



樊成赛,何瑞银,施印炎,等. 有机无机混合肥料离散元参数标定方法研究[J]. 南京农业大学学报,2024,47(2):402-413.
FAN Chengsai, HE Ruiyin, SHI Yinyan, et al. Study on discrete element parameter calibration method for organic inorganic mixed fertilizers [J].
Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(2): 402-413.

有机无机混合肥料离散元参数标定方法研究

樊成赛,何瑞银*,施印炎,王建林,徐高明

(南京农业大学工学院/江苏省智能化农业装备试验室,江苏 南京 210031)

摘要:[目的]在有机无机混合肥料仿真试验中,传统参数标定方法待标定参数多,标定过程复杂。本文根据有机肥对无机肥颗粒黏附特性,提出一种新的离散元仿直接触参数标定方法。[方法]利用自由落体碰撞试验、静摩擦试验、滚动摩擦试验对复合小球和钢的接触参数进行校准;设计 Plackett-Burmen Design 试验、爬坡试验和 Box-Behnken 响应面试验,得到混合肥料接触模型最优参数,通过堆积角对比试验、有机肥和无机肥混合比例预测试验、撒肥盘颗粒分布对比试验验证最优参数。[结果]复合小球与钢的最优碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数分别为 0.323、0.776、0.255;有机肥肥料之间最优碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数分别为 0.40、0.70、0.14;有机肥与钢板之间的最优碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数分别为 0.44、0.70、0.15;Hertz-Mindlin with JKR 模型参数为 0.017。最优参数进行对比验证堆积角的相对误差为 1.05%,最优参数能预测不同混合比例肥料的堆积角,撒肥盘抛撒试验列分布最大相对误差为 35.95%,平均误差 15.86%。[结论]试验结果验证了标定方法正确性,同时为后续有机肥-无机肥-机械互作系统研究提供依据。

关键词:离散元;混合标定;有机无机配施;方法研究;堆积角

中图分类号:S220.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)02-0402-12

Study on discrete element parameter calibration method for organic inorganic mixed fertilizers

FAN Chengsai, HE Ruiyin*, SHI Yinyan, WANG Jianlin, XU Gaoming

(College of Engineering/Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province,
Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: [Objectives] In order to solve the problem of multiple contact parameters and difficult calibration of organic and inorganic mixed fertilizer, according to the adhesion characteristics of organic fertilizer to inorganic fertilizer particles, a new calibration method of contact parameters for discrete element simulation was proposed in this paper. [Methods] The contact parameters between the composite ball (TCB) and steel were calibrated using free fall collision tests, static friction tests, and rolling friction tests. The Plackett-Burmen Design test, slope climbing test, and Box-Behnken response surface test were designed to obtain the optimal parameters of the mixed fertilizer contact model. The optimal parameters were verified through the stacking angle comparison test, mixing proportion of organic fertilizer to inorganic fertilizer prediction test, and fertilizer tray particle distribution comparison test. [Results] The optimal collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient between TCB and steel were 0.323, 0.776 and 0.255, respectively. The optimal collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient among organic fertilizers were 0.40, 0.70 and 0.14, respectively. The optimal collision recovery coefficient between organic fertilizer and steel plate were 0.44, 0.70 and 0.15 for static and rolling friction coefficients, respectively. The Hertz-Mindlin with JKR model parameter was 0.017. Comparison of the optimal parameters verified that the relative error of the stacking angle was 1.05%, and the optimal parameters could predict the stacking angle of different mixed proportion fertilizers. The maximum relative error of the distribution of the fertilizer tray throwing test column was 35.95%, and the average error was 15.86%. [Conclusions] The experimental results verified the correctness of the calibration method, and provided a basis for subsequent research on the organic fertilizer-inorganic fertilizer-mechanical interaction system.

Keywords: discrete element method; mixed calibration; organic inorganic compound application; method study; angle of repose

有机肥和无机肥的配合施用是改善农田环境、提高农作物产量和质量的重要途径之一^[1]。有机肥在双季作物增产和生物群落改善方面有重要作用^[2],有机无机肥料配施比例对土壤结构和果实产量的影响

收稿日期:2023-04-04

基金项目:国家重点研发计划部省联动项目(2022YFD2300700);江苏省农业科技自主创新基金[CX(19)2012]

*通信作者:何瑞银,教授,博导,主要从事智能化农业装备研究,E-mail:ryhe@njau.edu.cn。

显著,35%~50%无机肥使用同等肥效有机肥代替时,对提高作物产量和改善土壤环境的效果最好^[3-7]。目前,有机肥无机肥混合主要还是依靠人工,市场还没有成熟的有机无机配施机械,其制约因素主要是有机肥-无机肥-机械互作系统接触过程复杂、混合机制尚不明晰。基于离散元的数值模拟方法是设计优化此类系统的重要方式之一,而对于2种混合物料的机械系统,其离散元仿真接触参数多、标定困难是应用此方法的关键制约因素。

近年来,在参数标定方面的研究较多,如:针对生物炭基肥和活性微米级颗粒进行离散元参数的标定,用试验和仿真相结合的方法通过增大仿真颗粒粒径来对颗粒较小的粒径进行离散元分析^[8-9];针对不同地区土壤颗粒进行离散元仿真的标定,均采用与实际颗粒较为接近的多体形状颗粒,并证明选择更贴近实物的多体颗粒,可以提高仿真的精度^[10-11];用球形颗粒对有机肥进行标定,并把所标定的模型应用于果园有机肥深施机的性能研究^[12-13];通过类似的球形替代方法标定颗粒接触参数模型并应用到实际全膜双垄沟覆膜过程中,所得试验结果和仿真的相对误差分别为2.6%和3.1%^[14]。张秀丽等^[15]为设计一种混合均匀、改善堵料的搅龙设备,在仿真方面利用离散元方法进行仿真优化设计,最终提高搅拌均匀效率约20%;Kruggel-Emden等^[16]对JKR模型进行研究,并提出提高仿真效率的方法;金浩等^[17]创建了与以往球形黏结刚性颗粒模型不同的柔性片烟壳体模型,并分析了柔性片烟壳体模型形变特点;廖洋洋等^[18]对燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数进行了标定。可以看出,现有研究大多仅对单一物料标定,混合物料标定是分开标定再合并,存在流程繁琐的问题,尚不能真实反映有机肥与无机肥黏附的真实情况。

根据相关文献的有机肥和无机肥的本征参数、接触参数和模型参数进行离散元仿真^[12,19],发现仿真结果与物理试验结果差距较大。因此,本文结合有机肥和无机肥的黏附特性探究一种简化标定的试验方法。简化方法是根据有机肥和无机肥的黏附特性提出建立复合小球颗粒模型,此颗粒模型在与有机肥接触时表现有机肥接触参数,在与机械接触时表现复合小球的接触参数。标定方法是首先通过三组单因素试验校准复合小球和钢的接触参数,然后通过Plackett-Burman Design筛选显著试验因素、爬坡试验确定最优区间、Box-Behnken试验确定复合小球和有机肥之间的最优接触参数,最后用堆积角验证试验、有机无机混合比例堆积角预测模型验证试验、撒肥分布试验,验证标定参数的正确性和新标定方法正确性。该研究把有机肥的黏附特性考虑到混合肥料接触模型中,在保证精度的同时,简化标定过程,反映真实接触情况。

1 混合肥料堆积现象及假设

1.1 试验材料

本课题组设计一款有机无机肥配施机械,根据农艺要求无机肥和有机肥混合质量比为0.06~0.14。有机肥为南京市溧水区三元农业科技有限公司家庭农场施用的腐熟完成的羊粪有机肥和史丹利复合肥(硫酸钾型22-5-13)。用量筒和电子天平测量体积和质量,并计算容积密度,在EDEM2018中建立100 mL的圆柱,动态生成颗粒直到溢出,刮板挂掉多余颗粒,统计100 mL圆柱中颗粒质量,通过修正颗粒密度值使其达到试验的容积密度,具体方法参考文献[20];采用烘箱干燥法测定有机肥和无机肥含水率;用泰勒筛筛分法确定有机肥颗粒粒径分布,如图1所示。随机抽取100颗无机肥颗粒,采用游标卡尺测量无机肥颗粒的外形尺寸(长×宽×高)。测定有机肥和无机肥的基本物理参数,如表1所示。

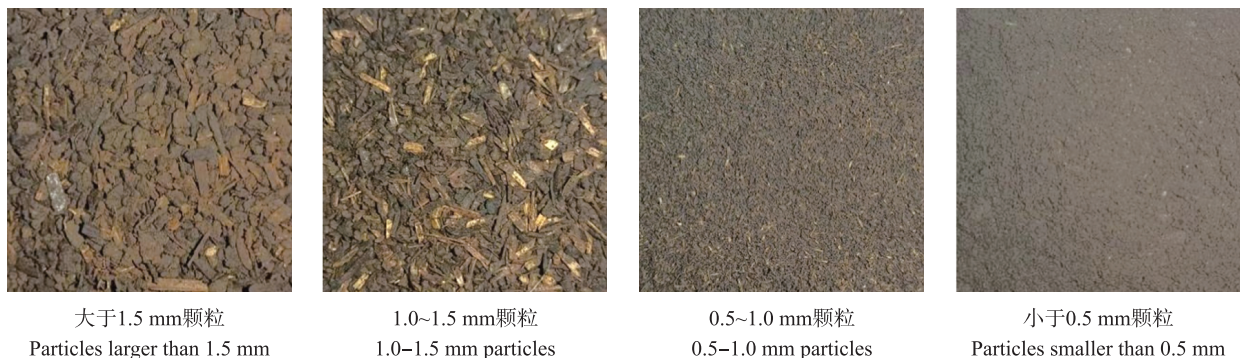


图1 有机肥颗粒泰勒筛筛分结果

Fig. 1 Taylor screen results of organic fertilizer pellets

表 1 相关标定颗粒的基本物理参数
Table 1 Basic physical parameters of relevant calibration particles

物理参数 Physical parameters	有机肥 Organic fertilizer	无机肥 Inorganic fertilizer	复合小球 The composite ball (TCB)
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Density	572	1 380	1 146
含水率/% Water content	23	4	8
粒径/mm Particle size	(0,0.5]:(0.5,1]:(1,1.5]:>1.5=1:1:1:1	长 Length:2.0±1.10 宽 Wide:1.5±0.82 高 High:1.1±0.62	长 Length:3.2±0.72 宽 Wide:3.0±0.65 高 High:2.8±0.79

观察发现无机肥与有机肥按质量比 0.14 混合后,无机肥颗粒表面均会黏附大量有机肥颗粒,并形成新的球形颗粒(下文称复合小球),如图 2 所示。外层形成 1.0~1.5 mm 的有机肥外壳,此外壳一直存续在整个运动过程,所以在有机无机混合肥料中,事实为有机肥与复合小球的接触,也就是有机肥材料相互之间的接触。基于此可以做出假设:在混合肥料中存在复合小球和有机肥 2 种颗粒材料,实际接触为有机肥之间的接触。因此把复合小球作为一种颗粒材料建立在 EDEM 中,其材料属性如表 1 所示。



图 2 复合小球示意图

Fig. 2 The composite ball (TCB) schematic diagram

1.2 堆积角测定方法

有机无机混合肥料(均匀混合)的堆积角测定方法有多种^[21-22],本文选择漏斗法测定堆积角。具体操作方法是准备有机无机混合肥料共 50 g,无机肥和有机肥质量比为 0.14。采用自制的堆积角测定装置,其结构如图 3 所示,主要包括支架、白色背景板、漏斗、混合肥料、堆积台、照相机和三脚架,其中白色背景板主要用于混合肥料堆积角的图像处理。在对堆积角拍照时要保证照相机(尼康 D5300)中心线位于混合肥料堆积台平面,照相机与堆积台始终保持 400 mm 的距离,焦距 120 mm。

通过 MATLAB 图像直线拟合的方法测量堆积角,把拍摄图像导入程序,运用有机无机混合肥料偏黑、背景为白色的性质进行去噪及二值化处理,处理完成之后提取曲线轮廓,并用直线拟合轮廓,直线拟合效果良好(R^2 接近 1),最后求直线与水平的夹角即为堆积角,测量过程如图 4 所示。当无机肥和有机肥质量比为 0.14 时,混合肥料堆积角 3 次重复的平均值为 33.15°。

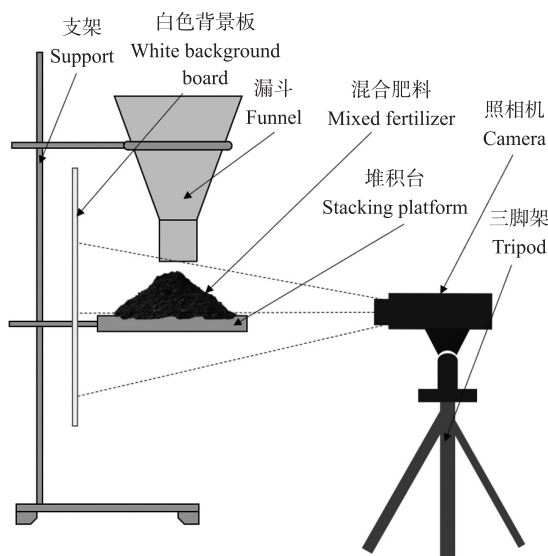


图 3 堆积角测定装置

Fig. 3 Device for measuring angle of repos

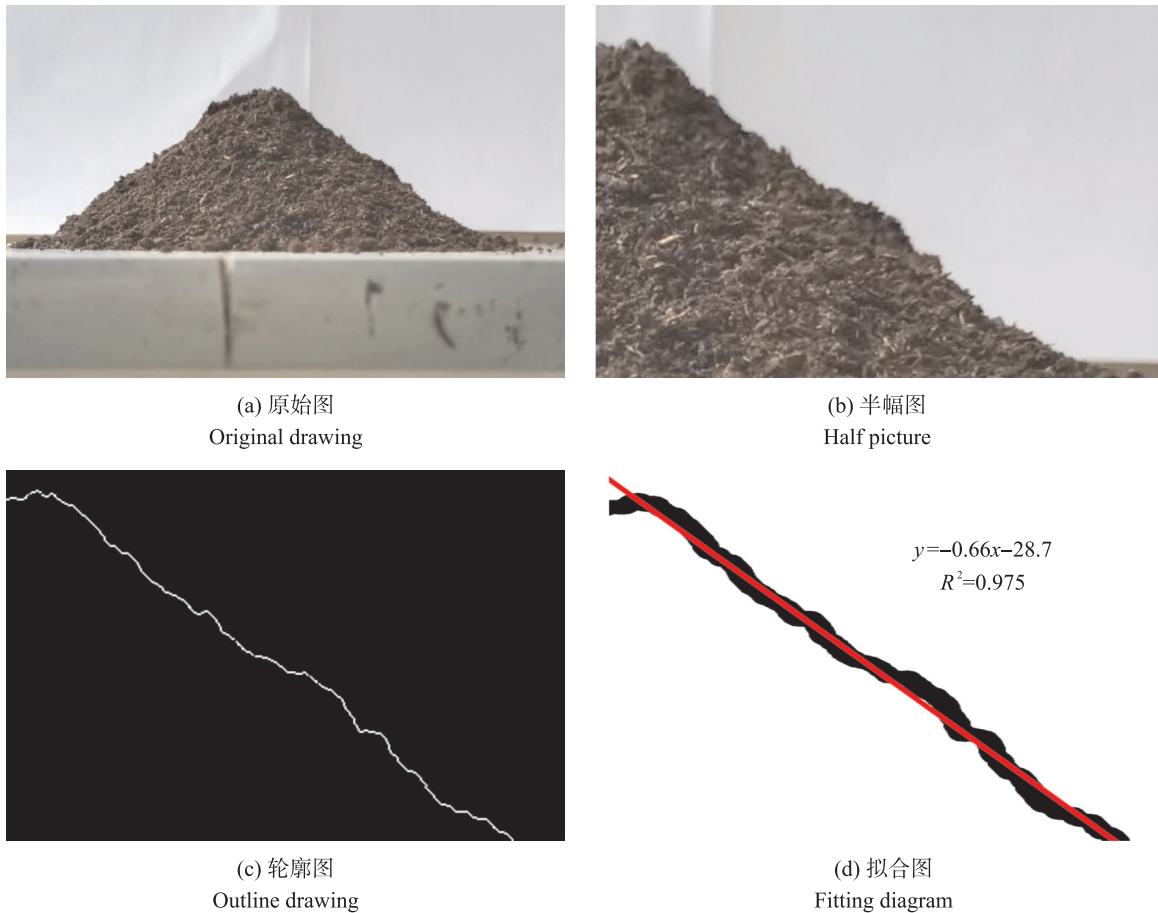


图 4 堆积角图像测量

Fig. 4 Image measurement of the stacking angle

1.3 试验材料参数测定

泊松比和剪切模量是仿真测试的重要参数。有机肥和复合小球的泊松比和剪切模量通过文献获取与试验校准相结合的方法确定。从文献[12,23-28]中获得有机肥的泊松比范围为 0.2~0.4,而剪切模量范围为 5~20 MPa。使用 Z.J.-1000 高速剪切仪,并用 10、20 和 40 kg 砝码对有机肥和复合小球进行快速剪切试验,得到二者的泊松比分别为 0.254、0.210。环刀压缩法测得有机肥的弹性模量为 7.78×10^7 Pa,复合小球弹性模量为 3.65×10^6 Pa。根据公式(1)获得有机肥的剪切模量 G (Pa)。

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

式中: E 是弹性模量(Pa); μ 是泊松比。计算得出有机肥剪切模量为 1.25×10^7 Pa,复合小球剪切模量为 1.51×10^6 Pa。钢的材料参数参照文献[13],汇总如表 2 所示。

表 2 有机肥、复合小球和钢板本征参数

Table 2 Parameters of organic fertilizer,TCB and steel

仿真参数 Simulation parameters	数值 Value	仿真参数 Simulation parameters	数值 Value
有机肥泊松比 Poisson's ratio of organic fertilizer	0.25	复合小球泊松比 Poisson's ratio of TCB	0.21
有机肥剪切模量/Pa Shear modulus of organic fertilizer	1.25×10^7	复合小球剪切模量/Pa Shear modulus of TCB	1.51×10^6
钢板密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Density of steel	7 861	钢板剪切模量/Pa Hear modulus of steel	7.9×10^{10}
钢板泊松比 Poisson's ratio of steel	0.3		

通过文献[20,23-28]确定有机肥之间的碰撞恢复系数为 0.2~0.6,静摩擦系数为 0.3~1.0,滚动摩擦系数为 0~0.3;有机肥与钢材料之间的碰撞恢复系数为 0.2~0.6,静摩擦系数为 0.5~0.9,滚动摩擦系数为 0~0.3;另外有机肥颗粒之间的 JKR 参数选择为 0~0.04。汇总如表 3 所示。

表 3 Plackett-Burmen Design 因素水平
Table 3 Factors and levels table of Plackett-Burman Design

因素 Factors		水平 Levels		
		-1	0	1
有机肥-无机肥 Organic fertilizer-Inorganic fertilizer	碰撞恢复系数 Restitution coefficient(A)	0.20	0.40	0.60
	静摩擦系数 Static friction coefficient(B)	0.30	0.65	1.00
	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient(C)	0.00	0.15	0.30
有机肥-钢 Organic fertilizer-Steel	碰撞恢复系数 Restitution coefficient(D)	0.20	0.40	0.60
	静摩擦系数 Static friction coefficient(E)	0.50	0.70	0.90
	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient(F)	0.00	0.15	0.30
有机肥之间的 JKR Johnson Kendall Roberts(G) of organic particles		0.00	0.02	0.04

1.4 仿真环境搭建

在进行仿真之前必须建立仿真颗粒的结构模型, 现有的相关研究有用球形颗粒代替不规则颗粒^[12-13], 也有用更接近实物的模型降低仿真的相对误差^[10-11]。通过 1.1 节材料的筛分, 粒径大于 1 mm 的有机肥建立长条状颗粒模型, 粒径小于 1 mm 的有机肥建立球形颗粒模型, 2 种颗粒在粒径范围内随机分布。复合小球平均粒径 3 mm, 建立球形颗粒模型, 在粒径范围内随机分布。为了使模拟误差最小, 获得合理实用的模拟时间, 基于粒子尺度理论^[29-30], 需要根据放大后的尺寸通过标定确定接触参数, 最终建立有机肥颗粒和复合小球颗粒(图 5)。选择 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型颗粒间接触模型进行模拟试验, 颗粒与机械部件之间选用 Hertz-Mindlin (no slip) 模型。从混合肥料中挑选复合小球颗粒共 204 粒, 动态生成 50 g 颗粒, 其中复合小球 12.6 g, 有机肥 37.4 g。有机肥颗粒材料和复合小球颗粒材料本征参数按照表 1 和表 2 设置, 完成颗粒生成并在漏斗沉积 3 s, 下落模拟时间设置为 5 s。

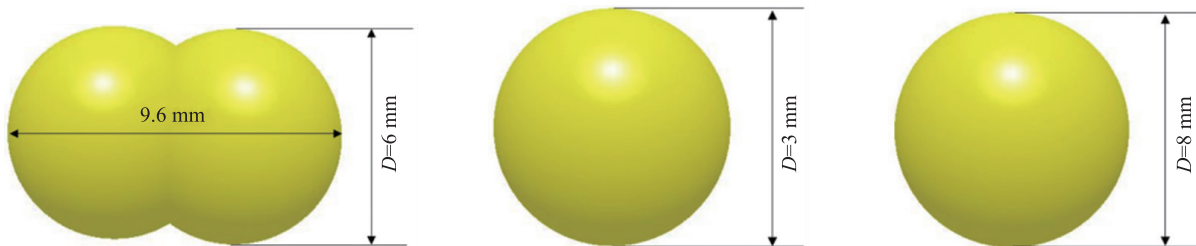


图 5 有机肥和复合小球离散元模型

Fig. 5 Discrete element model of organic fertilizer and TCB

1.5 试验方法

传统标定方法将待标定接触参数及仿真模型参数分开标定, 但是本文所标定的混合肥料中有机肥对无机肥具有包覆特性, 传统标定方法所得模型的宏观表现与实际相矛盾。本文建立有机肥和无机肥黏结的复合小球颗粒模型, 其在与机械结构碰撞和滑移时无机肥内核起一定的作用, 需单独标定^[31], 在与自身以及与有机肥接触时碰撞恢复系数影响很小^[32]。

基于以上分析, 本文将利用自由落体试验、静摩擦试验、滚动摩擦试验对复合小球和钢的接触参数进行校准, 然后采用 Plackett-Burman Design 针对堆积模型中的其他接触参数筛选显著试验因素, 通过爬坡试验确定最优区间。在最优区间内选取三水平, 设计 Box-Behnken 试验, 得出回归方程, 对输出的回归方程求解最优参数并做堆积角验证试验, 以期标定的接触参数能表现不同比例混合肥料堆积的真实情况, 表现有机无机混合肥料的抛撒情况。

2 混合肥料颗粒仿真试验

2.1 复合小球接触参数校准

在有机肥-无机肥-机械互作系统中, 有机肥-复合小球-钢之间存在大量的相互接触, 这些接触参数影响模拟试验的准确性, 因此对试验所用的复合小球-钢碰撞恢复系数(X_1)、静摩擦系数(X_2)和滚动摩擦系数(X_3)进行标定, 3 个接触参数分别使用自由落体试验、静摩擦试验、滚动摩擦试验。3 个试验已经过验证^[33], 并分别只对碰撞恢复系数(X_1)、静摩擦系数(X_2)、滚动摩擦系数(X_3)敏感。3 个试验用的材料

和设备为 0.5 mm 钢板(305)、数显倾角仪(精度为 0.01°)、华谷动力 WP-GUT030M 高速摄像机、刻度尺、木板。

2.1.1 物理试验 采用自由落体试验测定复合小球-钢碰撞恢复系数,复合小球从 150 mm 高度自由落体,用高速摄像机记录复合小球自由下落在钢板上的反弹高度(Y_1)为 13.41 mm。用测斜仪测量复合小球堆在钢板上发生相对滑动时的钢板旋转角度(Y_2)为 21.96°。再以更大的角度(30°)使复合小球从钢板 80 mm 高度上滚下,复合小球的水平滚动距离(Y_3)为 74.6 mm。3 组物理试验均重复 5 次并求取平均值。3 个试验台架如图 6 所示。

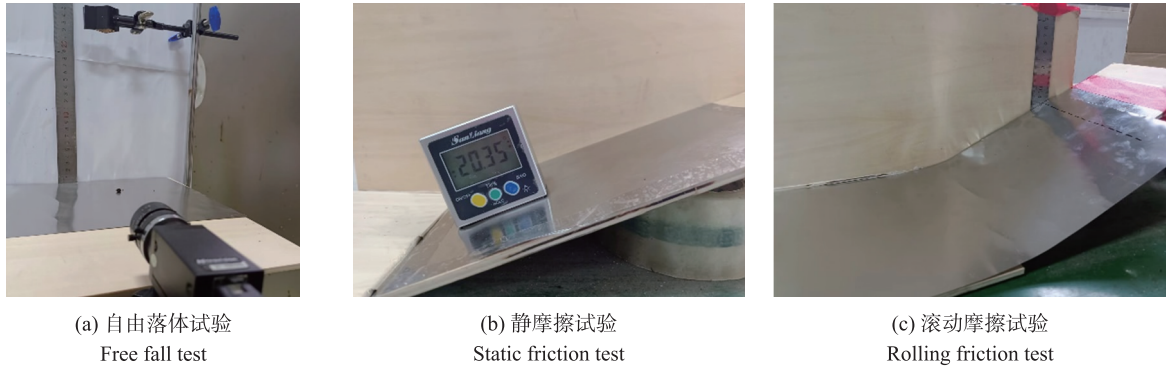


图 6 接触参数物理试验图

Fig. 6 Physical test diagram of contact parameters

2.1.2 仿真试验 把上述物理试验模型通过三维建模搭建离散元仿真试验环境,3 个试验中非敏感影响因素选取表 3 中的中间水平,敏感影响因素取 6 个梯度,6 个梯度设定的仿真试验结果数据范围应该包含对应的物理试验结果,保证拟合直线的可靠性,最终获得仿真试验结果的 6 组数据,试验结果如表 4 所示。

表 4 模拟试验数据

Table 4 Simulation test data sheet

序号 Number	X_1 / mm	Y_1 / mm	碰撞高度误差(e_1)/% Collision height error	X_2 / (°)	Y_2 / (°)	角度误差(e_2)/% Angular error	X_3 / mm	Y_3 / mm	滚动距离误差 e_3 /% Rolling distance error
1	0.15	1.62	87.92	0.70	10.31	-53.05	0.20	115.30	54.56
2	0.20	3.33	75.17	0.72	13.56	-38.25	0.22	95.40	27.88
3	0.25	7.20	46.31	0.74	14.80	-32.60	0.24	84.32	13.03
4	0.30	10.12	24.53	0.76	19.58	-10.84	0.26	66.73	-10.55
5	0.35	16.40	-22.30	0.78	23.34	6.28	0.28	61.75	-17.23
6	0.40	30.15	-125.00	0.80	28.60	30.24	0.30	44.47	-40.39

为验证单一接触参数在试验中的独立性,在 EDEM 软件中分别把 X_1 、 X_2 、 X_3 作为自变量, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 作为因变量做单因素试验,统计试验数据并建立折线统计图(图 7),再对数据进行拟合。根据数据特点采用不同的拟合方式,自由落体试验采用二次多项式拟合,静摩擦试验和滚动摩擦试验采用直线拟合。从图 7 可以看出,三者的 R^2 都趋近于 1,方程拟合可靠性高,各 X_i 与 Y_i ($i=1\sim 3$) 相关性极高。将物理试验值代入拟合的直线方程,得到复合小球-钢板碰撞恢复系数为 0.323,静摩擦系数为 0.776,滚动摩擦系数为 0.255。

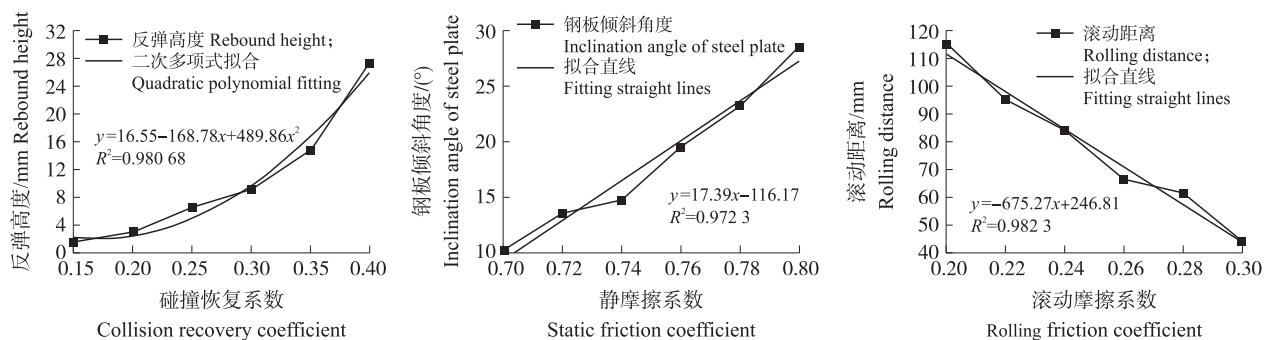


图 7 钢板-复合小球接触参数试验拟合线

Fig. 7 Fitting line of contact parameters between steel plate and TCB

2.2 Plackett-Burmen Design 显著性试验

复合小球和钢的接触参数标定之后,混合肥料的离散元仿真受7个接触参数影响,影响因素依然较多,所以通过 Design Expert 13 软件设计 Plackett-Burmen Design 显著性试验,从7个接触参数中筛选更加具有显著影响的因素。

通过试验设计软件 Design Expert 13 设计 Plackett-Burmen Design 试验,7个影响因素分别为混合肥料颗粒之间的碰撞恢复系数(A)、静摩擦系数(B)和滚动摩擦系数(C),有机肥颗粒与钢之间的碰撞恢复系数(D)、静摩擦系数(E)和滚动摩擦系数(F),接触模型参数 JKR(G);H、J、K、L 为空白列。从这7个影响因素选择显著性影响因素,共需要13组试验,其试验设计及结果如表5所示。

表5 Plackett-Burmen Design 显著性试验设计及结果

Table 5 Plackett-Burmen Design significance test design and results

序号 Number	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	堆积角/(°) Stacking angle
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	30.86
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	48.00
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	46.91
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	39.11
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	32.73
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	34.45
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	25.82
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	27.33
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	41.51
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	36.53
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	35.24
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	21.78
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31.74

注:A、B、C代表混合肥料颗粒之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数;D、E、F代表有机肥颗粒与钢之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数;G代表JKR;H、J、K、L为空白列。下同。

Note: A, B and C represent recovery coefficients, static friction coefficients and rolling friction coefficients between the mixed fertiliser particles; D, E and F represent recovery coefficients, static friction coefficients and rolling friction coefficients between the organic fertiliser particles and the steel; G represents JKR; H, J, K and L indicate blank column. The same below.

Plackett-Burmen Design 显著性试验证明回归方程对于7个影响因素中混合肥料颗粒之间静摩擦系数(B)、混合肥料颗粒之间滚动摩擦系数(C)、有机肥颗粒与钢的碰撞恢复系数(D)、接触模型参数 JKR(G)的P值均小于0.05,影响显著,而其余3个影响因素的P值大于0.05,影响不显著(表6)。

2.3 最陡爬坡试验确定最优参数区间

确定显著性影响因素后需要对4个显著性影响因素的最优区间进一步细化,采用最陡爬坡试验法来确定最优区间。根据结果显示,混合肥料颗粒之间的静摩擦系数(B)、滚动摩擦系数(C)和接触模型

参数 JKR(G)与堆积角是正相关,所以同时递增进行最陡爬坡试验;有机肥颗粒与钢之间的碰撞恢复系数(D)与堆积角是负相关,所以同时递减进行最陡爬坡试验。在前文确定混合肥料颗粒之间的静摩擦系数(B)、混合肥料颗粒之间的滚动摩擦(C)、有机肥颗粒与钢的碰撞恢复系数(D)以及JKR参数(G)4个显著性接触参数的范围分别为0.3~1.0、0~0.3、0.2~0.6、0~0.04,将该范围划分为6个梯度,其余3个参数(有机肥之间的碰撞恢复系数、有机肥与钢的静摩擦系数和滚动摩擦系数)分别设定为0.40、0.70、0.15。设计试验方法及试验结果如表7所示。

由表7可以看出,第4组试验的堆积角为35.26°与物理试验堆积角(33.15°)误差最小,此时混合肥料颗粒之间的静摩擦系数(B)为0.72,滚动摩擦系数(C)为0.18,有机肥与钢碰撞恢复系数(D)为0.44,JKR(G)为0.024。在此较优参数附近选择最优参数区间,混合肥料之间静摩擦(B)为0.5~0.8,混合肥料之间滚动摩擦(C)为0.1~0.2,有机肥与钢的碰撞恢复系数(D)为0.3~0.5,JKR(G)参数区间为0.01~0.03。

表6 Plackett-Burman Design 试验结果方差分析

Table 6 Analysis of variance of Plackett-Burman Design test results

方差来源 Source	均方和 Sum of squares	DF	P值 P-value
A	2.03	1	0.607 4
B	58.12	1	0.040 6*
C	315.91	1	0.002 2**
D	56.03	1	0.042 9*
E	0.88	1	0.732 2
F	34.31	1	0.083 7
G	219.56	1	0.004 4**

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

表 7 最陡爬坡试验设计及结果

Table 7 Design and results of steepest ascent test

梯度 Gradient	影响因素 Influence factor				堆积角/(°) Stacking angle	梯度 Gradient	影响因素 Influence factor				堆积角/(°) Stacking angle
	B	C	D	G			B	C	D	G	
1	0.30	0.00	0.60	0.000	17.46	4	0.72	0.18	0.36	0.024	35.26
2	0.44	0.06	0.52	0.008	22.52	5	0.86	0.24	0.28	0.032	41.50
3	0.58	0.12	0.44	0.016	28.38	6	1.00	0.30	0.20	0.040	47.53

2.4 Box-Behnken 响应面试验

分别在每个显著因素最优参数区间取 3 个水平,设计 4 因素 3 水平的响应面试验。根据 Design Expert 13 设计 BBD(Box-Behnken Design) 响应面试验,共 29 次试验。试验中,非显著性因素选择中间水平(有机肥之间的碰撞恢复系数、有机肥与钢的静摩擦系数和滚动摩擦系数分别设定为 0.40、0.70、0.15),基于上文最优参数区间确定显著性参数水平如表 8 所示,试验设计及结果如表 9 所示。

表 8 Box-Behnken 因素水平

Table 8 Factors and levels table of Box-Behnken

因素 Factors	水平 Levels			因素 Factors	水平 Levels		
	-1	0	1		-1	0	1
B	0.50	0.65	0.80	D	0.30	0.40	0.50
C	0.10	0.15	0.20	G	0.01	0.02	0.03

表 9 Box-Behnken 响应面试验

Table 9 Box-Behnken response surface test

序号 Number	因素 Factors				堆积角/(°) Stacking angle	序号 Number	因素 Factors				堆积角/(°) Stacking angle
	B	C	D	G			B	C	D	G	
1	1	0	-1	0	29.50	16	0	-1	0	1	31.09
2	-1	0	0	1	41.36	17	0	-1	-1	0	42.52
3	0	0	-1	1	36.54	18	0	0	0	0	31.14
4	0	0	0	0	32.64	19	1	-1	0	0	31.46
5	0	1	0	-1	22.28	20	-1	1	0	0	30.93
6	1	0	1	0	34.16	21	0	1	0	1	40.85
7	-1	0	1	0	31.19	22	0	0	-1	-1	30.54
8	1	1	0	0	29.76	23	0	0	1	-1	26.28
9	-1	0	-1	0	38.74	24	0	-1	0	-1	38.30
10	0	1	-1	0	24.83	25	1	0	0	1	31.90
11	0	0	0	0	32.28	26	0	0	1	1	37.74
12	0	1	1	0	37.99	27	-1	0	0	-1	28.95
13	0	0	0	0	33.29	28	1	0	0	-1	31.49
14	0	0	0	0	33.12	29	-1	-1	0	0	35.82
15	0	-1	1	0	24.43						

从表 10 可见,混合肥料之间的静摩擦系数(B)、滚动摩擦系数(C)和 JKR(G)对堆积角具有极显著影响,有机肥与钢之间的碰撞恢复系数(D)对堆积角具有显著影响,BC 交互项对堆积角没有显著影响,剔除 BC 交互项后发现回归方程拟合效果更好,保留其他影响显著的交互项。整体线性回归方程 $P < 0.0001$,回归方程拟合性较好,其 R^2 值接近于 1,说明结果具有很好的可信度。

表 10 Box-Behnken 响应面试验结果

Table 10 Response surface test results of Box-Behnken

方差来源 Source	均方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	P 值 P-value	方差来源 Source	均方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	P 值 P-value
Model	698.60	9	77.62	<0.0001	CD	244.14	1	244.14	<0.0001
B-B	29.20	1	29.20	<0.0001	CG	166.15	1	166.15	<0.0001
C-C	24.03	1	24.03	0.0001	DG	7.45	1	7.45	0.0140
D-D	9.86	1	9.86	0.0057	残差 Residual	19.33	19	1.02	
G-G	144.49	1	144.49	<0.0001	失拟项 Lack of fit	16.41	15	1.09	0.3764
BD	37.27	1	37.27	<0.0001	纯误差 Pure error	2.93	4	0.73	
BG	36.00	1	36.00	<0.0001	总和 Total	717.93	28		

根据 Box-Behnken 响应面试验结果,失拟项 $P=0.3764$, 变异系数 (CV) 为 3.63%, 决定系数 (R^2) 为 0.9731, 校正决定系数 (R_{adj}^2) 为 0.9603, 精确度 (Adeq precision) 为 36.2365。简化后的回归方程:

$$R = 27.79724 - 1.56000B - 1.41500C - 0.90667D + 3.47000G - 3.00000BG + 3.05250BD + 6.44500CG + 7.81250CD + 1.36500DG$$

采用软件 Design Expert 13, 以物理试验测得堆积角 33.15° 为目标值, 求解得最优参数 $B=0.70$ 、 $C=0.14$ 、 $D=0.44$ 、 $G=0.017$ 。

2.5 堆积角验证

把回归方程求得的最优参数带入离散元仿真模型, 得到其堆积角为 32.80° , 如图 8 所示, 相对于物理试验得到的算数平均值 (33.15°) 误差为 1.05%, 可以初步证明假设正确。

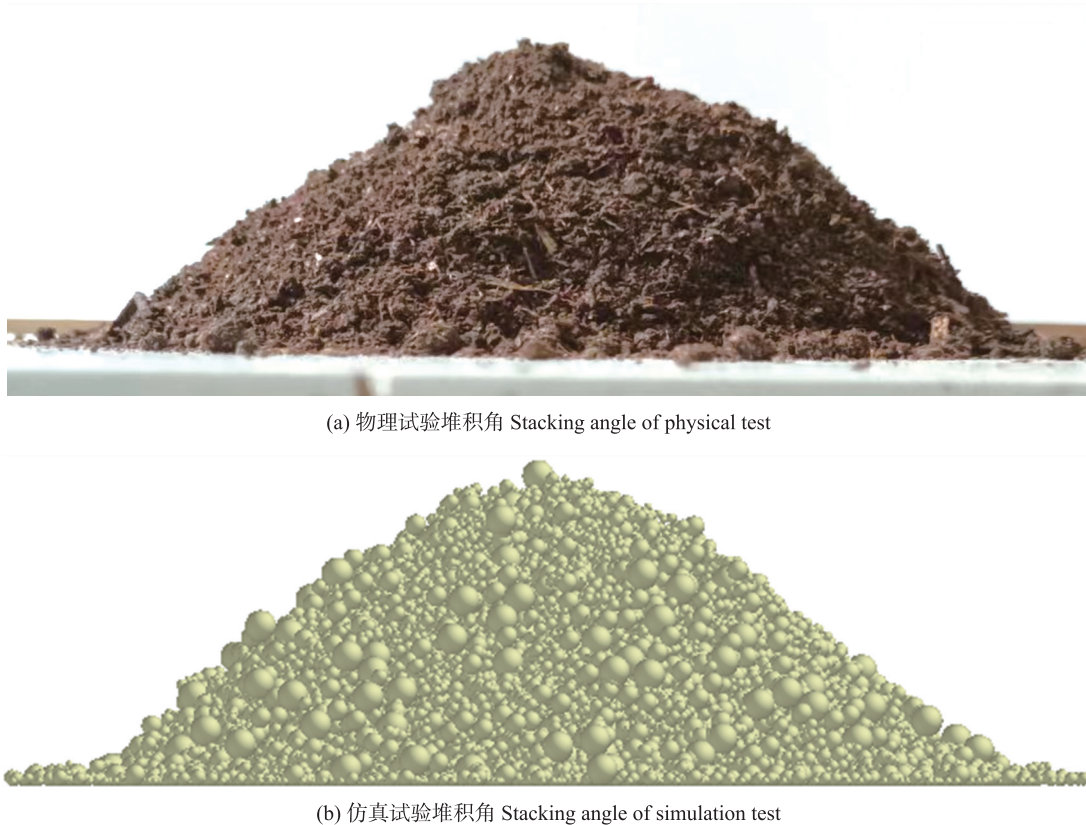


图 8 堆积角物理试验和仿真试验对比

Fig. 8 Comparison of physical and simulation test of stacking angle

2.6 有机肥和无机肥混合比例预测验证

堆积角验证试验完成后, 能证明所标定的接触参数组合能对应无机肥和有机肥质量比为 0.14 的宏观堆积表现。为验证此最优参数在不同混合比例的预测性能, 设计无机肥和有机肥质量比为 0.06~0.30 的梯度物理试验, 差值为 0.06, 每组试验重复 3 次。EDEM 仿真试验设置同样混合比例, 仿真环境与 1.4 节相同。试验数据如表 11 所示。

表 11 有机肥和无机肥不同混合比例物理试验与仿真试验结果

Table 11 Physical test and simulation test results with different ratios of organic fertilizer (OF) and inorganic fertilizer (IOF)

$m(\text{无机肥})/m(\text{有机肥})$ $m(\text{IOF})/m(\text{OF})$	物理试验堆积角/ $^\circ$ Stacking angle of physical test	标准差 Standard deviation	仿真试验堆积角/ $^\circ$ Stacking angle of simulation test
0.06	33.33	0.40	33.2
0.12	33.06	0.25	33.1
0.18	33.13	0.34	33.3
0.24	32.73	0.40	32.8
0.30	32.07	0.38	32.3

从表 11 可见,无机肥和有机肥质量比为 0.06~0.18 时,堆积角基本不变;为 0.18~0.30 时,随质量比增大堆积角呈逐渐减小。可能是因为无机肥密度大,随着质量比增大,在重力影响下堆积角减小,质量比小时重力作用不明显,有机肥团聚作用为主导因素。

3 撒肥盘颗粒分布验证试验

3.1 试验目的

前文通过一系列试验得到混合肥料颗粒模型的最优接触参数,下文把所标定的颗粒模型运用到 EDEM 离散元仿真试验中,并统计撒肥盘的抛撒肥料颗粒分布。通过撒肥盘台架进行物理试验并统计混合肥料分布情况,最后对比仿真结果和物理试验结果,再次验证混合肥料颗粒模型的正确性。

3.2 台架试验

根据大棚有机肥和无机肥施用要求预研制一台有机无机配施一体机,首先搭建撒肥盘台架试验(静态试验方法),当天风速小于 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,台架肥箱容积 50 kg,搅龙输送量设定为 $1.5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,撒肥盘转速设定为 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ [34],撒肥盘直径 55 mm,离地高度 55 mm,2 个扇叶对称无偏角布置,整体结构如图 9 所示。地面放置 $6\times 6=36$ 个纸箱,尺寸为 $300 \text{ mm}\times 300 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}$,每 2 个纸箱间距为 1 m,通过统计各列纸箱中有机肥质量来表征有机肥分布。数据统计结果如表 12 所示。

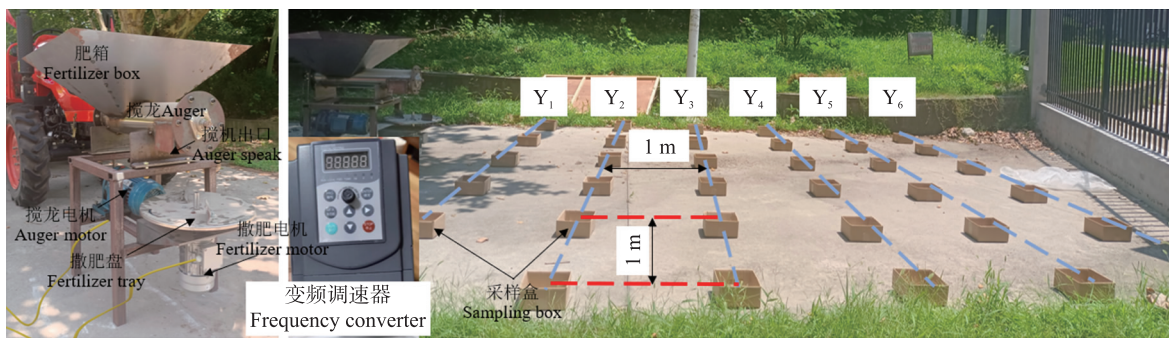


图 9 物理试验现场

Fig. 9 Physical test site diagram

表 12 仿真试验和台架试验混合肥料各列质量分布

Table 12 Mass distribution of each row of mixed fertilizer by simulation test and bench test

列 Columns	仿真试验有机肥质量分布/g Mass distribution of organic fertilizer in simulation test	台架试验有机肥质量分布/g Mass distribution of organic fertilizer in bench test	3 次台架试验标准差/g Standard deviation of 3 bench tests	相对误差/% Relative error
Y1	656.10	482.58	192.47	35.95
Y2	735.18	786.66	42.76	6.55
Y3	945.18	808.68	87.73	16.88
Y4	1 042.26	953.94	60.37	9.26
Y5	595.50	636.06	30.92	6.38
Y6	466.68	644.40	120.86	27.58

3.3 仿真试验

仿真过程中采用标定好的混合肥料模型。为简化仿真过程,只对撒肥盘进行建模,撒肥盘转速为 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,撒肥盘离地高度 550 mm,使用边长 150 mm 正方形颗粒工厂代替搅龙有机肥输送,有机肥颗粒密度为 $572 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,复合小球颗粒密度为 $1 146 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,出料速度为 $1.3 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,总质量为 50 kg。仿真环境不建立地面,用 Group 工具代替地面位置,有机肥和复合小球经过 Group 后会消失,减少计算工作量,统计各列 Group 全部时间的颗粒总质量。统计结果如表 12 所示。

3.4 结果对比

统计台架试验与仿真试验各列方格混合肥料质量,试验结果如表 12 所示,台架试验进行 3 次,统计平均值,并将标准差列在表 12。从表 12 可以看出,单列最大相对误差为 35.95%,平均误差为 15.86%。与堆积角验证试验相比误差较大,可能撒肥盘高速旋转下的振动、有机肥与架子的碰撞、空气阻力等因素都会影响仿真结果。与前人所做的撒肥盘试验[34]相比,仿真精度有一定提高。

4 结论

1)在对有机无机混合肥料堆积角仿真过程中发现,通过传统方法对2种颗粒分别标定得到仿真结果与实际情况差异较大,结果表明有机肥对无机肥的黏附特性是影响堆积角的重要原因。基于此提出一种新的离散元参数标定方法,引入复合小球的概念。通过此方法标定复合小球与钢的接触参数以及有机肥之间的接触参数,与原来的标定相比无机肥与有机肥的接触参数减少3个,有效简化混合物料接触过程,同时能够正确反映接触过程。

2)设计单因素试验校准复合小球与钢的碰撞恢复系数、滚动摩擦系数和静摩擦系数,通过设计Plackett-Burmen Design显著性试验得出有机无机混合肥料的显著影响因素、最陡爬坡试验显著因素最优区间、Box-Behnken试验参数的最优值。堆积角验证试验结果表明,有机无机混合肥料仿真堆积角与真实肥料堆积角之间相对误差为1.05%,并验证了标定参数在有机无机混合肥料不同混合比例的适应性和预测准确性。

3)在对有机无机混合肥料标定完成之后进行有机无机混合肥料的撒肥仿真试验和台架试验,结果表明,仿真试验能定性反映混合肥料分布情况。其中撒肥盘带来的流场变化可能是造成仿真试验和物理试验误差的关键因素,后续可以在流固耦合方面进一步探究有机肥-机械-空气系统的互作机制。

参考文献 References:

- [1] Li P, Li Y B, Xu L Y, et al. Crop yield-soil quality balance in double cropping in China's upland by organic amendments: a meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2021, 403: 115197.
- [2] Li P, Kong D N, Zhang H J, et al. Different regulation of soil structure and resource chemistry under animal- and plant-derived organic fertilizers changed soil bacterial communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 165: 104020.
- [3] 李文涛,于春晓,张丽莉,等. 有机无机配施对水稻产量及氮肥残效的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(1): 63-72.
Li W T, Yu C X, Zhang L L, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on rice yield and nitrogen residual effect[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(1): 63-72 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李桂花,张雪凌,周吉祥,等. 长期秸秆还田下有机无机配施及微量元素和缓释肥的施用对双季稻产量和肥料利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 149-155.
Li G H, Zhang X L, Zhou J X, et al. Impact of manure incorporation, microelements and slow release fertilizer application on double rice yield and fertilizer use efficiency under long-term straw return condition[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 149-155 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王亚麒,刘京,苟剑渝,等. 长期有机无机配施下烤烟-玉米轮作优化土壤微生物活化无机磷[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 808-818.
Wang Y Q, Liu J, Gou J Y, et al. Optimization of soil microbial activation of inorganic phosphorus in tobacco-maize rotation under long-term combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 808-818 (in Chinese with English abstract).
- [6] 徐丽萍. 塑料大棚栽培下有机无机配施对大白菜产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(6): 109-114.
Xu L P. Influences of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield and quality of Chinese cabbage and soil fertility under plastic greenhouse cultivation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(6): 109-114 (in Chinese).
- [7] 姜玲玲,刘静,赵同科,等. 有机无机配施对番茄产量和品质影响的Meta分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 601-610.
Jiang L L, Liu J, Zhao T K, et al. Meta-analysis of combinative application of organic and inorganic fertilizers on effect of yield and qualities of tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 601-610 (in Chinese with English abstract).
- [8] 任德志,张露籍,宫元娟,等. 生物炭基肥离散元模型参数标定与试验[J]. *沈阳农业大学学报*, 2023, 54(4): 447-455.
Ren D Z, Zhang L J, Gong Y J, et al. Calibration and testing of discrete element model parameters for biochar-based fertilizer[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2023, 54(4): 447-455 (in Chinese with English abstract).
- [9] 韩伟,王绍宗,张倩,等. 基于JKR接触模型的微米级颗粒离散元参数标定[J]. *中国粉体技术*, 2021, 27(6): 60-69.
Han W, Wang S Z, Zhang Q, et al. Discrete element parameter calibration of micron sized powder particles based on JKR contact model[J]. *China Powder Science and Technology*, 2021, 27(6): 60-69 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 49-56.
Zhang R, Han D L, Ji Q L, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 49-56 (in Chinese with English abstract).
- [11] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 80-88.
Huang Y X, Hang C G, Yuan M C, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 80-88 (in Chinese with English abstract).
- [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 Q C, Xu L M, Xing J J, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(18): 21-27 (in Chinese with English abstract).

- [13] 袁全春,徐丽明,牛丛,等. 果园有机肥深施机分层变量排肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):195-202.
Yuan Q C,Xu L M,Niu C,et al. Design and test of layered variable rate fertilizer discharge control system for organic fertilizer deep applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(suppl 1):195-202(in Chinese with English abstract).
- [14] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报,2019,50(2):49-56,77.
Dai F,Song X F,Zhao W Y,et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):49-56,77(in Chinese with English abstract).
- [15] 张秀丽,刘云鹏,李连豪,等. 有机肥生产中的多段式搅龙设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3):49-56.
Zhang X L,Liu Y P,Li L H,et al. Design and performance experiment of multi-segment type auger in process of organic fertilizer production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(3):49-56(in Chinese with English abstract).
- [16] Kruggel-Emden H,Wirtz S,Scherer V. A study on tangential force laws applicable to the discrete element method (DEM) for materials with viscoelastic or plastic behavior[J]. Chemical Engineering Science,2008,63(6):1523-1541.
- [17] 金浩,蒋明洋,徐超,等. 基于离散元法的柔性片烟建模及仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(5):563-571.
Jin H,Jiang M Y,Xu C,et al. Modeling and simulation parameters calibration of flexible tobacco strips based on discrete element[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2023,54(5):563-571(in Chinese with English abstract).
- [18] 廖洋洋,尤泳,王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):14-22.
Liao Y Y,You Y,Wang D C,et al. Parameter calibration and experiment of discrete element model for mixed seeds of oat and arrow pea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):14-22(in Chinese with English abstract).
- [19] 张秀丽,吴亚文,李建华,等. 烟草颗粒肥配比混施装置的设计与试验[J]. 河南农业大学学报,2020,54(5):829-835.
Zhang X L,Wu Y W,Li J H,et al. Design and experiment of tobacco pellet fertilizer mixture applicator[J]. Journal of Henan Agricultural University,2020,54(5):829-835(in Chinese with English abstract).
- [20] Azimi-Nejadani H,Karparvarfard S H,Naderi-Boldaji M. Weed seed burial as affected by mouldboard design parameters,ploughing depth and speed:DEM simulations and experimental validation[J]. Biosystems Engineering,2022,216:79-92.
- [21] 朱新华,伏胜康,李旭东,等. 不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究[J]. 农业机械学报,2022,53(8):34-41.
Zhu X H,Fu S K,Li X D,et al. General method for discrete element parameters calibration of goat manure with different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):34-41(in Chinese with English abstract).
- [22] Beakawi Al-Hashemi H M,Baghabra Al-Amoudi O S. A review on the angle of repose of granular materials[J]. Powder Technology,2018,330:397-417.
- [23] 秦程程,魏丹,金梁,等. 有机无机肥配施对设施土壤耕层养分、番茄产量和品质的影响[J]. 北方园艺,2022(6):84-91.
Qin C C,Wei D,Jin L,et al. Effects of organic and inorganic combined application on soil nutrients,tomato yield and quality[J]. Northern Horticulture,2022(6):84-91(in Chinese with English abstract).
- [24] 宋雅欣,赵同科,安志装,等. 有机无机肥料配施对设施番茄产量及土壤养分含量的影响[J]. 华北农学报,2021,36(增刊1):306-311.
Song Y X,Zhao T K,An Z Z,et al. Effects of organic and inorganic fertilizers combined application on yield and soil nutrient in facility tomatoes[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2021,36(suppl 1):306-311(in Chinese with English abstract).
- [25] 李建勇,王齐旭,张瑞明. 有机肥和生物炭对设施青菜生产及土壤养分积累利用的影响[J]. 北方园艺,2019(22):16-21.
Li J Y,Wang Q X,Zhang R M. Effects of organic fertilizer and biochar on pakchoi yield and soil nutrient accumulation and utilization in protected vegetable fields[J]. Northern Horticulture,2019(22):16-21(in Chinese with English abstract).
- [26] Yu W J,Liu R X,Yang W P. Parameter calibration of pig manure with discrete element method based on JKR contact model[J]. AgriEngineering,2020,2(3):367-377.
- [27] 张晓明. 有机肥颗粒热风干燥工艺及装备研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
Zhang X M. Study on the drying process and equipment for organic fertilizer pellets[D]. Beijing:China Agricultural University,2017(in Chinese with English abstract).
- [28] Xie C,Yang J W,Wang B S,et al. Parameter calibration for the discrete element simulation model of commercial organic fertilizer[J]. International Agrophysics,2021,35(1):107-117.
- [29] Thakur S C,Ooi J Y,Ahmadian H. Scaling of discrete element model parameters for cohesionless and cohesive solid[J]. Powder Technology,2016,293:130-137.
- [30] Tamás K. The role of bond and damping in the discrete element model of soil-sweep interaction[J]. Biosystems Engineering,2018,169:57-70.
- [31] Zhao X J,Eri Q T,Wang Q A. An investigation of the restitution coefficient impact on simulating sand-char mixing in a bubbling fluidized bed[J]. Energies,2017,10(5):617.
- [32] Freireich B,Litster J,Wassgren C. Using the discrete element method to predict collision-scale behavior;a sensitivity analysis[J]. Chemical Engineering Science,2009,64(15):3407-3416.
- [33] Ma X J,Liu M,Hou Z F,et al. Calibration and experimental studies on the mixing parameters of red clover seeds and coated powders[J]. Processes,2022,10(11):2280.
- [34] van Liedekerke P,Tijssens E,Dintwa E,et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology,2009,190:348-360.