

基于离散元法的耕层残膜拉伸性能研究

申世龙^{1,2} 张佳喜^{1,2} 蒋永新³ 王毅超^{1,2} 刘旋峰³ 李金明^{1,2} 董文浩^{1,2}

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 由于耕层残膜回收机关键农机部件设计优化过程中缺乏准确的残膜离散元模型参数,在一定程度上制约了耕层残膜回收机残膜受力机理分析与机构优化改进。本文以棉田耕层残膜为研究对象,对耕层残膜含量和极限拉伸力进行测定,得到不同耕层深度、不同厚度的残膜含量和极限拉伸力。根据测定结果,利用 EDEM 软件选用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型对耕层残膜进行离散元模型参数标定,选用单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力、粘结半径、接触半径为试验因素。通过 Plackett - Burman 试验,确定影响 Bonding 的主要参数有单位面积法向刚度、临界法向应力和粘结半径。通过最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验,最终确定最优的 Bonding 模型显著参数单位面积法向刚度、临界法向应力、粘结半径分别为 2.36×10^5 N/m³、 6.47×10^4 Pa、0.004 mm,对参数进行了仿真试验验证,误差为 5.88%,满足要求。通过对比物理试验与仿真试验的拉伸过程耕层残膜状态与拉伸曲线,表明了耕层残膜模型合理性,为后期耕层残膜回收机仿真与膜土分离机理研究提供了理论支撑。

关键词: 棉田耕层残膜; 极限拉伸力; 离散元模型; Bonding 模型; 拉伸仿真试验

中图分类号: S225.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0132-10

OSID:



Tensile Properties of Residual Film in Tillage Layer Based on Discrete Element Method

SHEN Shilong^{1,2} ZHANG Jiayi^{1,2} JIANG Yongxin³ WANG Yichao^{1,2} LIU Xuanfeng³
LI Jinming^{1,2} DONG Wenhao^{1,2}

(1. Mechanical and Electronic Engineering Institute, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agriculture Equipment, Urumqi 830052, China

3. Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: Due to the lack of accurate discrete element model parameters in the design and optimization process of the key agricultural machinery components of the plough layer residual film recycling machine, the research on the interaction mechanism between the plough layer residual film recycling machine and the residual film was restricted to a certain extent. Taking the residual film in the tillage layer of cotton field as the research object, the residual film in the tillage layer content and ultimate tensile force were measured, and the residual film content and ultimate tensile force of different tilting depth and thickness were obtained. According to the measurement results, the Hertz - Mindlin with Bonding contact model was selected for discrete element model parameter calibration by using EDEM software. The normal stiffness per unit area, tangential stiffness per unit area, critical normal stress, critical tangential stress, bond radius and contact radius were selected as test factors. Through Plackett - Burman test, the steepest climbing test and Box - Behnken test were used in turn. Finally, the significant parameters of the optimal Bonding model were determined as normal stiffness per unit area, critical normal stress and bond radius, whose values were 2.36×10^5 N/m³, 6.47×10^4 Pa and 0.004 mm, respectively. The simulation test

收稿日期: 2024-03-06 修回日期: 2024-04-27

基金项目: 新疆农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-09)、新疆维吾尔自治区“揭榜挂帅”项目和新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2024G103)

作者简介: 申世龙(1990—),男,博士生,主要从事农业机械装备研究,E-mail: 2505770715@qq.com

通信作者: 张佳喜(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事循环农业技术与装备研究,E-mail: zhangjiayi@edu.xjau.cn

was carried out to verify the parameters, and the error value was 5.88%, which met the requirements. Through the comparative analysis of the residual film in the tillage layer state and tensile curve of the physical testing and simulation test in the stretching process, the rationality of the residual film model in the tillage layer was proved, which provided theoretical support for the later residual film in the tillage layer recycling machine to simulate the mechanical recovery of residual film in the tillage layer and analyze the separation mechanism of film and soil.

Key words: residual film in the tillage layer of cotton field; ultimate tensile force; discrete element model; Bonding model; tensile simulation test

0 引言

地膜覆盖是稳定新疆维吾尔自治区棉花种植产量最重要的手段之一^[1-3],但回收不彻底导致大量棉田残膜滞留土壤中,严重破坏了土壤环境,因此棉田耕层残膜回收是当前研究重要课题^[4-5]。棉田残膜一般分布地表或耕层土壤中。由于对残膜力学性能测定及分布状态研究思路不清晰,传统的耕层残膜回收机作业效果不佳^[6-7]。

随着计算机技术的发展,离散元法在农业装备研究中应用越来越广泛^[8-10]。都鑫等^[11]利用 Bonding 模型建立肥料颗粒仿真模型,通过单轴压缩试验得到包膜肥料颗粒实际极限破碎位移和极限破碎载荷,确定最优包膜肥料 Bonding 模型参数,为颗粒机械破碎机理提供研究思路;靳伟等^[12]基于残膜与土壤、秸秆等悬浮速度差异、流动特性差异,利用 EDEM 软件建立了残膜与土壤、秸秆模型,提出了一种残膜与杂质悬浮分离方法。刘凡一等^[13-14]利用 EDEM 软件结合真实试验,得到小麦颗粒堆休止角离散元仿真参数。李永祥等^[15]利用颗粒接触缩放原理和量纲分析进行颗粒缩放,选择“Hertz - Mindlin with JKR”接触模型,通过休止角试验对接触参数进行标定,并通过实际试验进行了验证。郭备等^[16]利用 EDEM 构建了生猪饲料离散元模型,采用圆筒提升法进行粥料休止角仿真模拟。

综上所述,国内外从事农业机械研发的科研人员基于离散元法分别开展了土壤、种子、肥料、秸秆等物料参数研究^[17-23],对棉田耕层残膜离散元模型的研究鲜有报道。棉田耕层残膜离散元模型构建对利用离散元法研究残膜回收机的作业机理具有重要意义。

残膜极限拉伸力是目前残膜最重要的特性之一^[24-25]。本文以新疆维吾尔自治区棉田残膜为研究对象,结合物理试验与仿真试验,应用 EDEM 软件对棉田耕层残膜的接触参数进行标定。以拉伸试验中极限拉伸力为响应值,采用万能试验机测量极限残膜拉伸力,并依次通过 Plackett - Burman 筛选试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验对棉田耕

层残膜进行离散元仿真和校准,以确定较优的残膜离散元仿真参数值,以期探究回收机械作用在耕层残膜上而不会拉断残膜的力学条件研究提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为新疆棉田残膜,来源于新疆维吾尔自治区库尔勒市棉田。该基地为连续 20 年覆膜种植棉花的农田,耕层多年残膜留量较为严重。本试验样品取自 2022 年秋季松耙联合整地机作业后耕层中的残膜样品。经田间取样检测,土壤中残膜分布深度主要为 0 ~ 20 cm,故本文取样深度为 0 ~ 20 cm。考虑采样精确性,采用五点法取样,每个采样点面积为 1 m × 1 m,并对每个采样点按 0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm、100 ~ 150 mm、150 ~ 200 mm 将耕层深度划分为 4 个范围,如图 1 所示。分别对每个范围耕层深度进行取膜,取膜过程如图 2 所示。然后将样品中的耕层残膜水洗、晾干,称量后,分别按不同深度和厚度进行实际耕层残膜拉伸试验^[26]。所用仪器为:卷尺(0 ~ 5 m)、筛子、铁锹、干燥箱、电子秤。

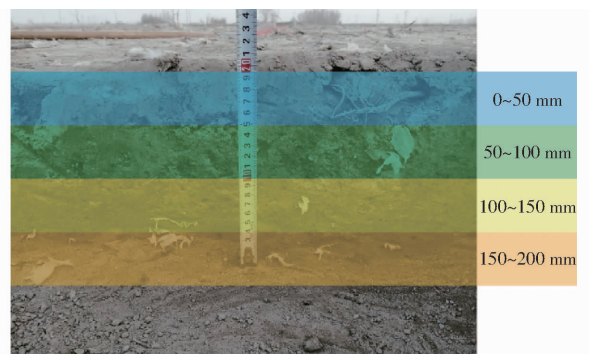


图 1 耕层深度

Fig. 1 Depth of tillage layer

1.2 试验方法

运用拉伸物理试验与 EDEM 仿真试验相结合的方法对棉田耕层残膜的离散元模型参数进行标定,首先利用万能试验机对耕层残膜样本进行拉伸试验,测量得耕层残膜极限拉伸力实际均值,并利用

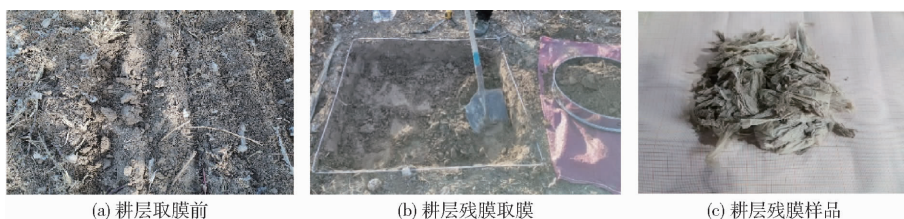


图2 耕层残膜取样

Fig.2 Sampling of residual film in tillage layer

EDEM 软件对耕层残膜进行虚拟建模,并进行拉伸仿真试验。应用 Design-Expert 软件进行 Plackett - Burman 筛选试验设计,并进行多因素显著性分析,筛选出对耕层残膜拉伸力有显著影响的参数;根据 Box - Behnken 试验建立并优化棉田耕层残膜拉伸力与显著性参数的回归模型,并对参数进行综合优化得到最优参数组合。最后利用最优组合参数设定仿真试验,对比棉田耕层残膜模型拉伸力与实际拉伸力的差异,验证标定模型参数准确性。

2 参数标定过程

2.1 耕层残膜分布测定

对不同耕层深度的残膜进行含量测定,结果如图3所示。由图3可知,耕层深度为0~50 mm时,残膜含量均值为6.58 g/m²;耕层深度为50~100 mm时,残膜含量均值为12.39 g/m²;耕层深度为100~150 mm时,残膜含量均值为11.63 g/m²;耕层深度为150~200 mm时,残膜含量均值为5.65 g/m²。其中,残膜含量主要集中在50~150 mm范围内,占总含量的67.17%。

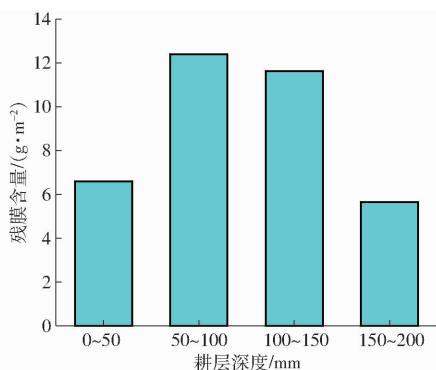


图3 耕层残膜含量

Fig.3 Residual film content in topsoil layer

2.2 拉伸物理试验

拉伸试验装置如图4a所示,由RGM-4002型万能试验机(量程为0~2 kN)、上下两夹具、台式计算机组成。按照GB/T 1040.3—2006标准第3部分(薄片和薄片试验条件)的要求,选取展开面积较大的残膜进行标准剪裁,制作拉伸试样,长条拉伸形状,宽度为10 mm,长度为150 mm长条形。试样安

装夹具时需与试验机轴线成一条直线,夹紧后自然下垂,夹具间初始距离为50 mm。利用RGM-4002型万能试验机(量程为0~2 kN)以初速度10 mm/s匀速提升上夹具,观察残膜状态变化,直到残膜拉断为止,生成拉伸过程中拉力变化曲线,得到极限拉伸力。拉伸试样如图4b所示。

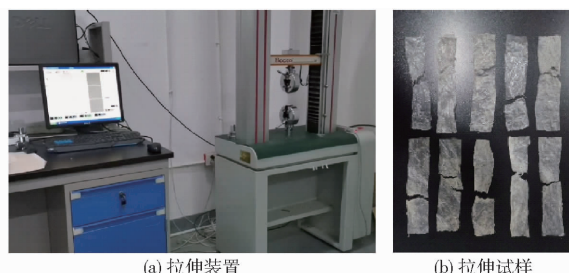


图4 耕层残膜拉伸试验

Fig.4 Residual film tension test

为了探究耕层厚度对残膜力学性能的影响,应用螺旋千分尺(精度0.01 mm)对单张耕层残膜对折5次后进行厚度测定,求得平均值。经测定残膜厚度主要为0.008、0.010 mm。该试验分别对这两种厚度的0~50 mm、50~100 mm、100~150 mm、150~200 mm范围内耕层残膜进行测定,每组选取10个残膜样本进行测定,并计算样本平均值,获得极限拉伸力变化。测得结果如表1所示。

表1 耕层残膜分布及极限拉伸力测试结果

Tab.1 Residual film in tillage layer distribution and ultimate tensile force test results

| 残膜厚度/ mm | 耕层深度/ mm | 极限拉伸力/N | | | |
|-------------|-------------|---------|------|------|------|
| | | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
| 0.008 | 0~50 | 1.71 | 2.25 | 1.96 | 0.17 |
| | 50~100 | 1.31 | 1.68 | 1.49 | 0.13 |
| | 100~150 | 1.02 | 1.68 | 1.15 | 0.08 |
| | 150~200 | 0.88 | 1.15 | 1.02 | 0.09 |
| 0.010 | 0~50 | 1.61 | 2.16 | 2.02 | 0.17 |
| | 50~100 | 1.32 | 1.75 | 1.54 | 0.14 |
| | 100~150 | 0.75 | 1.54 | 1.31 | 0.22 |
| | 150~200 | 0.79 | 1.41 | 1.18 | 0.18 |

通过表1可以得出,厚度为0.01 mm的耕层残膜极限拉伸力均值略高于厚度为0.008 mm的耕层残膜,并且随着耕层深度的增加,其极限拉伸力均值不断降低,其中棉田耕层深度0~50 mm范围内残

膜极限拉伸力均值分别为 1.96、2.02 N, 标准差均为 0.17 N; 棉田耕层深度 50 ~ 100 mm 范围内残膜极限拉伸力均值分别为 1.49、1.54 N, 标准差分别为 0.13、0.14 N; 棉田耕层深度 100 ~ 150 mm 范围内残膜极限拉伸力均值为 1.15、1.31 N, 标准差分别为 0.08、0.22 N; 棉田耕层深度 150 ~ 200 mm 范围内残膜极限拉伸力均值分别为 1.02、1.18 N, 标准差为 0.09、0.18 N。主要原因是当年新铺农膜受日晒风化, 其力学性能有所降低。而后表层膜被回收后剩余的残膜受耕整机触土部件的翻土作用被深翻至耕层内。随着埋藏时间增加, 耕层中的残膜会受到土壤、砂砾磨损、植物根茎破坏、微生物分解、水分肥料化学侵蚀等多种不可控因素的影响。因此, 耕层残膜力学性能不断下降, 其完整度也不断下降。这也是造成耕层残膜碎片化的原因之一。

考虑实际耕层中不同埋藏年限、厚度的残膜之间的表面特征不易判别, 试验样本采样后按埋藏年限精准分类测定较为困难; 开展残膜在耕层土壤随埋藏年限增加其力学性能变化规律的研究周期较长; 残膜力学特性受农田耕层土壤环境等不确定性因素较多等, 不利于后期研究。因此本文主要根据以上耕层残膜分布含量测定及对厚度为 0.008、0.01 mm 的残膜拉伸物理试验结果, 摒弃少量极限拉伸力较小和细碎且无法制作成拉伸标准的残膜样本, 选取耕层深度为 150 ~ 200 mm、厚度为 0.008 mm 的极限拉伸力平均值为 1.02 N 的残膜作为离散元模型对象开展参数标定, 通过耕层残膜分布的测定试验发现, 耕层深度 0 ~ 200 mm 范围内残膜主要集中在 50 ~ 150 mm, 占总含量的 67.17%, 因此将耕层残膜回收机工作深度设定为 200 mm, 才能将 50 ~ 150 mm 范围内的残膜全部回收。通过拉伸物理试验发现, 随着耕层深度的不断增加, 其极限拉伸力平均值变小, 其中耕层深度为 150 ~ 200 mm、厚度为 0.008 mm 的残膜极限拉伸力平均值为 1.02 N, 为试验样本极限拉伸力平均值的最小值, 且标准差为 0.09 N, 试验样本极限拉伸力的数据集离散程度较小, 该平均值可作为回收机械作用在耕层残膜上而不会拉断残膜的力学条件, 避免由机损造成的耕层残膜撕碎现象。

2.3 模型方程求解

2.3.1 仿真模型原理

图 5 为两颗粒之间形成的 Bond 键模型示意图。如图 6 所示, F_n 为法向力, F_s 为切向力, σ_c 为抗拉强度, U_n 为法向位移, U_s 为切向位移, k_n 为法向刚度, k_s 为切向刚度, S 为两个颗粒之间的接触面积。

当对颗粒拉伸或剪切, 其力与位移呈线性关系。

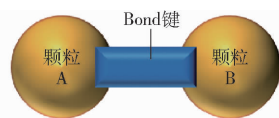


图 5 两颗粒之间形成的 Bond 键模型

Fig. 5 Bond model formed between two particles

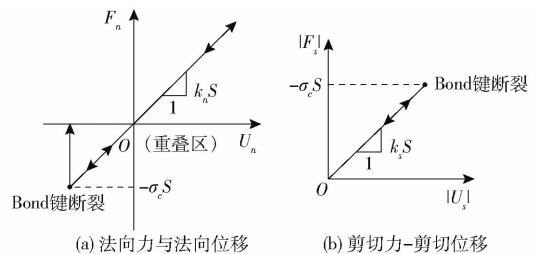


图 6 力-位移关系

Fig. 6 Force - displacement relation diagram

作用的力或位移超过 Bond 键的正常强度或剪切强度时, Bond 键断裂^[27]。该模型能够模拟拉伸加载下残膜材料中变形与断裂现象。

通过前期对耕层残膜的测试发现, 残膜具有一定的柔韧性和延展性。结合以上特性, 选取 Hertz - Mindlin with Bonding 模型来模拟棉田残膜, 将耕层残膜等似为一层紧密排列颗粒组成的颗粒集层, 各颗粒之间通过 Bond 键连接, 因此可以保证建立的模型具有延展性和柔韧性^[28]。当颗粒之间发生相对运动时, 承受拉伸、弯曲和剪切力, 键产生力计算公式为

$$\begin{cases} F_n = - \int v_n k_n S \delta t \\ F_s = - \int v_t k_s S \delta t \\ M_n = - \int \omega_n k_n J \delta t \\ M_t = - \int \omega_t k_s \frac{J}{2} \delta t \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} S = \pi R_b^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_b^4 \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_n —— 法向速度, m/s

v_t —— 切向速度, m/s

δt —— 仿真时间步长, s

M_n —— 法向力矩, N·m

M_t —— 切向力矩, N·m

ω_n —— 法向角速度, rad/s

ω_t —— 切向角速度, rad/s

J —— 颗粒惯性矩, mm⁴

R_b —— 粘结半径, mm

当力和力矩达到极限值或 Fraction 颗粒间的距离大于设定的接触半径时, Bond 粘结键发生断裂, 法向及切向剪切力计算公式为^[29]

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J}R_B \\ \tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J}R_B \end{cases} \quad (3)$$

式中 σ_{\max} ——法向剪切力, N

A ——颗粒间接触面积, m^2

τ_{\max} ——切向剪切力, N

2.3.2 仿真试验及参数

根据实际试验场景,采用 EDEM 软件建立耕层

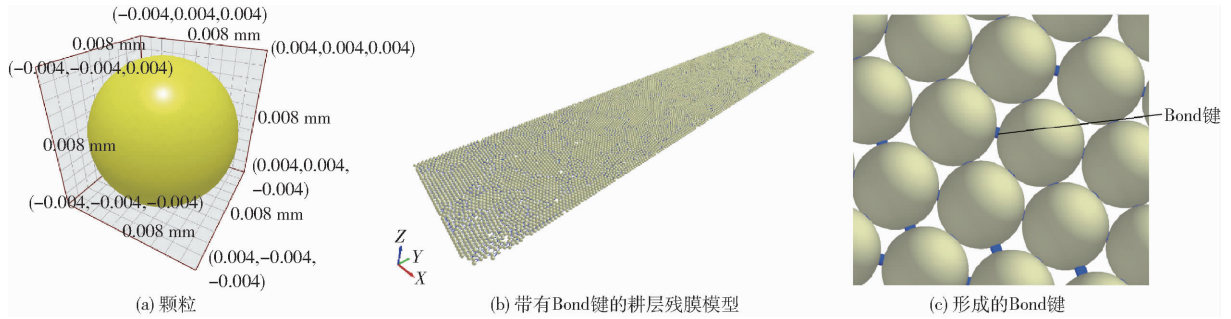


图7 耕层残膜模型

Fig. 7 Residual film model in tillage layer

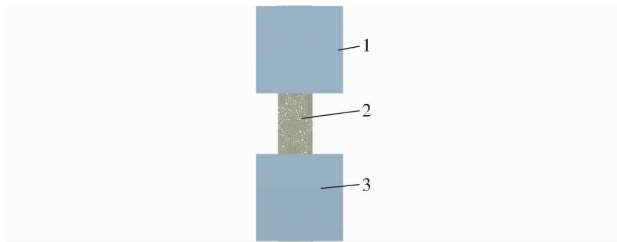


图8 拉伸试验模型

Fig. 8 Tensile test model

1. 上夹具 2. 耕层残膜模型 3. 下夹具

仿真中耕层残膜颗粒物理特性参数、接触参数如表 2 所示^[12,25]。EDEM 中设置仿真总时间为 3.2 s, 时间步长为 1.88×10^{-7} s, 每隔 0.01 s 保存 1 次数据, 网格尺寸取 4 倍最小球形单元尺寸。设置上夹具移动速度为 10 mm/s, 观察耕层残膜模型断裂与拉力情况。

表2 材料物理特性参数

Tab. 2 Physical property parameters of materials

| 项目 | 参数 | 数值 |
|---------|---------------------------------------|--|
| 残膜(聚乙烯) | 泊松比 | 0.38 |
| | 密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1.32×10^3 |
| | 弹性模量/Pa | $8.4 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^9$ |
| | 剪切模量/Pa | $5.4 \times 10^8 \sim 8.7 \times 10^8$ |
| 残膜-残膜 | 碰撞恢复系数 | 0.86 |
| | 静摩擦因数 | 0.52 |
| | 动摩擦因数 | 0.43 |

2.4 仿真参数响应面设计

2.4.1 Plackett - Burman 试验

利用 Plackett - Burman 试验可以找出各因素间

残膜模型,进行拉伸仿真试验,如图 8 所示,主要包括上夹具、下夹具、残膜模型。其中上、下夹具由 Solidworks 建模并另存为“.IGS”格式后,导入到 EDEM 软件而得^[30]。生成耕层残膜模型的区域选取长、宽、高为 $10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的立方体,耕层残膜模型由 2.34×10^7 个半径为 0.004 mm 的颗粒组成,其中耕层残膜模型厚度为 0.008 mm。颗粒与颗粒之间通过 Bond 键连接,如图 7 所示。虚拟耕层残膜拉伸试验模型如图 8 所示。

对考察目标响应影响显著程度,为去除不显著因素做准备^[31-33]。根据文献[11,34-35]对 Bond 键的阐述,影响 Bond 键的关键参数主要有单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力、粘结半径、接触半径。试验以极限拉伸力 Y 为指标,以单位面积法向刚度 X_1 、单位面积切向刚度 X_2 、临界法向应力 X_3 、临界切向应力 X_4 、粘结半径 X_5 、接触半径 X_6 共 6 个因素为试验因素,因素编码如表 3 所示。每个因素选取 2 个水平。试验选用 $N = 12$ 的 Plackett - Burman 试验设计,试验方案设计如表 4 所示, $Z_1 \sim Z_6$ 为因素编码值。

表3 试验因素编码

Tab. 3 Codes of test factors

| 因素 | 编码 | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 1 | 0 | -1 |
| 单位面积法向刚度 $X_1 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$ | 5.6×10^5 | 3.4×10^5 | 1.2×10^5 |
| 单位面积切向刚度 $X_2 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$ | 5.6×10^5 | 3.4×10^5 | 1.2×10^5 |
| 临界法向应力 X_3 / Pa | 9×10^4 | 5×10^4 | 1×10^4 |
| 临界切向应力 X_4 / Pa | 9×10^4 | 5×10^4 | 1×10^4 |
| 粘结半径 X_5 / mm | 0.005 | 0.004 | 0.003 |
| 接触半径 X_6 / mm | 0.005 | 0.004 | 0.003 |

利用 Design-Expert 软件对各因素效应进行显著性检验分析,得到显著性检验分析结果(表 5)^[31]。

由表 5 可知,各因素对极限拉伸力 Y 整体影响显著,其影响由大到小为 $Z_5, Z_3, Z_1, Z_4, Z_6, Z_2$,其中

表 4 Plackett - Burman 试验方案设计

Tab.4 Plackett - Burman test scheme design

| 试验号 | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₄ | Z ₅ | Z ₆ | Y/N |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0.79 |
| 2 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2.09 |
| 3 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1.31 |
| 4 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1.12 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1.91 |
| 6 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0.89 |
| 7 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1.37 |
| 8 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0.51 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0.83 |
| 10 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1.41 |
| 11 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0.97 |
| 12 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0.73 |

表 5 Plackett - Burman 试验方差显著性分析

Tab.5 Analysis of variance significance of Plackett - Burman test

| 来源 | 平方和 | 均方 | 贡献 | F | P |
|----------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| Z ₁ | 0.43 | 0.43 | 17.91 | 8.42 | 0.033 7 * |
| Z ₂ | 0.023 | 0.023 | 0.93 | 0.44 | 0.537 3 |
| Z ₃ | 0.54 | 0.54 | 22.23 | 10.45 | 0.023 1 * |
| Z ₄ | 0.19 | 0.19 | 7.93 | 3.74 | 0.110 8 |
| Z ₅ | 0.89 | 0.89 | 36.31 | 17.22 | 0.008 9 ** |
| Z ₆ | 0.09 | 0.09 | 3.73 | 1.75 | 0.242 9 |

注：* 表示差异显著 (P < 0.05)；** 表示差异极显著 (P < 0.01)。下同。

Z₅、Z₃、Z₁的 P 小于 0.05,表明因素对目标显著,Z₄、Z₆、Z₂的 P 大于 0.05,表明因素对目标不显著。Z₅、Z₃、Z₁贡献值分别为 36.31、22.23、17.91。由图 9 可知,Z₅、Z₃对目标的效应值均为正,Z₁对目标效应值均为负。原因为当夹具拉伸残膜模型时,单位面积法向刚度越大,Bond 键越脆,越容易被破坏;其次临界法向应力越大,两颗粒之间抵抗外力破坏的能力就越强,则 Bond 键就越稳定;颗粒之间粘结半径越大,接触面积就越大,则 Bond 键就越不容易破坏。

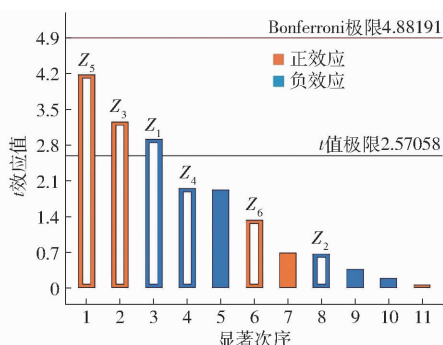


图 9 帕累托图

Fig.9 Pareto diagram

2.4.2 最陡爬坡试验

根据 Plackett - Burman 试验结果,X₂、X₄、X₆对

结果影响不显著,分别取为 3.4 × 10⁵ N/m³、5 × 10⁴ Pa、0.004 mm。选取 X₁、X₃、X₅ 初值分别为 1.2 × 10⁵ N/m³、1 × 10⁵ Pa、0.003 mm,步长分别为 1.1 × 10⁵ N/m³、2 × 10⁴ Pa、0.000 5 mm,进行最陡爬坡试验,以进一步找到逼近真实值的参数组合,最陡爬坡试验方案和结果如表 6 所示。

表 6 最陡爬坡试验方案及结果

Tab.6 Test and results of the steepest ascent

| 序号 | X ₁ /(N·m ⁻³) | X ₃ /Pa | X ₅ /mm | Y/N |
|----|--------------------------------------|---------------------|--------------------|------|
| 1 | 1.2 × 10 ⁵ | 1 × 10 ⁴ | 0.003 0 | 0.66 |
| 2 | 2.3 × 10 ⁵ | 3 × 10 ⁴ | 0.003 5 | 0.94 |
| 3 | 3.4 × 10 ⁵ | 5 × 10 ⁴ | 0.004 0 | 1.09 |
| 4 | 4.5 × 10 ⁵ | 7 × 10 ⁴ | 0.004 5 | 1.21 |
| 5 | 5.6 × 10 ⁵ | 9 × 10 ⁴ | 0.005 0 | 1.59 |

结合前期耕层残膜实际拉伸试验测定,根据表 6 确定 3 号试验中的各个参数作为后期试验中心点,2 号、4 号试验参数为低水平和高水平,进行 Box - Behnken 试验,找出最优参数组合^[32]。

2.4.3 Box - Behnken 试验及回归模型

根据 Plackett - Burman 试验找出的显著性因素分别为粘结半径 Z₅、临界法向应力 Z₃、单位面积法向刚度 Z₁。利用 Design-Expert 进行 Box - Behnken 试验设计精确找出因素的水平及响应值,试验方案见表 7,方差分析结果见表 8。

表 7 Box - Behnken 试验方案及结果

Tab.7 Box - Behnken test scheme and results

| 序号 | Z ₁ | Z ₃ | Z ₅ | Y/N |
|----|----------------|----------------|----------------|------|
| 1 | -1 | -1 | 0 | 0.91 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 1.12 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 1.10 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 1.86 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 0.92 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 1.53 |
| 7 | -1 | 0 | 1 | 1.27 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 1.94 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 0.87 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 1.51 |
| 11 | 0 | -1 | 1 | 1.29 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 1.91 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 1.06 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 1.13 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0.97 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 1.12 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 1.05 |

2.4.4 回归模型分析与参数优化

由表 8 可知,该模型差异极显著 (P < 0.000 1)。模型失拟项无显著性差异 (P = 0.096 3 > 0.05),说

表8 Box - Behnken 试验方差分析

Tab.8 Analysis of variance of Box - Behnken test

| 来源 | 平方和 | 均方 | F | P |
|--|-------------------------|-------------------------|--------|-------------|
| 模型 | 1.97 | 0.22 | 44.94 | <0.000 1 ** |
| Z ₁ | 0.63 | 0.63 | 129.69 | <0.000 1 ** |
| Z ₃ | 0.60 | 0.60 | 122.87 | <0.000 1 ** |
| Z ₅ | 0.31 | 0.31 | 63.95 | <0.000 1 ** |
| Z ₁ Z ₃ | 0.076 | 0.076 | 15.50 | 0.005 6 ** |
| Z ₁ Z ₅ | 9 × 10 ⁻⁴ | 9 × 10 ⁻⁴ | 0.18 | 0.680 5 |
| Z ₃ Z ₅ | 1 × 10 ⁻⁴ | 1 × 10 ⁻⁴ | 0.02 | 0.089 0 |
| Z ₁ ² | 0.042 | 0.042 | 8.59 | 0.022 0 * |
| Z ₃ ² | 0.027 | 0.027 | 5.49 | 0.051 6 |
| Z ₅ ² | 0.26 | 0.26 | 52.75 | 0.000 2 ** |
| 残差 | 0.034 | 4.88 × 10 ⁻³ | | |
| 失拟 | 0.026 | 8.69 × 10 ⁻³ | 4.30 | 0.096 3 |
| 纯误差 | 8.08 × 10 ⁻³ | 2.02 × 10 ⁻³ | | |
| 总和 | 2.01 | | | |
| R ² = 0.983 0 R ² _{Adj} = 0.961 1 精密度为 20.719 | | | | |

明所选模型拟合程度好,可较好地拟合试验结果^[33]。决定系数 R² 为 0.983 0,与调整决定系数 R²_{Adj} 为 0.961 1 基本接近,表明模型回归方程和相关性都很好。因此,Box - Behnken 设计可靠,该模型可较好地应用于标定耕层残膜极限拉伸力理论预测。

该模型一次项 Z₁、Z₃、Z₅ 对响应值极限拉伸力 Y 影响均极显著 (P < 0.01); 交互项 Z₁Z₅、Z₃Z₅ 对响应值极限拉伸力 Y 影响不显著 (P > 0.05), Z₁Z₃ 对响应值极限拉伸力 Y 影响达到极显著水平 (P < 0.01); 平方项 Z₃² 对响应值极限拉伸力 Y 影响不显著 (P > 0.05); 平方项 Z₁²、Z₅² 对响应值极限拉伸力 Y 影响达到显著水平 (P < 0.05)。

在保证模型显著的情况下,对模型进行优化,去除对拉伸试验影响不显著的项,优化后方差分析结果如表 9 所示,试验精密度为 22.727,提高了试验精密度,说明模型可较好预测极限拉伸力与 6 个因素的关系。

优化后,对因素根据编码公式进行回代后,得到二次回归方程为

$$Y = 1.10 + 0.28Z_1 + 0.27Z_3 + 0.2Z_5 + 0.14Z_1Z_3 + 0.1Z_1^2 + 0.25Z_5^2 \quad (4)$$

对回归模型进行优化分析,获得极限拉伸力 Y 的最佳参数组合条件 X₁、X₃、X₅ 分别为 2.36 × 10⁵ N/m³、6.47 × 10⁴ Pa、0.004 mm,并且在此条件下得出极限拉伸力 Y 理论预测值为 1.02 N。

3 残膜拉伸仿真验证

3.1 残膜拉伸力试验验证

为了验证回归模型的正确性,利用 EDEM 软件,

表9 回归模型优化方差分析

Tab.9 Regression model optimization analysis

| of variance | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|--------|-------------|
| 来源 | 平方和 | 均方 | F | P |
| 模型 | 1.95 | 0.32 | 52.36 | <0.000 1 ** |
| Z ₁ | 0.63 | 0.63 | 102.17 | <0.000 1 ** |
| Z ₃ | 0.60 | 0.60 | 96.8 | <0.000 1 ** |
| Z ₅ | 0.31 | 0.31 | 50.38 | <0.000 1 ** |
| Z ₁ Z ₃ | 0.076 | 0.076 | 12.21 | 0.005 8 ** |
| Z ₁ ² | 0.046 | 0.046 | 7.37 | 0.021 8 * |
| Z ₅ ² | 0.27 | 0.27 | 43.10 | <0.000 1 ** |
| 残差 | 0.062 | 6.19 × 10 ⁻³ | | |
| 失拟 | 0.054 | 8.98 × 10 ⁻³ | 4.44 | 0.085 2 |
| 纯误差 | 8.08 × 10 ⁻³ | 2.02 × 10 ⁻³ | | |
| 总和 | 2.01 | | | |
| R ² = 0.969 2 R ² _{Adj} = 0.950 6 精密度为 22.727 | | | | |

对残膜厚度为 0.008 mm,耕层深度为 150 ~ 200 mm 的残膜进行离散元建模,并进行拉伸仿真试验,获得极限拉伸力 Y 均值为 1.08 N,与理论预测值误差为 5.88%,其物理残膜拉伸试验与仿真试验拉伸力变化曲线如图 10 所示,两种残膜拉伸力与时间变化趋势相似度极高。说明本文标定得到的 Bonding 模型参数组合准确性高,具有实际应用价值。

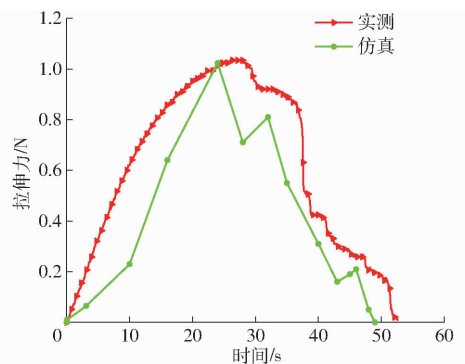


图10 拉伸力-时间曲线

Fig. 10 Tension - times curves

3.2 残膜拉伸过程对比

拉伸试验仿真过程如图 11a ~ 11e 所示。如图 11a、11b 所示,耕层残膜模型整体由原来的平整逐渐变为沿拉伸方向发生不规整微小的褶皱,其中间拉伸阶段宽度也逐渐变窄。根据颗粒颜色判断,中间颗粒蓝色逐渐变为浅绿色,表示颗粒力随着上夹具升高而逐渐升高;如图 11c 所示,模型拉伸阶段中间的 Bond 键逐渐断裂,形成圆形缺口,并逐渐向两段过渡,直至两断裂残膜模型间形成条状颗粒链(图 11d)。图 11e 所示,随着上夹具逐渐升高,模型中间条状颗粒链之间的 Bond 键也发生完全断裂,此时耕层残膜模型发生完全断裂。最后断裂的条状残膜颗粒链有一定的弹性回缩现象。

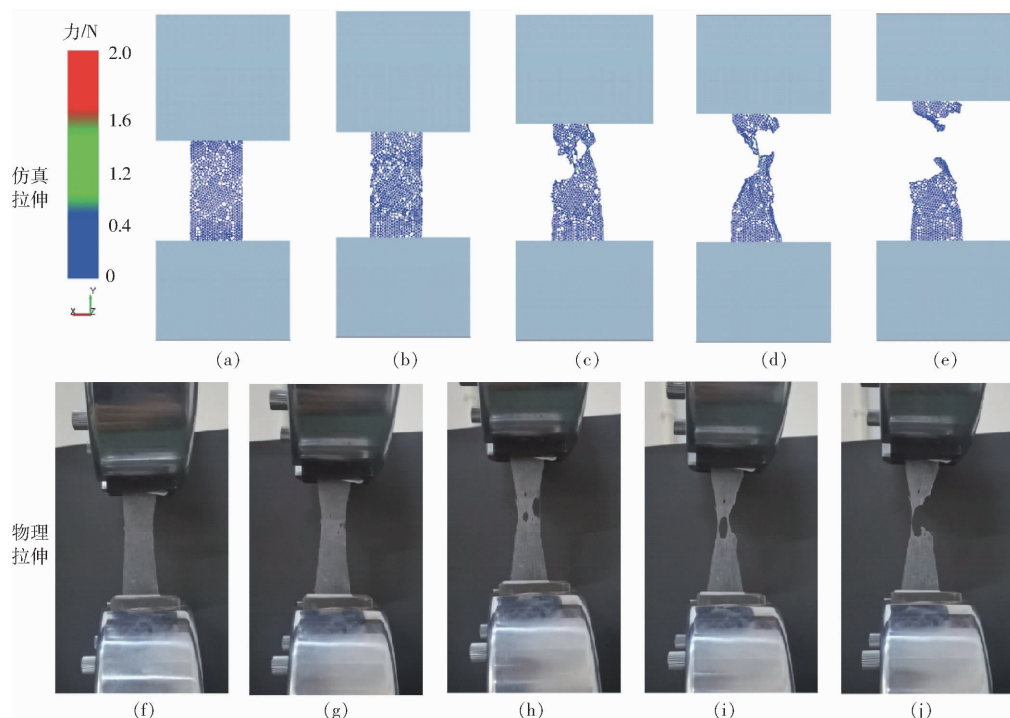


图 11 仿真与物理拉伸过程对比

Fig. 11 Comparison between simulation and real stretch

图 11f~11j 所示为随机取出的真实耕层残膜样本各阶段残膜拉伸状态变化。通过对比可知,真实拉伸状态与仿真各对应状态的一致性较高,表明残膜离散元参数的合理性。

4 结论

(1) 对不同耕层深度残膜含量与不同残膜厚度的物理极限拉伸力测定,解析出耕层残膜分布规律与力学性能变化规律。选取厚度为 0.008 mm、耕层深度为 150~200 mm 范围内的残膜极限拉伸力均值为 1.02 N 的残膜作为离散元标定的对象。基于离散元 EDEM 软件,选取 Hertz - Mindlin with Bonding 模型对耕层残膜进行模型参数选取及优化,通过 Plackett - Burman 试验设计敏感性分析,得出对耕层残膜极限拉伸力影响贡献由大到小为粘结半径、临界法向应力、单位面积法向刚度、临

界切向应力、接触半径、单位面积切向刚度,其中粘结半径、临界法向应力、单位面积法向刚度为显著因素。

(2) 根据最陡爬坡试验、Box - Behnken 试验设计分析,构建了单位面积法向刚度、临界法向应力、粘结半径 3 个因素对残膜极限拉伸力的二次回归模型,并对回归模型进行了优化,最终得到各因素参数对极限拉伸力最优值分别为 $2.36 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 、 $6.47 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、0.004 mm,并且在此条件下得出极限拉伸力理论预测值为 1.02 N。

(3) 以最优参数构建离散元耕层残膜模型得到极限拉伸力为 1.08 N,与理论预测值相对误差为 5.88%。利用优化的离散元耕层残膜模型与实际拉伸试验进行拉伸状态过程对比,表明两者拉伸变化状态具有较高一致性,因此该模型参数应用于耕层残膜模型标定具有较高的合理性。

参 考 文 献

- [1] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2017,48(6):1-14.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):1-14. (in Chinese)
- [2] 温浩军,牛琪,纪超. 地膜机械化技术现状及分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(3):145-153.
WEN Haojun, NIU Qi, JI Chao. Current status of and analysis on the mechanical technology of plastic film[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(3): 145-153. (in Chinese)
- [3] 王昭宇,陈学庚,颜利民,等. 随动式残膜回收机起膜拾捡机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):80-90.
WANG Zhaoyu, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on collecting and removing device for profile modeling residual plastic film collector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 80-90. (in Chinese)
- [4] 杨松梅,陈学庚,颜利民,等. 残膜回收机带式卷膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):135-144.

- YANG Songmei, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on belt-type curl-up film device for residual plastic film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 135 – 144. (in Chinese)
- [5] 康建明,解臣硕,王小瑜,等. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):91 – 98.
KANG Jianming, XIE Chenshuo, WANG Xiaoyu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 91 – 98. (in Chinese)
- [6] 张凤奎,李平,张宏,等. 棉田耕层残膜回收机的设计与机架模态分析[J]. 塔里木大学学报,2019,31(3):63 – 69.
ZHANG Fengkui, LI Ping, ZHANG Hong, et al. Design and rack modal analysis of cotton field plough layer residual film recycling machine[J]. Journal of Tarim University, 2019, 31(3): 63 – 69. (in Chinese)
- [7] 胡灿,杜整,王旭峰,等. 旋耕刀齿式棉田耕层残膜回收机设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2023,28(10):173 – 183.
HU Can, DU Ao, WANG Xufeng, et al. Design and experiment of a rotary tillage knife tooth type residual film recovery machine in the plough layer of cotton field[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(10): 173 – 183. (in Chinese)
- [8] 谢伟,彭磊,蒋麟,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 Ping, et al. Discrete element model building and optimization 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)
- [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 corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 69 – 77. (in Chinese)
- [10] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报,2021,52(4):1 – 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1 – 20. (in Chinese)
- [11] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(7):141 – 149.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Calibration of Bonding model parameters for coated fertilizers based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 141 – 149. (in Chinese)
- [12] 靳伟,张学军,丁幼春,等. 基于 EDEM – Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 89 – 98.
JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Experiment on suspension separation of residual film and impurity based on EDEM – Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 89 – 98. (in Chinese)
- [13] 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 CSAE, 2018, 34(15): 37 – 43. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 李永祥,李飞翔,徐雪萌,等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(16):320 – 327.
LI Yongxiang, LI Feixiang, XU Xuemeng, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 320 – 327. (in Chinese)
- [16] 邬备,钱怀源,黄天赐,等. 基于 EDEM 的生猪粥料离散元模型参数标定[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(3): 726 – 736.
WU Bei, QIAN Huaiyuan, HUANG Tianci, et al. Calibration of discrete element model parameters of pig porridge based on EDEM[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(3): 726 – 736. (in Chinese)
- [17] 田辛亮,丛旭,齐江涛,等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(10):100 – 108,242.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw – soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100 – 108,242. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 卢琦,刘芳建,刘立晶,等. 种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立与验证[J]. 农业机械学报,2023,54(10): 46 – 57.
LU Qi, LIU Fangjian, LIU Lijing, et al. Establishment and verification of discrete element model for seed furrow soil – seed – covering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 46 – 57. (in Chinese)

- [20] 刘文政,何进,李洪文,等.基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J].农业机械学报,2018,49(5):125-135,142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato mini tuber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125-135,142. (in Chinese)
- [21] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等.三七茎秆离散元参数标定与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):61-70,91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61-70,91. (in Chinese)
- [22] 扈伟昊,杨发展,赵国栋,等.基于离散元法的立式旋耕刀工作参数分析与优化[J].中国农机化学报,2022,43(10):25-32,41.
HU Weihao, YANG Fazhan, ZHAO Guodong, et al. Analysis and optimization of working parameters of vertical rotary tiller blade based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 25-32,41. (in Chinese)
- [23] 徐天月.精密播种单体及其关键部件工作过程的试验研究与仿真分析[D].长春:吉林大学,2019.
XU Tianyue. Experimental study and simulation analysis of the working process of the precision seeding unit and its key parts [D]. Changchun:Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [24] 方旭,靳伟,张学军,等.农用地膜力学性能试验与分析[J].农机化研究,2019,41(10):203-207,212.
FANG Xu, JIN Wei, ZHANG Xuejun, et al. Testing and analysis of mechanical properties of agricultural ground membrane [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 203-207,212. (in Chinese)
- [25] 胡广发,全腊珍,邹运梅,等.农田残膜机械回收膜土分离模型的建立与仿真试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2021,47(3):344-350.
HU Guangfa, QUAN Lazhen, ZOU Yunmei, et al. Establishment and simulation experiment of the membrane-soil separation model for the mechanical recovery of residual membrane in farmland[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 47(3): 344-350. (in Chinese)
- [26] 邢剑飞.梳齿式耕层残膜回收及整地联合作业机的优化设计[D].阿拉尔:塔里木大学,2020.
XING Jianfei. Optimized design of comb-type plough layer residual film recovery and land preparation combined working machine[D]. Alar:Tarim University, 2020. (in Chinese)
- [27] ZHANG X P, ZHANG Q, LIU Q S, et al. A numerical study of wave propagation and cracking processes in rock-like material under seismic loading based on the bonded-particle model approach[J]. Engineering, 2022, 17: 140-150.
- [28] 解臣硕.滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置理论研究与试验[D].泰安:山东农业大学,2023.
XIE Chenshuo. Research and experiment investigation of tumbler screen type residual film-impurities wind separator screen hole-clearing device[D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [29] 周华,车海龙,耿端阳,等.玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J].农业机械学报,2023,54(11):49-60,113.
ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 49-60,113. (in Chinese)
- [30] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等.螺旋锥体离心式排肥器扰动防堵机理分析与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):44-54.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Mechanism analysis and test of disturbance and blockage prevention of spiral cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 44-54. (in Chinese)
- [31] 张佳喜,张彭,张虎,等.新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J].农业机械学报,2024,55(1):76-84,108.
ZHANG Jiayi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76-84,108. (in Chinese)
- [32] 郝建军,魏文波,黄鹏程,等.油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J].农业工程学报,2021,37(12):36-44.
HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 36-44. (in Chinese)
- [33] 侯守印,纪张驰,薛东辉,等.适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(7):111-122.
HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 111-122. (in Chinese)
- [34] 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)
- [35] 牛智有,孔宪锐,沈柏胜,等.颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J].农业机械学报,2022,53(7):132-140,207.
NIU Zhiyou, KONG Xianrui, SHEN Baisheng, et al. Parameters calibration of discrete element simulation for pellet feed attrition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 132-140,207. (in Chinese)