

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

李俊伟^{1,2,3,4}, 佟金^{1,3}, 胡斌^{2,4}, 王虎彪^{1,3}, 毛春昱^{1,3,5}, 马云海^{1,3*}

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003;
3. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 4. 石河子大学农业部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003;
5. 吉林工程师范技术学院, 长春 130022)

摘要:为了获得可用于东北地区黏重黑土与触土部件相互作用的离散元仿真模拟参数,该文利用 EDEM 中 Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 接触模型对不同含水率的东北地区黏重黑土进行相关参数标定,针对含水率在 10%~20%的实际作业环境,分别配置含水率为 12.46%±1%和 17.15%±1%的 2 种黏重黑土,以土壤颗粒间的滚动摩擦系数、恢复系数、表面能参数及静摩擦系数为标定对象,并以土壤颗粒的仿真堆积角为响应值,基于 Box-Behnken 的响应面优化方法得到堆积角回归模型,并对回归模型进行寻优,得到 2 种含水率的模型参数优化解,并给出了模型参数范围。测定了 4 种含水率下黏重黑土对 3 种触土部件材料(65Mn、UHMW-PE 和 PTFE)的静摩擦系数,并以此为基础分别对 65Mn(典型铁基材料)和 PTFE(典型低表面能材料)板进行斜面试验,以含水率为 17.15%±1%的黏重黑土为试验对象,分别搭建斜面物理试验平台和仿真模型,以土壤颗粒与触土部件材料之间的滚动摩擦系数、恢复系数、表面能参数及静摩擦系数为标定对象,以仿真得到的土球在 65Mn 和 PTFE 板上的滚动距离为响应值,基于响应面优化法得到滚动距离回归模型,以实测的滚动距离为目标对回归模型进行寻优,得到黏重黑土对 2 类典型触土部件材料接触模型参数的优化解。研究表明,标定优化后的土壤模型能够近似代替真实的东北地区黏重黑土进行仿真,可利用标定后的参数进行黏重黑土与触土部件间的离散元仿真,可为东北黏重黑土作业条件下的农业机械触土部件仿生减阻设计与优化提供基础数据。

关键词:土壤; 含水率; 离散元法; 黏重黑土; 仿真参数标定

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.06.016

中图分类号: S347.7; S22

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-06-0130-11

李俊伟, 佟金, 胡斌, 王虎彪, 毛春昱, 马云海. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.06.016 <http://www.tcsae.org>
Li Junwei, Tong Jin, Hu Bin, Wang Hubiao, Mao Chunyu, Ma Yunhai. 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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.06.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

触土部件与土壤接触或在切割土壤过程中所涉及到的相互作用力学问题一直是该领域研究的难点与热点。由于土壤的复杂性与多样性,目前尚未有一种准确的数学模型能替代所有类型土壤的本构模型。对于现代触土部件的设计及其优化,通常需要对触土部件与土壤相互作用的过程进行仿真分析,而现有的有限元土壤模型由于其采用的是连续介质的表达形式而无法模拟土壤颗粒之间运动及其对耕作部件相互作用的动态过程^[1-2]。离散元素建模(discrete element modeling)是一种用于对粒状材料的力学行为进行建模的数值方法^[3],该方法将散粒体简化成具有质量和形状的颗粒集合,解决各个颗粒体之间

及其与边界间的相互作用,从而揭示颗粒与边界之间的物理作用性质^[4]。近几年来,离散元法在工程中得到越来越广泛的应用,越来越多的学者运用离散元法进行散粒物料的流动性、固体破碎及机具-土壤相互作用方面的研究。在农业工程领域,离散元法的应用主要集中在以散粒体为主的农业物科学,土壤与农机部件的相互作用等方面的研究^[5-7]。通常在利用离散元法进行散粒体研究之前,需对散粒体的物料特性参数进行标定。除了模拟土壤颗粒之外,基于离散元法的接触模型参数标定还被应用于比如小麦、水稻、马铃薯、大豆等其他散粒体^[8-13]。

土壤与触土部件之间相互作用的精准模型对设计与优化触土部件具有重要作用^[14-15]。然而,触土部件在土壤中进行耕作作业时,土壤-机具之间的相互作用受土壤性质及土壤的动态作用直接影响^[16-17],对不同类型的土壤,其影响效应差异显著,因此,在运用离散元法对触土部件与土壤的相互作用进行仿真前,需先标定土壤颗粒与触土部件之间的相关仿真参数。

目前,国内外学者主要针对 EDEM 软件中以 Hertz-Mindlin 等模型为主的内嵌模型对土壤颗粒接触参数进行研究,Mustafa 等^[1,3,14-15]利用 Hertz-Mindlin 及

收稿日期: 2018-10-11 修订日期: 2019-03-03

项目基金: 国家重点研发计划项目(YS2016YFNC050065)课题(2016YFD0701601); 国家自然科学基金项目(51805338, 51875242, 51865051); 吉林省科技厅项目(20170101173JC, 20190302129GX)

作者简介: 李俊伟, 讲师, 博士生, 主要从事农业机械减阻耐磨仿生技术研究。

Email: ljwjdxy@shzu.edu.cn

*通信作者: 马云海, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程仿生技术研究。

Email: myh@jlu.edu.cn

Hysteretic Spring 接触模型, 研究分析了土壤在有黏结力和无黏结力的情况下土壤颗粒的塑性形变等问题。丁启朔等^[18]利用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型建立了黏性水稻土的深松耕作离散元模型。虽然 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型可以用来模拟粘结颗粒, 但是该模型是用一个有限大小的“胶粘剂”粘结, 适用于模拟混凝土和岩石等硬粒介质。张锐等^[19]提出了一种标定沙土颗粒相互作用参数的方法, 该方法使用标准球和非标准球对沙土颗粒的静摩擦系数、恢复系数等关键参数进行标定, 为沙土颗粒的离散元接触模型参数标定提供了有价值的参考。王宪良等^[4]基于代理模型的方法, 利用 The Edinburgh Elasto-Plastic Cohesion Model (ECM) 弹塑性接触模型表示土壤颗粒接触模型, 根据试验测定堆积角及剪切试验得到的参数建立离散元土壤模型, 仿真分析模型参数的敏感性, 最后以敏感性参数为变量, 以试验值为目标构建代理模型并进行参数优化, ECM 模型是一种将土壤应变滞后性、内聚力及范德华力等考虑在内的非线性模型, 适用于研究土壤、有机材料等的压缩问题。石林榕等^[20-21]整合延迟弹性模型 (hysteretic spring contact model, HSCM) 和线性内聚力模型 (liner cohesion model, LCM) 优势, 建立了西北旱区农田土壤模型, 对土壤颗粒之间的静摩擦系数、滚动摩擦系数和内聚强度等关键参数进行离散元标定。

上述 EDEM 软件中的接触模型大多适用于黏性弱含水率较低的土壤颗粒, 如沙土、旱土或者岩石等, 而对于东北地区的黏重黑土, 其宏观表现出的黏性及塑性特征远大于土壤颗粒之间的弹性特征, 土壤颗粒之间粘结力较大, 上述接触模型并不适用。

武涛等^[22]基于土壤堆积角物理试验结果, 采用考虑颗粒间粘结力的“Hertz-Mindlin with JKR Cohesion”接触模型进行土壤堆积角仿真试验, 对考虑粘结力的土壤颗粒之间的关键参数如 JKR 表面能参数、恢复系数、静摩擦系数与滚动摩擦系数进行接触模型的参数标定, 试验验证了 JKR 模型可以用来模拟含水率较高的黏湿南方土壤。课题组在实际调研中发现, 对于东北地区的黑黏土, 土壤孔隙率低, 黏粒多, 腐殖质含量高, 土壤性质复杂, 含水率较高, 在作物收获期间的含水率一般在 10%~20% 之间, 特别是下雨后的土壤, 其含水率更高, 当农机耕作部件进行作业时, 触土部件的土壤粘附现象严重, 耕作阻力较大, 严重影响生产效能。

本文前期研究发现, 由于粘附能力很强, 当含水率超过 20% 后, 黏重黑土近于流变体性质, 其黏性及塑性性质很突出, 在实际试验过程中发现, 当含水率超过 12% 后, 土壤颗粒之间就会发生较为严重的团聚现象, 由此可见, 对于黏重黑土, 其颗粒之间的粘结力是必须要重点考虑的因素。因此, 本文根据东北地区的黏重黑土特性, 配置 2 种含水率的黏重黑土, 在 EDEM2.7 软件平台上, 基于颗粒间粘结力的“Hertz-Mindlin with JKR Cohesion”接触模型, 采用物理试验与仿真试验相结合的方法, 分别对含水率为 12.46%±1% 和 17.15%±1% 的黏

重黑土进行堆积角仿真试验, 基于 Box-Behnken 的响应面优化方法, 对不同含水率黏重黑土颗粒之间的接触模型仿真参数进行标定, 对 4 种含水率的黏重黑土与 3 种触土部件材料 (典型铁基类触土部件材料 65Mn 及 2 种低表面能材料超高分子量聚乙烯 (UHMW-PE) 和聚四氟乙烯 (PTFE)) 的静摩擦系数进行试验测定, 并在此基础上利用斜面试验方法, 分别对较高含水率下 (含水率 17.15%±1%) 的黏重黑土与 2 类典型触土部件材料 (65Mn 钢板和 PTFE 板) 的接触模型参数进行标定, 以为进一步研究东北地区黏重黑土或者含水率较高的黏湿土壤与触土部件之间的相互作用提供离散元仿真所需的基础参数, 并为触土部件减粘降阻仿生设计提供必要的仿真参数。

1 土壤颗粒间的接触模型参数标定

1.1 接触模型的选取

Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 模型是一个凝聚力接触模型, 该接触模型在 Hertz 接触理论的基础上结合 JKR 理论, 考虑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]。对于含水率较高的黏重黑土, 由于土壤之间或土壤对触土部件材料之间的粘附力较大, 本文选取 Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 模型来模拟东北黏重黑土, 并依此进行接触模型参数标定。用 Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 接触模型模拟湿颗粒时, 将 2 个颗粒分开所需要的力取决于液体表面张力 γ_s 和润湿角, 如式 (1)。

$$F_{\text{pullout}} = -2\pi\gamma_s \cos(\theta)\sqrt{R_i R_j} \quad (1)$$

式中 F_{pullout} 为将 2 个颗粒分开所需的力, N; θ 为接触角, ($^\circ$); R 为颗粒半径, mm。

1.2 模型参数类型及标定

对于含水率较高的黏重黑土, 颗粒之间的黏结力或者颗粒与触土部件材料之间的粘结力是重要考虑对象, 在 EDEM JKR 模型中用表面能来表征颗粒之间或颗粒与触土部件材料之间的黏结力。

1.2.1 试验材料及其本征参数

试验用土壤样品采自吉林农业大学试验田, 土壤类型为典型东北黏重黑土, 土壤堆积密度为 1.07 kg/m³, 为了更准确地反映实际作业土壤状况, 考虑到雨后土壤含水率实测值与连续晴天下的土壤含水率差异, 以 2 种含水率的黏重黑土为对象进行离散元土壤颗粒接触模型的参数标定, 因此本文采用配置的含水率为 12.46%±1% 和 17.15%±1% 的黏重黑土为对象进行堆积角物理试验。土壤的本征参数通过图 1 所示的 SLB-1 型应力应变控制式三轴试验仪测得, 结果如表 1 所示。

1.2.2 土壤堆积角物理试验

堆积角试验基本步骤是: 分别配制含水率为 12.46%±1% 和 17.15%±1% 的黏重黑土, 搭建如图 2 所示的试验台, 利用手持式红外线测距仪 (Leica DISTO D3a /0.1 $^\circ$) 测量试验所形成的堆积角, 随机从堆形的 5 个方位测量堆积角, 取平

均值作为结果, 每种含水率测量 3 次, 测得 2 种含水率的黏重黑土的堆积角分别是 $40.92^\circ \pm 0.11^\circ$ 和 $44.15^\circ \pm 0.11^\circ$ 。

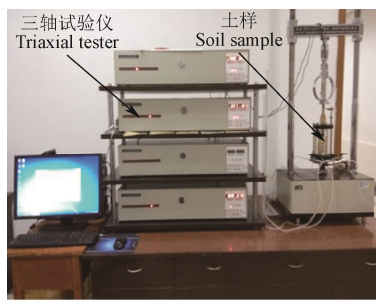


图 1 土壤参数测试
Fig.1 Soil parameter test

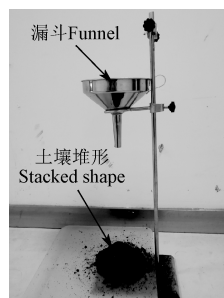


图 2 土壤堆积角测试
Fig.2 Soil repose angle test

1.2.3 土壤堆积角仿真试验模型的建立

参考文献[22]的方法, 在 EDEM 2.7 软件中建立堆积角仿真模型。漏斗顶部直径为 150 mm, 底部直径为 30 mm, 高为 200 mm, 接料底板为 400 mm×400 mm 的方形板。漏斗底部与接料底板的距离为 400 mm。采用随机分布方式生成土壤颗粒, 颗粒半径设置为 2~4 mm, 仿真参数设置详见表 1。

表 1 土壤堆积角 EDEM 仿真参数

材料 Materials	参数 Parameters	数值 Values	来源 Source
土壤 Soil	密度/kg·m ⁻³	1 516.4	测定
	泊松比	0.46	测定
	剪切模量/MPa	1	文献[24]
PTFE	密度/kg·m ⁻³	2.1×10 ³	文献[25]
	泊松比	0.4	文献[25]
	剪切模量/MPa	100	文献[26]
65Mn	密度/kg·m ⁻³	7 861	文献[27]
	泊松比	0.29	文献[28]
	剪切模量/MPa	7.9×10 ⁴	文献[27-28]

1.3 标定试验设计

根据不同含水条件的黏重黑土颗粒之间的粘结性质, 拟定颗粒之间的 JKR 表面能参数、恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数作为待标定的接触模型参数, 采用响应面优化方法, 以堆积角为试验指标, 在 Design-expert 软件平台上, 运用 Box-Behnken 方法进行试验设计, 参考 EDEM 通用颗粒材料数据库 GEMM (generic EDEM material model database, GEMM) 中土壤颗粒的相关参数, 结合仿真预试验的结果及文献[22], 堆积角仿真试验因素的水平值设置如表 2 所示。

表 2 土壤堆积角仿真试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of simulation test for soil repose angle

水平 Level	JKR 表面能 JKR surface energy $x_1/(J \cdot m^{-2})$	恢复系数 Restitution coefficient x_2	静摩擦系数 Static friction coefficient x_3	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient x_4
低水平 Low level	4.00	0.35	0.40	0.05
中心水平 Central level	7.00	0.57	0.70	0.17
高水平 High level	10.00	0.80	1.00	0.30

在 EDEM2.7 软件平台下, 分别从锥面的 X 方向和 Y 方向截取图片, 导入 CAD 软件中标注土壤堆积角^[20], 共测量 4 个堆积角, 取平均值, 仿真试验结果如表 3 所示。

表 3 土壤堆积角仿真试验设计及结果

Table 3 Results and simulation test design for soil repose angle

试验号 Test No.	JKR 表面能 JKR surface energy $x_1/(J \cdot m^{-2})$	恢复系数 Restitution coefficient x_2	静摩擦系数 Static friction coefficient x_3	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient x_4	堆积角 Repose angle/(°)
1	7.00	0.57	1.00	0.05	24.36
2	4.00	0.80	0.70	0.17	36.23
3	4.00	0.57	0.70	0.30	43.07
4	7.00	0.57	0.40	0.05	23.85
5	7.00	0.35	1.00	0.17	40.7
6	7.00	0.57	0.70	0.17	29.94
7	7.00	0.35	0.40	0.17	43.59
8	10.00	0.57	0.70	0.30	52.95
9	10.00	0.57	1.00	0.17	36.00
10	7.00	0.57	0.70	0.17	30.82
11	4.00	0.57	0.40	0.17	30.37
12	10.00	0.80	0.70	0.17	27.99
13	4.00	0.57	1.00	0.17	28.81
14	4.00	0.57	0.70	0.05	20.39
15	7.00	0.57	0.70	0.17	31.41
16	7.00	0.80	0.70	0.30	31.75
17	7.00	0.57	0.70	0.17	32.88
18	7.00	0.80	1.00	0.17	22.57
19	4.00	0.35	0.70	0.17	33.12
20	7.00	0.35	0.70	0.05	28.58
21	7.00	0.80	0.70	0.05	12.73
22	7.00	0.57	1.00	0.30	39.44
23	7.00	0.80	0.40	0.17	24.64
24	7.00	0.57	0.40	0.30	49.48
25	10.00	0.57	0.70	0.05	26.33
26	10.00	0.57	0.40	0.17	42.08
27	7.00	0.35	0.70	0.30	48.64
28	10.00	0.35	0.70	0.17	47.8
29	7.00	0.57	0.70	0.17	32.58

1.4 土壤堆积角仿真试验结果与分析

1.4.1 堆积角回归模型

按表 2 进行堆积角仿真试验, 并对试验结果进行回归方差分析, 结果如表 4 所示, 通过对试验数据的多元回归, 得到东北黏重黑土的堆积角回归模型为

$$\begin{aligned}
 y = & 31.53 + 3.96x_1 - 8.18x_2 - 2.38x_3 + 10.18x_4 \\
 & - 5.73x_1x_2 - 1.13x_1x_3 + 0.99x_1x_4 + 0.21x_2x_3 \\
 & - 0.26x_2x_4 - 2.64x_3x_4 + 4.01x_1^2 - 1.25x_2^2 + 2.60x_3^2 \\
 & + 0.15x_4^2 + 4.01x_1^2x_2 + 0.47x_1^2x_3 + 2.15x_1^2x_4 - 2.35x_1x_2^2 \\
 & + 0.77x_1x_3^2 + 1.14x_2^2x_3 - 0.41x_2^2x_4 - 1.09x_2x_3^2 \\
 & + 2.01x_1^2x_2^2 - 3.82x_1^2x_3^2
 \end{aligned} \quad (2)$$

回归方程 (2) 的决定系数 $R^2 = 0.9977$, 校正决定系数

Adj- $R^2=0.9838$ 。

由表 4 可知, 模型的 $P=0.0004 < 0.01$, 说明该堆积角的回归模型极显著, 可以根据该模型对堆积角进行预测。在 4 个试验因素中, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 均对堆积角影响显著, 显著性程度依次为 $x_4 > x_2 > x_1 > x_3$, 其中 x_4 、 x_2 、 x_1 对堆积角影响极显著; x_1x_2 对堆积角影响极显著, x_3x_4 对堆积角影响较为显著, 其余因素的交互影响均不显著; x_1^2 对堆积角影响极显著, x_3^2 影响显著, 其余因素的二次方项影响不显著; $x_1^2x_2$ 对堆积角影响极显著, 其余因素的二次方与一次方交互作用影响均不显著; $x_1^2x_3^2$ 影响显著, 其余因素的二次方项交互作用影响均不显著。

表 4 土壤堆积角回归模型的方差分析

Table 4 Variance analysis of regression model of soil repose angle					
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	2 573.47	24	107.23	71.83	0.000 4
x_1	62.57	1	62.57	41.91	0.002 9
x_2	267.98	1	267.98	179.50	0.000 2
x_3	22.71	1	22.71	15.21	0.017 5
x_4	414.33	1	414.33	277.53	<0.000 1
x_1x_2	131.33	1	131.33	87.97	0.000 7
x_1x_3	5.11	1	5.11	3.42	0.138 0
x_1x_4	3.88	1	3.88	2.60	0.182 2
x_2x_3	0.17	1	0.17	0.11	0.754 1
x_2x_4	0.27	1	0.27	0.18	0.692 3
x_3x_4	27.83	1	27.83	18.64	0.012 5
x_1^2	32.91	1	32.91	22.05	0.009 3
x_2^2	6.62	1	6.62	4.44	0.102 9
x_3^2	28.53	1	28.53	19.11	0.012 0
x_4^2	0.099	1	0.099	0.066	0.809 6
$x_1^2x_2$	32.16	1	32.16	21.54	0.009 7
$x_1^2x_3$	0.45	1	0.45	0.30	0.613 5
$x_1^2x_4$	9.22	1	9.22	6.18	0.067 8
$x_1x_2^2$	11.00	1	11.00	7.37	0.053 3
$x_1x_3^2$	1.19	1	1.19	0.79	0.423 2
$x_2^2x_3$	2.61	1	2.61	1.75	0.256 6
$x_2^2x_4$	0.33	1	0.33	0.22	0.661 7
$x_2x_3^2$	2.35	1	2.35	1.58	0.277 5
$x_1^2x_2^2$	4.03	1	4.03	2.70	0.175 7
$x_1^2x_3^2$	14.59	1	14.59	9.77	0.035 3
纯误差 Pure error	5.97	4	1.49		
总和 Sum	2 579.44	28			

1.4.2 不同含水率的黏重黑土堆积角参数优化与验证

通过 Design-expert 软件的优化模块, 以 $12.46\% \pm 1\%$ 含水率的黏重黑土形成的堆积角 40.92° 为目标对堆积角回归模型进行寻优, 得到多组优化解, 通过堆积角仿真试验验证这些优化解, 选取与物理试验得到的土壤堆积角相近的 1 组优化解, 即土壤颗粒之间的 JKR 表面能 7.46 J/m^2 , 恢复系数 0.56, 静摩擦系数 0.78, 滚动摩擦系数 0.22, 此优化解下的堆积角仿真结果为 40.31° , 与物

理试验结果的相对误差为 1.49%。图 3 为堆积角仿真试验与物理试验堆形的对比。从图 3 可以看出, 对于优化参数的仿真试验, 土壤堆形与物理试验得到的结果具有较高的相似性。在土壤颗粒堆积角标定的 4 个参数中, 影响最显著的是滚动摩擦系数, 其次是恢复系数与表面能参数。对于含水率 $12.46\% \pm 1\%$ 的黏重黑土, 仿真参数在一定范围内取值均能获得在物理试验堆积角误差范围内的结果, 仿真结果与试验结果的相对误差在 2.5% 以内, 即滚动摩擦系数在 $0.2 \sim 0.24$ 之间, JKR 表面能范围在 $6 \sim 8 \text{ J/m}^2$ 之间, 恢复系数在 $0.45 \sim 0.6$ 之间, 静摩擦系数在 $0.65 \sim 0.9$ 之间。同理, 对于含水率 $17.15\% \pm 1\%$ 的黏重黑土, 以 44.15° 的堆积角为优化目标, 最终得到土壤间 JKR 表面能参数为 8.41 J/m^2 , 土壤颗粒的恢复系数为 0.5, 静摩擦系数系数为 0.8, 土壤间的滚动摩擦系数为 0.23, 利用该优化参数获得的堆积角仿真试验结果与物理试验结果在角度和堆形上均具有较高的相似性。同理, 得到含水率 $17.15\% \pm 1\%$ 黏重黑土的仿真参数范围, 即滚动摩擦系数在 $0.22 \sim 0.24$ 之间, JKR 表面能范围在 $7 \sim 9 \text{ J/m}^2$ 之间, 恢复系数在 $0.45 \sim 0.6$ 之间, 静摩擦系数在 $0.65 \sim 0.9$ 之间。

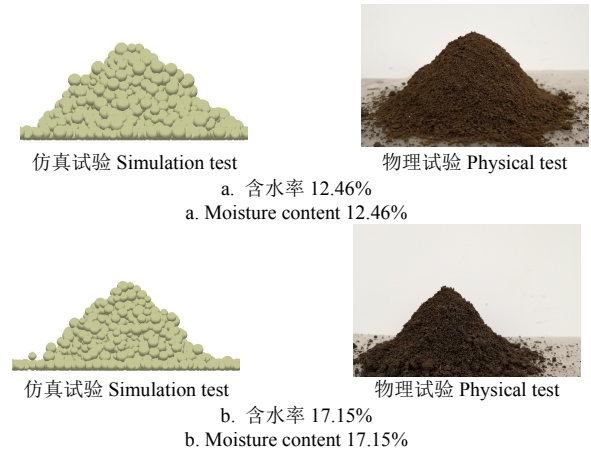


图 3 不同含水率黏重土壤堆积角仿真与物理试验的堆形对比
Fig.3 Stacked shape comparison between simulation and physical test of repose angle for clayey soil under different moisture content

2 土壤与不同触土部件材料的接触模型参数标定

2.1 材料与方法

为了给针对黏重黑土地区触土部件的减阻性能优化及仿生设计提供准确可靠的仿真参数, 在 1.1 节研究结果的基础上, 针对典型触土部件材料 65Mn 和 2 种减粘材料 (超高分子量聚乙烯 UHMW-PE 和聚四氟乙烯 PTFE), 采用静摩擦试验测定 4 种含水率的黏重黑土对典型触土部件材料的静摩擦系数, 并基于静摩擦试验结果, 采用斜面试验标定高含水率 (含水率为 $17.15\% \pm 1\%$) 的黏重黑土对 2 种典型触土部件材料 (65Mn 和 PTFE) 的离散元仿真参数。

2.1.1 土壤静摩擦试验

土壤对不同材料的静摩擦系数是土壤与触土部件材料之间的特有属性, 不会因为土壤的形状而改变, 但是土壤的含水率对其具有较大影响^[29-30]。

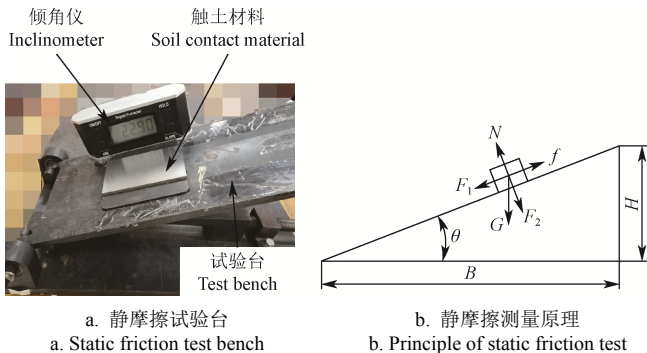
为了减少仿真因素数, 提高仿真优化水平与精度, 土壤对不同材料的静摩擦系数由如图 4 所示的静摩擦试

验台测得。按前述方法配置含水率分别为 0, 12.46%, 17.15%和 23.5%的 4 种黏重黑土, 制成 1 cm×1 cm×1 cm 的土块, 每次试验前, 保证土块的含水率保持均衡, 误差控制在±1%。每种含水率的黏重黑土均重复测试 20 次, 利用斜面仪测量每次土块下滑瞬间的角度, 通过式 (3) ~ (4) 计算得到对应的静摩擦系数, 取平均值作为最终结果。

$$\begin{cases} F_1 = G \sin \theta \\ F_2 = G \cos \theta \\ F_1 - f = 0 \\ F_2 - N = 0 \\ f = \mu F_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{f}{F_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{G \sin \theta}{G \cos \theta} = \tan \theta \quad (4)$$

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 为支撑力, N; μ 为静摩擦系数; θ 为底座与斜面夹角, (°)。



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 为支撑力, N; θ 为底座与斜面夹角, (°)。B 为底座长度, mm; H 为斜面末端高度, 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, (°). B is the base length, mm. H is the height of the slope end, mm.

图 4 静摩擦试验台及其测量原理

Fig.4 Static friction test bench and its measuring principle

2.1.2 斜面试验

对于不同含水率的黏重黑土, 含水率越高(含水率小于土壤液限值), 其对触土部件材料的粘附摩擦力越大^[29]。分别用上述 2 种触土部件材料(65Mn、PTFE)搭建如图 5 所示的斜面试验台, 采用含水率为 17.15%±1%的黏重黑土为对象, 标定高含水率下的黏重黑土对不同触土部件材料的接触模型参数。其中土壤颗粒通过 3D 打印的球形模具制得, 土球半径为 $r=5$ mm。试验的基本步骤为: 土球在斜面上端自然向下滚动, 至土球滚动停止, 用直尺测量土球沿水平方向上的滚动距离 S , 每次取土球沿直线滚动的试验值为最终检验值, 重复 10 次, 取平均值 \bar{S} 作为最终检验值。同时, 在 EDEM2.7 软件中进行斜面仿真试验。物理试验平台与仿真试验平台的关键参数(斜面末端高度 H 与斜面长度 L)一致。为了便于实现, 斜面试验台的 2 个关键参数可在预实验的基础上, 按试验条件自行设定, 但需满足土球有自由滚动的行为发生, 且能保证水平面上的接触材料长度大于土球自然滚动至停止的距离。在预试验的基础上, 本文斜面试验台参数

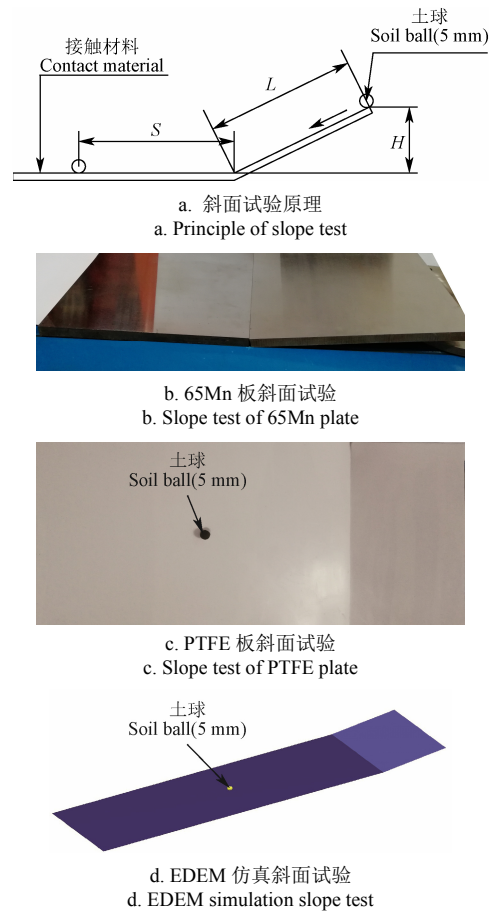
设定如表 5 所示, 仿真模拟参数见表 1。

表 5 斜面试验台参数

Table 5 Parameters of slope bench

材料 Material	斜面长度 Slope length L /mm	斜面末端高度 Height of slope end H /mm
65Mn	202.00	20.00
PTFE	140.00	20.00

利用 Desin-expert 软件中的 Box-Behnken 法进行斜面试验仿真参数标定的试验设计, 参考 EDEM 通用颗粒材料数据库 GEMM (generic EDEM material model database, GEMM)中钢铁及塑料的相关参数, 根据仿真预试验及物理试验的结果及文献[25], 拟定土壤颗粒与 65Mn 及 PTFE 板之间的斜面仿真试验因素与水平, 如表 6 所示。



注: S 为土球自然滚动距离, mm。
Note: S is the natural rolling distance of earth ball, mm.

图 5 土壤与不同触土材料的斜面试验

Fig 5 Slope test of soil and different contact materials

表 6 斜面仿真试验因素及水平

Table 6 Factors and levels of slope simulation test

水平 Level	接触材料 Contact material	JKR 表面能 JKR surface energy x_1 /($J \cdot m^{-2}$)	恢复系数 Restitution coefficient x_2	静摩擦系数 Static friction coefficient x_3	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient x_4
低水平 Low level	65Mn	2.00	0.20	0.20	0.03
	PTFE	1.00	0.10	0.10	0.03
中心水平 Central level	65Mn	7.00	0.45	0.45	0.055
	PTFE	5.50	0.40	0.40	0.055
高水平 High level	65Mn	12.00	0.70	0.70	0.08
	PTFE	10.00	0.70	0.70	0.08

2.2 结果与分析

2.2.1 静摩擦试验结果与分析

图 6 为静摩擦系数试验测试结果。通过静摩擦试验，测得含水率为 0（干土）、12.46%±1%、17.15%±1%、23.5%±1% 的黏重黑土与 PTFE 板之间的静摩擦系数依次为 0.447±0.075、0.332±0.034、0.522±0.11、0.633±0.16；与 UHMW-PE 板之间的静摩擦系数依次为 0.351±0.09、0.435±0.069、0.593±0.17、0.83±0.25；含水率为 0（干土）、12.46%±1%、17.15%±1% 的黏重黑土与 65Mn 板之间的静摩擦系数依次为 0.197±0.03、0.351±0.075、0.571±0.16。由图 6 可知，对于触土材料 65Mn，随着土壤含水率的增大，其静摩擦系数亦增大且增大幅度明显，

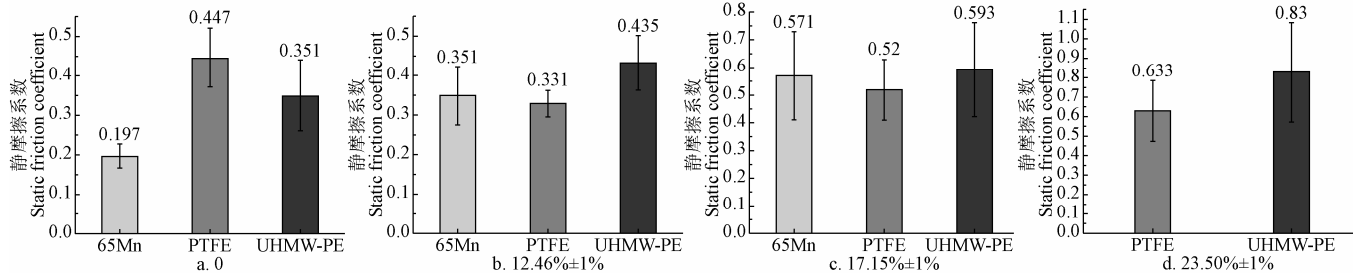


图 6 不同含水率黏重黑土与不同触土材料间的静摩擦系数

Fig.6 Static friction coefficient between clayey black soil with different moisture content and different contact materials

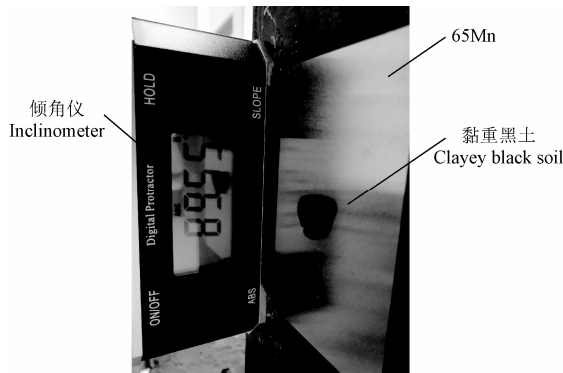


图 7 含水率 23.5% 的黏重黑土粘附在竖直 65Mn 板上

Fig.7 Clayey black soil with moisture content 23.5% adhere to vertical 65Mn plate

2.2.2 斜面仿真试验结果与分析

1) 土壤与 65Mn 板的斜面仿真试验结果与分析

含水率为 17.15%±1% 的土球在 65Mn 板上的斜面仿真试验结果见表 7，滚动距离回归模型的方差分析见表 8。

对表 7 中的试验数据进行多元回归，得到土壤颗粒在 65Mn 板上的滚动距离回归模型，其回归方程为

$$\begin{aligned}
 y = & 155.74 + 2.40x_1 - 5.31x_2 + 0.71x_3 - 208.90x_4 \\
 & - 1.29x_1x_2 + 1.28x_1x_3 - 14.0x_1x_4 - 0.53x_2x_3 - 2.53x_2x_4 \\
 & - 1.19x_3x_4 + 2.09x_1^2 + 2.01x_2^2 - 0.98x_3^2 + 94.79x_4^2 \\
 & + 4.94x_1^2x_2 + 0.32x_1^2x_3 - 5.29x_1^2x_4 - 6.87x_1x_2^2 \\
 & - 8.51x_1x_3^2 - 1.17x_2^2x_3 + 4.25x_2^2x_4 + 5.95x_2x_3^2 \\
 & - 5.49x_1^2x_2^2 + 0.67x_1^2x_3^2
 \end{aligned} \tag{5}$$

回归方程 (5) 的决定系数 $R^2 = 1.0000$ ，校正决定系数 $Adj-R^2 = 0.9999$ 。

而对于 PTFE 板与 UHMW-PE 板，随着土壤含水率的增加，静摩擦系数提高的趋势较平缓，当含水率超过 23.5% 时，土壤仍然具有下滑趋势，摩擦系数并无显著增大。

图 7 为含水率 23.5% 的黏重黑土粘附在竖直 (90°) 的 65Mn 钢板上。如图 7 所示，含水率为 23.5% (小于液限值) 时，试验土壤已经完全粘附在 65Mn 板上，试验台升角 >90° 后仍然不掉落，这说明在此含水率下的黏重黑土与 65Mn 板触土面的粘附力大于其自身重力。而在低表面能的 PTFE 板和 UHMW-PE 板上含水率为 23.5% 的黏重黑土在一定升角范围内自由滑动，说明低表面能触土部件具有减粘效果，这为仿生减粘触土部件的设计提供了思路。

表 7 含水率 17.15% 的土壤在 65Mn 板上的斜面仿真试验结果
Table 7 Slope simulation test results of soil with moisture content of 17.15% on 65Mn plate

试验号 Test No.	JKR 表面能 JKR surface energy x_1 ($J \cdot m^{-2}$)	恢复系数 Restitution coefficient x_2	静摩擦系数 Static friction coefficient x_3	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient x_4	滚动距离 Rolling distance /mm
1	2.00	0.20	0.45	0.055	157.9
2	7.00	0.20	0.45	0.08	55.74
3	12.00	0.45	0.20	0.055	149.09
4	2.00	0.70	0.45	0.055	159.73
5	12.00	0.45	0.45	0.08	26.83
6	7.00	0.45	0.45	0.055	156.29
7	7.00	0.45	0.45	0.055	156.37
8	7.00	0.70	0.70	0.055	156.42
9	7.00	0.45	0.70	0.03	460.36
10	12.00	0.45	0.45	0.03	483.21
11	7.00	0.20	0.20	0.055	156.06
12	7.00	0.45	0.45	0.055	153.76
13	12.00	0.20	0.45	0.055	151.53
14	7.00	0.45	0.70	0.08	40.18
15	7.00	0.45	0.45	0.055	155.83
16	7.00	0.45	0.20	0.08	41.14
17	7.00	0.70	0.45	0.03	454.40
18	2.00	0.45	0.20	0.055	163.88
19	12.00	0.45	0.70	0.055	153.73
20	2.00	0.45	0.70	0.055	163.39
21	7.00	0.70	0.20	0.055	158.39
22	12.00	0.70	0.45	0.055	148.20
23	2.00	0.45	0.45	0.03	450.41
24	2.00	0.45	0.45	0.08	50.04
25	7.00	0.70	0.45	0.08	40.06
26	7.00	0.45	0.45	0.055	156.46
27	7.00	0.20	0.70	0.055	156.20
28	7.00	0.45	0.20	0.03	456.54
29	7.00	0.20	0.45	0.03	459.97

表 8 土壤在 65Mn 板上滚动距离的回归模型方差分析
Table 8 Variance analysis of regression model of soil rolling distance on 65Mn plate

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	5.910E+005	24	24 624.06	19 139.31	<0.000 1
x_1	22.99	1	22.99	17.87	0.013 4
x_2	112.89	1	112.89	87.75	0.000 7
x_3	2.04	1	2.04	1.59	0.275 9
x_4	1.745E+005	1	1.745E+005	1.357E+005	<0.000 1
x_1x_2	6.66	1	6.66	5.17	0.085 3
x_1x_3	6.58	1	6.58	5.11	0.0865
x_1x_4	784.28	1	784.28	609.59	<0.000 1
x_2x_3	1.11	1	1.11	0.87	0.405 0
x_2x_4	25.55	1	25.55	19.86	0.011 2
x_3x_4	5.71	1	5.71	4.44	0.102 8
x_1^2	8.93	1	8.93	6.94	0.057 9
x_2^2	16.95	1	16.95	13.18	0.022 2
x_3^2	4.05	1	4.05	3.15	0.150 6
x_4^2	37 835.38	1	37 835.38	29 407.94	<0.000 1
$x_1^2x_2$	48.76	1	48.76	37.90	0.003 5
$x_1^2x_3$	0.21	1	0.21	0.16	0.708 2
$x_1^2x_4$	56.02	1	56.02	43.54	0.002 7
$x_1x_2^2$	94.46	1	94.46	73.42	0.001 0
$x_1x_3^2$	144.84	1	144.84	112.58	0.000 4
$x_2^2x_3$	2.75	1	2.75	2.14	0.217 6
$x_2^2x_4$	36.17	1	36.17	28.11	0.006 1
$x_2x_3^2$	70.81	1	70.81	55.03	0.001 8
$x_1^2x_2^2$	30.20	1	30.20	23.47	0.008 4
$x_1^2x_3^2$	0.46	1	0.46	0.35	0.583 8
纯误差 Pure error	5.15	4	1.29		
总和 Sum	5.910E+005	28			

由表 8 可知,模型的 $P < 0.000 1$, 说明该模型极显著, 可用该模型对 65Mn 板上土粒的滚动距离进行预测。在试验因素参考值范围内, x_1 、 x_2 、 x_4 对滚动距离均有显著影响, 显著性水平由高到低依次为 $x_4 > x_2 > x_1$, 静摩擦系数 x_3 对滚动距离影响不显著; x_1x_4 对滚动距离的影响极显著, x_2x_4 对滚动距离的影响较显著, 其余因素交互影响均不显著; x_2^2 对滚动距离影响显著、 x_4^2 对滚动距离影响极显著, 其余因素二次方对滚动距离的影响均不显著; $x_1^2x_2$ 、 $x_1x_2^2$ 、 $x_1^2x_4$ 、 $x_1x_3^2$ 、 $x_2^2x_4$ 、 $x_2x_3^2$ 对滚动距离影响显著, 其余因素的二次方与一次方的交互作用影响均不显著; 只有 $x_1^2x_2^2$ 对滚动距离影响显著, 其余因素的二次方交互作用不显著。

斜面试验测得含水率 17.15%±1%的土球在 65Mn 板上的滚动距离为 155.93±12.41 mm。通过 Design-expert 软件的优化模块, 以土球滚动距离为目标对回归模型进行寻优, 选取与土球在 65Mn 板上滚动距离相近的优化

解, 结合前文静摩擦试验结果, 选静摩擦系数为 0.57。仿真结果显示当土壤与 65Mn 板之间的 JKR 表面能为 5.5 J/m²、恢复系数为 0.61、静摩擦系数为 0.57、滚动摩擦系数为 0.056 时, 滚动距离仿真结果为 153.56 mm, 与物理试验得到的滚动距离平均值 155.93 mm 接近, 相对误差为 1.52%。

2) 土壤与 PTFE 板的斜面仿真试验结果分析

土球在 PTFE 板上的斜面仿真试验结果见表 9, 回归模型的方差分析见表 10。

表 9 含水率 17.15%的土壤在 PTFE 板上的斜面仿真试验结果
Table 9 Slope simulation test results of soil with moisture content of 17.15% on PTFE plate

试验号 Test No.	JKR 表面能 JKR surface energy x_1 (J·m ⁻²)	恢复系数 Restitution coefficient x_2	静摩擦系数 Static friction coefficient x_3	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient x_4	滚动距离 Rolling distance /mm
1	5.50	0.70	0.10	0.055	148.32
2	1.00	0.10	0.40	0.055	218.84
3	10.00	0.40	0.10	0.055	97.15
4	5.50	0.10	0.40	0.03	415.04
5	5.50	0.10	0.70	0.055	157.93
6	10.00	0.40	0.40	0.03	333.45
7	1.00	0.40	0.40	0.03	523.11
8	1.00	0.70	0.40	0.055	206.90
9	5.50	0.70	0.40	0.03	408.58
10	10.00	0.40	0.70	0.055	96.42
11	5.50	0.70	0.70	0.055	158.17
12	1.00	0.40	0.10	0.055	218.41
13	5.50	0.40	0.70	0.08	64.88
14	5.50	0.10	0.10	0.055	157.96
15	1.00	0.40	0.70	0.055	218.23
16	5.50	0.40	0.40	0.055	165.28
17	10.00	0.70	0.40	0.055	90.06
18	10.00	0.40	0.40	0.08	11.95
19	5.50	0.40	0.40	0.055	167.18
20	5.50	0.40	0.40	0.055	164.22
21	5.50	0.40	0.40	0.055	161.98
22	5.50	0.40	0.10	0.08	65.97
23	5.50	0.40	0.40	0.055	173.39
24	10.00	0.10	0.40	0.055	76.34
25	5.50	0.40	0.10	0.03	438.44
26	5.50	0.10	0.40	0.08	65.46
27	5.50	0.40	0.70	0.03	424.52
28	5.50	0.70	0.40	0.08	66.05
29	1.00	0.40	0.40	0.08	104.60

对表 9 中的试验数据进行多元回归, 得到土壤颗粒在 PTFE 板上的滚动距离回归模型, 其回归方程为

$$\begin{aligned}
 y = & 166.41 - 70.58x_1 - 1.47x_2 - 3.75x_3 \\
 & - 183.03x_4 + 6.42x_1x_2 - 0.14x_1x_3 + 24.25x_1x_4 \\
 & + 2.47x_2x_3 + 1.76x_2x_4 + 3.21x_3x_4 - 5.75x_1^2 \\
 & - 10.24x_2^2 - 0.57x_3^2 + 82.61x_4^2 + 1.91x_1^2x_2 \quad (6) \\
 & + 3.53x_1^2x_3 - 1.97x_1^2x_4 + 5.74x_1x_2^2 + 9.81x_1x_3^2 \\
 & + 6.21x_2^2x_3 + 10x_2^2x_4 - 0.88x_2x_3^2 \\
 & - 0.88x_2x_3^2 - 2.38x_1^2x_2^2 - 2.54x_1^2x_3^2
 \end{aligned}$$

表 10 土壤在 PTFE 板上滚动距离的回归模型方差分析
Table 10 Variance analysis of regression model of soil rolling distance on PTFE plate

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	4.979E+005	24	20 746.33	1 106.31	<0.000 1
x_1	19 924.73	1	19 924.73	1 062.49	<0.000 1
x_2	8.61	1	8.61	0.46	0.535 1
x_3	56.33	1	56.33	3.00	0.158 1
x_4	1.340E+005	1	1.340E+005	7 145.40	<0.000 1
x_1x_2	164.61	1	164.61	8.78	0.041 4
x_1x_3	0.076	1	0.076	4.033E-003	0.952 4
x_1x_4	2 352.74	1	2 352.74	125.46	0.000 4
x_2x_3	24.40	1	24.40	1.30	0.317 6
x_2x_4	12.43	1	12.43	0.66	0.461 3
x_3x_4	41.15	1	41.15	2.19	0.212 6
x_1^2	67.76	1	67.76	3.61	0.130 1
x_2^2	441.72	1	441.72	23.55	0.008 3
x_3^2	1.38	1	1.38	0.074	0.799 6
x_4^2	28 737.85	1	28 737.85	1 532.46	<0.000 1
$x_1^2x_2$	7.32	1	7.32	0.39	0.566 1
$x_1^2x_3$	24.85	1	24.85	1.33	0.313 8
$x_1^2x_4$	7.80	1	7.80	0.42	0.554 1
$x_1x_2^2$	65.95	1	65.95	3.52	0.134 0
$x_1x_3^2$	192.47	1	192.47	10.26	0.032 8
$x_2^2x_3$	77.07	1	77.07	4.11	0.1126
$x_2^2x_4$	200.00	1	200.00	10.67	0.030 9
$x_2x_3^2$	1.56	1	1.56	0.083	0.787 5
$x_1^2x_2^2$	5.69	1	5.69	0.30	0.611 1
$x_1^2x_3^2$	6.44	1	6.44	0.34	0.589 4
纯误差 Pure error	75.01	4	18.75		
总和 Sum	4.980E+005	28			

回归方程 (6) 的决定系数 $R^2 = 0.999 8$, 校正决定系数 $Adj-R^2 = 0.998 9$ 。

表 10 为模型的方差分析结果, 由表 10 可知, 模型的 $P < 0.000 1$, 说明该模型极显著, 可以根据模型对 PTFE 板上土球的滚动距离进行预测。 x_1 、 x_4 对滚动距离的影响均极显著, x_2 、 x_3 对滚动距离影响不显著; x_1x_4 对滚动距离的影响极显著, x_1x_2 对滚动距离影响显著, 其余因素一次交互作用影响均不显著; x_4^2 、 x_2^2 对滚动距离的影响极显著, 影响顺序为 $x_4^2 > x_2^2$, 其余因素的二次方作用影响均不显著; $x_1x_3^2$ 、 $x_2^2x_4$ 对滚动距离影响显著, 其余因素的二次方与一次方交互作用影响均不显著; 各因素的二次方项交互作用影响均不显著。

对含水率为 $17.15\% \pm 1\%$ 的土球, 测得其在 PTFE 板

上的滚动距离为 269.55 ± 11.25 mm。利用 Design-expert 软件中的优化模块, 以滚动距离 269.55 mm 为目标对回归模型进行寻优, 选取与土球滚动距离相近的 1 组优化解, 逐一进行仿真验证, 结合前文静摩擦试验结果, 选取黏重黑土与 PTFE 板的静摩擦系数为 0.52, 仿真结果显示当土壤与 PTFE 板之间的 JKR 表面能为 4.08 J/m^2 、恢复系数为 0.6、静摩擦系数为 0.52、滚动摩擦系数为 0.045 时, 滚动距离仿真结果为 269.35 mm, 与物理试验得到的平均滚动距离 269.55 mm 接近, 相对误差为 0.07%。

3 结 论

1) 针对东北地区高含水率的黏重黑土, 基于离散元方法, 采用 Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 模型分别对含水率为 $12.46\% \pm 1\%$ 与含水率 $17.15\% \pm 1\%$ 的 2 种土壤进行离散元仿真, 通过堆积角仿真试验标定 2 种含水率下的黏重黑土颗粒之间的接触模型仿真参数, 与物理试验进行对比, 得到堆积角回归方程, 利用响应面优化方法得到 2 种含水率的黏重黑土接触模型的参数分别为: 含水率 $12.46\% \pm 1\%$ 下土壤颗粒之间滚动摩擦系数为 0.22, JKR 表面能为 7.46 J/m^2 , 恢复系数为 0.56, 静摩擦系数 0.78; 含水率 $17.15\% \pm 1\%$ 的土壤颗粒 JKR 表面能为 8.41 J/m^2 , 恢复系数为 0.5, 静摩擦系数系数为 0.8, 土壤之间的滚动摩擦系数 0.23。由此可得, 对于含水率在 $10\% \sim 20\%$ 的黏重黑土, 在进行相关离散元仿真试验时, 各对应参数值可取上下限之间的值。

2) 测定了 4 种不同含水率的黏重黑土对不同触土部件材料的静摩擦系数, 含水率为 0 (干土)、 $12.46\% \pm 1\%$ 、 $17.15\% \pm 1\%$ 、 $23.5\% \pm 1\%$ 的黏重黑土与 65Mn 板之间的静摩擦系数依次为 0.197 ± 0.03 、 0.351 ± 0.075 、 0.571 ± 0.16 和无限大; 与 PTFE 板之间的静摩擦系数依次为 0.447 ± 0.075 、 0.332 ± 0.034 、 0.522 ± 0.11 、 0.633 ± 0.16 ; 与 UHMW-PE 板之间的静摩擦系数分别为 0.351 ± 0.09 、 0.435 ± 0.069 、 0.593 ± 0.17 、 0.83 ± 0.25 。对于触土材料 65Mn, 随着土壤含水率的增大, 其静摩擦系数亦增大且增大幅度较显著, 当土壤含水率超过 23.5% 以后, 土壤对 65Mn 板的粘附力已经大于使其下滑的摩擦力, 土壤会粘附在 65Mn 板上, 而对于 PTFE 板与 UHMW-PE 板, 随着土壤含水率的增加, 静摩擦系数提高的趋势较平缓, 当含水率超过 23.5% 时, 土壤仍然具有下滑的趋势, 摩擦系数并无显著增大, 尤其对于 PTFE 板, 由于其表面能较 UHMW-PE 板更低, 表现出较好的减粘性能, 由此说明低表面能触土部件具有减粘效果, 为仿生减粘触土部件的设计提供思路。

3) 通过斜面物理试验与仿真试验相结合的方法, 得到含水率为 $17.15\% \pm 1\%$ 的黏重黑土对 2 类触土部件材料的离散元仿真参数, 即黏重黑土与 PTFE 板之间的 JKR 表面能为 4.08 J/m^2 , 恢复系数为 0.6, 静摩擦系数为 0.52, 滚动摩擦系数为 0.045; 与 65Mn 板之间的 JKR 表面能为 5.5 J/m^2 , 恢复系数为 0.61, 静摩擦系数为 0.57, 滚动摩擦系数为 0.056。

4) 通过 2 种含水率的黏重黑土堆积角的回归模型方差分析以及土壤对 2 种触土部件材料 65Mn、PTFE 的斜面试验的回归模型方差分析, 得到东北地区黏重黑土颗粒之间(或颗粒与触土部件材料之间)的滚动摩擦系数以及颗粒之间(或颗粒对触土部件材料)的表面能参数对接触模型影响均极显著, 这与物理试验现象相吻合。

本文研究结果对东北黏重黑土地地区农业生产具有一定指导意义, 含水率越高, 黏重黑土的粘附性越强, 对触土部件的粘附亦越严重, 因此, 对于黏重黑土地地区土壤进行耕作, 可以选择减粘材料的触土部件或者设计仿生减粘触土部件, 有利于减少土壤粘附; 对于块茎类作物的机械收获作业, 可以尽量让土壤晾晒一些时日, 以降低土壤含水率, 减少土壤与触土部件的粘附, 且尽量避免雨后作业。

[参 考 文 献]

- [1] Mustafa Ucgul, John M Fielke, Chris Saunders. 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.
- [2] 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 bulldozer 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).
- [3] Mustafa Ucgul, John M Fielke, Chris Saunders. Three dimensional discrete element modeling DEM of tillage accounting for soil cohesion and adhesion[J]. *Biosystems Engineering*, 2015(129): 298—306.
- [4] 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).
- [5] B Li, Y Chen, J Chen. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016(158): 177—185.
- [6] 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).
- [7] 贺一鸣, 吴明亮, 向伟, 等. 离散元法在农业工程领域的应用进展[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(20): 133—137.
He Yiming, Wu Mingliang, Xiang Wei, et al. Application progress of discrete element method in agricultural engineering[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(20): 133—137. (in Chinese with English abstract).
- [8] 鹿芳媛, 马旭, 谭穗妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验. *农业机械学报*[J], 2018, 49(2): 94—99.
Lu Fangyuan, Ma Xu, Tan Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 94—99. (in Chinese with English abstract).
- [9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(22): 36—42. (in Chinese with English abstract).
- [10] 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.
Liu Fanyi, Zhang Jian, Li Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(12): 247—253. (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘凡一, 张舰, 陈军. 小麦籽粒振动筛分黏弹塑性接触模型构建及其参数标定[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 37—43.
Liu Fanyi, Zhang Jian, Chen Jun. Construction of visco-elasto-plasticity contact model of vibratory screening and its parameters calibration for wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(15): 37—43. (in Chinese with English abstract).
- [12] 彭飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 140—147.
Peng Fei, Wang Hongying, Fang Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 140—147. (in Chinese with English abstract).
- [13] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(9): 86—92.
Zhang Tao, Liu Fei, Zhao Manquan, et al. Measurement of

- physical parameters of contact between soybean seed and metering device and discrete element simulation calibration[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(9): 86–92. (in Chinese with English abstract).
- [14] Mustafa Ucgul, John M Fielke, Chris Saunders. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modeling[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2015(2): 130–141.
- [15] Mustafa Ucgul, John M Fielke, Chris Saunders. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. *Biosystems Engineering*, 2014(121): 105–107.
- [16] 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 without English abstract).
- [17] Tong Jin, Mohammad Almagzoub Mohammad, Zhang Jinbo, et al. DEM numerical simulation of abrasive wear characteristics of a bioinspired ridged surface[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2010 (7): 175–181.
- [18] 丁启朔, 任骏, Belal Eisa Adam, 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, Belal Eisa Adam, 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)
- [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): 50–56.
- 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): 50–56. (in Chinese with English abstract).
- [20] 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)
- [21] 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及参数校核[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4): 174–182.
- Shi Linrong, Wu Jianmin, Zhao Wuyun, et al. Establishment and parameter verification of farmland soil model in uniaxial compression based on discrete element method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 174–182. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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 with English abstract)
- [23] EDEM 2.5 theory reference guide[R/OL]. 2014-12-05 [2015-06-07]. <http://www.docin.com/p-980174717.html>
- [24] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 113–121.
- Xiong Pingyuan, Yang Zhou, Sun Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(18): 113–121. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郝新敏, 杨元, 黄斌香. 聚四氟乙烯微孔膜及纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [26] 滕兵. 端面扭动摩擦界面行为研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- Teng Bing. Study on Face-on-Face Torsional Tribological Interfacial Behaviors[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [27] Mustafa Ucgul, Chris Saunders, John M Fielke. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough[J]. *Biosystems Engineering*, 2017(155): 44–54.
- [28] J Y Sun, Y M Wang, Y H Ma, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. *Advances in Engineering Software*, 2018(119): 30–37.
- [29] 任露泉. 土壤粘附力学[M]. 北京: 机械工业出版社. 2011.
- [30] 钱定华, 张际先. 土壤对金属材料粘附和摩擦研究状况概述[J]. *农业机械学报*, 1984(1): 69–78.
- Qian Dinghua, Zhang Jixian. A Summary of study of adhesion and friction between soil and metals[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1984(1): 69–78. (in Chinese with English abstract).

Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China

Li Junwei^{1,2,3,4}, Tong Jin^{1,3}, Hu Bin^{2,4}, Wang Hubiao^{1,3}, Mao Chunyu^{1,3,5}, Ma Yunhai^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

4. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China

5. Jilin Engineering Normal University, Changchun 130022, China;)

Abstract: In order to obtain the interaction parameters which can be used for discrete element simulation between the **soil-engaging** components and clayey black soil in northeast China, the Hertz-Mindlin with JKR Cohesion contact model in EDEM2.7 was used to simulate the clayey black soil. Aiming at the actual working environment with moisture content of 10%-20%, 2 kinds of clayey black soil with moisture content of $12.46\% \pm 1\%$ and $17.15\% \pm 1\%$ were prepared respectively. The rolling friction coefficient, recovery coefficient, JKR surface energy parameter and the static friction coefficient between the soil particles were used as the model calibrated parameters. The soil repose angle simulated under the simulation parameters was set as the response value. The regression model of the soil repose angle was established based on the Box-Behnken response surface method, and the regression model was optimized by using the soil repose angles under 2 moisture contents obtained by physical experiments. The optimal solution of the contact model parameters of the clayey black soil particles with 2 moisture contents was obtained. The parameter range of the discrete element contact model of clayey black soil with moisture content between 10%-20% were given. The soil repose angle and stacked shape obtained by the simulation experiment with the optimized solution had a high similarity with that of the physical test. At the same time, the static friction coefficients of 3 kinds of soil contact materials such as 65Mn plate, UHMW-PE plate and PTFE plate were tested under the conditions of 4 kinds of moisture content, which were 0, 12.46%, 17.15% and 23.5% respectively. Then for the 2 typical soil contact materials such as 65Mn and PTFE, the slope physical test bench were constructed for the clayey black soil with moisture content of $17.15\% \pm 1\%$. The slope simulation models of 65Mn and PTFE materials were established under the EDEM2.7 software platform. Based on the critical simulation parameters such as JKR surface energy parameter, static friction coefficient, rolling friction coefficient and recovery coefficient between soil particle and soil contact material, the simulated rolling distance of the soil ball on different soil contact materials was set as the response value. The excellent fit regression model of rolling distance for the 2 kinds of typical soil contact materials were established based on the response surface optimization method of Box-Behnken. The 2 regression models were optimized by the sliding distance obtained by the physical experiment. Then the optimized solution of the contact model parameters of different materials was obtained. The simulation results showed that when the surface energy of JKR between soil and 65Mn was 5.5 J/m^2 , the recovery coefficient was 0.61, the static friction coefficient was 0.57 and the rolling friction coefficient was 0.056, the rolling distance simulation result was 153.56 mm, which was close to the average rolling distance obtained from physical experiments of 155.93 mm, and the relative error was 1.52%; When the surface energy of JKR between soil and PTFE was 4.08 J/m^2 , the recovery coefficient was 0.6, the static friction coefficient was 0.52 and the rolling friction coefficient was 0.045, the simulation result of rolling distance was 269.35 mm, which was close to the average rolling distance of 269.55 mm obtained from physical experiment, and the relative error was 0.07%. And the optimized parameters can be used to simulate the discrete parameters between the clayey black soil and the soil-engaging components. The study provides credible basic data for the design and simulation of agricultural machinery under clayey black soil conditions.

Keywords: soils; water content; discrete element method; clayey black soil; calibration of simulation parameter