

玉米秸秆-牛粪混料离散元仿真参数标定与试验

马永财¹ 戚艳¹ 王汉羊¹ 滕达¹ 陈家祺¹ 刘丹²

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学土木水利学院, 大庆 163319)

摘要: 为了提高玉米秸秆与牛粪混料在离散元压缩成型仿真过程中所需参数的准确性, 本文对玉米秸秆-牛粪混料进行参数标定试验, 并采用仿真与物理试验相结合的方式对标定参数的准确性进行验证。通过筛选试验得到对混料离散元有显著影响的参数; 以堆积角为评价指标, 利用 Design-Expert 软件对 3 个显著性影响参数进行最陡爬坡试验设计和 Box - Behnken 试验设计, 并应用粒子群优化算法 (PSO) 进行参数寻优, 得到最优参数组合为: 玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 0.128、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 0.320、牛粪-牛粪 JKR 表面能 0.033 J/m²; 在该参数组合条件下进行仿真试验, 结果表明, 仿真堆积角与实际堆积角相对误差为 1.27%, 单轴压缩仿真试验与物理试验的最大压缩位移相对误差为 2.97%。研究结果可为玉米秸秆-牛粪混料压缩成型离散元仿真提供依据。

关键词: 玉米秸秆-牛粪混料; 参数标定; 离散元; 粒子群优化算法

中图分类号: S216.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0441-10

OSID:



Discrete Element Simulation Parameter Calibration and Experiment of Corn Straw - Cow Manure Mixture

MA Yongcai¹ QI Yan¹ WANG Hanyang¹ TENG Da¹ CHEN Jiaqi¹ LIU Dan²

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. College of Civil and Hydraulic Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of parameters required in the discrete element compression moulding simulation process of corn straw and cow manure blends, a parameter calibration test on corn straw - cow manure mixtures was carried out and the accuracy of the calibrated parameters was verified by using a combination of simulation analysis and physical tests. The parameters with significant influence on the discrete elements of the blends were screened out through the screening test; taking the stacking angle as the evaluation index, the Design-Expert software was used to carry out the steepest-climbing experimental design and the Box - Behnken experimental design for the three parameters with significant influence, and the particle swarm optimisation (PSO) algorithm was applied for the parameter optimization, and the optimal parameter combinations were obtained as follows: corn straw - cow manure rolling friction coefficient was 0.128, cow manure - cow manure rolling friction coefficient was 0.320, and cow manure - cow manure JKR surface energy was 0.033 J/m²; the simulation test was conducted under the conditions of this parameter combination, and the results showed that the relative error between the simulated stacking angle and the actual stacking angle was 1.27%, and the relative error between the uniaxial compression simulation test and the maximum compression displacement in the physical test was 2.97%. The results can provide a reference for the discrete element simulation of compression moulding of corn straw - cow manure mixture.

Key words: corn straw - cow manure mixture; parameter calibration; discrete element; particle swarm optimization algorithm

收稿日期: 2024-07-17 修回日期: 2024-08-10

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2019E073)、黑龙江八一农垦大学“揭榜挂帅”科技攻关项目 (JB20220001) 和黑龙江八一农垦大学学成、引进人才科研启动计划项目 (XYB2015-04、XYB2015-05)

作者简介: 马永财 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱作农业生产机械化关键技术及装备研究, E-mail: myc1631@163.com

0 引言

东北黑土区是我国粮食主产区,随着农业生产和农民生活水平的提高,大量作物秸秆和牲畜粪便等农业废弃物产生的污染问题十分严重^[1]。其中玉米秸秆和牛粪作为重要的生物质资源,经压缩成型后可作为育苗钵使用^[2-3]。但育苗钵成型质量受原料特性以及成型设备性能影响较大,单纯通过试验很难分析其问题关键。目前,生物质压缩成型机理研究多侧重于研究原料致密填充、表面变形与破坏以及塑性变形等方面^[4]。而对微观机理研究多集中在原料粒度对原料受热后分子间连结性的影响,及原料在受到外力挤压下,达到其屈服强度后断裂变形,成为细小颗粒,形成纤维流动状态后物理、生化特性^[5]等。

离散元法是一种能准确描述散体颗粒流动不连续性的数值模拟方法^[6],近年来被广泛应用于农业工程领域。目前国内外已有众多学者利用离散元仿真软件开展相关生物质材料方面的参数标定理论研究。SHAIKH等^[7]使用离散元方法模拟不同含水率下单根履带板与粘土壤地形的相互作用,采用Hertz-Mindlin接触模型对各含水率土壤的参数进行标定,并进行了土槽试验以验证仿真准确性。王斌斌等^[8]选择Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion (EEPA)模型,以单轴密闭压缩轴向应变20%、50%对应的轴向压力为目标值,利用单轴密闭压缩和仿真试验对草炭参数进行标定。WANG等^[9]采用Hertz-Mindlin模型对小麦粉碎过程中接触参数进行标定,随后以小麦籽粒黏结模型临界载荷为响应值,生成临界载荷回归方程,将标定参数代入EDEM模型进行计算,计算值与观测值相对误差为1.6%。ZENG等^[10]基于Hertz-Mindlin with bonding V2模型建立了包衣棉籽与土壤压缩仿真模型,以峰值压缩力为响应值,采用物理试验与仿真试验相结合的方法,对包衣棉籽与土壤仿真模型的接触参数进行标定。赵智豪等^[11]选择Hertz-Mindlin with JKR Cohesion (JKR)模型和Hertz-Mindlin模型分别对土壤和水稻前茬进行离散元仿真参数标定,并采用直剪试验和旋耕试验对标定参数进行验证。现有基于离散元法的参数标定研究多为解决收获^[12]、播种^[13]、触土部件优化^[14]、机械施肥^[15]、秸秆还田和粉碎^[16]等过程中存在仿真参数准确性较低的问题,针对基于成型的混料基质离散元仿真参数标定研究较少。对目标值进行寻优操作多依靠设计软件Design-Expert,存在多组参数均能导致相同宏观响应结果的问题^[17]。

本文以玉米秸秆-牛粪混料为研究对象,分别对玉米秸秆与牛粪的本征参数和接触参数进行测定,采用EDEM离散元软件对玉米秸秆-牛粪混料进行参数标定,并利用粒子群优化算法(PSO)对参数进行寻优,通过堆积角物理试验和单轴压缩试验验证标定参数的可靠性,以期为基于离散元法的玉米秸秆-牛粪混料压缩成型仿真模拟提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

研究对象为玉米秸秆-牛粪混料,玉米秸秆取自黑龙江八一农垦大学试验田,经DLF-20型粉碎机粉碎后放置于恒温干燥箱中,设置干燥温度105℃,干燥至恒质量。并利用GB/T 6003.1—2012标准检验筛将玉米秸秆过筛分级处理,筛选出粒径为0~9 mm的秸秆储存备用。牛粪购自于山东省肥沃农资有限公司的腐熟牛粪,经干燥箱干燥至恒质量后,使用不同粒径检验筛进行筛分,牛粪粒径为0~2 mm。根据后续压缩成型试验所需对玉米秸秆与牛粪原料质量进行混合配制,并通过

$$m_s = \frac{m_0}{1 - \omega_1} (\omega_1 - \omega_0) \quad (1)$$

式中 m_s ——配置样品加水量,kg
 m_0 ——样品质量,kg
 ω_0 ——物料原始含水率,%
 ω_1 ——物料目标含水率,%

对原料含水率进行调节^[18],调节后物料含水率为12%,试验样品如图1所示。

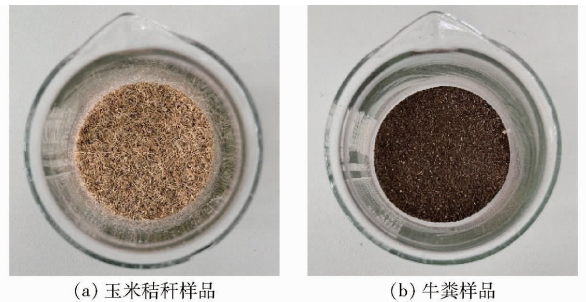


图1 样品实物图

Fig. 1 Sample physical pictures

1.2 物料本征参数测定

1.2.1 密度

随机选取20 g玉米秸秆和230 g牛粪样品,采用振动筛分法^[8]对玉米秸秆和牛粪进行筛分,分析其粒径分布。其中,牛粪粒径为0~2 mm约占92.8%,玉米秸秆粒径分布如表1所示。考虑粉碎后玉米秸秆颗粒尺寸不一且间隙较大,因此采用粉碎法^[19]对玉米秸秆密度进行测量。玉米秸秆经高速粉碎机(1 000 r/min)粉碎后过200目筛,采用电

子天平(精度 0.1 mg)和量筒(分度值 0.2 mL,量程 10 mL)分别测量质量和体积,计算得玉米秸秆密度。重复 10 次试验取均值,最终得到玉米秸秆密度 342.86 kg/m^3 。

表 1 玉米秸秆粒径分布

Tab. 1 Grain size distribution of corn stalks

粒径/mm	分布百分比/%
[0,3]	8.8
(3,6]	52.3
(6,9]	36.7
>9	2.2

牛粪密度参考文献[20],采用环刀法进行测量。用环刀(容积 200 cm^3)对牛粪样品进行采样后称量,对牛粪密度进行计算,重复 10 次试验后得到牛粪平均密度 1351.35 kg/m^3 。

1.2.2 剪切模量和泊松比

由于玉米秸秆颗粒尺寸较小且粒度不均,试验较难测得粉碎后秸秆剪切模量与泊松比,因此参照文献[21-25],确定玉米秸秆泊松比与剪切模量分别为 0.35 、 $2.4 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。牛粪剪切模量是指牛粪抵抗剪切应变的能力,目前通过试验难以对剪切模量进行精准测量,多通过牛粪泊松比与弹性模量近似求得,因此在预试验的基础上参照文献[26-27],确定牛粪剪切模量为 $5.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

牛粪泊松比参考土壤泊松比测试方法^[28],采用直剪试验得到牛粪抗剪强度曲线如图 2 所示,将数据输入到 Origin 中进行拟合,牛粪抗剪强度计算式为

$$\tau = c + \tan\varphi \quad (2)$$

式中 τ ——牛粪抗剪强度, kPa

c ——牛粪内聚力, kPa

φ ——牛粪内摩擦角, ($^\circ$)

$\tan\varphi$ ——牛粪内摩擦因数

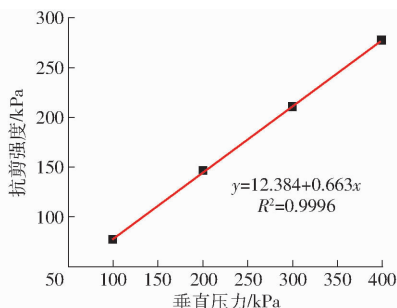


图 2 牛粪抗剪强度曲线

Fig. 2 Shear strength curve of cow manure

牛粪泊松比计算式为

$$\mu_c = \frac{K_c}{1 + K_c} \quad (3)$$

其中 $K_c = 1 - \sin\varphi$ (4)

式中 μ_c ——牛粪泊松比

K_c ——牛粪侧向压力系数

由图 2 和式(2)可得牛粪基本物理参数如表 2 所示,由式(3)、(4)可得牛粪泊松比为 0.31。

表 2 牛粪基本物理参数

Tab. 2 Basic physical parameters of cow manure

参数	内聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	内摩擦因数
数值	12.384	33.53	0.663

1.3 物料接触参数测定

采用斜面法^[15]测得物料与钢板间静摩擦因数、物料与物料间静摩擦因数,采用斜面滚动法^[15]测得物料与钢板间滚动摩擦因数、物料与物料间滚动摩擦因数,采用自由落体法^[29]测得碰撞恢复系数。

1.3.1 静摩擦因数

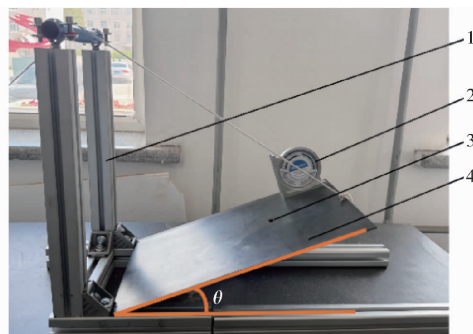
静摩擦因数试验装置如图 3 所示,测量物料与钢板间静摩擦因数时,将待测样品和角度测量仪(江苏云利恒电子商务有限公司,量程 $2 \times 90^\circ$,精度 $\pm 0.1^\circ$)放置在钢板($431 \text{ mm} \times 282 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$)上,钢板初始角度为 0° ,缓慢提升钢板直至待测样品有滑动趋势时停止操作,此时记录角度测量仪读数 θ ,重复 10 次试验取均值,静摩擦因数计算式为

$$f_s = \tan\theta \quad (5)$$

式中 f_s ——静摩擦因数

θ ——斜面与水平面夹角, ($^\circ$)

测量物料与物料间静摩擦因数时,分别制作玉米秸秆种群板与牛粪种群板,将玉米秸秆种群板放置于钢板上,待测样品放置于玉米秸秆种群



(a) 试验装置



(b) 玉米秸秆种群板



(c) 牛粪种群板

图 3 静摩擦因数测量试验装置

Fig. 3 Static friction coefficient test devices

1. 支架 2. 角度测量仪 3. 待测样品 4. 钢板

板上,重复上述操作,分别测得玉米秸秆-玉米秸秆静摩擦因数以及玉米秸秆-牛粪静摩擦因数。同理,将牛粪种群板放置在钢板上可测得牛粪-牛粪间静摩擦因数。

1.3.2 滚动摩擦因数

滚动摩擦因数试验装置如图4所示,由倾斜钢板、水平钢板、钢尺、角度测量仪和支架组成。在预试验基础上,选取 $\alpha = 30^\circ$ 时测试滚动摩擦因数。测试物料与钢板间滚动摩擦因数时,将待测样品放置于距离倾斜钢板底部200 mm位置上,以初速度为零向下自由滚动至停止,水平滚动距离为 d 。根据能量守恒定律可得滚动摩擦因数计算式为

$$f_k = \frac{L \sin \alpha}{L \cos \alpha + d} \quad (6)$$

式中 f_k ——滚动摩擦因数

L ——物料与倾斜钢板底部距离,mm

α ——钢板倾斜角, ($^\circ$)

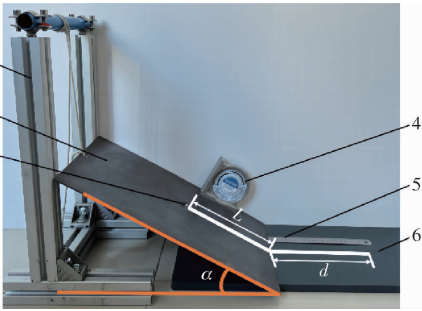


图4 滚动摩擦因数测量试验装置

Fig.4 Rolling friction coefficient measurement test device

1. 支架
2. 倾斜钢板
3. 待测样品
4. 角度测量仪
5. 钢尺
6. 水平钢板

重复10次试验取平均值。同理,测试物料与物料间滚动摩擦因数时,将种群板放置于倾斜钢板与水平钢板上,重复上述操作,可测得玉米秸秆-玉米秸秆滚动摩擦因数、玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数和牛粪-牛粪滚动摩擦因数。

1.3.3 碰撞恢复系数

通过自由落体法测得玉米秸秆、牛粪和钢材各自及相互间的碰撞恢复系数,试验装置如图5所示。选用玉米秸秆种群板、牛粪种群板或钢板作为碰撞板,将玉米秸秆或预制牛粪颗粒在距碰撞板250 mm处自由落体,采用高速摄像机记录待测样品接触碰撞板后反弹高度 H_2 ,重复10次试验取均值,可得到玉米秸秆-钢材间碰撞恢复系数、玉米秸秆-牛粪间碰撞恢复系数、玉米秸秆-玉米秸秆间碰撞恢复系数、牛粪-牛粪间碰撞恢复系数和牛粪-钢材间碰撞恢复系数,计算式为

$$e = \frac{v_y}{v} = \frac{\sqrt{2gH_1}}{\sqrt{2gH_2}} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \quad (7)$$

式中 e ——碰撞恢复系数

v_y ——物料碰撞后径向速度,mm/s

v ——物料碰触后速度,mm/s

H_1 ——物料自由落体初始高度,mm



图5 碰撞恢复系数测量试验装置

Fig.5 Collision recovery coefficient measurement test device

1. 钢板
2. 计算机
3. 高速摄像机
4. 钢尺
5. 光源

1.4 试验方法

玉米秸秆-牛粪混料实际堆积角由圆筒提升法测定;在此基础上,以堆积角为目标值,利用离散元软件 EDEM 对混料进行离散元仿真模拟。使用试验设计软件 Design-Expert,通过 Plackett - Burman 试验筛选出对玉米秸秆-牛粪混料离散元有显著影响的参数;并对显著性影响参数进行最陡爬坡试验设计和 Box - Behnken 试验设计,利用粒子群优化算法 (PSO) 得到显著性影响参数最优解;最后,在标定参数下进行玉米秸秆-牛粪混料仿真堆积角试验以及单轴压缩试验,验证其标定参数准确性。

1.5 PSO 算法

粒子群优化算法 (PSO) 模拟了自然界中鸟类捕食行为^[30]。算法将食物位置类比为优化问题的最优解集,将鸟类飞行方向与位置类比为粒子速度和位置。粒子群中每一个粒子都表示一个解,并且每个粒子都会通过目标函数得出对应的适应度,该适应度可以根据目标问题来评估解的性能。该算法具有搜索效率高、收敛速度快以及操作简单等优点,算法流程如图6所示。

2 接触参数标定

2.1 堆积角物理试验

采用圆筒提升法^[31]对玉米秸秆-牛粪混料堆积角进行测定。试验装置如图7所示,由 WDW - 200 型万能试验机、钢制圆筒(内径34 mm,高80 mm)、钢制圆板(半径70 mm)组成。试验时,圆筒内装填玉米秸秆-牛粪混料32 g,使用万能试验机将圆筒以速度500 mm/s 匀速提升,混料经圆筒底部

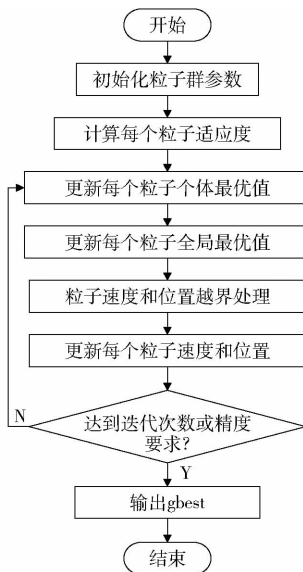


图 6 粒子群算法流程图

Fig. 6 Flowchart of particle swarm optimization



图 7 堆积角物理试验

Fig. 7 Physical test of repose angle

1. 万能试验机 2. 钢制圆筒 3. 混料堆 4. 钢制圆板

入圆板,试验结束后,静置 10 min 待颗粒堆稳定后,使用电子数显水平尺测量堆积角,试验重复 10 次取平均值,得到玉米秸秆-牛粪混料堆积角为 38.13° 。

2.2 堆积角仿真试验

2.2.1 接触模型选取

由于玉米秸秆中含有木质素,压缩成型时,模具内温度会随着内摩擦力增加逐渐上升,使木质素发生软化,为纤维颗粒团聚提供粘聚力^[32]。牛粪力学属性与土壤、肥料等散体颗粒类物质相似,流动性差且具有一定含水率,因此颗粒之间会存在粘附现象^[27]。在此基础上,考虑湿颗粒间粘结作用对颗粒运动的影响,采用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion (JKR) 接触模型对玉米秸秆-牛粪混料进行离散元参数标定试验。该模型利用表面能来表示颗粒间相互作用,更好地模拟湿颗粒或具有粘性颗粒间力学特性^[33]。

2.2.2 仿真模型建立

仿真过程中,颗粒尺寸和几何模型对仿真结果影响较大。结合前文 1.1 节对玉米秸秆和牛粪进行

分级筛分,得到玉米秸秆和牛粪粒径分布范围。根据表 1 分别建立粒径为 4.5 mm 和 7.5 mm 的玉米秸秆颗粒模型,其中 4.5 mm 秸秆颗粒和 7.5 mm 秸秆颗粒分别占秸秆总生成量 59.2% 和 40.8%,在 EDEM 中设置玉米秸秆为刚性体。建立粒径为 1 mm 的牛粪颗粒模型,玉米秸秆和牛粪颗粒模型如图 8 所示。将钢筒几何模型输入到 EDEM 中,材料属性设置为钢。设置钢材泊松比、密度和剪切模量分别为 0.30、7 800 kg/m³、 8.0×10^{10} Pa^[33-34],接触参数由前文 1.3 节测得,如表 3 所示。

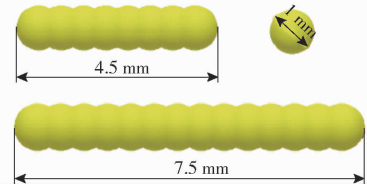


图 8 玉米秸秆和牛粪离散元颗粒模型

Fig. 8 Discrete element particle model of corn stalk and cow manure

表 3 玉米秸秆-牛粪混料堆积角仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters of stacking angle of corn straw - cow manure mixture

参数	数值
玉米秸秆-玉米秸秆恢复系数	0.396
玉米秸秆-玉米秸秆静摩擦因数	0.519
玉米秸秆-玉米秸秆滚动摩擦因数	0.088
玉米秸秆-钢材恢复系数	0.404
玉米秸秆-钢材静摩擦因数	0.325
玉米秸秆-钢材滚动摩擦因数	0.173
玉米秸秆-牛粪恢复系数 X_1	0.184 ~ 0.540
玉米秸秆-牛粪静摩擦因数 X_2	0.333 ~ 0.673
玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 X_3	0.050 ~ 0.250
牛粪-牛粪恢复系数 X_4	0.100 ~ 0.540
牛粪-牛粪静摩擦因数 X_5	0.532 ~ 0.838
牛粪-牛粪滚动摩擦因数 X_6	0.310 ~ 0.550
牛粪-钢材恢复系数	0.435
牛粪-钢材静摩擦因数 X_7	0.577 ~ 0.727
牛粪-钢材滚动摩擦因数 X_8	0.124 ~ 0.430
玉米秸秆-牛粪 JKR 表面能 $X_9 / (\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	0.01 ~ 0.07
牛粪-牛粪 JKR 表面能 $X_{10} / (\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	0.02 ~ 0.08

在 EDEM 软件中,在钢筒内设置 2 个颗粒工厂,分别生成玉米秸秆颗粒与牛粪颗粒。玉米秸秆颗粒生成总质量为 2.56 g,生成速度为 4 g/s;牛粪颗粒生成总质量设为 29.44 g,生成速度为 46 g/s。仿真时间设为 12.0 s,仿真步长为 0.01 s,设定玉米秸秆-牛粪颗粒以自由落体运动从圆筒底部流出,重力加速度为 9.81 m/s^2 。为保证玉米秸秆和牛粪颗粒能够充分混合,参照文献[32],经过大量仿真预试验,在颗粒生成后设置圆筒转速为 50 r/min,待颗粒混合均匀后,圆筒以速度 0.5 m/s

匀速提升。运用 EDEM 后处理 Clipping 模块在颗粒堆垂面处设置 Clipping Planes Group 截面,利用 Tools 模块中量角器工具 Protractor,分别在颗粒堆截面底面、夹角和斜边上选定 3 个点,这 3 个点构成的角度作为堆积角 R ,堆积角测量以及仿真几何模型如图 9 所示。

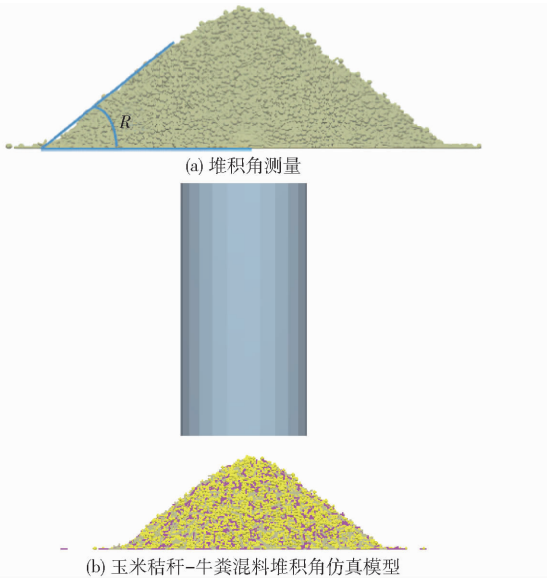


图 9 圆筒提升法仿真

Fig. 9 Simulation of cylinder lifting method

3 结果与分析

3.1 Plackett - Burman 试验与显著性分析

为考察各影响因素与响应值之间关系,应用 Design-Expert 软件设计 Plackett - Burman 筛选试验,通过比较各影响因素 2 水平间的差异性来确定因素的显著性。试验以玉米秸秆-牛粪混料堆积角为响应值,试验因素编码如表 4 所示,试验设计与结果如表 5 所示。其中 $x_1 \sim x_{10}$ 为因素编码值,方差分析结果见表 6。从表 6 可看出,对玉米秸秆-牛粪混料堆积角具有显著性影响的参数分别为 x_3 、 x_6 和 x_{10} 。这 3 个参数的 P 值均小于 0.05,贡献度合计 91.35%。因此,结合参数显著性及贡献度,选取玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 X_3 、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 X_6 、牛粪-牛粪 JKR 表面能 X_{10} 进行后续最陡爬坡试验。

3.2 最陡爬坡试验设计

为确定显著性参数玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 X_3 、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 X_6 和牛粪-牛粪 JKR 表面能 X_{10} 的最优值,将其余参数设置为中间水平值,设计最陡爬坡试验如表 7 所示。根据试验结果可以看出,堆积角随着 X_3 、 X_6 、 X_{10} 的增加逐渐增大,呈正相关,其相对误差呈先降低后增加的趋势。当

表 4 Plackett - Burman 试验因素与编码

Tab. 4 Plackett - Burman test factors and codes

因素	编码		
	-1	0	1
玉米秸秆-牛粪恢复系数 X_1	0.184	0.362	0.540
玉米秸秆-牛粪静摩擦因数 X_2	0.333	0.503	0.673
玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 X_3	0.050	0.150	0.250
牛粪-牛粪恢复系数 X_4	0.100	0.320	0.540
牛粪-牛粪静摩擦因数 X_5	0.532	0.685	0.838
牛粪-牛粪滚动摩擦因数 X_6	0.310	0.430	0.550
牛粪-钢材静摩擦因数 X_7	0.577	0.652	0.727
牛粪-钢材滚动摩擦因数 X_8	0.124	0.277	0.430
玉米秸秆-牛粪 JKR 表面能 $X_9/(J \cdot m^{-2})$	0.010	0.040	0.070
牛粪-牛粪 JKR 表面能 $X_{10}/(J \cdot m^{-2})$	0.020	0.050	0.080

表 5 Plackett - Burman 试验设计与结果

Tab. 5 Plackett - Burman test design and results

试验序号	因素										堆积角/ ($^{\circ}$)
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	43.06
2	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	32.97
3	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	39.24
4	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	42.21
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	43.72
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	30.01
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	36.43
8	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	39.88
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	40.13
10	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	34.44
11	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	45.81
12	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	40.89

表 6 方差分析

Tab. 6 ANOVA result

参数	效应	F	P	贡献度/%	显著性顺序
x_1	1.29	72.16	0.075	2.03	6
x_2	1.51	98.90	0.064	2.78	5
x_3	2.29	228.31	0.042*	6.41	3
x_4	1.66	120.03	0.058	3.37	4
x_5	-0.38	6.33	0.241	0.18	7
x_6	6.51	1 841.45	0.015*	51.73	1
x_7	0.10	0.39	0.644	0.01	10
x_8	0.36	5.48	0.257	0.15	8
x_9	-0.28	3.37	0.318	0.09	9
x_{10}	5.22	1 182.30	0.019*	33.21	2

注: * 表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.005$), 下同。

X_3 、 X_6 、 X_{10} 分别取 0.10、0.37、0.04 J/m^2 时,仿真堆积角与实际堆积角相对误差最小,为 3.99%。在 Box - Behnken 试验中,将玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 0.10、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 0.37 和牛粪-牛粪 JKR 表面能 0.04 J/m^2 作为响应面试验设计中心水平,设计三因素三水平正交试验设计。

表 7 最陡爬坡试验设计及结果

Tab.7 Test design and results of the steepest climb

序号	x_3	x_6	$X_{10}/$ ($J \cdot m^{-2}$)	堆积角/ ($^{\circ}$)	相对误差/ %
1	0.05	0.31	0.03	35.98	5.64
2	0.10	0.37	0.04	39.65	3.99
3	0.15	0.43	0.05	41.70	9.36
4	0.20	0.49	0.06	48.24	26.51
5	0.25	0.55	0.07	50.01	31.16

3.3 Box - Behnken 试验设计

应用 Design-Expert 软件进行 Box - Behnken 试验设计。得到 x_3 、 x_6 、 x_{10} 与目标值堆积角的二次回归模型。试验因素编码如表 8 所示,试验设计及结果见表 9。

表 8 BBD 试验因素编码

Tab.8 BBD test factors and levels coding

编码	因素		
	x_3	x_6	$X_{10}/(J \cdot m^{-2})$
-1	0.07	0.32	0.032
0	0.10	0.37	0.040
1	0.13	0.42	0.048

表 9 BBD 试验设计及结果

Tab.9 BBD experimental design and results

试验 序号	因素			堆积角 $Y/(^{\circ})$
	x_3	x_6	x_{10}	
1	0	-1	-1	39.57
2	1	0	1	37.12
3	-1	-1	0	35.94
4	0	0	0	37.35
5	1	0	-1	39.24
6	0	-1	1	41.91
7	0	0	0	37.96
8	1	1	0	42.52
9	0	0	0	37.23
10	0	1	-1	41.35
11	-1	0	-1	39.46
12	-1	0	1	38.31
13	-1	1	0	39.74
14	1	-1	0	38.53
15	0	1	1	43.44
16	0	0	0	37.59
17	0	0	0	38.02

3.3.1 回归模型

通过对试验结果进行多元回归拟合分析,获得玉米秸秆-牛粪混料堆积角与 3 个显著性参数的二阶回归模型,其回归方程为

$$Y = 37.41 - 0.045x_3 + 3.71x_6 + 1.13x_{10} + 0.645x_3x_6 + 0.685x_3x_{10} + 0.6875x_6x_{10} - 1.34x_3^2 + 0.7147x_6^2 - 0.3052x_{10}^2 \quad (8)$$

试验回归模型方差分析如表 10 所示。回归模型极显著 ($P < 0.0001$); 决定系数 R^2 为 0.9879, 趋近于 1, 表示回归方程拟合程度较好; 交互项 x_3x_6 、 x_3x_{10} 、 x_6x_{10} 对堆积角影响显著 ($P < 0.05$); 变异系数为 1.32%, 表示该试验具有较高可靠性; 精确度为 29.32, 说明该试验精确度较高。

表 10 回归模型方差分析

Tab.10 Analysis of variance of regression model

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	135.81	9	15.09	63.40	<0.0001**
x_3	0.0612	1	0.0162	0.0681	0.8017
x_6	110.34	1	110.34	463.59	<0.0001**
x_{10}	10.19	1	10.19	42.83	0.0003**
x_3x_6	1.66	1	1.66	6.99	0.0332*
x_3x_{10}	1.88	1	1.88	7.89	0.0262*
x_6x_{10}	1.89	1	1.89	7.94	0.0258*
x_3^2	7.59	1	7.59	31.90	0.0008**
x_6^2	2.15	1	2.15	9.04	0.0198*
x_{10}^2	0.3923	1	0.3923	1.65	0.2400
残差	1.67	7	0.2380		
失拟项	1.24	3	0.4133	3.88	0.1116
误差	0.4261	4	0.1065		
总和	137.47	16			

注: ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

3.3.2 回归模型交互效应

扰动图如图 10 所示, 因素 x_3 、 x_6 、 x_{10} 在所选水平范围内, 堆积角的变化趋势存在一定差异, 随着 x_6 的增加, 堆积角迅速上升, 斜率较大; 随着 x_{10} 的增加, 堆积角也呈增加趋势; 相反随着 x_3 的增加, 堆积角先升高后降低。

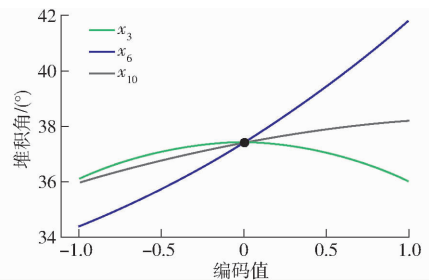


图 10 扰动图

Fig.10 Perturbation diagram

在回归方程基础上, 建立了模型响应面和等高线如图 11 所示。由图 11a 可知, 当 X_3 在低水平时, 响应值随着 X_6 的增加快速升高, 当 X_3 在高水平时, 相比于在低水平, 响应值随 X_6 增加而升高的速率更快; 当 X_6 分别在低水平和高水平时, 随着 X_3 增加, 响应值呈先升高后降低趋势, 且靠近 X_6 一侧曲面坡度较陡, 说明 X_6 对堆积角影响大于 X_3 。

由图 11b 可知, X_6 一定时, 当 X_3 在不同水平时, 响应值随着 X_{10} 的增加而升高, 呈正相关; 当 X_{10} 维持

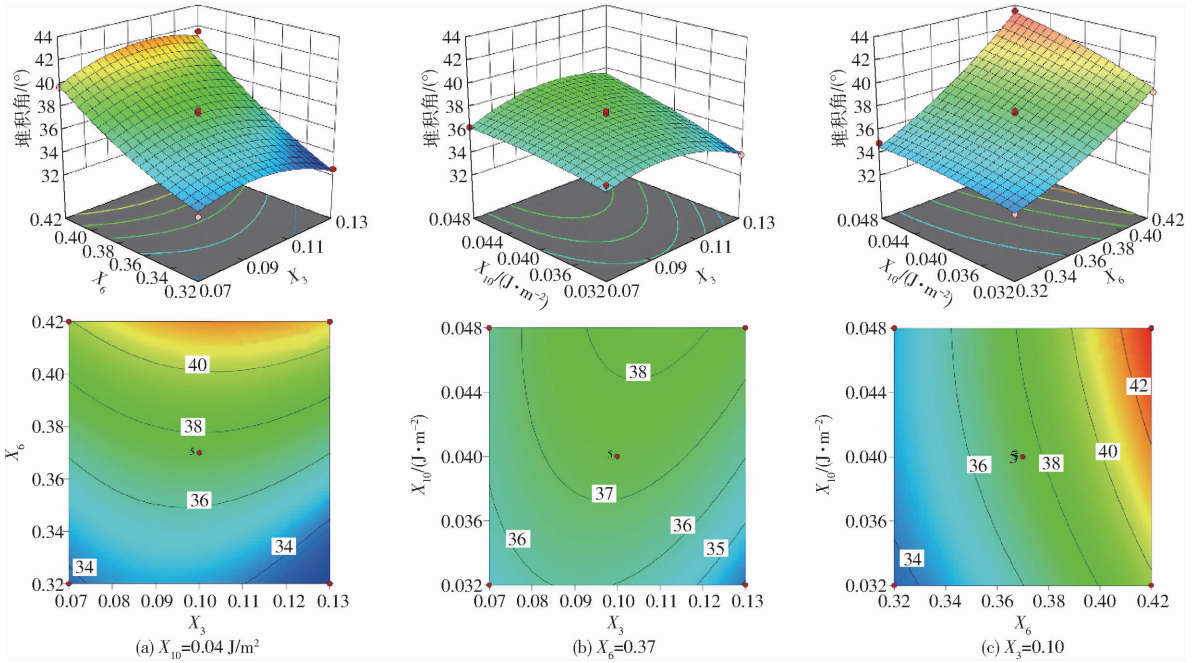


图 11 交互项响应面及等高线图

Fig. 11 Interaction terms response surfaces and contour maps

在不同水平时,曲面坡度随 X_3 增加呈先增加后平缓降低趋势。等高线呈半椭圆形且在 X_{10} 附近较密集,说明 X_{10} 对堆积角影响大于 X_3 。

由图 11c 可知,当 X_3 值一定时, X_6 和 X_{10} 交互曲面随 X_6 的增加呈急剧上升状态;当 X_6 在低水平时,响应值随 X_{10} 的增加变化并不明显,当 X_6 在高水平时,响应值随着 X_{10} 的增加快速升高,且靠近因素 X_6 一侧曲面坡度较陡,说明 X_6 对堆积角的影响大于 X_{10} 。由以上对回归模型交互效应进行分析可知,两因素交互项对响应值堆积角的影响程度均达到显著性水平 ($P < 0.05$),显著性由大到小为 $X_6 X_{10}$ 、 $X_3 X_{10}$ 、 $X_3 X_6$,表明因素间的交互作用对堆积角均有一定程度影响。

3.4 基于 PSO 算法的参数优化与模型验证

3.4.1 目标函数及约束条件

在 Matlab 软件中应用 PSO 算法以物理堆积角 38.13° 为目标值进行参数寻优。由 3.3 节得到堆积角与玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 X_3 、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 X_6 、牛粪-牛粪 JKR 表面能 X_{10} 之间的函数关系。将优化问题简化为

$$\begin{cases} \min_{X_3, X_6, X_{10}} e = \text{abs}(Y - 38.13) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.07 \leq X_3 \leq 0.13 \\ 0.32 \leq X_6 \leq 0.42 \\ 0.032 \text{ J/m}^2 \leq X_{10} \leq 0.048 \text{ J/m}^2 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

根据式 (8) 利用 PSO 算法进行优化设计,参数配置如表 11 所示。经过 200 次迭代后,得到 Y 趋近于 38.13° 时, $(X_3, X_6, X_{10}) = (0.128, 0.320,$

表 11 PSO 算法参数配置

Tab. 11 PSO algorithm parameter configuration

参数	种群大小	迭代次数	自我学习因子	社会学习因子
数值	100	200	1.5	1.5

0.033 J/m^2), 即最优解为:玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 0.128、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 0.320、牛粪-牛粪 JKR 表面能 0.033 J/m^2 。

3.4.2 堆积角验证试验

在 EDEM 中设置上述最优参数,其余接触参数取中间水平,玉米秸秆-牛粪混料堆积角离散元仿真如图 12 所示,重复 3 次,得到堆积角 37.87° 、 39.23° 、 38.75° ,取平均值 38.61° ,与实际堆积角相对误差为 1.27%。结果表明,模型标定的玉米秸秆-牛粪混料接触参数具有可靠性。

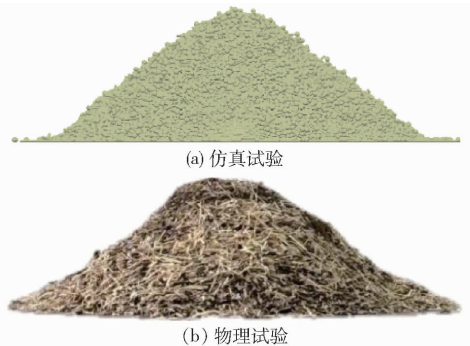


图 12 堆积角物理试验与仿真试验对比

Fig. 12 Comparison of physical test and simulation test of stacking angle

3.4.3 单轴压缩成型验证试验

为了进一步验证标定参数可靠性,进行玉米秸

秆-牛粪混料单轴压缩仿真试验与物理试验如图 13 所示。仿真试验中颗粒生成质量以及压杆下降速度均与实际单轴压缩试验条件相同,仿真试验结束后通过后处理模块导出运动过程中压力数据。使用 Origin 软件将仿真试验力位移曲线与实际单轴压缩试验力位移曲线进行拟合对比,如图 14 所示,两曲线拟合决定系数 R^2 为 0.962 9,说明拟合程度较好。其中仿真试验得到的最大压缩位移 29.07 mm,较实际单轴压缩试验的最大压缩位移 29.96 mm 的相对误差为 2.97%。综上所述,本文标定的玉米秸秆-牛粪混料接触参数可用于构建其离散元压缩成型仿真模型。

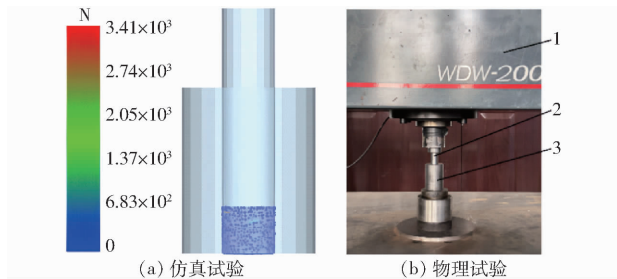


图 13 单轴压缩仿真试验与物理试验

Fig. 13 Uniaxial compression simulation test and physical test

1. 万能试验机 2. 压杆 3. 模孔

4 结论

(1) 应用离散元仿真软件 EDEM, 选取 JKR 接

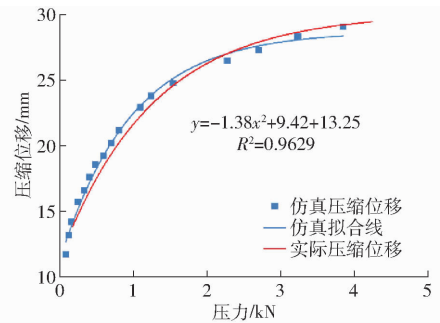


图 14 压缩位移对比

Fig. 14 Compression displacement correlation

触模型对玉米秸秆-牛粪混料进行离散元参数标定。

(2) 以堆积角为响应值,通过 Plackett - Burman 试验筛选出对堆积角有显著性影响的参数:玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 X_3 、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 X_6 、牛粪-牛粪 JKR 表面能 X_{10} ;在此基础上,通过最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验确定各显著参数的最佳取值范围以及堆积角与显著性影响参数的二次回归模型,并对模型进行方差分析以及交互效应分析。

(3) 利用粒子群优化算法以实际堆积角 38.13° 为目标进行显著性参数寻优,得到最优参数组合为:玉米秸秆-牛粪滚动摩擦因数 0.128、牛粪-牛粪滚动摩擦因数 0.320、牛粪-牛粪 JKR 表面能 0.033 J/m^2 。在最优参数组合下进行仿真堆积角试验,与实际物理堆积角相对误差为 1.27%,单轴压缩仿真试验与物理试验的最大压缩位移相对误差为 2.97%。

参 考 文 献

- [1] 姜延,李思达,马秀兰,等. 东北黑土区农业废弃物资源化利用研究进展[J]. 吉林农业大学学报,2022,44(6):706-716. JIANG Yan, LI Sida, MA Xiulan, et al. Research progress of agricultural waste resource utilization in the black soil region of northeast China[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2022, 44(6):706-716. (in Chinese)
- [2] 滕达. 水稻秸秆与牛粪混配育苗钵成型及表层炭化试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2023. TENG Da. Study on the molding and surface carbonization of rice straw and cow manure [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [3] MA Yongcai, QIU Shiting, LI Jun, et al. Parameter optimization of a potted seedling tray prepared from a mixture of rice straw and fermented cow manure using the response surface methodology[J]. ACS Omega, 2021, 6(39):25235-25245.
- [4] OBI O E, MONG O O, NLEONU E C, et al. Determination of combustion characteristics of densified biomass fuels from agricultural and domestic wastes[J]. Journal of Energy Research and Reviews, 2023, 15(2):26-34.
- [5] 张建超,德雪红,李震,等. 生物质固化成型机理及设备的研究现状[J]. 林产工业, 2020, 57(12):45-49. ZHANG Jianchao, DE Xuehong, LI Zhen, et al. Current status of research on biomass curing mechanism and equipment[J]. China Forest Products Industry, 2020, 57(12):45-49. (in Chinese)
- [6] FU J, CUI Z, CHEN Y, et al. Simulation and experiment of compression molding behavior of substrate block suitable for mechanical transplanting based on discrete element method (DEM)[J]. Agriculture, 2023, 13(4):883.
- [7] SHAIKH S A, LI Y, MA Z, et al. Discrete element method (DEM) simulation of single grouser shoe-soil interaction at varied moisture contents[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191:106538.
- [8] 王斌斌,何智,丁辛亭,等. 基于单轴密闭压缩试验的草炭离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5):87-97. WANG Binbin, HE Zhi, DING Xinting, et al. Calibration of peat discrete element parameters based on uniaxial closed compression test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5):87-97. (in Chinese)
- [9] WANG X, WU W, JIA H. Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing[J]. Food Science Nutrition, 2023, 11(12):7751-7764.
- [10] ZENG F, DIAO H, CUI J, et al. Establishment and parameter calibration of a simulation model of coated cotton seeds and soil [J]. Processes, 2024, 12(3):521.

- [11] 赵智豪,吴明亮,谢双鹏,等. 土壤-水稻前茬离散元仿真参数标定及其旋耕轨迹分析[J]. 农业工程学报,2024,40(7):72-82.
ZHAO Zhihao, WU Mingliang, XIE Shuangpeng, et al. Parameter calibration for the discrete element simulation of soil preceding rice stubble and its rotary tillage trajectory[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(7):72-82. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 马帅,徐丽明,袁全春,等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(1):40-49.
MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(1):40-49. (in Chinese)
- [15] 张宏建,陈修波,李宏立,等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):80-90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):80-90. (in Chinese)
- [16] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):76-84.
ZHANG Jiayi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):76-84. (in Chinese)
- [17] 杨杰,张静,孙欣伊,等. 基于 MOPSO 的荞麦秸秆育苗钵成型工艺参数优化[J]. 太阳能学报,2023,44(5):1-9.
YANG Jie, ZHANG Jing, SUN Xinyi, et al. Optimization of process parameters of buckwheat straw seedling boxing based on MOPSO[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2023,44(5):1-9. (in Chinese)
- [18] 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 Xinhua, FU Shengkang, LI Xudong, 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)
- [19] JIAN Z, CAN X, LIEWANG C, et al. Determination of physical and interaction parameters of green pepper (*Zanthoxylum armatum*): investigation of the mechanism of significant factors against the repose angle[J]. LWT,2022,162:113409.
- [20] 宋占华,李浩,闫银发,等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(6):21-33.
SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):21-33. (in Chinese)
- [21] 王新,田海清,肖子卿,等. 玉米秸秆茎节接触物理参数测定与离散元数值模拟标定[J]. 江苏农业科学,2023,51(16):162-170.
WANG Xin, TIAN Haiqing, XIAO Ziqing, et al. Measurement of stalk joint contact physical parameters and discrete element numerical simulation calibration of corn stalk[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2023,51(16):162-170. (in Chinese)
- [22] 张涛,刘飞,赵满全,等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2018,23(4):120-127.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Determination of corn stalk contact parameters and calibration of discrete element method simulation[J]. Journal of China Agricultural University,2018,23(4):120-127. (in Chinese)
- [23] 王伟伟,蔡丹艳,谢进杰,等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(3):127-134.
WANG Weiwei, CAI Danyan, XIE Jinjie, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):127-134. (in Chinese)
- [24] 王洪波,樊志鹏,乌兰图雅,等. 揉碎玉米秸秆螺旋输送仿真离散元模型参数标定[J]. 中国农业科技导报,2023,25(3):96-106.
WANG Hongbo, FAN Zhipeng, WULAN Tuyu, et al. Parameter calibration of discrete element model for simulation of crushed corn stalk screw conveying[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2023,25(3):96-106. (in Chinese)
- [25] 童世合,邵明玺,曹猛,等. 基于 DEM 的玉米秸秆离散元模型参数标定[J]. 中国农机化学报,2023,44(2):69-75.
TONG Shihe, SHAO Mingxi, CAO Meng, et al. Parameter calibration of corn straw discrete element model based on DEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(2):69-75. (in Chinese)
- [26] 王盼柳,曹哲,李浩,等. 利用牛粪生产垫料的滚筒结构优化[J]. 中国农业大学学报,2021,26(9):189-196.
WANG Panliu, CAO Zhe, LI Hao, et al. Structure optimization of a drum recycling solid cow manure as bedding[J]. Journal of China Agricultural University,2021,26(9):189-196. (in Chinese)
- [27] 韩树杰,臧江涛,坎杂,等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报,2021,52(4):101-108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):101-108. (in Chinese)

- operating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 421-429. (in Chinese)
- [21] 章少岑, 魏新华, 邓屹, 等. 履带式收割机全田块路径跟踪算法设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 36-45.
ZHANG Shaocen, WEI Xinhua, DENG Yi, et al. Design and experiments of the whole field path tracking algorithm for a track-based harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 36-45. (in Chinese)
- [22] 孙传祝, 王法明, 李学强, 等. 马铃薯精密播种机智能控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 36-44.
SUN Chuanzhu, WANG Faming, LI Xueqiang, et al. Design of intelligent control system of potato precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 36-44. (in Chinese)
- [23] 白慧娟, 方宪法, 王德成, 等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 61-72.
BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 61-72. (in Chinese)
- [24] 何杰, 朱金光, 张智刚, 等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 17-24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 17-24. (in Chinese)
- [25] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1999(1): 32-42.
LI Hongxing. Variable theory domain adaptive fuzzy controller[J]. Science China Technological Sciences, 1999(1): 32-42. (in Chinese)
- [26] 张闻宇, 丁幼春, 廖庆喜, 等. 拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 43-50.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 43-50. (in Chinese)
- [27] 曹顺安, 谢学军, 刘光临. 基于 Smith 预估器的 PID 自适应控制及其应用[J]. 化工自动化及仪表, 2004(1): 28-32.
CAO Shun'an, XIE Xuejun, LIU Guanglin. PID self-adaptive controlling based on Smith predictor and its application[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2004(1): 28-32. (in Chinese)
- [28] 陆萍蓝, 张火明, 毛汝东. 史密斯预估补偿控制与 PID 控制的比较研究[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(2): 171-179.
LU Pinglan, ZHANG Huoming, MAO Rudong. Investigation on comparison between the SMITH predictive compensation control and the PID control[J]. Journal of China Jiliang University, 2009, 20(2): 171-179. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 450 页)

- [28] 苟金保. 免耕播种机渐开线侧深施肥开沟器设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.  
GOU Jinbao. Design and test of furrow opener for deep fertilizing at involute side of no-tillage seeder[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [29] 文恩杨, 李玉华, 牛子儒, 等. 蒜种颗粒离散元模型参数标定[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 160-167.  
WEN Enyang, LI Yuhua, NIU Ziru, et al. Parameter calibration of discrete element model for garlic particles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 160-167. (in Chinese)
- [30] YU H, HU Y, QI L, et al. Hyperspectral detection of moisture content in rice straw nutrient bowl trays based on PSO-SVR[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8703.
- [31] 于淼, 周海滨, 丁京涛, 等. 基于 EDEM 的餐厨垃圾组成颗粒间接触参数标定[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(12): 111-120.  
YU Miao, ZHOU Haibin, DING Jingtao, et al. Calibration of interparticle contact parameters of kitchen waste composition based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(12): 111-120. (in Chinese)
- [32] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 100-108.  
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model of corn straw-soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100-108. (in Chinese)
- [33] 高昕毓, 武佩, 李修竹, 等. 基于 Matlab 的颗粒饲料休止角试验研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(9): 173-179.  
GAO Xinyu, WU Pei, LI Xiuzhu, et al. Experimental study on angle of repose of pellet feed based on Matlab[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(9): 173-179. (in Chinese)
- [34] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 58-69.  
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 58-69. (in Chinese)