湖南农业大学学报(自然科学版)　2018, 44(2):216–220. DOI:10.13331/j.cnki.jhau.2018.02.019
Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)

投稿网址：http://xb.ijournal.cn

基于堆积试验的壤土离散元参数的标定

贺一鸣[1,2]，向伟[1,2]，吴明亮[1,2,3*]，全伟[1,2]，陈超鹏[1,2]

(1.湖南农业大学工学院，湖南 长沙 410128；2.南方粮油作物协同创新中心，湖南 长沙 410128；3.湖南省现代农业装备工程技术研究中心，湖南 长沙 410128)

摘　要：为获取南方地区黏弹性壤土颗粒离散元接触模型的本征物理参数和接触力学参数，建立其用于离散元仿真的接触模型。以试验测定的堆积角为 40.95°的壤土为研究对象，选取 Hertz–Mindlin with JKR 接触模型，通过实测试验获取壤土的本征物理参数值；借助 GEMM 数据库推荐的土壤接触力学参数初选范围，通过最陡爬坡试验得到接触力学参数值的最优值区间。利用 Design–Expert 软件对最优值区间的接触力学参数进行 4 因素 3 水平二次正交旋转组合试验，获取堆积角回归模型，以实测土壤堆积角 40.95°为目标，对回归模型进行接触力学参数寻优，得到接触力学参数的最优组合为：JKR 表面能 13.05 J/m^2，恢复系数 0.5，动摩擦因数 0.15，静摩擦因数 1.06，该最优组合参数仿真堆积角均值为 41.07°，与实测堆积角误差为 0.3%。

关　键　词：壤土；堆积角；离散元法；参数标定；接触模型

中图分类号：S152.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1007–1032(2018)02–0216–05

Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap

HE Yiming[1,2], XIANG Wei[1,2], WU Mingliang[1,2,3*], QUAN Wei[1,2], CHEN Chaopeng[1,2]

(1.College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Hunan Province Modern Agricultural Equipment Engineering Technology Research Center, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: A contact model for discrete element simulation was established to obtain the physical parameters and contact mechanical parameters of viscoelasticity loam soil particlesin southern region. Take the loam soil which test measured soil repose angel 40.95° as study object, chosen Hertz–Mindlin with JKR as contact model, the loam soil physical parameters was obtained by experiment. The steepest ascent test was used to obtain the optimum contact mechanics parameters by means of soil contact mechanic parameters primary select range in GEMM database. Design–expert software was used to carry out 4 factor 3 horizontal quadrature rotation combination test to obtain repose angel regression model. The variance analysis result showed that the optimization combination parameters as follow: JKR surface energy was 13.05 J/m^2, recovery coefficient was 0.5, rolling friction coefficient was 0.15, static friction coefficient was 1.06 when the actual measurement repose angle was selected as target of 40.95°. The simulated mean repose angle was 41.07 ° by using best combination parameters. The repose angle value error was 0.3% compared with actual measurement value.

Keywords: loam soil; repose angle; discrete element method; parameters calibration; contact model

研究农业机械触土部件与土壤的相互作用时，土槽试验或大田试验仅能宏观了解土壤运动情况，而无法探索土壤的动态细观行为。离散元法作为一种可从微观角度仿真研究土壤的新兴研究方法，因其可直观量化分析土壤在触土部件作用下的受力与运动规律被广泛应用[1–7]。采用离散元法研究机

收稿日期：2017–10–30　　修回日期：2018–03–11
基金项目：湖南省政府重大专项(湘府阅[2014]35 号)；湖南省科学技术厅项目(2016NK2015，2017NK2131)
作者简介：贺一鸣(1993—)，男，湖南永州人，硕士研究生，主要从事农业机械创新设计研究，1121006988@qq.com；*通信作者，吴明亮，博士，教授，主要从事农业机械创新设计研究，mlwu@hunau.edu.cn

具与土壤相互作用，需要建立土壤颗粒接触模型，因而准确获取土壤颗粒离散元接触模型的仿真参数是关键[8–12]。仿真参数分为本征物理参数与接触力学参数两类，其中本征物理参数诸如密度、含水率、粒径比、堆积角等可通过试验测定获取，但接触力学参数只能通过仿真模拟试验获取。通常用虚拟标定的参数得到接触模型并仿真得到堆积角，通过调整接触参数值使模拟堆积角与实测值逼近，从而得到物料的接触参数。张锐等[13]应用 EDEM 中 Hertz–Mindlin 接触模型，基于堆积角对标准球和非标准球无黏性沙土颗粒的碰撞恢复系数与摩擦因数进行了标定，建立了沙土接触模型；UCGUL 等[14]应用 Hysteretic Spring Model 接触模型，通过堆积角和直剪试验模拟标定土壤颗粒摩擦因数，解决了土壤颗粒间无黏结力塑性形变问题；王宪良等[15]应用外置编译 ECM 接触模型，以堆积角为目标值对土壤颗粒半径、摩擦因数进行标定，并进行了轮胎–土壤压实接触仿真验证。针对干燥无黏性颗粒进行离散元法仿真参数标定，已有大量的研究，但对于非干燥黏弹性颗粒的参数标定鲜有报道。笔者应用 EDEM 中 Hertz–Mindlin with JKR 接触模型，以南方黏弹性壤土为样本，试验获取其密度、含水率、粒径比、堆积角，基于 EDEM 软件中内置的 GEMM(Generic EDEM material model database)数据库所推荐的范围值，通过最陡爬坡试验进行参数范围值初选，再采用正交旋转试验进行接触力学参数优选获取，并结合堆积角模拟试验验证了壤土模型参数的准确性。现将结果报道如下。

1　材料与方法

1.1　壤土本征参数的测定

采集湖南农业大学试验土槽的壤土，晾晒、粉碎并经泰勒筛分级，测得粒径 1、2、5 mm 壤土颗粒占比分别为 15%、76%和 9%。取粉碎的壤土试样 5 kg，经手持喷雾均匀润湿后装入密闭铁盒封存 12 h，使得壤土颗粒间水分由表面吸湿水通过静置转换成颗粒间毛细管水，从而产生颗粒间黏结力。取出壤土样本，分别通过烘干试验、比重瓶试验，得到样本壤土含水率为 18.14%，土壤密度为 2 670 kg/m^3。

采用注入法[16–17]进行堆积角试验。试验装置如图 1 所示。重复 5 次。测得壤土堆积角均值 40.95°。

图1　堆积角实测试验装置

Fig.1　Experiment measurement equipment for repose angle

由文献[18]可知，弹性模量 E、泊松比 v 和剪切模量 G 间满足 $G=\dfrac{E}{2(1+v)}$。根据测试壤土的特性与相关文献[2–5]，选取壤土泊松比为 0.38，通过应力应变测试三轴剪切试验仪，测定弹性模量 E 为 2.76×10^6 Pa，计算得到壤土剪切模量为 1×10^6 Pa。

1.2　壤土颗粒接触模型的建立

因 JKR 表面能可模拟颗粒间由于水分存在而产生黏结力[19]，故土壤颗粒接触模型采用 EDEM 中的 Hertz–Mindlin with JKR 接触模型。在该接触模型中，若颗粒间直接接触，接触以颗粒间重叠量 δ、表面黏性力 γ 及接触参数计算颗粒间法向接触力 F_{JKR}。其算法按照文献[20]的方法进行。若土壤颗粒未直接接触，颗粒间重叠量等于 0，但颗粒间隔处于范德华力作用的最大间距范围内，范德华力依然存在，其最大值为 F_{pullout}；当颗粒间隔大于范德华力作用最大间距，则颗粒间范德华力为 0 N。颗粒间范德华力的计算及最大间距算法按照文献[20]的方法进行。

1.3　堆积角实测试验装置的仿真

为保证仿真不发生失真，依据实测堆积角试验装置，按 1∶1 建立虚拟仿真模型，如图 2 所示。几何体漏斗和接料盘材料均定义为铁，其密度为 7 850 kg/m^3，泊松比 0.3，剪切模量 7×10^{10} Pa[21]。漏斗顶部直径 150 mm，底部直径 30 mm，落料高 165 mm，颈高 35 mm，接料盘直径 100 mm。土壤颗粒由漏斗顶部颗粒工厂按照筛分测得粒径比生成落料，仿真过程中，设置 Rayleigh 时步长为 20%，网格尺寸取 3 倍最小颗粒单元半径。仿真模型如图 2 所示。

图2 堆积角实测试验装置的仿真模型

Fig.2 Simulation test model for repose angle

1.4 壤土接触参数的获取

1.4.1 最陡爬坡试验

根据测定的土壤颗粒粒径大小、密度和堆积角值，结合文献[22–25]和软件内置 GEMM 数据库，得到颗粒间接触参数的推荐取值范围：JKR 表面能为 10.45~15.75 J/m^2，恢复系数为 0.48~0.52，静摩擦因数为 0.82~1.16，动摩擦因数为 0~0.20。开展表 1 所示最陡爬坡试验[26]，结果表明，3 号水平的接触参数值所对应的堆积角相对误差最小，故各接触参数最优值附近区间低水平为 2 号水平值，高水平为 4 号水平值，即 JKR 表面能为 11.75~14.35 J/m^2，恢复系数为 0.49~0.51，静摩擦因数为 0.9~1.07，动摩擦因数为 0.05~0.15。

表1 最陡爬坡试验结果

Table 1 Design and results of steepest ascent test

序号	静摩擦因数	动摩擦因数	JKR 表面能/(J·m^{-2})	恢复系数	堆积角/(º)	相对误差/%
1	0.82	0.00	10.45	0.48	0.00	100.00
2	0.90	0.05	11.75	0.49	29.25	28.57
3	0.99	0.10	13.05	0.50	40.70	0.61
4	1.07	0.15	14.35	0.51	49.24	20.24
5	1.16	0.20	15.75	0.52	58.39	42.59

1.4.2 二次正交旋转组合试验

选择 JKR 表面能、恢复系数、动摩擦因数和静摩擦因数 4 个接触力学参数为试验因素。各因素高低水平值分别为通过最陡爬坡试验获取的范围值，利用 Design–Expert 数据处理软件，按照二次回归正交旋转试验设计方法进行试验，建立回归方程和优化模型。设计因素水平编码如表 2 所示。

表2 仿真试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of simulation test

试验因素	低水平	中水平	高水平
JKR 表面能 A/(J·m^{-2})	11.75	13.05	14.35
恢复系数 B	0.49	0.50	0.51
动摩擦因数 C	0.05	0.10	0.15
静摩擦因数 D	0.90	0.99	1.07

2 结果与分析

2.1 仿真试验结果

根据二次正交旋转组合试验设计进行仿真模拟试验，以各影响因素取值为自变量，以堆积角为评价指标，接触力学参数标定结果如表 3 所示。

表3 接触力学参数标定后的堆积角

Table 3 Design and results of contact mechanical parameters calibrate test

试验号	JKR 表面能/(J·m^{-2})	恢复系数	动摩擦因数	静摩擦因数	堆积角/(º)
1	14.35	0.51	0.99	0.10	50.67
2	13.05	0.50	0.99	0.10	39.35
3	13.05	0.49	0.99	0.05	28.75
4	14.35	0.50	1.07	0.10	46.49
5	13.05	0.50	0.99	0.10	38.66
6	13.05	0.50	0.90	0.05	37.99
7	13.05	0.50	0.99	0.10	38.66
8	11.75	0.51	0.99	0.10	45.73
9	14.35	0.49	0.99	0.10	33.42
10	13.05	0.51	0.99	0.05	41.34
11	13.05	0.50	0.99	0.10	39.01
12	13.05	0.51	0.90	0.10	46.67
13	13.05	0.49	0.99	0.15	35.32
14	13.05	0.49	1.07	0.10	31.35
15	13.05	0.49	0.90	0.10	34.22
16	14.35	0.50	0.90	0.10	43.35
17	13.05	0.51	0.99	0.15	48.24
18	14.35	0.50	0.99	0.15	46.32
19	11.75	0.50	0.90	0.10	43.23
20	13.05	0.50	1.07	0.15	40.03
21	14.35	0.50	0.99	0.05	37.32
22	13.05	0.50	0.99	0.10	40.36
23	11.75	0.49	0.99	0.10	34.95
24	11.75	0.50	0.99	0.05	37.95
25	13.05	0.50	0.90	0.15	45.00
26	11.75	0.50	1.07	0.10	36.31
27	13.05	0.51	1.07	0.10	45.49
28	11.75	0.50	0.99	0.15	43.13
29	13.05	0.50	1.07	0.05	36.72

2.2 堆积角回归模型及交互效应

应用 Design–Expert 软件对表 3 中的试验数据

进行分析，得到堆积角二次多项式回归模型。

$$\theta = 39.21+1.36A+6.68B-1.17C+3.16D+1.62AB+2.51AC+0.96AD+0.42BC+0.082BD-0.92CD+2.34A^2-0.5B^2+0.84C^2-0.26D^2。$$

由回归模型的方差分析结果(表 4)可知，该模型的 P 值为 0.000 1(P<0.01)，JKR 表面能(A)、颗粒间恢复系数(B)、颗粒间静摩擦因数(C)、颗粒间动摩擦因数(D)、JKR 表面能–恢复系数(AB)、JKR 表面能–静摩擦因数(AC)、JKR 表面能二次项(A^2)均小于 0.01，说明用该回归模型描述自变量与堆积角相关性时，自变量与因变量关系均极显著；决定系数 R^2 与校正决定系数 R^2_{adj} 分别为 0.981 1 和 0.962 2，均接近于 1，变异系数 CV 值与精密度分别为 2.58% 和 29.464，说明该堆积角拟合回归模型具有较高的可靠性。

表4　接触力学参数标定二次多项式模型的方差分析

Table 4　ANOVA of quadratic polynomial model of contact mechanical parameters calibrate test

方差来源	均方	自由度	平方和	P 值
模型	783.59	14	55.97	<0.000 1*
A	22.06	1	22.06	0.000 5*
B	535.07	1	535.07	<0.000 1*
C	16.50	1	16.50	0.001 6*
D	120.14	1	120.14	<0.000 1*
AB	25.30	1	25.30	0.000 3*
AC	10.47	1	10.47	0.007 6*
AD	3.65	1	3.65	0.087 2
BC	0.71	1	0.71	0.429 4
BD	0.027	1	0.027	0.876 0
CD	3.42	1	3.42	0.096 5
A^2	35.47	1	35.47	<0.000 1*
B^2	1.63	1	1.63	0.239 0
C^2	4.53	1	4.53	0.059 5
D^2	0.43	1	0.43	0.539 4
残差	15.10	14	1.08	
失拟项	13.11	10	1.31	
纯误差	1.99	4	0.50	
总和	798.68	28		

R^2=0.981 1; R^2_{adj}=0.962 2; CV=2.58%; 精密度为 29.464。

JKR 表面能二次项(A^2)、JKR 表面能与颗粒间恢复系数(AB)、JKR 表面能与颗粒静摩擦因数(AC)对堆积角影响显著，当静摩擦因数与动摩擦因数为优选区间内固定值时，堆积角随 JKR 表面能与恢复系数的增大而显著增大，参数之间存在一次与二次的交互效应。

2.3　最优参数组合的确定及仿真验证

利用 Design–Expert 软件对获取的堆积角回归模型，以实测 40.95° 堆积角为目标值求解，得到 6 组优化解。为使仿真结果与实测结果一致性更好，对所得 6 组优化解进行对比验证，选取外形轮廓最为近似的一组优化解，如图 3 所示。各自变量参数值分别为：JKR 表面能 13.05 J/m^2，颗粒间恢复系数 0.50，颗粒间静摩擦因数 1.06，动摩擦因数 0.15。采用优化解参数进行 5 次重复仿真试验，堆积角分别为 40.7°、41.35°、40.3°、41.99°、41.02°，标准偏差为 0.58°，表明该优化组合参数仿真结果稳定，且与实测结果无显著差异。

a　实测土堆；b　仿真土堆。

图3　堆积角实测与仿真试验土堆的外形轮廓

Fig.3　Morphology of loam soil for Repose angle test by simulation and experiment

3　结论

基于 Hertz–Mindlin with JKR 接触模型，通过实测试验与仿真试验分别获取黏弹性壤土本征物理参数与接触力学参数，建立了黏弹性土壤壤土颗粒离散元模型，该壤土模型仿真试验堆积角与实测试验堆积角结果误差为 0.3%，土堆的外形轮廓相似性高。

堆积角二次回归模型方差分析结果表明，该模型显著性高，以实测堆积角 40.95°为目标值对回归模型寻优，其接触力学参数最优组合为：JKR 表面能 13.05 J/m^2，恢复系数 0.50，静摩擦因数 1.06，动摩擦因数为 0.15。

参考文献：

[1] 徐泳，李红艳，黄文彬．耕作土壤动力学的三维离散元建模与仿真方案策划[J]．农业工程学报，2003，19(2)：34–38．

[2] 方会敏，姬长英，AHMED Ali Tagar，等．秸秆—土壤—旋转耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]．农业机械学报，2016，47(1)：60–67．

[3] 于建群，钱立彬，于文静，等．开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]．农业机械学报，2009，40(6)：53–57．

[4] 张锐．基于离散元细观分析的土壤动态行为研究[D]．长春：吉林大学，2005．

[5] 顿国强，杨永振，陈海涛，等．基于 EDEM 的控位分层施肥开沟器作业过程的仿真与试验[J]．湖南农业大学学报(自然科学版)，2018，44(1)：95–100．

[6] FRACEZEK J，ZLOBECKI A，ZEMANEK J. Assessment of angle of repose of granular plant material using computer image analysis[J]．Journal of Food Engineering，2007，83(1)：17–22．

[7] MAK J，CHEN Y，SADEK M A．Determining parameters of a discrete element model for soil–tool interaction in three different soils[J]．Soil & Tillage Research，2013，126(3)：34–41．

[8] 王成军，李耀明，马履中，等．小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]．农业工程学报，2012，28(11)：274–278．

[9] 韩燕龙，贾富国，唐玉荣，等．颗粒滚动摩擦因数对堆积特性的影响[J]．物理学报，2014，30(11)：127–132．

[10] 贾富国，韩燕龙，刘扬，等．稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J]．农业工程学报，2014，30(11)：254–260．

[11] 宋学锋，张锋伟，戴飞，等．基于离散元的施肥机肥料块破碎装置参数的优化[J]．湖南农业大学学报(自然科学版)，2017，43(2)：206–211．

[12] COETZEE C J，ELS D N J．Calibration of discrete element parameters and the modeling of soil discharge and bucket filling[J]．Computers and Electronics in Agriculture，2009，65(2)：198–212．

[13] 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]．农业机械学报，2017，48(3)：49–56．

[14] UCGUL Mustafa，FIELKE John M，SAUNDERS Chris．3D DEM tillage simulation：validation of a hysteretic spring contact model in for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]．Soil & Tillage Research，2014，144：220–227．

[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]．农业机械学报，2017，48(10)：50–59．

[16] 吴爱祥，孙业志，刘湘平．散体动力学理论及其研究[M]．北京：冶金出版社，2002．

[17] GB/T11986—1989 表面活性剂、粉体和颗粒休止角测量[S]．

[18] 刘鸿文．材料力学[M]．北京：高等教育出版社，2013．

[19] JOHNSON K L，KENDALL K，ROBERTS A D．Surface energy and the contact of elastic soilds[J]．Proc R Soc Lond A，1971，324：301–313．

[20] DEM Solution．EDEM 2017 Theory Reference Guide[M]．Edinburgh：DEM Solution，2017．

[21] 南京水利科学研究院土工研究所．土工试验技术手册[K]．北京：人民交通出版社，2007．

[22] 石林榕，吴建民，赵武云，等．基于离散单元法农田土壤单轴压缩模型的建立与参数校核[J]．中国农业大学学报，2015，20(4)：174–182．

[23] 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]．农业机械学报，2016，47(9)：62–72．

[24] 丁启朔，葛双洋，任骏．水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J]．农业机械学报，2017，48(1)：47–63．

[25] 黄玉祥，杭程光，苑梦蝉，等．深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]．农业机械学报，2016，47(7)：80–88．

[26] 刘凡一，张舰，李博，等．基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]．农业工程学报，2016，32(12)：247–253．

责任编辑：罗慧敏
英文编辑：吴志立