

新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究

韩树杰^{1,2} 戚江涛^{1,2} 坎 杂^{1,2} 李亚萍^{1,2} 蒙贺伟^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 为确定新疆果园散体厩肥离散元仿真参数,采用仿真试验与物理试验相结合的方法,对散体厩肥的离散元参数进行标定。以不同参数组合下的堆积角为响应值,采用 Plackett – Burman 试验对散体厩肥离散元仿真参数进行筛选,得到对堆积角影响显著的参数,即厩肥-厩肥恢复系数、厩肥-钢恢复系数、JKR 表面能;通过 Box – Behnken 试验建立堆积角与显著性参数的二阶回归模型,并对其进行优化,得到显著性参数最优值,即厩肥-厩肥恢复系数为 0.49、厩肥-钢恢复系数为 0.34、JKR 表面能为 0.02 J/m²;将最优参数组合下仿真试验得到的堆积角与物理试验值进行对比,二者相对误差为 2.73%。研究表明,标定的参数可靠,可为果园散体厩肥深施机械化过程仿真参数优化提供依据。

关键词: 厩肥; 离散元; 参数标定; 堆积角

中图分类号: S141.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0101-08 OSID: 

Parameters Calibration of Discrete Element for Deep Application of Bulk Manure in Xinjiang Orchard

HAN Shujie^{1,2} QI Jiangtao^{1,2} KAN Za^{1,2} LI Yaping^{1,2} MENG Hewei^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China
2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China)

Abstract: The setting of contact parameters and contact model parameters between materials would directly affect the reliability of discrete element simulation test results. In order to determine the parameters of discrete element simulation of bulk manure in Xinjiang orchard, simplify the crushed irregular bulk manure into spherical particles, considering the cohesion characteristics between particles of organic fertilizer, the contact model of Hertz – Mindlin with Johnson – Kendall – Roberts was used in simulation modeling. The method of combining simulation and physical test was used to calibrate the discrete element parameters of bulk manure. Through the simulation of the combination of different parameters, with the accumulation angle as the response value, the Plackett – Burman test was used to screen the discrete element simulation parameters of bulk manure, and the parameters that had a significant effect on the stacking angle were obtained, that was, the restoration coefficient of manure and manure, the restoration coefficient of manure and steel plates, and JKR; the Box – Behnken design methods was employed to establish and optimize the second-order regression model of repose angle and significance parameter, in order to obtaine these optimal values such as the recovery coefficient between manure and manure, the recovery coefficient between manure and steel plate and the JKR were calculated as 0.49, 0.34, 0.02 J/m², respectively. Comparing the accumulation angle obtained from the simulation with the optimal parameter combination and the physical test value, the relative error was 2.73%. The results showed that the calibrated parameters were reliable, which provided a basis for the optimization of simulation parameters of the mechanization process of orchard bulk manure.

Key words: manure; discrete element method; calibration of parameters; stacking angle

收稿日期: 2020 – 06 – 26 修回日期: 2020 – 07 – 21
基金项目: 兵团师域发展创新支持计划项目(2018BB042)、石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZK201917)、石河子大学成果转化与
技术推广计划项目(CGZH201901)和中央引导地方科技发展专项资金项目(KC005104)
作者简介: 韩树杰(1992—),男,助理工程师,主要从事果园施肥机械化研究,E-mail: 1518824237@qq.com
通信作者: 蒙贺伟(1982—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备机械化研究,E-mail: mhw_mac@shzu.edu.cn

0 引言

新疆地区厩肥资源较为丰富,施用厩肥可促进果园土壤微生物的生命活动,对提高土壤肥力、改善土壤结构、补充土壤养分和创造良好的土壤生态环境具有重要作用^[1-3]。

近年来,随着计算机技术的发展,离散元法(Discrete element method, DEM)在农业装备研究上应用越来越广泛^[4-8]。利用离散元法全面、系统研究散体物料和机械装置之间的相互作用机理和物料的运动状态,不仅可以优化机械装置的结构参数和工作参数,而且可以提高研发效率、改善机械作业性能、节约成本。物料离散元参数标定是研究物料与机械装置之间相互作用的基础。GRIMA 等^[9]利用崩塌试验中的颗粒堆休止角对于颗粒在离散元仿真中所需滚动摩擦因数进行了标定;BOAC 等^[10]运用离散方法模拟了精选油籽颗粒的材料和相互作用特性;温翔宇等^[11]对颗粒肥料进行离散元仿真,标定了颗粒肥的摩擦因数;袁全春等^[12]对有机肥散体颗粒离散元模型进行参数标定,仿真休止角与实际休止角的相对误差仅为 0.42%;罗帅等^[13]基于 JKR 粘结模型标定了蚯蚓粪基质的离散元参数,休止角仿真结果与实际试验结果较为接近;文献[14-17]分别对粘性土壤、沙土颗粒土壤的模型参数进行了标定,结果表明,虚拟仿真结果与实测值之间差异较小。

本文在以上研究基础上,以新疆果园深施散体厩肥为研究对象,采用仿真试验与物理试验相结合的方法,对散体厩肥的离散元参数进行标定,从而获得散体厩肥的离散元模型,以期全面、系统研究肥料和施肥装置之间的相互作用机理以及物料的运动状态提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用厩肥为新疆生产建设兵团第八师二二一团葡萄园用厩肥,由纯牛粪发酵,发酵时间为 3~4 个月。前期试验结果表明,为保证施肥机作业性能,提高施肥机施肥均匀性和稳定性,施肥前需对厩肥进行粉碎处理。用环刀法测定所选厩肥的密度;选取 500 g 厩肥作为试验样本,使用土壤标准粒径筛(筛孔直径 0.25~5 mm)确定其粒径分布情况;用 MH45 型含水率测定仪(质量测量精度 0.001 g,含水率测量精度 0.01%)测定厩肥的含水率;堆积角试验中所用钢板材质为 45 号钢,参照文献[18-20]确定所选材料的泊松比、剪切模量,材料的基本

性质如表 1 所示,本征参数如表 2 所示。

表 1 厩肥基本性质
Tab.1 Basic properties of manure

参数	质量分数/%					密度/ (g·cm ⁻³)	含水 率/%
	0.25 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 1 mm	1 ~ 2 mm	2 ~ 5 mm	>5 mm		
数值	13.69	15.91	40.82	21.02	8.56	1.496	20.32

表 2 厩肥、钢本征参数
Tab.2 Intrinsic parameters of manure and steel plate

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(g·cm ⁻³)
厩肥	0.25	1.00 × 10 ⁶	1.496
钢板	0.30	7.90 × 10 ¹⁰	7.850

1.2 试验方法

肥料颗粒的自然堆积角能反映其流动、摩擦等特性^[21],本文采用物理试验与仿真试验相结合的方法^[22-23]对厩肥离散元模型参数进行标定,采用注入法对厩肥进行堆积角试验,并在 EDEM 离散元仿真软件中进行仿真,应用 Design-Expert 8.0.6 软件进行 Plackett-Burman 多因素显著性筛选试验与分析,得出对堆积角有显著性影响的参数;在此基础上,通过 Box-Behnken 响应面分析法建立并优化厩肥堆积角与显著性参数的回归模型,以实际堆积角为目标值对回归方程求解寻优,得到显著性参数最优值。最后在最优参数下进行仿真试验,对比厩肥仿真堆积角和实际堆积角,验证标定的厩肥离散元模型参数的准确性。

1.3 物理模型

结合文献[24-26]对堆积角的相关研究,试验参照 GB 11986—89/ISO 4324—1977《表面活性剂粉体和颗粒休止角的测量》,采用注入法测量散体厩肥的堆积角,测量装置如图 1 所示,漏斗下口内径为 10 mm,锥度为 60°,托盘直径为 100 mm,高度为 25 mm,漏斗的下端口与托盘上表面距离为 75 mm。试验时,漏斗中的厩肥颗粒经漏斗口落于托盘上,最终在托盘上形成稳定的颗粒堆,在侧面对堆积角拍照,采用 Matlab 对图像进行处理以获得厩肥颗粒的

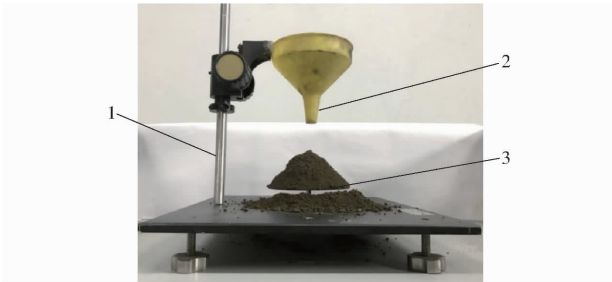


图 1 堆积角物理试验
Fig.1 Physical test of stacking angle
1. 支撑架 2. 漏斗 3. 托盘

堆积角。重复 5 次试验取其平均值,试验得到厩肥的堆积角为 35.47°。

2 厩肥堆积角仿真试验

2.1 颗粒间接触模型

在 EDEM 接触模型理论中,Hertz – Mindlin with JKR Cohesion 模型是一个凝聚力接触模型,该接触模型在 Hertz 接触理论的基础上结合 JKR 理论,考虑湿颗粒间粘结力对颗粒运动的影响,适用于模拟颗粒间因水分发生明显粘结和团聚的物料^[14]。在该模型中,法向弹性接触力的实现基于 Johnson – Kendall – Roberts 理论,切向弹性力、法向耗散力和切向耗散力均与 Hertz – Mindlin (no slip) 接触模型中的计算方法一致,在 Johnson – Kendall – Robert 理论中,JKR 法向弹性力的实现基于重叠量 δ 、相互作用参数和表面能。计算式为

$$F_{JKR} = -4 \sqrt{\pi \gamma E^*} \alpha^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 \tag{1}$$

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \tag{2}$$

其中

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_i^2}{E_i} + \frac{1 - v_j^2}{E_j} \tag{3}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \tag{4}$$

式中 F_{JKR} ——JKR 法向弹性力,N
 α ——相互接触 2 个颗粒的接触圆半径,m
 γ ——表面能,N/m
 E^* ——等效弹性模量,Pa
 R^* ——等效半径,m
 $E_i、E_j$ ——相互接触 2 个颗粒的弹性模量,Pa
 $v_i、v_j$ ——相互接触 2 个颗粒的泊松比
 $R_i、R_j$ ——相互接触 2 个颗粒的半径,m
当 $\gamma = 0$ 时,力变为 Hertz – Mindlin 法向力

$$F_{Hertz} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}} \tag{5}$$

即使颗粒并不是直接接触,该模型也提供吸引凝聚力,颗粒间具有非凝聚力的最大间隙为

$$\delta_c = \frac{\alpha_c^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha_c}{E^*}} \tag{6}$$

$$\alpha_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2E^*} - \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \tag{7}$$

式中 δ_c ——颗粒间具有非凝聚力时的法向最大间隙,m
 α_c ——2 个颗粒的接触半径,m
当颗粒并非实际接触并且间隙小于 δ_c 时,凝聚

力达到最大值

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2} \pi \gamma R^* \tag{8}$$

摩擦力的计算和 Hertz – Mindlin (no slip) 接触模型不同,其取决于 JKR 法向力的正向排斥部分。因此,该模型在接触力的凝聚力分量更大时提供一个更大的摩擦力。

因此,经过处理后的厩肥具有散粒体的物料特性,厩肥颗粒之间受水分子和化学物质的影响也具有粘结力特性。为了更准确地模拟厩肥的真实状态,本文选择 Hertz – Mindlin with JKR Cohesion 模型进行仿真模拟。

2.2 几何模型建立

在仿真过程中,颗粒和装置模型对仿真结果有很大的影响,在保证仿真模型尺寸与物理模型一致的基础上,建立了简化的厩肥和漏斗装置模型。经过粉碎处理的散体厩肥颗粒近似球形,将厩肥颗粒模型设置为球形。在 SolidWorks 软件中根据物理试验模型建立仿真模型,把模型转换为 STL 格式,导入 EDEM 2.7 软件中作为漏斗装置仿真模型,本文采用 EDEM 软件内置的 Hertz – Mindlin (no slip) 接触模型作为颗粒与装置之间的接触模型,颗粒模型及漏斗模型如图 2、3 所示。

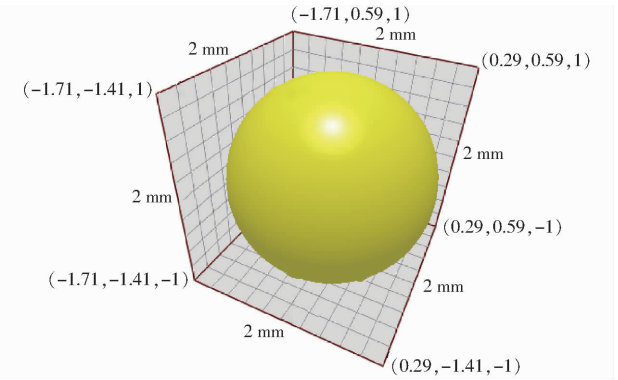


图 2 颗粒模型
Fig.2 Particle model

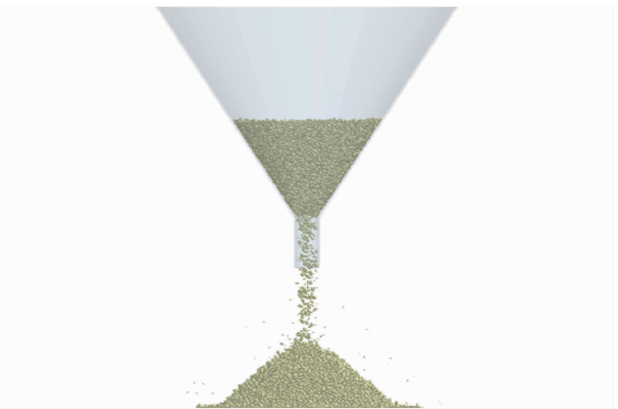


图 3 漏斗模型
Fig.3 Funnel model

2.3 仿真参数设置

根据试验所测定的厩肥颗粒粒径分布范围,为确保仿真结果准确性的同时提高仿真效率,仅生成粒径分布占比较大区间的颗粒。在 EDEM 中采用随机分布,将生成的球颗粒半径限制在 0.5 ~ 1.25 倍的初始球半径之间。仿真中,动态生成漏斗中颗粒,在漏斗正上方建立颗粒工厂,设置为虚拟,生成总质量为 0.6 kg,生成速率为 0.2 kg/s,数据保存时间间隔为 0.01 s,固定时间步长是瑞利时间步长的 20%,网格尺寸取 2 倍最小球形单元尺寸。基于 EDEM 内嵌 Hertz – Mindlin with JKR Cohesion 模型进行厩肥接触参数的仿真标定,其模型参数(JKR 表面能)是表征所研究物料含水率效果的重要参数。通过大量预试验确定了 JKR 表面能的取值范围。综合对比文献[12,18 – 20]中所研究肥料、土壤与本文所研究厩肥特性的差异,确定厩肥仿真接触参数的取值范围,如表 3 所示。

表 4 因素水平

因素							
水平	厩肥-厩肥恢复系数	厩肥-厩肥静摩擦因数	厩肥-厩肥滚动摩擦因数	厩肥-钢恢复系数	厩肥-钢静摩擦因数	厩肥-钢滚动摩擦因数	JKR 表面能/(J·m ⁻²)
-1	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0
1	0.6	0.8	0.4	0.6	0.8	0.4	0.025

Plackett – Burman 试验方案及结果如表 5 所示, A ~ G 为因素水平值, H ~ L 为空白列,利用 Design-Expert 8.0.6 软件^[27-28]对该结果进行方差分析,得到接触参数和接触模型参数显著性如表 6 所示。由表 6 可知,JKR 表面能、厩肥-厩肥恢复系数、厩肥-钢恢复系数的 $P < 0.05$,对厩肥堆积角的影响显著;而其他参数的 $P > 0.05$,对厩肥堆积角影响不显著。

表 5 Plackett – Burman 试验方案及结果

试验因素												堆积角/ (°)
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	38.76
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	34.02
3	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	36.05
4	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	36.02
5	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	40.33
6	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	31.21
7	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	35.70
8	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	36.54
9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	28.15
10	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	28.98
11	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	40.26
12	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	37.16

表 3 仿真参数取值范围

参数	数值
厩肥-厩肥恢复系数	0.1 ~ 0.6
厩肥-厩肥静摩擦因数	0.3 ~ 1.0
厩肥-厩肥滚动摩擦因数	0.1 ~ 0.5
厩肥-钢恢复系数	0.048 ~ 0.60
厩肥-钢静摩擦因数	0.20 ~ 0.86
厩肥-钢滚动摩擦因数	0.1 ~ 0.5
JKR 表面能/(J·m ⁻²)	0 ~ 0.03

Tab.3 Simulation parameters

2.4 仿真试验与结果分析

2.4.1 Plackett – Burman 筛选试验

Plackett – Burman 筛选试验通过考察目标响应与各因子间的关系,比较各个因子 2 水平间的差异性来确定因子显著性。本文 Plackett – Burman 试验设计以厩肥堆积角为响应值,对仿真接触参数及接触模型参数进行筛选。试验接触参数高水平设置为低水平的 2 倍,根据文献[13 – 14]中因素高低水平取值方法,确定本文因素水平如表 4 所示。

表 6 Plackett – Burman 试验结果显著性分析

test results			
方差来源	效应	均方和	P
A	4.44	59.05	0.006 7 **
B	0.34	0.34	0.715 2
C	-1.77	9.36	0.109 0
D	2.70	21.92	0.034 7 *
E	0.89	2.38	0.358 9
F	0.49	0.71	0.601 5
G	5.00	74.90	0.004 4 **

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

为方便后续试验,在 Box – Behnken 试验^[29-30]中只考虑 3 个影响显著的参数,不显著因素取值分别为厩肥-厩肥静摩擦因数 0.65、厩肥-厩肥滚动摩擦因数 0.3、厩肥-钢静摩擦因数 0.53、厩肥-钢滚动摩擦因数 0.3,进行响应面试验设计。

2.4.2 Box – Behnken 响应面试验及回归模型

根据响应面设计原理,选取显著性参数的低、中、高 3 个水平进行试验设计,试验选取 5 个中心点对误差进行评估。Box – Behnken 试验参数取值如表 7 所示。

表 7 Box – Behnken 试验参数取值

Tab.7 Parameter value of Box – Behnken test

参数	数值
厩肥-厩肥恢复系数	0.1 ~ 0.6
厩肥-厩肥静摩擦因数	0.65
厩肥-厩肥滚动摩擦因数	0.3
厩肥-钢恢复系数	0.1 ~ 0.6
厩肥-钢静摩擦因数	0.53
厩肥-钢滚动摩擦因数	0.3
JKR 表面能/(J·m ⁻²)	0 ~ 0.025

Box – Behnken 试验方案及结果如表 8 所示,重点考察 3 个对厩肥堆积角影响显著参数,即 JKR 表面能、厩肥-厩肥恢复系数、厩肥-钢恢复系数。应用 Design-Expert 软件建立堆积角 θ 与 3 个显著性参数的二阶回归方程为

$$\theta = 30.92 + 1.75A + 0.88D + 3.23G - 0.21AD - 1.07AG + 0.46DG - 0.63A^2 + 0.041D^2 + 0.69G^2$$

(9)

表 8 Box – Behnken 试验方案及结果

Tab.8 Design and results of Box – Behnken test

序号	A	D	G	堆积角/(°)
1	-1	1	0	29.80
2	-1	0	1	34.09
3	-1	0	-1	24.19
4	-1	-1	0	27.52
5	1	-1	0	31.27
6	1	0	-1	30.00
7	1	1	0	32.73
8	1	0	1	35.63
9	0	1	-1	29.42
10	0	1	1	35.51
11	0	-1	-1	28.72
12	0	-1	1	32.95
13	0	0	0	31.52
14	0	0	0	30.28
15	0	0	0	30.65
16	0	0	0	31.48
17	0	0	0	30.67

Box – Behnken 试验模型方差分析结果如表 9 所示,由表 9 可知,该拟合模型 $P = 0.000\,3$,拟合度较好;厩肥-厩肥恢复系数(A)、JKR 表面能(G) P 值均小于 0.01;厩肥-钢恢复系数(D)、厩肥-厩肥恢复系数和 JKR 表面能交互项(AG) P 值均小于 0.05,说明各个参数对堆积角的影响显著,表明回归模型的有效性。失拟项 $P = 0.114\,7 > 0.05$,表明所得回归方程与实际拟合中非正常误差所占比例小,没有弯曲失拟现象发生,拟合性较好。试验中变异系数为 2.65%,说明试验有较高的可靠性。决定系数为

表 9 Box – Behnken 试验模型方差分析

Tab.9 ANOVA of quadratic polynomial model of

Box – Behnken test					
方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	13.71	9	123.35	20.43	0.000 3 **
A	24.61	1	24.61	36.67	0.000 5 **
D	6.13	1	6.13	9.13	0.019 3 *
G	83.53	1	83.53	124.50	<0.000 1 **
AD	0.17	1	0.17	0.25	0.632 0
AG	4.56	1	4.56	6.79	0.035 1 *
DG	0.86	1	0.86	1.29	0.293 6
A^2	1.68	1	1.68	2.50	0.157 8
D^2	7.164×10^{-3}	1	7.164×10^{-3}	0.011	0.920 6
G^2	2.00	1	2.00	2.98	0.128 1
残差	4.70	7	0.67		
失拟项	3.48	3	1.16	3.81	0.114 7
纯误差	1.22	4	0.30		
总和	128.05	16			

$R^2 = 0.963$,校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.916$,均大于 0.9,表明模型能够真实地反映实际情况。试验精确度为 17.981,说明模型具有良好的精确度。

根据表 9 结果,在保证模型良好的前提下,剔除对堆积角影响不显著的项(AD 、 DG 、 A^2 、 D^2 、 G^2),优化模型后的方差分析结果如表 10 所示,失拟项 $P = 0.132\,7$;变异系数为 2.83%;决定系数 $R^2 = 0.928$;校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.904$;试验精密度为 21.358。可知,模型拟合性、可靠性以及精确性良好,较优化前有了一定改善,优化后回归方程为

$$\theta = 30.97 + 1.75A + 0.88D + 3.23G - 1.07AG$$

(10)

表 10 Box – Behnken 试验优化回归模型方差分析

Tab.10 ANOVA of modified model of Box – Behnken test

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	118.82	4	29.70	38.62	<0.000 1 **
A	24.61	1	24.61	31.99	0.000 1 **
D	6.13	1	6.13	7.96	0.015 4 *
G	83.53	1	83.53	108.59	<0.000 1 **
AG	4.56	1	4.56	5.93	0.031 5 *
残差	9.23	12	0.77		
失拟项	8.01	8	1.00	3.29	0.132 7
纯误差	1.22	4	0.30		
总和	128.05	16			

2.4.3 回归模型交互效应分析

根据优化回归模型方差分析结果,可知厩肥-厩肥恢复系数和 JKR 表面能的交互项(AG)对厩肥的堆积角影响显著($P < 0.05$)。当厩肥-厩肥恢复系数为 0.35 时,应用 Design-Expert 软件绘制厩肥-厩肥恢复系数和 JKR 表面能交互作用(AG)的响应曲

面(图4),可以直观地看出两个参数之间的交互效应。由AG曲面可知,随着两个参数取值的增加,厩肥堆积角均呈现上升趋势,相对于厩肥-厩肥恢复系数(A),JKR表面能(G)的效应面曲线比较陡,表明其对堆积角影响较为显著。

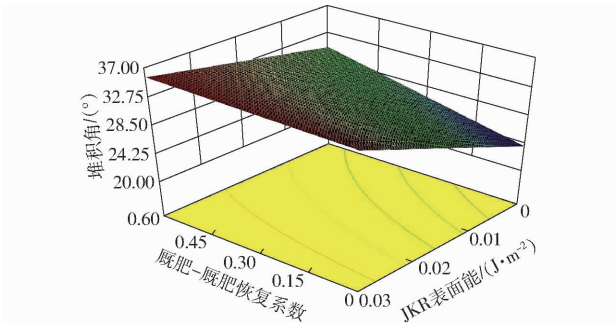


图4 AG交互效应对堆积角的影响

Fig.4 Interaction effect diagram of A and G

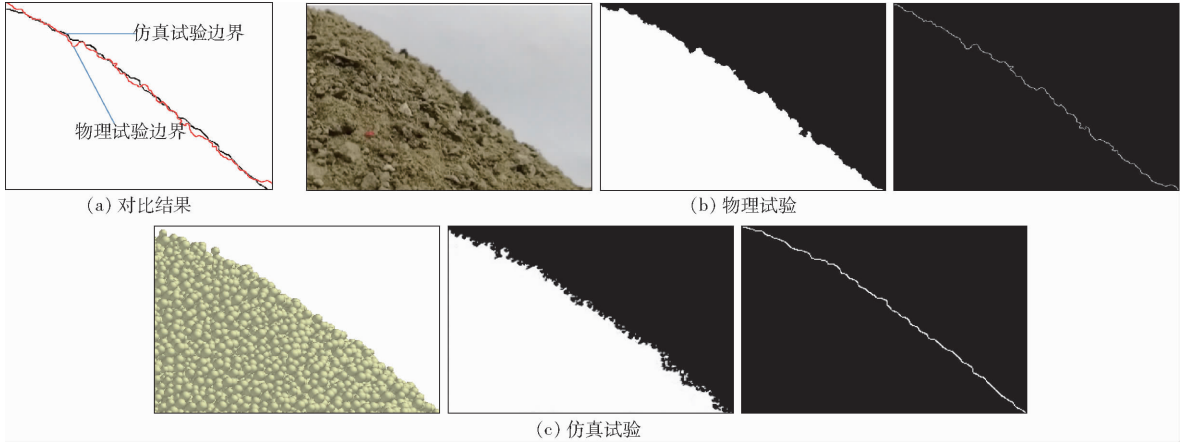


图5 仿真试验与物理试验对比结果

Fig.5 Comparison between simulation test and physical test

直观看出,利用标定后的厩肥参数得到的堆积边界与厩肥物理试验堆积结果比较接近,说明所得厩肥参数的最优值准确可靠,仿真试验与物理试验的对照如图5b、5c所示。

4 结论

(1)通过 Plackett – Burman 筛选试验,得到对厩肥堆积角具有显著影响的接触参数和接触模型参数为厩肥-厩肥恢复系数、厩肥-钢恢复系数、JKR 表面能,而厩肥-厩肥的静摩擦因数和滚动摩擦因数、厩肥-钢的静摩擦因数和滚动摩擦因数对堆积角无显著性影响。

(2)通过 Box – Behnken 响应曲面试验,得出对

3 最佳参数组合确定与仿真验证

应用 Design-Expert 软件对优化后的回归方程进行寻优求解,当 JKR 表面能为 0.02 J/m²,厩肥-钢恢复系数为 0.49,厩肥-厩肥恢复系数为 0.34,其余非显著性参数选取中间水平(厩肥-厩肥静摩擦因数 0.65,厩肥-厩肥滚动摩擦因数 0.3,厩肥-钢静摩擦因数 0.53,厩肥-钢滚动摩擦因数 0.3)时,仿真结果与实际堆积角相对误差最小。为验证最优参数组合的准确性,采用上述参数值,其他参数设置不变,应用 EDEM 2.7 软件进行堆积角仿真试验,3 次重复仿真所得厩肥堆积角分别为 34.8°、35.0°、33.7°。厩肥堆积角 3 次平均值为 34.5°。与厩肥实际堆积角 35.47°的相对误差为 2.73%,并且,从图 5a 可以

厩肥堆积角影响显著的参数,建立显著性参数与堆积角之间的二次回归模型,并对其进行优化,根据其方差分析得出,3 个显著性参数的一次项(厩肥-厩肥恢复系数、厩肥-钢恢复系数、JKR 表面能、厩肥-厩肥恢复系数和厩肥表面能的交互项对厩肥堆积角影响显著。

(3)通过对优化后的回归模型求解可知,当 JKR 表面能为 0.02 J/m²、厩肥-钢恢复系数为 0.49、厩肥-厩肥恢复系数为 0.34,非显著性参数选取中间水平时,仿真试验和物理试验得到的厩肥堆积角无显著性差异($P > 0.05$),说明采用响应面方法分析标定厩肥接触参数和接触模型参数可行。

参 考 文 献

[1] 王志勇,红梅,杨殿林,等. 供氮水平和有机无机配施对夏玉米产量及土壤硝态氮的影响[J]. 中国土壤与肥料,2008(6): 11 – 14.
WANG Zhiyong,HONG Mei,YANG Dianlin,et al. Effects of nitrogen supply level and organic and inorganic fertilization on summer maize yield and soil nitrate nitrogen[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(6):11 – 14. (in Chinese)
[2] 苏娜,杨丽娟,周崇俊,等. 有机肥与氮肥配施对设施土壤中碱解氮含量的影响[J]. 安徽农业科学,2006,34(24):6542 –

6543.

SU Na, YANG Lijuan, ZHOU Chongjun, et al. Effect of combination of organic fertilizer and nitrogen fertilizer on alkaline hydrolysis nitrogen content in facility soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(24): 6542 – 6543. (in Chinese)

- [3] 宋建国,刘伟,梁爱萍,等.氮肥配施秸秆和厩肥对土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 转化的影响[J].安徽农业科学,2010,38(9): 4721 – 4722.
- SONG Jianguo, LIU Wei, LIANG Aiping, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer with straw and barn manure on the transformation of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(9): 4721 – 4722. (in Chinese)
- [4] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2014, 101(2): 24 – 33.
- [5] 贾富国,姚丽娜,韩燕龙,等.基于离散元法的糙米匀料盘仿真优化设计[J].农业工程学报,2016,32(4):235 – 241.
- JIA Fuguo, YAO Li'na, HAN Yanlong, et al. Simulation and optimal design of uniform plate of brown rice based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 235 – 241. (in Chinese)
- [6] 李洪昌,李耀明,唐忠,等.基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J].农业工程学报,2011,27(5):117 – 121.
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 117 – 121. (in Chinese)
- [7] 方会敏,姬长英, FARMAN Ali Chandio, 等.基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL].农业机械学报,2016, 47(3):22 – 28.
- FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22 – 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160304&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004. (in Chinese)
- [8] 郑侃,何进,李洪文,等.基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL].农业机械报,2016,47(9):62 – 72.
- ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62 – 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160910&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)
- [9] GRIMA A P, WYPYCH P W. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling[J]. Granular Matter, 2011, 13(2): 127 – 132.
- [10] BOAC J M, CASADA M E, MAGHIRANG R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1201 – 1216.
- [11] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115 – 122, 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002013&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.013. (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] 罗帅,袁巧霞, GOUDA Shaban, 等.基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J/OL].农业机械学报,2018, 49(4):343 – 350.
- LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343 – 350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180440&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.040. (in Chinese)
- [14] 武涛,黄伟凤,陈学深,等.考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J].华南农业大学学报,2017,38(3): 93 – 98.
- WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters of cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93 – 98. (in Chinese)
- [15] 王宪良,胡红,王庆杰,等.基于离散元的土壤模型参数标定方法[J/OL].农业机械学报,2017,48(12):78 – 85.
- WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 – 85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171209&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)

- [16] 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?file_no=20170306&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006. (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/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):123–132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):123–132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1file_no=20200214&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.014. (in Chinese)
- [18] 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 Xiaoming. Study on hot air drying technology and equipment of organic fertilizer granules [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [19] 张周. 不同有机肥排肥性能分析及排肥机构设计[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
ZHANG Zhou. Performance analysis and mechanism design of different organic fertilizers [D]. Guiyang: Guizhou University, 2018. (in Chinese)
- [20] LANDRY H, THIRION F, LAGUE C, et al. Numerical modeling of the flow of organic fertilizers in land application equipment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 51: 35–53.
- [21] 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 study of micro-mechanical structure in particle pile[J]. Acta Physica Sinica, 2009,58(3):1819–1825. (in Chinese)
- [22] MICHAEL R, KEVIN J H. A methodical calibration procedure for discrete element models[J]. Powder Technology, 2017, 307: 73–83.
- [23] COETZEE C J. Calibration of the discrete element method[J]. Powder Technology, 2017, 310: 104–142.
- [24] 李永祥,李飞翔,徐雪萌,等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(16):320–327.
LI Yongxiang, LI Feixiang, XU Xuemeng, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 320–327. (in Chinese)
- [25] 李俊伟,佟金,胡斌,等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(6):130–140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in Northeast China [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6):130–140. (in Chinese)
- [26] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):140–147.
PENG Fei,WANG Hongying,FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):140–147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180416&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
- [27] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [28] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.
- [29] 陈潇凯,李邦国,林逸. 改进响应面法在汽车正面抗撞性优化中的应用[J]. 北京理工大学学报,2009,29(12):1076–1079,1084.
CHEN Xiaokai, LI Bangguo, LIN Yi. Application of improved RSM in the optimization design of automotive frontal crash worthiness[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009,29(12):1076–1079,1084. (in Chinese)
- [30] 栾庆祥,赵杨,周欣,等. 单因素试验结合响应面分析法优化杜仲最佳提取工艺[J]. 药物分析杂志,2013,33(5):859–865.
LUAN Qingxiang, ZHAO Yang, ZHOU Xin, et al. Optimization on extraction technology for *Eucommia ulmoides* by single-factor experiment combined with response surface methodology [J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2013,33(5):859–865. (in Chinese)