

包衣玉米种子离散元参数分析与标定

刘瑞^{1,2} 李衍军³ 刘忠军^{2,4} 刘立晶^{2,4} 吕海涛⁵

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 潍坊学院机电与车辆工程学院, 潍坊 261061; 4. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;

5. 东丰县农业机械技术推广服务中心, 辽源 136300)

摘要: 为确定最优包衣玉米种子离散元仿直接触参数组合,以真实试验和不同参数组合下仿真得到的包衣玉米种子休止角和堆积角的误差为响应值,标定包衣玉米种子离散元仿真参数。采用经典力学理论建立量化描述散体颗粒的运动力学方程,通过分析力学方程确定主要接触参数。通过 Central Composite 试验建立模型参数与响应值之间的多元二次回归方程,利用遗传算法 NSCA-Ⅱ 对多元二次方程进行多目标优化,获得最佳包衣玉米种子离散元模型接触参数组合:种间静摩擦因数为 0.432、种间滚动摩擦因数为 0.082、种间碰撞恢复系数为 0.178。结合台架试验和仿真试验,通过斜面滑动试验,得到马齿形玉米种子与有机玻璃间静摩擦因数为 0.116 4。验证试验得到堆积角仿真试验结果为 27.83°,与实测落种测得堆积角数值之间的误差为 1.76%,结果表明,标定的包衣玉米种子离散元模型接触参数准确可靠,可用于离散元仿真试验。

关键词: 玉米种子; 包衣; 离散元; 经典力学; 参数标定

中图分类号: S985.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0001-08

Analysis and Calibration of Discrete Element Parameters of Coated Maize Seed

LIU Rui^{1,2} LI Yanjun³ LIU Zhongjun^{2,4} LIU Lijing^{2,4} LÜ Haitao⁵

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

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

3. School of Electromechanical and Vehicle Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China

4. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Beijing 100083, China

5. Dongfeng Country Service Center of Agriculture Machinery Extension, Liaoyuan 136300, China)

Abstract: In order to determine the optimal contact parameter combination of discrete element simulation of coated corn seeds, the error rates of repose angle and stacking angle of coated corn seeds obtained from the real test and simulation under different parameter combinations were used as response values to calibrate the discrete element simulation parameters of coated corn seeds. The classical mechanics theory was used to establish the kinetic equations of granular particles, and the main contact parameters were determined by the analytical mechanics equations. The Central Composite test was used to establish the multiple quadratic regression equation between the model parameters and the response values. The genetic algorithm NSCA-Ⅱ was used to optimize the multiple quadratic equation, and the verification test was carried out to obtain the optimal contact parameter combination of the coated corn seed discrete element model, that was the interspecies static friction coefficient was 0.432, the interspecies rolling friction coefficient was 0.082, and the interspecies collision recovery coefficient was 0.178. Combined with bench test and simulation test, through inclined plane sliding test, the static friction coefficient between horse tooth corn seed and plexiglass was 0.116 4. In order to verify the accuracy of the calibration parameters, the four contact parameters were used to carry out the simulation test of seed ejection, the simulation test result of the stacking angle obtained by the test was 27.83°, compared with

收稿日期: 2021-07-15 修回日期: 2021-09-10

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科技专项和中国农业机械化科学研究院自研项目

作者简介: 刘瑞(1990—),男,博士生,主要从事农业机械设计与理论研究,E-mail: ruiliuqiusuo@163.com

通信作者: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事种植机械装备研究,E-mail: xyliulj@sina.com

the actual values of seed dropping, the error was 1.76%, the results showed that the demarcated discrete element model and contact parameters of coated maize seeds were accurate and reliable, and could be used in discrete element simulation experiments.

Key words: corn seed; coating; discrete element; classical mechanics; parameter calibration

0 引言

玉米是我国第一大粮食作物,单产居三大作物之首^[1],在我国农业生产中占有十分重要的地位。玉米种子质量是保证玉米稳产高产的重要农业资料,玉米种子经包衣处理能够达到防治苗期病虫害、促进生长发育、提高作物产量的目的^[2-3]。种子包衣能增加种子的价值、有力推动玉米的精密播种和科学管理。

采用玉米精密排种装置播种时,玉米种子在排种器中经历的充种、清种、携种、投种运动都属于散体颗粒的运动^[4];以上作业过程中,种子与种子、种子与排种器之间的作用力较为复杂;利用基于离散元的虚拟仿真技术可模拟玉米种子的运动规律,有助于探究排种机理,促进排种器的进一步优化,节约研究成本^[5-6]。优化包衣玉米种子离散元模型和仿真参数,可显著提高利用离散元法对排种器研究结果的准确性和可靠性。仿真参数^[7-9]主要包括包衣玉米种子本征参数(种子密度、几何尺寸、泊松比、弹性模量等)和基本接触参数(种子间静摩擦因数和滚动摩擦因数、种子与接触材料间静摩擦因数和滚动摩擦因数、碰撞恢复系数等);包衣玉米种子离散元模型的本征参数与同类型玉米种子的本征参数一致,但颗粒模型的误差和不同形状玉米种子间复杂的接触运动,以及玉米种子经包衣处理后部分接触参数发生变化,需要对接触参数重新标定。

崔涛等^[10]选择类球形玉米种子,借助高速摄像标定玉米种子与有机玻璃、镀锌钢板间的滚动摩擦因数。王云霞等^[11]采用原颗粒聚合体方法建立种子模型,以休止角和堆积角为试验指标,建立以种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数为自变量的回归方程,标定玉米种间摩擦因数。近些年来基于离散元的现代设计方法广泛应用于玉米、小麦、大豆、水稻、苜蓿等散体颗粒排种器研究^[12-17],但对影响显著仿真参数的选取缺乏理论依据。因此利用经典力学理论建立散体颗粒在排种器中的运动力学方程,并分析主要影响参数,对获取准确的模型参数具有重要的现实意义。本文以包衣玉米种子为研究对象,采用牛顿第二定律、牛顿第三定律和赫兹接触理论,建立量化描述散体颗粒的运动力学方程,通过力学方程分析并确定主要接触参数;建立不同形状玉米种

子颗粒模型,结合台架试验和仿真试验,通过最陡爬坡试验、Central Composite 试验和斜面滑动试验对主要接触参数进行标定;通过排出法进行验证试验,以期提供更为精确的包衣玉米种子离散元模型仿真参数。

1 颗粒接触力学模型

基于 EDEM 的离散元仿真中包衣玉米颗粒每个粒子被看作一个整体,系统中的任何颗粒由于重力加速度以及颗粒与颗粒、颗粒与排种器壁之间的粘弹性、非粘弹性和摩擦产生的力和扭矩而使颗粒发生平移和旋转运动。颗粒间和颗粒-壁面接触产生的力遵循牛顿第三定律,同时,颗粒间的相互作用产生的接触面积用一个近似公式表示。如图 1 所示,作用在两个颗粒接触区域的接触力由颗粒 i 和 j 之间的弹性摩擦和碰撞产生^[18],可表示为

$$\mathbf{F}_{ij} = \mathbf{F}_{n,ij} + \mathbf{F}_{\tau,ij} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{F}_{n,ij} = \mathbf{F}_{n,ij}^e + \mathbf{F}_{n,ij}^v$$

$$\mathbf{F}_{\tau,ij} = -\tau_{ij} \min(|\mathbf{F}_{\tau,ij}^s|, |\mathbf{F}_{\tau,ij}^d|)$$

式中 $\mathbf{F}_{n,ij}$ 、 $\mathbf{F}_{\tau,ij}$ ——法向和切向接触力

$\mathbf{F}_{n,ij}^e$ 、 $\mathbf{F}_{n,ij}^v$ ——垂直于接触表面的弹性阻尼力和粘性阻尼力

$\mathbf{F}_{\tau,ij}^s$ 、 $\mathbf{F}_{\tau,ij}^d$ ——接触面切线方向上的静摩擦力和动摩擦力

τ_{ij} ——切线方向的单位矢量,其方向和相互接触的两粒子 i 和 j 的切向速度 $v_{\tau,ij}$ 一致

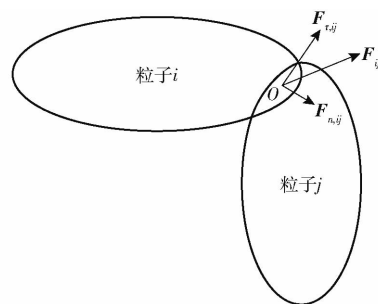


图 1 粒子 i 与粒子 j 接触区域的接触力

Fig. 1 Contact force of contact area between particle i and particle j

对于两个接触的粒子 i 、 j ,将粒子假定为椭球形粒子进行粒子的动力学分析,如图 2 所示,在法向上,根据赫兹接触理论可知弹性阻尼力和粘性阻尼力可表示为^[19-20]

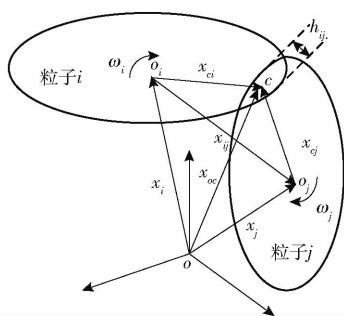


图 2 两粒子接触的几何示意图

Fig. 2 Geometric diagram of two particles contact

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{n,ij}^e = \frac{4}{3} \frac{E_i E_j}{E_i(1-\mu_j^2) + E_j(1-\mu_i^2)} \sqrt{R_{ij}} h_{ij}^{3/2} \mathbf{n}_{ij} \\ \mathbf{F}_{n,ij}^v = -\gamma_n m_{ij} \mathbf{v}_{n,ij} \end{cases} \quad (2)$$

其中
$$h_{ij} = R_i + R_j - |\mathbf{x}_{ij}| \quad (3)$$

$$m_{ij} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \quad (4)$$

$$R_{ij} = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{n_{ij}} = (\mathbf{v}_{ij} \mathbf{n}_{ij}) \mathbf{n}_{ij} \quad (6)$$

式中 E_i, E_j ——包衣玉米种子 i, j 弹性模量, Pa

 μ_i, μ_j ——包衣玉米种子 i, j 泊松比 m_i, m_j ——粒子 i, j 质量

R_i, R_j ——粒子 i, j 的等效半径, mm

$\mathbf{x}_{ij}$ ——粒子 i 与粒子 j 的位置矢量, mm

 γ_n ——法向上的粘性阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$

n_{ii} ——接触面中心法线方向的单位矢量

v_{ii} ——碰撞粒子在接触点相对速度, m/s

对于两个接触的粒子 i 和 j , 根据 Mindlin 理论

提出的静摩擦力可表示为^[16]

$$\mathbf{F}_{\tau, \ddot{u}}^s = \mathbf{F}_{\tau, \ddot{u}}^{s,e} + \mathbf{F}_{\tau, \ddot{u}}^{s,v} \quad (7)$$

其中 $F_{\tau_{ii}}^{s,v} = -\gamma_{\tau} m_{ii} \mathbf{v}_{\tau_{ii}}$ (8)

$$\mathbf{F}_{\tau,ij}^{s,e} = -\frac{16}{3} \frac{\varepsilon_i \varepsilon_j \sqrt{R_{ij} h_{ij}}}{\varepsilon_i (2 - \mu_i) + \varepsilon_j (2 - \mu_j)} \delta_{\tau,ij} \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (9)$$

$$\delta_{\tau,ij} = \int \mathbf{v}_{\tau,ij}(t) dt \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_{\tau,ij} = \mathbf{v}_{ij} - \mathbf{v}_{n,ij} \quad (11)$$

式中 $\varepsilon_i, \varepsilon_j$ ——包衣玉米种子 i, j 剪切模量, Pa

τ_{ij} ——接触面中心切线方向的单位矢量

$\delta_{\tau,ij}$ ——粒子 i 与 j 接触后切向方向滑动长度, mm

γ_{τ} ——切向方向的粘性阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$

$v_{\tau,ij}$ ——碰撞粒子在接触点切向相对速度,
m/s

$v_{n,ij}$ ——碰撞粒子在接触点法向相对速度,
m/s

对于上述非线性粘弹力模型, γ_n 是一个常数, 可以根据颗粒碰撞中测定的恢复系数确定。粒子间切向的粘性阻力与库伦摩擦力 $f_s \mathbf{F}_{n,ij}$ (f_s 为静摩擦因数) 有关^[21-25]。

两个粒子间动摩擦力基于库伦定律表示为

$$\mathbf{F}_{\tau,ij}^d = -\mu |\mathbf{F}_{n,ij}| \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (12)$$

式中 μ ——颗粒与颗粒间滚动摩擦因数

利用 EDEM 模拟包衣玉米种子在排种器中的运动规律时,需考虑作用在两个相邻接触的粒子上的所有粒子转矩,因此每个粒子的运动由牛顿第二定律可得

$$\begin{cases} m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij} + m_i g \\ I_i \frac{d^2 \omega_i(t)}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^N x_{cij} F_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

式中 x_i ——粒子 i 重心的位置, mm

ω_i ——粒子 i 的角速度, rad/s

g ——重力加速度, m/s^2

I_i ——粒子 i 的惯性矩, mm^4

x_{cij} ——两粒子接触点相对于粒子 i 重心的位置, mm

由式(1)、(2)、(7)、(12)可知,利用基于离散元的虚拟仿真分析软件 EDEM 分析包衣玉米种子的运动规律时,包衣玉米种子的基本接触参数(颗粒间静摩擦因数、颗粒间动摩擦因数、颗粒间碰撞恢复系数)是影响开展玉米播种运动过程仿真精度的主要参数。

由文献[14]可知进行排出法落种试验时,颗粒与试验器具表面间的静摩擦因数对休止角和堆积角影响较大。

2 包衣玉米种子种间接触参数标定

2.1 实测落种试验

试验选用的包衣玉米种子由河南富吉泰种业公司生产,品种为郑单 958,含水率为 13%,千粒质量 375.26 g。

选择自制有机玻璃容器,该容器长度为 300 mm,宽度为 150 mm,高度为 310 mm,容器中部设置有隔板。测量时,接种盒放置于落种口正下方;将种子从容器上方倒入,并用水平刮板将容器上部多余的种子刮除,保持种子与容器上部平面平齐;将活动插板从隔板中部缓慢抽出,玉米种子经历落种、堆积、静止,在容器上方区域两侧形成稳定的休止角 α ,在接种盒处形成稳定的堆积角 β ,如图 3 所示。为了减小误差,每组试验重复 5 次,取 5 次试验所得休止角和堆积角的平均值作为实测落种试验值。



图 3 实测落种试验

Fig.3 Actual seed drop test

为了得到准确的实测落种试验值,如图 4 所示,采用计算机图像处理技术及 Matlab 软件读取实测落种试验图像,依次进行灰度处理、二值化处理,获取种子堆积的边界线;再调用 cftool 工具箱对边界线进行直线拟合,根据拟合结果可知:堆积角拟合直线的相关系数 $R = 0.9824$,休止角拟合直线的相关系数 $R = 0.971$,表明拟合的效果很好,直线斜率即为所测角度的正切值;最后得到包衣玉米种子实测落种的堆积角为 27.35° 、休止角为 31.72° 。

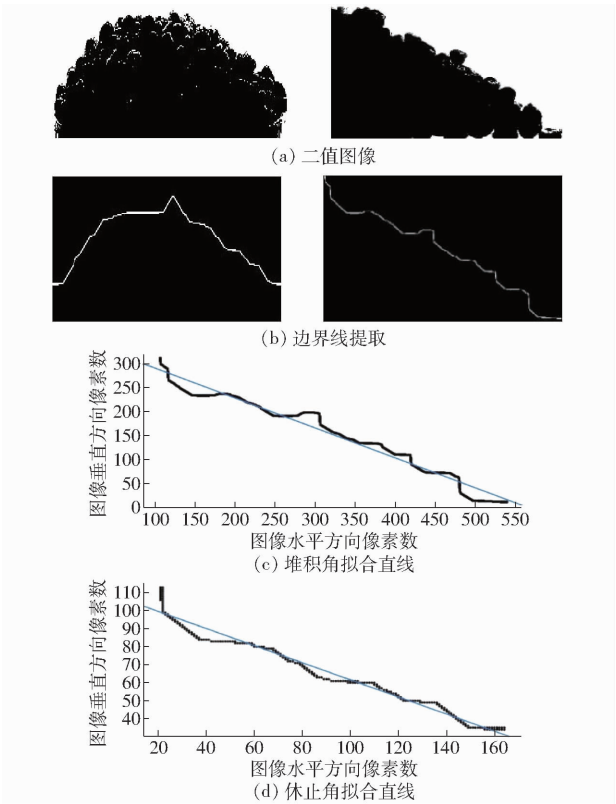


图 4 实测落种试验测量值

Fig.4 Measured values of actual seed drop test

2.2 仿真落种试验

2.2.1 包衣玉米种子模型

依据玉米种子不同的形状和尺寸分类建立单个玉米种子颗粒模型,可以精确模拟玉米种子颗粒在排种器中的实际运动情况^[26-28]。参考文献[19]关

于玉米种子颗粒的建模方法,首先将郑单 958 包衣玉米种子按几何形状分别归类为:马齿形、球锥形、类球形,每种形状玉米种子选取 50 粒,利用数显卡尺测得建模平均主尺寸,如表 1 所示。

表 1 包衣玉米种子建模主尺寸

Tab.1 Modeling principal dimension of coated corn seed

种子形状	上底 W_1/mm	下底 W_2/mm	高度 H_1/mm	除去穗轴 的高度 H_2/mm	上部 厚度 T_1/mm	底部 厚度 T_2/mm
马齿形	5.89	8.72	9.73	11.94	4.58	5.37
球锥形	5.56	8.12	8.51	10.36	4.47	6.52
类球形		9.39	8.55		7.31	

根据每个类别玉米种子形状,将马齿形简化为梯形,球锥形下部简化为半球形、上部简化为四棱台,类球形简化为球形。在兼顾考虑颗粒模型的还原精度和仿真时间、效率的原则下,马齿形、球锥形、类球形玉米种子分别采用 12 球、10 球、9 球进行堆积建模,建立的玉米种子模型如图 5 所示。



图 5 包衣玉米种子模型

Fig.5 Models of coated corn seed

2.2.2 EDEM 模型

仿真落种试验过程与实际落种试验过程一致,首先在三维绘图软件 SolidWorks 中建立相应的落种装置,然后导入 EDEM 软件中。为了保证试验条件相同,将如图 5 所示的玉米种子模型按照实际不同形状玉米种子数量占比进行设置,马齿形、球锥形、类球形的比例为 6:2:1。颗粒接触模型选用 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型。每种形状玉米种子按照体积正态分布的方式生成,仿真落种试验如图 6 所示。根据文献[3,8-9]确定部分仿真参数如表 2 所示。

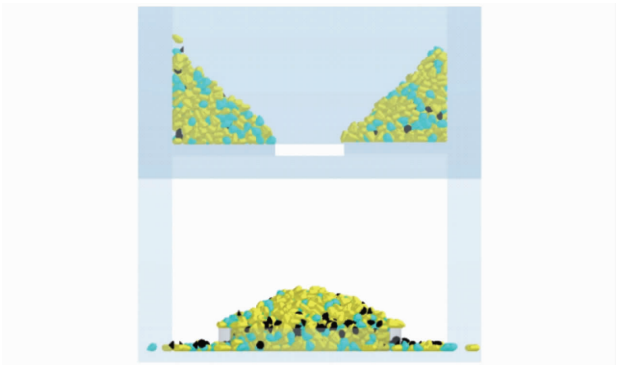


图 6 仿真落种试验

Fig.6 Simulated seed drop test

表 2 离散元仿真参数

Tab.2 Discrete element simulation parameters

参数	材料	
	包衣玉米种子	有机玻璃
泊松比	0.4	0.5
剪切模量/Pa	1.37×10^8	1.77×10^8
密度/(g·cm ⁻³)	1.197	1.18
碰撞恢复系数(与颗粒)		0.65

2.2.3 评价指标

堆积角仿真试验值误差计算式为

$$y_1 = \frac{\beta - \beta_1}{\beta_1} \times 100\%$$

式中 β_1 ——堆积角仿真试验值,(°)

休止角仿真试验值误差计算式为

$$y_2 = \frac{\alpha - \alpha_1}{\alpha_1} \times 100\%$$

式中 α_1 ——休止角仿真试验值,(°)

2.2.4 主要接触参数爬坡试验

通过 Plackett – Burman 试验,以颗粒间静摩擦因数 x_1 、颗粒间动摩擦因数 x_2 、颗粒间碰撞恢复系数 x_3 为试验因素,包衣玉米种群休止角仿真试验值误差为响应值,寻求 Central Composite 试验取值范围,试验方案与结果如表 3 所示,仿真休止角与实测休止角如图 7 所示。

表 3 最陡爬坡试验方案及结果

Tab.3 Design and results of Plackett – Burman test scheme

序号	因素			$y_2/\%$
	x_1	x_2	x_3	
1	0.30	0.050 0	0.10	20.18
2	0.35	0.062 5	0.13	13.32
3	0.40	0.075 0	0.16	6.25
4	0.45	0.087 5	0.19	1.31
5	0.50	0.100 0	0.22	5.92
6	0.55	0.112 5	0.25	8.10
7	0.60	0.125 0	0.28	19.63

由表 3 可知,休止角仿真试验值误差呈先减小后增大的趋势,取第 4 组试验为中心点,设为零水平,第 3 组和第 5 组分别为 -1 水平和 1 水平进行正交试验。

2.2.5 仿真正交试验方案

为了获得包衣玉米种子离散元模型最佳组合参数,根据回归正交试验设计原理,以颗粒间静摩擦因数、颗粒间动摩擦因数和颗粒间碰撞恢复系数为试验因素,进行仿真落种试验,试验因素编码如表 4 所示。

根据三元二次回归正交试验设计,需安排 20 组

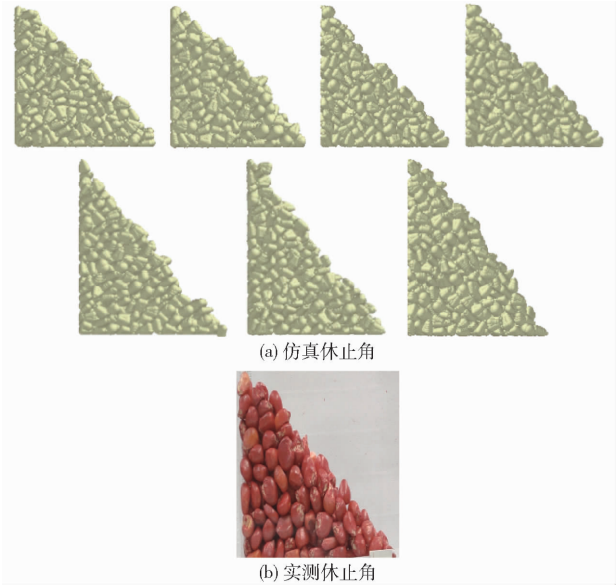


图 7 包衣玉米种子休止角

Fig.7 Coated corn seed repose angle

表 4 试验因素编码

Tab.4 Horizontal coding of test factors

编码	因素		
	x_1	x_2	x_3
-1.682	0.366	0.067 0	0.14
-1	0.400	0.075 0	0.16
0	0.450	0.087 5	0.19
1	0.500	0.100 0	0.22
1.682	0.534	0.108 0	0.24

试验。试验方案及结果如表 5 所示。

表 5 试验方案及结果

Tab.5 Experiment scheme and results

序号	因素			$y_1/\%$	$y_2/\%$
	x_1	x_2	x_3		
1	0.5	0.1	0.22	7.74	6.92
2	0.5	0.1	0.16	3.39	7.11
3	0.5	0.075	0.22	7.26	4.35
4	0.5	0.075	0.16	6.48	8.11
5	0.4	0.1	0.22	5.86	6.29
6	0.4	0.1	0.16	2.56	3.62
7	0.4	0.075	0.22	7.53	3.15
8	0.4	0.075	0.16	5.75	5.13
9	0.534	0.087 5	0.19	8.17	2.89
10	0.366	0.087 5	0.19	3.57	4.3
11	0.45	0.108	0.19	3.62	7.56
12	0.45	0.067 0	0.19	6.35	7.24
13	0.45	0.087 5	0.24	6.88	6.74
14	0.45	0.087 5	0.14	4.28	5.62
15	0.45	0.087 5	0.19	1.95	1.63
16	0.45	0.087 5	0.19	2.37	1.84
17	0.45	0.087 5	0.19	1.65	1.75
18	0.45	0.087 5	0.19	1.70	1.98
19	0.45	0.087 5	0.19	2.24	1.76
20	0.45	0.087 5	0.19	2.54	0.97

2.3 试验结果分析

通过 Design-Expert 软件对表 5 的试验结果进行处理,得到方差分析如表 6、7 所示,获取堆积角仿真试验值误差和休止角试验值误差的回归方程,并检验其显著性。

表 6 堆积角仿真值误差响应面方差分析
Tab.6 Variance analysis of response surface for error rate of simulation value of stacking angle

来源	自由度	均方	F	P
模型	9	94.45	20.22	0.000 1 **
x_1	1	19.88	38.29	0.000 1 **
x_2	1	17.24	33.20	0.000 2 **
x_3	1	14.09	27.13	0.000 4 **
x_1^2	1	27.03	52.08	<0.000 1 **
x_2^2	1	16.59	31.96	0.000 2 **
x_3^2	1	23.30	44.88	<0.000 1 **
x_1x_2	1	0.63	1.22	0.295 4
x_1x_3	1	0.003	0.006	0.980 9
x_2x_3	1	3.24	6.24	0.031 6 *
残差	10	5.19		
失拟项	5	4.52	6.78	0.027 9
纯误差	5	0.67		
总和	19	99.64		

注: * 表示影响显著 ($P < 0.05$), ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$),下同。

表 7 休止角仿真值误差响应面方差分析
Tab.7 Variance analysis of response surface for error rate of simulation value of repose angle

来源	自由度	均方	F	P
模型	9	95.65	9.5	0.000 8 **
x_1	1	1.43	1.28	0.285 1
x_2	1	37.1	33.15	0.000 2 **
x_3	1	17.08	15.27	0.002 9 **
x_1^2	1	5.46	4.88	0.051 6
x_2^2	1	53.38	47.7	<0.000 1 **
x_3^2	1	33.88	30.27	0.000 3 **
x_1x_2	1	0.004	0.004	0.984 4
x_1x_3	1	2.69	2.4	0.152
x_2x_3	1	8.45	7.55	0.020 6 *
残差	10	11.19		
失拟项	5	10.56	16.77	0.003 8
纯误差	5	0.63		
总和	19	106.84		

由表 6、7 可知, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_2x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 对堆积角仿真试验值误差影响极显著; x_2 、 x_3 、 x_2x_3 、 x_2^2 、 x_3^2 对休止角仿真试验值误差影响极显著;为了获得简化的回归模型,剔除不显著因子,建立两试验指标的回归方程为

$$y_1 = 254.51 - 518.37x_1 - 1\,576.12x_2 - 659.58x_3 + 1\,696.67x_2x_3 + 549.09x_1^2 + 6\,603.66x_2^2 + 1\,434.2x_3^2 \quad (16)$$

$$y_2 = 212.51 - 2\,576.37x_2 - 726.36x_3 + 2\,740x_2x_3 + 11\,844.9x_2^2 + 1\,729.44x_3^2 \quad (17)$$

对回归方程(16)进行失拟性检验,失拟项 $P = 0.027\,9$,不显著;对回归方程(17)进行失拟性检验,失拟项 $P = 0.003\,8$,不显著;表明在试验范围内,不存在其他影响试验指标的主要因素,回归模型拟合度较好,试验因素与试验指标存在显著的二次关系。

2.4 NSCA-Ⅱ 算法参数优化

利用 NSCA-Ⅱ 算法解决本文多目标优化问题,从 Pareto 最优解集中选取一组非劣解,作为堆积角仿真试验值误差和休止角仿真试验值误差的最优解。优化求解的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.366 \leq x_1 \leq 0.534 \\ 0.067 \leq x_2 \leq 0.108 \\ 0.14 \leq x_3 \leq 0.24 \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

参数优化后得到的 Pareto 最优解集如图 8 所示,根据优于准则选取堆积角仿真试验值误差为 1.582%,休止角仿真试验值误差为 1.725%,为本文的最优解,相应得到包衣玉米种子离散元模型最优组合参数为:种间静摩擦因数为 0.432、种间滚动摩擦因数为 0.082、种间碰撞恢复系数为 0.178。

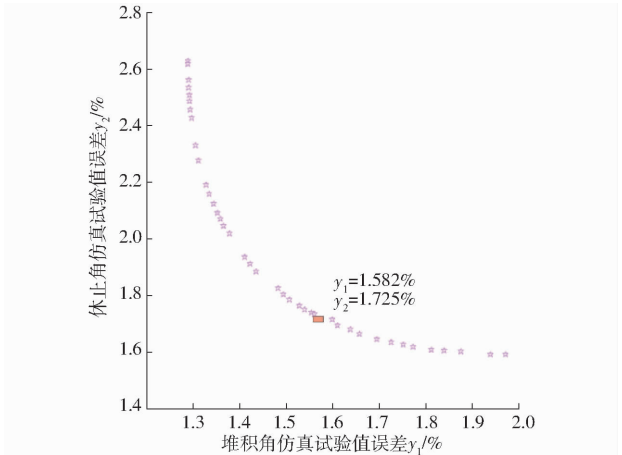


图 8 基于 NSCA-Ⅱ 算法的 Pareto 最优解曲线
Fig.8 Pareto optimal solution curve based on NSCA-Ⅱ algorithm

3 包衣玉米种子与有机玻璃间静摩擦因数标定

同一类玉米种子中马齿形玉米种子占比较大,故本文使用斜面滑动试验标定马齿形颗粒与

有机玻璃间静摩擦因数,试验如图 9 所示。将马齿形玉米种子放置于倾斜角为 35° 、高度为 80 mm 的斜面上,以初速度为 0 沿着斜面向下滑动,待种子在平面上静止后,测量种子的水平滑动距离,试验重复 5 次,取平均值,得到实测种子水平滑动距离为 $l = 101.4\text{ mm}$ 。

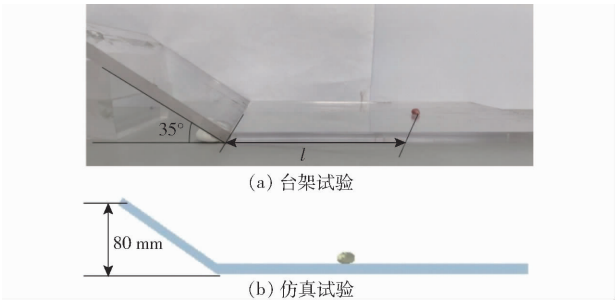


图 9 静摩擦因数标定试验

Fig. 9 Calibration test of static friction coefficient

表 8 静摩擦因数仿真试验方案及结果

Tab. 8 Static friction coefficient simulation test scheme and results

x_4	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14
l_1/mm	157.91	150.76	139.52	126.15	112.32	108.7	99.86	89.75	80.25

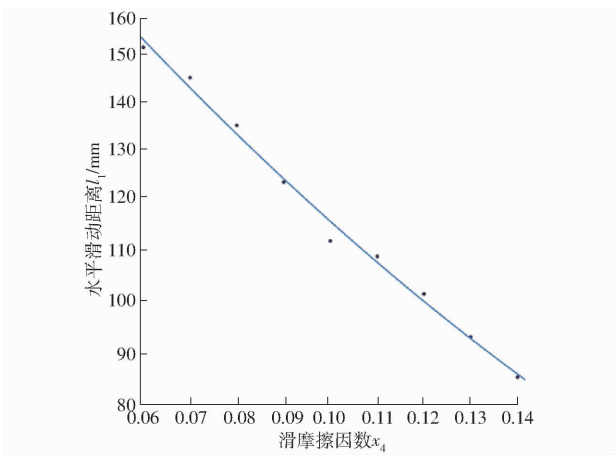


图 10 仿真试验静摩擦因数与水平滑动距离拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of static friction coefficient and horizontal sliding distance in simulation test

将台架试验得到的水平滑动距离 $l = 101.4\text{ mm}$ 代入式 (19), 得到 $x_4 = 0.1164$; 为了验证结果的可靠性, 利用此值进行仿真试验, 试验重复 5 次取平均值, 得到种子的水平滑动距离为 104.3 mm , 与台架试验值的相对误差为 2.87% , 两者结果基本一致, 因此 EDEM 仿真试验中, 马齿形包衣玉米种子与有机玻璃间的静摩擦因数为 0.1164 。

4 验证试验

为了验证本文标定的包衣玉米种子离散元模型接触参数的可靠性与准确性, 将标定的种间静摩擦因数为 0.432 、种间滚动摩擦因数为 0.082 、种间碰

撞恢复系数、颗粒与有机玻璃间静摩擦因数、动摩擦因数和颗粒间碰撞恢复系数对静摩擦因数的测量没有影响, 在仿真试验中均取 0 。

参照文献 [3] 标定的参数, 颗粒与有机玻璃间碰撞恢复系数为 0.621 , 颗粒与有机玻璃间静摩擦因数为 0.459 , 结合前期仿真预试验, 取静摩擦因数 x_4 为 $0.06 \sim 0.14$, 安排 9 组试验, 每组参数下取 5 次重复试验的平均值作为 l_1 , 试验方案及结果如表 8 所示。

由表 8 得到种子的水平滑动距离 l_1 与静摩擦因数 x_4 的关系曲线如图 10 所示, 其拟合方程为

$$l_1 = 2\,145x_4^2 - 518.37x_4 - 135.4 \quad (19)$$

两者呈线性变化规律, 方程决定系数 $R^2 = 0.991$, 因此可以用于标定马齿形玉米种子与有机玻璃间的静摩擦因数。

撞恢复系数为 0.178 , 马齿形包衣玉米种子与有机玻璃间静摩擦因数为 0.1164 , 采用自制落种装置进行堆积角仿真试验, 试验条件与实测落种试验条件相同, 试验重复 10 次取平均值, 堆积角仿真试验结果为 27.83° (图 11b), 实测落种堆积角为 27.35° (图 11a), 误差为 1.76% , 仿真值与实际值无显著差异, 试验结果表明本文建立的包衣玉米种子模型可以应用于离散元仿真试验, 标定的模型参数准确。

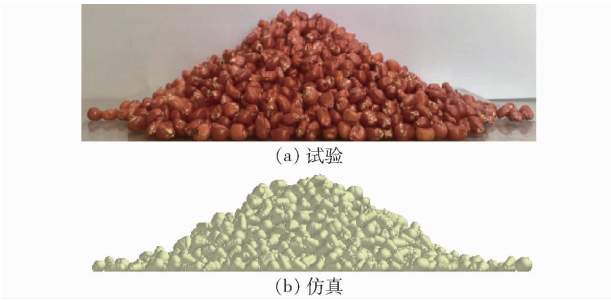


图 11 对比验证试验

Fig. 11 Comparative verification tests

5 结论

(1) 采用牛顿第二定律、牛顿第三定律和赫兹接触理论, 建立量化描述散体颗粒的运动力学方程, 分析并确定构成力学方程的主要接触参数分别为: 种间静摩擦因数、种间滚动摩擦因数、种间碰撞恢复系数、颗粒与壁面间静摩擦因数。

(2) 仿真落种试验以休止角和堆积角仿真数值与实际落种数值的误差为响应值, 通过正交得

到试验因素(种间静摩擦因数、种间滚动摩擦因数、种间碰撞恢复系数)与两个响应值之间的二次回归数学模型,基于 NSCA-Ⅱ 算法得到最佳组合参数:种间静摩擦因数为 0.432、种间滚动摩擦因数为 0.082、种间碰撞恢复系数为 0.178。结合台架试验和 EDEM 仿真试验,通过斜面滑动试验,标

定马齿形包衣玉米种子与有机玻璃间的静摩擦因数为 0.116 4。

(3)将标定的接触参数采用排出法进行验证试验,堆积角仿真试验结果为 27.83° ,真实试验结果为 27.35° ,误差为 1.76%,结果表明,标定的包衣玉米种子离散元模型接触参数准确可靠。

参 考 文 献

- [1] 梁书荣,赵会杰.密度、种植方式和品种对夏玉米群体发育特征的影响[J].生态学报,2010,30(7):1927-1931.
LIANG Shurong, ZHAO Huijie. Effects of planting densities and modes on developmental characteristics of summer maize populations in two varieties[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1927-1931. (in Chinese)
- [2] 王雅玲,杨代斌,袁会珠,等.低温胁迫下戊唑醇和苯醚甲环唑种子包衣对玉米种子出苗和幼苗的影响[J].农药学报,2009,11(1):59-64.
WANG Yaling, YANG Daibin, YUAN Huizhu, et al. Effects of seed-coating tebuconazole and difenoconazole on emergence of maize seeds and response of seed lings at chilling stress[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2009, 11(1): 59-64. (in Chinese)
- [3] 王少先,彭克勤,萧浪涛,等.种子包衣及丸化技术研究进展[J].种子,2002(5):32-35.
- [4] 颜丙新.盘室同步气吸式精量排种器设计研究[D].北京:中国农业大学,2018.
YAN Bingxin. Design and research of vacuum precision seed-metering device with synchronously rotating plate and chamber [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [5] 付宏,王常瑞,靳聪,等.农机部件数字化设计软件平台 Agri DEM 开发[J].农业工程学报,2017,33(7):1-9.
FU Hong, WANG Changrui, JIN Cong, et al. Development of digital design software platform Agri DEM for agricultural machinery parts[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 1-9. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 黄小毛,查显涛,潘海兵,等.油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J].农业工程学报,2014,30(24):22-29.
HUANG Xiaomao, ZHA Xiantao, PAN Haibing, et al. Measurement and analysis of rapeseeds' restitution coefficient in point-to-plate collision model[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 22-29. (in Chinese)
- [8] 孙其诚,王光谦.颗粒物质力学导论[M].北京:科学出版社,2009.
- [9] 王成军,李耀明,马履中,等.小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J].农业工程学报,2012,28(11):274-278.
WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong, et al. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 274-278. (in Chinese)
- [10] 崔涛,刘佳,杨丽,等.基于高速摄影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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 刘凡一,张舰,李博,等.基于堆积试验的小麦离散元参数分析与标定[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)
- [15] 马文鹏,尤泳,王德成,等.基于 RSM 和 NSGA-Ⅱ 的苜蓿种子离散元模型参数标定[J].农业机械学报,2020,51(8):136-144.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA-Ⅱ [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 136-144. (in Chinese)
- [16] 张涛,刘飞,赵满全,等.大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定[J].中国农业大学学报,2017,22(9):86-92.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Measurement of physical parameters of contact between soybean seed and seed metering device and discrete element simulation calibration[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 86-92. (in Chinese)

- QU Zhe, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Experiment on feed rate and cylinder speed of longitudinal axial flow threshing and separating device for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 58–65. (in Chinese)
- [18] 耿爱军,杨建宁,张姬,等. 玉米摘穗收获机械损伤影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 56–62.
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Ji, et al. Influence factor analysis of mechanical damage on corn ear picking[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 56–62. (in Chinese)
- [19] SPECKMANN H, JAHNS G. Development and application of an agricultural BUS for data transfer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1999, 23(3): 219–237.
- [20] 张真,迟瑞娟,杜岳峰,等. 基于CAN总线的玉米收获智能控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 275–281.
ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 275–281. (in Chinese)
- [21] 雷晓顺,侯帅,秦璇,等. 电液比例阀控液压马达系统的模糊PID恒速控制[J]. 流体传动与控制, 2016(1): 42–46.
LEI Xiaoshun, HOU Shuai, QIN Xuan, et al. Electro-hydraulic proportional valve-controlled hydraulic motor system of fuzzy PID constant speed control[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2016(1): 42–46. (in Chinese)
- [22] 卢文辉,李胜,吕敏健. 电液比例阀的结构原理与研究现状[J]. 机床与液压, 2014, 42(5): 166–172.
LU Wenhui, LI Sheng, LÜ Minjian. Fundamental working principles of electro-hydraulic proportional valves and review on their development[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(5): 166–172. (in Chinese)
- [23] 袁玉先,林国治,刘钊. 电液比例阀用控制器的设计[J]. 机械设计与制造, 2017(8): 86–89.
YUAN Yuxian, LIN Guozhi, LIU Zhao. Design of controller used by electro-hydraulic proportional valve[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(8): 86–89. (in Chinese)
- [24] 李心平,高连兴. 种子玉米籽粒果柄断裂机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 47–51.
LI Xinping, GAO Lianxing. Experimental study on breaking mechanism of kernel stem of corn seed[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 47–51. (in Chinese)
- [25] 李心平,马福丽,高连兴. 玉米种子的跌落式冲击试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 113–116.
LI Xinping, MA Fuli, GAO Lianxing. Dropping impact experiment on corn seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 113–116. (in Chinese)
- [26] ZHU Xiaolong, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Experimental study on the key factors of low-loss threshing of high-moisture maize[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(5): 23–31.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 玉米收获机械试验方法:GB/T 21961—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 脱粒机试验方法:GB/T 5982—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 玉米收获机械技术条件:GB/T 21962—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

(上接第8页)

- [17] 李永祥,李飞翔,徐雪萌,等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320–327.
LI Yongxiang, LI Feixiang, XU Xuemeng, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 320–327. (in Chinese)
- [18] BALEVICIUS R, SIELAMOWICZ I, MROZ Z, et al. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: a comparison of the DEM model results with the experimental measurements[J]. Powder Technology, 2011, 214: 322–336.
- [19] RIMANTAS K, ALGIRDAS M, ARNAS K, et al. Parallel discrete element simulation of poly-dispersed granular material[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41: 52–63.
- [20] JOZEF H, MAREK M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206–225.
- [21] 吴爱详,孙业志,刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [22] 李婉宜,曾攀,雷丽萍,等. 离散颗粒流动堆积行为离散元模拟及实验研究[J]. 力学与实践, 2012, 34(1): 20–26.
LI Wanyi, ZENG Pan, LEI Liping, et al. Simulation based on discrete element method and experiment on flow and packing behavior of particles[J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(1): 20–26. (in Chinese)
- [23] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [24] 王立军,李洋,梁昌,等. 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 122–127.
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 122–127. (in Chinese)
- [25] 刘彩玲,魏丹,宋建农,等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 82–89.
LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 82–89. (in Chinese)
- [26] DARIUS M, ALVARO R G, RIMANTAS K, et al. Maize grain shape approaches for DEM modelling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 247–258.
- [27] ZHOU L, YU J, WANG Y, et al. A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2020, 374: 353–376.
- [28] CHEN Z, YU J, XUE D. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2018, 328: 167–183.