

海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定

邢洁洁¹, 张锐¹, 吴鹏¹, 张喜瑞^{1*}, 董学虎², 陈瑛³, 汝绍锋¹

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 中国热带农业科学院农业机械研究所, 湛江 524091;
3. 加拿大曼尼托巴大学, 温尼伯 R3T 2N2)

摘要: 为获取适用于海南热区砖红壤与触土部件相互作用的离散元仿真模型参数, 该文利用 EDEM 仿真软件中 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型对海南地区砖红壤进行相关模型参数标定, 首先以含水率为 7.8%、实际休止角为 32.35° 的砖红壤为研究对象, 以物理试验获取的砖红壤-砖红壤、砖红壤-触土部件间恢复系数、静摩擦系数及滚动摩擦系数为标定对象, 应用 Plackett-Burman 设计试验筛选出对休止角有显著影响的参数: 即砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数、JKR 表面能、砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数、砖红壤-砖红壤恢复系数。进一步以砖红壤颗粒休止角为响应值, 基于 Box-Behnken 设计试验得到休止角与显著性参数的二阶回归模型, 并以实际休止角为目标, 针对显著性参数进行寻优, 得到最佳组合: 砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数为 0.07、砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数为 0.24、砖红壤-砖红壤恢复系数为 0.4、JKR 表面能为 4.31 J/m²。最后在标定的参数下进行休止角与破土阻力离散元仿真验证试验, 对比计算得出仿真休止角与实测休止角相对误差为 0.62%, 仿真破土阻力与实测破土阻力相对误差为 3.43%, 并通过对比分析两次试验中破土阻力变化曲线的拟合情况, 得出两曲线间的可决系数 $R^2=0.993\ 9$, 均方根误差 RMSE=0.017 7, 该结果表明标定所得相关参数可用作海南热区砖红壤离散元仿真。

关键词: 砖红壤; 离散元模型; 休止角; 参数标定; 破土阻力

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.018

中图分类号: S220.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0158-09

邢洁洁, 张锐, 吴鹏, 张喜瑞, 董学虎, 陈瑛, 汝绍锋. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.018 <http://www.tcsae.org>
Xing Jiejie, Zhang Rui, Wu Peng, Zhang Xirui, Dong Xuehu, Chen Ying, Ru Shaofeng. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 158—166. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

砖红壤是中国最南端热带雨林或季雨林地区的地带性土壤, 相较于普通土壤有更强的膨胀性、流塑性及持水性, 具有质地黏重、土层深厚、比阻大等特点。对砖红壤地进行耕作作业时, 会出现阻力大、效率低、触土部件土壤粘附严重等问题^[1-2], 严重影响生产效率。基于砖红壤自身结构的复杂性, 研发适用于海南热区砖红壤地的高性能耕作装备十分必要。在设计、优化关键触土部件时, 往往需要解析砖红壤-触土部件的相互作用耦合机制, 而实际土槽试验或田间试验仅能了解土壤宏观运动情况, 无法对土壤微观运动规律进行探究。目前国内外已有专家学者利用有限元法探究耕作过程中土壤动态扰动行为^[3-4], 然而有限元法是基于连续介质的表达形式模拟土壤整体破坏行为, 无法模拟土壤颗粒运动过程^[5-6]。近几年来, 随着农业机械化水平的不断提高, 由 Cundall

等^[7]提出的用以解决不连续介质问题的离散元法逐渐被应用在农业工程领域, 该方法可用于模拟颗粒间微观和宏观变形, 在土壤-土壤、土壤-触土部件间的接触力学模型分析方面具有广泛应用前景^[8-12]。

农机具触土部件在田间进行耕作作业时, 由于土壤类型的不同, 土壤-触土部件间的相互作用也会存在差异^[13]。因此, 对不同的土壤进行离散元建模时, 需要根据土壤的具体情况, 选择合适的土壤接触模型并对相关模型参数进行准确性标定^[14], 以确保离散元仿真试验的真实性。Santos^[15]通过旋转滚筒法获取了樱桃果干颗粒的休止角, 并标定出颗粒间的接触参数; Mustafa 等^[16]研究了土壤分别在有粘结力和无粘结力情况下颗粒塑性变形问题; 王宪良等^[17]验证了弹塑性接触模型 (Edinburgh elasto-plastic cohesion model, ECM) 符合土壤本构关系, 并对土壤颗粒间的静摩擦系数和滚动摩擦系数进行了标定; 石林榕等^[18]建立了西北旱区农田土壤颗粒接触模型并对关键参数进行离散元标定; 张锐等^[19]提出一种标定沙土颗粒仿真参数的方法, 试验得出颗粒形状对颗粒间静摩擦系数影响较大; 丁启朔等^[20]建立了湿粘水稻土的深松耕作离散元模型并对相关仿真参数进行标定。

目前, 关于土壤建模参数标定的研究主要是针对黏性较弱如沙土、旱土或岩石等土壤类型, 对于黏性较大

收稿日期: 2019-11-16 修订日期: 2020-03-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51865007)

作者简介: 邢洁洁, 讲师, 主要从事热带智能农业机械研究。

Email: 584731137@qq.com

*通信作者: 张喜瑞, 教授, 主要从事热带智能农业机械研究。

Email: zhangxirui_999@sina.com

的砖红壤土并不适用。本文针对砖红壤离散元模型参数不清的问题，以海南热区砖红壤样品为研究对象，选取 EDEM 软件中“Hertz-Mindlin with JKR”(JKR)接触模型，通过土壤休止角与破土阻力仿真对比试验，完成对砖红壤土离散元模型参数的标定，以期后续探究砖红壤-触土部件耦合机理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 接触模型的选取

砖红壤质地厚重且存在粘附现象，经典的 Hertz-Mindlin 接触模型仅考虑弹性变形，不考虑颗粒模型间的粘结力，难以准确模拟触土部件在砖红壤中的作业规律；Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型虽然可用来模拟粘结颗粒，但该模型是利用有限大小的“胶粘剂”粘结，适用于模拟混凝土和岩石等较坚硬介质^[21]；而 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型是一种建立在 Hertz 理论上的粘结性颗粒接触模型，同时考虑到湿颗粒间粘结力对颗粒运动的影响，适用于模拟颗粒间因静电、水分等原因发生明显粘结和团聚的物料，如农作物和泥土等^[22-23]。“Hertz-Mindlin with JKR”接触模型中的法向弹性力可较好的表征颗粒间的粘弹性特征。

Hertz-Mindlin with JKR 接触模型的法向弹性力基于法向重叠量和表面能，即

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

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

式中 F_{JKR} 为 JKR 法向弹性力，N； δ 为两接触颗粒之间法向重叠量，m； α 为两接触颗粒之间切向重叠量，m； γ 为表面能，N/m； E^* 为等效弹性模量，Pa； R^* 为等效接触半径，m。等效弹性模量 E^* 与等效接触半径 R^* 定义为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

式中 E_1 、 E_2 分别为两接触颗粒的弹性模量，Pa； ν_1 、 ν_2 分别为两接触颗粒的泊松比； R_1 、 R_2 分别为两接触颗粒的接触半径，m。

当表面能 $\gamma=0$ 时，JKR 法向弹性力变为 Hertz-Mindlin 法向力：

$$F_{JKR} = F_{Hertz} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

即使颗粒并不是直接接触，Hertz-Mindlin with JKR 接触模型也提供吸引凝聚力^[23]，颗粒间具有非零凝聚力的最大间隙为

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

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

式中 δ_c 为颗粒间具有非零凝聚力时的法向最大间隙，m； α_c 为颗粒间具有非零凝聚力时的切向最大间隙，m。

当 $\delta > \delta_c$ 时，颗粒间凝聚力变为 0；当颗粒并非实际接触且间隔小于 δ_c 时，凝聚力达到最大值：

$$F_{cohesion} = -\frac{3}{2} \pi \gamma R^* \quad (8)$$

式中 $F_{cohesion}$ 为 2 个颗粒间凝聚力，N； R^* 为等效接触半径，m。

海南热区雨水较多，Hertz-Mindlin with JKR 接触模型也可模拟湿润砖红壤颗粒，此时将 2 个颗粒分开所需要的分离力取决于液体表面张力和湿润角：

$$F_{pullout} = -2\pi\gamma_s \cos(\tau) \sqrt{R_i R_j} \quad (9)$$

式中 $F_{pullout}$ 为将 2 个颗粒分开所需的分离力，N； γ_s 为液体表面张力，N； τ 为湿润角，(°)； R_i 、 R_j 为颗粒半径，m。

1.2 模型参数的类型及标定

模型参数包括材料本征参数、接触参数和接触模型参数，其中材料本征参数与接触模型参数较为固定，可通过查阅资料得到。故本文主要针对砖红壤模型接触参数进行试验标定。

1.2.1 试验材料及本征参数

本次试验土壤样品采自海南大学儋州市香蕉地试验田，地处 19°11'~19°52'N，108°56'~109°45'E，测得采集土样的含水率为 7.8%，由于土样不均匀，对土样进行风干、碾碎、过筛处理后，根据土样的 pH 值，加入适量氢氧化钠溶液制成悬浮液并定容，根据文献^[24]所述方法计算各级颗粒的质量，并计算其百分含量。测定出砖红壤颗粒组成情况如表 1 所示。

表 1 砖红壤颗粒组成
Table 1 Particle composition of latosol

颗粒粒径 Particle size/mm	颗粒百分比含量 Percentage content of particles/%
<0.05	82.1
<0.01	72.6
<0.005	63.5

砖红壤颗粒材料本征参数为^[25]：泊松比 0.38；剪切模量 1×10^6 Pa；密度 $1\ 850\ \text{kg/m}^3$ ；接触模型参数主要为 JKR 表面能，将仿真颗粒堆积密度和仿真规模导入 EDEM 通用颗粒材料数据库（Generic EDEM material model database, GEMM）中，得 JKR 表面能为 $3.8 \sim 10.2\ \text{J/m}^2$ 。

1.2.2 砖红壤休止角物理试验

颗粒状物质被倾倒在水平面时会形成锥体，锥体表面与水平面所成内角即为休止角，是表征颗粒物料流动、摩擦等特性的宏观参数，与颗粒密度、颗粒表面积及颗粒摩擦系数有关，因此，休止角物理试验常被用作颗粒物料离散元参数标定^[26-27]。试验样品土壤堆积密度为 $2.51\ \text{kg/m}^3$ ，土壤含水率 7.8%，采用文献^[28]所述方法进行土壤休止角试验，试验结果如图 1 所示，重复 10 次测定取砖红壤实际休止角平均值为 32.35° 。



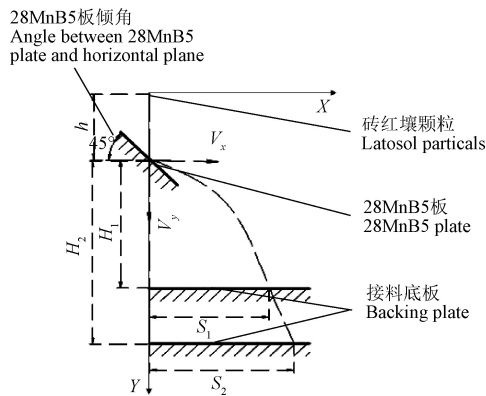
1. 接料板 2. 砖红壤颗粒
1. Feeder plate 2. Latosol particles

图 1 砖红壤休止角物理试验

Fig.1 Physical test of repose angle of latosol

1.2.3 恢复系数测定试验

在耕作作业过程中,土壤-土壤、土壤-触土部件间会存在各种碰撞和挤压,从而造成触土部件不同程度的损坏。恢复系数是体现碰撞特性的力学参数,定义为碰撞后法向反弹速度与碰撞前法向靠近速度的比值^[29]。恢复系数通常采用自由落体试验或平板碰撞试验测定,由于土壤颗粒大小不均匀,采用自由落体试验时,被测颗粒常发生旋转或多点碰撞,碰撞后很难产生垂直方向上的弹回,测定结果会产生较大误差。本试验中,基于运动学原理,采用图 2 所示斜板碰撞试验装置测定恢复系数。



注: h 为土壤颗粒下落点距 28MnB5 板的高度, m; S_1 、 S_2 和 H_1 、 H_2 分别为土壤颗粒两次碰撞 28MnB5 板后在水平面内、竖直平面内的位移, m; 28MnB5 板倾角为 45° ; X 、 Y 为坐标轴; V_x 、 V_y 分别为颗粒碰撞 28MnB5 板后沿 X 方向和 Y 方向的速度, m/s。
Note: h is the height between the falling point of soil particles and 28MnB5 plate, m. S_1 , S_2 , H_1 and H_2 are the displacements of soil particles in horizontal and vertical planes respectively after colliding with 28MnB5 plate respectively, m; X , Y are the coordinate axes, V_x and V_y are the velocities of particles in X and Y directions after colliding with 28MnB5 plate respectively, m/s.

图 2 斜板碰撞试验原理图

Fig.2 Principle diagram of inclined plate collision test

砖红壤颗粒下落至 28MnB5 板处与板发生碰撞做斜抛运动,可分解为沿 X 方向的匀速运动(速度 V_x)和沿 Y 方向初速度为 V_y ,加速度为 g 的匀变速运动,最终落在接料底板上,即:

$$\begin{cases} S_1 = V_x t \\ H_1 = V_y t + \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 S_i 、 H_i ($i=1, 2$) 分别为土壤颗粒碰撞 28MnB5 板后在水平面内、竖直平面内的位移, m。

改变接料底板的高度 H_1 , H_2 , 分别测得两次砖红壤颗粒碰撞后在接料底板上的水平位移量 S_1 , S_2 , 可得:

$$\begin{cases} V_x = \sqrt{\frac{g S_1 S_2 (S_1 - S_2)}{2(H_1 S_2 - H_2 S_1)}} \\ V_y = \frac{H_1 V_x}{S_1} - \frac{g S_1}{2 V_x} \end{cases} \quad (11)$$

式中 S_1 、 S_2 和 H_1 、 H_2 分别为两次土壤颗粒碰撞 28MnB5 板后在水平面内、竖直平面内的位移。

由恢复系数定义可求得恢复系数 C_r 得:

$$C_r = \frac{V_n}{V'_n} = \frac{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2)} \cos \left[45^\circ + \arctan \left(\frac{V_y}{V_x} \right) \right]}{V_0 \sin 45^\circ} \quad (12)$$

$$V_0 = \sqrt{2gh} \quad (13)$$

式中 V_n 为碰撞后法向反弹速度, m/s; V'_n 为碰撞前法向靠近速度, m/s; V_0 为碰撞前颗粒速度, m/s。

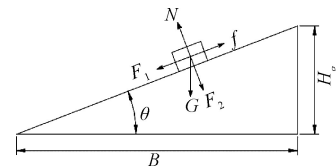
砖红壤-触土部件间恢复系数通过砖红壤颗粒撞击 28MnB5 板测定;砖红壤-砖红壤间恢复系数可采用粘接剂将砖红壤土颗粒均匀粘附在斜板表面,使其形成颗粒板,通过砖红壤颗粒撞击颗粒板测定。通过多次反复试验测定,最终得到:砖红壤颗粒间恢复系数范围为 0.1~0.7,砖红壤颗粒与 28MnB5 材料板间恢复系数范围为 0.05~0.7。

1.2.4 静摩擦系数测定试验

在土壤实际耕作过程中,土壤-土壤、土壤-触土部件之间大部分为多点接触,产生的摩擦大多为静摩擦;在离散元仿真试验中,两颗粒间受到的切向合力通常是通过静摩擦力来限制的,因此在采用离散元模拟土壤与触土部件相互作用过程时,静摩擦系数对模拟结果影响较大。

设计如图 3 所示的斜板试验,通过改变斜板高度 H_g ,当砖红壤颗粒开始滑落时测定斜板倾角,进而求得静摩擦系数,反复试验测定 20 次,取平均值。砖红壤颗粒刚开始滑落时在斜板上的平衡方程为

$$\begin{cases} F_1 = G \sin \theta \\ F_2 = G \cos \theta \\ F_1 - f = 0 \\ F_2 - N = 0 \\ f = \mu F_2 \end{cases} \quad (14)$$



注: F_1 为拉力, N; F_2 为压力, N; G 为重力, N; f 为摩擦力, N; N 为支持力, N; μ 为静摩擦系数; θ 为斜板倾角, ($^\circ$); B 为底座长度, mm; H_g 为斜面高度, mm。
Note: F_1 is tension, N; F_2 is pressure, N; G is gravity, N; f is friction, N; N is support force, N; θ is angle between base and slope, ($^\circ$); B is the base length, mm; H_g is the height of the slope, mm.

图 3 静摩擦系数测定试验原理图

Fig.3 Principle diagram of static friction coefficient test

砖红壤颗粒在斜板上的静摩擦系数为

$$\mu = \frac{f}{F_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{G \sin \theta}{G \cos \theta} = \tan \theta \quad (15)$$

式中 F_1 为拉力, N; F_2 为压力, N; G 为重力, N; f 为摩擦力, N; N 为支持力, N; μ 为静摩擦系数; θ 为斜板倾角, ($^\circ$)。

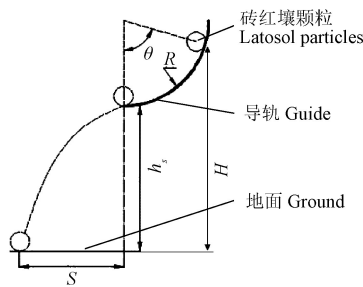
其中, 砖红壤-触土部件间静摩擦系数通过砖红壤颗粒在 28MnB5 板滑动试验测定; 砖红壤-砖红壤间静摩擦系数可通过砖红壤颗粒与上述颗粒板滑动试验测定。反复多次试验取平均值, 最终得到砖红壤-砖红壤间静摩擦系数为 0.4~1.1, 砖红壤-触土部件间静摩擦系数为 0.3~0.9。

1.2.5 滚动摩擦系数测定试验

设计如图 4 所示试验装置测量滚动摩擦系数, 质量为 m 的砖红壤颗粒在半径为 R 的导轨 θ 角处自由滚落, 测定滚落高度 H 、水平抛出高度 h_s 及水平抛出距离 S , 由微元法可知, 当颗粒转动一个较小的角度 ω 时, 对导轨的正压力近似不变, 即:

$$f = \sigma mg \cos(\theta - \omega) \quad (16)$$

式中 f 为砖红壤颗粒在整个运动过程中的摩擦力, N; σ 为滚动摩擦系数; θ 为导轨倾角, ($^\circ$); m 为砖红壤颗粒质量, kg; g 为重力加速度, N/kg; ω 为砖红壤颗粒转动的较小的一个角度, ($^\circ$)。



注: θ 为导轨倾角, ($^\circ$); R 为导轨半径, m; h_s 为砖红壤颗粒抛出点距地面高度, m; S 为水平抛出距离, m; H 为砖红壤颗粒滚落高度, m。
Note: θ is angle between base and guide rail, ($^\circ$); R is guide radius, m; h_s is height of latosol particles throwing point from the ground, m; S is horizontal throw distance, m; H is the rolling height of latosol particles, m.

图 4 滚动摩擦系数测定试验原理图

Fig.4 Principle diagram of rolling friction coefficient test

在此过程中, 滑动摩擦力所做的功 Q_1 为

$$Q_1 = \int_0^\theta 2R\omega \cdot \sigma mg \cos(\theta - \omega) d\omega \quad (17)$$

式中 R 为导轨半径, m。

砖红壤颗粒在距地面 h_s 处水平抛出的动能 Q_2 为

$$Q_2 = \frac{1}{2}mv^2 \quad (18)$$

式中 v 为砖红壤颗粒从导轨抛出时速度, m/s。

重力所做的功 Q 为

$$Q = mgh \quad (19)$$

$$H = h_s + R(1 - \cos \theta) \quad (20)$$

式中 H 为砖红壤颗粒滚落高度, m; h_s 为砖红壤颗粒抛出点距地面高度, m。

由砖红壤颗粒运动过程中的能量守恒, 即 $Q_1 + Q_2 = Q$ 可求出滚动摩擦系数 σ , 若要测量砖红壤颗粒间滚动摩擦

系数, 仍可采用上述粘接剂形成颗粒板, 再将砖红壤颗粒放置于颗粒板上自由滚落, 多次重复试验测定求平均值: 砖红壤-砖红壤间滚动摩擦系数为 0.05~0.25, 砖红壤-触土部件间滚动摩擦系数为 0.05~0.25。

1.3 参数标定试验设计

综上试验结果: 砖红壤颗粒之间的恢复系数范围为 0.1~0.7, 静摩擦系数范围为 0.4~1.1, 滚动摩擦系数范围为 0.05~0.25; 砖红壤土颗粒与触土部件之间的恢复系数范围为 0.05~0.7, 静摩擦系数范围为 0.3~0.9, 滚动摩擦系数范围为 0.05~0.25; JKR 表面能取值范围为 3.8~10.2 J/m²。应用 Plackett-Burman 和 Box-Behnken 设计试验进行参数标定, 其中试验因素选定为恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数和 JKR 表面能, 试验指标为休止角, 确定各因素水平表如表 2 所示, 共 7 个因素, 各取一个高水平、一个低水平。

表 2 仿真试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of simulation test

因素 Factors	水平 Levels		
	-1	0	1
A (砖红壤-砖红壤恢复系数) A (L-L restitution coefficient)	0.1	0.4	0.7
B (砖红壤-砖红壤静摩擦系数) B (L-L static friction coefficient)	0.4	0.75	1.1
C (砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数) C (L-L rolling friction coefficient)	0.05	0.15	0.25
D (砖红壤-28MnB5 板恢复系数) D (L-M restitution coefficient)	0.05	0.38	0.7
E (砖红壤-28MnB5 板静摩擦系数) E (L-M static friction coefficient)	0.3	0.6	0.9
O (砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数) O (L-M rolling friction coefficient)	0.05	0.15	0.25
G (JKR 表面能/(J·m ⁻²)) G (JKR Surface energy/(J·m ⁻²))	3.8	7	10.2

注: L 为砖红壤; M 为 28MnB5 板。

Note: L is latosol; M is steel plate.

2 结果与分析

2.1 Plackett-Burman 试验设计确定关键影响因素

Plackett-Burman 是一种两水平的试验设计方法, 通过比较各个因子两水平的差异与整体的差异来确定因子的显著性。延用表 2 设置各因素水平, 共进行 12 次试验, 试验方案及结果如表 3 所示, 其中设置 4 个空白列用于误差分析。

表 3 Plackett-Burman Design 方案及结果

Table 3 Scheme and results of Plackett-Burman Design

序号 No.	试验因素 Test factors											休止角 Repose angle/($^\circ$)
	A	B	C	D	E	O	G	H	J	K	L	
1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	46.8
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	7.3
3	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	22.6
4	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	16.7
5	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	23.6
6	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	22.1
7	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	25.8
8	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	52.6
9	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	50.4
10	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	35.2
11	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	31.9
12	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	29.7

注: H、J、K、L 为空白列。

Note: H, J, K and L indicate blank column.

对试验结果进行分析, 得到 7 个因素对休止角贡献度如表 4 所示。由表 4 可知, 7 个因素对休止角均为正效应, 即休止角随着该 7 个因素增大而增大, 其中对休止角影响较为显著的 4 个因素依次为: C (砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数)、 G (表面能)、 O (砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数) 和 A (砖红壤-砖红壤恢复系数), 合计贡献度为 95.68%。

表 4 Plackett-Burman Design 试验结果分析

Table 4 Analysis of Plackett-Burman Design test results

试验因素 Test factors	标准化效应 Stabilized effects	均方和 Sum of mean squares	贡献度 Contribution degree/%
A	4.88	71.54	3.40
B	1.18	4.20	0.20
C	19.38	1 127.14	53.52
D	3.12	29.14	1.38
E	0.42	0.52	0.03
O	7.52	169.50	8.05
G	14.68	646.80	30.71

2.2 Box-Behnken 试验设计

2.2.1 试验方案与结果

得到休止角显著影响因素后, 应用 Box-Behnken 设计试验进行响应面分析并寻找最优解, 以 C (砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数)、 G (表面能)、 O (砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数) 和 A (砖红壤-砖红壤恢复系数) 为试验因素, 休止角为试验指标, 沿用表 2 各因素试验水平, 共进行 29 次试验, 试验方案及结果如表 5 所示。

表 5 Box-Behnken Design 方案及结果

Table 5 Scheme and results of Box-Behnken Design

序号 No.	A L-L restitution coefficient	C L-L rolling friction coefficient	O L-M rolling friction coefficient	G JKR surface energy/ (J·m ⁻²)	休止角 Repose angle/(°)
1	-1	0	-1	0	29.6
2	0	0	-1	-1	28.6
3	0	0	0	0	31.6
4	0	-1	0	1	32.2
5	0	0	1	-1	32.8
6	0	1	-1	0	33.2
7	0	0	0	0	31.4
8	0	-1	-1	0	30.4
9	-1	0	1	0	31.8
10	-1	1	0	0	32.1
11	0	0	0	0	31.5
12	1	0	-1	0	32.1
13	0	0	-1	1	33.9
14	0	0	0	0	31.2
15	0	0	1	1	31.6
16	-1	0	0	1	30.4
17	1	0	0	1	33.4
18	1	-1	0	0	31.8
19	1	0	0	-1	29.3
20	1	0	1	0	32.4
21	0	1	1	0	33.5
22	0	1	0	1	33.4
23	0	-1	0	-1	29.6
24	0	1	0	-1	31.5
25	-1	0	0	-1	29.5
26	1	1	0	0	32.1
27	0	-1	1	0	32.4
28	-1	-1	0	0	29.5
29	0	0	0	0	31.6

2.2.2 休止角回归模型分析

应用 Design-expert 软件对试验结果进行多元回归拟合分析, 可得休止角回归模型:

$$y = 31.46 + 0.68A + 0.82C + 0.56O + 1.13G - 0.57AC - 0.48AO + 0.80AG - 0.43CO - 0.18CG - 1.62OG - 0.53A^2 + 0.44C^2 + 0.51O^2 - 0.25G^2$$

该回归方程的决定系数 $R^2=0.991$, 表明有 99.11% 试验差异可用该模型解释, 与实际数据的拟合程度高; 校正决定系数 $\text{adj-}R^2=0.982$ 与 R^2 非常接近 1, 表明相关性较好; 变异系数 $\text{CV}=0.60\%$, 综上表明该模型具有较好的可靠性, 可以用于进一步分析。对该模型试验结果进行回归方差分析, 结果如表 6 所示。由表 6 可以看出, 模型 $P<0.000$, 说明该休止角回归模型极显著; 在给定的试验因素水平范围内, A (砖红壤-砖红壤恢复系数)、 C (砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数)、 O (砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数)、 G (JKR) 对休止角影响极显著; AC 、 AG 、 OG 对休止角影响极显著, AO 、 CO 对休止角影响较为显著, CG 对休止角影响不显著; A^2 、 C^2 、 O^2 对休止角影响极显著, G^2 对休止角影响较为显著。

表 6 Box-Behnken Design 二次回归模型方差分析

Table 6 ANOVA of Box-Behnken Design quadratic model

方差源 Variance source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	55.42	14	3.96	111.33	<0.000 1
A	5.60	1	5.60	157.58	<0.000 1
C	8.17	1	8.17	229.69	<0.000 1
O	3.74	1	3.74	105.20	<0.000 1
G	15.41	1	15.41	433.45	<0.000 1
AC	1.32	1	1.32	37.19	<0.000 1
AO	0.90	1	0.90	25.38	0.000 2
AG	2.56	1	2.56	71.99	<0.000 1
CO	0.72	1	0.72	20.32	0.000 5
CG	0.12	1	0.12	3.44	0.084 6
OG	10.56	1	10.56	297.04	<0.000 1
A^2	1.79	1	1.79	50.44	<0.000 1
C^2	1.24	1	1.24	34.78	<0.000 1
O^2	1.70	1	1.70	47.76	<0.000 1
G^2	0.41	1	0.41	11.48	0.004 4
纯误差 Pure error	0.11	4	0.03		
总和 Sum	55.53	18			

2.2.3 参数优化与试验验证

在设置的试验因素水平范围内, 基于 Design-expert 软件的优化模块, 以实际测得休止角 32.35° 为目标对休止角回归模型进行寻优, 对得到的若干组解进行休止角仿真验证, 得到与物理试验形状相近的一组最优解, 即 A (砖红壤-砖红壤恢复系数) 为 0.4, C (砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数) 为 0.07, O (砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数) 为 0.24, G (JKR 表面能) 为 4.31 J/m^2 ; 在 EDEM 软件中将 A 、 C 、 O 、 G 设置为上述最优解, 其余参数选取中间水平, 即 B (砖红壤-砖红壤静摩擦系数) 0.75、 D

(砖红壤-28MnB5 板恢复系数) 0.38、 E (砖红壤-28MnB5 板静摩擦系数) 0.6, 该优化解下得到的休止角仿真结果与实际物理试验结果对比如图 5 所示。

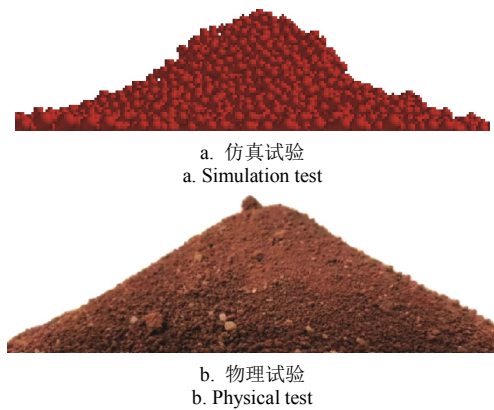


图 5 仿真试验与物理试验对比
Fig.5 Comparison of simulation and physical tests

在休止角测量试验中, 散料堆会出现“凹形表面”和“凸形表面”等现象^[30], 堆积边界参差不齐, 使得直接测量或采用 EDEM 软件后处理量角器方法测量结果不够准确。为更精确测得休止角, 本次试验借助 Python 的 matplotlib 模块、pillow 模块及 scikit learn 的 Linear regression 模块对试验图像进行处理并求解, 处理过程如下:

1) 读取砖红壤土堆单侧图像并进行图像的灰度及二值化处理 (图 6a); 在处理完的图片上选取坡度边界, 对获取到的数据进行最小二乘线性拟合, 进而确定拟合方程斜率 (图 6b);

2) 按式 (21) 计算休止角:

$$\zeta = \frac{\arctan |k| \times 180^\circ}{\pi} \quad (21)$$

式中 ζ 为砖红壤土堆测量休止角, ($^\circ$); k 为斜率。

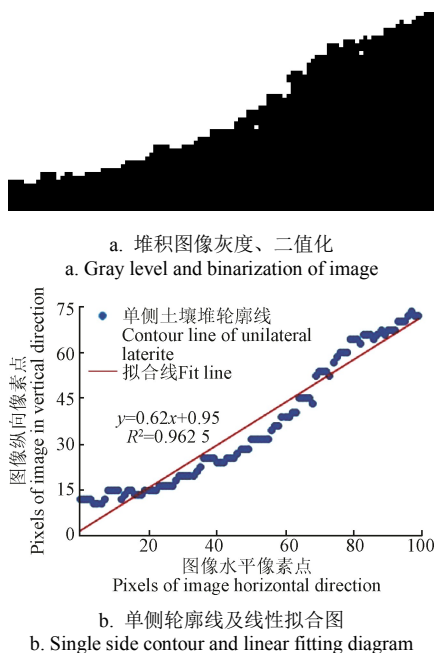


图 6 砖红壤休止角数值测量
Fig.6 Numerical measurement of repose angle of latosol

由图 7 可知, 砖红壤休止角单侧轮廓采用最小二乘法拟合出的线性方程为 $y=0.62x+0.95$, 斜率 $k=0.62$, 带入式 (21) 中得休止角 ζ 为 31.79° , 重复 5 次试验, 得到砖红壤休止角计算值分别为: 31.79° 、 32.93° 、 31.96° 、 32.48° 和 32.53° , 平均值为 32.33° , 与砖红壤休止角实际测量值 32.35° 相对误差为 0.62%。

2.3 破土阻力对比试验

为进一步核实标定的模型参数的准确性与合理性, 设计破土阻力对比验证试验: 在 EDEM 软件中设置上述标定最优参数, 并生成砖红壤颗粒; 通过 EDEM 软件仿真模拟破土刃在砖红壤中破土过程, 并进行实际试验, 对比破土阻力变化的拟合情况。

2.3.1 EDEM 仿真试验

在 SolidWorks 软件中建立大小为 $350 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的土槽与破土刃三维模型并导入 EDEM 软件中, 待完全生成土壤颗粒后, 让破土刃以 1 m/s^2 的加速度从静止加速至 1 m/s , 之后继续匀速前进直至完全穿过砖红壤土层, 耕作深度为 80 mm , 仿真过程如图 7 所示。待仿真结束后通过后处理模块导出运动过程中阻力变化数据。

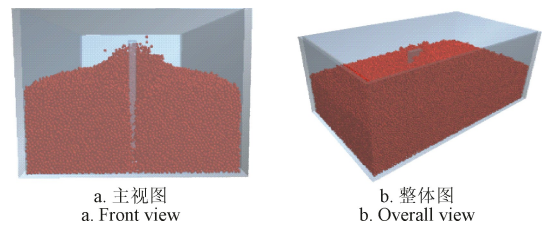


图 7 破土过程仿真试验图
Fig.7 Simulation test diagram of soil breaking process

2.3.2 土槽试验

搭建如图 8 所示试验装置, 取相同大小土槽置于试验台上, 土槽内砖红壤取自儋州市香蕉试验田, 土槽上方安装直线导轨。调整试验台高度, 使得测力仪与直线导轨位于同一水平线上, 由伸缩电机带动测力仪和破土刃运动, 控制破土刃沿直线导轨以 1 m/s^2 的加速度从静止加速至 1 m/s , 并匀速前进穿过砖红壤土层, 与仿真试验中的运动一致, 记录运动过程中测力计读数。

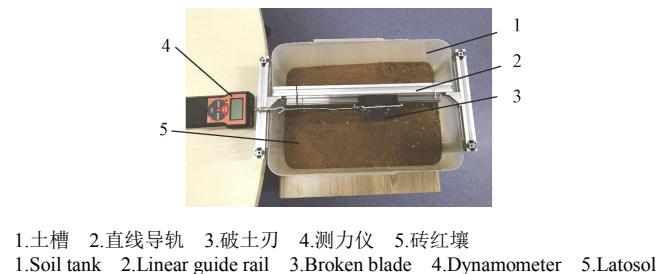


图 8 破土过程实际试验图
Fig.8 Actual test diagram of soil breaking process

2.3.3 阻力对比分析

绘制仿真运动过程与实际试验过程阻力变化曲线, 如图 9 所示, 对比分析两条曲线可知, 在破土刃刚开始破土时所受阻力较大, 随着破土刃逐渐松开土壤, 所受

阻力逐渐趋于稳定,对比可得两阻力曲线形状趋于一致;仿真试验所得稳定破土阻力 3.31 N,与实际测量所得稳定破土阻力 3.2 N 相对误差为 3.43%,相对误差较小;使用 scikit learn 中的 metrics 模块分别计算模型的决定系数 R^2 与均方根误差 RMSE,得出两曲线间的 $R^2=0.993\ 9$,趋于 1,说明两曲线拟合状况越好;RMSE=0.017 7,趋于 0,说明两曲线的离散程度越小。综上,表明本文所标定砖红壤土颗粒仿真模型参数准确可靠。

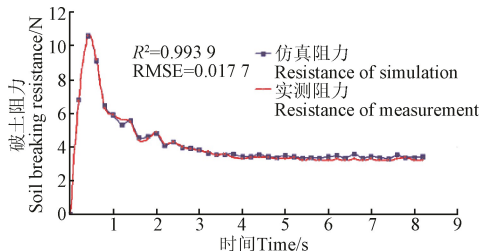


图9 仿真与试验过程破土阻力对比分析

Fig.9 Comparison of soil breaking resistance in simulation and test

3 结 论

1) 针对海南热区特有的砖红壤土,基于 EDEM 离散元仿真软件,选用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型对含水率为 7.8%的砖红壤样品进行离散元仿真,通过试验测定砖红壤-砖红壤、砖红壤-触土部件间恢复系数依次为 0.1~0.7、0.05~0.7;砖红壤-砖红壤、砖红壤-触土部件间静摩擦系数依次为 0.4~1.1、0.3~0.9;砖红壤-砖红壤、砖红壤-触土部件间滚动摩擦系数均为 0.05~0.25。

2) 应用 Plackett-Burman Design 试验设计确定砖红壤休止角关键影响因素包括:砖红壤-砖红壤恢复系数、砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数、砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数及 JKR 表面能。

3) 应用 Box-Behnken 试验设计确定 4 个显著影响因素最优值:砖红壤-砖红壤恢复系数 0.40、砖红壤-砖红壤滚动摩擦系数 0.07、砖红壤-28MnB5 板滚动摩擦系数 0.24、JKR 表面能 4.31 J/m²。以最优参数组合得到的仿真试验休止角与实际测量休止角相对误差为 0.62%。

4) 在 EDEM 软件中仿真模拟破土刃在砖红壤中破土过程,并进行实际对比验证试验。两次稳定破土阻力相对误差为 3.43%,表明标定砖红壤离散元仿真模型参数准确可靠。

本文研究结果对海南热区砖红壤地作业具有一定指导意义;但需指出的是,本文虽做了实际试验,结果较为理想,但基于砖红壤土的特殊性和香蕉根系的复杂性,后期将开展更为深入的研究,本文为后期的实际土壤建模提供了基本参数支撑,可为进一步研制适用于砖红壤香蕉地作业条件下的触土部件提供基础数据。

[参 考 文 献]

[1] 张骏达,孙向阳,刘艳,等. 海南省儋州市砖红壤在中国土壤系统分类的归属研究[J]. 广东农业科学, 2015, 42(10): 46—52.
Zhang Junda, Sun Xiangyang, Liu Yan, et al. Attribution of

laterite of Danzhou, Hainan province in Chinese soil taxonomy[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(10): 46—52. (in Chinese with English abstract)

[2] 严晓丽,汪春,李明,等. 红壤凿形深松铲的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 135—142
Yan Xiaoli, Wang Chun, Li Ming, et al. Design and experiment on the chisel-shape deep-shovel in red loam[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 135—142. (in Chinese with English abstract)

[3] 徐中华,王建华. 有限元法分析土壤切削问题的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 134—137.
Xu Zhonghua, Wang Jianhua. Advances in finite element analysis of soil cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 134—137. (in Chinese with English abstract)

[4] Abo-Elnor M, Hamilton R, Boyle J T. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2004, 75(1): 61—73.

[5] Ucgul M, Fielke J M, Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121(3): 105—117.

[6] 张锐,李建桥,周长海,等. 推土板表面形态对土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 13—19.
Zhang Rui, Li Jianqiao, Zhou Changhai, et al. Simulation of dynamic behavior of soil ahead of the bulldozing plates with different surface configurations by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 13—19. (in Chinese with English abstract)

[7] Cundall P A, Strack O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47—65.

[8] 马云海,马圣胜,贾洪雷,等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36—41.
Ma Yunhai, Ma Shengsheng, Jia Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 36—41. (in Chinese with English abstract)

[9] 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.
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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62—72. (in Chinese with English abstract)

[10] 邓佳玉,胡军,李庆达,等. 基于 EDEM 离散元法的深松铲仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 14—18.
Deng Jiayu, Hu Jun, Li Qingda, et al. Simulation and experimental study on the subsoiler based on EDEM discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural

- Mechanization, 2016, 37(4): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [11] 方会敏, 姬长英, Chandio F A, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22—28.
Fang Huimin, Ji Changying, Chandio F A, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22—28. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [13] Tong Jin, Mohammad M A, Zhang Jinbo, et al. DEM numerical simulation of abrasive wear characteristics of a bioinspired ridged surface[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(2): 175—181.
- [14] 龚明. 材料物料特性参数标定[R]. 北京: EDEM 用户大会报告, 2013.
- [15] Santos K G, Campos A V P, Oliveira O S, et al. Dem simulations of dynamic angle of repose of acerola residue : a parametric study using a response surface technique[J]. Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2015, 1(2): 11326—11333.
- [16] Mustafa U, Fielke J M, Saunders C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144: 220—227.
- [17] 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 with English abstract)
- [18] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 181—187. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
Zhang Rui, Han Dianlei, Ji Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49—56. (in Chinese with English abstract)
- [20] 丁启朔, 任骏, Adam B E, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38—48.
Ding Qishuo, Ren Jun, Adam B E, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38—48. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(6): 130—140. (in Chinese with English abstract)
- [22] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. Proc R Soc London: A, 1971, 324(158): 301—313.
- [23] EDEM 2.5 theory reference guide[R/OL]. 2014-12-05 [2015-06-07]. <http://www.docin.com/p-980174717.html>
- [24] 陈丽琼. 比重计法测定土壤颗粒组成的研究[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(4): 97—99.
Chen Liqiong. Research on structure of soil particle by hydrometer method[J]. Environmental Science Survey, 2010, 29(4): 97—99. (in Chinese with English abstract)
- [25] Chen Y, Munkholm L J, Nyord T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 34—41.
- [26] 贾旭光, 陈曦, 李鑫. 不同粒度和堆载形态下散体瞬时自然安息角的实验研究[J]. 现代矿业, 2015, 549(1): 25—27.
Jia Xuguang, Chen Xi, Li Xin. Experiment research on instantaneous natural repose angle of granular slope under different granularity and stack form[J]. Modern Mining, 2015, 549(1): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [27] 冯俊小, 林佳, 李十中, 等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 208—213.
Feng Junxiao, Lin Jia, Li Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 208—213. (in Chinese with English abstract)
- [28] 朱震和. 表面活性剂—粉体和颗粒: 休止角的测量[J]. 日用化学科学, 1981(4): 66—68.
- [29] 葛藤, 贾智宏, 周克栋. 计算点接触碰撞恢复系数的一种理论模型[J]. 机械设计与研究, 2007(3): 14—15, 22.
Ge Teng, Jia Zhihong, Zhou Kedong. A Theoretical model for the coefficient of restitution calculation of point impact[J]. Machine Design & Research, 2007(3): 14—15, 22. (in Chinese with English abstract)
- [30] Frączek J, Złobicki 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.

Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province

Xing Jiejie¹, Zhang Rui¹, Wu Peng¹, Zhang Xirui^{1*}, Dong Xuehu², Chen Ying³, Ru Shaofeng¹

(1. School of Mechanics and Electrics Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. Tropical Agricultural Machinery Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, 524091, China;

3. University of Manitoba, Winnipeg, R3T 2N2, Canada)

Abstract: Latosol is the zonal soil of tropical rainforest or seasonal rainforest in the southernmost part of China. Compared with ordinary soil, latosol has stronger expansibility, flow plasticity and water holding capacity. In the cultivation of latosol, there are many problems, such as high resistance, low efficiency, and serious soil adhesion of parts touching the soil. In recent years, with the continuous improvement of agricultural mechanization level, discrete element method is gradually applied in the field of agricultural engineering. But the existing research is mainly aimed at the soil with weak viscosity, such as sandy soil, dry soil or rock soil. These research results are not suitable for the latosol, and there are few researches on the parameter calibration of the discrete element simulation model of latosol. In this paper, the simulation contrast test of soil repose angle and soil breaking resistance, and calibrate the contact parameters of the discrete element model of latosol had been carried out with "Hertz-Mindlin with JKR" contact model in the EDEM software. The actual repose angle of latosol with moisture content of 7.8% was measured to be 32.35°. The recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient between latosol, latosol and contact parts were measured by design test. Seven coefficients were selected as test factors by Design-expert software and factor level was set. The repose angle was taken as test index and design parameter calibration test was carried out. Using Plackett-Burman Design test to determine the key factors affecting the repose angle of latosol include recovery coefficient of latosol-latosol, rolling friction coefficient of latosol-latosol, rolling friction coefficient of latosol-28MnB5 plate and surface energy. Using regressive analysis by Box-Behnken to fit the test results, and the repose angle regression model was obtained. The regression variance analysis of the model showed that the regression model was very significant, and the repose angle could be predicted according to the model. Taking the actual repose angle of latosol as the objective value, the regression model was optimized, and the optimal values of four significant factors were obtained: latosol-latosol recovery coefficient 0.40, latosol-latosol rolling friction coefficient 0.07, latosol-28MnB5 plate rolling friction coefficient 0.24, JKR surface energy 4.31 J/m². The simulation experiment of the repose angle of EDEM was designed, and the image of the simulated repose angle was processed by python. The relative error between the simulated repose angle and the measured repose angle was 0.62%. The soil tank model was established to simulate the movement process of the breaking blade in the latosol, and the test was carried out to compare the fitting situation of the change of the breaking resistance. Comparison of soil breaking fitting resistance curve in numeral simulation and test, showed that the calibration of the parameters of the discrete element simulation model of latosol was accurate and reliable.

Keywords: latosol; discrete element model; repose angle; parameter calibration; soil breaking resistance