

控释肥颗粒群仿直接触参数标定与试验

张宏建¹ 陈修波¹ 李宏立¹ 田 园¹ 范国强¹ 许珺烁¹ 刘双喜^{1,2} 王金星^{1,3}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;

3. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 接触参数影响控释肥颗粒离散元仿真结果。为了精准模拟控释肥颗粒力学行为与运动规律, 本文基于离散元法对控释肥颗粒的接触参数进行标定与试验。首先, 建立控释肥离散元基础模型, 并利用台架和仿真试验相结合的方法, 在 EDEM 中对控释肥颗粒与 PVC 板之间接触参数进行标定。其次, 通过碰撞弹跳试验、斜面滑移试验和斜面滚动试验测得控释肥颗粒与 PVC 板之间的碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数分别为 0.539、0.507 和 0.105。最后, 通过堆积试验、最陡爬坡试验和正交旋转组合试验, 得到控释肥颗粒间的碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数分别为 0.38、0.25 和 0.09, 并通过无底圆筒提升试验和排肥台架试验进行验证。试验结果表明, 堆积角实际值与仿真结果的相对误差为 1.54%, 排肥量实际值与仿真结果 4 种转速下的相对误差分别为 4.38%、4.23%、4.41%、4.36%, 所标定的控释肥接触参数精准有效, 可为控释肥离散元仿真提供数据和模型支撑。

关键词: 控释肥; 离散元法; 接触参数; 标定试验; 堆积角

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0080-11

OSID:



Simulated Contact Parameters Calibration and Experiment of Controlled-release Fertilizer Particles

ZHANG Hongjian¹ CHEN Xiubo¹ LI Hongli¹ TIAN Yuan¹ FAN Guoqiang¹
XU Junshuo¹ LIU Shuangxi^{1,2} WANG Jinxing^{1,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: The contact parameters affect the discrete element simulation results of controlled-release fertilizer particles. In order to accurately simulate the mechanical behavior and motion law of controlled-release fertilizer particles, the contact parameters of controlled-release fertilizer particles were calibrated and experimented based on the discrete element method. Firstly, the basic model of controlled-release fertilizer discrete elements was established, and the contact parameters between controlled-release fertilizer particles and PVC panels were calibrated in EDEM by combining bench and simulation experiment. Secondly, the collision recovery coefficient, static friction factor and rolling friction factor between controlled-release fertilizer particles and PVC plate were measured by collision bounce experiment, slope slip experiment and inclined rolling experiment to be 0.539, 0.507 and 0.105, respectively. Finally, through the accumulation experiment, the steepest climbing experiment and the orthogonal rotation combination experiment, the collision recovery coefficient, static friction factor and rolling friction factor between controlled-release fertilizer particles were obtained as 0.38, 0.25 and 0.09, respectively, and verified by bottomless cylinder lifting experiment and fertilizer discharge bench experiment. The experiment results showed that the relative error between the actual value of the

收稿日期: 2023-10-24 修回日期: 2023-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201682)、山东省重点研发计划项目(2022CXGC020706)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27)、泰安市揭榜挂帅项目(2021-004)和泰安市科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TATSGC012)

作者简介: 张宏建(1991—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: zhanghongji_an@163.com

通信作者: 王金星(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: jinxingw@163.com

accumulation angle and the simulation result was 1.54%, and the relative error between the actual value of the discharge amount and the simulation result at the four speeds was 4.38%, 4.23%, 4.41% and 4.36%, respectively, and the contact parameters of the calibrated controlled-release fertilizer were accurate and effective, which can provide data and model support for the simulation of controlled-release fertilizer discrete elements.

Key words: controlled-release fertilizer; discrete element method; contact parameter; calibration experiment; stacking angle

0 引言

施用控释肥是减少肥料浪费、提高养分利用率、减轻环境污染的重要途径之一^[1]。控释肥以化学肥料为核心,通过包膜技术和调控技术延缓肥料养分释放速率、延长作物对肥料养分的吸收周期、同步肥料养分释放速率与作物需求,有效减少肥料养分的挥发,显著提高了肥料利用率^[2]。控释肥已成为化肥提质增效的重要发展方向,是我国鼓励发展且产销量最大的新型肥料。随着施肥装备与技术的迅速发展,机械化施肥成为我国主要的施肥方式。然而,在机械化施肥过程中,控释肥颗粒群与排肥机构、土壤颗粒、肥料颗粒之间存在复杂的相互作用力,难以通过仪器设备直接测定^[3]。离散元法是解决不连续介质问题的数值模拟方法,通过建立固体颗粒体系的参数化模型,进行颗粒行为模拟和分析,已成为过程分析、设计优化和产品研发的一种强大工具^[4-6]。

目前,国内外学者已将离散元法应用于细矿石、饲料和土壤等颗粒模型方面进行了大量研究。ZHANG等^[7]利用离散元法标定放大颗粒的参数,使放大颗粒与实际颗粒具有相同的颗粒流动特性,所得参数可直接用于细粒铁尾矿的离散元模拟;郭三琴等^[8]通过仿真与台架试验对颗粒饲料与钢板、颗粒饲料与尼龙之间进行参数标定,为提高投饲的均匀性提供了数据支持;UCGUL等^[9]通过休止角和贯入度试验标定模拟土壤耕作所需的参数,得到的接触模型和接触参数可有效模拟无粘性土壤;杨摄等^[10]通过大量物理试验与仿真试验对沙粒参数进行了标定,建立沙粒的土壤模型,为机械除沙以及相关后续研究提供合理可靠的参数;ZHOU等^[11]模拟了玻璃圆球颗粒在长方体容器中落料堆积过程,发现颗粒间及颗粒与容器壁滑动和滚动摩擦因数是影响堆积形态的关键因素;韩伟等^[12]建立JKR接触模型,应用离散元法对微米级粉体颗粒活性染料进行了参数标定,为后续相关研究提供数据参考。

综上所述,固体颗粒的离散元仿真模型接触参数是影响颗粒运动的重要因素。获取准确的接触参

数可以保证离散元仿真的精度,但目前接触仿真参数主要取经验值,大部分参数直接测定比较困难,特别是对于材料间接触参数的测定误差大,且接触参数的研究还缺乏系统性。离散元法在建立固体颗粒体系参数模型方面优势突出。控释肥作为固体颗粒肥料,利用离散元法对控释肥颗粒进行仿真模型建立和参数标定,有助于全面系统获得控释肥物理特性参数,进而更好地设计施肥机械结构和优化作业参数,提高施肥机械的施肥性能。基于此,本文以控释肥颗粒为研究对象,在EDEM软件中建立球形控释肥颗粒离散元基础模型,根据台架试验和仿真试验,标定控释肥颗粒与PVC塑料之间接触参数,基于堆积试验、最陡爬坡试验、二次回归正交旋转组合试验的响应面优化方法,确定EDEM仿真控释肥颗粒之间接触参数。

1 控释肥颗粒基础模型建立

1.1 试验材料

选用河北德沃多生物科技有限公司生产的颗粒状控释肥,实物如图1所示。



图1 控释肥颗粒

Fig. 1 Controlled-release fertilizer granules

由于施肥机在作业过程中肥料大多与施肥箱、施肥管道等排肥机构接触,本文选择PVC塑料作为接触材料,确定PVC物理参数为^[13]:泊松比0.38、密度 1400 kg/m^3 、剪切模量 2090 MPa 。

1.2 物理参数

随机选取100粒控释肥颗粒作为试验样本,使用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测量其三轴尺寸^[14]。求出控释肥颗粒等效直径 D 以及球形度 φ ,得到形状尺寸参数如表1所示。

表1 控释肥颗粒形状尺寸参数

Tab.1 Controlled-release fertilizer granule shape and size parameters

参数	长度 L/mm	宽度 W/mm	厚度 T/ mm	等效直径 D/mm	球形度 $\varphi/\%$
最大值	4.78	4.46	4.51	4.78	95.16
最小值	3.14	2.81	2.88	2.71	93.28
平均值	3.96	3.64	3.70	3.75	94.22

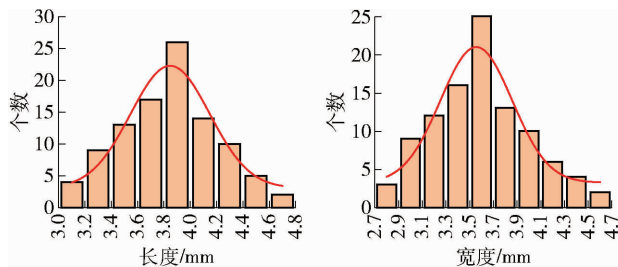


图2 控释肥颗粒三轴尺寸分布直方图

Fig.2 Size distributions of controlled-release fertilizer particles

4.6 mm 区间。

利用排水法、干燥法测定控释肥颗粒的密度和含水率,利用宁波瑞柯伟业仪器有限公司生产的粉体流动行为分析仪测定泊松比,利用济南联工测试技术有限公司生产的 CMT-300 型万能试验机测定剪切模量,试验结果为:控释肥密度 1529 kg/m^3 、含水率 0.50%、泊松比 0.33、剪切模量 35.6 MPa 。

1.3 接触模型

接触模型描述了元素在相互接触时的行为。由于控释肥颗粒与其他肥料特性不同,它们不会因水分和化学物质的影响而发生粘连现象,并且在实际试验中控释肥颗粒与 PVC 板接触表面光滑几乎无粘附力,且颗粒间没有复杂相互作用力,因此 EDEM 仿真时选用 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型^[15]。该模型以 Mindlin 的研究成果作为理论基础,具有准确而高效的计算性能,能够较好地表现出颗粒物料之间的接触效果。法向力和阻尼力的计算公式为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_n^{ret} \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad \beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (3)$$

$$S_n = 2Y^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (4)$$

式中 F_n ——法向力 F_n^d ——阻尼力

E^* ——等效杨氏模量

R^* ——模型颗粒等效半径

δ_n ——法向重叠量 m^* ——等效质量

v_n^{ret} ——相对法向速度

对上述计算得到的控释肥颗粒三轴尺寸和等效直径,利用 Origin 2018 进行拟合,尺寸分布如图 2 所示。从图中可以看出,随机选取的 100 粒控释肥颗粒三轴尺寸呈正态分布,颗粒长度分布在 $3.2 \sim 4.5 \text{ mm}$ 区间占 94%,宽度分布在 $3.0 \sim 4.3 \text{ mm}$ 区间占 90% 左右,厚度分布在 $3.0 \sim 4.4 \text{ mm}$ 区间占 95% 左右,有 90% 左右的颗粒等效直径分布在 $2.8 \sim$

β ——与恢复系数相关的参数

S_n ——法向刚度

Y^* ——复合杨氏模量

e ——恢复系数

切向力 F_t 由切向重叠量 δ_t 和切向刚度 S_t 确定,即

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (5)$$

$$\text{其中} \quad S_t = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (6)$$

式中 G^* ——等效切向模量

此外,切向阻尼力 F_t^d 为

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{ret} \quad (7)$$

式中 v_t^{ret} ——相对切向速度

库仑摩擦力 $\mu_s F_n$ 限制了切向力,其中 μ_s 是静摩擦因数。

在 EDEM 仿真中,滚动摩擦的影响非常重要,必须加以考虑,一般在接触面上施加一个力矩 T_i 来表征滚动摩擦

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (8)$$

式中 μ_r ——滚动摩擦因数

R_i ——颗粒 i 质心到接触点的距离

ω_i ——颗粒 i 在接触点处的单位角速度向量

1.4 离散元基础模型

在离散元仿真试验前,需要建立控释肥颗粒的离散元仿真结构模型。仿真试验时,若完全按照颗粒的实际形状及尺寸进行颗粒建模,虽仿真精度高,但仿真时间长、效率低。当物料颗粒的球形度超过 90% 可以近似为球形处理^[16]。鉴于控释肥颗粒的平均球形度为 94%,本文选择球形颗粒建立控释肥颗粒的离散元模型,如图 3 所示。球形颗粒形状简

单、规则,参数只有一个半径,而且球形颗粒之间只有一种接触状态,可大大缩短检测计算时间,有利于提高仿真效率。通过上述 1.2 节对随机选取的 100 粒控释肥三轴尺寸和等效直径计算,得到其平均等效直径为 3.75 mm,因此确定构建的控释肥颗粒基础模型等效直径为 3.75 mm,质量为 4.39×10^{-5} kg。

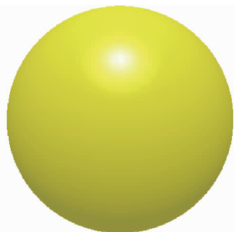


图3 控释肥颗粒球形基础模型

Fig.3 Controlled-release fertilizer spherical simulation model

2 接触参数标定

在仿真试验时,需定义离散元仿真模型的物性参数,主要包括材料本征参数(如密度、剪切模量、泊松比等)和接触参数^[17](如颗粒与颗粒、颗粒与材料间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等)。其中,材料本征参数与真实值基本一致,而控释肥属于小粒径球形颗粒,通过台架试验直接测量其接触参数,会与实际值存在差异,需对其接触参数进行重新标定^[18]。为提高离散元仿真试验可靠性,本文结合台架试验和仿真试验,标定仿真试验中的接触参数。常用的接触参数标定试验包括碰撞弹跳试验、斜面滑移试验、斜面滚动试验和堆积试验等^[19]。

2.1 控释肥颗粒与 PVC 接触参数标定

2.1.1 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数是用于描述碰撞中能量转移和物体反弹的物理量。本文通过碰撞弹跳试验标定控释肥颗粒与 PVC 板之间的碰撞恢复系数 e ,碰撞恢复系数计算公式为

$$e = \sqrt{\frac{h_1}{H_1}} \quad (9)$$

式中 h_1 ——控释肥颗粒最大弹起高度,mm

H_1 ——控释肥颗粒初始位置高度,mm

将控释肥颗粒从高度 $H_1 = 150$ mm 处自由下落,与水平放置的 PVC 板发生碰撞,通过高速摄像机记录控释肥颗粒最高弹起高度,台架试验重复 5 次,计算结果取平均值,得最高弹起高度实测值 $h_1 = 46.37$ mm。

由于控释肥颗粒与 PVC 板之间的静摩擦因数 A_2 、滚动摩擦因数 A_3 ,以及控释肥颗粒之间的碰撞恢复系数 X_1 、静摩擦因数 X_2 和滚动摩擦因数 X_3 均

对弹起高度没有影响,为了避免其对仿真试验产生干扰,在 EDEM 仿真试验过程中,将 A_2 、 A_3 、 X_1 、 X_2 、 X_3 均设置为 0。仿真试验时,将尺寸为 100 mm × 60 mm 的 PVC 板模型导入 EDEM 中,在其正上方处建立颗粒工厂,距离 PVC 板模型 150 mm,用于生成控释肥颗粒,颗粒采用尺寸固定的动态方式生成。仿真试验总时间为 2 s,时间步长为 1.67×10^{-5} s,网格尺寸为最小颗粒半径的 3 倍。通过仿真预试验,确定控释肥颗粒与 PVC 板之间的碰撞恢复系数 A_1 的取值范围为 0.35 ~ 0.65,取步长为 0.05,进行 7 组仿真试验,每组试验进行 5 次取平均值,试验方案与仿真结果如表 2 所示,表中 B_1 为仿真时最大弹起高度。

表 2 碰撞恢复系数仿真试验方案与结果

Tab.2 Crash recovery coefficient simulation experiment scheme and results

序号	A_1	B_1 /mm
1	0.35	19.92
2	0.40	25.58
3	0.45	32.16
4	0.50	39.69
5	0.55	48.17
6	0.60	57.61
7	0.65	68.06

为得到仿真试验中控释肥颗粒与 PVC 板之间碰撞恢复系数与最大弹起高度的关系,对表 2 中的试验数据进行曲线拟合,得到二次多项式拟合曲线如图 4 所示,曲线方程为

$$B_1 = 191.19A_1^2 - 30.84A_1 + 7.3093 \quad (R^2 \leq 1) \quad (10)$$

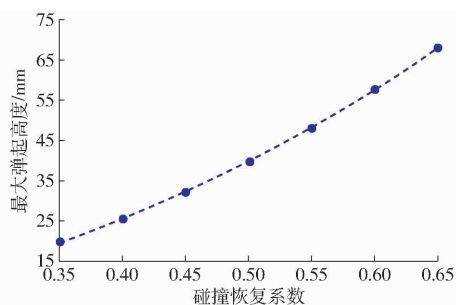


图4 碰撞恢复系数与最大弹起高度拟合曲线
Fig.4 Collision recovery coefficient fitted curves to maximum bounce height

式(10)的决定系数 $R^2 = 1$,表明该方程拟合准确可靠。将台架试验测得最大弹起高度实际值 46.37 mm 代入式(10),求得 $A_1 = 0.539$,将该数值输入 EDEM 软件中进行仿真验证,试验重复 5 次,计算结果取平均值,测得最大弹起高度仿真值为 47.23 mm,与实测值的相对误差为 1.85%,表明标

定后的仿真结果与台架试验结果相符。确定 EDEM 仿真试验中,控释肥颗粒与 PVC 板之间碰撞恢复系数 $A_1 = 0.539$ 。

2.1.2 静摩擦因数

本文通过斜面滑移试验进行静摩擦因数 μ 测定。使用斜面滑移试验标定控释肥颗粒与 PVC 板间的静摩擦因数,试验如图 5 所示。计算公式为

$$\mu = \frac{mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \tan \alpha \quad (11)$$

式中 α ——滑动斜面倾斜角, ($^\circ$)

m ——控释肥颗粒质量

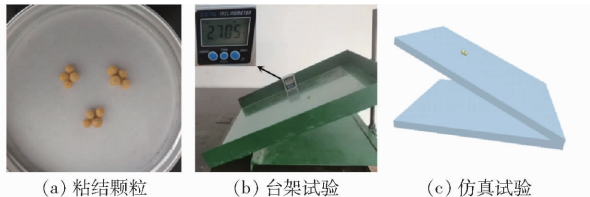


图 5 静摩擦因数台架标定试验

Fig. 5 Static friction factor bench calibration experiment

试验过程中为防止控释肥滚动,缩小试验误差,将 4 颗控释肥颗粒粘结在一起。初始时,将 PVC 板水平固定在斜板上,将粘结好的控释肥颗粒放置在 PVC 板上,使用水平仪记录倾斜角,使斜板绕着一边缓慢匀速转动,当粘结控释肥颗粒开始滑移时停止转动,记录倾斜板倾斜角,台架试验重复 5 次,计算结果取平均值,求得 $\alpha = 27.05^\circ$ 。

控释肥颗粒与 PVC 板之间的滚动摩擦因数 A_3 , 以及控释肥颗粒之间的碰撞恢复系数 X_1 、静摩擦因数 X_2 、滚动摩擦因数 X_3 均对斜板倾斜角没有影响。为了避免其对仿真试验产生影响,在 EDEM 仿真试验过程中,将 A_3 、 X_1 、 X_2 、 X_3 均设置为 0,控释肥颗粒与 PVC 板之间碰撞恢复系数选择已标定好的参数 $A_1 = 0.539$ 。

仿真试验时,将 2 个形状为 $100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的 PVC 板模型和直径 20 mm 、高度 50 mm 的圆筒模型导入 EDEM 中。PVC 板重叠水平放置,将圆筒放在 PVC 板一侧,防止生成的颗粒随处滚动,在仿真时间 1.4 s 时设置 1 m/s 向上的匀速运动。在圆筒正上方处建立颗粒工厂,距离 PVC 板模型 49 mm ,用于生成粘结控释肥颗粒,颗粒采用固定尺寸的动态方式生成。仿真试验总时间为 4 s ,时间步长为 $4.84 \times 10^{-6} \text{ s}$,网格尺寸为最小颗粒半径的 3 倍。在颗粒生成后,将位于上侧的 PVC 板添加绕垂直于滑落方向的匀速旋转运动,速度为 $10^\circ/\text{s}$ 。通过仿真预试验,设控释肥颗粒与 PVC 板之间的静摩擦因数 A_2 的取值范围为 $0.35 \sim 0.65$,取步长为 0.05 ,进行 7 组仿真试验。每组试验进行 5 次取平均值,试

验方案与仿真结果如表 3 所示,表中 B_2 为仿真时倾斜角。

表 3 静摩擦因数仿真试验方案与结果

Tab. 3 Static friction factor simulation experiment scheme and results

序号	A_2	$B_2/(\text{^\circ})$
1	0.35	17.51
2	0.40	18.55
3	0.45	23.38
4	0.50	26.57
5	0.55	30.11
6	0.60	33.54
7	0.65	36.87

为得到仿真试验中控释肥颗粒与 PVC 板之间静摩擦因数与斜板倾斜角的关系,对表 3 中的试验数据进行曲线拟合,得到二次多项式拟合曲线如图 6 所示,曲线方程为

$$B_2 = 25.476A_2^2 + 44.488A_2 - 2.075 \quad (12)$$

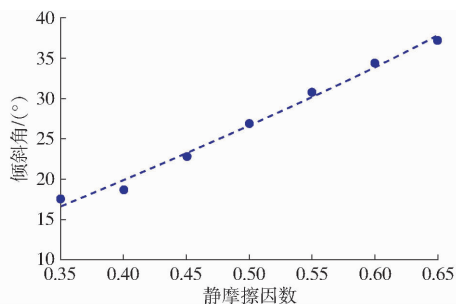


图 6 静摩擦因数与倾斜角拟合曲线

Fig. 6 Static friction factor fitted curve to inclination angle

式(12)的决定系数 $R^2 = 0.9901$,接近于 1,表明该方程拟合准确度高。将台架试验的斜板倾斜角实测值 $\alpha = 27.05^\circ$ 代入式(12),求得 $A_2 = 0.507$,将该数值输入 EDEM 软件中进行仿真验证,试验重复 5 次,计算结果取平均值,试验得到倾斜角仿真值为 28.20° ,与实测值的相对误差为 4.25% ,表明标定后仿真结果与台架试验结果相符。确定 EDEM 仿真试验中,控释肥颗粒与 PVC 板之间静摩擦因数 $A_2 = 0.507$ 。

2.1.3 滚动摩擦因数

本文通过斜面滚动试验标定控释肥颗粒与 PVC 板之间的滚动摩擦因数 μ_r ,试验如图 7 所示。滚动摩擦因数的计算公式为

$$mgS \sin \gamma = \mu_r mg (S \cos \gamma + b) \quad (13)$$

式中 S ——控释肥颗粒水平滚动距离,mm

γ ——滚动斜面倾斜角, ($^\circ$)

b ——控释肥颗粒斜面滚动距离,mm

将 PVC 板固定在斜板上,在地面上铺有大面积 PVC 板与之衔接,以便于使控释肥颗粒完全滚落在

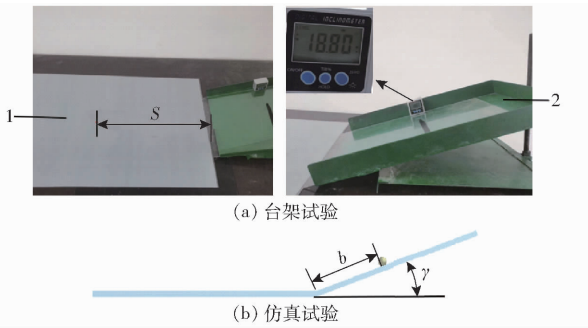


图7 滚动摩擦因数台架标定试验

Fig.7 Rolling factor of friction bench calibration experiment

1. 水平面 2. 倾斜面

PVC板上。由于控释肥颗粒球形率高、粒径小,当斜板倾斜角 γ 与水平滚动距离 S 较大时,会导致颗粒在滚动过程中发生弹跳,影响试验结果准确性;当 γ 与 S 较小时,控释肥颗粒水平滚动距离较小,使试验误差增大。因此经大量预试验调整,设定倾斜角 γ 为 18.80° 、水平滚动距离 S 为30 mm。将控释肥颗粒放置于倾斜角 $\gamma = 18.80^\circ$ 的倾斜面上,使其在斜面上的滚动距离为 $b = 30$ mm,以初速度为0沿着倾斜面向下滚动,控释肥颗粒最终滚落至水平面上,待其在水平面上完全静止时,测量颗粒水平滚动距离。台架试验重复5次,计算结果取平均值,求得 $S = 63.26$ mm。

控释肥颗粒之间的碰撞恢复系数 X_1 、静摩擦因数 X_2 和滚动摩擦因数 X_3 均对水平滚动距离没有影响,避免其对仿真试验产生影响,在EDEM仿真试验过程中,将 X_1 、 X_2 和 X_3 的值均设置为0,控释肥颗粒与PVC板之间的碰撞恢复系数和静摩擦因数选用已标定好的参数: $A_1 = 0.539$, $A_2 = 0.507$ 。

仿真试验时,将利用Solidworks生成的PVC板模型导入EDEM中,各项尺寸与实际试验保持一致。在倾斜面上距离地面30 mm处放置直径20 mm、高度50 mm的圆筒,避免生成的颗粒随处滚动,仿真时间2 s时,给圆筒添加速度为1 m/s的向上匀速直线运动。在圆筒正上方处建立颗粒工厂,距离倾斜面49 mm,用于生成控释肥颗粒,颗粒采用尺寸固定的动态方式生成。仿真试验总时间为3.5 s,时间步长为 9.19×10^{-6} s,网格尺寸为最小颗粒半径的3倍。经过仿真预试验,取控释肥颗粒与PVC板之间滚动摩擦因数 A_3 范围为0.05~0.11,取步长0.01,进行7组仿真试验。每组试验重复5次取平均值,试验方案与结果如表4所示,表中 B_3 为仿真试验水平滚动距离。

为得到仿真试验中控释肥颗粒与PVC板之间滚动摩擦因数与水平滚动距离的关系,对表4中的试验数据进行曲线拟合,得到二次多项式拟合曲线

表4 滚动摩擦因数仿真试验方案与结果

Tab.4 Rolling friction factor simulation experiment scheme and results

序号	A_3	B_3/mm
1	0.05	163.29
2	0.06	131.67
3	0.07	108.33
4	0.08	89.20
5	0.09	76.60
6	0.10	65.20
7	0.11	57.50

如图8所示,曲线方程为

$$B_3 = 22900A_3^2 - 5385.6A_3 + 376.28 \quad (14)$$

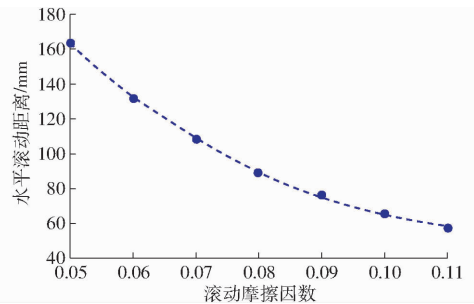


图8 滚动摩擦因数与水平滚动距离拟合曲线

Fig.8 Rolling friction factor fitted curve to horizontal rolling distance

式(14)的决定系数 $R^2 = 0.9988$,接近于1,表明该方程拟合准确度高。将台架试验的水平滚动距离实测值 $S = 63.26$ mm代入式(14),求得 $A_3 = 0.105$,将该数值输入EDEM软件中进行仿真试验验证,试验重复5次,计算结果取平均值。试验得到水平距离仿真值为60.8 mm,与实测值的相对误差为3.89%,表明标定后的仿真结果与台架试验结果相符。EDEM仿真试验中,确定控释肥颗粒与PVC板之间滚动摩擦因数 $A_3 = 0.105$ 。

2.2 控释肥颗粒之间接触参数标定

2.2.1 试验方法选择

由于控释肥颗粒的球形度高,颗粒与颗粒之间为点接触,颗粒弹性大、接触面积小,如果继续通过碰撞弹跳试验、斜面滑移试验和斜面滚动试验进行标定,实验操作难度高,而且在测定时会存在大量干扰因素,达不到理想目标效果,对试验结果会产生较大影响^[20]。本文通过颗粒堆积角试验方法,以颗粒间接触参数为因素,对比台架试验,以实测堆积角与仿真堆积角的相对误差为指标,进行最陡爬坡试验、二次回归正交旋转组合设计试验,对试验结果优化得到控释肥颗粒之间的仿真接触参数。

2.2.2 堆积试验

目前测量堆积角标定接触参数的典型方法主要

有抽板法、漏斗法和无底圆筒提升法3种^[21]。在进行台架预试验时,发现采用漏斗法试验时,控释肥颗粒弹性大难以堆积,达不到目标效果,若使用抽板法会减小颗粒间碰撞恢复系数对运动的影响^[22]。无底圆筒提升法受到的干扰因素较少,因此本文选用该方法。

圆筒材料由PVC制成,直径为30 mm,高度为100 mm。在地面上水平放置形状尺寸为100 mm × 60 mm的PVC板,将圆筒放置在PVC板上,圆筒中填满控释肥颗粒,并将圆筒上端的颗粒刮平。为使控释肥颗粒在堆积过程中充分扩散且在PVC板上形成无约束颗粒堆,需要缓慢且匀速提升圆筒,速度过快会导致控释肥颗粒难以成堆,速度过慢颗粒扩散不充分,会对试验结果造成较大影响。仿真试验时,在圆筒正上方建立颗粒工厂,生成颗粒落入圆筒内,待圆筒内充满颗粒并稳定时,给圆筒添加向上提升运动,提升速度设置为0.1 m/s。当颗粒群扩散稳定后,颗粒堆斜面与水平PVC板的夹角即为堆积角,堆积台架试验和仿真试验如图9所示。每组台架试验重复5次取平均值,通过水平仪测得堆积角均值为19.80°。

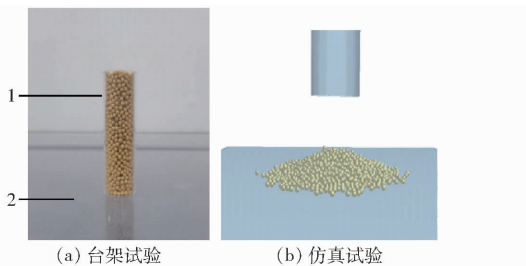


图9 控释肥颗粒堆积试验

Fig.9 Controlled-release fertilizer particle accumulation experiment

1. 无底圆筒 2. PVC板

在控释肥颗粒离散元模型参数标定中,应用EDEM软件中GENERIC EDEM MATERIAL MODEL DATABAS模块^[23],该模块为通用颗粒材料数据库,设置颗粒材料的类型、堆积密度和堆积角度等参数,就可以得到颗粒间的接触参数范围。输入已知的控释肥基本物理参数,可以得到控释肥颗粒间碰撞恢复系数 X_1 、静摩擦因数 X_2 与滚动摩擦因数 X_3 的范围分别为:0.15~0.75、0.20~0.32、0.03~0.20。

2.2.3 最陡爬坡试验

在EDEM仿真试验中,采用已标定的控释肥颗粒与PVC板之间接触参数,选取控释肥颗粒之间碰撞恢复系数 X_1 、静摩擦因数 X_2 和滚动摩擦因数 X_3 作为试验因素,仿真试验堆积角 θ' 与台架试验堆积角 θ 的相对误差 δ 作为试验指标。

利用上述得到的系数范围进行最陡爬坡试验,确定三因素五水平二次正交旋转组合设计试验的零水平及因素水平区间。根据系数范围分成7组试验,最陡爬坡试验方案与结果如表5所示。控释肥颗粒堆积角结果如图10所示,其中,图10中试验1~试验7为最陡爬坡试验仿真结果。

表5 最陡爬坡试验方案与结果

Tab.5 Experiment scheme and results of the steepest climb

序号	因素			$\theta'/(^\circ)$	$\delta/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	0.15	0.20	0.03	10.52	46.87
2	0.25	0.22	0.06	11.27	43.08
3	0.35	0.24	0.09	14.44	27.07
4	0.45	0.26	0.12	20.20	2.02
5	0.55	0.28	0.15	24.60	24.24
6	0.65	0.30	0.18	28.55	44.19
7	0.75	0.32	0.20	29.40	48.48

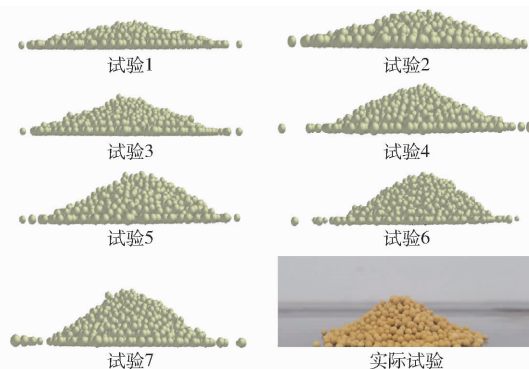


图10 控释肥颗粒堆积角试验结果

Fig.10 Controlled release fertilizer particle stacking angle diagram test results

根据表5可得,堆积角相对误差先减小后增大,第4组堆积角仿真试验与台架试验相对误差最小,即最优值区间在第4组试验附近。因此,分别选用第3组、第4组和第5组试验因素作为二次回归正交旋转组合试验-1,0,1水平。

2.2.4 二次回归正交旋转组合试验

为得到最佳的控释肥颗粒之间的碰撞恢复系数、静摩擦因数与滚动摩擦因数,以最陡爬坡试验得到的因素组合为依据,进行三因素五水平二次正交旋转组合设计试验。以颗粒间碰撞恢复系数 X_1 、静摩擦因数 X_2 和滚动摩擦因数 X_3 为试验因素,以仿真试验堆积角 R_1 为指标,利用Design-Expert 10.0.7软件中central-composite模块对试验数据进行回归分析,利用响应面法寻找最佳参数组合。仿真试验因素编码如表6所示,仿真试验设计方案与结果如表7所示, X'_1 、 X'_2 、 X'_3 为因素编码值。

表 6 仿真试验因素编码

Tab. 6 Simulation experiment factor coding

因素	编码				
	-1.682	-1	0	1	1.682
X_1	0.29	0.35	0.45	0.55	0.61
X_2	0.23	0.24	0.26	0.28	0.29
X_3	0.07	0.09	0.12	0.15	0.17

根据仿真试验得到的数据,应用软件 Design-Expert 10.0.7 对仿真试验结果(表 7)进行多元回归拟合,得到堆积角 R_1 的二次回归方程为

$$R_1 = 9.76 + 2.32X_1 + 1.73X_2 + 4.96X_3 - 1.01X_1X_2 - 2.12X_1X_3 - 1.81X_2X_3 + 0.081X_1^2 + 1.54X_2^2 - 0.037X_3^2 \quad (15)$$

表 7 仿真试验方案与结果

Tab. 7 Simulation experiment scheme and results

序号	试验因素			$R_1 / (^\circ)$
	X'_1	X'_2	X'_3	
1	1	-1	-1	16.34
2	0	0	0	20.62
3	0	0	0	22.51
4	0	1.682	0	27.53
5	0	0	1.682	26.01
6	0	0	0	18.95
7	1.682	0	0	27.23
8	-1	-1	1	25.94
9	-1	1	1	30.80
10	1	-1	1	30.69
11	0	0	-1.682	12.87
12	1	1	-1	24.39
13	0	0	0	17.89
14	-1	-1	-1	10.17
15	-1	1	-1	15.19
16	0	0	0	19.85
17	0	0	0	18.84
18	0	-1.682	0	20.31
19	1	1	1	24.45
20	-1.682	0	0	16.49

式(15)决定系数 $R^2 = 0.9168$, 接近于 1, 表明

回归方程的预测值和实际值的拟合良好,可靠性高,可以使用该模型来预测堆积角。二次回归方程模型的方差分析和显著性检验如表 8 所示。由表 8 可知,该回归模型极显著,模型拟合度 $P < 0.0001$ 。 X_1X_2 对仿真试验堆积角的影响不显著, X_1X_3 、 X_2X_3 对检验结果的影响都显著,表明 3 个因素之间存在交互作用,相关试验因素对响应值的影响不是简单的线性关系,存在二次关系。表中失拟项 $P = 0.2416$, 检验结果不显著,说明无其他影响评价指标的主要因素。仿真堆积角的影响因素由大到小为控释肥颗粒间滚动摩擦因数、碰撞恢复系数和静摩擦因数。

表 8 方差分析

Tab. 8 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	8.18	9	16.89	<0.0001**
X_1	1.25	1	20.45	0.0013**
X_2	0.66	1	11.25	0.0085**
X_3	5.19	1	91.56	<0.0001**
X_1X_2	0.093	1	1.69	0.2012
X_1X_3	0.57	1	12.62	0.0088**
X_2X_3	0.42	1	7.86	0.0189*
X_1^2	0.079	1	2.61	0.2156
X_2^2	0.41	1	0.63	0.0193*
X_3^2	0.031	1		0.4783
残差	0.52	10		
失拟	0.38	5	2.03	0.2416
误差	0.25	5		
总和	8.76	19		

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

根据回归方程分别得到各因素交互作用对仿真堆积角影响的响应曲面,如图 11 所示。

如图 11a 所示,当碰撞恢复系数 X'_1 为零水平时,随着滚动摩擦因数固定,堆积角随着静摩擦因数的增大而增大,且当滚动摩擦因数在高水平时,静摩擦因数对堆积角的影响较为显著。

如图 11b 所示,当静摩擦因数 X'_2 为零水平时,随着碰撞恢复系数固定,堆积角随着滚动摩擦因数

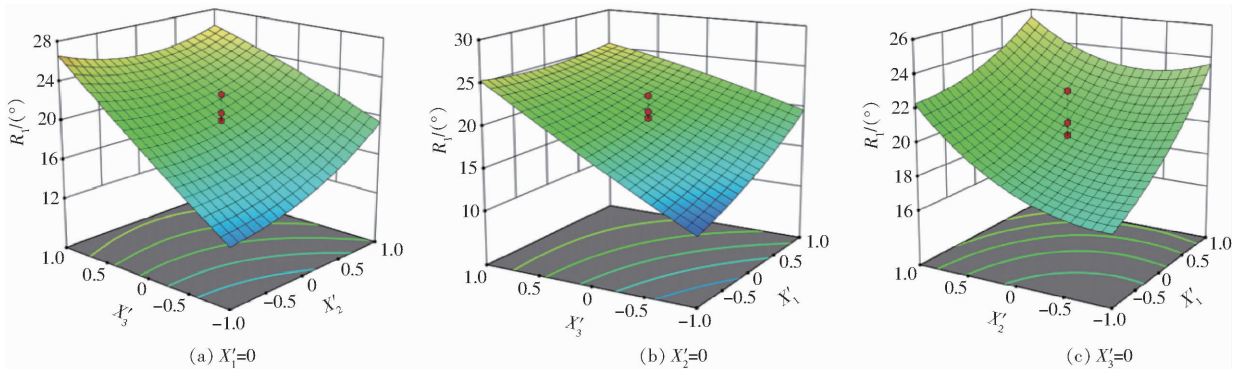


图 11 交互因素对仿真堆积角影响的响应曲面

Fig. 11 Surface views of response interaction factors to simulation stacking angles

的增大而增大,且当碰撞恢复系数在高水平时,滚动摩擦因数对堆积角的影响较为显著。

如图 11c 所示,当滚动摩擦因数 X_3 为零水平时,随着静摩擦因数固定,堆积角随着碰撞恢复系数的增大而增大,且当静摩擦因数在高水平时,碰撞恢复系数对堆积角的影响较为显著。

3 试验验证

3.1 最优参数求解

以堆积角试验得到的实际堆积角 19.80° 为目标响应值,利用 Design-Expert 10.0.7 的优化模块,对回归方程进行求解,分析响应曲面,对回归模型进行寻优,得到优化解。其目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min R_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.25 \leq X_1 \leq 0.65 \\ 0.22 \leq X_2 \leq 0.30 \\ 0.07 \leq X_3 \leq 0.17 \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

得到多组最佳参数,最终从中选取控释肥颗粒间碰撞恢复系数为 0.38、静摩擦因数为 0.25、滚动摩擦因数为 0.09。利用该参数进行仿真堆积角试验,得到堆积角为 19.98° ,与实际堆积角相对误差仅为 0.9%。

3.2 堆积角试验对比验证

将仿真试验堆积角与台架试验堆积角进行对比,结果如表 9 所示。利用无底圆筒提升试验和 EDEM 仿真试验进行验证,试验过程如图 12 所示。圆筒的尺寸规格和试验方法同 2.2.2 节一致,堆积角试验重复 5 次,取平均值为 20.17° 。将所选取的最优参数代入 EDEM 中进行堆积角仿真试验,控释肥颗粒与 PVC 板之间参数选取上文标定值。仿真试验重复 5 次,取平均值为 19.86° ,仿真结果与实测值的相对误差为 1.54%。说明标定后的仿真结果与实际试验结果基本吻合,由此表明通过标定的方法可以找到仿真模型与物理试验控释肥颗粒间在物理特性上的对应关系,标定的控释肥颗粒接触参数可用于离散元仿真试验,为后续仿真模拟提供基础。

表 9 堆积角试验结果对比

Tab.9 Comparison experiment stacking angle results

序号	试验值	仿真值
1	20.12	19.13
2	19.88	19.90
3	18.95	18.75
4	20.56	20.34
5	21.34	21.19
平均值	20.17	19.86

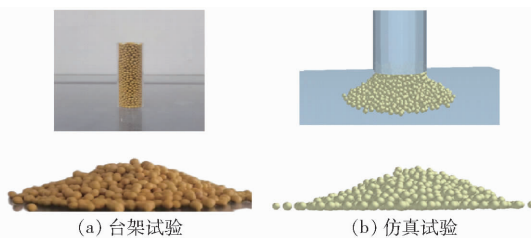


图 12 对比验证试验过程

Fig.12 Comparative validation experiment process diagram

3.3 排肥试验对比验证

以外槽轮式排肥器为试验设备,以排肥量为试验目标,在山东省农业装备智能化工程实验室内进行排肥台架试验,同时结合仿真试验进行对比验证。首先将排肥器和肥箱固定在安装架上,在其下方放置一收集盒,控释肥通过输肥管落入收集盒中;其次在肥箱中加入超过肥箱容积一半的控释肥,排肥器的传动轴由步进电机驱动,设置步进电机转速为 30、40、50、60 r/min 4 个等级;最后开启电源,待排肥稳定后记录排肥结果,试验过程如图 13 所示。在每个转速条件下每组试验重复 5 次,取平均值。排肥器和肥箱的材质均由 PVC 材料构成,在进行排肥仿真时,所有参数选择上述所标定的最优参数,仿真试验的槽轮转速与台架试验保持一致,每组试验重复 5 次,取平均值,试验结果如表 10 所示。在 4 个转速等级下,对比排肥量的实测值和仿真值,每组台架试验与仿真试验排肥量的相对误差分别为 4.38%、4.23%、4.41%、4.36%,试验结果表明仿真条件下排肥量变化情况与真实台架试验条件下基本相同,说明标定后的控释肥颗粒参数可用于离散元仿真中,为后续模拟仿真提供了基础。

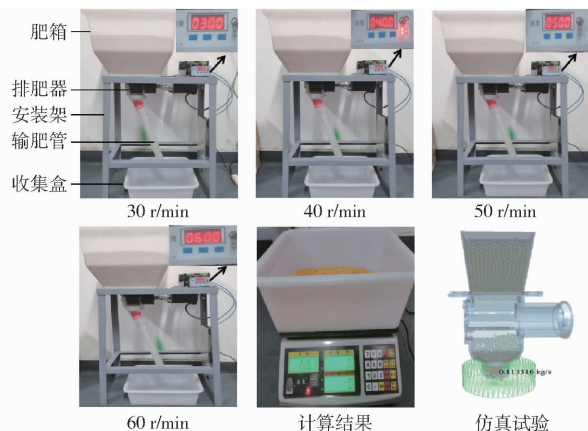


图 13 对比验证试验过程

Fig.13 Comparative validation experiment process diagram

4 结论

(1) 根据测得的控释肥颗粒物理特性参数,在 EDEM 中建立了单个球形仿真结构基础模型,其等效直径为 3.75 mm,质量为 4.39×10^{-5} kg。

表 10 排肥量对比试验结果
Tab. 10 Comparison results of the test fertilizer discharge

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	类别	排肥量/($g \cdot s^{-1}$)					平均值/ ($g \cdot s^{-1}$)	相对误差/ %
		1	2	3	4	5		
30	试验值	50.15	50.23	49.78	49.65	50.11	49.98	4.38
	仿真值	52.86	52.24	51.78	52.46	52.03	52.17	
40	试验值	68.30	67.68	70.24	70.74	69.82	69.36	4.23
	仿真值	72.25	72.16	71.79	72.03	73.24	72.29	
50	试验值	83.42	83.54	84.08	86.82	84.36	84.44	4.41
	仿真值	88.47	88.15	88.91	87.53	87.72	88.16	
60	试验值	100.36	100.57	101.11	100.87	99.97	100.58	4.36
	仿真值	105.33	105.89	104.26	105.12	104.27	104.97	

(2) 通过 EDEM 软件进行控释肥颗粒与 PVC 板之间接触参数标定。结合台架试验, 分别采用碰撞弹跳法、斜面滑动法和斜面滚动法对控释肥颗粒与 PVC 板间的碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数进行了标定, 分别为 0.539、0.507 和 0.105。

(3) 通过堆积角试验方法, 确定最佳的控释肥颗粒间的碰撞恢复系数、静摩擦因数与滚动摩擦因数。以最陡爬坡试验得到的因素组合为依据, 进行三因素五水平二次正交旋转组合设计试验, 以颗粒间碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数为试验因素, 以仿真试验堆积角为指标, 并利用 Design-

Expert 10.0.7 软件 central-composite 模块对试验数据进行回归分析, 通过响应面法寻找最佳数组, 得到控释肥颗粒之间碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数分别为 0.38、0.25 和 0.09。

(4) 通过无底圆筒提升试验与排肥试验, 对所标定的仿真参数进行验证, 分别进行多组试验并取平均值。对比得到的实际试验与仿真试验堆积角, 两者的相对误差为 1.54%; 对比得到的台架试验与仿真试验排肥量, 在 4 种转速下, 相对误差分别为 4.38%、4.23%、4.41%、4.36%, 所得结果进一步验证了离散元仿真的可靠性, 从而为排肥机构设计和优化提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 关瑞, 张民, 诸葛玉平, 等. 控释氮肥一次性基施提高谷子产量和氮素利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 639-646.
GUAN Rui, ZHANG Min, ZHUGE Yuping, et al. Single basal application of controlled release nitrogen fertilizer improve yield and nitrogen use efficiency of foxtail millet[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(4): 639-646. (in Chinese)
- [2] 姚媛媛, 王晓琪, 杨越超, 等. 控释尿素与黄腐酸提高稻麦轮作系统产量和效益的协同效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2122-2132.
YAO Yuanyuan, WANG Xiaoqi, YANG Yuechao, et al. Yield and economic profit synergism of controlled release urea and fulvic acid in rice-wheat rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(12): 2122-2132. (in Chinese)
- [3] 翟彩娇, 崔士友, 张蛟, 等. 缓/控释肥发展现状及在农业生产中的应用前景[J]. 农学学报, 2022, 12(1): 22-27.
ZHAI Caijiao, CUI Shiyu, ZHANG Jiao, et al. Development status of slow/controlled release fertilizers and their application prospects in agricultural production[J]. Journal of Agronomy, 2022, 12(1): 22-27. (in Chinese)
- [4] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1-20. (in Chinese)
- [5] 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 Yangyang, YOU Yong, WANG Decheng, 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)
- [6] 陈涛, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 91-100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91-100. (in Chinese)
- [7] ZHANG Jinxia, CHANG Zhenjia, NIU Fusheng, et al. Simulation and validation of discrete element parameter calibration for fine-grained iron tailings[J]. Minerals, 2022, 13(1): 58-58.
- [8] 郭三琴, 万鹏, 杨俊, 等. 基于离散元的鱼饲料仿真参数标定与试验[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 286-295.
GUO Sanqin, WAN Peng, YANG Jun, et al. Discrete element based calibration and test of simulation parameters for fish feed

- [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 286–295. (in Chinese)
- [9] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105–117.
- [10] 杨摄, 郑明军, 吴文江, 等. 基于离散元的风沙沙粒物理特性参数标定[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(1): 49–57.
YANG She, ZHENG Mingjun, WU Wenjiang, et al. Calibration of physical characteristics of wind sand particles based on discrete element method[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2021, 34(1): 49–57. (in Chinese)
- [11] ZHOU Y C, XU B H, YU A B, et al. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres[J]. Powder Technology, 2002, 125: 45–54.
- [12] 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 Wei, WANG Shaozong, ZHANG Qian, et al. Discrete element parameter calibration of micron sized powder particles based on JKR contact model[J]. Chinese Powder Technology, 2021, 27(6): 60–69. (in Chinese)
- [13] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115–122, 142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115–122, 142. (in Chinese)
- [14] 张宏建, 石绍军, 刘双喜, 等. 不同肥料粒形特征对肥料球度的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 59–66.
ZHANG Hongjian, SHI Shaojun, LIU Shuangxi, et al. Effect of different fertilizer shape characteristics on fertilizer sphericity [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 59–66. (in Chinese)
- [15] 张喜瑞, 胡旭航, 刘俊孝, 等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 121–130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 121–130. (in Chinese)
- [16] 赵佳佳, 韩静, 韩晗, 等. 基于离散元的颗粒肥料与PVC板之间的仿真参数的标定[J]. 农机化研究, 2024, 46(1): 54–58.
ZHAO Jiajia, HAN Jing, HAN Han, et al. Calibration of simulation parameters between granular fertilizer and PVC plate based on discrete elements[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(1): 54–58. (in Chinese)
- [17] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123–132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameter for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123–132. (in Chinese)
- [18] GONZ LEZ-MONTELLANO C, FUENTES J M, AYUGA-TÉLLEZ E, et al. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 553–562.
- [19] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 69–77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 69–77. (in Chinese)
- [20] 张胜伟, 张瑞雨, 陈天佑, 等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 71–79.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CHEN Tianyou, et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71–79. (in Chinese)
- [21] 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): 125–135, 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): 125–135, 142. (in Chinese)
- [22] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73–82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [23] SUN Jingwei, YANG Huawei, LIU Yi, et al. Calibration and model optimization of simulation contact parameters of potassium fertilizer particles based on discrete element method[J]. AMA, 2021, 32(3): 4651–4668.