

颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究

温翔宇^{1,2} 袁洪方^{1,2} 王刚^{1,2} 贾洪雷^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 对分体圆筒法、倾斜法、抽板法和斜面法 4 种颗粒特性测试方法进行 Plackett – Burman 多因素显著性筛选试验, 试验方差分析结果表明, 不同的测试方法影响测量结果的显著因素与因素显著程度。根据分体圆筒法、倾斜法和斜面法的方差分析结果, 提出一种基于颗粒物料整体特性的摩擦因数标定方法, 将仿真试验与真实试验相结合, 依次标定出尿素颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数为 0.41, 颗粒间静摩擦因数为 0.36, 颗粒间滚动摩擦因数为 0.15。将所标定的摩擦因数采用无底圆筒法进行验证试验, 休止角仿真试验结果为 30.57°, 真实试验结果为 31.74°, 相对误差为 3.69%, 不同含水率下的实际试验休止角与所标定摩擦因数下的仿真休止角相对误差均不大于 4.59%, 仿真试验结果与真实试验结果无显著差异, 验证了所标定摩擦因数的有效性。本方法可用于其他颗粒状物料间摩擦因数的标定试验。

关键词: 颗粒肥料; 离散元; 接触参数; 标定方法

中图分类号: S145.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)02-0115-08 OSID: 

Calibration Method of Friction Coefficient of Granular Fertilizer by Discrete Element Simulation

WEN Xiangyu^{1,2} YUAN Hongfang^{1,2} WANG Gang^{1,2} JIA Honglei^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China
2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Whether the contact parameters between materials are set correctly affects the reliability of the results of discrete element simulation test. At present, the calibration method of contact parameters in discrete element simulation is still in the exploratory stage. Plackett – Burman multi-factor significance screening test was carried out for four kinds of particle characteristics test methods: split cylinder method, tilt method, drawing plate method and inclined plane method. The analysis of variance of test results showed that the significant factors and factors influencing the measurement results were different from each other. According to the results of variance analysis of split cylinder method, inclined method and inclined plane method, a method of friction coefficient calibration based on the overall characteristics of particulate materials was proposed. The simulation test was combined with the real test, and the static friction coefficient between the urea particles and the PVC material was 0.41, the static friction coefficient between the particles was 0.36, and the rolling friction coefficient between the particles was 0.15. The calibrated coefficients were validated by the bottomless cylinder method. The angle of repose simulation test results was 30.57 degrees, the real test results was 31.74 degrees and the relative error was 3.69%. Under different water content conditions, the relative error between the actual test angle of repose and the simulated angle of repose under the calibrated coefficients was not greater than 4.59%. There was no significant difference between the simulation results and the real test results. The validity of the calibration coefficients was verified by the test results. This method can be used to calibrate the friction coefficient of other granular materials.

Key words: granular fertilizer; discrete element; contact parameter; calibration method

收稿日期: 2019-06-27 修回日期: 2019-07-23
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700904)、国家自然科学基金项目(51705191)和吉林省科技发展计划项目(20180414074GH)
作者简介: 温翔宇(1992—),男,博士生,主要从事农业机械研究,E-mail: 505311404@qq.com
通信作者: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: jiahle@vip.163.com

0 引言

科学施肥、提高肥料的利用率是当前急需解决的问题。为了寻求更加科学的施肥方式,国内外学者在精确施肥、变量施肥的理论上进行了大量研究,形成了相对成熟的体系,肥料不再直接从肥箱排施到土壤中,增加了控制肥料排施过程^[1-3]的中间环节。通过试验可以测定施肥作业效果,但排肥过程却很难直接观测。因此,通过基于离散元法的软件对肥料颗粒建模,模拟肥料排施过程进行数字化设计,探究影响肥料排施效果的因素,可以提高研发效率,节约成本^[4]。

在离散元分析软件 EDEM 中进行仿真试验前,需要设定待研究材料的物理特性参数(泊松比、剪切模量、密度)以及各个材料间的接触参数(碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数),这些参数对仿真试验结果有着十分重要的影响^[5-7]。张锐等^[8]通过 SLB-1 型应力应变测试三轴剪切试验仪,测定沙土的弹性模量,计算出沙土的泊松比;石林榕等^[9]通过 HDV-1K 电动双柱拉压力测试仪对种薯样品进行静态压缩试验,可通过公式计算出种薯的弹性模量、泊松比、剪切模量。材料密度一般可通过天平和量筒应用排液法测定,但各个材料间的接触参数却难以通过试验直接测定,需要在 EDEM 软件中进行仿真标定试验,标定的接触参数是否准确直接影响仿真试验结果的可靠性。

GELDART 等^[10]分析了 8 种粉末颗粒堆积角的测量方法,不同的测试方法对休止角测量结果有较大影响,这是因为不同测试方法,影响休止角测量结果的显著因素以及因素显著程度不同。刘彩玲等^[11]利用 Plackett-Burman 试验方法进行尿素颗粒的休止角仿真试验,筛选影响显著的边界参数依次为尿素颗粒间滚动摩擦因数、颗粒间静摩擦因数和颗粒与 ABS 板间静摩擦因数,通过自制静摩擦因数测量仪和虚拟仿真标定方法对显著因素进行研究,并对确定值进行了堆积过程的仿真和试验验证,仿真休止角与实际试验休止角相对误差仅为 0.36%。袁全春等^[12]提出一种通过仿真试验建立回归模型并结合物理试验寻优的方法,对有机肥离散元模型参数进行标定,在标定的参数下进行仿真验证试验,仿真休止角与实际休止角的相对误差为 0.42%。

目前,对于颗粒物料的参数标定多数只选用一种方法来标定多个接触参数,但不同的测试方法所得到的结果也反映了颗粒物料的特性。因此,本文通过 Plackett-Burman 因素显著性筛选试验对多种颗粒特性测试方法进行研究,选出不同方法所对应

的显著因素,进行综合标定,以实现标定参数可以反映颗粒物料的整体特性,提高离散元仿真试验结果的精确度。

1 材料与方法

1.1 试验材料基本参数

试验用肥料选用氮质量分数 46% 的大颗粒尿素,因颗粒肥料在实际的流动排施过程中,主要工作环境是在施肥管中,所以试验用圆筒等与肥料接触的材料,均选用与施肥管同种材质的软质 PVC 材料,进行参数标定试验,便于为后续模拟肥料在实际工况中的流动情况研究提供数据基础。通过查阅资料确定所选材料的泊松比、剪切模量的数值范围,用天平、量筒通过排液法测定所选尿素颗粒的密度,用精度 0.01 mm 的游标卡尺测定尿素颗粒的粒径范围,计算颗粒球形率。材料的基本参数如表 1 所示。

表 1 材料基本参数
Tab. 1 Basic material parameters

材料	参数	数值
大颗粒尿素	泊松比	0.25 ~ 0.51 ^[13-15]
	弹性模量/Pa	$8.2 \times 10^7 \sim 8.9 \times 10^7$ ^[16]
	剪切模量/Pa	$2.30 \times 10^7 \sim 3.56 \times 10^7$ ^[17]
	密度/(kg·m ⁻³)	1 337
	球形率/%	85 ~ 96
	粒径范围/mm	1.60 ~ 5.00
软质 PVC	泊松比	0.32 ~ 0.47
	剪切模量/Pa	$2.04 \times 10^6 \sim 5.68 \times 10^6$
	密度/(kg·m ⁻³)	1 282

1.2 试验方法

肥料颗粒的自然休止角能反映其流动、摩擦等特性^[18],本文采用分体圆筒法、倾斜法和抽板法进行尿素颗粒休止角试验,应用 Design-Expert 8.0.6 软件进行 Plackett-Burman 多因素显著性筛选试验设计,在 EDEM 离散元仿真软件中按试验设计安排仿真试验,待颗粒群稳定后,测定颗粒休止角,由于每组试验参数不同,颗粒堆形态并不总是倾斜的直线,若用屏幕量角器等手段测量颗粒堆的休止角会产生很大的误差,所以对休止角的测量方法为^[19-20]:采用 Matlab 数字图像处理软件读取颗粒堆边缘图像(如图 1a 所示),对图像进行灰度化、二值化处理输出二值图(如图 1b 所示),提取二值化图像边界轮廓(如图 1c 所示),扫描轮廓图像上每一个像素,记录白点的坐标及个数,通过最小二乘法对所记录的白点进行线性拟合,并用红色线画出拟合直线(如图 1d 所示),在 Matlab 软件工作区读取拟合直线的斜率,可求得颗粒堆边缘轮廓的倾角。

对于分体圆筒法,选择颗粒堆积成的圆锥体相互垂直的 4 个方向的母线测定其倾角,求平均值即为肥料颗粒的自然休止角,对于倾斜法和抽板法,取颗粒群左、右两侧倾斜的边缘轮廓测定其倾角,取平均值为肥料颗粒的自然休止角,每组仿真试验重复 3 次取平均值。

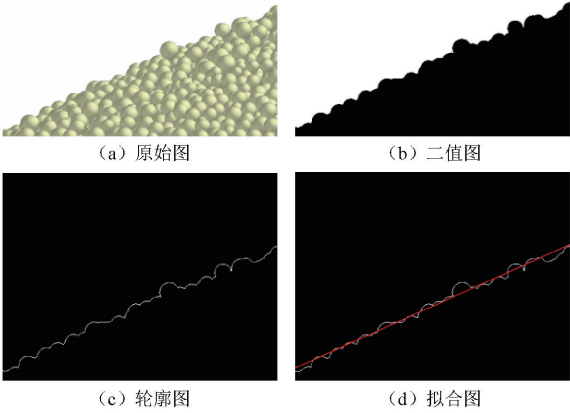


图 1 Matlab 软件图像处理

Fig. 1 Image processing by using Matlab software

将测定的休止角数值填入 Design-Expert 8.0.6 软件中,进行方差分析,分析 3 种方法影响休止角的显著因素,并增加斜面法测定组合颗粒与 PVC 材料静摩擦因数仿真试验,同样进行 Plackett – Burman 筛选试验设计,验证斜面法标定组合颗粒与 PVC 材料静摩擦因数的可行性。通过真实试验测定 3 种休止角测试方法对应的尿素颗粒休止角以及斜面法的斜面倾角,每组试验重复 3 次取平均值,将其作为目标值,分别对不同方法的显著因素进行仿真标定试验,最后用标定的参数进行仿真验证试验,与真实试验进行对比,验证标定参数的准确性。

2 休止角仿真试验

2.1 仿真模型建立

真实试验采用干燥的肥料颗粒作为试验材料,含水率 0.37%,肥料表面几乎无粘附力,因此仿真采用 Hertz – Mindlin 无滑动接触模型,并设置重力加速度方向。

肥料颗粒的粒径分布对颗粒群体积密度有直接的影响,较小的颗粒可以填充在大颗粒间的空隙中,增大颗粒间的接触面积,仿真试验颗粒群粒径分布与真实情况不一致,会对堆积试验结果产生影响。因此,通过筛分法统计肥料颗粒的粒径分布,发现 EDEM 软件中提供的固定粒径、平均分布、正态分布 3 种粒径分布方式难以单一地反映本次试验中肥料样本真实的粒径分布,通过预试验建立两种尿素颗粒模型,分别命名为 D Particle 与 X Particle, D Particle 的颗粒模型为半径 1.5 mm 的球形颗粒,

在颗粒工厂中设置正态分布的颗粒平均直径为肥料颗粒模型直径的 1 倍,标准差 0.28 mm,最小颗粒直径为平均直径的 1 倍,最大颗粒直径为平均值的 1.666 倍, X Particle 的颗粒模型为半径 0.8 mm 的球形颗粒,在颗粒工厂中设置正态分布的颗粒平均直径为肥料颗粒模型直径的 1 倍,标准差 0.80 mm,最小颗粒直径为平均直径的 1 倍,最大颗粒直径为平均值的 1.875 倍,仿真颗粒粒径分布与筛分法得到的肥料粒径分布接近。

按照不同的试验方法分别设置对应的仿真几何模型,分体圆筒法仿真设置如图 2 所示,无底圆筒与底座直径均为 100 mm,无底圆筒高 180 mm,底座高 40 mm。初始状态时,无底圆筒与底座贴合,装置内部生成尿素颗粒,待大颗粒尿素在重力作用下沉降后,无底圆筒以 0.001 m/s 的速度沿竖直方向提升,逐步与底座分离,失去圆筒壁面支撑的尿素颗粒滑落至底座外部,在 EDEM 仿真试验中设置计算域,不对滑落至底座外部的颗粒进行计算,以减少仿真工作量,提高仿真速度。待尿素颗粒在底座稳定堆积后,测定尿素颗粒休止角。

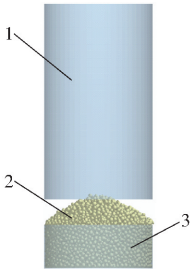


图 2 分体圆筒法休止角仿真

Fig. 2 Simulation of angle of repose of split cylinder method

1. 无底圆筒 2. 颗粒堆 3. 底座

倾斜法仿真设置如图 3 所示,圆筒直径为 100 mm,高度 180 mm,将圆筒上下两端封闭并水平放置,圆筒容器生成占其容积 1/2 ~ 1/3 的尿素颗粒,设置圆筒绕水平轴以 2(°)/s 的速度缓慢旋转,当颗粒的表面产生滑动时,测定其表面的倾斜角。

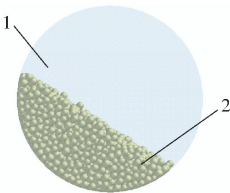


图 3 倾斜法休止角仿真

Fig. 3 Simulation of angle of repose of tilt method

1. 圆筒 2. 颗粒堆

抽板法仿真设置如图 4 所示,长方体盒子在 XY 面投影为边长 80 mm 的正方形,长方体高度 150 mm,初始状态长方体内部封闭并生成尿素颗粒,待颗粒在重力作用下沉降后,长方体一侧的活动

板以 0.002 m/s 的速度沿竖直方向提升,失去壁面支撑的颗粒滑出长方体,待稳定后测定颗粒堆休止角。

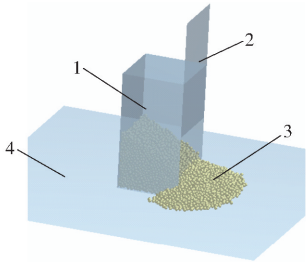


图 4 抽板法休止角仿真

Fig. 4 Simulation of angle of repose of side plate lifting method

1. 长方体盒子 2. 活动板 3. 颗粒堆 4. 底板

斜面法仿真设置如图 5 所示,为了保证尿素颗粒在斜面上滑动而非滚动,采用 4 个半径 2 mm 的圆球建立组合颗粒模型,通过调整圆球坐标位置,设置圆球球心均在同一水平面上且 4 个圆球间两两相互接触(如图 5a 所示),设置生成颗粒数量为 1,斜面初始角度为 0,斜面绕其一侧的水平轴以 1(°)/s 的速度缓慢旋转(如图 5b 所示),待组合颗粒在倾斜的斜面上产生滑动趋势时,记录此时斜面的倾斜角度。

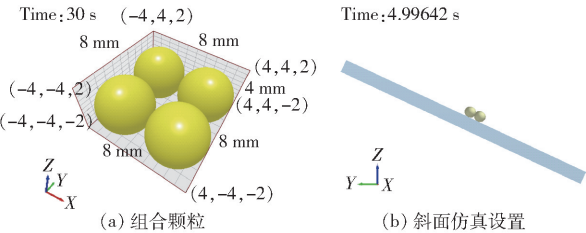


图 5 斜面法仿真

Fig. 5 Simulation of inclined plane method

2.2 仿真试验

考虑到现阶段软质 PVC 材料因加工工艺以及增塑剂的成分和添加比例的不同,会对材料的本征参数产生影响,因此将软质 PVC 材料的泊松比、剪切模量也作为影响因素,共选取 10 个因素进行显著性筛选试验,筛选影响显著的因素,试验因素与水平见表 2。

表 2 Plackett – Burman 试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of Plackett – Burman experiment

试验因素	低水平(-1)	高水平(1)
尿素泊松比 A	0.2	0.5
尿素剪切模量 B/Pa	2.3×10^7	3.6×10^7
软 PVC 泊松比 C	0.30	0.50
软 PVC 剪切模量 D/Pa	2.0×10^6	5.7×10^6
尿素-尿素碰撞恢复系数 E	0.1	0.6
尿素-尿素静摩擦因数 F	0.1	0.7
尿素-尿素滚动摩擦因数 G	0.01	0.30
尿素-PVC 碰撞恢复系数 H	0.1	0.6
尿素-PVC 静摩擦因数 J	0.1	0.7
尿素-PVC 滚动摩擦因数 K	0.01	0.30

应用 Design-Expert 8.0.6 软件进行 Plackett – Burman 试验设计,试验方案如表 3 所示,a ~ k 表示各试验因素对应水平值,L 列作为空白列,将每组试验对应的仿真参数输入 EDEM 软件中,进行休止角仿真试验。

表 3 Plackett – Burman 试验方案

Tab.3 Scheme of Plackett – Burman experiment

序号	a	b	c	d	e	f	g	h	j	k	L
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

分体圆筒法、倾斜法、抽板法、斜面法 4 种颗粒特性测试方法的仿真结果见表 4。

表 4 Plackett – Burman 试验结果

Tab.4 Results of Plackett – Burman experiment

序号	分体圆筒法	倾斜法	抽板法	斜面法
1	30.16	15.32	12.29	5.85
2	34.88	16.21	14.66	5.85
3	35.67	15.84	13.00	5.90
4	23.40	26.62	18.14	39.95
5	28.88	32.34	25.45	39.95
6	34.07	35.00	21.68	39.95
7	22.91	11.64	9.57	5.85
8	30.20	32.52	22.53	39.95
9	23.17	26.72	15.97	39.95
10	19.02	11.39	9.79	5.85
11	20.03	22.70	10.98	39.95
12	18.88	11.18	8.86	5.85

对分体圆筒法、倾斜法、抽板法和斜面法测定的结果进行方差分析,得出所选的 10 个因素对休止角影响的显著程度,方差分析结果如表 5 ~ 8 所示。

分体圆筒法方差分析结果表明,尿素颗粒间静摩擦因数对分体圆筒法测定的休止角结果影响极显著,尿素颗粒间滚动摩擦因数对休止角影响显著,其他因素对休止角影响不显著,分体圆筒法与无底圆筒法的差别在于:无底圆筒法锥形颗粒堆底面与试验材料接触,颗粒与试验材料间的摩擦因数对休止角产生影响,而分体圆筒法中与锥形颗粒堆下方接

表 5 分体圆筒法试验方差分析结果

Tab.5 ANOVA of test result of split cylinder method

方差来源	效应	均方和	<i>p</i>
模型	54. 34	43. 29	0. 032 4 *
<i>A</i>	0. 5	0. 76	0. 194 6
<i>B</i>	0. 065	0. 013	0. 752 0
<i>C</i>	0. 34	0. 34	0. 278 7
<i>D</i>	0. 57	0. 98	0. 172 0
<i>E</i>	-0. 12	0. 047	0. 574 6
<i>F</i>	11. 08	367. 97	0. 009 1 **
<i>G</i>	4. 49	60. 44	0. 022 4 *
<i>H</i>	-0. 19	0. 10	0. 450 7
<i>J</i>	-0. 30	0. 26	0. 313 6
<i>K</i>	-0. 81	1. 96	0. 123 1

注：* 表示显著($p < 0.05$), **表示极显著($p < 0.01$)。下同。

表 6 倾斜法试验方差分析结果

Tab.6 ANOVA of test result of tilt method

方差来源	效应	均方和	<i>p</i>
模型	42. 92	88. 00	0. 034 5 *
<i>A</i>	-1. 33	5. 33	0. 113 4
<i>B</i>	0. 013	$5. 333 \times 10^{-4}$	0. 964 7
<i>C</i>	-1. 18	4. 18	0. 127 7
<i>D</i>	-0. 62	1. 17	0. 234 0
<i>E</i>	-1. 30	5. 10	0. 115 9
<i>F</i>	6. 16	113. 96	0. 024 8 *
<i>G</i>	1. 10	3. 61	0. 137 2
<i>H</i>	0. 54	0. 86	0. 267 7
<i>J</i>	15. 72	741. 36	0. 009 7 **
<i>K</i>	1. 22	4. 49	0. 123 3

表 7 抽板法试验方差分析结果

Tab.7 ANOVA of test result of side plate lifting method

方差来源	效应	均方和	<i>p</i>
模型	340. 88	34. 09	0. 171 6
<i>A</i>	-2. 37	16. 90	0. 194 9
<i>B</i>	0. 64	1. 23	0. 550 3
<i>C</i>	-0. 54	0. 86	0. 604 6
<i>D</i>	-1. 86	10. 38	0. 244 0
<i>E</i>	-0. 12	0. 046	0. 896 2
<i>F</i>	6. 05	109. 81	0. 078 5
<i>G</i>	0. 52	0. 81	0. 614 1
<i>H</i>	2. 34	16. 43	0. 197 5
<i>J</i>	7. 76	180. 81	0. 061 3
<i>K</i>	1. 10	3. 61	0. 381 9

触的是颗粒本身,所以在无底圆筒法试验中颗粒间静摩擦因数、颗粒间滚动摩擦因数和颗粒与试验材料间静摩擦因数对休止角影响显著^[21],而分体圆筒法中仅尿素颗粒间静摩擦因数和尿素颗粒间滚动摩擦因数对休止角影响显著。

倾斜法方差分析结果表明,尿素颗粒间静摩擦因数对倾斜法测定的休止角结果影响显著,尿素颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数对休止角影响极显著,其他因素对休止角影响不显著,仿真过程中颗粒在

重力作用下相互挤压,边缘的颗粒被挤压在 PVC 圆筒内壁面上,在颗粒与 PVC 材料间静摩擦力和颗粒间静摩擦力的作用下,颗粒群随着圆筒绕水平轴转动,处于相对静止状态,直至颗粒群表面与水平面倾角达到一定值时,颗粒间以及颗粒与 PVC 材料间的力学平衡被打破,颗粒群表面开始滑动,使休止角始终在小范围内波动,维持稳定值。

从抽板法方差分析数据可以看出,尿素颗粒间静摩擦因数和尿素颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数的正负效应、均方和与其他因素有显著差异,这与倾斜法分析的结果相似,但 p 仍未达到显著要求,而且抽板法试验模型也不显著。

表 8 斜面法试验方差分析结果

Tab.8 ANOVA of test result of inclined plane method

方差来源	效应	均方和	<i>p</i>
模型	64. 60	348. 67	0. 000 6 **
<i>A</i>	$8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>B</i>	$-8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>C</i>	$8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>D</i>	$8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>E</i>	$-8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>F</i>	$8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>G</i>	$8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>H</i>	$8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0
<i>J</i>	34. 09	3486. 73	0. 000 2 **
<i>K</i>	$-8. 333 \times 10^{-3}$	$2. 083 \times 10^{-4}$	0. 500 0

斜面法方差分析表明,仅颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数对试验结果影响极显著,其余因素对试验结果不显著,验证了斜面法对组合颗粒与 PVC 间静摩擦因数标定的可行性。

3 摩擦因数标定

根据上述仿真试验分析结果,提出一种基于颗粒物料整体特性的摩擦因数标定方法,将仿真试验与真实试验相结合,采用斜面法、倾斜法、分体圆筒法对尿素颗粒间静摩擦因数、尿素颗粒间滚动摩擦因数、尿素颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数这 3 个因素进行标定,其余 7 个因素参数不变:尿素泊松比 0. 25,尿素剪切模量 $3. 4 \times 10^7$ Pa,软质 PVC 泊松比 0. 47,软质 PVC 剪切模量 2×10^6 Pa,尿素颗粒间碰撞恢复系数 0. 28,尿素颗粒与 PVC 材料间碰撞恢复系数 0. 35,尿素颗粒与 PVC 材料间滚动摩擦因数 0. 04,而尿素颗粒间静摩擦因数作为不变参数时,设定数值为 0. 50,尿素颗粒间滚动摩擦因数作为不变参数时,设定数值为 0. 08。

3.1 尿素颗粒与 PVC 间静摩擦因数标定

在 EDEM 软件中对尿素颗粒与 PVC 间静摩擦

因数进行单因素试验,因素范围设置在 0.1~0.6 之间,间隔为 0.1,将试验结果绘制成散点图,发现尿素颗粒与 PVC 间静摩擦因数在 0.1~0.6 之间,与实际情况接近,并且线性相关性极好,在此范围内对斜面倾角 α 和尿素颗粒与 PVC 间静摩擦因数 μ_p 进行线性拟合(如图 6 所示),拟合方程为

$$\alpha = 52.5\mu_p + 1.4$$

$(0.1 \leq \mu_p \leq 0.6) \quad (R^2 = 1)$

(1)

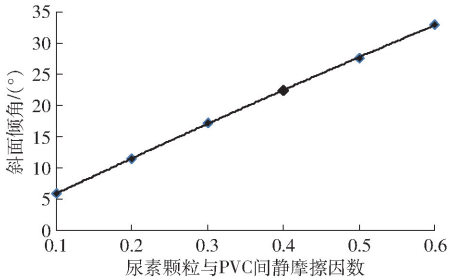


图 6 尿素颗粒与 PVC 间静摩擦因数拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of static friction coefficient between urea particles and PVC

采用精度 0.1 mg、满量程 110 g 的精密电子天平,称取 4 粒等效直径 4 mm、质量近似相等的尿素颗粒,在同一平面上将其粘结在一起,将组合颗粒置于粘贴有 PVC 材料的斜面上(如图 7 所示),斜面初始角度 0,缓慢提升斜面角度,待组合颗粒在 PVC 斜面上开始下滑时,记录此时斜面的倾角为 22.9°,将其代入拟合方程(1)中,可求出尿素颗粒与 PVC 间静摩擦因数 μ_p 为 0.41。

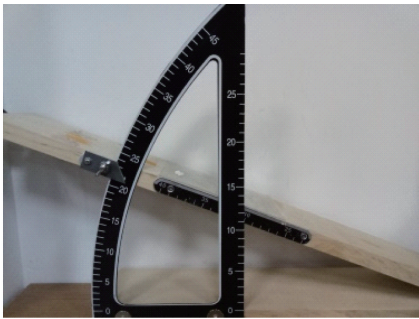


图 7 斜面法试验

Fig. 7 Test by inclined plane method

3.2 尿素颗粒间静摩擦因数标定

在倾斜法因素显著性筛选试验中仅颗粒间静摩擦因数和颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数影响显著,因此将斜面法标定的颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数 0.41 作为固定值,对尿素颗粒间静摩擦因数进行单因素仿真试验,因素范围设置在 0.05~0.40 之间,间隔为 0.05,发现尿素颗粒间静摩擦因数在 0.05~0.40 范围内休止角趋近于二次项拟合(如图 8 所示),颗粒群表面倾角 β 和尿素颗粒间静摩擦因数 μ_n 二次项拟合方程为

$$\beta = -74.5\mu_n^2 + 93.756\mu_n + 12.053$$

$(0.05 \leq \mu_n \leq 0.40) \quad (R^2 = 0.9945)$

(2)

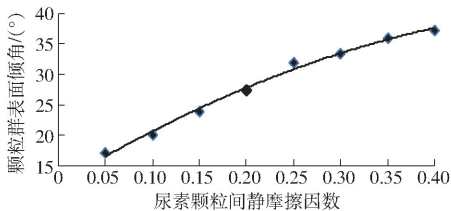


图 8 尿素颗粒间静摩擦因数拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of static friction coefficient between urea particles

真实试验用圆筒采用软质 PVC 材料围制而成,与仿真试验中圆筒模型尺寸一致,考虑到软质 PVC 材质的圆筒易变形,在 PVC 圆筒外套装一个尺寸相匹配的树脂圆筒,使 PVC 圆筒在填充物料以及试验过程中不会发生形变(如图 9 所示),在圆筒内填充其容积 1/3 的尿素颗粒后,将圆筒用 PVC 材料封闭,使圆筒水平放置并以稳定的角速度绕中心轴缓慢转动,待颗粒堆表面开始滑动时,记录此时倾角为 35.97°,将其代入拟合方程(2)中,求解得 μ_n 为 0.36 和 0.90,因一元二次方程的解 0.90 不在本试验范围,所以得出尿素颗粒间静摩擦因数 μ_n 为 0.36。



图 9 倾斜法休止角测定试验

Fig. 9 Test of measuring angle of repose by tilt method

3.3 颗粒间滚动摩擦因数标定

在分体圆筒法因素显著性筛选试验中颗粒间静摩擦因数和颗粒间滚动摩擦因数影响显著,将尿素颗粒间静摩擦因数 0.36 和颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数 0.41 作为固定值,对尿素颗粒间滚动摩擦因数进行单因素仿真试验,因素范围设置在 0.01~0.30 之间,间隔为 0.05,尿素颗粒休止角 γ 和尿素颗粒间滚动摩擦因数 μ_s 拟合曲线如图 10 所示,拟合方程为

$$\gamma = -293.57\mu_s^2 + 140.63\mu_s + 22.926$$

$(0.01 \leq \mu_s \leq 0.30) \quad (R^2 = 0.9826)$

(3)

真实试验装置如图 11 所示,将尿素颗粒填充在圆筒内部,缓慢提升 PVC 无底圆筒,使其与 PVC 底座逐渐分离,部分尿素颗粒滑落至 PVC 底座外,待底座上方的尿素颗粒堆稳定后,选择圆锥体相互垂

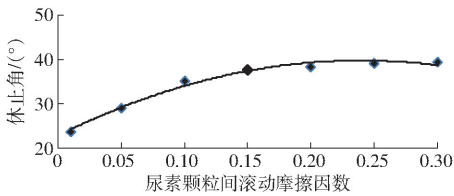


图 10 尿素颗粒间滚动摩擦因数拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of rolling friction coefficient between urea particles



图 11 分体圆筒法休止角测定试验

Fig. 11 Test of measuring angle of repose by split cylinder method

直的 4 个方向的母线与水平面的夹角,求平均值即为对应肥料颗粒的自然休止角,试验重复 3 次取平均值,为 37.26°,将其代入拟合方程(3)中,求出尿素颗粒间滚动摩擦因数 μ_s 为 0.15。

3.4 验证试验

将所标定的颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数 0.41、颗粒间静摩擦因数 0.36 和颗粒间滚动摩擦因数 0.15 采用无底圆筒法进行仿真试验,PVC 无底圆筒直径为 80 mm,高 180 mm,圆筒内部生成尿素颗粒,待大颗粒尿素在重力作用下沉降后,PVC 无底圆筒以 0.05 m/s 的速度沿竖直方向提升,待颗粒堆稳定后测定其休止角,试验重复 3 次取平均值,休止角仿真结果为 30.57°(如图 12a 所示),在相同试验条件下测定大颗粒尿素的实际休止角为 31.74°(如图 12b 所示),误差为 3.69%,无显著差异,试验结果证明了所标定因数的有效性,标定方法满足离散元仿真要求。

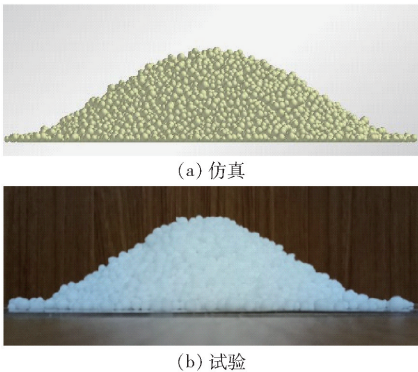


图 12 仿真结果与真实试验结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation and experiment results

考虑到肥料在存放或使用的过程中易受潮,导致肥料含水率会发生变化,影响肥料颗粒的物理特性,本文采用无底圆筒法测定了含水率在 0.37% ~ 1.13% 之间的尿素颗粒休止角,与本文所标定参数条件下的仿真试验结果进行对比,相对误差如表 9 所示。

表 9 不同含水率的尿素颗粒休止角

Tab. 9 Angle of repose of urea granules with different moisture contents

参数	含水率/%				
	0.37	0.56	0.75	0.94	1.13
休止角/(°)	31.74	31.81	31.47	31.72	32.04
相对误差/%	3.69	3.90	2.86	3.63	4.59

试验结果表明:仿真结果与真实试验的相对误差不大于 4.59%,所标定摩擦因数满足不同含水率下尿素颗粒的仿真研究。

4 结论

(1)对分体圆筒法、倾斜法、抽板法和斜面法 4 种颗粒特性测试方法进行研究,采用 Plackett – Burman 多因素显著性筛选试验设计,对离散元仿真软件 EDEM 中需要设定的物理特性参数(泊松比、剪切模量、密度)以及各个材料间的接触参数(碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数)共 10 个因素进行显著性方差分析。分析结果表明:尿素颗粒间静摩擦因数对分体圆筒法测定的休止角结果影响极显著,尿素颗粒间滚动摩擦因数影响显著;对于倾斜法测定的休止角结果,尿素颗粒间静摩擦因数影响显著,尿素颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数影响极显著;斜面法方差分析表明,仅组合颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数对试验结果影响极显著。

(2)基于上述分析结果,提出一种基于颗粒物料整体特性的摩擦因数标定方法,通过斜面法对颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数进行单因素仿真试验,得出试验结果的线性拟合方程,将真实试验结果斜面倾角 22.9°代入拟合方程,标定出颗粒与 PVC 材料间静摩擦因数为 0.41,将其作为固定值,采用倾斜法对颗粒间静摩擦因数进行单因素试验,与真实试验结合,标定颗粒间静摩擦因数为 0.36,用分体圆筒法对颗粒间滚动摩擦因数进行拟合,标定为 0.15。

(3)将标定摩擦因数采用无底圆筒法进行验证试验,仿真试验结果为 30.57°,真实试验结果为 31.74°,误差为 3.69%,无显著差异。在含水率 0.37% ~ 1.13% 条件下测定尿素颗粒的休止角,与本文所标定参数条件下的仿真试验结果进行对比,相对误差不大于 4.59%,试验结果验证了所标定摩擦因数的有效性,标定方法满足离散元仿真要求。

参 考 文 献

- [1] 苑进,刘勤华,刘雪美,等. 配比变量施肥中多肥料掺混模拟与掺混腔结构优化[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6): 125-132.
YUAN Jin, LIU Qinhu, LIU Xuemei, et al. Simulation of multi-fertilizers blending process and optimization of blending cavity structure in nutrient proportion of variable rate fertilization [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 125-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140620&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.020. (in Chinese)
- [2] 苑进,刘勤华,刘雪美,等. 多肥料变比变量施肥过程模拟与排落肥结构优化[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):81-87.
YUAN Jin, LIU Qinhu, LIU Xuemei, et al. Granular multi-flows fertilization process simulation and tube structure optimization in nutrient proportion of variable rate fertilization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 81-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.013. (in Chinese)
- [3] 吴南,林静,李宝筏. 免耕播种机精量穴施肥系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):64-72.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa. Design and test on no-tillage planter precise hole fertilization system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 64-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180708&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.008. (in Chinese)
- [4] 付宏,王常瑞,靳聪,等. 农机部件数字化设计软件平台 AgriDEM 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 AgriDEM for agricultural machinery parts [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 1-9. (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] CLEARY P W. Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods[J]. Minerals Engineering, 1998, 11(11): 1061-1080.
- [7] 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)
- [8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006. (in Chinese)
- [9] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报,2018,34(6):35-42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35-42. (in Chinese)
- [10] GELDART D, ABDULLAH E C, HASSANPOUR A, et al. Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose[J]. China Particuology, 2006, 4(3/4): 104-107.
- [11] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 82-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180909&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.009. (in Chinese)
- [12] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2018,34(18):21-27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21-27. (in Chinese)
- [13] 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构设计及试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):163-169.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 163-169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)
- [14] 周韦,王金峰,王金武,等. 基于 EDEM 的水田深施肥机构螺旋钢丝的数值模拟与分析[J]. 农机化研究,2015,37(1):27-30.
ZHOU Wei, WANG Jinfeng, WANG Jinwu, et al. Numerical simulation and analysis of a fertilizer can on fertilizer spreader based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 27-30. (in Chinese)
- [15] 王金峰,高观保,王金武,等. 叶片调节式水田侧深施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):68-76.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WANG Jinwu, et al. Design and test of adjustable blades side deep fertilizing device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 68-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180308&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.008. (in Chinese)

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180420&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.020. (in Chinese)
- [18] 聂艳,吴学敏,何颖,等. 基于产能核算和空间聚类的县级基本农田划定研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 809–815.
NIE Yan, WU Xuemin, HE Ying, et al. Demarcation method of prime farmland and based on productivity and spatial clustering[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 809–815. (in Chinese)
- [19] 王新盼,姜广辉,张瑞娟,等. 高标准基本农田建设区域划定方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 241–250.
WANG Xinpan, JIANG Guanghui, ZHANG Ruijuan, et al. Zoning approach of suitable areas for high quality capital farmland construction[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 241–250. (in Chinese)
- [20] 曹丽萍,罗志军,冉凤维,等. 基于耕地质量和空间集聚格局的县域基本农田划定[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 349–355, 364.
CAO Liping, LUO Zhijun, RAN Fengwei, et al. Distribution of prime farmland based on cultivated land quality and spatial agglomeration pattern at county scale[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 349–355, 364. (in Chinese)
- [21] 杨绪红,金晓斌,郭贝贝,等. 基于最小费用距离模型的高标准基本农田建设区划定方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014, 50(2): 202–210.
YANG Xuhong, JIN Xiaobin, GUO Beibei, et al. Zoning method of high standard primary farmland based on the least-cost distance model[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014, 50(2): 202–210. (in Chinese)
- [22] 周明,王占岐. 基于耕地质量和空间聚类的县域基本农田划定——以湖北省团风县为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 316–321.
ZHOU Ming, WANG Zhanqi. Spatial distribution of primary farmland based on cultivated land quality and spatial clustering at county scale—a case of Tuanfeng County, Hubei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5): 316–321. (in Chinese)
- [23] 唐秀美,潘瑜春,刘玉,等. 基于四象限法的县域高标准基本农田建设布局与模式[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 238–246, 293.
TANG Xiumei, PAN Yuchun, LIU Yu, et al. Layout and mode partition of high-standard basic farmland construction at county level based on four-quadrant method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 238–246, 293. (in Chinese)
- [24] 熊昌盛,谭荣,岳文泽. 基于局部空间自相关的高标准基本农田建设分区[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 276–284.
XIONG Changsheng, TAN Rong, YUE Wenzhe. Zoning of high standard farmland construction based on local indicators of spatial association[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 276–284. (in Chinese)
- [25] 张林波,虞慧怡,李岱青,等. 生态产品内涵与其价值实现途径[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 173–183.
ZHANG Linbo, YU Huiyi, LI Daiqing, et al. Connotation and value implementation mechanism of ecological products[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 173–183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190619&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.019. (in Chinese)

(上接第 122 页)

- [16] 王金峰,鞠金艳,尹大庆. 尿素颗粒弹性模量的测试与分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11626–11628.
WANG Jinfeng, JU Jinyan, YIN Daqing. Test and analysis of elastic modulus of urea particle[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2014, 42(33): 11626–11628. (in Chinese)
- [17] 王金峰, ZOU Detang, WANG Jinwu, et al. Testing and analysis of the shear modulus of urea granules[J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2013, 7(1): 137–144.
- [18] 赵永志,江茂强,徐平,等. 颗粒堆内微观力学结构的离散元模拟研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1819–1825.
ZHAO Yongzhi, JIANG Maoqiang, XU Ping, et al. Discrete element simulation of the microscopic mechanical structure in sandpile[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1819–1825. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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 Physica Sinica, 2014, 63(17): 174501–174507. (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)