



李承明,张斌,夏雨阳,等.胶园植保硫磺粉颗粒离散元模型参数标定[J].江西农业大学学报,2022,44(3):605-613.
LI C M,ZHANG B,XIA Y Y,et al.Parameter calibration of discrete element model of sulfur powder particles for rubber plantation protection[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(3):605-613.

胶园植保硫磺粉颗粒离散元模型参数标定

李承明¹,张斌^{1,2},夏雨阳¹,王勇¹,肖骁¹,付威^{1*}

(1.海南大学 机电工程学院,海南 海口 570228;2.海南大学 信息与通信工程学院,海南 海口 570228)

摘要:【目的】白粉病是影响橡胶树天然橡胶产量的重要病害,常使用硫磺粉进行防治。为确定胶园植保过程中喷施硫磺粉颗粒的离散元仿真参数,对硫磺粉粉体的离散元参数进行标定。【方法】通过BT-1000型粉体综合特性测试仪进行物理试验获取硫磺粉休止角,测量多次取平均值。以休止角为响应值,应用Plackett-Burman试验筛选出对休止角影响显著的3个参数,进一步基于最陡爬坡试验确定显著性参数的最优取值区间,并通过Box-Behnken试验建立并优化休止角与显著性参数的二阶回归模型,以物理试验休止角为目标值,对显著性参数寻优得到最佳组合。【结果】经过物理试验测得的硫磺粉休止角大小为 48.56° 。通过Plackett-Burman试验筛选出的3个影响显著参数为:硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数、硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数和JKR表面能,其余影响不显著的参数取值:硫磺粉-硫磺粉恢复系数为0.2、硫磺粉-硫磺粉静摩擦系数为0.6、硫磺粉-不锈钢恢复系数为0.2、硫磺粉-不锈钢静摩擦系数为0.5。最陡爬坡试验确定的最优取值区间:硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数为0.1~0.2、硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数为0.15~0.35、JKR表面能为 $0.02\sim 0.04\text{ J/m}^2$ 。寻优后得到的显著性参数组合:硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数为0.17、硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数为0.34、JKR表面能为 0.03 J/m^2 。将上述参数输入仿真软件进行验证,得到仿真休止角平均值为 47.95° ,与物理试验所得实际休止角的相对误差为1.26%。【结论】标定的硫磺粉离散元参数可靠,可为硫磺粉颗粒与植保喷粉装置间相互耦合仿真提供参数支持,为植保喷粉机的设计仿真与优化提供依据。

关键词:胶园植保;硫磺粉;离散元;休止角;参数标定

中图分类号:S224;S492 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2022)03-0605-09

Parameter Calibration of Discrete Element Model of Sulfur Powder Particles for Rubber Plantation Protection

LI Chengming¹,ZHANG Bin^{1,2},XIA Yuyang¹,WANG Yong¹,XIAO Xiao¹,FU Wei^{1*}

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 2.School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: [Objective] Powdery mildew is a disease that affects the production of natural rubber. Sulfur powder is often used for its prevention and treatment. This study aims to determine the discrete element simulation parameters of the sulfur powder particles sprayed in the process of plant protection in the rubber plantation,

收稿日期:2021-09-25 修回日期:2021-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(32160424)和海南省重点研发项目(ZDYF2020042)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (32160424) and Hainan Provincial Key Research and Development Program (ZDYF2020042)

作者简介:李承明, orcid.org/0000-0002-5520-5332, licm2019@163.com; *通信作者:付威,教授,博士,主要从事智能农机装备研究, orcid.org/0000-0002-8209-6186, fuwei001@126.com。

the discrete element parameters of the sulfur powder were calibrated. [Methods] The repose angle of sulfur powder was obtained by physical tests with BT-1000 powder comprehensive characteristic tester, and the average value was measured. Taking the repose angle as the response value, three parameters with significant influence on the repose angle were selected by Plackett-Burman test, and the optimal value range of significance parameters was further determined based on the steepest climbing test. The second-order regression model of repose angle and significance parameters was established and optimized by Box-Behnken test, and the repose angle of physical test was taken as the target value to optimize the significance parameters to get the optimal combination. [Results] The repose angle of sulfur powder measured by physical tests was 48.56° . The three significant parameters selected by Plackett-Burman test were sulfur powder-sulfur powder rolling friction coefficient, sulfur powder-stainless steel rolling friction coefficient and JKR surface energy. The other parameters with insignificant effect were: sulfur powder-sulfur powder restoration coefficient was 0.2, sulfur powder-sulfur powder static friction coefficient was 0.6, sulfur powder-stainless steel restoration coefficient was 0.2, sulfur powder-stainless steel static friction coefficient was 0.5. The optimal range determined by the steepest climbing test were as follows: sulfur powder-sulfur powder rolling friction coefficient was 0.1-0.2, sulfur powder-stainless steel rolling friction coefficient was 0.15-0.35, JKR surface energy was 0.02-0.04 J/m². The significant parameter combinations obtained after optimization were as follows: sulfur powder-sulfur powder rolling friction coefficient was 0.17, sulfur powder-stainless steel rolling friction coefficient was 0.34, JKR surface energy was 0.03 J/m². The above parameters were input into the simulation software, which verified that the average value of the simulation repose angle was 47.95° , and the relative error between the simulation repose angle and the one obtained by the physical tests was 1.26%. [Conclusion] The results show that the calibrated discrete element parameters of the sulfur powder are reliable, which can provide parameter support for the coupling simulation between the sulfur powder particles and the plant protection powder spraying device, thus providing the basis for simulating design and optimizing the plant protection powder spraying machine.

Keywords: rubber plantation protection; sulfur powder; discrete element method; repose angle; parameter calibration

【研究意义】天然橡胶是我国重要的战略物资和工业原料,广泛应用于国民经济建设中^[1]。我国天然橡胶树的种植面积超过113万hm²,其中海南省种植面积超53万hm²。白粉病是我国橡胶树所面临最严重的病害之一,因此防治白粉病是天然橡胶生产管理过程中的重要环节之一^[2]。目前白粉病主要通过人工背负式喷粉机进行硫磺粉喷施作业,防治效果直接影响到天然橡胶的品质和产量。硫磺粉作为胶园植保机械化喷施作业过程中的重要组成部分,其接触特性对喷粉机的喷施效果有重要影响^[3]。因此,研究硫磺粉颗粒的离散元参数对胶园植保喷粉机械的优化设计有重要意义。【前人研究进展】国内外学者应用离散元法(Discrete Element Method, DEM)对不同的农业物料颗粒进行了大量参数标定方面的研究^[4-6]。王韦韦等^[7]以实际堆积角为目标值,对玉米秸秆粉料进行了致密成型离散元仿真模型参数标定研究;李永祥等^[8]通过颗粒缩放将小麦粉颗粒放大至1.2 mm后,再对小麦粉的接触参数进行标定,仿真结果与实际值无显著性差异,为小颗粒的参数标定提供了参考。石辰凤等^[9]将四种中药浸膏粉颗粒进行放大后,根据仿真模拟休止角,确定了相应的接触参数;邢洁洁等^[10]为了获取适用于海南热区砖红壤与农业机械工作部件之间的离散元参数,对香蕉地试验田的砖红壤样品进行了模型参数标定,并加以破土阻力试验验证;王黎明等^[11]通过物理堆积试验与仿真相结合,对猪粪接触参数做了标定工作;袁全春等^[12]通过仿真试验建立模型,结合圆筒提升法进行目标参数寻优,标定了有机肥离散元模型参数;武涛等^[13]基于土壤堆积角物理试验,采用Hertz-Mindlin with JKR接触模型进行仿真试验,获得了较高可信度的黏性土壤离散元接触模型参数。综上可知,应用离散元法获得散体物料相关参数的方式得到广泛地认可,具有良好的可行性。【本研究切入点】针对胶园植保硫磺粉颗粒接触参数的研究未见有相关报道。主要由于硫磺粉的颗粒粒径为微米级,且颗粒间易发生粘结,接触特性复杂,使用常规的手段不易准确获得其相

关接触参数,需要通过虚拟标定来确定。【拟解决的关键问题】以胶园植保硫磺粉为研究对象,采用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型,依次进行 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验,求解最优参数组合,对比仿真休止角与实际硫磺粉休止角完成离散元模型参数标定,以期为研究硫磺粉颗粒与喷粉装置之间的相互作用机理提供有效基础参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

试验材料选用广西防城港五星环保科技股份有限公司生产的硫磺粉,含水率为 9%,细度为 325 目(粒径 45 μm);试验仪器为粉体综合特性测试仪(型号:BT-1000 型,丹东百特仪器有限公司)。

1.2 休止角测量

休止角被广泛用于表征颗粒物料的流动性,也称为堆积角、安息角。通过 BT-1000 型粉体综合特性测试仪进行漏斗法测量硫磺粉休止角,测试仪器如图 1 所示^[14]。将接料盘和休止角试验台放置在测试仪固定位置,从入料口添加硫磺粉后,在振动筛的作用下通过筛网、出料口洒落到试样台上,形成锥体。待锥体稳定后,关闭电源,将量角器慢慢靠近硫磺粉锥体,调整好角度和位置后,开始测定休止角的大小,如图 2 所示。为保证测量的准确性,需要分别在 3 个不同的位置对休止角进行测定,取其平均值,试验重复 3 次,最后得到硫磺粉的实际休止角平均值为 48.56°。

2 仿真模型

2.1 接触模型选取

硫磺粉颗粒间存在的范德华力和静电力等黏附力,导致了硫磺粉的黏附和团聚^[15-16],因此选择 EDEM 2018 软件中的 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型进行仿真,该模型适用于模拟颗粒间因作用力而发生粘结和团聚的情况^[17-18],本文通过引入 JKR 表面能用于表征硫磺粉颗粒间的接触。



图1 BT-1000 型粉体综合特性测试仪

Fig.1 BT-1000 powder comprehensive characteristic tester



图2 测量休止角

Fig.2 Measuring the repose angle

2.2 仿真参数设置

由于硫磺粉颗粒粒径微小,本征参数难以准确获取,综合参考粉体颗粒离散元仿真相关文献^[19-22],设定硫磺粉颗粒的本征参数为:真实密度 2 000 kg/m^3 、泊松比 0.3、硫磺粉剪切模量 $5 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。同时,结合 EDEM 2018 软件中内置的 GEMM 数据库,确定了硫磺粉颗粒与不锈钢之间仿真参数的参考范围,如表 1 所示。

2.3 仿真模型建立

在 Creo 软件中建立测量仪器的简化模型,另存为 IGS 格式,导入 EDEM 2018 软件中,仿真模型如图 3 所示。由于试验所用硫磺粉细度为 325 目,颗粒形状接近球形,因此仿真采用球形颗粒模型。参考采用颗粒缩放法的国内外文献^[8-9,23-25],选择放大颗粒直径设置为 0.9 mm,如图 4 所示,颗粒生成方式为 Dynamic,生成速率设为 5 000 个/s,生成数量设为不限,仿真时间设置为 5 s,时间步长设置为 Rayleigh 时间步长的 20%,每 0.05 s 保存 1 次。待接料盘上的粉体颗粒锥体形状基本不变后,将生成速率设置为 0 个/s 继续仿真,待漏斗中颗粒落完并保持稳定后,采用软件后处理中自带的量角器工具,测量休止角。

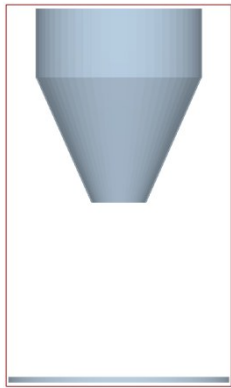


图3 测量仪器简化模型

Fig.3 Simplified model of measuring instrument

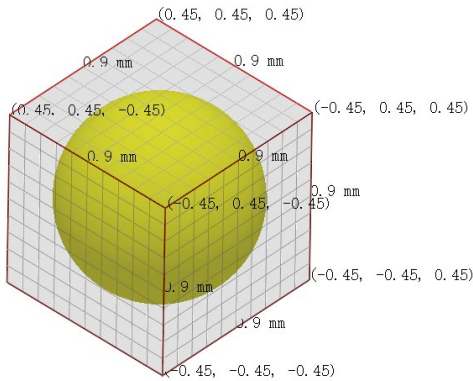


图4 仿真颗粒模型

Fig.4 Simulation particle model

表 1 离散元参数范围表

Tab.1 Parameter range table of discrete element method

仿真参数 Simulation parameters	数值 Value	仿真参数 Simulation parameters	数值 Value
硫磺粉密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Density of sulfur powder	2 000	硫磺粉-硫磺粉静摩擦系数 Sulfur powder-sulfur powder static friction coefficient	0.20~0.70
硫磺粉泊松比 Poisson's ratio of sulfur powder	0.30	硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数 Sulfur powder-sulfur powder rolling friction coefficient	0.05~0.30
硫磺粉剪切模量/Pa Shear modulus of sulfur powder	5×10^7	硫磺粉-不锈钢恢复系数 Sulfur Powder-stainless Steel restoration coefficient	0.10~0.65
不锈钢密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Density of stainless steel	7 800	硫磺粉-不锈钢静摩擦系数 Sulfur powder-stainless steel static friction coefficient	0.20~1.00
不锈钢泊松比 Poisson's ratio of stainless steel	0.30	硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数 Sulfur powder-stainless steel rolling friction coefficient	0.05~0.55
不锈钢剪切模量/Pa Shear modulus of stainless steel	7×10^{10}	JKR 表面能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$) JKR surface energy	0.01~0.50
硫磺粉-硫磺粉恢复系数 Sulfur powder-sulfur powder restoration coefficient	0.10~0.75		

3 仿真试验与结果分析

3.1 Plackett-Burman 试验

通过 Plackett-Burman 试验以硫磺粉休止角为响应值,将 7 个离散元参数分别用字母 A 到 G 进行表示,根据表 1 中的参数范围来设置各参数的高低水平,以参考范围的最低值为依据设定低水平的值,以参考范围的最高值为依据设定高水平的值,从而进行响应值与参数之间的显著性筛选。设定参数的高低水平后进行筛选试验,如表 2 所示。

使用 Design Expert 8.0.6 软件进行 Plackett-Burman 试验,按照表 2 中设定的参数依次输入,得到 12 组试验组合,依次利用 EDEM 2018 软件进行仿真试验,测量休止角大小并填写表 3,其中 H、J、K、L 为空白列。进一步地,继续使用 Design Expert 8.0.6 软件进行显著性分析,获得对休止角影响显著的参数排序,如表 4 所示。由表 4 可知,C(硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数)的 $P<0.01$,对硫磺粉颗粒休止角的影响极显著;F(硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数)和 G(JKR 表面能)的 $P<0.05$,对硫磺粉颗粒休止角的影响显著,其余的 4 个参数 $P>0.05$,对硫磺粉颗粒休止角的影响较小。考虑到后续的试验影响,只选取对休止角影响性最大的 3 个参数。对于显著性较小的参数,结合国内相关文献取值如下:硫磺粉-硫磺粉恢复系数为 0.2,硫磺粉-硫磺粉静摩擦系数为 0.6,硫磺粉-不锈钢恢复系数为 0.2,硫磺粉-不锈钢静摩擦系数为 0.5。

表 2 Plackett–burman 试验参数
Tab.2 Parameters of Plackett–Burman test

编号 Serial number	参数 Parameters	低水平(−1) Low level	高水平(1) High level
A	硫磺粉–硫磺粉恢复系数	0.10	0.70
B	硫磺粉–硫磺粉静摩擦系数	0.20	0.70
C	硫磺粉–硫磺粉滚动摩擦系数	0.05	0.35
D	硫磺粉–不锈钢恢复系数	0.10	0.60
E	硫磺粉–不锈钢静摩擦系数	0.20	0.90
F	硫磺粉–不锈钢滚动摩擦系数	0.05	0.55
G	JKR 表面能/(J·m ^{−2})	0.01	0.20

表 3 Plackett–Burman 试验设计及结果
Tab.3 Design and results Plackett–Burman experiment

序号 Serial number	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	休止角/(°) Repose angle
1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	38.49
2	1	−1	1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	47.03
3	1	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	−1	50.07
4	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	50.51
5	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	42.58
6	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	43.44
7	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	−1	1	52.13
8	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	40.58
9	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	1	46.51
10	−1	1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	44.95
11	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	35.62
12	1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	47.86

表 4 Plackett–Burman 试验参数显著性分析
Tab.4 Significance analysis of Plackett–Burman test parameters

参数 Parameters	平方和 Sum of squares	F 值 F value	P 值 P value	显著性排序 Significance ranking
A	3.58	1.49	0.288 8	6
B	0.063	0.026	0.878 9	7
C	171.23	71.53	0.001 1**	1
D	7.35	3.07	0.154 7	5
E	13.59	5.68	0.075 8	4
F	36.09	15.08	0.017 8*	3
G	38.20	15.96	0.016 2*	2

*表示显著($P<0.05$), **表示极显著($P<0.01$)。
*Indicates significant($P<0.05$), ** Indicates extremely significant($P<0.01$).

3.2 最陡爬坡试验

从上述的 Placket–Burman 试验可得,对硫磺粉休止角影响最大的 3 个显著性参数依次为:硫磺粉–硫磺粉滚动摩擦系数、JKR 表面能和硫磺粉–不锈钢滚动摩擦系数。根据以上 3 个参数的高低水平值,选取适当的爬坡步长值,设计最陡爬坡试验,定位最优的参数区间。如表 5 所示,共进行 6 次试验,分别以

0.05、0.1和0.01的爬坡步长确定显著性参数的取值后,进行休止角仿真试验。分析可知,第3组试验的休止角相对误差最小,且整个最陡爬坡试验的相对误差呈现出先减少后增大的趋势。因此,最优的参数区间在第3组试验附近,可分别选取第2组和第4组的参数值为低、高水平进行下一步的Box-Behnken试验设计。

表5 最陡爬坡试验设计及结果

Tab.5 Design and results of the steepest climbing test

序号 Serial number	<i>C</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	休止角/(°) Repose angle	相对误差/% Relative error
1	0.05	0.05	0.01	30.79	36.60
2	0.10	0.15	0.02	40.25	17.11
3	0.15	0.25	0.03	48.01	1.13
4	0.20	0.35	0.04	51.66	6.38
5	0.25	0.45	0.05	58.65	20.78
6	0.30	0.55	0.06	62.53	28.77

3.3 Box-Behnken 试验

获得休止角显著影响参数后,应用Box-Behnken试验进行响应面分析并寻求最优解,以*C*(硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数)、*F*(硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数)、*G*(JKR表面能)为试验参数,休止角为指标进行试验,试验方案及结果如表6所示。

表6 Box-Behnken试验设计及结果

Tab.6 Design and results of Box-Behnken test

序号 Serial number	<i>C</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	休止角/(°) Repose angle
1	-1	-1	0	48.74
2	1	-1	0	47.11
3	-1	1	0	46.87
4	1	1	0	50.64
5	-1	0	-1	49.31
6	1	0	-1	48.55
7	-1	0	1	47.02
8	1	0	1	49.31
9	0	-1	-1	51.45
10	0	1	-1	46.67
11	0	-1	1	45.76
12	0	1	1	51.32
13	0	0	0	49.12
14	0	0	0	48.74
15	0	0	0	48.32

表7为BoxBehnken试验模型方差分析,从表中可得,该拟合模型 $P=0.000\ 3$ ($P<0.01$),拟合度较好;其中*C*(硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数)、*CF*(硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数与硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数交互项)、*CG*(硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数与JKR表面能交互项)、*FG*(硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数与JKR表面能交互项)的 P 值均小于0.01;*F*(硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数)和*G*(JKR表面能)的 P 值均小于0.05,说明上述的参数都对休止角的大小有不同程度的影响,证明所得回归模型的有效性。此外,表中的失拟项 $P=0.791\ 9>0.05$ 、决定系数 $R^2=0.987\ 8$ 、校正决定系数 $R^2_{\text{adj}}=0.965\ 9$ 、变异系数CV为0.65%、试验精确度 $A_p=22.657$,说明所得模型具有良好的拟合性和精确度,与实际试验之间的误差较小,能够准确地反映出实际情况,表明了BoxBehnken试验具有较高可靠性。

表 7 中的结果为基础,去除对休止角影响不显著项: C^2 、 F^2 、 G^2 后,优化二次回归模型,得到的方差分析结果如表 8 所示:失拟项 $P=0.693\ 6$;变异系数 $CV=0.72\%$;决定系数 $R^2=0.975\ 8$;校正决定系数 $R^2_{\text{adj}}=0.957\ 6$;试验精密度 $A_p=24.275$ 。不难看出,模型在拟合性、可靠性和精确性方面都表现良好,较优化前相比有一定程度的改善,在 Design-Expert 8.0.6 软件中建立显著性参数与休止角的优化后回归方程为:

$$Y = 48.60 + 0.46C + 0.30F - 0.32G + 1.35CF + 0.76CG + 2.59FG - 0.32C^2 - 0.067F^2 + 0.14G^2 \quad (1)$$

表 7 Box-Behnken 试验二次回归模型方差分析

Tab.7 Anova of quadratic polynomial model of Box-Behnken test

方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
Source of variance	Mean square	Degree of freedom	Sum of square	F value	P value
模型 Model	40.09	9	40.09	45.12	0.000 3**
C	1.68	1	1.68	17.05	0.009 1**
F	0.74	1	0.74	7.54	0.040 5*
G	0.83	1	0.83	8.36	0.034 1*
CF	7.29	1	7.29	73.85	0.000 4**
CG	2.33	1	2.33	23.56	0.004 7**
FG	26.73	1	26.73	270.76	<0.000 1**
C^2	0.38	1	0.38	3.82	0.108 0
F^2	0.017	1	0.017	0.17	0.698 6
G^2	0.073	1	0.073	0.74	0.429 7
残差 Residual	0.49	5	0.099		
失拟项 Lack of fit	0.17	3	0.058	0.36	0.791 9
纯误差 Pure error	0.32	2	0.16		
总和 Sum	40.58	14			
$R^2=0.987\ 8$	$R^2_{\text{adj}}=0.965\ 9$		$CV=0.65\%$		$A_p=22.657$

*表示显著($P<0.05$), **表示极显著($P<0.01$)。

*Indicates significant($P<0.05$), ** Indicates extremely significant($P<0.01$).

表 8 Box-Behnken 试验优化回归模型方差分析

Tab.8 ANOVA of modified model of Box-Behnken test

方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
Source of variance	Mean square	Degree of freedom	Sum of square	F value	P value
模型 Model	39.60	6	6.60	53.72	<0.000 1**
C	1.68	1	1.68	13.70	0.006 0**
F	0.74	1	0.74	6.06	0.039 2*
G	0.83	1	0.83	6.72	0.032 0*
CF	7.29	1	7.29	59.34	<0.000 1**
CG	2.33	1	2.33	18.93	0.002 4**
FG	26.73	1	26.73	217.57	<0.000 1**
残差 Residual	0.98	8	0.12		
失拟项 Lack of fit	0.66	6	0.11	0.69	0.693 6
纯误差 Pure error	0.32	2	0.16		
总和 Sum	40.58	14			
$R^2=0.975\ 8$	$R^2_{\text{adj}}=0.957\ 6$		$CV=0.72\%$		$A_p=24.275$

*表示显著($P<0.05$), **表示极显著($P<0.01$)。

*Indicates significant($P<0.05$), ** Indicates extremely significant($P<0.01$).

4 参数优化与试验验证

利用 Design Expert 8.0.6 软件中的优化模块,以物理试验休止角平均值 48.56° 为目标值,对回归模型进行寻优,得到一组与物理试验数据相近的参数:硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数 0.17、硫磺粉-不锈钢滚

动摩擦系数0.34、JKR表面能 0.03 J/m^2 ,其余非显著性参数的取值结合相关文献(硫磺粉-硫磺粉恢复系数0.2,硫磺粉-硫磺粉静摩擦系数0.6,硫磺粉-不锈钢恢复系数0.2,硫磺粉-不锈钢静摩擦系数0.5)。为检验最优参数组合的准确性,将上述各参数值输入EDEM 2018软件中进行仿真,得到结果如图5所示。重复3次仿真试验,所得硫磺粉休止角分别为 47.93° 、 47.77° 、 48.15° ,平均值为 47.95° ,最优参数组合下休止角仿真结果与实际物理休止角结果的相对误差为1.26%,如图6所示,仿真结果与真实试验在角度方面无明显差异。

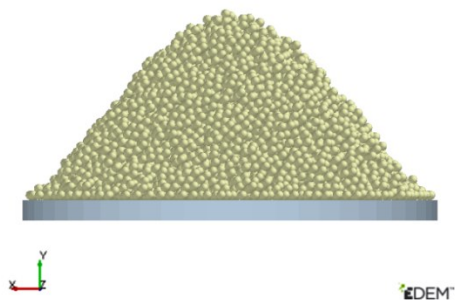


图5 仿真试验

Fig.5 Simulation test



图6 物理试验

Fig.6 Physical test

5 结论

通过BT-1000型粉体综合特性测试仪进行硫磺粉休止角测定,得到硫磺粉的实际休止角平均值为 48.56° 。基于离散元软件EDEM中Hertz-Mindlin with JKR接触模型对放大颗粒的接触参数进行标定,由Plackett-Burman试验可知,对硫磺粉休止角影响显著的参数为硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数、硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数和JKR表面能。根据Box-Behnken试验结果,建立并优化3个显著性参数与休止角间的二次回归模型,根据模型方差分析的结果可知,除了3个显著性参数(硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数、硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数和JKR表面能)的一次项外,各显著性参数的交互项对硫磺粉放大颗粒休止角影响也极其显著。

本文以硫磺粉实际休止角为目标值,进行寻优,求得显著性参数的最佳组合为:硫磺粉-硫磺粉滚动摩擦系数0.17、硫磺粉-不锈钢滚动摩擦系数0.34、JKR表面能 0.03 J/m^2 。进行对比试验,测得仿真试验的休止角为 47.95° ,与实际物理休止角的相对误差为1.26%,表明标定的硫磺粉离散元仿真参数有效。

参考文献 References:

- [1] 王海杰,莫尚勇,高安.提升海南天然橡胶产业竞争力的对策分析[J].中国农垦,2021(9):45-48.
WANG H J, MO S Y, GAO A. Analysis of countermeasures to improve the competitiveness of Hainan's natural rubber industry[J]. China state farm, 2021(9):45-48.
- [2] 符兴义.海南橡胶树主要病害的防治[J].特种经济动植物,2021,24(9):37-38.
FU X Y. Prevention and control of main diseases of rubber trees in Hainan[J]. Special economic animals and plants, 2021, 24(9):37-38.
- [3] 张荣芳,焦伟,周纪磊,等.不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J].农业机械学报,2020,51(S1):227-235.
ZHANG R F, JIAO W, ZHOU J L, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(S1):227-235.
- [4] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等.离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J].农业机械学报,2021,52(4):1-20.
ZENG Z W, MA X, CAO X L, 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.
- [5] GRIMA A P, WYPYCH P W. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling[J]. Granular Matter, 2011, 13(2):127-132.
- [6] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等.基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):123-132.
YU Q X, LIU Y, CHEN X B, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for panax notoginseng seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(2):123-132.

- [7] 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 W W, CAI D Y, XIE J J, 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.
- [8] 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 Y X, LI F X, XU X M, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on partial scaling[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(16): 320-327.
- [9] 石辰风,杨茂蕊,唐正馨,等.中药浸膏粉离散元模拟参数标定方法研究[J].中草药,2020,51(24):6205-6212.
SHI C F, YANG M R, TANG Z X, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of Chinese medicine extract powders[J]. Chinese traditional and herbal drugs, 2020, 51(24): 6205-6212.
- [10] 邢洁洁,张锐,吴鹏,等.海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J].农业工程学报,2020,36(5):158-166.
XING J J, ZHANG R, WU P, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol in hot area of Hainan Province[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(5): 158-166.
- [11] 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 L M, FAN S Y, CHENG H S, et al. Calibration of contact parameters for pig manure based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(15): 95-102.
- [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 Q C, XU L M, XING J J, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(18): 21-27.
- [13] 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 T, HUANG W F, CHEN X S, 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.
- [14] 付瑜.-200目硫磺粉收集过程中的荷电特性及静电消除[D].绵阳:西南科技大学,2017.
FU Y. Charge characteristics and static electricity elimination during the collection of -200 mesh sulfur powder[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [15] 蒋方扬.硫磺粉体在输送过程中静电规律研究[D].绵阳:西南科技大学,2017.
JIANG F Y. Sulfur powder in the change rule of static electricity in the process of conveying sports research[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [16] 袁渭康,王静康,费维扬,等.化学工程手册[M].北京:化学工业出版社,2019.
YUAN W K, WANG J K, FEI W Y, et al. Chemical engineering handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [17] 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 S J, QI J T, KAN Z, 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.
- [18] 彭才望,许道军,贺喜,等.黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J].农业工程学报,2020,36(17):212-218.
PENG C W, XU D J, HE X, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for pig manure organic fertilizer treated with *Hermetia illucen*[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(17): 212-218.
- [19] KUMAR S, SAINI C S. Study of various characteristics of composite flour prepared from the blend of wheat flour and gorgon nut flour[J]. International journal of agriculture, environment and biotechnology, 2016, 9(4): 679-689.
- [20] 张建.粉体定量加料器及应用研究[D].镇江:江苏大学,2008.
ZHANG J. Powder dosing devices and its application[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008.
- [21] EL-KASSEM B, SALLOUM N, BRINZ T, et al. A multivariate regression parametric study on DEM input parameters of free-flowing and cohesive powders with experimental data-based validation[J]. Computational particle mechanics, 2021, 8(1): 87-111.
- [22] 张西良,张建,李萍萍,等.粉体物料流动性仿真分析[J].农业机械学报,2008,39(8):196-198.
ZHANG X L, ZHANG J, LI P P, et al. Liquidity simulation of powder material[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2008, 39(8): 196-198.
- [23] 任建莉,周龙海,韩龙,等.基于颗粒缩放理论的垂直螺旋输送离散模拟[J].过程工程学报,2017,17(5):936-943.
REN J L, ZHOU L H, HAN L, et al. Discrete simulation of vertical screw conveyor based on particle scaling theory[J]. The Chinese journal of process engineering, 2017, 17(5): 936-943.
- [24] 周龙海.垂直螺旋输送的EDEM仿真与实验研究[D].杭州:浙江工业大学,2017.
ZHOU L H. EDEM simulation and experiment of vertical screw conveying[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [25] SAKAI M, ABE M, SHIGETO Y, et al. Verification and validation of a coarse grain model of the DEM in a bubbling fluidized bed[J]. Chemical engineering journal, 2014, 244: 33-43.