0.024
0.5	0.056	0.012
0.25	0.038	0.004
0.125	0.027	0.003 7
0.1	0.019	0.002 5

分别将 5 组标定后的种间静摩擦因数和滚动摩擦因数输入 EDEM 中,进行堆积角仿真模拟。采集仿真结果图像并摄取边界与实际试验堆积角情况对比,如图 8。由图可知,曲线 $\varepsilon = 0.125$ 和真实情况拟合较好,证明仿真标定时零因素水平选择对标定结果影响显著。在以上取值为 0.125 倍的实测值作为零水平进行标定的堆积角边界与玉米种子真实堆积结果更吻合。

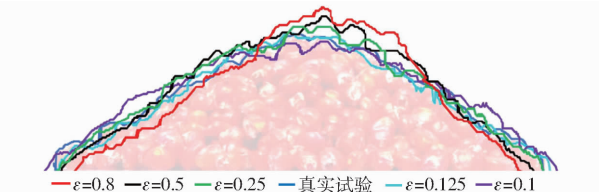


图 8 不同 ε 取值下仿真标定与真实试验边界拟合图

Fig.8 Result of calibration under different ε values

为寻找标定时试验点零水平的可靠值,以 ε 为横轴,以标定后仿真得到堆积角的正切值为纵轴,将试验结果绘制成散点图并拟合曲线(图 9)。由拟合方程可知,标定范围的零水平取值为实测值的

0.197 7 倍时,标定结果与实际情况符合度较好。且应用该修正系数下的因素水平进行仿真标定,获得玉米堆积角最优标定参数组合为:玉米-玉米静摩擦因数为 0.031、玉米-玉米滚动摩擦因数为 0.003 9。

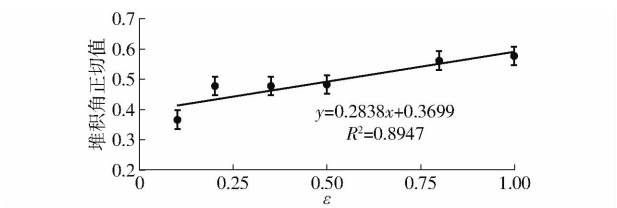


图 9 标定结果与 ε 拟合曲线

Fig.9 Fitted curve between calibration result and ε value

4 试验验证

4.1 堆积角验证

为验证标定后的仿真参数准确性,采用测量参数和 $\varepsilon = 1$ 、 $\varepsilon = 0.5$ 、 $\varepsilon = 0.197 7$ 时标定参数进行了抽板堆积角仿真试验和真实试验对比。真实测量和仿真试验分别进行 5 次重复,观察种子分布状态如图 10。对图中 3 个部位的堆积角提取边界进行处理后结果如表 12。

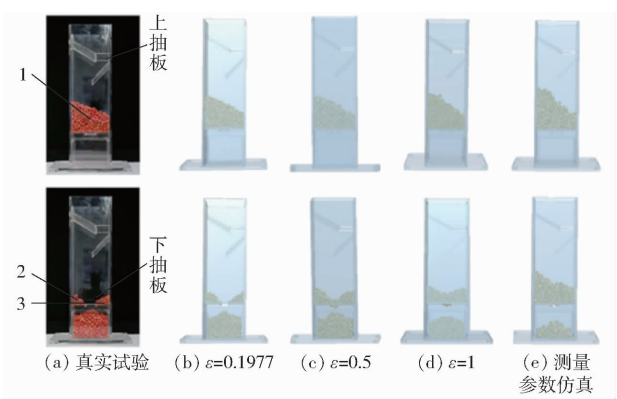


图 10 真实试验与仿真结果对比图

Fig.10 Comparison diagram of real test and simulation results

- 1. 上抽板抽出后形成堆积角
- 2. 下抽板抽出后形成左侧堆积角
- 3. 下抽板抽出后形成右侧堆积角

为检验不同仿真参数对仿真结果的影响是否显著,将上述试验数据通过 SPSS 软件进行分析,定义 $p < 0.05$ 为显著,通过显著性差异检验后,利用 Origin 2018 软件,在抽板试验 3 个不同位置处,观察不同仿真参数和真实试验堆积角正切值的变化,针对不同试验类型进行显著性分析,得柱状图如图 11 (图中同一位置不同小写字母表示差异显著)。

由图 11 可知,在抽板试验 3 个不同位置处的堆积角正切值因仿真参数取值不同而不同。在仿真试验时,仿真参数不同对 3 个位置堆积角的影响均显著,但 $\varepsilon = 0.197 7$ 标定参数仿真结果与真实试验结

表 12 仿真与真实试验堆积角正切值对比
Tab.12 Tangential value of stacking angle compared with that of real experiment

试验序号	试验类型	堆积角正切值		
		位置 1	位置 2	位置 3
1	测量参数仿真	0.836		
2		0.823		
3		0.809		
4		0.817		
5		0.840		
1	$\varepsilon = 1$	0.636	0.536	0.505
2		0.624	0.541	0.512
3		0.615	0.552	0.520
4		0.624	0.533	0.514
5		0.632	0.546	0.519
1	$\varepsilon = 0.5$	0.543	0.632	0.576
2		0.556	0.624	0.583
3		0.551	0.633	0.575
4		0.542	0.641	0.564
5		0.538	0.619	0.583
1	$\varepsilon = 0.197 7$	0.465	0.781	0.614
2		0.443	0.810	0.606
3		0.439	0.796	0.617
4		0.432	0.822	0.621
5		0.451	0.806	0.603
1	真实试验	0.420	0.812	0.616
2		0.432	0.859	0.641
3		0.416	0.781	0.601
4		0.452	0.721	0.609
5		0.471	0.794	0.629

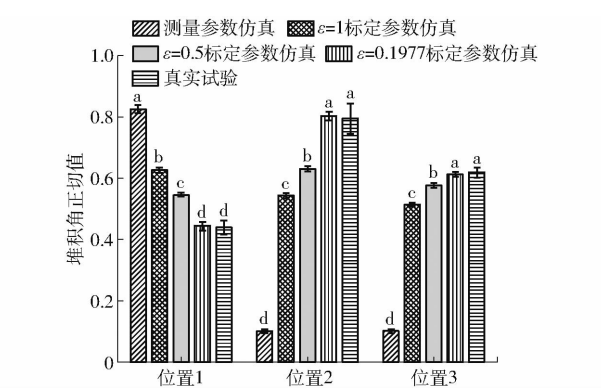


图 11 抽板试验不同位置下不同仿真参数结果与真实试验对比

Fig.11 Results of different simulation parameters compared with real test results at different positions of pumping test

果不显著,其余仿真参数仿真结果与真实试验结果显著。说明在 $\varepsilon = 0.197 7$ 标定参数可以直接用于真实试验的仿真。

4.2 EDEM – Fluent 排种验证

为进一步验证标定后的参数在气固耦合仿真时是否适用,进行了气固两相流耦合仿真试验,并对其

种群堆积角重点分析。采用山东省农业机械科学研究院研制的玉米气吸式精量排种器。排种器工作气压 -6 kPa,排种盘转速 20 r/min,型孔数 36 个,共进行 3 次测试,每次测试检测不低于 250 个型孔,试验采用登海 605 玉米种子。气固两相流耦合仿真设定排种盘转速 20 r/min,进气口压力 -6 kPa,颗粒场仿真时间步长为 1×10^{-5} s,气流场仿真时间步长为 5×10^{-4} s,玉米模型采用真实玉米种子三维逆向粘结颗粒填充而成,仿真总时间 4 s,仿真参数采用测量参数、 $\varepsilon = 1$ 、 $\varepsilon = 0.5$ 、 $\varepsilon = 0.1977$ 时标定的参数。试验结果如图 12 所示。

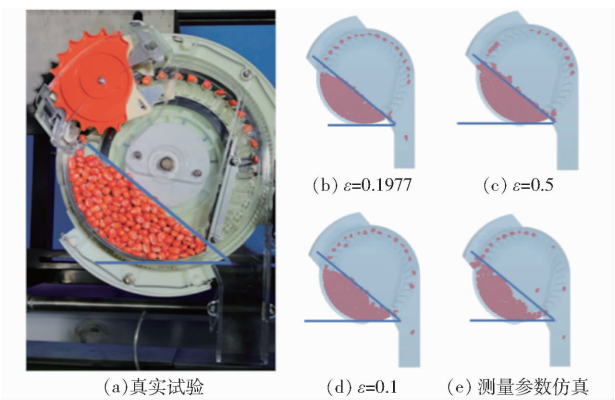


图 12 气固耦合不同标定参数仿真试验与真实试验对比

Fig. 12 Diagram of real test and simulation test for different calibration parameters of gas-solid coupling

利用 Matlab 对采集图像种群角度进行求解,在 Matlab 读取试验图像后,依次对图像进行去噪、灰度、二值化处理,最后提取种群边界点,边界点上的连线即为种群的边界曲线,利用最小二乘法对边界点进行直线拟合,拟合的直线斜率即为种群堆积角的正切值,5 次试验测量种群堆积角正切值结果如表 13。

试验结果表明,随着标定参数范围越大,仿真得到的种群堆积角正切值越大,且伴随有型孔漏充种的情况,也越偏离真实试验结果。证明标定参数范

表 13 不同参数仿真与真实试验堆积角正切值对比
Tab. 13 Tangential value of stacking angle compared with that of real experiment

试验类型	平均值	标准差
测量参数仿真	1.038 9	0.061 2
$\varepsilon = 1$ 标定参数仿真	0.923 1	0.054 3
$\varepsilon = 0.5$ 标定参数仿真	0.872 2	0.056 2
$\varepsilon = 0.1977$ 标定参数仿真	0.740 8	0.060 4
真实试验	0.713 6	0.082 1

围越大标定结果越不准确,在 $\varepsilon = 0.1977$ 标定参数仿真时与真实试验无显著性差异,且仿真堆积角与真实试验堆积角参数比较接近,误差小于 4%,可以用于气固耦合试验的模拟仿真。

5 结论

(1)利用斜面法测定了玉米-玉米间的静摩擦因数为 0.332;基于高速摄影技术的能量守恒方法对玉米-玉米间的滚动摩擦因数测定结果为 0.078。

(2)建立实测值与标定范围零水平的线性方程,修正系数分别取 1、0.8、0.5、0.25、0.125、0.1,计算相应的标定范围,应用响应面法进行参数标定,结果表明修正系数取值为 0.1977 倍的实测值作为零水平计算的范围进行标定的堆积角边界与玉米种子真实堆积结果更吻合。

(3)仿真时粘结模型物料接触参数标定时零水平取值与真实物料接触参数关系为 0.1977 的倍数关系,以此求得标定范围。应用通用旋转组合试验结果,建立了玉米种间接触参数与堆积角正切值之间的二次回归模型,对其求解得到玉米-玉米静摩擦因数为 0.031,玉米-玉米滚动摩擦因数为 0.0039。

(4)验证试验表明,标定后的参数改善了玉米模型的流动性,且气固耦合仿真排种过程中种群堆积角与真实试验堆积角参数比较接近,误差小于 4%,可以应用于实际排种过程仿真。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 张国忠,罗锡文,臧英,等. 水稻气力式排种器群布吸孔吸种盘吸种精度试验[J]. 农业工程学报,2013,29(6):13-20. ZHANG Guozhong, LUO Xiwen, ZANG Ying, et al. Experiment of sucking precision of sucking plate with group holes on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 13-20. (in Chinese)

[3] 刘立意,郝世杨,张萌,等. 基于 CFD-DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(8):27-32. LIU Liyi, HAO Shiyang, ZHANG Meng, et al. Numerical simulation and experiment on paddy ventilation resistance based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 27-32. (in Chinese)

[4] 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报,2013,44(2):22-29. MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 22–29. (in Chinese)
- [5] MARTINA C L, BOUVARDA D, SHIMAB 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.
- [6] 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.
- [7] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型间接触参数标定[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)
- [8] 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)
- [9] 韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 174501–174507. HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Phys. Sin., 2014, 63(17): 174501–174507. (in Chinese)
- [10] COETZEE C J, EIS D N J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 198–212.
- [11] COETZEE C J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape[J]. Powder Technol, 2016, 297: 50–70.
- [12] PASHA M, HARE C, GHADIRI M, et al. Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater[J]. Powder Technol, 2016, 296: 29–36.
- [13] 刘佳. 机械气力组合式精密排种器设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013. LIU Jia. Design and research of the mechanical-pneumatic combined precision seed-metering device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [14] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 46–54. HOU Zhanfeng, DAI Nianzu, CHEN Zhi, et al. Measurement and calibration of physical property parameters for agropyron seeds in a discrete element simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 46–54. (in Chinese)
- [15] 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): 125–142. 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): 125–142. (in Chinese)
- [16] 贾旭光, 陈曦, 李鑫. 不同粒度和堆载形态下散体瞬时自然安息角的实验研究[J]. 现代矿业, 2015(1): 25–27. JIA Xuguang, CHEN Xi, LI Xin. Experiment research on instantaneous natural repose angle of granular slope under different granularity and stack form[J]. Modern Mining, 2015(1): 25–27. (in Chinese)
- [17] 栗霞飞, 赵满全, 刘飞, 等. 一种基于离散元摩擦因数测定仪改进设计[J]. 农机化研究, 2018, 41(5): 76–80. LI Xiafei, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. An improved design of a tester based on discrete element friction coefficient[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 41(5): 76–80. (in Chinese)
- [18] 王立军, 赵惠君, 武振超, 等. 颗粒滚动摩擦系数对颗粒堆内部受力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(3): 65–72. WANG Lijun, ZHAO Huijun, WU Zhenchao, et al. Effect of coefficient of rolling friction on internal force of particles pile[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(3): 65–72. (in Chinese)
- [19] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34–41. CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34–41. (in Chinese)
- [20] FRACZEK J, ZLOBECKI A, ZEMANEK J. Assessment of angle of repose of granular plant material using computer image analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 17–22.
- [21] 贾富国, 韩燕龙, 刘扬, 等. 稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 254–260. JIA Fuguo, HAN Yanlong, LIU Yang, et al. Simulation prediction method of repose angle for rice particle materials[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 254–260. (in Chinese)
- [22] WEIGLER F, MELLMANNELL J. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer[J]. Particology, 2014, 12(2): 33–39.
- [23] KEPPLER I, KOCIS L, OLDAL I, et al. Grain velocity distribution in a mixed flow dryer[J]. Advanced Powder Technology, 2012, 23(6): 824–832.
- [24] BOAC J M, CASADA M E, MAGHIRANG R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1201–1216.
- [25] 王美美, 王万章, 杨立权, 等. 基于响应面法的玉米籽粒离散元参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 111–117. WANG Meimei, WANG Wanzhang, YANG Liquan, et al. Calibration of discrete element model parameters for maize kernel based on response surface methodology[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(3): 111–117. (in Chinese)