doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.019

新疆棉田秆土膜混合物离散元仿真参数标定

赵　岩[1,2]　刘学凯[1,2]　陈学庚[1,2]　田辛亮[1,2]　于河涛[1,2]　王奋飞[1,2]　黄广亮[1,2]
(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832000;2.农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832000)

摘要:针对新疆棉田地表及浅层秸秆-土壤-残膜(简称"秆土膜")混合物离散元接触参数缺乏,制约残膜回收装备关键部件仿真分析与参数优化问题,本研究以新疆沙性土壤、棉花秸秆和残膜为研究对象,建立秆土膜混合物离散元模型。针对材料的物理特性,选取 Hertz-Mindlin(no slip)与 Hertz-Mindlin with Bonding 模型分别表征土壤、秸秆、残膜的接触行为与残膜柔性变形的力学特性。通过分体圆筒法测得秆土膜混合物休止角为 33.97°,并以休止角为响应指标,基于 Plackett-Burman 设计对 21 个接触参数进行筛选,确定土壤-土壤静摩擦因数、土壤-土壤动摩擦因数、残膜-钢静摩擦因数、残膜-钢动摩擦因数和秸秆-钢静摩擦因数为主要影响因素。最陡爬坡试验确定参数优化区间后,利用响应面法构建休止角与关键参数间的二次回归模型并进行参数寻优。结果表明:最优参数组合为:土壤-土壤静摩擦因数 0.329、动摩擦因数 0.114;残膜-钢静摩擦因数 0.418、动摩擦因数 0.150;秸秆-钢静摩擦因数 0.293。采用该参数组合进行仿真验证,得到休止角平均值为 35.11°,与实测值相对误差为 3.36%。研究结果表明,标定后的参数能够较好表征新疆棉田秆土膜混合物的宏观堆积特性,可为残膜回收机起膜、输送、清杂与卷捆等关键部件的离散元仿真与参数优化提供基础参数。

关键词:残膜回收;秸秆-土壤-残膜混合物;参数标定;休止角;离散元
中图分类号:S220.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)17-0200-10　　**OSID**:

Discrete Element Simulation Parameter Calibration of Cotton Stalk - Soil - Film Mixture in Xinjiang

Zhao Yan[1,2]　Liu Xuekai[1,2]　Chen Xuegeng[1,2]　Tian Xinliang[1,2]　Yu Hetao[1,2]
Wang Fenfei[1,2]　Huang Guangliang[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: In view of the lack of discrete element contact parameters of straw-soil-residual film mixture on the surface and shallow layer of cotton field in Xinjiang, the simulation analysis and parameter optimization of key components of residual film recovery equipment are restricted. Xinjiang sandy soil, cotton straw and residual film were taken as the research objects, and a discrete element simulation model suitable for the mixture was constructed. According to the physical properties of materials, Hertz - Mindlin (no slip) and Hertz - Mindlin with Bonding models were selected to characterize the contact behavior of soil, straw and residual film and the mechanical properties of flexible deformation of residual film. The repose angle of the cotton stalk - soil - film mixture was measured to be 33.97° by the split cylinder method. Based on the Plackett - Burman experimental design, five significant influencing factors were selected from 21 contact parameters, which were soil - soil static friction coefficient, soil - soil dynamic friction coefficient, residual film - steel static friction coefficient, residual film - steel dynamic friction coefficient and straw - steel static friction coefficient. After determining the parameter optimization interval by the steepest ascent method, the quadratic regression model between the angle of repose and the key parameters was constructed by the response surface method and the parameters were optimized.

收稿日期:2026-01-30　修回日期:2026-04-03
基金项目:新疆维吾尔自治区"天池英才"项目(CZ002549)、兵团自然科学支持计划项目(2024DA023)、兵团科技创新人才计划项目(2023CB008-09)、石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZK202307)和农业农村部西北农业装备重点实验室开放课题(KFKT202509)
作者简介:赵岩(1983—),男,教授,主要从事棉花生产全程机械化研究,E-mail:zhaoyan@shzu.edu.cn
通信作者:田辛亮(1991—),男,副教授,博士,主要从事棉花生产全程机械化研究,E-mail:1139287905@qq.com

The results showed that the optimal parameter combination was soil – soil static friction coefficient 0.329, dynamic friction coefficient 0.114; the static friction coefficient of residual film – steel was 0.418, and the dynamic friction coefficient was 0.150, straw – steel static friction coefficient was 0.293. Using this parameter combination for simulation verification, the average angle of repose was 35.11°, and the relative error with the measured value was 3.36%. The results showed that the calibrated parameters can better characterize the macroscopic accumulation characteristics of the stalk – soil – residual film mixture in Xinjiang cotton field, and can provide basic parameters for discrete element simulation and parameter optimization of key components such as film lifting, conveying, cleaning and baling of residual film recovery machine.

Key words: residual film recovery; cotton stalk – soil – residual film mixture; parameter calibration; angle of repose; discrete element method

0　引言

农膜覆盖技术作为我国农业增产与粮食安全保障的核心手段,在新疆、甘肃、内蒙古东部的棉花、玉米等作物规模化种植中广泛应用[1]。而残膜污染也成为农业绿色发展的突出障碍[2-3]。实现高效残膜回收是解决问题的关键。人工捡拾因劳动强度大、成本高、拾净率低,难以适配规模化农业生产需求,机械化回收成为解决残膜污染的主要方式[4]。新疆地区应用秸秆粉碎与残膜回收机,主要作业工序包括“起膜—输送—清杂—卷捆”4 个关键环节。机具回收作业的对象为“秸秆-土壤-残膜”(以下简称“秆土膜”)混合物[5]。土壤主要来源于挑膜和输送过程中被带起的表层颗粒及小土块,秸秆主要来源于地表和浅层残留的棉秆碎段,残膜则包括地表裸露膜、半埋压膜和破碎膜条。三者的质量组成和形态分布并非固定不变,而是受采收方式、整地条件、土壤含水率、残膜老化破碎程度以及机具入土深度和作业速度等因素的共同影响。

残膜回收机作业时,秸秆、土壤的粘附特性与残膜的柔性特征相互耦合,直接影响残膜回收机的作业质量[6]。当土壤比例增加时,捡拾阻力和输送负荷增大,膜捆夹土比例上升,容易导致含杂率增加并降低后续储运效率;当秸秆比例增加时,柔性秸秆易与残膜发生缠绕和架桥,增加输送堵塞和卷捆不均匀的风险;当残膜本身占比较高且片状连续性较好时,更有利于膜芯形成和持续卷绕,而残膜高度破碎时则更易在捡拾和卷捆过程中产生掉落和外抛。土壤粘附会增强残膜与秸秆的裹带效应,秸秆缠绕又会改变残膜在机内的受力与运动路径,最终共同影响残膜回收率、膜捆含杂率和膜捆成型质量。仅依据单一物料或双组分物料开展建模,难以准确反映新疆棉田残膜回收的真实工况。

当前针对“秸秆-土壤-残膜”混合物的复杂特性研究较少。离散元法作为模拟颗粒物料运动与接触特性的核心仿真工具[7],已在农业物料仿真领域成熟应用。现有研究已实现单组分(棉花秸秆、耕后土壤)或双组分(玉米秸秆-土壤)物料离散元仿真参数标定研究,张佳喜等[8]针对新疆棉花秸秆,结合休止角测定与三点弯曲力学试验,结合 Hertz – Mindlin(no slip)与 Hertz – Mindlin with Bonding 模型,标定了棉秆颗粒间的粘结参数及秸秆与钢的接触参数,为纤维类农业物料仿真建模提供了可复用的参考方法;宋少龙等[9]聚焦新疆棉田耕后土壤,选用 Hertz – Mindlin 无滑动接触模型,通过通用旋转中心组合试验标定土壤-土壤、土壤-65Mn 钢的接触参数,开沟作业仿真与田间试验工作阻力相对误差小于 10.2%,验证了土壤离散元模型的工程适用性;田辛亮等[10]以黑土区玉米秸秆与土壤混料为对象,采用 Hertz – Mindlin with JKR 颗粒接触模型,通过 Plackett – Burman 试验与 Box – Behnken 响应面试验,标定得到土壤颗粒间及土壤-金属界面间的关键接触参数,仿真休止角与物理实测值相对误差仅 1.64%,为双组分农业混料仿真提供了可靠方法。

针对新疆棉田秆土膜三组分混合物离散元接触参数缺乏、混合物运动与成捆行为难以准确模拟的问题,本文以新疆棉田土壤、棉花秸秆和残膜为对象建立混合物离散元模型;通过休止角试验获取实测值,采用 Plackett – Burman 试验筛选关键接触参数,结合最陡爬坡试验和 Box – Behnken 响应面法优化参数组合,并通过仿真与物理试验结果对比验证参数标定结果的可靠性,为新疆棉田秆土膜混合物离散元仿真及残膜回收装备关键部件仿真优化提供参数依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本文研究对象为新疆棉田秸秆-土壤-残膜混合物,材料取自新疆维吾尔自治区塔城地区沙湾市商户地乡朱家庄二连收获后、播种前棉田(44°36′ N,

85°58′ E),土壤类型为沙性土壤,含水率 10.3%。所采集残膜为上一生长季覆膜后遗留于田间的地膜,期间经历半年的风吹日晒、昼夜温差及田间环境作用,属于典型的田间老化残膜。由于残膜回收机针对地表残膜回收作业,捡拾钉齿长度为 50 mm,故本研究选取 0 ~ 50 mm 表层作为采样深度。田间采样按 S 形路径设置采样点,满足随机性、等量取样与多点混合原则。采集一定量秸秆-土壤-残膜混合物样品,并对其进行分拣分离,分别获得土壤、秸秆和残膜试验材料。土壤、秸秆与残膜的本征参数已有诸多研究者完成系统测定与标定,本研究不再开展重复性测量工作,因此引用相关文献中已验证的土壤、秸秆及残膜本征参数[8-9,11],如表 1 所示,为后续秆土膜混合物离散元仿真模型构建与接触参数标定提供试验依据与数据基础。

表 1 试验材料本征参数

Tab. 1 Intrinsic parameters of test materials

材料	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	剪切模量/Pa
土壤	0.36	1 250	1.0×10^{6}
棉花秸秆	0.35	1 080	6.9×10^{8}
残膜	0.38	910	8.3×10^{8}
钢	0.30	7 850	7.9×10^{10}

1.2 试验方法

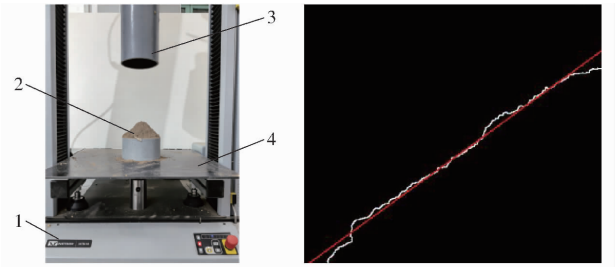
休止角能够反映物料在重力作用下形成稳定堆体时的宏观流动与堆积特征,是多接触参数共同作用下的综合响应,适合用于 DEM 基础参数初步标定,以休止角作为秆土膜混合物接触参数的评价指标。

采用“物理实测-数值仿真-统计寻优-试验验证”的参数标定流程,通过分体圆筒法[12]测定秆土膜混合物休止角实测均值,随后开展离散元仿真,利用 Design-Expert 软件进行 Plackett - Burman 试验设计,筛选对休止角具有显著影响的关键接触参数;结合最陡爬坡方法缩小关键参数的取值区间;采用 Box - Behnken 响应面法,建立休止角与关键参数的二次回归模型,并进行参数组合寻优。将寻优参数进行离散元重复试验,对比实际休止角与仿真休止角的相对误差,验证标定结果的可靠性。

1.3 棉花秸秆-土壤-残膜混合物休止角物理试验

试验前先对材料进行预处理,为了消除秸秆长度差异导致的试验干扰,保障试验重复性与后续参数标定的准确性,将棉花秸秆裁剪为每段 20 mm[13],为消除残膜不规则形态对堆积过程中接触作用的影响,避免因残膜集中堆积、嵌入土壤颗粒导致的测定误差,将残膜裁剪为 10 mm × 20 mm、20 mm × 20 mm、20 mm × 30 mm[14-15] 3 种规格。

为获取秆土膜混合物的休止角,在 INSTRON 34TM - 10 型万能试验机上安装钢制圆筒与钢板构成试验系统。高 300 mm、内径 100 mm 的钢制圆筒置于钢板中央,填充混合物后以速度 0.05 m/s 匀速提升圆筒,使物料自由下落并逐步形成稳定堆体。稳定后采集混合物堆正视图像,并通过图像灰度处理与轮廓提取获取堆体边界,如图 1 所示,利用直线拟合求得休止角。共进行 10 次重复试验,得到平均休止角为 33.97°。



(a) 休止角物理试验 (b) 休止角线性拟合曲线

图 1 休止角物理试验与线性拟合曲线

Fig. 1 Angle of repose physics test and linear fitting curve

1. 万能试验机 2. 秆土膜混合物堆 3. 钢制圆筒 4. 钢板

2 休止角仿真试验

2.1 接触模型选取

基于棉田土壤沙性强、含水率低、颗粒间粘附力弱的物理特性[9],在模拟土壤、秸秆与金属材料三者间的接触碰撞时,采用 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型。该模型不考虑颗粒间的相互吸引力,主要依赖摩擦作用反映接触行为,能够描述此类低粘附力、干燥松散物料间的相互作用。考虑到残膜具有柔性变形与延展特征,为在离散元下反映其粘结连续特性,本文选用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型建立残膜。该模型将残膜视为由粘结键连接的颗粒集合体,键在断裂前可传递法向与切向的力与力矩,从而模拟残膜材料的拉伸、弯曲及剪切行为。其力与力矩的增量计算公式为

$$\delta F_n = -v_n S_n A \delta t \tag{1}$$

$$\delta F_t = -v_t S_t A \delta t \tag{2}$$

$$\delta M_n = -\omega_n S_t J \delta t \tag{3}$$

$$\delta M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta t \tag{4}$$

其中粘结键截面几何参数由等效粘结半径 R_B 确定,即

$$A = \pi R_B^2 \tag{5}$$

$$J = \frac{1}{2}\pi R_B^4 \tag{6}$$

式中 δM_n、δM_t——法向弯矩增量与切向扭矩增量,N·m

δF_n、δF_t——法向力增量与切向力增量，N

v_n、v_t——两颗粒间的法向相对速度与切向相对速度，m/s

ω_n、ω_t——法向相对角速度与切向相对角速度，rad/s

S_n、S_t——法向刚度和切向刚度，N/m^3

A——两个颗粒间的接触面积，m^2

J——颗粒粘结键截面的惯性矩，m^4

R_B——颗粒间粘结半径，m

δt——仿真时间步长，s

当颗粒间距大于预设粘结半径或其受到的外力超过了粘结键承受极限，Bond 连接将发生不可逆的断裂。Bond 键的法向应力和切向应力断裂判别分别为[14]

$$\sigma_{max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J}R_B \tag{7}$$

$$\tau_{max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J}R_B \tag{8}$$

式中　σ_{max}——临界法向应力，Pa

τ_{max}——临界切向应力，Pa

上述公式描述了 Bond 键在变形过程中所产生的抗力与抗力矩。当颗粒间的相对位移或转动导致键内应力超过设定的临界法向应力或临界切向应力时，键发生断裂，此后颗粒恢复为 Hertz－Mindlin 接触。此建模方法可较好地模拟残膜在受力时的连续变形、应力传递及最终断裂的连续过程，适用于柔性薄膜类材料的仿真。建模时，将残膜化为由颗粒单元形成的薄层结构，利用 Bond 键在相邻颗粒之间建立连接关系，以此确保所构建模型能够体现出残膜应有的延展性与柔韧性，从而模拟残膜实际的物理特性。Bonding 模型参数设置为法向刚度 2.08×10^8 N/m^3、切向刚度 4×10^7 N/m^3、临界法向应力 7.25×10^6 Pa、临界切向应力 1.064×10^6 Pa，粘结半径是颗粒半径的 1.2 倍[16－17]。

2.2　仿真模型建立

颗粒粒径过小将导致计算量激增，而过大可能降低仿真的真实性。为缩短仿真计算时间并兼顾结果可靠性，在 DEM 中将土壤颗粒采用球形等效，并对粒径进行适度尺度放大，使仿真堆积形态与实测堆积形态在宏观上相吻合[18]，最终，土壤颗粒直径分别为 2 mm（76.17%）、3 mm（13.38%）、4 mm（10.45%）3 种，模型如图 2 所示。

棉花秸秆整体呈近似圆柱形细长结构。参考已有的秸秆离散元模型建模方法[13－19]，结合棉秆的实际构造，使用颗粒群构建棉秆表皮及其内部组织。通过粘结不同直径的颗粒单元，建立长度为 20 mm 的棉秆模型。依据实测棉秆直径分布，设置 5～10 mm 6 种直径模型，生成比例分别为 1.77%、21.77%、39.38%、26.95%、9.29%和 0.84%。该比例由棉花秸秆裁剪测量后的统计结果确定。为平衡计算效率与宏观堆积行为需求，本文对棉秆模型进行简化。在保留秸秆整体外形尺寸的基础上，将木质部与髓部采用相同类型颗粒构建，如图 3 所示。该模型适用于混合物堆积与输送过程中的接触与运动行为模拟，不用于表征秸秆内部组织的局部力学破坏。

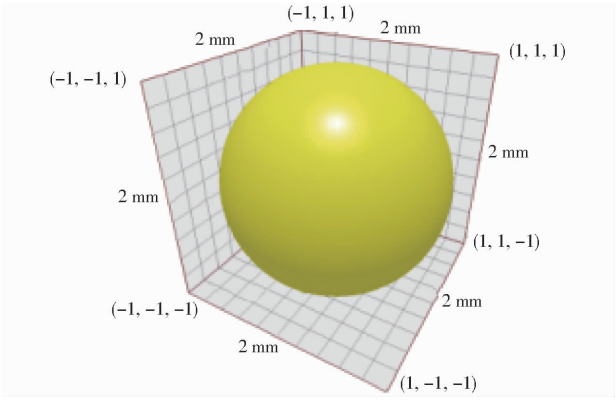


图 2　土壤颗粒模型（2 mm）

Fig. 2　Soil particle model (2 mm)

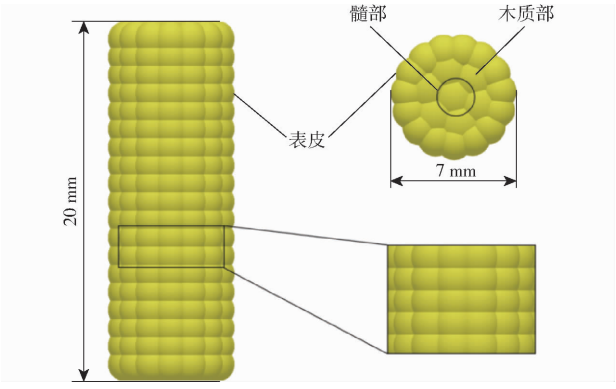


图 3　棉秆颗粒模型（7 mm×20 mm）

Fig. 3　Cotton stalk pellet model (7 mm×20 mm)

参照 GB 13735—2017《聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜》中地膜标称厚度不小于 0.01 mm 且耐候期超过 180 d 的规定，考虑到采用此厚度的残膜会导致颗粒数量大幅增加，消耗极大的计算资源。为保证仿真效率且不影响结果有效性，对模型进行简化，将残膜厚度等比例放大到 1 mm，残膜平面尺寸设定为 20 mm×10 mm、20 mm×20 mm 及 20 mm×30 mm 3 种规格[14－15,20]。以 20 mm×10 mm 规格为例，如图 4 所示。

仿真采用分体圆筒法，圆筒内径 100 mm，高度 300 mm[8]。在建立离散元模型并设定材料接触参数后进行计算，颗粒以 dynamic 模式生成，土壤、残膜、秸秆按分层交错方式装填圆筒[10]。以速度

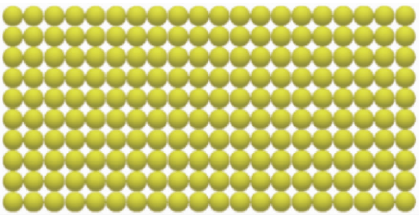
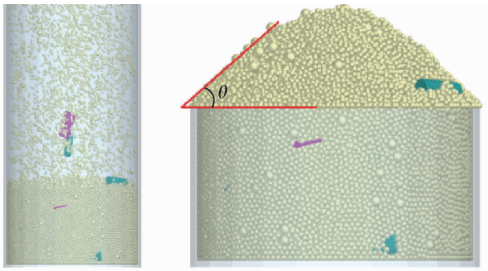


图 4 残膜颗粒模型(20 mm × 10 mm)

Fig. 4 Residual plastic film particle model (20 mm × 10 mm)

0.05 m/s匀速提升圆筒,物料在失去约束后自然坍落成堆;待混合物堆轮廓稳定后测量休止角 θ,如图 5 所示。



(a) 颗粒填充阶段 (b) 颗粒稳定堆积阶段

图 5 土壤-秸秆-残膜混合物堆积仿真试验

Fig. 5 Simulation test of soil - straw - residual plastic film mixed material accumulation

2.3 仿真参数设置

离散元仿真接触参数取值采取文献引用与物理试验相结合的方法确定。对于残膜-残膜、秸秆-秸秆等同质物料间接触特性,以及土壤-钢、秸秆-钢及土壤-残膜的接触参数,已有较多成熟的研究成果和试验数据可供参考,因此本文首先根据文献[8-9,11,14,21-24]确定上述物料的参数取值范围。由于秆土膜混合物中土壤颗粒数量占主导,残膜与秸秆所占比例相对较低,且残膜-残膜、秸秆-秸秆同质接触对混合物整体堆积特性影响有限,因此并未将其作为优化对象,而是依据前期研究及相关文献结果取定值处理,以减少试验因素数量并提高参数标定效率。考虑到土壤、秸秆和残膜间接触参数受含水率、残膜老化状态及作业条件影响,直接采用文献数据存在一定局限。因此结合材料的实际状态,对相关参数范围进行了文献筛选与必要的物理测定,获取适用于本研究工况的参数范围,见表 2。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

项目	参数	数值
土壤-土壤	碰撞恢复系数	0.20 ~ 0.60
	静摩擦因数	0.30 ~ 0.70
	动摩擦因数	0.10 ~ 0.50
土壤-残膜	碰撞恢复系数	0.20 ~ 0.80
	静摩擦因数	0.20 ~ 0.60
	动摩擦因数	0.12 ~ 0.60
土壤-秸秆	碰撞恢复系数	0.10 ~ 0.50
	静摩擦因数	0.40 ~ 0.60
	动摩擦因数	0.10 ~ 0.30
土壤-钢	碰撞恢复系数	0.28 ~ 0.60
	静摩擦因数	0.30 ~ 0.70
	动摩擦因数	0.05 ~ 0.25
残膜-秸秆	碰撞恢复系数	0.30 ~ 0.90
	静摩擦因数	0.50 ~ 0.70
	动摩擦因数	0.20 ~ 0.60
残膜-钢	碰撞恢复系数	0.10 ~ 0.90
	静摩擦因数	0.40 ~ 0.60
	动摩擦因数	0.10 ~ 0.50
秸秆-钢	碰撞恢复系数	0.30 ~ 0.70
	静摩擦因数	0.28 ~ 0.60
	动摩擦因数	0.02 ~ 0.10
残膜-残膜	碰撞恢复系数	0.10
	静摩擦因数	0.437
	动摩擦因数	0.397
秸秆-秸秆	碰撞恢复系数	0.50
	静摩擦因数	0.41
	动摩擦因数	0.06

3 试验设计与分析

3.1 Plackett-Burman 试验设计

为筛选影响秆土膜混合物休止角的主要接触参数,采用 Design-Expert 13 软件中的 Plackett-Burman 试验设计模块开展因素筛选试验。根据前期预试验、物理试验及相关文献确定各接触参数的取值范围,选取 21 个接触参数作为待筛选因素,并建立因素编码表,见表 3。各因素分别设置为低水平(-1)、中心水平(0)和高水平(1)。以仿真试验获得的秆土膜混合物休止角为响应指标,通过比较不同因素水平下响应值变化,并结合方差分析结果判断各接触参数对休止角的影响显著性。在 24 组 Plackett-Burman 试验组合的基础上增设 3 组中心点,最终形成 27 组仿真试验。Plackett-Burman 试验因素组合及仿真结果见表 4,表中 $X_1 \sim X_{21}$ 为因素编码值。

应用 Design-Expert 软件,对表 4 所示的仿真结果进行统计分析,得到各因素对秆土膜混合物休止角影响的显著性排序,结果见表 5。在筛选的 21 个因素中有 9 个因素达到显著水平($P < 0.05$),其中 X_3、X_2、X_{20}、X_{17}、X_{18} 的单因素贡献率均超过 5%,分别是 34.69%、29.74%、7.99%、7.17%、5.82%,累计贡献度超过 85%,表明上述 5 个因素对休止角响应影响较大。因此,选取这 5 个参数作为后续最陡爬坡试验的优化因素,以进一步确定其较优取值区间。

表 3　仿真试验因素编码

Tab. 3　Factor coding for simulation experiments

参数	编码		
	-1	0	1
土壤-土壤碰撞恢复系数 x_1	0.20	0.40	0.60
土壤-土壤静摩擦因数 x_2	0.30	0.50	0.70
土壤-土壤动摩擦因数 x_3	0.10	0.30	0.50
土壤-残膜碰撞恢复系数 x_4	0.20	0.50	0.80
土壤-残膜静摩擦因数 x_5	0.20	0.40	0.60
土壤-残膜动摩擦因数 x_6	0.12	0.36	0.60
土壤-秸秆碰撞恢复系数 x_7	0.10	0.30	0.50
土壤-秸秆静摩擦因数 x_8	0.40	0.50	0.60
土壤-秸秆动摩擦因数 x_9	0.10	0.20	0.30
土壤-钢碰撞恢复系数 x_{10}	0.28	0.44	0.60
土壤-钢静摩擦因数 x_{11}	0.30	0.50	0.70
土壤-钢动摩擦因数 x_{12}	0.05	0.15	0.25
残膜-秸秆碰撞恢复系数 x_{13}	0.30	0.60	0.90
残膜-秸秆静摩擦因数 x_{14}	0.50	0.60	0.70
残膜-秸秆动摩擦因数 x_{15}	0.20	0.40	0.60
残膜-钢碰撞恢复系数 x_{16}	0.10	0.50	0.90
残膜-钢静摩擦因数 x_{17}	0.40	0.50	0.60
残膜-钢动摩擦因数 x_{18}	0.10	0.30	0.50
秸秆-钢碰撞恢复系数 x_{19}	0.30	0.50	0.70
秸秆-钢静摩擦因数 x_{20}	0.28	0.44	0.60
秸秆-钢动摩擦因数 x_{21}	0.02	0.06	0.10

3.2　最陡爬坡试验

依据 Plackett－Burman 试验筛选结果，确定 5 个主要影响参数（土壤-土壤动摩擦因数、土壤-土壤静摩擦因数、秸秆-钢静摩擦因数、残膜-钢静摩擦因数和残膜-钢动摩擦因数），开展最陡爬坡试验[10]，以休止角仿真值相对实测值的相对误差作为评价指标，确定土壤-秸秆-残膜与接触材料间接触参数的较优范围，相对误差 y 计算公式为

$$y=\frac{|\theta_1-\theta_0|}{\theta_0}\times 100\% \tag{9}$$

式中　θ_0——秆土膜混合物实际休止角，(°)

θ_1——秆土膜混合物仿真休止角，(°)

仿真过程中除 X_2、X_3、X_{17}、X_{18}、X_{20}外，其他因素均取表 3 所列范围的中间水平，最陡爬坡试验设计及结果如表 6 所示。

分析表 6 最陡爬坡试验结果，物理休止角为 33.97°，介于 1 号与 2 号仿真休止角之间（高于 1 号、低于 2 号）。因此，选取 1 号与 2 号试验对应的因素水平分别作为响应面试验的低水平与高水平。土壤-土壤静摩擦因数、土壤-土壤动摩擦因数、残膜-钢静摩擦因数、残膜-钢动摩擦因数以及秸秆-钢静

表 4　Plackett－Burman 因素组合设置及仿真结果

Tab. 4　Factor settings in Plackett－Burman design and corresponding simulation results

序号	因素																					休止角/(°)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	
1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	35.93
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	33.45
3	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	36.59
4	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	35.85
5	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	33.95
6	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	34.48
7	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	35.51
8	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	27.57
9	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	46.37
10	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	30.31
11	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	29.36
12	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	70.99
13	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	64.81
14	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	34.54
15	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	50.24
16	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	36.90
17	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	53.33
18	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	37.79
19	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	31.04
20	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	43.78
21	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	34.19
22	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	37.38
23	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	32.99
24	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	39.48
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45.70
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45.75
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45.83

表 5 Plackett – Burman 筛选试验结果

Tab. 5 Results of Plackett – Burman screening test

试验因素	平方和	贡献率/%	P	显著性排序
X_3	922.11	34.69	0.002 4	1
X_2	790.62	29.74	0.002 8	2
X_{20}	212.29	7.99	0.010 2	3
X_{17}	190.40	7.17	0.011 3	4
X_{18}	154.66	5.82	0.013 9	5
X_8	105.46	3.97	0.020 2	6
X_9	66.09	2.49	0.031 6	7
X_4	54.36	2.05	0.038 1	8
X_{10}	47.85	1.80	0.042 9	9
X_{15}	34.55	1.30	0.058 1	10
X_{21}	25.62	0.96	0.076 0	11
X_{14}	17.35	0.65	0.106 7	12
X_6	7.73	0.29	0.201 3	14
X_1	7.45	0.28	0.206 9	13
X_{11}	6.06	0.23	0.238 6	15
X_7	3.71	0.14	0.323 0	16
X_{16}	3.57	0.13	0.330 1	17
X_5	2.01	0.08	0.440 0	18
X_{19}	0.636 3	0.02	0.644 2	20
X_{12}	0.631 0	0.02	0.645 5	19
X_{13}	0.000 1	≈0	0.995 0	21

表 6 最陡爬坡试验方案及结果

Tab. 6 Scheme and results of the steepest ascent test

序号	因素					休止角/(°)
	x_2	x_3	x_{17}	x_{18}	x_{20}	
1	0.30	0.10	0.40	0.10	0.28	28.64
2	0.40	0.20	0.45	0.20	0.36	40.39
3	0.50	0.30	0.50	0.30	0.44	47.73
4	0.60	0.40	0.55	0.40	0.52	57.03
5	0.70	0.50	0.60	0.50	0.60	55.48

摩擦因数的优化区间分别确定为 0.30 ~ 0.40、0.10 ~ 0.20、0.40 ~ 0.45、0.10 ~ 0.20 和 0.28 ~ 0.36。

3.3 Box – Behnken 试验

以土壤–土壤静摩擦因数、土壤–土壤动摩擦因数、残膜–钢静摩擦因数、残膜–钢动摩擦因数、秸秆–钢静摩擦因数为试验因素,秆土膜混合物休止角为响应指标,开展五因素三水平试验。试验方案及仿真结果见表 7。对结果进行多元回归拟合,建立休止角与各试验因素间的回归方程

$$\begin{aligned}Y = &-104.00 + 60.56x_2 + 698.94x_3 - 19.51x_{17} + \\ &38.91x_{18} + 478.95x_{20} + 452.00x_2x_3 + \\ &408.00x_2x_{17} + 138.00x_2x_{18} - 293.75x_2x_{20} - \\ &826.00x_3x_{17} - 39.00x_3x_{18} - 731.25x_3x_{20} - \\ &228.00x_{17}x_{18} - 350.00x_{17}x_{20} - 80.00x_{18}x_{20} - \\ &297.00x_2^2 - 794.33x_3^2 + 153.33x_{17}^2 + \\ &103.00x_{18}^2 - 147.92x_{20}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

表 7 Box – Behnken 试验方案及结果

Tab. 7 Box – Behnken experimental design and results

序号	因素					休止角/(°)
	x_2	x_3	x_{17}	x_{18}	x_{20}	
1	0.40	0.15	0.45	0.15	0.32	36.69
2	0.35	0.15	0.425	0.20	0.28	36.29
3	0.35	0.15	0.45	0.20	0.32	37.34
4	0.35	0.15	0.45	0.15	0.28	37.12
5	0.35	0.15	0.425	0.15	0.32	37.13
6	0.35	0.20	0.425	0.10	0.32	37.44
7	0.35	0.20	0.45	0.15	0.32	37.11
8	0.35	0.15	0.425	0.15	0.32	38.66
9	0.30	0.15	0.425	0.15	0.36	36.36
10	0.35	0.20	0.425	0.15	0.28	37.83
11	0.40	0.15	0.40	0.15	0.32	37.34
12	0.30	0.15	0.425	0.20	0.32	36.56
13	0.35	0.20	0.425	0.20	0.32	35.40
14	0.40	0.20	0.425	0.15	0.32	38.34
15	0.35	0.15	0.425	0.10	0.36	39.09
16	0.40	0.15	0.425	0.15	0.28	38.08
17	0.35	0.20	0.425	0.15	0.36	35.88
18	0.35	0.15	0.425	0.15	0.32	37.64
19	0.30	0.15	0.45	0.15	0.32	35.00
20	0.40	0.10	0.425	0.15	0.32	33.53
21	0.35	0.15	0.40	0.15	0.28	36.83
22	0.35	0.15	0.45	0.15	0.36	36.97
23	0.40	0.15	0.425	0.20	0.32	38.84
24	0.30	0.15	0.425	0.10	0.32	37.62
25	0.35	0.15	0.425	0.20	0.36	36.78
26	0.35	0.10	0.425	0.10	0.32	35.16
27	0.30	0.10	0.425	0.15	0.32	32.74
28	0.35	0.10	0.425	0.15	0.28	32.62
29	0.35	0.15	0.40	0.15	0.36	38.08
30	0.40	0.15	0.425	0.10	0.32	38.52
31	0.35	0.15	0.425	0.10	0.28	37.96
32	0.35	0.10	0.425	0.20	0.32	33.51
33	0.35	0.10	0.45	0.15	0.32	34.92
34	0.35	0.20	0.40	0.15	0.32	39.90
35	0.35	0.15	0.425	0.15	0.32	37.62
36	0.30	0.15	0.425	0.15	0.28	33.99
37	0.35	0.10	0.40	0.15	0.32	33.58
38	0.30	0.15	0.40	0.15	0.32	37.69
39	0.35	0.15	0.425	0.15	0.32	37.50
40	0.40	0.15	0.425	0.15	0.36	38.10
41	0.35	0.15	0.45	0.10	0.32	37.80
42	0.35	0.10	0.425	0.15	0.36	36.52
43	0.35	0.15	0.425	0.15	0.32	37.12
44	0.35	0.15	0.40	0.10	0.32	37.72
45	0.30	0.20	0.425	0.15	0.32	33.03
46	0.35	0.15	0.40	0.20	0.32	38.40

对试验结果进行方差分析,如表 8 所示。回归模型的 P 值小于 0.000 1,表明所建立的二次回归模型极显著;失拟项的 P 值为 0.120 7,大于 0.05,说

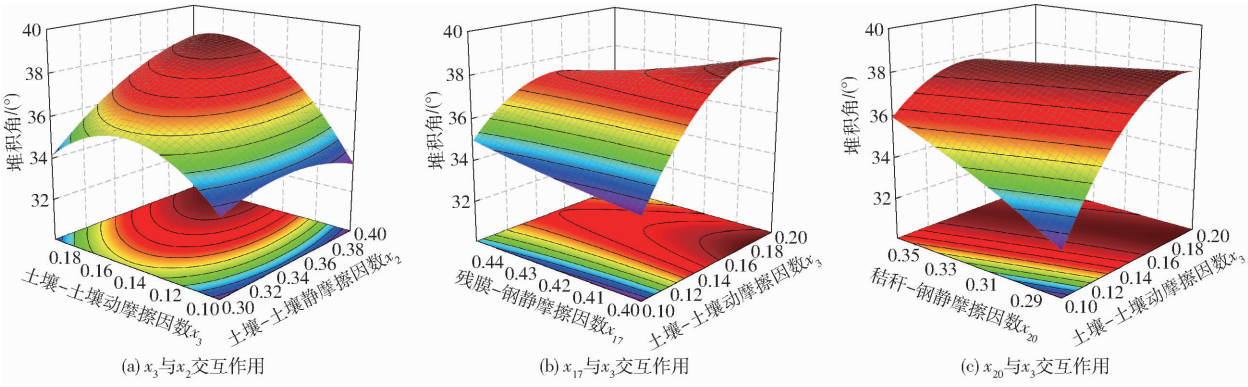
表 8　方差分析

Tab. 8　Analysis of variance

来源	平方和	均方	F	P
模型	124. 77	6. 24	7. 81	<0. 000 1
X_2	16. 91	16. 91	21. 17	0. 000 1
X_3	31. 22	31. 22	39. 09	<0. 000 1
X_{17}	2. 71	2. 71	3. 40	0. 077 2
X_{18}	4. 19	4. 19	5. 25	0. 030 7
X_{20}	3. 12	3. 12	3. 90	0. 059 4
X_2X_3	5. 11	5. 11	6. 39	0. 018 1
X_2X_{17}	1. 04	1. 04	1. 30	0. 264 6
X_2X_{18}	0. 476 1	0. 476 1	0. 596 1	0. 447 3
X_2X_{20}	1. 38	1. 38	1. 73	0. 200 5
X_3X_{17}	4. 26	4. 26	5. 34	0. 029 4
X_3X_{18}	0. 038 0	0. 038 0	0. 047 6	0. 829 1
X_3X_{20}	8. 56	8. 56	10. 71	0. 003 1
$X_{17}X_{18}$	0. 324 9	0. 324 9	0. 406 8	0. 529 4
$X_{17}X_{20}$	0. 490 0	0. 490 0	0. 613 5	0. 440 8
$X_{18}X_{20}$	0. 102 4	0. 102 4	0. 128 2	0. 723 3
X_2^2	4. 81	4. 81	6. 02	0. 021 4
X_3^2	34. 42	34. 42	43. 09	<0. 000 1
X_{17}^2	0. 080 2	0. 080 2	0. 100 4	0. 754 0
X_{18}^2	0. 578 7	0. 578 7	0. 724 5	0. 402 8
X_{20}^2	0. 488 8	0. 488 8	0. 612 0	0. 441 4
残差	19. 97	0. 798 7		
失拟项	18. 38	0. 919 1	2. 90	0. 120 7
误差	1. 59	0. 317 2		
总和	144. 74			

明失拟项不显著，模型与试验数据具有较好的拟合效果，可用于秆土膜混合物休止角的预测分析。一次项中，X_2 和 X_3 对休止角的影响均极显著，X_{18} 的影响显著，而 X_{17} 和 X_{20} 未达到显著水平，但表现出一定影响趋势。交互项中，X_2X_3、X_3X_{17} 和 X_3X_{20} 对模型响应具有显著影响，其余交互项均不显著。二次项中，X_2^2 和 X_3^2 分别达到显著和极显著水平，其中 X_3^2 的 F 值最大，表明土壤-土壤动摩擦因数对休止角的影响最为明显。

图 6 为显著交互项对秆土膜混合物休止角的响应曲面。由图 6a 可知，当土壤-土壤动摩擦因数 x_3 保持不变时，休止角随土壤-土壤静摩擦因数 x_2 的增大而增大；当 x_2 保持不变时，休止角随 x_3 的增大而增大，且沿 x_3 方向的曲面坡度更大。由图 6b 可知，残膜-钢静摩擦因数 x_{17} 与 x_3 的增加均会使休止角增大，但沿 x_3 方向的响应变化更明显。由图 6c 可知，x_3 和秸秆-钢静摩擦因数 x_{20} 增大时，休止角总体呈上升趋势，且沿 x_3 方向的响应变化最为明显。综合表 8 与图 6 可知，影响秆土膜混合物休止角变化的主要因素为土壤-土壤静摩擦因数、土壤-土壤动摩擦因数和残膜-钢动摩擦因数，其中土壤-土壤动摩擦因数是影响秆土膜混合物休止角变化的主导因素。



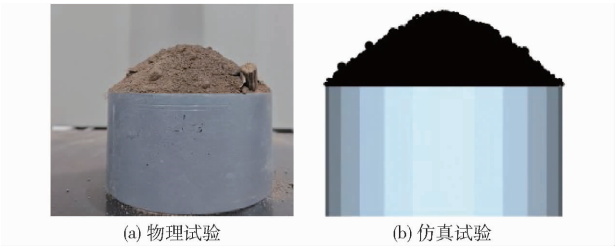
(a) x_3与x_2交互作用　(b) x_{17}与x_3交互作用　(c) x_{20}与x_3交互作用

图 6　显著交互项对休止角影响的响应曲面

Fig. 6　Response surfaces for significant interaction effects on angle of repose

3.4　参数优化及仿真验证

在因素水平范围内，利用 Design-Expert 软件对接触参数进行寻优。以秆土膜混合物物理休止角为目标值，得到一组与物理休止角相近的解：土壤间的静、动摩擦因数分别为 0. 329 和 0. 114；残膜与钢间的静、动摩擦因数分别为 0. 418 与 0. 150；秸秆与钢的静摩擦因数则为 0. 293。其余参数取其范围的中间值。以上述参数进行秆土膜混合物堆积仿真重复试验。结果显示，仿真休止角的平均值为 35. 11°，与实测值的相对误差为 3. 36%，表明标定参数具有较好的可靠性，结果对比如图 7 所示。



(a) 物理试验　(b) 仿真试验

图 7　仿真试验与物理试验对比

Fig. 7　Comparison of simulation and physical test results

4　结论

(1) 针对新疆棉田机械化作业仿真时，遇到的

秸秆-土壤-残膜三成分混合物参数缺失的问题,本研究构建了基于 Hertz - Mindlin(no slip)与 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型的离散元仿真模型。并通过堆积试验,测定该混合物的物理试验休止角为 33.97°,为仿真参数验证提供物理基准。

(2)通过 Plackett - Burman 试验设计,对 3 种物料及物料与接触材料间的 21 种接触参数进行显著性排序,结果表明有 9 个因素达到显著性水平($P < 0.05$),其中土壤-土壤静摩擦因数、土壤-土壤动摩擦因数、残膜-钢静摩擦因数、残膜-钢动摩擦因数以及秸秆-钢静摩擦因数 5 种接触参数累计贡献度超过 85%,是影响休止角的关键因素,其余接触参数对休止角影响较小,在后续仿真中取各自区间中值。

(3)对筛选出的 5 个贡献率较高的因素进行最陡爬坡试验,确定关键接触参数的较优取值区间;在此基础上,利用响应面法构建秆土膜混合物休止角与关键参数间的二次回归模型,并以实测休止角为目标值进行参数寻优。最终得到较优参数组合:土壤-土壤静摩擦因数和动摩擦因数分别为 0.329、0.114;残膜-钢静摩擦因数和动摩擦因数分别为 0.418、0.150;秸秆-钢静摩擦因数为 0.293。

(4)将上述参数进行离散元重复试验,结果显示仿真休止角均值为 35.11°,与物理试验值的相对误差为 3.36%,表明标定后的参数能够反映新疆棉田秆土膜混合物的堆积特性,该模型可为新疆棉田残膜回收装备关键部件的仿真优化提供数据参考。

参 考 文 献

[1] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2024.

[2] 罗凯, 袁盼盼, 靳伟, 等. 链筛式耕层残膜回收机设计与工作参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 19 - 27.
Luo Kai, Yuan Panpan, Jin Wei, et al. Design of chain-sieve type residual film recovery machine in plough layer and optimization of its working parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 19 - 27. (in Chinese)

[3] 胡灿, 杜鳌, 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)

[4] 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)

[5] 陈学庚, 温浩军, 颜利民, 等. 棉花生产全程机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2026, 57(7): 1 - 23.
Chen Xuegeng, Wen Haojun, Yan Limin, et al. Research progress in key technologies and equipment for full mechanization production of cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(7): 1 - 23. (in Chinese)

[6] 缑海啸, 祝国庆, 宋明慧, 等. 滚筒式斜向捡拾残膜回收装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(7): 144 - 154.
Gou Haixiao, Zhu Guoqing, Song Minghui, et al. Design and experiment of drum-type oblique pick-up residual film recovery device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(7): 144 - 154. (in Chinese)

[7] 李元超, 田辛亮, 赵岩, 等. 基于 Tavares 模型的多面体棉籽离散元参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 124 - 131, 220.
Li Yuanchao, Tian Xinliang, Zhao Yan, et al. Parameter calibration and experiment of polyhedral cottonseed discrete element based on Tavares model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 124 - 131, 220. (in Chinese)

[8] 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 Jiaxi, 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)

[9] 宋少龙, 汤智辉, 郑炫, 等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 63 - 70.
Song Shaolong, Tang Zhihui, Zheng Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 63 - 70. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 李佳莉, 王新忠, 张炳成, 等. 基于多特征综合分析的农用残膜柔性离散元模型构建方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 170 - 179.
Li Jiali, Wang Xinzhong, Zhang Bingcheng, et al. Construction method of flexible DEM model for agricultural residual film based on multi-feature comprehensive analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,

56(7)：170－179. (in Chinese)

[12] 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)

[13] Zhang B，Chen X，Liang R，et al. Calibration and test of contact parameters between chopped cotton stalks using response surface methodology[J]. Agriculture，2022，12(11)：1851.

[14] 申世龙，张佳喜，蒋永新，等. 基于离散元法的耕层残膜拉伸性能研究[J]. 农业机械学报，2024，55(7)：132－141.
Shen Shilong，Zhang Jiaxi，Jiang Yongxin，et al. Tensile properties of residual film in tillage layer based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(7)：132－141. (in Chinese)

[15] 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)

[16] Wang F，Dai F，Zhang F，et al. Simulation analysis and test on the effect of picking up the residual film of typical film lifting parts[J]. Agronomy，2023，13(2)：488.

[17] 段鑫驰. 水稻覆膜播种机关键机构的设计与试验[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2024.
Duan Xinchi. Design and experiment of key mechanisms of rice film-mulching seeder[D]. Shenyang：Shenyang Agricultural University，2024. (in Chinese)

[18] 武涛，黄伟凤，陈学深，等. 考虑颗粒间粘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)

[19] Liang R，Chen X，Zhang B，et al. Calibration and test of the contact parameters for chopped cotton stems based on discrete element method[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering，2022，15(5)：1－8.

[20] 解臣硕，康建明，彭强吉，等. 滚筒筛式膜杂分离装置数值模拟与参数优化[J]. 中国农机化学报，2024，45(4)：1－11.
Xie Chenshuo，Kang Jianming，Peng Qiangji，et al. Numerical simulation and parameter optimization of trommel screen type membrane and impurity separation device[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization，2024，45(4)：1－11. (in Chinese)

[21] 靳伟，丁幼春，农峰，等. 抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(11)：71－82.
Jin Wei，Ding Youchun，Nong Feng，et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth and bar for residual film-soil-straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(11)：71－82. (in Chinese)

[22] 张雁鸿. 基于膜土结合力分析的压秆式棉田残膜回收机的设计与试验[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2025.
Zhang Yanhong. Design and experiment of stalk pressing type cotton field residual film collector based on film-soil binding force analysis[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University，2025. (in Chinese)

[23] Peng Q，He X，Li G，et al. Calibrating and testing the discrete element parameters for peanut seedling film[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2024，17(5)：65－72.

[24] 蒋德莉. 随动式残膜回收机清杂系统研究与试验[D]. 石河子：石河子大学，2020.
Jiang Deli. Research and experiment on cleaning system of profile modeling residual film recovery machine[D]. Shihezi：Shihezi University，2020. (in Chinese)