

玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定

周 华^{1,2} 车海龙^{1,2} 耿端阳^{1,2} 陈美舟^{1,2} 张银平^{1,2}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东省旱作智能农机装备协同创新中心, 淄博 255000)

摘要: 为获取玉米田耕层不同土壤的各项参数, 本文将玉米田耕层典型土壤分为未与玉米根茬接触的普通土壤 (PT) 和与玉米根茬结合形成根土复合体的土壤 (GT), 采用物理试验与离散元仿真相结合的方法, 分别对离散元参数进行标定。基于 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型, 采用中心组合试验设计方法, 以土壤堆积角为目标值, 进行了四因素五水平仿真试验。基于 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型, 采用 Design-Expert 软件, 应用 Plackett - Burman 设计敏感性分析试验、最陡爬坡试验、Box - Behnken 试验, 以土壤硬度为目标值, 对显著性参数进行寻优, 得到 PT 最优解组合为: 粘结键法向刚度 $4.37 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结键切向刚度 $1.46 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、切向极限应力 $3.24 \times 10^5 \text{ Pa}$; GT 最优解组合为: 粘结键法向刚度 $5.19 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结键切向刚度 $4.25 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、法向极限应力 $4.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。基于两种土壤标定的参数对其进行了土壤直剪验证试验, 结果表明, 所标定的两种土壤仿真和实测最大剪应力的相对误差均低于 10%, 仿真参数可靠。本文提出的土壤颗粒建模方法、标定方法及其所标定的参数值准确可靠, 可为玉米田耕层土壤模型构建提供理论依据。

关键词: 玉米田耕层土壤; 玉米根土复合体; 离散元; 参数标定

中图分类号: S222.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0049-12

OSID:



Discrete Element Modeling and Parameter Calibration of Typical Soil in Maize Field Tillage Layer

ZHOU Hua^{1,2} CHE Hailong^{1,2} GENG Duanyang^{1,2} CHEN Meizhou^{1,2} ZHANG Yinping^{1,2}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Shandong Provincial Collaborative Innovation Center of Dry-farming Intelligent Agricultural Equipment, Zibo 255000, China)

Abstract: To obtain the parameters of different soil in the maize field tillage layer, the typical soil of the maize field tillage layer was divided into ordinary soil (PT) that was not in contact with maize stubble and soil (GT) that combined with maize stubble to form a root-soil complex. The discrete element parameters were calibrated by combining physical experiments and discrete element simulation. Based on Hertz - Mindlin (no slip) contact model, a four factor and five level simulation test was conducted with the central composite design of experiments method and the soil accumulation angle as the target value. Based on the Hertz - Mindlin with bonding model, the Plackett - Burman test, steepest climbing test and Box - Behnken test were designed by using Design-Expert software. The significance parameters were optimized with soil hardness as the target value, and the optimal solution combination for PT was obtained as follows: normal stiffness per unit area was $4.37 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, shear stiffness per unit area was $1.46 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, critical shear stress was $3.24 \times 10^5 \text{ Pa}$. The optimal solution combinations for GT as follows: normal stiffness per unit area was $5.19 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, shear stiffness per unit area was $4.25 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, and critical normal stress was $4.52 \times 10^5 \text{ Pa}$. A soil direct shear validation test was conducted based on the parameters calibrated for two types of soil. The results showed that the relative error of maximum shear stress between the simulation and measurement of the two types of soil was less than 10%, indicating that the simulation parameters were reliable. The soil particle modeling method and calibration

收稿日期: 2023-07-05 修回日期: 2023-08-15

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2022QE150)、国家重点研发计划项目 (2021YFD2000401-2) 和山东省重点研发计划项目 (2019GNC106087)

作者简介: 周华 (1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事现代农业装备设计及测控研究, E-mail: zhouhua688@163.com

通信作者: 张银平 (1989—), 女, 副教授, 博士, 主要从事现代农业装备设计及测控研究, E-mail: zhangyinping929@163.com

method proposed as well as the calibrated parameter values were accurate and reliable, and can provide a theoretical basis for the construction of soil models in maize fields.

Key words: maize field cultivated soil; maize root-soil complex; discrete elements; parameter calibration

0 引言

随着保护性耕作的日益普及,农机触土部件的工作环境已经从赤裸的土壤变成了混有作物根茬和秸秆的农田^[1-4]。因此,确定触土部件与土壤、根茬和秸秆之间的相互作用,已被视为现代化高效农业发展的重要基础^[5-7]。土壤作为触土部件作业研究的基础,其与根茬及秸秆等均有紧密联系,因此,需要对土壤的各种离散特性进行分析,以便为触土部件的设计提供参考。研究触土部件与土壤的相互作用时,若单纯采用大田试验,很难从微观角度观察土壤颗粒的动态特性,目前应用较多的是试验与数值模拟相结合的方法。利用数值模拟的方法辅助力学特性研究是目前的发展趋势,土壤颗粒属于散粒体,具有典型的离散性,因此选择离散元法进行土壤颗粒仿真及参数标定更为可靠^[8]。

离散元法又称离散单元法,是一种用于模拟并分析散体介质系统动力学行为的数值方法,能够从微观角度出发,将土壤看作由大量离散的独立运动颗粒组成的整体,直观反映每个颗粒所受的力、位移等^[9-12]。目前已有研究将离散元方法应用于土壤仿真中。宋占华等^[13]以桑园土壤为例,利用 EDEM 软件中的 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型建立了非等直径土壤球形颗粒模型,并对土壤颗粒的接触参数进行了标定优化。张锐等^[14]应用 Hertz - Mindlin 接触模型,对标准球和非标准球的无黏性沙土颗粒的碰撞恢复系数与摩擦因数进行标定,建立了沙土接触模型。王宪良等^[15]以华北麦玉两熟区免耕壤土为研究对象,基于离散元软件 EDEM 扩展的 The Edinburgh Elasto - Plastic Adhesion 非线性弹塑性接触模型开展常年免耕农田土壤离散元仿真模型参数标定研究,并进行了土壤应力传递验证试验。针对黏弹性土壤、砂质土壤等大范围土壤参数标定已有大量研究,但对于作物根茎周围土壤的参数与普通土壤参数是否一致鲜有报道。ZHANG 等^[16]取靠近玉米根茎一点 3 个深度范围的土壤,通过试验测出本征参数,取其平均值作为土壤仿真参考,建立了玉米根土复合体模型。目前多数研究都是将大田耕层土壤看作同一参数,无法充分体现作物根茬对土壤特性的影响。

玉米田耕层中的典型土壤可分为两类,一类是未与玉米根茬接触的普通土壤(PT),另一类是与玉

米根茬结合形成根土复合体的土壤(GT)。本文提出一种显著性分析和响应面法相结合的方法,利用实测试验和仿真模拟对玉米田耕层中典型土壤的离散元仿真参数进行标定及优化。应用 EDEM 中 Hertz - Mindlin (no slip) 和 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型,分别以 PT 和 GT 为样本,试验获取其含水率、堆积角等,基于 EDEM 软件中内置的 GEMM 数据库所推荐的范围值,采用 Design-Expert 软件依次设计 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验完成两种土壤仿真参数标定及优化,并结合堆积角模拟试验、土壤硬度测试试验和土壤直剪试验验证土壤模型参数的准确性。

1 材料与方法

1.1 试验材料及基本参数测量

试验所选用的土壤均于 2022 年 11 月 17 日取自山东省淄博市张店区西吕村(118.003 9°E, 36.881 1°N)。在同一块玉米种植试验田里,整体采用五点取样法收集玉米耕层土壤。根据实际测量,玉米行距不小于 50 cm,玉米根系固土直径约 20 cm。因此,为确保土壤样品的代表性,PT 取样于两行玉米中间位置(该位置不受玉米根系影响);GT 取样于玉米根系 10 cm 固土范围内。用环刀法采集土壤,取样时将取样点上层覆盖的秸秆清理干净。在环刀内壁均匀涂抹凡士林,环刀刃口垂直于土壤平面放置,将手柄置于环刀上方,用锤子敲击手柄使环刀切入土壤,待环刀略低于土壤平面时,清除环刀周围的土壤,将环刀轻轻取出,刮去多余土壤,使环刀上下两端土壤平整。所用环刀内径 50.46 mm,高度 50 mm,图 1a 为将土壤上层覆盖物等清理干净,图 1b 为环刀取土过程,图 1c 为 PT 和 GT 分别收集入密封袋的散土,以备后续堆积角测量。根据《土力学试验指导》的烘干法对土壤含水率进行测试^[17],测得 PT 含水率为 16.12%,GT 含水率为 19.36%。采用比重瓶法测得土壤颗粒密度为 2 680 kg/m³。

1.2 土壤堆积试验

土壤堆积角是农机触土部件和土壤相互作用过程中影响土壤应变的重要参数,因此将土壤堆积角作为一个重要参数进行测量,本研究利用应用较为广泛的圆筒提升法测定土壤的堆积角^[18]。试验所用圆筒和接料盘的材料均为钢,如图 2 所示。先将圆筒用自制夹紧装置连接到万能材料试验机的提升



图 1 土壤取样

Fig. 1 Soil sampling

装置上,把提升装置下降到圆筒垂直接触到接料盘上,分别将过筛后的 PT 和 GT 装入圆筒内,使土壤高度与圆筒高度平齐,启动万能材料试验机,以速度 1 mm/s 匀速提升圆筒,使土壤受重力自然降落并堆积,土壤堆积静置后斜面与水平面的夹角即为土壤堆积角。用相机拍下两种土壤堆积情况(图 3a、3b),试验分别重复 10 次。

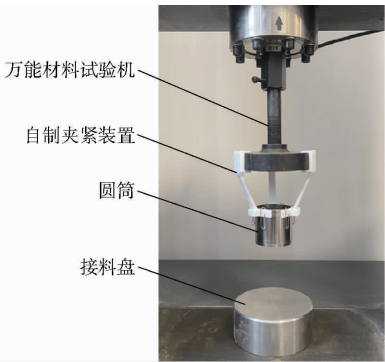


图 2 圆筒提升装置

Fig. 2 Cylinder lifting device

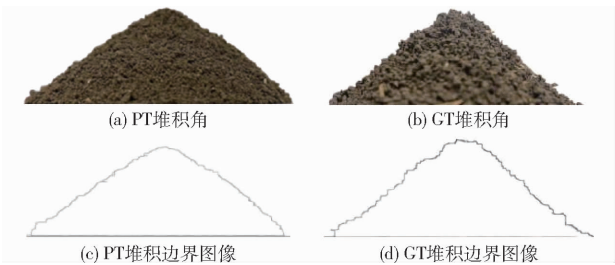


图 3 土壤堆积角及边界图像

Fig. 3 Soil accumulation angle and boundary image

为减小人为视觉造成的测量误差,利用 Python 分别对土壤堆积图像进行处理,得到边界图像如图 3c、3d 所示,将边界图像导入 Origin 中,利用图像数字化工具得到边界图像的坐标值,对一侧的坐标值进行线性拟合,得到拟合图像和方程式^[19],如图 4 所示。通过对拟合曲线斜率取反函数,得到 PT 堆积角平均值为 34.75°,GT 堆积角平均值为 42.40°,两种土壤的堆积角差异性较为明显。

1.3 土壤硬度检测试验

土壤硬度检测试验地点与上述试验为同一块试验田。采用 TYD-1 型指针式土壤硬度计进行检测。

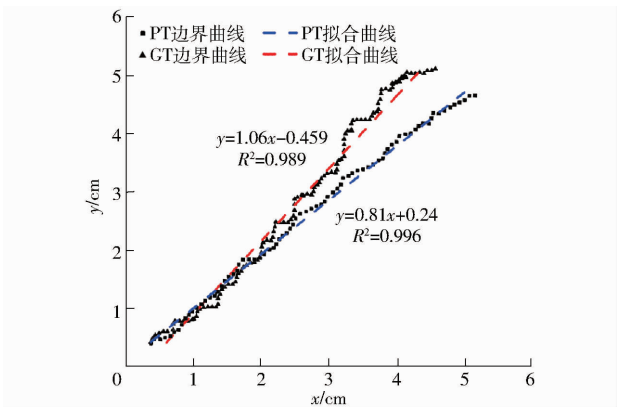


图 4 线性拟合结果

Fig. 4 Linearly fit results

测,原理是利用压力计之理论值,直接测量出土壤硬度。先将准备测量的土壤表面铲平,然后将土壤硬度计尖端圆锥部分插入土壤中,直到顶口部分,待指针不再转动后,垂直顺向拔出土壤硬度计,并从表上读取硬度指示值,读取测量值完毕后,旋转从动针旋钮,使指示表归零,以备下次使用。土壤硬度实测试验如图 5 所示。对测取的两种土壤数据取平均值得 PT 硬度为 316 kPa、GT 硬度为 422 kPa。



图 5 土壤硬度检测试验

Fig. 5 Soil hardness detection test

1.4 土壤直剪验证试验

为验证所建玉米田典型土壤离散元仿真模型的准确性,利用 ZJ-1B 型应变控制式直剪仪对标定参数的模型进行验证。土壤直剪实测试验如图 6 所示。设垂直压力为 100 kPa,剪切速率为 0.5 mm/min。

剪应力计算公式为

$$\tau = C_r R \tag{1}$$

式中 C_r ——直剪仪测力环系数,取 158.7 kPa/mm

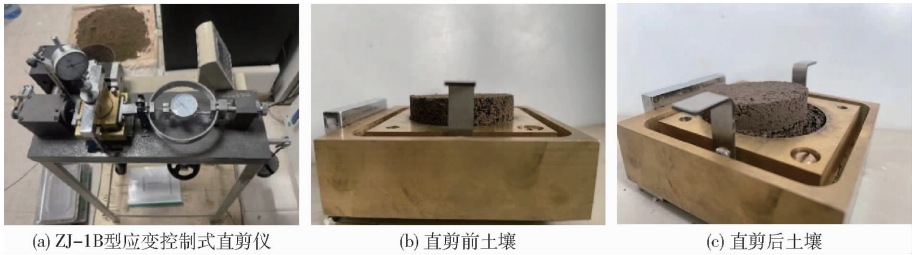


图6 土壤直剪试验

Fig.6 Soil direct shear test

R ——剪切时水平量表最大读数,mm
对测取的两种土壤数据取平均值得 PT 剪应力为 139.64 kPa、GT 剪应力为 182.30 kPa。

1.5 土壤离散元参数标定试验

1.5.1 离散元接触模型选择

选择合适的接触模型是精确模拟土壤离散元模型的前提,对于土壤堆积角试验,选用 Hertz - Mindlin (no slip) 模型作为离散元仿真中土壤颗粒与土壤颗粒接触模型以及土壤颗粒与钢的接触模型^[20]。

在土壤硬度检测试验时,由于土壤颗粒间存在一定的粘聚力,结合对各种接触模型的分析,该试验选择 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型^[21-23]。当颗粒间产生粘结作用后,土壤颗粒粘结力 F_n 、 F_t 和力矩 M_n 、 M_t 随着时间步从零开始增加。即

$$\delta F_n = -V_n S_n A_b \delta_t \tag{2}$$

$$\delta F_t = -V_t S_t A_b \delta_t \tag{3}$$

$$\delta M_n = -\omega_n S_n J \delta_t \tag{4}$$

$$\delta M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta_t \tag{5}$$

其中 $A_b = \pi R_b^2 \tag{6}$

$$J = \frac{1}{2} \pi R_b^4 \tag{7}$$

式中 δF_n ——颗粒粘结键法向应力,N
 δF_t ——颗粒粘结键切向应力,N
 δM_n ——颗粒粘结键法向力矩,N·m
 δM_t ——颗粒粘结键切向力矩,N·m
 V_n ——颗粒法向速度,m/s
 V_t ——颗粒切向速度,m/s
 S_n ——粘结键法向刚度,N/m³
 S_t ——粘结键切向刚度,N/m³
 ω_n ——颗粒法向角速度,rad/s
 ω_t ——颗粒切向角速度,rad/s
 A_b ——接触面积,mm²
 J ——粘结球形空间惯性矩,m⁴
 R_b ——粘结半径,mm
 δ_t ——时间步长,s

当作用在粘结键上的外界力超过某个预先设定

的值时,粘结键断裂,即

$$\sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A_b} + \frac{2M_t}{J} R_b \tag{8}$$

$$\tau_{\max} < \frac{-F_t}{A_b} + \frac{M_n}{J} R_b \tag{9}$$

由式(8)、(9)可知,Hertz - Mindlin with bonding 模型需要设置的参数分别为粘结键法向和切向刚度、法向和切向极限应力以及粘结半径。

将土壤及钢材的本征参数和接触参数输入到 EDEM 软件中,从 GEMM 数据库获取仿真参数范围和推荐数值,结合文献[13-15、18、24-25]得出参数如表1所示。

表1 土壤与钢的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters for soil and steel

类型	参数	范围	来源
本征参数	土壤颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2.68 × 10 ³	试验获得
	土壤泊松比	0.38	文献[13-15]
	土壤剪切模量/Pa	1.15 × 10 ⁷	文献[13-14]
	钢密度/(kg·m ⁻³)	7.85 × 10 ³	文献[18]
	钢泊松比	0.30	文献[18]
	钢剪切模量/Pa	7.90 × 10 ¹⁰	文献[18]
接触参数	土-土碰撞恢复系数	0.6	文献[24-25]
	土-土静摩擦因数	0.4~1.2	待标定
	土-土动摩擦因数	0.1~0.3	待标定
	土-钢碰撞恢复系数	0.6	文献[24-25]
	土-钢静摩擦因数	0.4~1.2	待标定
	土-钢动摩擦因数	0.1~0.3	待标定
bonding 模型参数	粘结键法向刚度/(N·m ⁻³)	1 × 10 ⁷ ~9 × 10 ⁷	待标定
	粘结键切向刚度/(N·m ⁻³)	1 × 10 ⁷ ~9 × 10 ⁷	待标定
	法向极限应力/Pa	1 × 10 ⁵ ~9 × 10 ⁵	待标定
	切向极限应力/Pa	1 × 10 ⁵ ~9 × 10 ⁵	待标定
	粘结半径/mm	5.5~7.5	待标定

1.5.2 土壤离散元参数标定试验方法

选取 x_1 (土-土静摩擦因数)、 x_2 (土-土动摩擦因数)、 x_3 (土-钢静摩擦因数)、 x_4 (土-钢动摩擦因数) 进行优化试验,以土壤堆积角为响应值,采用中心组合试验设计方法,进行四因素五水平仿真试验。为保证参数标定的可靠性,避免在交互作用下试验

因素范围外存在优值,根据中心组合设计原理,结合表 1 中参数范围拓展试验因素区间,土壤堆积角仿真试验设计如表 2 所示。

表 2 土壤堆积角仿真试验设计

Tab.2 Design of simulation experiment for soil accumulation angle

编码	因素			
	土-土静摩	土-土动摩	土-钢静摩	土-钢动摩
	擦因数 x_1	擦因数 x_2	擦因数 x_3	擦因数 x_4
-2	0	0	0	0
-1	0.4	0.1	0.4	0.1
0	0.8	0.2	0.8	0.2
1	1.2	0.3	1.2	0.3
2	1.6	0.4	1.6	0.4

仿真所用土壤颗粒尺寸对建模速率和建模精度有较大影响,颗粒过大会导致仿真误差增大,颗粒过小会大幅增加仿真运行时间,为了简化运算同时保证试验结果的准确性,土壤颗粒采用半径为 5 mm 的球形颗粒^[26-27]。

在 EDEM 后处理平台中,分别从土壤堆积锥面的 X 方向和 Y 方向截取图像,导入 CAD 软件中标注土壤堆积角,每组共测量 4 个堆积角取平均值,仿真土壤堆积角测量如图 7 所示。

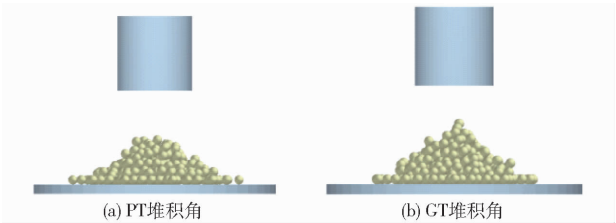


图 7 仿真土壤堆积角测量

Fig.7 Simulated soil accumulation angle measurement

由于土壤多样性,在确定 PT、GT 关键参数的初始范围之后,需要对试验土壤 bonding 模型的仿真参数进行标定及优化。Plackett – Burman 试验主要针对影响因子数众多,且未确定各因子相对于响应变量的显著性采用的试验设计方法^[28-29]。首先利用 Design-Expert 软件设计 Plackett – Burman 试验,分别以 PT、GT 硬度为响应值,筛选出最显著的 3 个影响因素。仿真试验中共设置 5 项真实参数($x_5 \sim x_9$),6 项虚拟参数($x_{10} \sim x_{15}$),如表 3 所示。每个参数均取高、低两个水平,分别通过编码 +1 和 -1 表示,共设置 12 组试验,每组仿真试验重复 3 次,取其平均值记为试验结果。确定出对土壤硬度影响最显著的 3 个因素后,通过最陡爬坡试验进一步缩小显著因素的参数范围,最后,采用 Box – Behnken 试验对仿真模型进行回归分析和参数优化,确定 PT、GT 离散元仿真的最优参数。Plackett – Burman 试验参

数如表 3 所示。

表 3 Plackett – Burman 试验参数

Tab.3 Plackett – Burman test parameters

参数	低水平 (-1)	高水平 (+1)
粘结键法向刚度 $x_5/(N \cdot m^{-3})$	1×10^7	9×10^7
粘结键切向刚度 $x_6/(N \cdot m^{-3})$	1×10^7	9×10^7
法向极限应力 x_7/Pa	1×10^5	9×10^5
切向极限应力 x_8/Pa	1×10^5	9×10^5
粘结半径 x_9/mm	5.5	7.5
虚拟参数 $x_{10} \sim x_{15}$		

基于两种土壤标定的参数,用 EDEM 软件生成 2 个尺寸为 300 mm × 300 mm × 100 mm 的土槽,用三维设计软件 SolidWorks 等比例画出一个高 40 mm、最大直径 24.5 mm 的圆锥体,材质为钢,将其导入到 EDEM 软件中进行离散元仿真试验,如图 8 所示。

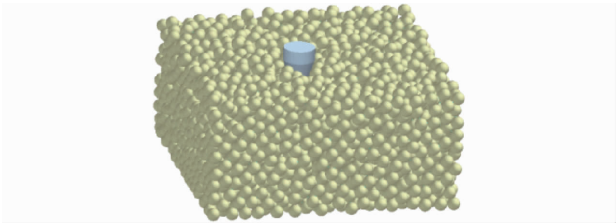


图 8 仿真土壤硬度测量

Fig.8 Simulate soil hardness measurement

土壤硬度 P 计算公式为

$$P = \frac{F}{S} \tag{10}$$

式中 F ——圆锥体运动停止时所受的最大力,N
 S ——圆锥体运动停止时与土壤表面平齐的横截面积, m^2

2 土壤离散元仿真标定试验

2.1 土壤堆积角仿真标定试验

2.1.1 PT 和 GT 堆积角仿真标定试验

土壤堆积角试验设计与结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为编码值。

对堆积角进行线性回归方程拟合,得出二次项回归方程为

$$\begin{aligned} \theta = & 40.75 + 2.16X_1 + 9.27X_2 + 4.84X_3 + 1.93X_4 + \\ & 0.2706X_1X_2 + 0.6144X_1X_3 - 0.3956X_1X_4 + \\ & 0.0106X_2X_3 - 0.4169X_2X_4 + 0.1144X_3X_4 - \\ & 4X_1^2 - 0.6493X_2^2 - 4.47X_3^2 - 0.6555X_4^2 \end{aligned} \tag{11}$$

对土壤堆积角进行方差分析和显著性检验,土壤堆积角试验方差分析如表 5 所示。模型 $P(0.0005)$ 小于 0.01,说明模型极显著,同时失拟项 $P(0.0687)$ 大于 0.05,差异不显著,说明该模型在

表 4 土壤堆积角试验设计与结果

Tab.4 Soil accumulation angle experimental design and results

序号	因素				堆积角 $\theta/$ ($^{\circ}$)
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	-1	-1	-1	-1	20.00
2	1	-1	-1	-1	20.50
3	-1	1	-1	-1	36.00
4	1	1	-1	-1	37.50
5	-1	-1	1	-1	21.25
6	1	-1	1	-1	24.50
7	-1	1	1	-1	41.67
8	1	1	1	-1	44.50
9	-1	-1	-1	1	23.50
10	1	-1	-1	1	22.00
11	-1	1	-1	1	41.50
12	1	1	-1	1	41.00
13	-1	-1	1	1	29.25
14	1	-1	1	1	29.75
15	-1	1	1	1	42.75
16	1	1	1	1	46.00
17	-2	0	0	0	11.00
18	2	0	0	0	32.00
19	0	-2	0	0	14.30
20	0	2	0	0	55.50
21	0	0	-2	0	0.00
22	0	0	2	0	39.25
23	0	0	0	-2	30.75
24	0	0	0	2	39.00
25	0	0	0	0	42.00
26	0	0	0	0	43.00
27	0	0	0	0	40.50
28	0	0	0	0	39.00
29	0	0	0	0	41.00
30	0	0	0	0	46.00

回归区域内具有较好拟合性,不存在其他主要因素影响该试验的响应值。土-土动摩擦因数(X_2)、土-钢静摩擦因数(X_3)和二次项 X_1^2 、 X_3^2 对堆积角具有极显著影响($P < 0.01$),其余项影响均不显著($P > 0.05$)。由 F 值可知,4因素对土壤硬度影响由大到小为土-土动摩擦因数、土-钢静摩擦因数、土-土静摩擦因数、土-钢动摩擦因数。

以PT和GT实际堆积角为依据,对仿真参数进行优化,借助Design-Expert软件对拟合出的方程进行数值求解,分别以实际测得PT堆积角和GT堆积角 34.75° 和 42.40° 为目标,进行优化求解,得到若干组优化解,选取PT和GT接触参数最优解如表6所示。

2.1.2 PT和GT堆积角最优参数验证

为检验模型预测准确性,对响应面优化结果进

表 5 土壤堆积角试验方差分析

Tab.5 ANOVA for soil accumulation angle test

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	265.2	14	3 712.74	6.25	0.000 5 **
X_1	111.93	1	111.93	2.64	0.125 1
X_2	2 064.06	1	2 064.06	48.66	<0.000 1 **
X_3	562.31	1	562.31	13.26	0.002 4 **
X_4	89.44	1	89.44	2.11	0.167 1
$X_1 X_2$	1.17	1	1.17	0.027 6	0.870 2
$X_1 X_3$	6.04	1	6.04	0.142 4	0.711 2
$X_1 X_4$	2.5	1	2.5	0.059	0.811 3
$X_2 X_3$	0.001 8	1	0.001 8	0	0.994 9
$X_2 X_4$	2.78	1	2.78	0.065 6	0.801 4
$X_3 X_4$	0.209 3	1	0.209 3	0.004 9	0.944 9
X_1^2	438.7	1	438.7	10.34	0.005 8 **
X_2^2	11.56	1	11.56	0.272 6	0.609 2
X_3^2	547.56	1	547.56	12.91	0.002 7 **
X_4^2	11.79	1	11.79	0.277 9	0.605 8
残差	42.42	15	636.23		
失拟项	56.6	10	565.98	4.03	0.068 7
纯误差	14.05	5	70.25		
总和		29	4 348.97		

注:**表示极显著($P < 0.01$),下同。

表 6 PT和GT的参数最优解

Tab.6 Parameter optimal solution for PT and GT

土壤类型	土-土静摩擦因数	土-土动摩擦因数	土-钢静摩擦因数	土-钢动摩擦因数
PT	0.64	0.19	0.57	0.21
GT	0.82	0.21	0.84	0.26

行试验验证,仿真采用表6中的最优解,其他参数采用中水平参数,进行3次重复试验,结果如表7所示。PT堆积角仿真结果平均值为 32.30° ,与实际值相对误差为7.05%;GT堆积角仿真结果平均值为 41.25° ,与实际值相对误差为2.71%,仿真试验与实测结果基本一致。GT堆积角明显高于PT,其仿真值和实测值相对于PT分别增加27.71%和22.01%。以上结果表明PT和GT标定的接触参数准确可靠,可通过离散元仿真建立玉米田耕层典型土壤模型。

表 7 PT和GT堆积角试验的参数最优解验证

Tab.7 Verification of optimal solution of parameters for PT and GT accumulation angle tests

土壤类型	仿真/($^{\circ}$)	实测/($^{\circ}$)	相对误差/%
PT	32.30	34.75	7.05
GT	41.25	42.40	2.71
相对增量/%	27.71	22.01	

2.2 土壤硬度仿真标定试验

2.2.1 Plackett-Burman 试验

Plackett-Burman 试验共计对11个因素设计

12 组试验,其中 5 项真实参数 X_5 (粘结键法向刚度)、 X_6 (粘结键切向刚度)、 X_7 (法向极限应力)、 X_8 (切向极限应力)、 X_9 (粘结半径),6 项虚拟参数 ($X_{10} \sim X_{15}$),其试验设计与结果如表 8 所示。由表 8 可知,随各因素所取水平变化,PT 和 GT 硬度均在一定范围内波动明显。

表 8 Plackett – Burman 试验设计与结果
Tab.8 Plackett – Burman trial design and results

序号	因素											PT 硬度/	GT 硬度/
	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	kPa	kPa
1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	269.43	248.62
2	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	153.72	225.27
3	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	379.83	446.92
4	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	192.14	149.26
5	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	181.10	267.94
6	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	139.70	129.51
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	232.48	327.39
8	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	109.99	217.20
9	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	142.46	236.09
10	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	129.94	135.46
11	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	409.34	527.81
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	130.36	124.63

运用 Design-Expert 软件分别对 PT 和 GT 的 Plackett – Burman 试验结果进行方差分析,获得 5 项真实参数对 PT 和 GT 硬度的影响显著性如表 9 所示。由表 9 可知, X_5 (粘结键法向刚度)、 X_6 (粘结键切向刚度)、 X_8 (切向极限应力)对 PT 硬度影响较大,其余参数影响较小; X_5 (粘结键法向刚度)、 X_6 (粘结键切向刚度)、 X_7 (法向极限应力)对 GT 硬度影响较大,其余参数影响较小。

表 9 Plackett – Burman 试验参数显著性分析
Tab.9 Significance analysis of Plackett – Burman test parameters

类型	参数	均方和	P	影响率/%	显著性排序
PT	X_5	31 678.91	0.003 7	31.69	1
	X_6	18 814.69	0.012 2	18.82	3
	X_7	8 656.06	0.053 2	8.65	5
	X_8	27 101.23	0.005 4	27.11	2
	X_9	13 732.60	0.023 3	13.73	4
GT	X_5	78 727.88	0.000 6	47.27	1
	X_6	31 244.06	0.006 2	18.76	3
	X_7	34 442.03	0.004 9	20.68	2
	X_8	4 762.71	0.158 3	2.86	5
	X_9	17 364.17	0.021 8	10.43	4

因此,分别针对 PT 和 GT 硬度影响显著的因素进行最陡爬坡试验和 Box – Behnken 试验。

2.2.2 最陡爬坡试验

针对 Plackett – Burman 试验筛选出的显著性影响因素进行最陡爬坡试验,进一步缩小显著性参数的范围,以快速确定最优值的邻近区域。因此,对 PT 显著性参数 X_5 、 X_6 、 X_8 和 GT 显著性参数 X_5 、 X_6 、

X_7 进行最陡爬坡试验,试验时非显著因素均取其中间水平,即 PT 非显著性参数: x_7 (法向极限应力 5×10^5 Pa)、 x_9 (粘结半径 6.5 mm);GT 非显著性参数: x_8 (切向极限应力 5×10^5 Pa)、 x_9 (粘结半径 6.5 mm)。最陡爬坡试验设计与结果如表 10 所示。

表 10 最陡爬坡试验设计与结果
Tab.10 Steepest climb test design and results

序号	$x_5/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	$x_6/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	x_8/Pa	PT 硬度/ kPa	误差/%
1	1×10^7	1×10^7	1×10^5	153.08	-51.55
2	3×10^7	3×10^7	3×10^5	290.23	-8.16
3	5×10^7	5×10^7	5×10^5	387.90	22.75
4	7×10^7	7×10^7	7×10^5	531.63	68.24
5	9×10^7	9×10^7	9×10^5	687.90	117.70
序号	$x_5/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	$x_6/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	x_7/Pa	GT 硬度/ kPa	误差/%
1	1×10^7	1×10^7	1×10^5	154.56	-63.37
2	3×10^7	3×10^7	3×10^5	307.22	-27.20
3	5×10^7	5×10^7	5×10^5	402.76	-4.56
4	7×10^7	7×10^7	7×10^5	533.97	26.53
5	9×10^7	9×10^7	9×10^5	570.70	35.24

对 PT 的最陡爬坡试验结果表明,随着参数 X_5 、 X_6 、 X_8 的增加,PT 的硬度目标值 316 kPa 在以 1 号、3 号水平分别为低、高水平的硬度区间;对 GT 的最陡爬坡试验结果表明,随着参数 X_5 、 X_6 、 X_7 的增加,GT 的硬度目标值 422 kPa 在以 2 号、4 号水平分别为低、高水平的硬度区间。因此,针对 PT 和 GT 分别进行 Box – Behnken 试验。

2.2.3 Box－Behnken 试验

基于最陡爬坡试验结果,对 PT 和 GT 分别进行 Box－Behnken 试验设计。对于 PT,显著性参数粘结键法向刚度、粘结键切向刚度和切向极限应力的 Box－Behnken 试验设计与结果如表 11 所示。

表 11 Box－Behnken 试验设计与结果 (PT)
Tab.11 Box－Behnken experimental design and results (PT)

序号	因素			PT 硬 度/kPa
	$x_5/(N\cdot m^{-3})$	$x_6/(N\cdot m^{-3})$	x_8/Pa	
1	1×10^7	1×10^7	3×10^5	153.08
2	5×10^7	1×10^7	3×10^5	319.75
3	1×10^7	5×10^7	3×10^5	173.04
4	5×10^7	5×10^7	3×10^5	250.11
5	1×10^7	3×10^7	1×10^5	162.63
6	5×10^7	3×10^7	1×10^5	200.85
7	1×10^7	3×10^7	5×10^5	162.63
8	5×10^7	3×10^7	5×10^5	451.17
9	3×10^7	1×10^7	1×10^5	226.33
10	3×10^7	5×10^7	1×10^5	244.80
11	3×10^7	1×10^7	5×10^5	272.82
12	3×10^7	5×10^7	5×10^5	398.94
13	3×10^7	3×10^7	3×10^5	258.60
14	3×10^7	3×10^7	3×10^5	313.16
15	3×10^7	3×10^7	3×10^5	285.99
16	3×10^7	3×10^7	3×10^5	276.43
17	3×10^7	3×10^7	3×10^5	290.23

根据试验结果,采用 Design-Expert 软件对其进行回归拟合,建立以 PT 硬度 Y_1 为响应值,以 X_5 、 X_6 、 X_8 为变量的二次回归模型,其二次回归方程为

$$Y_1=284.88+71.31X_5+11.86X_6+56.37X_8-22.4X_5X_6+62.58X_5X_8+26.91X_6X_8-51.15X_5^2-9.75X_6^2+10.58X_8^2$$

(12)

对 PT 的 Box－Behnken 试验设计与结果进行方差分析和显著性检验,结果如表 12 所示。在该模型分析中,模型 $P(0.0028)$ 小于 0.01,说明模型极显著,同时失拟项 $P(0.0786)$ 大于 0.05,差异不显著,说明该模型在回归区域内具有较好拟合性。粘结键法向刚度(X_5)、切向极限应力(X_8)和交互作用项 X_5X_8 对 PT 硬度具有极显著影响($P<0.01$),二次项 X_5^2 对 PT 硬度具有显著影响($P<0.05$),粘结键切向刚度(X_6)、交互作用项 X_5X_6 、 X_6X_8 和二次项 X_6^2 、 X_8^2 影响均不显著($P>0.05$)。由 F 可知,3 因素对 PT 硬度影响程度由大到小为粘结键法向刚度、切向极限应力、粘结键切向刚度。

对于 GT,显著性参数粘结键法向刚度、粘结键

表 12 Box－Behnken 试验方差分析 (PT)

Tab.12 Box－Behnken test ANOVA (PT)

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	11 075.99	9	99 683.87	10.37	0.002 8**
X_5	40 682.12	1	40 682.12	38.07	0.000 5**
X_6	1 125.86	1	1 125.86	1.05	0.338 8
X_8	25 420.1	1	25 420.1	23.79	0.001 8**
X_5X_6	2 006.89	1	2 006.89	1.88	0.212 9
X_5X_8	15 664.83	1	15 664.83	14.66	0.006 5**
X_6X_8	2 896.77	1	2 896.77	2.71	0.143 6
X_5^2	11 014.59	1	11 014.59	10.31	0.014 8*
X_6^2	399.87	1	399.87	0.374 2	0.56
X_8^2	471.66	1	471.66	0.441 4	0.527 7
残差	1 068.48	7	7 479.35		
失拟项	1 962.48	3	5 887.45	4.93	0.078 6
纯误差	397.97	4	12.57		
总和		16	107 200		

注：* 表示显著 ($P<0.05$),下同。

切向刚度和法向极限应力 Box－Behnken 试验设计与结果如表 13 所示。

表 13 Box－Behnken 试验设计与结果 (GT)

Tab.13 Box－Behnken experimental design and results (GT)

序号	因素			GT 硬 度/kPa
	$x_5/(N\cdot m^{-3})$	$x_6/(N\cdot m^{-3})$	x_7/Pa	
1	3×10^7	3×10^7	5×10^5	307.64
2	7×10^7	3×10^7	5×10^5	451.17
3	3×10^7	7×10^7	5×10^5	276.65
4	7×10^7	7×10^7	5×10^5	533.97
5	3×10^7	5×10^7	3×10^5	315.71
6	7×10^7	5×10^7	3×10^5	461.78
7	3×10^7	5×10^7	7×10^5	218.05
8	7×10^7	5×10^7	7×10^5	461.78
9	5×10^7	3×10^7	3×10^5	373.04
10	5×10^7	7×10^7	3×10^5	292.36
11	5×10^7	3×10^7	7×10^5	373.04
12	5×10^7	7×10^7	7×10^5	326.33
13	5×10^7	5×10^7	5×10^5	452.65
14	5×10^7	5×10^7	5×10^5	402.76
15	5×10^7	5×10^7	5×10^5	366.45
16	5×10^7	5×10^7	5×10^5	435.67
17	5×10^7	5×10^7	5×10^5	412.10

根据试验结果,采用 Design-Expert 软件对其进行回归拟合,建立以 GT 硬度 Y_2 为响应值,以 X_5 、 X_6 、 X_7 为变量的二次回归模型,其二次回归方程为

$$Y_2=413.93+98.83X_5-9.45X_6-7.96X_7+28.45X_5X_6+24.42X_5X_7+8.49X_6X_7+0.7856X_5^2-22.36X_6^2-50.38X_7^2$$

(13)

对 GT 的 Box－Behnken 试验设计与结果进行方

差分析和显著性检验,结果如表 14 所示。在该模型分析中,模型 $P(0.008)$ 小于 0.01,说明模型极显著,同时失拟项 $P(0.2714)$ 大于 0.05,差异不显著,说明该模型在回归区域内具有较好拟合性。粘结键法向刚度 (X_5) 对 GT 硬度具有极显著影响 ($P < 0.01$),二次项 X_7^2 对 GT 硬度具有显著影响 ($P < 0.05$),其他项影响均不显著 ($P > 0.05$)。由 F 值可知,3 因素对 GT 硬度影响由大到小为粘结键法向刚度、粘结键切向刚度、法向极限应力。

表 14 Box – Behnken 试验方差分析 (GT)
Tab.14 Box – Behnken test ANOVA (GT)

方差来源	均方	自由度	平方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	10 960.88	9	98 647.89	7.27	0.008 **
X_5	78 142.54	1	78 142.54	51.85	0.000 2 **
X_6	714.12	1	714.12	0.473 9	0.513 4
X_7	507.12	1	507.12	0.336 5	0.58
X_5X_6	3 237.63	1	3 237.63	2.15	0.186 1
X_5X_7	2 384.59	1	2 384.59	1.58	0.248 8
X_6X_7	288.49	1	288.49	0.191 4	0.674 9
X_5^2	2.6	1	2.6	0.001 7	0.968
X_6^2	2 104.51	1	2 104.51	1.4	0.275 9
X_7^2	10 687.84	1	10 687.84	7.09	0.032 3 *
残差	1 507.02	7	10 549.14		
失拟项	2 064.99	3	6 194.98	1.9	0.271 4
纯误差	1 088.54	4	4 354.16		
总和		16	109 200		

2.2.4 回归模型交互响应

根据 Box – Behnken 试验方差分析结果,应用 Design-Expert 软件分别对 2 种模型不同因素之间交互作用进行分析,得出各因素之间响应曲面。图 9 为交互因素 x_5 (粘结键法向刚度)、 x_8 (切向极限应力)对 PT 硬度的响应面和等高线图,当 x_6 (粘结键切向刚度)固定为 $1.46 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 时,PT 硬度随粘结键法向刚度和切向极限应力的增大而有增大的趋势。图 10 为交互因素 x_5 (粘结键法向刚度)、 x_6 (粘结键切向刚度)对 GT 硬度的响应面和等高线图,当 x_7 (法向极限应力)固定为 $4.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,GT 硬度随粘结键法向刚度和粘结键切向刚度的增大均有增大的趋势。

由此可知,粘结键法向刚度、粘结键切向刚度和切向极限应力对 PT 硬度的影响较大,粘结键法向刚度、粘结键切向刚度和法向极限应力对 GT 硬度的影响较大,且粘结键法向刚度是 PT 硬度、GT 硬度的主要影响因素。该结论与方差分析结果一致。

3 最优参数求解及试验验证

3.1 PT 和 GT 硬度最优参数模型验证

应用 Design-Expert 13 软件,将 PT 硬度 316 kPa

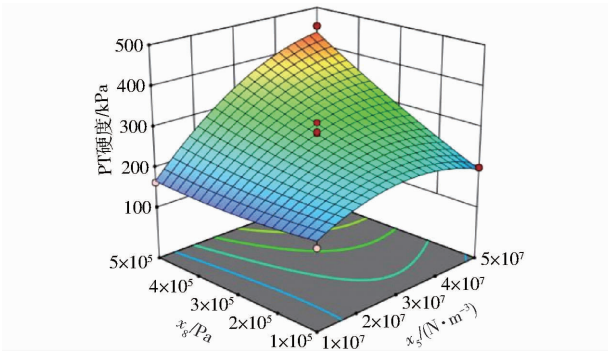


图 9 交互因素对 PT 硬度的响应面图 ($x_6 = 1.46 \times 10^7 \text{ N/m}^3$)

Fig.9 Surface diagram of response of interactive factors to PT hardness ($x_6 = 1.46 \times 10^7 \text{ N/m}^3$)

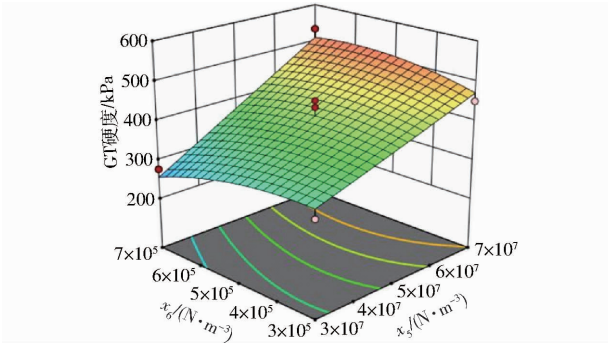


图 10 交互因素对 GT 硬度的响应面图 ($x_7 = 4.52 \times 10^5 \text{ Pa}$)

Fig.10 Surface diagram of the response of interactive factors to GT hardness ($x_7 = 4.52 \times 10^5 \text{ Pa}$)

和 GT 硬度 422 kPa 代入回归方程,分别对回归模型进行所对应目标的优化求解,获得 PT 硬度和 GT 硬度最优标定参数组合。PT 最优解组合为:粘结键法向刚度 $4.37 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结键切向刚度 $1.46 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、切向极限应力 $3.24 \times 10^5 \text{ Pa}$;GT 最优解组合为:粘结键法向刚度 $5.19 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结键切向刚度 $4.25 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、法向极限应力 $4.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

用最优参数组合进行仿真,结果如表 15 所示,GT 的硬度明显高于 PT,其仿真值和实测值相对于 PT 分别增加 31.05% 和 33.54%,这均证明了玉米田耕层两类土壤之间力学特性的差异性。所标定的两种土壤硬度仿真值和实测值之间的相对误差均低于 10%,证明仿真土壤的力学特性与实际土壤基本一致。仿真过程中 PT 和 GT 硬度随时间的变化

表 15 PT 和 GT 硬度试验的参数最优解验证
Tab.15 Verification of optimal solution of parameters for PT and GT hardness tests

土壤类型	仿真/kPa	实测/kPa	相对误差/%
PT	332.34	316	5.17
GT	435.53	422	3.21
相对增量/%	31.05	33.54	

过程如图 11 所示。硬度初始为 0,随着圆锥体入土深度的增加,其土壤硬度均显著增加,直至圆锥体全部进入土中达到最大土壤硬度。这与圆锥体周边土壤离散元模型中粘结键的受力变化过程一致,如图 12 所示。在圆锥体未入土时,粘结键受力几乎为 0,如图 12a 所示;在圆锥体入土后,粘结键受力显著增加,入土越深,粘结键受力越大并开始断裂,如图 12b 所示;在圆锥体全部入土时,粘结键断裂数量达到最大,对应最大土壤硬度,如图 12c 所示。

3.2 土壤直剪验证试验

为进一步确定玉米田耕层典型土壤中 PT 和 GT 的

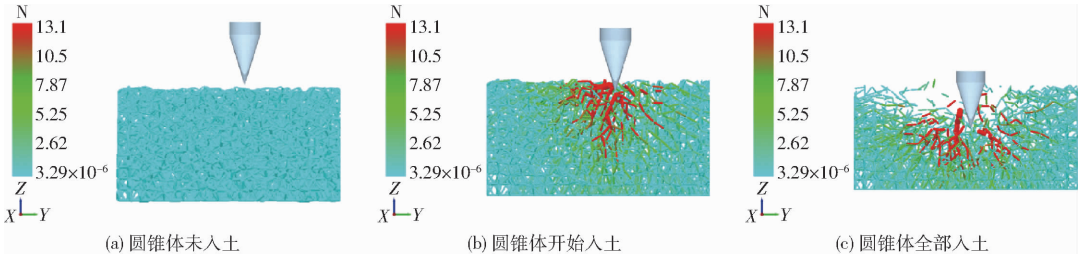


图 12 土壤粘结键受力变化过程

Fig. 12 Process of force change of soil bonds

最优参数组合的准确性,采用土壤直剪试验进行验证。在仿真试验中用上压板垂直向下移动到预定位置模拟对土壤施加垂直载荷 100 kPa,土壤直剪仿真试验如图 13 所示。

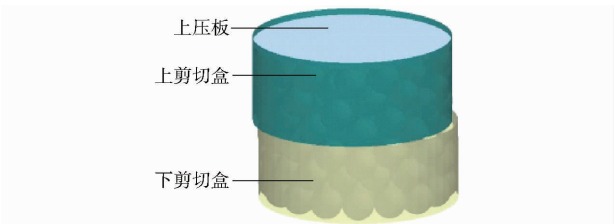


图 13 土壤直剪仿真试验

Fig. 13 Soil direct shear simulation test

得到直剪试验结果如表 16 所示,PT 和 GT 的实测和仿真最大剪应力相对误差均在 10% 以内,且 GT 实测和仿真的剪应力分别比 PT 增加 30.54% 和 23.59%,证明仿真土壤的力学特性与实际土壤基本一致。

表 16 PT 和 GT 直剪试验结果			
Tab. 16 PT and GT direct shear test results			
土壤类型	仿真/kPa	实测/kPa	相对误差/%
PT	153.00	139.64	8.73
GT	188.63	182.30	3.36
相对增量/%	23.29	30.54	

土壤直剪试验的实测和仿真剪应力-位移曲线如图 14 所示。由图 14 可知,两种土壤的仿真和实测除了最大剪应力误差较小外,其剪应力随位移的变化过程也几乎一致,这再次证明土壤模型建立的

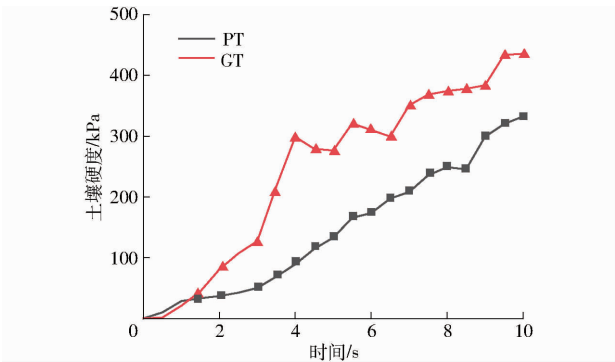


图 11 土壤硬度变化过程

Fig. 11 Soil hardness change process

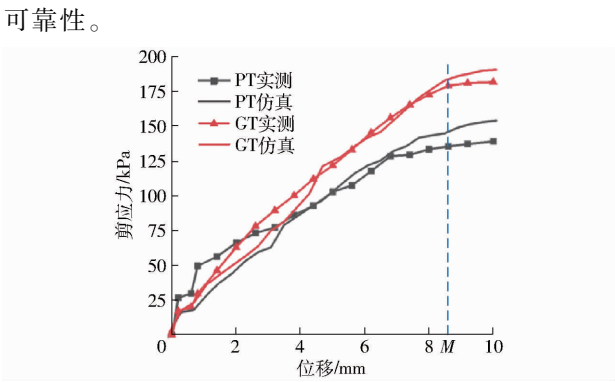


图 14 直剪试验的实测和仿真剪应力-位移曲线

Fig. 14 Measured and simulated shear stress – displacement curves for direct shear test

直剪仿真中土壤模型粘结键断裂数量-位移曲线如图 15 所示。图 15 中位移为 0 时是剪切前的初始状态,此时剪切盒内土壤受到上压板对其施加

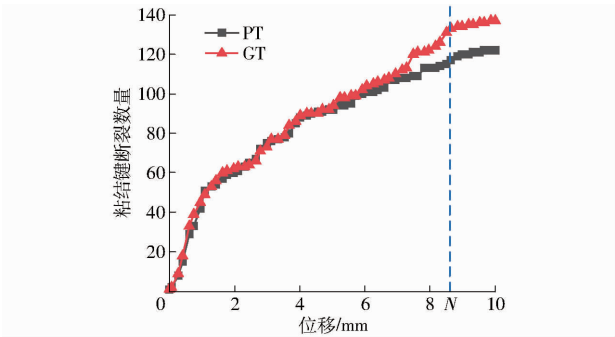


图 15 直剪仿真中土壤粘结键断裂数量-位移曲线

Fig. 15 Number – displacement curves of soil bond breaks in direct shear simulation

100 kPa 的垂直载荷, 粘结键受力较小、几乎无断裂, 对应图 14 中位移为 0 时; 图 15 中剪切盒位移 0 ~ N 之间为剪切过程中的状态, 下剪切盒开始移动, 粘结键断裂数量显著增加, 剪应力逐渐增大, 对应图 14 中 0 ~ M 阶段; 图 15 中 N 右侧阶段为在剪切盒快达到最大位移时, 剪切面附近的粘结键断裂数量接近最大值, 剪应力也随粘结键断裂数量的增加而逐渐趋向于最大值, 对应图 14 中 M 右侧阶段。

4 结论

(1) 基于离散元 EDEM 软件, 选取 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型对玉米田土壤进行模型参数标定及优化, 采用中心组合试验设计方法, 以土壤堆积角为目标值, 进行四因素五水平仿真试验, 得到 PT 最优解组合为: 土-土静摩擦因数 0.64、土-土动摩擦因数 0.19、土-钢静摩擦因数 0.57、土-钢动摩擦因数 0.21; GT 最优解组合为: 土-土静摩擦因数 0.82、土-土动摩擦因数 0.21、土-钢静摩擦因数 0.84、土-钢动摩擦因数 0.26。PT 堆积角仿真结果为 32.30° , 与实测堆积角 34.75° 的相对误差为 7.05%; GT 堆积角仿真结果为 41.25° , 与实测堆积

角 42.40° 的相对误差为 2.71%, 仿真试验与实测结果基本一致。

(2) 以土壤硬度为目标值, 通过 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验与 Box - Behnken 试验对两种土壤的 bonding 接触模型参数进行了标定及优化。PT 最优解组合为: 粘结键法向刚度 $4.37 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结键切向刚度 $1.46 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、切向极限应力 $3.24 \times 10^5 \text{ Pa}$; GT 最优解组合为: 粘结键法向刚度 $5.19 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结键切向刚度 $4.25 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、法向极限应力 $4.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。使用最佳参数进行仿真验证, 得出 PT 仿真硬度 332.34 kPa 与实测硬度 316.00 kPa 的相对误差为 5.17%, GT 仿真硬度 435.53 kPa 与实测硬度 422.00 kPa 的相对误差为 3.21%, 验证了标定参数的可靠性。

(3) 根据标定优化参数建立了两种土槽的离散元模型, 用直剪试验对两种土壤分别进行验证试验, 结果表明, 所标定的两种土壤仿真值和实测值之间的相对误差均低于 10%, 且仿真土壤与实际土壤直剪受力状态变化趋势基本一致, 标定的两种土壤可用于构建玉米田耕层典型土壤的离散元模型。

参 考 文 献

- [1] 何进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. (in Chinese)
- [2] JOASH B A, MAROLO A, YING C, et al. Calibration of discrete element parameters of crop residues and their interfaces with soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106349.
- [3] 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)
- [4] FIAZ A, DING Weimin, DING Qishuo, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil[J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0119648.
- [5] 周华, 李栋, 刘政源, 等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69 - 77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69 - 77. (in Chinese)
- [6] 张智泓, 陈朝阳, 赖庆辉, 等. 仿生布利冈结构农机耐磨触土部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 28 - 37.
ZHANG Zhihong, CHEN Zhaoyang, LAI Qinghui, et al. Design and experiments of the Bouligand structure inspired bionic wear resistant soil-engaging component for the agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 28 - 37. (in Chinese)
- [7] 杨庆璐, 陈桂斌, 谢立娟, 等. 伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 35 - 43.
YANG Qinglu, CHEN Guibin, XIE Lijuan, et al. Design and experiment of telescopic finger stalk of maize straw burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 35 - 43. (in Chinese)
- [8] 贾洪雷, 刘行, 余海波, 等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 68 - 77.
JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on stubble clearance mechanism with concave claw-type for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 68 - 77. (in Chinese)
- [9] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 69 - 77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of maize and simulation

- calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 69 – 77. (in Chinese)
- [10] 谢伟, 彭磊, 蒋赧, 等. 收获期油菜茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112 – 120.
XIE Wei, PENG Lei, JIANG Pin, et al. Discrete element model building and optimizing of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112 – 120. (in Chinese)
- [11] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 146 – 155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 146 – 155. (in Chinese)
- [12] 刘磊, 杜岳峰, 栗晓宇, 等. 基于离散元法的种子玉米剥皮过程籽粒损失分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 28 – 38.
LIU Lei, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Analysis and experiment on kernel loss of seed maize during peeling based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 28 – 38. (in Chinese)
- [13] 宋占华, 李浩, 闫银发, 等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 21 – 33.
SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 21 – 33. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 王宪良, 钟晓康, 耿元乐, 等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 100 – 107.
WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 100 – 107. (in Chinese)
- [16] ZHANG S L, ZHAO H B, WANG X Z, et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107519.
- [17] 刘伟, 汪权明. 土力学试验指导[M]. 北京: 化学出版社, 2020: 14 – 16.
- [18] 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)
- [19] 林恒鑫, 王琪, 廖鹏, 等. 植烟土壤土与触土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 196 – 203.
LIN Hengchu, WANG Qi, LIAO Peng, et al. Discrete element simulation parameter calibration for the interaction between vegetated sandy loam soil and soil-touching components[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 196 – 203. (in Chinese)
- [20] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 49 – 56, 77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49 – 56, 77. (in Chinese)
- [21] 杜俊, 张文良, 祝英豪, 等. 基于离散元法的旋耕刀辊功率分配特性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(6): 1031 – 1037.
DU Jun, ZHANG Wenliang, ZHU Yinghao, et al. Study on the characteristic of power distribution of rotary tillage by discrete element method[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(6): 1031 – 1037. (in Chinese)
- [22] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124 – 136.
WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124 – 136. (in Chinese)
- [23] 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 CSAE, 2018, 34(18): 113 – 121. (in Chinese)

different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1) : 227 – 235. (in Chinese)

[19] 廖宜涛,王在腾,廖庆喜,等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (增刊 1) : 236 – 243.
LIAO Yitao, WANG Zaiteng, LIAO Qingxi, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1) : 236 – 243. (in Chinese)

[20] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (6) : 73 – 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (6) : 73 – 82. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 曹成茂,向旺,罗坤,等. 抛推组合式前胡草土分离除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54 (3) : 106 – 114.
CAO Chengmao, XIANG Wang, LUO Kun, et al. Design and experiment of *Rodix peucedani* weeding machine separating weeds and soil with combination of throwing and pushing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (3) : 106 – 114. (in Chinese)

[23] 邢欢欢. 基于离散单元法的机械式挖掘机工作阻力模拟[D]. 沈阳:东北大学, 2014: 10 – 13.
XING Huanhuan. Simulation of mechanical excavator working resistance based on discrete unit method [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 10 – 13. (in Chinese)

[24] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003: 22 – 23.

[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.

[26] 陈威,曹成茂,张远,等. 太子参联合收获机挖掘铲的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56 (4) : 178 – 184, 194.
CHEN Wei, CAO Chengmao, ZHANG Yuan, et al. Design and test of digging shovel of *Pseudostellaria heterophylla* combined harvesting machine[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56 (4) : 178 – 184, 194. (in Chinese)

(上接第 60 页)

[24] 贺一鸣,向伟,吴明亮,等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的标定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44 (2) : 216 – 220.
HE Yiming, XIANG Wei, WU Mingliang, et al. Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44 (2) : 216 – 220. (in Chinese)

[25] 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 CSAE, 2019, 35 (6) : 130 – 140. (in Chinese)

[26] 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)

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

[28] HANG C G, GAO X J, YUAN M C, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168 : 73 – 82.

[29] 刘坤宇,苏宏杰,李飞宇,等. 基于响应曲面法的土壤离散元模型的参数标定研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42 (9) : 143 – 149.
LIU Kunyu, SU Hongjie, LI Feiyu, et al. Research on parameter calibration of soil discrete element model based on response surface method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42 (9) : 143 – 149. (in Chinese)