doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.008

基于单轴密闭压缩试验的草炭离散元参数标定

王斌斌[1]　何　智[1,2]　丁辛亭[1,2]　郝　伟[1,2]　杨　珍[1]　崔永杰[1,2]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了提升穴盘播种过程中草炭装盘、压穴、覆料的仿真准确性,基于草炭的物料特性,选择 Edinburgh Elasto - Plastic Adhesion(EEPA)模型在 EDEM 软件中建立草炭离散元仿真模型,通过单轴密闭压缩和虚拟仿真试验对草炭参数进行标定。通过物理试验测得草炭密度、粒径分布和接触参数,应用 Plackett - Burman Design 和最陡爬坡试验设计显著性分析试验,发现草炭间恢复系数、静摩擦因数、草炭切向刚度因子和剪切模量影响显著。应用 Central Composite Design 试验建立响应值与 4 个显著性参数的二次多项式回归模型,以单轴密闭压缩 20%、50% 轴向应变对应的轴向压力 3.83、91.45 N 为目标值对显著性参数进行寻优,得到最优组合为:草炭间恢复系数 0.202、草炭间静摩擦因数 0.595、切向刚度因子 0.667、草炭剪切模量 0.613 MPa。最后将该参数组合下的仿真值与实测值进行对比验证,在轴向应变范围 20% ~50% 内实测值与仿真值的平均误差约为 8.08%。相对误差在轴向应变 40% 左右达到最大值,为 15.34%。结果表明基于响应面法标定的 EEPA 模型参数可用于离散元仿真研究。

关键词: 草炭; 单轴密闭压缩; 离散元; 轴向压力; 参数标定

中图分类号: S565.9; TP181　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)05-0087-11　　**OSID**:

Calibration of Peat Discrete Element Parameters Based on Uniaxial Closed Compression Test

WANG Binbin[1]　HE Zhi[1,2]　DING Xinting[1,2]　HAO Wei[1,2]　YANG Zhen[1]　CUI Yongjie[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To enhance the accuracy of simulating charcoal loading, hole pressing, and overlaying in the hole tray seeding process, based on the material properties of charcoal, the Edinburgh Elasto - Plastic Adhesion (EEPA) model was selected to establish a discrete element simulation model of charcoal in EDEM software. The peat parameters were calibrated through shaft-closed compression and virtual simulation tests, while the density, particle size distribution, and contact parameters of peat were measured through physical experiments. Significance analysis experiments were designed by using Plackett - Burman Design and the steepest climbing test to determine the restitution coefficient, static friction coefficient, tangential stiffness factor, and shear of peat, with modulus having a significant effect. A quadratic polynomial regression model was established between the response value and four significant parameters using the central composite design test. The axial pressures of 3.83 N and 91.45 N corresponding to the uniaxial closed compression of 20% and 50% axial strain were used as target values for testing the significant parameters. After optimization, the optimal combination was determined to be a recovery coefficient of 0.202 between peat plants, a static friction coefficient of 0.595 between peat plants, a tangential stiffness factor of 0.667, and a peat shear modulus of 0.613 MPa. Finally, the simulated values and the measured values under this parameter combination were compared and verified. The average error between the measured values and the simulated values in the axial strain range of 20% to 50% was approximately 8.08%, with the relative error reaching the maximum value of 15.34% at about 40% of axial strain. These results demonstrated that the EEPA model parameters calibrated based on the response surface method can be used for discrete element simulation research.

Key words: peat; uniaxial closed compression; discrete element method; axial pressure; parameter calibration

收稿日期: 2023-09-07　修回日期: 2023-10-23

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY02-04)

作者简介: 王斌斌(1998—),男,硕士生,主要从事设施农业装备设计与自动化研究,E-mail: wbb2323826881@163.com

通信作者: 崔永杰(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事果蔬生产自动化研究,E-mail: agriculturalrobot@nwafu.edu.cn

0 引言

草炭又称泥炭,含有古代埋藏在地下未完全腐烂分解的植物体以及丰富的有机质,是无土栽培主要应用基质[1];选择合适的草炭有利于促进植物根系养分、水分以及空气供应,是培育壮苗、缩短育苗时间的保障[2]。草炭包括砂粒、粉粒、球体、腐殖质-黏粒团聚体及植物纤维残体,其中纤维含量为 12.0% ~ 15.0%[3-4]。草炭参数标定,有助于离散元法在草炭覆料研究中的应用,提高育苗基质草炭部分覆料进程的仿真准确性。

离散元法(Discrete element method,DEM)是一种能准确描述物质颗粒流动不连续性质的数值模拟方法[5],能够揭示内在作用机制,缩短研究周期。刘凡一等[6]利用 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型,以休止角为响应值,标定了小麦间的摩擦因数和小麦-有机板间的静摩擦因数。UCGUL 等[7]将线性黏附内聚模型整合到线性 Hysteretic Spring 模型,获得与实际休止角相近的土壤静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数。JIANG 等[8]采用 API 建模方法在 EDEM 中建立烟条的颗粒模型,以休止角为响应值,标定了烟条间的摩擦因数。丁辛亭等[9]以休止角为响应值,对比响应面和机器学习对显著性参数的优化效果,获取油茶籽的离散元仿真模型接触参数。袁全春等[10]选择 Hertz - Mindlin with Johnson - Kendall - Roberts 接触模型,以堆积角为响应值,标定有机肥的摩擦因数与表面能 JKR。上述研究在标定无黏性、自由流动的颗粒时,通常使用单个响应值(如休止角)作为标定的参考,但单一的休止角响应可能导致多个可行的参数组合,标定结果可靠性差[11],且大多只标定了摩擦因数与恢复系数。其次,以堆积角作为响应值进行的参数标定,离散元仿真模型需要高度的理想化,难以具体且不能考虑颗粒在运动或受外部动力影响时的行为。因此,DEM 接触参数的准确标定仍然是再现研究对象实际物理特性的关键因素。

大量随机的草炭湿颗粒随机排列堆积在一起,由于压缩程度的不同,表现出不同程度的弹性、塑性、黏性效应。HORABIK 等[12]与 ZHAO 等[13]基于秸秆的物料特性提出 Linear Spring 和 Hertz - Mindlin 接触模型,但这些模型只能描述变形范围内的弹性行为。XIA 等[14]根据煤矿的黏性物料特性,使用 Johnson - Kendall - Roberts(JKR)模型标定对休止角敏感的 DEM 参数,但 JKR 接触模型不能准确描述物料的塑性特性。LEBLICQ 等[15]基于 DEMeter + + 软件提出非线性接触模型表征茎秆之间的塑性特性,但不能表征不同压缩程度的茎秆黏性效应。THAKUR 等[16]提出 Edinburgh Elasto - Plastic Adhesion(EEPA)接触模型,EEPA 模型在 Hertz 接触理论的基础上,延伸包含了颗粒接触模型的弹塑性和黏性。JANDA 等[17]验证了 EEPA 模型可适用于模拟具有黏性、塑性的土壤粉末。ZHANG 等[18]基于 EEPA 模型标定了秸秆的接触参数,验证了 EEPA 模型可应用于茎秆类物料,但目前对该模型应用于草炭的参数标定鲜有报道。DING 等[19]将草炭视为单一球形土壤模型来建立离散元仿真模型。

本文以草炭为研究对象,以 EDEM 为离散元仿真工具,选择非线性弹塑性模型(EEPA)作为草炭的接触模型,以草炭单轴密闭压缩的 20%、50% 轴向应变对应的轴向压力 F_{20}、F_{50} 为响应值,通过 Plackett - Burman Design(PBD)、最陡爬坡和 Central Composite Design(CCD)试验对草炭接触模型参数进行标定,旨在获得最优的显著性参数组合。同时,提供一种可行的草炭建模方法来提高参数标定精度。

1 草炭仿真参数标定

1.1 试验材料

1.1.1 试验材料及其本征参数

本研究所用草炭产自山东芯喜乐生物科技有限公司。采用基于改进阿基米德原理的排水法测量草炭密度。将质量为 M 的草炭缓慢放入 100 mL 量筒内,分别加入 30、40、50 mL 水,标记水的体积为 V_1。为了防止加水后草炭向上漂浮,将100 g 砝码缓慢放入量筒内,放置于草炭上方测得总体积为 V,采用同样的方法测得砝码的体积为 V_W。草炭密度 ρ_1 计算公式为

$$\rho_1 = \frac{M}{V - V_W - V_1} \tag{1}$$

进行 6 次试验,根据测量结果计算得草炭密度为(0.724 ± 0.085) g/cm^3。

采用奥豪斯 MB23 型水分快速分析仪测量草炭含水率,通过 5 次试验测得含水率为 38.80% ~ 43.40%,满足国标要求[20]。

采用振动筛分法[21]对草炭颗粒度进行分析,振筛机激振力 1 kN,振幅小于等于 5 mm,使用 SFJ - 200 型不同孔径的标准检验筛随机筛选 200 g 草炭,得到草炭纤维与草炭颗粒,其中草炭纤维长度 15 ~ 50 mm,占比 16.98%,草炭颗粒粒径分布 0 ~ 2 mm、2 ~ 4 mm、4 ~ 6 mm、大于 6 mm,分别占比 13.560%、42.084%、21.840%、5.536%,其形状主要有球体、

类球体、粉末状(图 1)。在离散元仿真建模中,颗粒如何建模将很大程度上影响仿真结果的精确性与仿真效率。因此,当涉及大量颗粒作业即生成颗粒数量非常多时,无法建立与实际颗粒结构尺寸完全一样的模型,若采用任意形状的颗粒进行建模仿真,将会成倍地增加计算仿真时间[22-23]。本文设置用类球形代替实际草炭颗粒,草炭纤维用 Bonding 键联结。通过振动筛分试验得到草炭颗粒尺寸 0 ~ 6 mm 约占 90%。草炭颗粒绝大部分是粉末状,参考土壤颗粒泊松比测量方法,采用直剪试验得到草炭内摩擦角为 17.76°,根据经验公式

$$\nu_1 = \frac{K_0}{1 + K_0} \tag{2}$$

其中

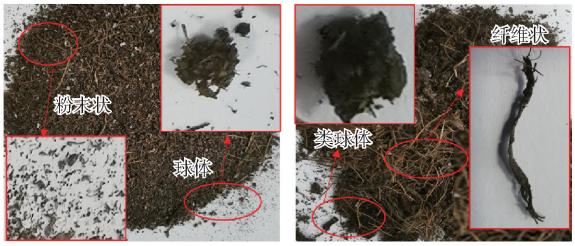
$$K_0 = 1 - \sin\theta \tag{3}$$

式中　ν_1——草炭泊松比

K_0——侧压力系数

θ——内摩擦角

通过计算得到试验草炭样品泊松比为 0.41[24]。



(a) 球体、粉末状　　(b) 类球体、纤维状

图 1　草炭形状分类图

Fig. 1　Charcoal shape particle size classification charts

1.1.2　接触参数测定

(1)草炭-尼龙板间静摩擦因数

参考文献[25],采用斜面法测定草炭-尼龙板间的静摩擦因数,搭建如图 2 所示的试验平台。选用 6 组 0 ~ 2 mm、2 ~ 4 mm、4 ~ 6 mm 草炭颗粒,为了保证草炭颗粒在斜面上滑动而非滚动,每组采用 4 个质量近似相等的草炭颗粒,在同一平面上将其粘结在一起,将组合颗粒放置于尼龙板上,尼龙板初始角度为 0°,缓慢转动旋转轮直至草炭开始有下滑趋势时停止转动,此时倾角仪(深圳维特智能科技有限公司,WT901C - WIFI 型)显示值为 θ_1。每组草炭进行 3 次试验,共进行 18 次试验。

通过 $\mu = \tan\theta_1$ 计算得到草炭-尼龙板间的静摩擦因数 μ 为 0.526 ± 0.051。

(2)草炭-尼龙板间滚动摩擦因数

参考文献[26],采用斜板滚动法与仿真试验相结合的方法来测定草炭-尼龙板间的滚动摩擦因数,搭建图 3b 所示的滚动摩擦试验平台,选用 6 组 0 ~ 2 mm、2 ~ 4 mm、4 ~ 6 mm 草炭,静置于高度为 H 的

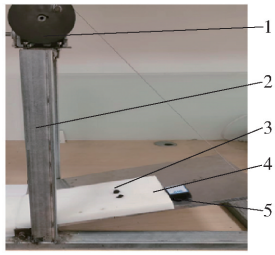
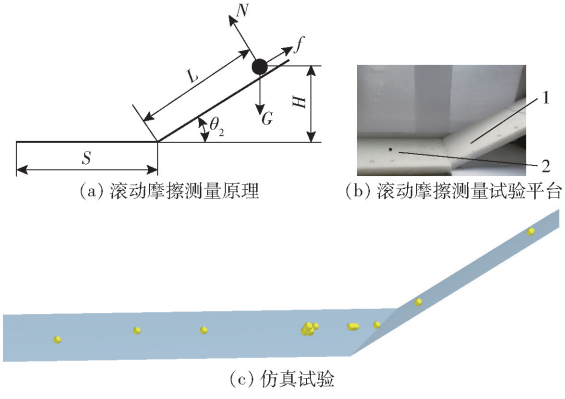


图 2　静摩擦因数测量

Fig. 2　Static friction factor measurement

1. 旋转轮　2. 机架　3. 草炭　4. 尼龙板　5. 倾角仪

倾斜尼龙板上,记录此时的倾角仪数值,使草炭颗粒自由滚动至停止,水平滚动距离为 S,每组草炭进行 3 次试验,共进行 18 次试验。



(a) 滚动摩擦测量原理　　(b) 滚动摩擦测量试验平台

(c) 仿真试验

图 3　滚动摩擦因数测量

Fig. 3　Rolling friction factor measurement

1. 尼龙板　2. 草炭

由于草炭颗粒多为非规则形体,当倾角 θ_2 与斜面滚动距离 L 较大时,会导致草炭颗粒在滚动过程中发生弹跳,影响试验结果准确性,当倾角 θ_2 与 L 较小时,草炭颗粒滚动距离较小,不利于试验测量,因此经大量预试验调整,设定倾角为 30°,斜面滚动距离 L 为 185 mm。假设草炭在纯滚动过程中只受到滚动摩擦力影响,则通过能量守恒定律可得

$$GH = \mu_f G(L\cos\theta_2 + S) \tag{4}$$

式中　μ_f——草炭-尼龙板间滚动摩擦因数

G——草炭重力,N

仿真试验以滚动摩擦因数为因素,水平滚动距离 S 为指标进行单因素仿真试验(图 3c),在 EDEM 中设置已标定的静摩擦因数、参考碰撞恢复系数[20],其余接触参数设为 0,滚动摩擦因数设置为 0.2 ~ 0.4,水平间隔为 0.1,将试验结果导入 Origin 绘制成散点图,并拟合曲线(图 4)。拟合方程为

$$S = 2\,677.23\mu_f^2 - 2\,386.71\mu_f + 563.34 \tag{5}$$

将实际测试的水平滚动距离代入式(5),计算得到草炭-尼龙板间的滚动摩擦因数 μ_f 为 0.272 ± 0.012,将其代入 EDEM 进行验证,得到仿真水平滚动距离为 108.443 mm,与实际水平滚动距离均值

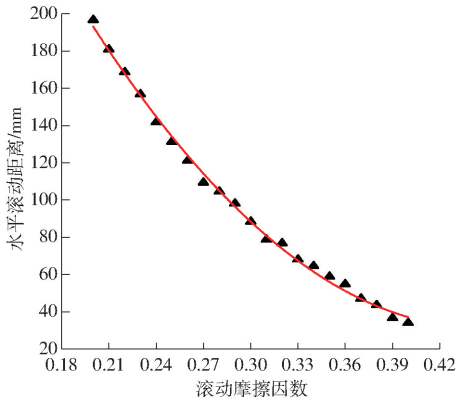


图 4 滚动摩擦因数与水平滚动距离拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of rolling friction coefficient and horizontal rolling distance

111.583 mm 相对误差为 2.896%，小于 5%，误差较小。

1.2 单轴密闭压缩物理试验

草炭轴向压力随时间变化的曲线通过单轴密闭压缩试验来获得[27]。用于单轴密闭压缩试验的圆筒，由两个半径 46 mm、高度 60 mm 的尼龙材质半圆筒通过螺母螺栓连接而成。如图 5 所示，将 25 g 草炭自然注入到圆筒中，使用 DDL10 型万能试验机（长春机械科学研究所有限公司，负载精度 ±5%）以恒定速率 8 mm/s 推动压板向下加载，压板直径 46 mm，最大载荷 10 kN。当加载至固结应力 100 kPa 和 300 kPa 时，以恒定速率 4 mm/s 上升，直至完全卸载。



图 5 单轴密闭压缩试验

Fig. 5 Uniaxial confined compression test

1. 万能试验机 2. 压板 3. 圆筒 4. 支撑板

如图 6 所示，单轴密闭压缩试验分别加载固结应力至 100、300 kPa。草炭轴向压力位移曲线可分为低刚度阶段、准线性阶段、曲线阶段。由于预应变的存在，压缩试验曲线在轴向应变 20% 左右由准线性阶段向曲线阶段过渡，100、300 kPa 试验曲线在轴向应变 50% 左右时开始出现较大差异，将 F_{20}、F_{50} 表示为草炭压缩轴向应变 20%、50% 时的轴向压力。本文仅将 F_{20}、F_{50} 作为草炭离散元参数标定的响应值。

1.3 草炭离散元建模及压缩仿真

根据草炭单轴密闭压缩试验曲线得到草炭属于非线性弹塑性介质，不同程度的单轴压缩对弹塑性

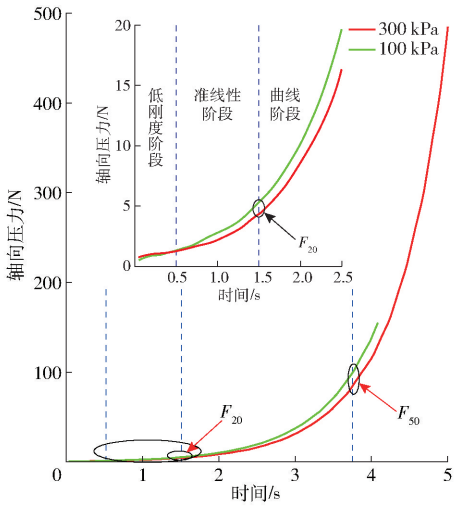


图 6 单轴密闭压缩试验曲线

Fig. 6 Uniaxial confined compression test curves

材料的强度有很大影响，物料孔隙度因固结应力水平的不同而不同，接触模型的选择应能够捕捉物料强度随固结应力水平的变化[17,28]。

EEPA 接触模型用非线性滞后弹簧模型表征弹塑性接触变形，以及作为塑性接触变形函数的粘着力部分[29]。该接触模型能较好地模拟草炭在压缩过程中的弹塑性行为；因此，选择 EEPA 接触模型作为草炭与草炭之间的接触模型。EPPA 颗粒间接触模型在 EDEM 软件应用过程中主要参数包括恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数、恒定初始黏结强度、表面能、接触塑性变形比、加载分支指数、黏结分支指数和切向刚度因子。恒定初始黏结强度恒定存在于颗粒之间，对试验过程影响较小，将恒定初始黏结强度因素不予考虑，大小定义为 0[30]；加载分支指数取为 1 或 1.5，区别于加载分支指数取为 1 时与 Hysteretic Spring 模型加载卸载过程中应力-应变曲线特征相似，本研究加载分支指数取 1.5[31]。

1.3.1 草炭离散元建模

约 90% 草炭颗粒尺寸介于 0 ~ 6 mm，且绝大部分是不规则形状；如图 7 所示，本文将草炭离散元建模按实际试验筛分为草炭颗粒与草炭纤维两部分，草炭颗粒按实际尺寸分为 0 ~ 2 mm、2 ~ 4 mm、4 ~ 6 mm，将大于 6 mm 的颗粒部分归入为 4 ~ 6 mm。各尺寸范围内颗粒随机生成，随机生成颗粒尺寸按实际颗粒形状尺寸设置最大、最小值，其中草炭纤维长度在 15 ~ 50 mm。考虑到草炭纤维建模的准确性，本文设置草炭纤维基准尺寸 32.3 mm，由 9 个长度 3.5 mm 的类球形单元体连接而成，类球形单元体宽 2 mm，采用 Bonding V2 模型连接单元体，随机在基准尺寸 0.5 ~ 1.5 倍范围内生成草炭纤维。Bonding V2 模型能够准确描述草炭的弯曲、扭转和剪切力学性能[18]，其黏结参数[32]如表 1 所示。

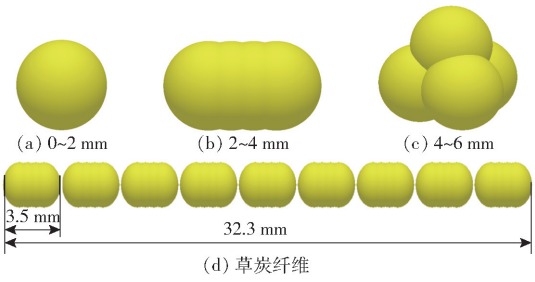


图 7　草炭颗粒模型

Fig. 7　Modeling of substrate charcoal pellets

表 1　Bonding V2 模型参数

Tab. 1　Bonding V2 model parameters

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	4.155 1×10^{9}
单位面积剪切刚度/(N·m^{-3})	8.074 9×10^{8}
法向强度/MPa	10
剪切强度/MPa	1.3
粘结圆盘尺度	1.0

1.3.2　压缩草炭仿真

压缩草炭离散元仿真颗粒与接触部件模型选择 Hertz－Mindlin(no slip)，建立与实际试验一样尺寸的圆筒生成草炭颗粒，草炭密度、草炭-尼龙板间静摩擦因数、草炭-尼龙板间滚动摩擦因数取其实测平均值，仿真参数设置如表 2 所示。

表 2　压缩仿真参数

Tab. 2　Compression simulation parameters

参数	数值
草炭密度 ρ_1/(g·cm^{-3})	0.724
尼龙板密度 ρ_2/(g·cm^{-3})	1.140
草炭-尼龙板间静摩擦因数	0.526
草炭-尼龙板间滚动摩擦因数	0.272
草炭泊松比 ν_1	0.410
尼龙板泊松比 ν_2	0.280
草炭-尼龙板间碰撞恢复系数	0.120
尼龙板剪切模量/MPa	3 200

所有颗粒生成在半径 23 mm、高度 60 mm 的圆筒内，草炭质量与实际试验保持一致，设定生成 25 g 草炭，包括 0～6 mm 草炭颗粒 21 g、草炭纤维 4 g。生成颗粒时间设置 1.8 s，生成颗粒朝竖直方向叠加堆积在一起(图 8a)。颗粒生成以后，在圆筒顶部建立半径 23 mm、厚度 4 mm 的压缩圆板。圆板以恒速 8.00 mm/s 向下压缩，压缩至轴向应变 60% 时停止压缩(图 8b)。

1.4　试验设计与方法

1.4.1　Plackett－Burman Design 试验筛选显著性参数

本文应用 Design-Expert 13 软件进行 PBD 试验设计与分析，以压缩草炭的 20%、50% 轴向应变对应的轴向压力作为响应值。对草炭的接触参数(草炭间恢复系数、草炭间静摩擦因数、草炭间滚动摩擦

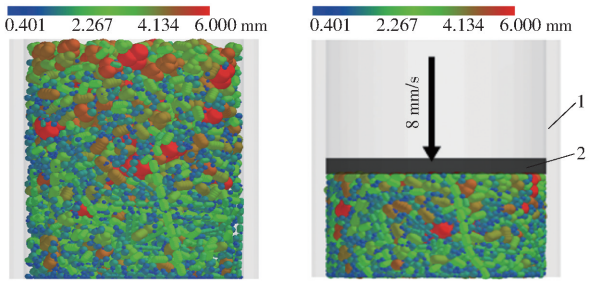


图 8　压缩草炭仿真

Fig. 8　Compressed substrate charcoal simulation

1. 圆筒　2. 压板

因数、草炭-尼龙板间恢复系数)、草炭剪切模量和 EEPA 接触模型参数(表面能、塑性变形比、黏结分支指数、切向刚度因子)进行筛选，筛选出对压缩草炭试验曲线有显著影响的参数。

将仿真规模、草炭堆积密度和堆积角等输入 EDEM 颗粒材料数据库(Generic EDEM material model database，GEMM)获取各参数的大致取值范围。如图 9 所示，在实际堆积角试验中，草炭堆积近

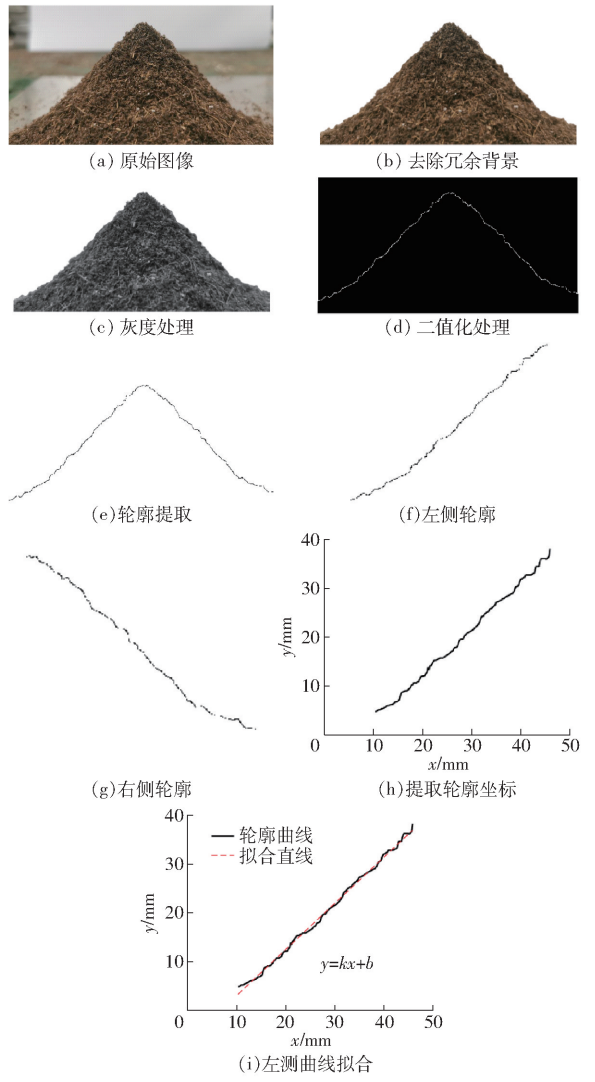


图 9　图像处理测量堆积角

Fig. 9　Image processing to measure stacking angle

似为均匀分布圆锥体(图9a),使用 Matlab 采用图像处理方法测得草炭堆积角,首先去除冗余背景(图9b),对图像进行灰度变化(图9c)与二值化处理(图9d)以便采用柯西算子进行边界轮廓提取(图9e)。最后对边界轮廓图像以堆积最高点为中点进行左右分割[26],形成左右两个单边图像(图9f、9g),提取单边图像轮廓坐标(图9h),采用最小二乘法对边界轮廓的斜率进行线性拟合(图9i),并且将堆积角切线与水平线之间的角度定义为堆积角,计算得到堆积角 $\theta_3 = \arctan|k|$,k 为拟合直线斜率,取两侧的平均值作为草炭的堆积角[33]。草炭堆积密度 1 ~ 1.5 g/cm^3,堆积角 40° ~ 45°,结合软件内置 GEMM 颗粒材料数据库与文献[34 - 37]参数取值范围,取草炭间恢复系数 0.2 ~ 0.8,草炭间静摩擦因数 0.2 ~ 1.0,草炭间滚动摩擦因数 0.05 ~ 0.3,表面能 4 ~ 16 J/m^2。根据文献[29,36],可知塑性变形比为 0.2 ~ 0.6,黏结分支指数为 0.5 ~ 3,切向刚度因子为 0.3 ~ 0.9。

PBD 试验各参数分别用 $A \sim J$ 表示,共 8 个参数。通过试验与参考相关文献,得到参数取值如表 3 所示。

表 3 PBD 因素编码

Tab. 3 Factors and codes of PBD

因素	编码		
	-1	0	1
恢复系数 A	0.20	0.50	0.80
静摩擦因数 B	0.20	0.60	1.00
滚动摩擦因数 C	0.050	0.175	0.300
表面能 D/J	4	10	16
塑性变形比 E	0.20	0.40	0.60
黏结分支指数 F	1.00	1.75	2.50
切向刚度因子 G	0.30	0.60	0.90
草炭剪切模量 J/MPa	0.60	1.10	1.60

1.4.2 最陡爬坡试验

最陡爬坡试验是针对显著性参数设计的,可以较快地缩小最优值参数所在的区间。根据 PBD 的试验结果,本文只将 4 个显著性参数(草炭间恢复系数、草炭间静摩擦因数、切向刚度因子、草炭剪切模量)进行最陡爬坡试验。根据方差分析确定爬坡方向,按照选定步长逐步变化,将非显著性参数取 PBD 参数的中间水平,将轴向压力的仿真值与实际值的相对误差作为最陡爬坡试验的试验指标,观察试验与仿真结果的误差变化,直到该误差达到最小值后又逐步增大,试验方案与结果如表 4 所示。

表 4 最陡爬坡试验方案与结果

Tab. 4 Scheme and result of the steepest ascent test

序号	因素				轴向压力 F_{20}/N	轴向压力 F_{50}/N	F_{20} 相对误差/%	F_{50} 相对误差/%
	A	B	G	J/MPa				
1	0.20	0.2	0.30	0.60	0.66	59.52	82.77	34.91
2	0.35	0.4	0.45	0.85	1.76	84.85	54.05	7.21
3	0.50	0.6	0.60	1.10	4.53	189.05	18.28	106.72
4	0.65	0.8	0.75	1.35	8.10	274.60	111.49	200.27
5	0.80	1.0	0.90	1.60	11.54	300.12	228.18	228.18

1.4.3 中心组合响应面试验

基于最陡爬坡试验确定离散元参数最佳范围,采用中心组合响应面(Central composite design, CCD)进行响应面分析试验,确定最优参数,建立轴向压力与显著性参数的关系模型。在试验中,非显著性参数取 PBD 试验的中间值,显著性参数及仿真因素编码如表 5 所示。

表 5 CCD 因素编码

Tab. 5 Factors and codes of CCD

因素	编码				
	-1.414	-1	0	1	1.414
A	0.107	0.200	0.425	0.650	0.743
B	0.076	0.200	0.500	0.800	0.924
G	0.207	0.300	0.525	0.750	0.843
J/MPa	0.445	0.600	0.975	1.350	1.505

2 结果与讨论

2.1 PBD 试验

PBD 试验设计方案及结果如表 6 所示,$A' \sim J'$ 为 $A \sim J$ 的编码值。使用 Design-Expert 软件进行方差分析,得到 8 个参数对响应值的影响效果和可信度分析。如表 7 所示,草炭间静摩擦因数对响应值 F_{20} 影响极显著($P < 0.01$),草炭剪切模量对响应值 F_{20} 影响显著($P < 0.05$),草炭间静摩擦因数、草炭剪切模量对响应值 F_{50} 影响极显著($P < 0.01$),草炭间恢复系数、切向刚度因子对响应值 F_{50} 影响显著($P < 0.05$)。F_{20} 响应值指标校正系数 R^2_{adj} 为 0.918 4,精密度为 12.233 5;F_{50} 响应值指标校正系数 R^2_{adj} 为 0.933 5,精密度 13.741 8;校正系数要求大于 0.8,精密度要求大于 4,本次试验具有可靠性,且

表 6　PBD 方案及结果

Tab. 6　Scheme and results of PBD

序号	因素								压力	压力
	A'	B'	C'	D'	E'	F'	G'	J'	F_{20}/N	F_{50}/N
1	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	6.167 8	124.509
2	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	3.070	40.612 3
3	1	−1	1	1	−1	1	1	1	0.027	142.124
4	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	10.585	183.051
5	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	1.140	107.527
6	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	0.030	46.842
7	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	2.114	142.185
8	1	1	−1	−1	−1	−1	−1	1	5.300	267.412
9	1	1	1	−1	−1	1	1	−1	4.436	125.264
10	−1	1	1	1	−1	1	−1	1	7.006	246.931
11	1	−1	1	1	1	1	−1	−1	1.584	88.879
12	−1	−1	−1	−1	−1	1	−1	−1	0.224	58.846

表 7　PBD 试验方差分析

Tab. 7　ANOVA of test of PBD

指标	方差来源	均方	自由度	F	P
F_{20}	模型	117.22	8	16.47	0.020 9 *
	A	0.490 8	1	0.551 7	0.511 5
	B	82.40	1	92.63	0.002 4 **
	C	4.27	1	4.80	0.116 2
	D	6.92	1	7.78	0.068 5
	E	4.86	1	5.47	0.101 4
	F	8.69	1	9.77	0.052 2
	G	0.112 2	1	0.126 2	0.746 0
	J	9.47	1	10.64	0.047 1 *
	残差	2.67	3		
	总和	119.89	11		
F_{50}	模型	56 815.14	8	20.29	0.015 5 *
	A	3 555.71	1	10.16	0.049 8 *
	B	13 425.24	1	38.36	0.008 5 **
	C	426.11	1	1.22	0.350 4
	D	682.37	1	1.95	0.257 0
	E	3 355.23	1	9.59	0.053 4
	F	1 123.84	1	3.21	0.171 0
	G	3 817.25	1	10.91	0.045 6 *
	J	30 429.29	1	86.95	0.002 6 **
	残差	1 049.84	3		
	总和	57 864.98	11		

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），** 表示影响极显著（$P < 0.01$）。下同。

F_{50}响应值对应的参数影响可靠性更高。因此，本文将草炭间恢复系数、草炭间静摩擦因数、切向刚度因子、草炭剪切模量设定为显著性参数，最陡爬坡试验与 CCD 试验时只考虑这 4 个因素。

2.2　最陡爬坡试验确定显著性参数最优值区间

根据 PBD 试验结果，显著性参数与响应值之间呈正向相关，即随着显著性参数的增大，轴向压力增大。与此相反，轴向压力相对误差先减小后增大。第 2 组和第 3 组相对误差最小，因此，选择 1 ~ 4 组，即各显著性参数的最佳范围为：草炭间恢复系数 0.2 ~ 0.65、草炭间静摩擦因数 0.2 ~ 0.8、切向刚度因子 0.3 ~ 0.75、草炭剪切模量 0.60 ~ 1.35 MPa。

2.3　响应面分析试验

基于 PBD 试验与最陡爬坡试验分析，应用 CCD 设计试验进行响应面分析并寻求最优解，以 A'、B'、G'、J'为试验因素编码，以 F_{20}、F_{50}为响应值指标。共进行 30 组试验，设计方案与结果如表 8 所示。

表 8　CCD 试验方案与结果

Tab. 8　Scheme and results of CCD

序号	因素				轴向压力	轴向压力
	A'	B'	G'	J'	F_{20}/N	F_{50}/N
1	−1	−1	−1	−1	0.839	69.903
2	1	−1	−1	−1	0.755	60.601
3	−1	1	−1	−1	4.010	107.541
4	1	1	−1	−1	3.656	105.748
5	−1	−1	1	−1	1.022	55.387
6	1	−1	1	−1	1.022	63.634
7	−1	1	1	−1	4.235	93.183
8	1	1	1	−1	4.574	141.683
9	−1	−1	−1	1	0.935	114.267
10	1	−1	−1	1	1.253	122.488
11	−1	1	−1	1	7.238	234.283
12	1	1	−1	1	5.740	220.057
13	−1	−1	1	1	1.103	108.682
14	1	−1	1	1	1.047	123.326
15	−1	1	1	1	7.567	176.393
16	1	1	1	1	7.021	257.590
17	−1.414	0	0	0	3.138	111.232
18	1.414	0	0	0	4.621	162.726
19	0	−1.414	0	0	0.276	49.029
20	0	1.414	0	0	7.038	183.628
21	0	0	−1.414	0	5.012	156.845
22	0	0	1.414	0	4.344	171.837
23	0	0	0	−1.414	2.767	80.223
24	0	0	0	1.414	4.204	224.033
25	0	0	0	0	4.612	164.740
26	0	0	0	0	4.128	171.437
27	0	0	0	0	3.895	169.239
28	0	0	0	0	4.713	176.209
29	0	0	0	0	4.498	166.925
30	0	0	0	0	4.354	153.015

应用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析，建立响应值与离散元参数之间的回归关系。对回归模型进行方差分析，如表 9 所示，草炭间恢复系数（A）对响应值 F_{50}影响极显著，草炭间静摩擦因数（B）、草炭剪切模量（J）对响应值 F_{20}、F_{50}影响极显著。草炭间静摩擦因数（B）和草炭剪切模量（J）之间的交互作用（BJ）对响应值 F_{20}、F_{50}影响极显著；草炭间恢复系数（A）和切向刚度因子（G）之间的交互作用（AG）对响应值 F_{50}影响极显著。草炭间恢复

表 9 CCD 二次回归模型方差分析

Tab. 9 ANOVA of central CCD model

指标	方差来源	均方	自由度	F	P
F_{20}	模型	129.41	14	41.08	<0.000 1 **
	A	0.002 4	1	0.010 5	0.919 7
	B	104.09	1	462.56	<0.000 1 **
	G	0.246 2	1	1.09	0.312 2
	J	9.55	1	42.45	<0.000 1 **
	AB	0.312 6	1	1.39	0.256 9
	AG	0.115 1	1	0.511 7	0.485 4
	AJ	0.176 9	1	0.786 2	0.389 3
	BG	0.342 6	1	1.52	0.236 2
	BJ	6.75	1	29.98	<0.000 1 **
	GJ	0.000 0	1	0.000 1	0.991 0
	A^2	0.896 6	1	3.98	0.064 4
	B^2	1.66	1	7.36	0.016 1 *
	G^2	0.074 2	1	0.329 7	0.574 4
	J^2	2.40	1	10.66	0.005 2 **
	残差	3.38	15		
	失拟	2.90	10	3.04	0.115 9
	误差	0.477 1	5		
	总和	132.79	29		
F_{50}	模型	86 637.00	14	33.31	<0.000 1 **
	A	2 169.65	1	11.68	0.003 8 **
	B	32 686.92	1	175.94	<0.000 1 **
	G	1.92	1	0.010 3	0.920 4
	J	37 219.93	1	200.34	<0.000 1 **
	AB	527.47	1	2.84	0.112 7
	AG	1 799.66	1	9.69	0.007 1 **
	AJ	122.01	1	0.656 8	0.430 4
	BG	19.03	1	0.102 4	0.753 3
	BJ	3 050.57	1	16.42	0.001 0 **
	GJ	77.43	1	0.416 8	0.528 3
	A^2	1 340.65	1	7.22	0.016 9 *
	B^2	4 645.69	1	25.01	0.000 2 **
	G^2	26.85	1	0.144 5	0.709 2
	J^2	181.56	1	0.977 3	0.338 5
	残差	2 786.73	15		
	失拟	2 476.57	10	3.99	0.069 9
	误差	310.17	5		
	总和	89 423.74	29		

系数平方项(A^2)对响应值 F_{50}有显著影响,草炭间静摩擦因数平方项(B^2)对响应值 F_{20}有显著影响,对响应值 F_{50}影响极显著。另外,草炭剪切模量平方项(J^2)对响应值 F_{20}有极显著影响。

F_{20}、F_{50}对应回归模型 $P<0.000\ 1$,说明响应值与所得回归方程的关系是极显著的;失拟项 $P=0.115\ 9>0.05$、$P=0.069\ 9>0.05$,说明所得回归方程与实际拟合中非正常误差比例小,拟合性较好,决定系数 $R^2=0.974\ 6$、$R^2=0.968\ 8$。剔除对回归模型影响不显著的因素,进行二次回归模型方差分析。精确度由 20.709 6 变为 31.640 3、由 21.473 0 变为 28.681 8,失拟项由 0.115 9 变为 0.132 1、由 0.069 9 变为 0.088 9,精确性和可靠性得到改善,优化后获得轴向压力回归方程为

$$F_{50}=-38.088+146.653A+269.013B-87.659G+53.669J+209.494AG+122.738BJ-247.466A^2-253.925B^2 \quad (6)$$

$$F_{20}=-3.472+0.048A+7.147B+0.493G+6.599J+5.772BJ-5.169B^2-3.919J^2 \quad (7)$$

2.4 交互因素对轴向压力响应面分析

取草炭间恢复系数(A)与切向刚度因子(G)为中间值,草炭间静摩擦因数(B)与草炭剪切模量(J)的响应曲面如图 10 所示,当取相同的响应值时,随着草炭剪切模量(J)的减小,草炭间静摩擦因数(B)增大,且草炭间静摩擦因数(B)相邻区域差值的变化逐渐增大,曲线斜率增大,F_{50}响应值对应的曲线斜率变化比 F_{20}响应值对应的曲线斜率变化更加明显;当草炭剪切模量(J)不变时,随着草炭间静摩擦因数(B)的增大,响应值轴向压力也逐渐增大。草炭间静摩擦因数(B)与草炭剪切模量(J)的变化与响应值呈正向相关性,且随着草炭间静摩擦因数(B)与草炭剪切模量(J)的增大,响应值越来越显

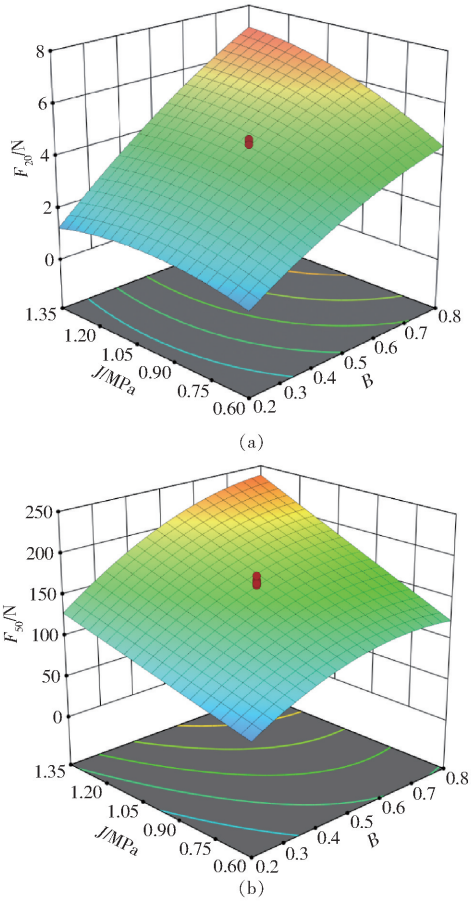


图 10 交互因素对轴向压力的影响

Fig. 10 Effect of interactive factors on axial pressure

著，即响应面越来越陡峭。

2.5　参数优化

在轴向压力 F_{20}、F_{50} 上下限 10% 范围内进行参数优化，借助 Design-Expert 13 的 Numerical 模块对显著性参数进行寻优，以 Desirability 值为参考，设定约束寻优条件

$$\begin{cases} 0.9F_{\text{physical}} \leqslant F_{20} \leqslant 1.1F_{\text{physical}} \\ 0.9F_{\text{physical}} \leqslant F_{50} \leqslant 1.1F_{\text{physical}} \\ 0.2 \leqslant A \leqslant 0.65 \\ 0.2 \leqslant B \leqslant 0.8 \\ 0.3 \leqslant G \leqslant 0.75 \\ 0.6\ \text{MPa} \leqslant J \leqslant 1.35\ \text{MPa} \end{cases} \tag{8}$$

对得到的若干组解取 6 组进行单轴密闭压缩仿真验证，选择与实际试验平均误差最小的一组为最优解。优化后最优解为：草炭间恢复系数 0.202、草炭间静摩擦因数 0.595、切向刚度因子 0.667、草炭剪切模量 0.613 MPa。

2.6　结果验证

根据响应面参数标定结果，验证其最优参数组合的可靠性，利用 EDEM 软件建立草炭离散元模型，进行单轴密闭压缩仿真试验，考察离散元模型和参数的通用性。如图 11 所示，使用 Origin 软件将 1.50 ~ 3.75 s（轴向应变 20% ~ 50%）范围内的仿真结果轴向压力曲线与实测的轴向压力变化曲线进行对比分析，取其范围内轴向压力的平均值，得到实测轴向压力平均值为 28.96 N，仿真轴向压力平均值为 31.65 N，相差 2.69 N，实测值与仿真值平均误差约为 8.08%。相对误差在轴向应变 40% 左右达到最大值，为 15.34%。因此，该研究建立的离散元仿真模型和参数标定可以准确描述草炭的压缩特性。

对草炭的单轴密闭压缩前期主要是对颗粒与颗粒之间空隙的压缩，这一过程将会导致较大塑性变形比的发生。草炭间的塑性变形比对响应值影响也较大，因而在此次试验中造成实测值与仿真值相对误差较大。

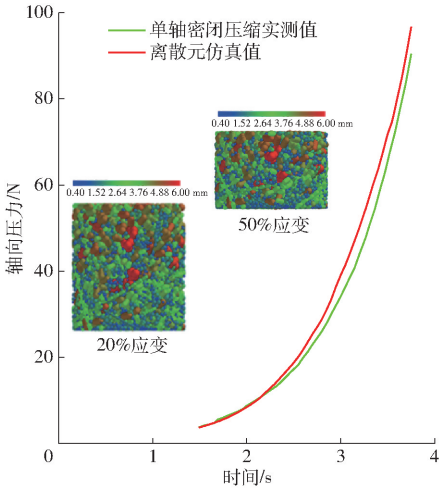


图 11　仿真与实测曲线

Fig. 11　Comparison of simulation and measured curves

3　结论

（1）基于离散元 EDEM 软件，选取 EEPA 接触模型并对草炭进行离散元建模及单轴密闭压缩仿真；通过 PBD 试验和最陡爬坡试验筛选出对轴向压力影响显著的参数，分别是草炭间恢复系数、草炭间静摩擦因数、切向刚度因子、草炭剪切模量，并缩小区间。

（2）根据 CCD 试验，进行响应面二次回归分析，得到草炭间静摩擦因数显著性最大，随着压缩的进行，草炭间恢复系数的影响效果上升。构建显著性参数与响应值间的二次回归模型，以轴向应变 20%、50% 对应的轴向压力 3.83、91.45 N 为目标值对显著性参数进行寻优，得到显著性参数最优组合如下：草炭间恢复系数为 0.202、草炭间静摩擦因数为 0.595、切向刚度因子为 0.667、草炭剪切模量为 0.613 MPa。

（3）通过将最优参数组合的仿真试验与单轴密闭压缩物理试验进行对比，发现在轴向应变范围 20% ~ 50% 内，随着压缩应变的增加，物理压缩的变化程度逐渐小于仿真压缩，仿真压缩曲线呈现出较陡的斜率。轴向压力仿真平均值与实测平均值相差 2.69 N，仿真值与实测值平均相对误差为 8.08%。

参　考　文　献

[1] 胡蒙爱，马嘉伟，张雪艳. 生物炭引入蚯蚓粪和草炭对基质环境、黄瓜植株生长和果实品质特性的影响[J]. 江西农业大学学报，2022，44(4)：852 - 861.
HU Mengai，MA Jiawei，ZHANG Xueyan. Effects of introducing biochar into vermicompost and peat on substrate environment，cucumber growth and quality characteristics[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis，2022，44(4)：852 - 861.（in Chinese）

[2] 刘景霞. 不同温度、光照和基质对辣椒幼苗生长的影响[D]. 长沙：湖南农业大学，2010.
LIU Jingxia. The effect of different light and temperature conditions and substrates on the growth of pepper seedlings[D]. Changsha：Hunan Agricultural University，2010.（in Chinese）

[3] BADV K，SAYADIAN T. An investigation into the geotechnical characteristics of Urmia peat[J]. Transactions of Civil Engineering，2012，36(C2)：167 - 180.

[4] 胡天明. 敦化市江源镇草炭土剪切特性及本构模型研究[D]. 长春：吉林大学，2020.
HU Tianming. Study on the shear characteristics and constitutive model of turfy soil in Jiangyuan Town，Dunhua City[D].

Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
[5] CARR M J, ROESSLER T, ROBINSON P W, et al. Calibration procedure of discrete element method (DEM) parameters for wet and sticky bulk materials[J]. Powder Technology, 2023, 429: 118919.
[6] 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 CSAE, 2016, 32(12): 247 - 253. (in Chinese)
[7] 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: 105 - 117.
[8] JIANG W, WANG L, TANG J, et al. Calibration and experimental validation of contact parameters in a discrete element model for tobacco strips[J]. Processes, 2022, 10(5): 998.
[9] 丁辛亭, 李凯, 郝伟, 等. 基于 RSM 和 GA - BP - GA 优化的油茶籽仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 139 - 150.
DING Xinting, LI Kai, HAO Wei, et al. Calibration of simulation parameters of *Camellia oleifera* seeds based on RSM and GA - BP - GA optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 139 - 150. (in Chinese)
[10] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21 - 27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21 - 27. (in Chinese)
[11] ROESSLER T, RICHTER C, KATTERFELD A, et al. Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials—part I: solving the problem of ambiguous parameter combinations[J]. Powder Technology, 2019, 343: 803 - 812.
[12] HORABIK J, MOLENDA M. Parameters and contact models for dem simulations of agricultural granular materials: a review[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206 - 225.
[13] ZHAO H, HUANG Y, LIU Z, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery: a review[J]. Agriculture, 2021, 11(5): 425.
[14] XIA R, LI B, WANG X, et al. Measurement and calibration of the discrete element parameters of wet bulk coal[J]. Measurement, 2019, 142: 94 - 95.
[15] LEBLICQ T, SMEETS B, RAMON H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 80 - 88.
[16] THAKUR S C, MORRISSEY J P, SUN J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model[J]. Granular Matter, 2014, 16(3): 383 - 400.
[17] JANDA A, OOI J Y. DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids[J]. Powder Technology, 2016, 293: 60 - 68.
[18] ZHANG Z, MEI F, XIAO P, et al. Discrete element modelling and simulation parameters calibration for the compacted straw cube[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 301 - 312.
[19] DING X, WEI Y, YAN Z, et al. Simulation and experiment of the spiral digging end-effector for hole digging in plug tray seedling substrate[J]. Agronomy, 2022, 12(4): 779.
[20] 中华人民共和国农业部. 蔬菜穴盘育苗: NY/T 2119—2012[S]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014.
[21] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
[22] SHMULEVICH I. State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 111(1): 41 - 53.
[23] WANG X, ZHANG S, PAN H B, et al. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 138 - 150.
[24] CHENG Y P, NAKATA Y, BOLTON M D. Discrete element simulation of crushable soil[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 633 - 641.
[25] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115 - 122, 142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115 - 122, 142. (in Chinese)
[26] 张胜伟, 张瑞雨, 陈天佑, 等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 71 - 79.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CHEN Tianyou, et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71 - 79. (in Chinese)
[27] HAN L H, ELLIOTT J A, BENTHAM A C, et al. A modified drucker-prager cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(10): 3088 - 3106.
[28] KARKALA S, DAVIS N, WASSGREN C, et al. Calibration of discrete-element-method parameters for cohesive materials using dynamic-yield-strength and shear-cell experiment[J]. Processes, 2019, 75(5): 278.
[29] THAKUR S C, MORRISSEY J P, SUN J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model[J]. Granular Matter, 2014, 16(3): 383 - 400.
[30] 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)

[31] 谢方平, 吴正阳, 王修善, 等. 基于无侧限抗压强度试验的土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 39 – 47.
XIE Fangping, WU Zhengyang, WANG Xiushan, et al. Calibration of discrete element parameters of soils based on unconfined compressive strength test[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 39(13): 39 – 47. (in Chinese)

[32] WANG Y, ZHANG Y, YANG Y, et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 400 – 414.

[33] HU Y, XIANG W, DUAN Y, et al. Calibration of ramie stalk contact parameters based on the discrete element method[J]. Agriculture, 2023, 13(5): 1070.

[34] 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 CSAE, 2017, 33(21): 181 – 187. (in Chinese)

[35] 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)

[36] 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.
XIANG 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)

[37] 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)

(上接第 86 页)

[17] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(13):23 – 34.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(13):23 – 34. (in Chinese)

[18] 陈美舟,刁培松,张银平,等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(21): 8 – 16.
CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(21): 8 – 16. (in Chinese)

[19] 顿国强,于春玲,杨永振,等. 大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(19):62 – 73.
DUN Guoqiang, YU Chunling, YANG Yongzhen, et al. Parameter simulation optimization and experiment of seed plate type hole for soybean breeding[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(19):62 – 73. (in Chinese)

[20] 顿国强,刘文辉,毛宁,等. 交替换岗式大豆小区育种排种器优化设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(1): 285 – 296.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, MAO Ning, et al. Optimization design and experiment of alternate post changing seed metering device for soybean plot breeding[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023,53(1):285 – 296. (in Chinese)

[21] 丁力,豆宇飞,王万章,等. 组合孔内充式油莎豆排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):100 – 115.
DING Li, DOU Yufei, WANG Wanzhang, et al. Design and experiment of seed metering device with combination hole and inner filling for *Cyperus esculentus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(12):100 – 115. (in Chinese)

[22] 张学军,程金鹏,史增录,等. 摆动夹取式玉米精量排种器取种性能仿真与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4):38 – 50.
ZHANG Xuejun, CHENG Jinpeng, SHI Zenglu, et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4): 38 – 50. (in Chinese)

[23] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 高速播种机玉米姿控驱导式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):108 – 119.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):108 – 119. (in Chinese)

[24] 吴孟宸,丛锦玲,闫琴,等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(23):30 – 38.
WU Mengchen, CONG Jinling, YAN Qin, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(23):30 – 38. (in Chinese)