

不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究

朱新华¹ 伏胜康² 李旭东¹ 魏玉强¹ 赵伟¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 四川航天职业技术学院, 成都 610100)

摘要: 针对畜禽粪肥含水率差异大等因素导致其离散元仿真参数标定方法通用性和实用性不强等问题, 以堆积角为响应值对不同含水率的羊粪进行试验研究。通过圆筒提升法建立了含水率-堆积角模型, 模型相关系数0.9999。基于羊粪粒度分布以 Hertz-Mindlin with JKR 为粘结模型建立4种不同粒径的 EDEM 颗粒模型; 通过 Plackett-Burman 试验、爬坡试验和 Box-Behnken 试验从10项参数中筛选出 JKR 表面能、颗粒间滚动摩擦因数和静摩擦因数3项显著性参数, 并建立了堆积角-离散元参数模型, 模型 P 值小于0.0001, 相对误差小于等于2.42%; 基于含水率-堆积角模型和堆积角-离散元参数模型推导构建了含水率-离散元参数模型, 以抽板法进行工程性验证, 相对误差小于等于5.37%。表明通过含水率即可直接预测羊粪离散元参数, 研究为施肥机械-羊粪仿真中离散元参数确定提供了通用、可靠的方法。

关键词: 羊粪; 含水率; 离散元; EDEM; 标定; 堆积角

中图分类号: S141.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)08-0034-08

OSID:



General Method for Discrete Element Parameters Calibration of Goat Manure with Different Moisture Contents

ZHU Xinhua¹ FU Shengkang² LI Xudong¹ WEI Yuqiang¹ ZHAO Wei¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Sichuan Aerospace Vocational College, Chengdu 610100, China)

Abstract: To solve the problem that the calibration method of discrete element simulation parameters was not universal and practical due to the large difference in moisture content of livestock and poultry manure, the discrete element parameters of goat manure with different moisture contents were studied with the resting angle as the response value. The moisture content - resting angle model was established with the cylinder lifting method, and the correlation coefficient was 0.9999. Based on the particle size distribution of goat manure, EDEM particle models of four kinds of particle sizes were established, and Hertz - Mindlin with JKR was used as the bonding model. Three significant parameters of JKR surface energy, rolling friction coefficient, and static friction coefficient between particles were selected from ten parameters by the Plackett - Burman test, climbing test, and Box - Behnken test. Then the resting angle - discrete element parameters model was established. The P -value of the model was less than 0.0001, and the relative error was less than or equal to 2.42%. The moisture content - discrete element parameters model was constructed based on the moisture content - resting angle model and the resting angle - discrete element parameters model. The engineering verification test with the side plate lifting method was conducted, and the relative error was less than or equal to 5.37%. The results showed that the moisture content can be used to predict the discrete element parameters of goat manure directly, and the method had fast prediction speed with high accuracy at the same time. The research results provide a general and reliable method for determining discrete element parameters of goat manure.

Key words: goat manure; moisture content; discrete element; EDEM; calibration; resting angle

收稿日期: 2022-04-18 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 陕西省农业协同创新与推广联盟重大科技项目(LMZD201703)和陕西省重点研发计划项目(2022NY-204, 2019ZDLNY01-05-02)

作者简介: 朱新华(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事西部旱区农业机械技术与装备研究, E-mail: zzh920@nwsuaf.edu.cn

0 引言

粪肥施肥体量大、工费高,而高效的施肥机械较为缺乏。目前,借助离散元法分析肥料颗粒间及肥料与装置间复杂的相互作用已成为施肥机械设计、优化的重要手段,可节约研发成本、缩短周期,提高装置性能^[1-4]。离散元法的应用以准确的离散元参数为前提^[5-6],快速准确标定离散元仿真参数是其在农业工程领域应用的关键^[7]。羊粪是我国北方来源广、抗生素等污染小的有机肥源,其有机质含量高达40%~65%^[8],高于牛粪、马粪、猪粪和鸡鸭鹅等粪肥^[9],在实际生产中受到重视,但腐熟羊粪的离散元参数标定尚未见报道。当前,粪肥离散元参数主要采用虚拟标定试验获得^[10-11],但这些研究所构建的标定方法存在通用性和实用性不足的问题。

国外学者以液态有机肥流体特性的研究为主,而对固态粘湿有机肥离散元参数标定方法的研究尚未见报道^[7]。国内学者基于堆积角试验对有机肥离散元参数标定的研究较多^[12-13],这些研究表明运用堆积角试验标定粪肥离散元参数能得到较为准确的结果。但上述研究均针对特定含水率下的粪肥进行研究,而实际粪肥的含水率范围较大,因此,该方法的通用性不足^[7]。物料的离散元参数受含水率影响较大,特定含水率下标定的离散元参数不能真实反映其它含水率的粪肥与机械之间的作用规律。

基于堆积角试验,罗帅等^[14]对不同含水率的蚯蚓粪基质离散元参数进行标定,建立了堆积角与离散元参数的关系模型;在含水率40%~85%范围内,王黎明等^[15]探索了通过堆积角快速标定猪粪离散元参数的方法。尽管上述研究考虑了含水率对粪肥离散元参数的影响,提高了堆积角-离散元参数模型和标定方法的通用性,但存在以下不足:粪肥堆积角测量的偶然误差大,必须多次测量,且粪肥堆积操作不便,以堆积角-离散元参数模型预测粪肥离散元

参数,实用性不足;研究中仅建立单一的肥料颗粒模型,与实际肥料的粒度分布差异较大^[7],且对所建模型的准确性缺少工程性验证(即用另外一种试验方法验证),所得离散元参数可靠性不足。

因此,针对不同含水率下畜禽粪肥的离散元参数快速标定方法通用性和实用性不足的问题,本文以含水率为31.91%~58.48%的腐熟羊粪为研究对象,通过圆筒提升法^[16]建立粪肥的含水率-堆积角模型;以堆积角为响应值,通过 Plackett - Burman 试验、爬坡试验和 Box - Behnken 试验建立堆积角-离散元参数模型;进而经推导建立羊粪含水率-离散元参数模型,并运用抽板法^[16]进行工程性验证,以期构建一种通用性和实用性强的羊粪离散元参数标定方法。

1 材料与与方法

1.1 试验材料与粒度分布

腐熟羊粪取自陕西省杨陵区西北农林科技大学第三试验站,原始含水率46.81%,密度0.47 g/cm³。在腐熟粪肥通常含水率范围(30%~60%)^[17-19]内通过自然风干法和添加纯净水的方法配制5个含水率梯度,计算方法为^[14]

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

式中 m_s ——配制样品的加水质量,kg

m_0 ——样品质量,kg

ω_0 ——原始含水率,%

ω_1 ——配制样品的目标含水率,%

每次堆积角测量的同时,均取一定量羊粪样品通过烘干法测量其含水率,测得供堆积角试验的5个含水率依次为:31.91%、39.33%、46.81%、53.32%和58.48%,如图1所示。取300 g原始含水率下的羊粪样本,利用振动筛(ZFJ-II型,浙江省上虞市大亨桥化验仪器厂)对其筛分,分析其粒径分布(表1)。

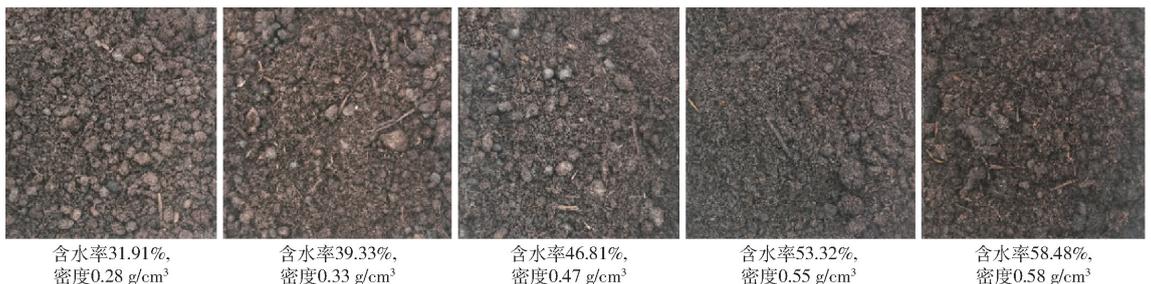


图1 不同含水率的羊粪试样

Fig. 1 Samples of goat manure with different moisture contents

1.2 羊粪堆积角试验及含水率-堆积角模型构建

采用圆筒提升法测定羊粪堆积角^[16]。图2为

试验装置,由电动式拉力试验机(HSV型)、圆筒(内径100 mm、长300 mm)和平台组成^[16,20]。圆筒和平

表1 羊粪粒径分布

Tab.1 Particle size distribution of goat manure

粒径 d/mm	分布百分比/%
[0,1.43]	30.33
(1.43,2.8]	32.57
(2.8,3.6]	17.63
(3.6,4.5]	19.06
>4.5	0.41



图2 圆筒提升法堆积角测试装置

Fig.2 Cylinder lifting resting angle tester

1. 拉力试验机 2. 圆筒 3. 平台

台均为钢材,圆筒直立于平台上。试验前在圆筒内填满羊粪,试验时通过拉力试验机以 20 mm/s 的速度提升圆筒^[16],使羊粪自圆筒下端漏出,形成肥堆,如图3所示。用数显倾角仪从肥堆的4个不同方向测量堆积角。以相同的方法依次对5种含水率羊粪进行堆积角测量,每组试验重复5次,结果取平均值。



图3 堆积角测量

Fig.3 Measurement of resting angle

基于测量结果,建立羊粪含水率-堆积角模型,并分析其相关性。

1.3 羊粪离散元模型构建

(1)接触模型。羊粪流动性差,颗粒间存在粘附力,故采用 Hertz - Mindlin with JKR 模型^[21-22](简称 JKR 模型)。该接触模型内置于 EDEM (2018, EDEM Solutions) 软件中,是一种能体现颗粒粘结性的接触模型,模型基于 Johnson - Kendall - Roberts 理论建立,在 Hertz - Mindlin 接触模型的基础上考虑了接触区域内范德华力对颗粒运动的影响,适用于模拟干粉状物料或含湿颗粒,并通过数值 surface energy 表征颗粒间的粘附力,可较好地模拟羊粪。

(2)颗粒粒径分布及材料本征参数。根据测定的羊粪粒径分布,同时考虑合理简化模型,在 EDEM 仿真中以球形颗粒模拟羊粪,颗粒粒径设置4种,分布如图4所示。

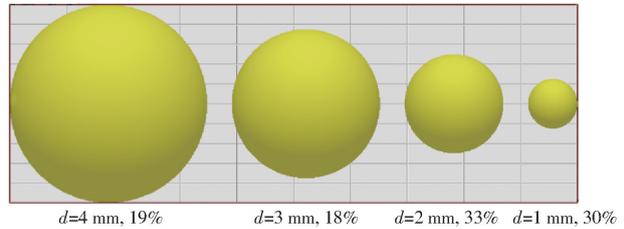


图4 羊粪颗粒模型

Fig.4 Particle models of goat manure

羊粪和钢材的本征参数如表2所示。

表2 羊粪和钢材的本征参数

Tab.2 Intrinsic parameters of goat manure and steel material

材料	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/MPa
羊粪	0.28 ~ 0.58 ^a	0.10 ~ 0.40 ^b	1.00 ~ 10.00 ^b
钢材	7.85 ^b	0.30 ^b	7.90×10^4 ^b

注:a表示该数值为实际测量得到;b表示该数值引自文献[15-16]。

(3)接触参数和 JKR 模型参数。结合 EDEM 通用颗粒材料数据库(Generic EDEM material model database, GEMM 数据库),根据羊粪、钢材的本征参数及文献[10-11,13-14,16]的推荐值,确定接触参数及 JKR 模型参数取值范围如表3所示。

表3 羊粪与钢材接触参数和 JKR 模型参数范围

Tab.3 Contact parameters and JKR model parameter range of goat manure and steel material

参数	数值
羊粪颗粒间恢复系数	0.10 ~ 0.60
羊粪颗粒间静摩擦因数	0.10 ~ 1.00
羊粪颗粒间滚动摩擦因数	0 ~ 0.60
羊粪-钢材恢复系数	0.10 ~ 0.80
羊粪-钢材静摩擦因数	0.20 ~ 0.90
羊粪-钢材滚动摩擦因数	0.10 ~ 1.00
JKR 表面能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)	0 ~ 0.20

1.4 羊粪离散元参数标定及堆积角-离散元参数模型构建

1.4.1 羊粪堆积角仿真方法

仿真过程设置与物理试验一致。设置圆筒提升速度 20 mm/s,生成羊粪颗粒总质量 3 kg,生成速度 0.2 kg/s,仿真固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%,为 7.4×10^{-6} s,数据保存时间间隔为 0.05 s,网格大小为 1.5 mm,仿真总时长为 15 s。仿真几何模型及堆积角测量如图5所示,运用 EDEM 后处理 Clipping 模块在坐标为(1,0,0)和(0,1,0)羊粪堆中

垂面处设置 Clipping Planes Group 截面,运用 Tools 模块中的量角器 Protractor,依次选定 Clipping Planes Group 截面上羊粪堆单侧的斜边、夹角和水平底面线上的 3 个羊粪颗粒作为堆积角 R_1 的 3 个点,获得堆积角数值。

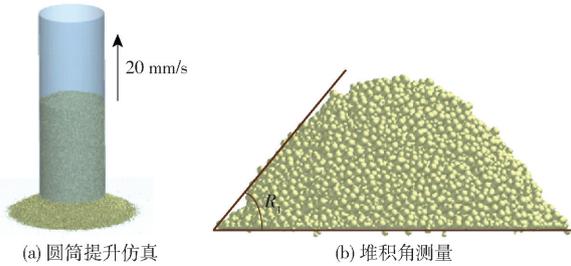


图 5 圆筒提升法仿真

Fig. 5 Simulation of cylinder lifting method

1.4.2 羊粪堆积角-离散元参数模型构建

应用 Design-Expert 8.0 (STAT - EASE) 软件设计 Plackett - Burman (PBD) 试验,以堆积角为响应值,从羊粪的密度、泊松比、剪切模量以及表 3 所示的接触参数和 JKR 模型参数共 10 个参数中筛选对堆积角影响显著的离散元参数。各参数取高、中、低 3 个水平,分别以编码 1、0 和 -1 表示,如表 4 所示,试验方案及结果见 2.2 节。

表 4 Plackett - Burman 试验因素编码

Tab. 4 Factors and levels of Plackett - Burman test

参数	编码		
	-1	0	1
羊粪密度/($g \cdot cm^{-3}$)	0.28	0.47	0.58
羊粪泊松比	0.10	0.25	0.40
羊粪剪切模量/MPa	1.00	5.50	10.00
羊粪颗粒间恢复系数	0.10	0.35	0.60
羊粪颗粒间静摩擦因数	0.10	0.55	1.00
羊粪颗粒间滚动摩擦因数	0	0.30	0.60
羊粪-钢材恢复系数	0.10	0.45	0.80
羊粪-钢材静摩擦因数	0.20	0.55	0.90
羊粪-钢材滚动摩擦因数	0.10	0.55	1.00
JKR 表面能/($J \cdot m^{-2}$)	0	0.10	0.20

为缩小参数范围并确定最优区间,针对显著性参数设计爬坡试验。试验时,非显著性参数取中间水平值,显著性参数按照设计的步长逐步增大,将仿真堆积角与中间水平含水率(46.81%)羊粪物理试验堆积角(41.00°)相对误差最小时的参数作为显著性参数最优区间的中间水平值,以确定最优取值区间。爬坡试验方案及结果见 2.3 节。

基于爬坡试验确定的离散元参数最优区间设计 Box - Behnken 试验,并对试验结果进行模型优化,以建立堆积角与显著性参数的关系模型。采用 3 个中心点进行误差估计,共 15 组试验,每组试验重复

3 次,取堆积角平均值作为试验结果。试验中各显著性参数取爬坡试验优化后的高、中、低 3 个水平,分别以编码 1、0 和 -1 表示,非显著性参数取值同爬坡试验一致,试验方案及结果见 2.4 节。

以 5 个含水率下羊粪物理试验堆积角为目标,对 Box - Behnken 试验得到的堆积角-离散元参数模型求解寻优得到离散元参数的最优组合。基于离散元参数最优组合(非显著性参数取值同爬坡试验一致),运用 EDEM 进行仿真并测量其堆积角,对比仿真堆积角与物理试验堆积角以验证堆积角-离散元参数模型的准确性。

1.5 羊粪含水率-离散元参数模型建立及工程性验证试验

通过堆积角-离散元参数模型能够推测离散元参数,但粪肥堆积角测量误差大、过程繁琐,而含水率测量精度高、简便。因此,基于羊粪含水率-堆积角模型和羊粪堆积角-离散元参数模型推导,建立羊粪含水率-离散元参数模型,以构建通用性和实用性好、准确度高的离散元参数标定方法。

为评价基于圆筒提升法建立的含水率-离散元参数模型的可靠性,通过另外一种堆积角试验方法——抽板法^[17, 20]对模型进行工程性验证。验证过程中,仿真与物理试验方法一致,图 6 为基于抽板法的堆积角仿真与物理验证试验。

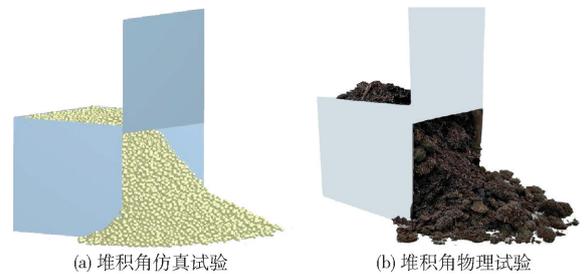


图 6 基于抽板法的堆积角仿真与物理验证试验

Fig. 6 Resting angle simulation and physical verification test based on side plate lifting method

在含水率 31.91% ~ 58.48% 范围内随机配制 3 个不同含水率的羊粪,并分别测量其物理试验堆积角;根据推导出的含水率-离散元参数模型求解,得到 3 个含水率下的羊粪离散元参数最优组合;以离散元参数最优组合进行仿真,分别得到仿真堆积角。对比物理试验堆积角与仿真堆积角以验证羊粪含水率-离散元参数模型的准确性。每组试验重复 5 次,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 含水率-堆积角模型构建

物理试验测定的不同含水率羊粪样本的堆积角如表 5 所示。

表5 不同含水率羊粪的堆积角

Tab.5 Resting angle of goat manure with different moisture contents

含水率/%	31.91	39.33	46.81	53.32	58.48
堆积角/(°)	37.50	38.90	41.00	43.20	45.40
堆积角标准差/(°)	0.50	0.20	0.14	0.45	0.70

根据表5,以羊粪样本的含水率与堆积角拟合多项式,得到含水率-堆积角模型

$$R_1 = 0.0055x^2 - 0.2022x + 38.329 \quad (2)$$

式中 x ——羊粪含水率, %

模型相关系数达0.9999,拟合曲线如图7所示。在含水率31.91%~58.48%范围内,羊粪堆积角随含水率升高而增大。羊粪属于散粒体物料,随着含水率的增大,羊粪颗粒间的粘度增大,流动性变差,故其堆积角变大。

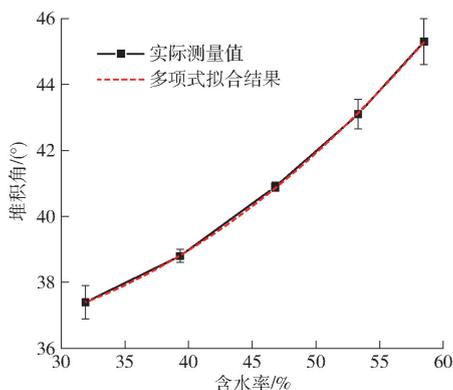


图7 羊粪含水率与堆积角关系曲线

Fig.7 Relationship curve between moisture content and resting angle of goat manure

2.2 显著性参数筛选结果与分析

基于Design-Expert 8.0软件设计PBD试验,试验方案与结果如表6所示,A~J为因素编码值。

表6 Plackett-Burman 试验方案与结果

Tab.6 Scheme and results of Plackett-Burman test

试验序号	因素											堆积角/(°)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	57.65
2	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	23.57
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10.47
4	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	65.24
5	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	22.01
6	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	28.37
7	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	42.33
8	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	80.14
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41.02
10	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	42.39
11	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	23.27
12	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	49.37
13	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	28.36

注:K为空白列。

表7为PBD试验结果显著性分析。

表7 Plackett-Burman 试验结果显著性分析

Tab.7 Significance analysis of Plackett-Burman test results

方差来源	效应	均方和	P	显著性序号
A	-4.53	464.25	0.1839	7
B	-5.93	61.61	0.1207	4
C	0.14	105.32	0.9569	10
D	3.21	30.88	0.2929	9
E	9.96	297.31	0.0482*	3
F	13.88	578.1	0.0257*	2
G	-4.64	64.54	0.1776	6
H	3.49	36.51	0.2640	8
I	5.75	99.13	0.1268	5
J	33.51	3369.1	0.0046**	1

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

根据表7,JKR表面能 $J(P < 0.01)$ 对羊粪堆积角影响极显著,颗粒间滚动摩擦因数 F 和静摩擦因数 $E(P < 0.05)$ 对羊粪堆积角影响显著,且3个参数对堆积角的影响均为正效应。分析其原因为:①随着JKR表面能增大,羊粪颗粒间的粘附性能增强,从而影响羊粪颗粒的流动性,因此,堆积角增大。②由于颗粒流动表现为颗粒与颗粒间的滚动和滑动,因此,影响颗粒流动性的主要参数为颗粒间滚动摩擦因数和静摩擦因数。当滚动摩擦因数和静摩擦因数增大时,颗粒间的滚动和滑动受阻,流动性变差,堆积角增大。③模型中的羊粪由4种不同粒径的球型颗粒组成,而球体模型的运动方式以滚动为主,因此,滚动摩擦因数比静摩擦因数对堆积角的影响更显著。

为方便后续试验,在爬坡试验、Box-Behnken试验和验证试验中只考虑3个显著性参数,不显著因素取中间水平值^[13]。

2.3 离散元参数最优区间确定

爬坡试验方案与结果如表8所示,可知,当JKR表面能为 0.05 J/m^2 、羊粪颗粒间滚动摩擦因数为0.15、静摩擦因数为0.30时,仿真堆积角与物理试

表8 爬坡试验方案与结果

Tab.8 Scheme and results of climbing test

试验序号	因素			仿真堆积角/(°)	相对误差/%
	JKR表面能/ $(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$	羊粪颗粒间滚动摩擦因数	羊粪颗粒间静摩擦因数		
1	0	0	0.10	20.76	48
2	0.05	0.15	0.30	39.13	2
3	0.10	0.30	0.50	55.15	38
4	0.15	0.45	0.70	66.92	67
5	0.20	0.60	0.90	68.15	70

验堆积角相对误差最小,为 2%,即该组参数为显著性参数最优区间的中间水平值,对应最优区间分别为 [0,0.10]、[0,0.30]、[0.10,0.50]。

2.4 堆积角-离散元参数模型建立

Box - Behnken 试验方案与结果如表 9 所示,决定系数 $R^2 = 0.9838$,校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.9716$,变异系数为 4.75%,精密为 28.597。建立堆积角-离散元参数模型并对其优化后,方差分析如表 10 所示。

表 9 Box - Behnken 试验方案与结果

Tab.9 Scheme and results of Box - Behnken test

试验 序号	因素			仿真堆积角/ (°)
	E	F	J	
1	1	0	-1	37.50
2	1	0	1	55.69
3	-1	-1	0	35.53
4	-1	1	0	55.01
5	0	0	0	39.04
6	0	-1	-1	24.07
7	0	-1	1	49.40
8	1	-1	0	47.49
9	0	1	-1	38.18
10	-1	0	1	51.57
11	-1	0	-1	21.88
12	1	1	0	63.03
13	0	1	1	60.24
14	0	0	0	38.21
15	0	0	0	37.45

表 10 Box - Behnken 试验模型方差分析

Tab.10 ANOVA of Box - Behnken model

方差来源	均方和	自由度	均方	P
模型	2081.29	6	346.88	<0.0001**
E	197.21	1	197.21	0.0001**
F	449.55	1	449.55	<0.0001**
J	1134.55	1	1134.55	<0.0001**
EJ	33.06	1	33.06	0.0241*
E ²	112.7	1	112.7	0.0009**
F ²	172.8	1	172.8	0.0002**
残差	34.33	8	4.29	
失拟项	33.06	6	5.51	0.1065
纯误差	1.26	2	0.63	
总和	2115.62	14		

根据试验结果及方差分析,E、F、J、E²、F²均对羊粪堆积角影响极显著,EJ对羊粪堆积角影响显著。建立的羊粪堆积角-离散元参数模型为

$$R_1 = 37.04 + 4.96E + 7.50F + 11.91J - 2.88EJ + 5.51E^2 + 6.82F^2 \quad (3)$$

2.5 堆积角-离散元参数模型验证

以 5 个含水率羊粪样本物理试验堆积角为目标

求解寻优,分别获得 5 组离散元参数(JKR 表面能、颗粒间滚动摩擦因数和静摩擦因数)的最优组合,如表 11 所示。

表 11 不同含水率下羊粪离散元参数最优值及验证试验结果

Tab.11 Optimal value of goat manure discrete element parameters and verification test results under different moisture contents

含水率/ %	JKR 表 面能/ (J·m ⁻²)	羊粪颗粒 间滚动摩 擦因数	羊粪颗粒 间静摩擦 因数	仿真堆积 角/ (°)	相对 误差/ %
31.91	0	0.07	0.10	37.03	1.25
39.33	0.01	0.02	0.28	38.66	0.62
46.81	0.01	0.05	0.45	40.07	2.27
53.32	0.03	0.23	0.45	43.64	1.02
58.48	0.09	0.30	0.50	46.50	2.42

当含水率为 58.48% 时,仿真和物理试验获得的羊粪堆积角如图 8 所示。由表 11 可知,由堆积角-离散元参数模型确定 3 个显著性离散元参数的最优组合后,各含水率羊粪仿真堆积角与物理试验堆积角的相对误差小于等于 2.42%,表明建立的模型可用于离散元参数确定。

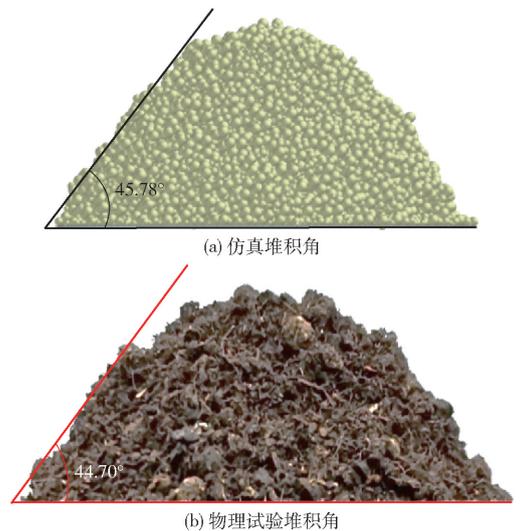


图 8 仿真与物理试验获得的堆积角

Fig.8 Resting angle obtained by simulation and physical test

2.6 含水率-离散元参数模型构建及验证

为准确、快速标定离散元参数,基于含水率-堆积角模型和堆积角-离散元参数模型,由式(2)、(3)推导获得含水率与离散元参数(JKR 表面能、颗粒间滚动摩擦因数和静摩擦因数)的模型,即含水率-离散元参数模型

$$4.96E + 7.50F + 11.91J - 2.88EJ + 5.51E^2 + 6.82F^2 = 0.0055x^2 - 0.2022x + 1.289 \quad (4)$$

根据式(4),可通过含水率直接得到离散元参数组合目标值。即借助 Design-Expert 8.0 软件中的

模型目标值寻优求解,得到离散元参数组合。

基于羊粪含水率-离散元参数模型,获得3组随机含水率下的羊粪离散元参数最优组合,通过抽板

法物理试验与仿真分别获得羊粪物理试验堆积角与仿真堆积角,如图9所示。每组试验重复5次,结果取平均值,测量结果如表12所示。

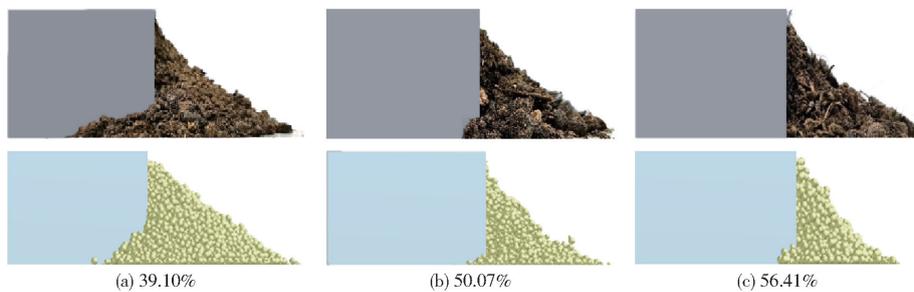


图9 抽板法试验与仿真对比

Fig.9 Comparisons of test and simulation with side plate lifting method

表12 抽板法验证试验结果

Tab.12 Verification test results of side plate lifting

method

含水率/ % (J·m ⁻²)	JKR 表面能/ (J·m ⁻²)	羊粪颗 粒间滚 动摩擦 因数	羊粪颗 粒间静 摩擦 因数	仿真 堆积 角/ (°)	物理试 验堆积 角/ (°)	相对 误差/ %
39.10	0.01	0.07	0.19	37.02	39.12	5.37
50.07	0.02	0.23	0.37	42.91	42.06	2.02
56.41	0.06	0.30	0.50	45.57	44.02	3.52

由表12可知,3组试验中仿真堆积角与物理试验堆积角的相对误差小于等于5.37%。表明建立的含水率-离散元参数模型可靠。

羊粪含水率-离散元参数模型的相对误差略大于堆积角-离散元参数模型,这是由于模型验证试验中采用了不同于圆筒提升法的抽板法。抽板法在此作为工程验证,能进一步反映模型的可靠性。两个模型的相对误差均较小,说明建立的两种模型均可用于离散元参数的预测。

建立的羊粪含水率-堆积角模型与罗帅等^[14]研究的蚯蚓粪基质含水率与堆积角关系变化趋势一致,且筛选得到的显著性参数相同,分别为JKR表面能、颗粒间滚动摩擦因数和静摩擦因数。建立的堆积角-离散元参数模型相对误差小于等于2.42%,均小于含水率25%~65%的蚯蚓粪基质^[23]以及含水率40%~85%的猪粪^[15]堆积角预测模型误差。建立的含水率-离散元参数模型通过工程性

验证,相对误差小于等于5.37%,表明模型可靠。由于含水率测量比堆积角测量准确性高、易操作,考虑到离散元参数预测模型的实际应用,建立的含水率-离散元参数模型比堆积角-离散元参数模型更具实用性。两种模型均能适应有机肥料不同含水率下离散元参数标定,具有通用性。

3 结论

(1)基于圆筒提升法物理试验建立了31.91%~58.48%范围内羊粪含水率-堆积角模型,模型相关系数为0.9999。

(2)通过Plackett-Burman试验和爬坡试验确定了含水率31.91%~58.48%的羊粪离散元显著性参数及其最优区间:JKR表面能为0~0.10 J/m²、羊粪颗粒间滚动摩擦因数为0~0.30、静摩擦因数为0.10~0.50;通过Box-Behnken试验建立了羊粪堆积角-离散元参数模型,模型 $P < 0.0001$,相对误差小于等于2.42%。

(3)基于含水率-堆积角模型和堆积角-离散元参数模型推导,建立了含水率-离散元参数模型;采用抽板法试验验证了羊粪含水率-离散元参数模型的可靠性,相对误差小于等于5.37%。

(4)基于建立的含水率-离散元参数模型和堆积角-离散元参数模型,均可求解出特定含水率下羊粪离散元显著性参数的最优组合,对不同含水率羊粪参数标定具有通用性和实用性。

参 考 文 献

- [1] 孙聪,曹亮,史志明,等. 基于离散元法的施肥机排肥性能分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3): 50-56. SUN Cong, CAO Liang, SHI Zhiming, et al. Analysis on fertilizer performance of fertilizer machine based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 50-56. (in Chinese)
- [2] ZHAO Hongbo, HUANG Yuxiang, LIU Zhengdao, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery: a review[J]. Agriculture, 2021, 11(5):11050425.
- [3] 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 22-29. MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 22-29. (in Chinese)

- [4] 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5):1-6.
YU Jianqun, FU Hong, LI Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5):1-6. (in Chinese)
- [5] 刘羽平,张拓,刘好. 稻谷颗粒模型离散元接触参数标定与试验[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(11): 70-76.
LIU Yuping, ZHANG Tuo, LIU Yu. Calibration and experiment of contact parameters of rice grain based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(11): 70-76. (in Chinese)
- [6] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 118: 117-122.
- [7] 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)
- [8] 芦伟,高月锋,简路洋,等. 羊粪作为有机肥对植物和土壤的影响[J]. 家畜生态学报, 2019, 40(9): 86-90.
LU Wei, GAO Yuefeng, JIAN Luyang, et al. Application effect of sheep manure on plant and soil[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2019, 40(9): 86-90. (in Chinese)
- [9] 王小龙,刘凤之,史祥宾,等. 不同有机肥对葡萄根系生长和土壤养分状况的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 177-184.
WANG Xiaolong, LIU Fengzhi, SHI Xiangbin, et al. Effects of organic fertilizers on root growth and soil nutrient of grape[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(5): 177-184. (in Chinese)
- [10] YUAN Quanchun, XU Liming, MA Shuai, et al. Calibration of simulation parameters of fermented sheep manure organic fertilizer based on skateboard test[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2020, 29(2): 1-8.
- [11] 石林榕,赵武云,孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 181-187.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 181-187. (in Chinese)
- [12] XIE Can, YANG Jingwei, WANG Baoshuai, et al. Parameter calibration for the discrete element simulation model of commercial organic fertilizer[J]. International Agrophysics, 2021, 35(1):107-117.
- [13] 韩树杰,戚江涛,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)
- [14] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343-350. (in Chinese)
- [15] 王黎明,范盛远,程红胜,等. 基于EDEM的猪粪接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 95-102.
WANG Liming, FAN Shengyuan, CHENG Hongsheng, et al. Calibration of contact parameters for pig manure based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15): 95-102. (in Chinese)
- [16] 袁全春,徐李明,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)
- [17] 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)
- [18] 孙永明. 规模化蚯蚓反应器系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.
SUN Yongming. Vermicomposting engineering system for organic waste conversion in large scale [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [19] KWAG J H, KIM J H, CHO S H, et al. Investigation on the characteristics of vertical composting system using layer manure [J]. Journal of Animal Environmental Science, 2010, 16(3): 237-244.
- [20] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese)
- [21] 贺一鸣,向伟,吴明亮,等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的标定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 216-220.
HE Yiming, XIANG Wei, WU Mingliang, et al. Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(2): 216-220. (in Chinese)
- [22] MUDARISOV S, FARKHUTDINOV I, KHAMALETDINOV R, et al. Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105228.
- [23] 林嘉聪,罗帅,袁巧霞,等. 不同含水率蚯蚓粪颗粒物料流动性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 221-227.
LIN Jiacong, LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, et al. Flow properties of vermicompost particle with different moisture contents[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 221-227. (in Chinese)