

温室劣苗基质离散元仿真参数标定

王小琴¹ 俞高红^{1,2} 刘霓红³ 童俊华^{1,2} 王钦源¹

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 广东省现代农业装备研究所, 广州 510630)

摘要: 穴盘育苗中劣质钵苗会影响后期种苗移栽成活率, 现有机械式剔除存在颗粒散落遗漏现象, 而气吸式剔除方式则可以很好地弥补这一缺陷。为解析钵苗基质气吸式剔除的机理, 本文开展离散元仿真的参数标定试验。选取 100 g 基质进行粒径分布检测, 采用漏斗静置, 基于图像处理获取基质两侧实际堆积角, 通过 Plackett – Burman 实验确定影响基质堆积角的 4 个因素; 通过最陡爬坡实验确定显著因素最大响应区域; 依据 Box – Behnken 实验建立二阶回归模型并求解最佳参数组合。结果表明, 在不显著因素取中间值时, 当基质颗粒–颗粒碰撞恢复系数为 0.142、基质颗粒–颗粒滚动摩擦因数为 0.097、基质颗粒–不锈钢静摩擦因数为 0.223 和基质 JKR 表面能为 2.325 J/m² 时, 所得仿真堆积角 φ 为 33.4°, 与实际堆积角 θ 为 34.19° 的相对误差为 2.31%, 满足试验需求, 所得标定参数可用于钵苗基质的离散元仿真。

关键词: 劣苗; 温室; 基质; 离散元; 参数标定

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)12-0359-08 **OSID:** 

Calibration of Discrete Element Simulation Parameters for Greenhouse Inferior Seedling Substrate

WANG Xiaojin¹ YU Gaohong^{1,2} LIU Nihong³ TONG Junhua^{1,2} WANG Qinyuan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China
3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The presence of inferior bowl seedlings in hole tray seedling cultivation would affect the survival rate of later seeding transplantation. It is urgent to clean the substrate of these holes. The existing mechanical removal methods often have the phenomenon of particle scattering and omission, while the air suction removal method can effectively compensate for this defect. In order to analyze the mechanism of air suction removal of bowl seedling substrate, parameter calibration experiments for discrete element simulation research were conducted. Totally 100 g of matrix was selected for particle size distribution detection and then a funnel was used to stand still. Based on image processing, the actual stacking angle on both sides of the matrix was obtained, the average value was calculated which was used as the response value. Through the Plackett – Burman experiment to screen for four significant factors that affected the stacking angle of the matrix. The maximum response area of significant factors was determined through the steepest climbing experiment. A second-order regression model was establish based on the Box – Behnken experiment and solved for the optimal parameter combination. The results showed that on the premise of taking the intermediate value of insignificant factors, when the matrix particle – particle collision coefficient of restitution A was 0.142, the matrix particle – particle rolling friction coefficient C was 0.097, the matrix particle – stainless steel static friction factor E was 0.223 and the matrix JKR surface energy G was 2.325 J/m², the simulated stacking angle was 33.4°, and the relative error with the actual stacking angle of 34.19° was 2.31%. The research result can meet the experimental requirements, and the obtained calibration parameters can be used for discrete element simulation of bowl seedling matrix.

Key words: inferior seedlings; greenhouse; matrix; discrete element; parameter calibration

收稿日期: 2023 – 05 – 18 修回日期: 2023 – 07 – 19
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2000600)和浙江省领雁研发攻关计划项目(2022C02026)
作者简介: 王小琴(1994—),女,博士生,主要从事农业装备智能化技术研究,E-mail: 1129233798@qq.com
通信作者: 童俊华(1984—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业装备智能化技术研究,E-mail: jhtong@zstu.edu.cn

0 引言

温室穴盘育苗作为一种常见的培育幼苗方式,经常会出现漏播、幼苗发育不良等现象。传统基质剔除方式以机械式末端直插为主,崔永杰等^[1]提出采用气吸式剔除方式将穴孔中的劣苗基质块剔除,结果表明基质平均剔净率 90% 以上。但是,目前关于基质气吸式剔除仍以经验设计为主,尚存在剔除机理不明、剔除方案不佳等问题。而且由于黏附状基质颗粒流动性差,在进行吸附式剔除时极易出现结块、堵塞输送管路等情况,不利于基质顺利剔除^[2-3],因此,有必要研究此类粘性小颗粒物质的物性参数,准确了解其吸附流动规律,以便于有针对性地设计特定吸附装备来解决上述问题^[4-6]。

离散单元法在物质松散流动、颗粒团聚体破碎及吸附机械与基质互作方面应用广泛^[7-9]。目前常用的方法是通过参数标定实验确定,其实质是建立物理实验与仿真实验之间的二阶回归模型,并基于特定响应值求解模型最优解,所求最优解即为待标定离散元参数^[10-11]。针对麦类植物果实、饲料颗粒等大粒径物质,文献[12-13]选取对谷物堆积角影响较大的因素进行参数标定,并进行正交实验得到最佳参数组合。针对不同含水率颗粒基质,文献[14-16]以煤散料流动性为特点,以堆积角作为最终指标,对煤颗粒模型接触参数进行标定实验,得到对堆积角形成的各因素影响由大到小:煤-煤静摩擦因数、煤-煤滚动摩擦因数、煤-钢静摩擦因数、煤-煤表面能,其他参数影响不足 1%,并针对煤炭干颗粒与湿颗粒分别进行了验证;文献[17-18]针对粉体小粒径物质,根据颗粒间的接触原理和量纲分析进行了合理缩放,将平均粒径分布在 0.212 mm 左右的小麦粉放大至 1.2 mm,有效解决了仿真时间过长等问题;文献[19-20]针对土壤颗粒直接测量困难,间接测量误差大等问题,以土壤堆积角、粘聚力和内摩擦角为目标,通过高斯-牛顿迭代法得出土壤颗粒半径、颗粒间静摩擦因数及滚动摩擦因数最佳参数组合。文献[21-23]采用响应面和机器学习对比显著性参数优化效果,结合遗传算法和 BP 神经网络得到最佳仿真参数组合,与实际堆积角相对误差为 1.09%,相比响应面算法减小 2.24 个百分点。以上这些关于颗粒大小不等、水分不一、求解方法各异的标定实验为研究基于颗粒黏附状基质堆积角响应的离散元参数标定提供了借鉴。

目前,基于离散单元法进行标定的实验,关于单一均匀颗粒物质的标定较为成熟,而育苗基质作为一种多类型颗粒混合的复杂物质,其组成及结构与

单一颗粒物质不完全相同,因此需要具体深入分析。由于颗粒状基质在育苗过程中为保证幼苗成活率需要浇注一定水分,容易造成劣苗基质在剔除过程中因含水率而结块,当基质内聚力较大时,基质颗粒之间流动不畅,需要研究其具体接触模型。而 JKR 模型即“Hertz - Mindlin with JKR”接触模型可以很好地表征含凝聚力颗粒间接触特性^[24-25]。因此,本文应用离散元分析软件 EDEM,对一定含水率基质颗粒进行参数标定实验,以实验测得的基质堆积角平均值为响应值,结合基本实验参数进行基质离散元仿真,确定显著因子,通过最陡爬坡实验缩短最优区间,并建立显著性响应因子与响应值之间的二阶回归方程,最后求解标定预测值和实际值之间的最小差,以快速找到显著因子最优参数组合。

1 模型建立

1.1 实验材料

实验所用基质来自杭州市萧苗农业有限公司,主要成分是泥炭、蛭石、珍珠岩,按质量比 6:3:1 配比而成,同一生长环境下保持各穴孔苗坨含水率相同且不低于 60%。随机选取 200 孔劣苗基质充分混合并取其中 100 g 进行试验,利用标准筛网对所得基质进行筛分测量,得到混合基质平均粒径分布。

1.2 筛选接触模型

假设两基质颗粒曲率半径分别为 R_i 和 R_j ,用弹簧和阻尼器等表征颗粒间法向及切向作用。如图 1 所示,颗粒状基质在吸附输送过程中颗粒间相互接触力可分为:法向弹力 F_{JKR} 、法向阻尼力 F_n^d 、切向弹力 F_τ 、切向阻尼力 F_τ^d ,其中法向弹力颗粒表征基质颗粒间粘结特性,计算式为

$$F_{JKR} = \frac{4E^* \alpha^3}{3R^*} - \sqrt{8\pi\Delta\gamma E^* \alpha^3}$$
 (1)

法向重叠量计算式为

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} - \sqrt{\frac{2\pi\Delta\gamma\alpha}{E^*}}$$
 (2)

接触半径计算式为

$$\alpha = R_i + R_j - |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$$
 (3)

$$b = \sqrt{\alpha R^*}$$
$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$$
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j}$$
$$\Delta\gamma = \gamma_i + \gamma_j - \gamma_{ij}$$

式中 δ ——法向重叠量, m
 α ——接触半径, m
 R^* ——当量半径, m

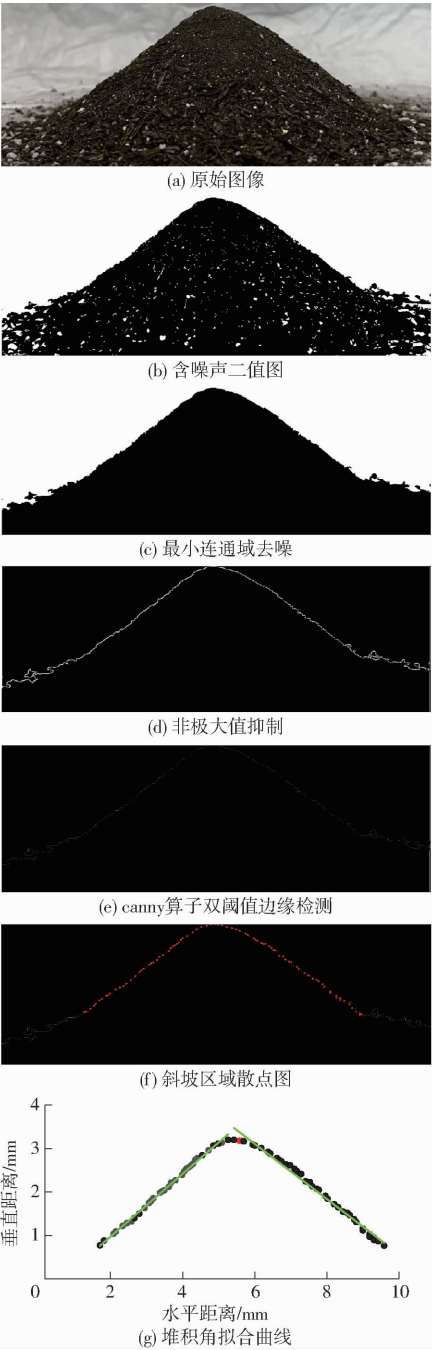


图 4 基质堆积角测量

Fig. 4 Measurement of matrix stacking angle

表 1 离散元仿真初始参数

Tab. 1 Discrete element simulation initial parameters

参数	数值	数据来源
泊松比	0.246 ~ 0.5	文献[3,26]
剪切模量/Pa	$1.6 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^7$	文献[3,26]
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	793.9 ~ 2 650	文献[1,26]
基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A	0.12 ~ 0.26	文献[1,3,26]
基质颗粒-颗粒静摩擦因数 B	0.427 ~ 0.65	文献[1,26]
基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C	0.02 ~ 0.345	文献[3,26]
基质颗粒-不锈钢碰撞恢复系数 D	0.12 ~ 0.20	文献[3,26]
基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E	0.20 ~ 0.30	文献[1,3,26]
基质颗粒-不锈钢滚动摩擦因数 F	0.02 ~ 0.035	文献[1,3,26]
基质 JKR 表面能 $G/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	1.513 ~ 5.728	文献[26]

表 2 因素水平

Tab. 2 Horizontal distribution of each parameter

因素	水平	
	低水平(-1)	高水平(1)
基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A	0.120	0.260
基质颗粒-颗粒静摩擦因数 B	0.427	0.650
基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C	0.020	0.345
基质颗粒-不锈钢碰撞恢复系数 D	0.120	0.200
基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E	0.200	0.300
基质颗粒-不锈钢滚动摩擦因数 F	0.020	0.035
基质 JKR 表面能 $G/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	1.513	5.728

2.3 最陡爬坡试验

在基质 JKR 表面能 G 、基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 、基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A 和基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E 这 4 个显著参数初定范围内等量划分逐步插入 4 组数据,基于原有高低水平共得到 6 组爬坡结果,结果如表 5 所示。由表 5 可

表 3 PB 试验方案及结果

Tab. 3 Design and results of Plackett – Burman experimental scheme

序号	因素							堆积角/ ($^{\circ}$)
	基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数	基质颗粒-颗粒静摩擦因数	基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数	基质颗粒-不锈钢碰撞恢复系数	基质颗粒-不锈钢静摩擦因数	基质颗粒-不锈钢滚动摩擦因数	基质 JKR 表面能	
1	-1	1	1	-1	1	1	1	49
2	-1	-1	-1	1	-1	1	1	44
3	-1	1	1	1	-1	-1	-1	25
4	1	-1	1	1	-1	1	1	60
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	6
6	1	-1	1	1	1	-1	-1	17
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	45
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	26
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	69
10	1	1	-1	-1	-1	1	-1	16
11	-1	1	-1	1	1	-1	1	41
12	1	1	-1	1	1	1	-1	17

表 4 PB 试验参数方差分析

Tab.4 Significance analysis of Plackett – Burman					
test parameters					
参数	均方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性排序
<i>A</i>	90.75	1	2.04	0.226 8	3
<i>B</i>	30.08	1	0.674 8	0.457 5	5
<i>C</i>	494.08	1	11.08	0.029 1 *	2
<i>D</i>	4.08	1	0.091 6	0.777 3	7
<i>E</i>	52.08	1	1.17	0.340 6	4
<i>F</i>	6.75	1	0.151 4	0.717 0	6
<i>G</i>	3 366.75	1	75.52	0.001 0 *	1

注：* 表示对模型影响显著 ($P<0.05$)。

表 5 最陡爬坡试验结果

Tab.5 Results of the steepest climbing experiment						
因素						
序号	基质颗	基质颗	基质颗	基质 JKR	堆积	相对
	粒-颗粒	粒-颗粒	粒-不锈	表面能	角/	误差/
	碰撞恢复	滚动摩	钢静摩擦	<i>G</i> /	(°)	%
	系数 <i>A</i>	擦因数 <i>C</i>	因数 <i>E</i>	(J·m ⁻²)		
1	0.120	0.020	0.20	1.513	24	29.81
2	0.148	0.085	0.22	2.356	32	6.41
3	0.176	0.150	0.24	3.199	39	14.07
4	0.204	0.215	0.26	4.042	49	43.32
5	0.232	0.280	0.28	4.885	54	57.94
6	0.260	0.345	0.30	5.728	61	78.41

知,最陡爬坡在第 2 组数据时相对误差最小,故而选取第 2 组参数为最优选,与之相邻最近的第 1 组和第 3 组数据分别为高水平和低水平仿真试验数据。

2.4 最优参数求解

基于最陡爬坡试验结果,进行 Box – Behnken (简称 BB) 试验,对前述 4 个显著参数在最陡爬坡结果选定范围内进行四因素三水平响应面分析,试验结果如表 6 所示。 a 、 c 、 e 、 g 为因素编码。由表 6 可知,基质颗粒堆积角与上述 4 个参数之间的二次回归模型为

$$\theta = 33.78 + 0.025a + 4.1c + 2.75e + 7.25g + 3.53ac - 0.675ae - 1.43ag + 0.375ce + 2.6cg - 2.65eg - 3a^2 + 1.27c^2 + 0.1225e^2 + 3.25g^2 + 1.07a^2c - 3.32a^2e - 1.58a^2g + 2.3ac^2 + 1.95ae^2 - 2.98c^2e + 8.35c^2g - 1.83ce^2 + 4.43a^2c^2 + 6.67a^2e^2$$

对表 6 试验结果进行方差分析,结果如表 7 所示,由表 7 可知,基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 与基质 JKR 表面能 G 对堆积角的影响显著 ($P < 0.05$),基质 JKR 表面能 G 的影响最大,其次为基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C ,随着二者取值的增大,堆积角也越来越大,而基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A 与基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E 对堆积角的影响则较小,这也与 PB 试验结果相吻合;各因素对堆积角的影响由大到小为:基质 JKR 表面能 G 、基质颗

表 6 响应面分析结果

Tab.6 Response surface analysis results					
试验 序号	因素				堆积角/ (°)
	基质颗粒- 颗粒碰撞 恢复系数 <i>a</i>	基质颗粒- 颗粒滚动 摩擦因数 <i>c</i>	基质颗粒- 不锈钢静 摩擦因数 <i>e</i>	基质 JKR 表面能 <i>g</i>	
1	1	0	0	-1	29.8
2	-1	0	0	1	41.1
3	0	1	0	-1	24.2
4	0	0	0	0	33.9
5	-1	-1	0	0	32.5
6	0	1	1	0	37.6
7	0	-1	0	-1	21.2
8	0	0	-1	-1	35.3
9	-1	0	-1	0	35.5
10	0	0	0	0	35.4
11	0	-1	-1	0	33.5
12	0	-1	1	0	32.3
13	-1	0	1	0	35.7
14	0	-1	1	1	47.2
15	0	0	0	1	44.3
16	1	0	0	1	38.3
17	0	1	0	1	60.6
18	1	1	0	0	47.5
19	0	0	1	1	44.5
20	1	-1	0	0	30.1
21	0	1	-1	0	37.3
22	0	0	0	0	32.4
23	0	0	0	0	32.6
24	0	0	-1	-1	24.5
25	-1	0	0	-1	26.9
26	0	0	0	0	34.6
27	1	0	1	0	38.3
28	-1	0	0	0	35.8
29	1	0	-1	0	40.8

表 7 响应面试验方差分析

Tab.7 Analysis of variance in response surface methodology					
方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 772.16	24	73.84	44.70	0.0010
<i>a</i>	0.002 5	1	0.002 5	0.0015	0.970 8
<i>c</i>	67.24	1	67.24	40.70	0.003 1
<i>e</i>	30.25	1	30.25	18.31	0.012 9
<i>g</i>	210.25	1	210.25	127.27	0.000 4
<i>ac</i>	49.70	1	49.70	30.09	0.005 4
<i>ae</i>	1.82	1	1.82	1.10	0.352 8
<i>ag</i>	8.12	1	8.12	4.92	0.090 9
<i>ce</i>	0.562 5	1	0.562 5	0.340 5	0.590 9
<i>cg</i>	27.04	1	27.04	16.37	0.015 5
<i>eg</i>	28.09	1	28.09	17.00	0.014 6
<i>a</i> ²	18.49	1	18.49	11.19	0.028 7
<i>c</i> ²	6.82	1	6.82	4.13	0.112 0
<i>e</i> ²	0.063 2	1	0.063 2	0.038 2	0.854 5
<i>g</i> ²	44.41	1	44.41	26.88	0.006 6
<i>a</i> ² <i>c</i>	2.31	1	2.31	1.40	0.302 4
<i>a</i> ² <i>e</i>	22.11	1	22.11	13.38	0.021 6
<i>a</i> ² <i>g</i>	4.96	1	4.96	3.00	0.158 1
<i>ac</i> ²	10.58	1	10.58	6.40	0.064 6
<i>ae</i> ²	7.61	1	7.61	4.60	0.098 5
<i>c</i> ² <i>e</i>	17.70	1	17.70	10.72	0.030 7
<i>c</i> ² <i>g</i>	139.44	1	139.44	84.41	0.000 8
<i>ce</i> ²	6.66	1	6.66	4.03	0.115 1
<i>a</i> ² <i>c</i> ²	19.58	1	19.58	11.85	0.026 2
<i>a</i> ² <i>e</i> ²	44.56	1	44.56	26.97	0.006 5
纯误差	6.61	4	1.65		
总和	1 778.77	28			

粒-颗粒滚动摩擦因数 C 、基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A 、基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E 。

由表 7 可知 4 个显著因素两两交互时对堆积角

影响由大到小依次为 AC 、 EG 、 CG 、 AG 、 AE 及 CE 。取 AC 、 EG 、 CG 交互响应曲面进行深入分析,结果如图 5 所示。

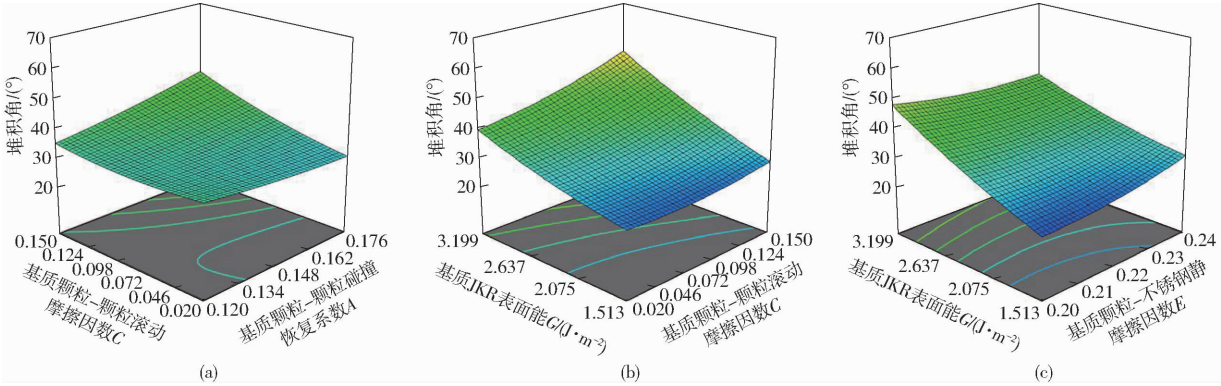


图 5 交互响应曲面
Fig. 5 Interaction response surfaces

由图 5a 可知,当基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A 不变时,堆积角随着基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 的增大而增大,变化趋势由平缓到逐渐陡峭;当基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 较小时,堆积角随基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A 的增大而轻微减小;当基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 取值较大时,堆积角随基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A 的增大而增大,变化趋势逐渐明显。

由图 5b 可知,当基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 不变时,堆积角随着基质 JKR 表面能 G 的增大而明显增大,且变化趋势非常明显;当基质 JKR 表面能 G 不变时,堆积角也随着基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 的增大而增大,但变化趋势相较于 JKR 的变化明显减弱。

由图 5c 可知,当基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E 不变时,堆积角随着基质 JKR 表面能 G 的增大而增大,且变化趋势由强到弱;当基质 JKR 表面能 G 不变时,堆积角随着基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E 的增大而先增大后减小。

3 最优参数组合与试验验证

应用 Design-Expert 软件,以物理试验测量得到的基质实际堆积角为目标值,对二阶回归方程求最优解,所得最优参数组合为:基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数 A 为 0.142、基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 为 0.097、基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E 为 0.223 和基质 JKR 表面能 G 为 2.325 J/m^2 ;将参数代入 EDEM 中进行基质颗粒堆积角仿真,所得实际结果与仿真结果对比如图 6 所示。仿真堆积角 φ 为 33.4° ,两者相对误差为 2.31%,仿真与试验误差相对较小,表明研究所得参数标定结果可用于基质离

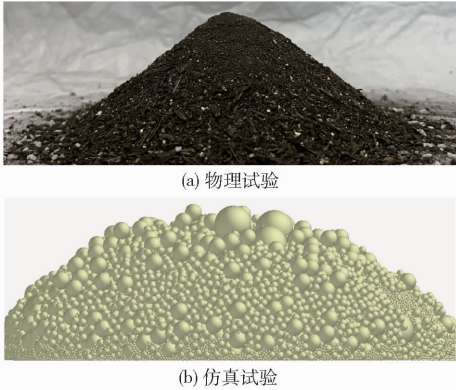


图 6 物理与仿真试验结果对比
Fig. 6 Comparison of physical and simulation experimental calibration

散元仿真。

4 结论

- (1) 针对育苗基质混合颗粒进行离散元仿真参数标定,并通过 PB 试验得出影响基质颗粒仿真堆积角的显著因素为:基质 JKR 表面能、基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数、基质颗粒-颗粒碰撞恢复系数和基质颗粒-不锈钢静摩擦因数。采用连通域去噪、canny 算子双阈值边缘检测等方法对实际堆积角图像进行处理,提取两侧斜坡区域散点进行拟合,通过将两侧斜坡综合取平均的方式获得了较高精度的基质实际堆积角。
- (2) 以 PB 试验模型筛选所得显著因素为基础,开展最陡爬坡试验,考察显著因素最大响应区域,进一步开展 BB 试验,并利用二阶回归模型求解最佳显著参数组合。
- (3) 以基质颗粒实际堆积角和仿真堆积角误差最小为目标,对回归方程寻优,在不显著因素取中间值前提下得到显著因素最优参数组合为:基质颗粒-

颗粒碰撞恢复系数 A 为 0.142、基质颗粒-颗粒滚动摩擦因数 C 为 0.097、基质颗粒-不锈钢静摩擦因数 E 为 0.223 和基质 JKR 表面能 G 为 2.325 J/m²。所得仿真堆积角 φ 为 33.4°, 实际堆积角 θ 为 34.19°, 相对误差 2.31%, 该虚拟标定所得参数组合可用于离散元仿真。

参 考 文 献

[1] 崔永杰,朱玉桃,马利,等. 穴盘缺苗气吸式基质剔除装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):140-151.
CUI Yongjie, ZHU Yutao, MA Li, et al. Design and experiment of air-suction substrates removal device for plug lack of seedlings trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):140-151. (in Chinese)

[2] TONG Junhua, YU Jianlin, WU Chuanyu, et al. Health information acquisition and position calculation of plug seedling in greenhouse seedling bed[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2021,185(1):1-14.

[3] 童俊华,石虎峰,武传宇,等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(8):107-116.
TONG Junhua, SHI Hufeng, WU Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107-116. (in Chinese)

[4] WANG X, MA H, LI B, et al. Review on the research of contact parameters calibration of particle system[J]. Mech. Sci. Technol., 2022, 36(4): 1363-1378.

[5] 施云芬,孙萌,张更宇,等. 厌氧颗粒污泥人工床层快速培养与吸附动力学分析[J]. 农业机械学报,2016,47(9):227-233.
SHI Yunfen, SUN Meng, ZHANG Gengyu, et al. Rapid cultivation of anaerobic granular sludge within artificial sludge bed and analysis of adsorption kinetics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):227-233. (in Chinese)

[6] BEHERA N, ALKASSAR Y, AGARWAL V, et al. Fluidized dense phase pneumatic conveying: a review[J]. Particulate Science and Technology, 2023, 41(2): 277-296.

[7] DE P, JANCORNELIS W. DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic comparison with continuum model and parametric study[J]. Soil Tillage Res., 2019, 195(1):1-14.

[8] 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)

[9] SUN J, CHEN H. Mechanical properties of the grooved-wheel drilling particles under multivariate interaction influenced based on 3D printing and EDEM simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,172(1):1-14.

[10] 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)

[11] MONCADA M, BETANCOURT F, TOLEDO P, et al. Effect of particle shape on parameter calibration for a discrete element model for mining applications[J]. Minerals, 2022, 13(1): 40.

[12] 陶志影,孙家伟,韩志恒,等. 谷壳垫料颗粒离散元模型参数标定[J]. 沈阳农业大学学报,2021,52(3):362-369.
TAO Zhiying, SUN Jiawei, HAN Zhiheng, et al. Parameter calibration of discrete element model of chaff padding particles [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021,52(3):362-369. (in Chinese)

[13] 牛智有,孔宪锐,沈柏胜,等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(7):132-140,207.
NIU Zhiyou, KONG Xianrui, SHEN Bosheng, et al. Parameters calibration of discrete element simulation for pellet feed attrition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):132-140,207. (in Chinese)

[14] 李铁军. 煤颗粒离散元模型宏观参数标定及其关系[D]. 太原:太原理工大学,2019.
LI Tiejun. Calibration of DEM model parameters for coal particles and research on parameters[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2019. (in Chinese)

[15] 向伟,吴明亮,吕江南,等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(12):116-123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(12):116-123. (in Chinese)

[16] 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 for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017,38(3):93-98. (in Chinese)

[17] 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)

[18] 邹洋,汤佟,高自成,等. 基于颗粒缩放理论的生石灰粉离散元参数标定[J]. 中国粉体技术,2023,29(2):81-91.
ZOU Yang, TANG Tong, GAO Zicheng, et al. Discrete element parameter calibration of quicklime powder based on particle scaling theory[J]. China Powder Science and Technology,2023,29(2):81-91. (in Chinese)

[19] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):78-85. (in Chinese)

[20] 王宪良,钟晓康,耿元乐,等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报,2021,37(23):100-107.
WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(23):100-107. (in Chinese)

[21] 丁辛亭,李凯,郝伟,等. 基于RSM和GA-BP-GA优化的油茶籽仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(2):139-150.
DING Xinting, LI Kai, HAO Wei, et al. Calibration of simulation parameters of *Camellia oleifera* seeds based on RSM and GA-BP-GA optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):139-150. (in Chinese)

[22] LONG S, XU S, ZHANG Y, et al. Method of soil-elastoplastic DEM parameter calibration based on recurrent neural network [J]. Powder Technology, 2023; 416:118-222.

[23] QIAN J, XU W, MU L, et al. Calibration of soil parameters based on an intelligent algorithm using an efficient sampling method[J]. Underground Space, 2020,19(3):1-22.

[24] 罗帅,袁巧霞,GOUDA Shaba,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 Shaba, 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)

[25] CHEN Z, TONG X, LI Z. Numerical investigation on the sieving performance of elliptical vibrating screen[J]. Processes, 2020, 8:1151.

[26] 马国鑫. 生物炭苗钵低损取苗增强机理与气顶-包裹夹取式取苗机构研究[D]. 镇江:江苏大学,2021.
MA Guoxin. Study on enhancement mechanism of low loss seedling picking in biochar and air ejection-package clamping pick-up device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2021. (in Chinese)