doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.015

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

李佳莉[1,2]　王新忠[3]　张炳成[1,2]　冯　震[4]　蒙贺伟[1,2]　坎　杂[1,2]

(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832002;2.绿洲特色经济作物生产机械化教育部工程研究中心,石河子 832002;
3.江苏大学农业工程学院,镇江 212013;4.新疆德农科技有限公司,双河 841007)

摘要:由于缺乏柔性薄膜离散元模型构建方法,对薄膜类物料在机械装置上运动特性的模拟研究受到限制,提出了一种基于柔性变形特性、摩擦特性及空气动力学特性的多特征综合分析的薄膜类物料离散元模型构建方法,以农用塑料残膜为例对其有效性进行了评价。通过物理试验测得单片塑料残膜悬垂系数、静摩擦因数、摩擦角、动摩擦因数及悬浮速度分别为 0.397、0.417、22.636°、0.373 及 2.327 m/s。利用 Rocky 仿真软件的 Shell 模型建立了残膜离散元模型,以悬垂系数、摩擦角及悬浮速度为响应指标,采用因子筛选试验、最陡爬坡试验和中心组合试验确定最佳参数组合为:基本壳体单元面积 174.017 mm^2、弹性比 0.850、密度 238.583 kg/m^3、杨氏模量 5.676 MPa、膜间静摩擦因数 0.437 和膜间动摩擦因数 0.397。最后,通过残膜料群流动试验开展了模型可靠性验证。结果表明,残膜料群悬浮速度模拟值与物理值相对误差为 3.18%,吻合较好;残膜料群在气流作用力、膜间摩擦力及重力作用下表现的团聚迁移、悬停、膨胀松动及料群解体等动态行为与物理试验结果一致,证明了建立的残膜柔性模型具有可行性和适用性。

关键词:农用残膜;柔性模型;多特征;参数标定;流动状态;离散元

中图分类号:S223.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0170-10　　**OSID**:

Construction Method of Flexible DEM Model for Agricultural Residual Film Based on Multi-feature Comprehensive Analysis

LI Jiali[1,2]　WANG Xinzhong[3]　ZHANG Bingcheng[1,2]　FENG Zhen[4]　MENG Hewei[1,2]　KAN Za[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832002, *China*
2. *Engineering Research Centre for Production Mechanization of Oasis Characteristic Cash Crops, Ministry of Education, Shihezi* 832002, *China*
3. *College of Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*
4. *Xinjiang Denong Science and Technology Co., Ltd., Shuanghe* 841007, *China*)

Abstract: Due to the lack of film model construction methods, the motion characteristics numerical simulation of the flexible materials on mechanical equipment is limited. A flexible model construction method based on a multi-feature comprehensive analysis of deformation, friction and aerodynamic characteristics was proposed, and its reliability was verified by using the plastic film as a study case. Firstly, the drape coefficient, static friction coefficient, friction angle, dynamic friction coefficient and suspension velocity of the film were measured to be 0.397, 0.417, 22.636°, 0.373 and 2.327 m/s, respectively, by physical tests. Based on this, a film model was constructed by using the custom shell model of Rocky software. Taking the drape coefficient, friction angle and suspension velocity as the response indexes, the optimal parameter combination of the model was determined as the basic shell element area of 174.017 mm^2, elastic ratio of 0.850, density of 238.583 kg/m^3, Young's modulus of 5.676 MPa, film-film static friction coefficient of 0.437, and film-film dynamic friction coefficient of 0.397. Finally, the film group flow test was conducted to verify the general applicability of the model. It showed that the relative error between the simulated suspension velocity and the physical value was

收稿日期:2024-12-19　修回日期:2025-01-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD1700500)、国家自然科学基金项目(52360022)、江苏省省部共建现代农业装备与技术协同创新中心项目(XTCX2006)、兵团农业技术攻关项目(2023AA401)和兵团科技计划项目(2024DA016、2024YD014)

作者简介:李佳莉(1996—),女,博士生,主要从事农业机械化技术研究,E-mail:lee_jsnt@163.com

通信作者:坎杂(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化技术研究,E-mail:kz-shz@163.com

3.18%, and the behaviour of migration, suspension, expansion loosening and disintegration were consistent with the physical test, indicating that the flexible model has feasibility and applicability.

Key words: agricultural residual film; flexible model; multi-feature; parameter calibration; flow state; discrete element method

0　引言

残膜污染是典型的农业面源污染类型之一[1]，对新疆农业生态环境保护及可持续发展构成了严重威胁。回收利用是解决残膜污染的主要途径[2]。机械回收的残膜夹杂大量棉秆、泥土等杂质，需分离后，才能进行资源化利用[3]。然而，膜杂混料专用分离技术及装备的匮乏已成为制约残膜资源化利用的瓶颈之一，主要原因为残膜与棉秆、泥土等杂质在分离装备上的复杂运动尚不明晰。因此，对物料运动特性的研究是提高膜杂分离质量的关键[4]。

随着计算机模拟技术的日益提高，离散元方法成为研究农业物料运动学特性的重要手段[5]。当使用离散元技术时，建立与实际物料具有相同物理力学性能的仿真模型，是准确模拟物料运动过程的前提[6]。目前，相关学者已建立棉秆、泥土等物料的离散元仿真模型[7-8]。但关于构建残膜的柔性离散元模型的研究较少。文献[9]通过 YADE 软件构建了柔性可变形的地膜模型，验证了与实际地膜在拉伸和撕裂过程中变形特征的一致性，但对地膜在单边约束或无约束条件下的受力变形行为没有研究，无法准确模拟地膜与其他物体接触时的自变形行为。文献[10]采用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型构建了耕层残膜模型。但由颗粒球填充的模型计算量大，不利于后续料群运动分析的仿真模拟。此外，实际的残膜杂质分离作业中通常使用筛分与气流协作的分离手段，涉及的残膜物料特性主要包括摩擦特性和空气动力学特性，单一的响应值不能反映残膜在不同作用力下的真实状态。

基于此，本文提出一种多特征综合分析的柔性残膜离散元模型构建方法。以悬垂系数、摩擦角及悬浮速度为响应值，通过因子筛选试验、最陡爬坡试验和中心组合试验对模型的关键参数进行校正，旨在构建与实物物理力学性能接近的柔性模型，同时，以期为其他大尺寸平面状柔性物料离散元模型构建与参数标定提供一种可靠的试验方法。

1　材料与方法

1.1　试验材料

残膜试验物料取自新疆生产建设兵团第五师八十五团场周边棉田机械化回收并由单轴破碎机破碎后的膜杂混料。相关试验于 2023 年 10 月在石河子大学农业农村部西北农业装备重点实验室进行。试验前，人工抖除残膜表面附着泥土，进行尺寸筛分（图 1），以最长边为依据进行归类。最长边在（0，5］mm 范围内的残膜属于微塑料[11]，很难通过机械进行筛分，故本文不予考虑。筛分结果表明，尺寸为（5，50］mm、（50，100］mm、（100，200］mm 及（200，+ ∞）mm 的残膜占比为 21.10%、51.81%、20.27% 和 6.82%。忽略表面黏附的灰尘，每片残膜平均厚度约为0.01 mm。

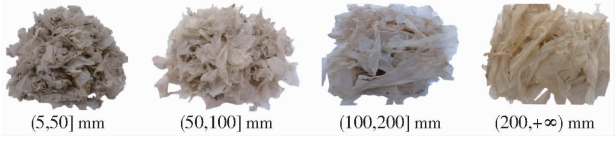


图 1　残膜试验物料

Fig. 1　Residual film test material

1.2　物理试验

残膜具有柔性大变形、临界速度小、流动性差等特征。采用悬垂试验测定残膜柔性变形能力，该试验是研究织物自重变形程度的常用方法[12]；采用悬浮试验测定残膜临界速度[13-15]；采用摩擦试验测定残膜与接触材料的摩擦因数，以表征其流动性[16]。

1.2.1　悬垂试验

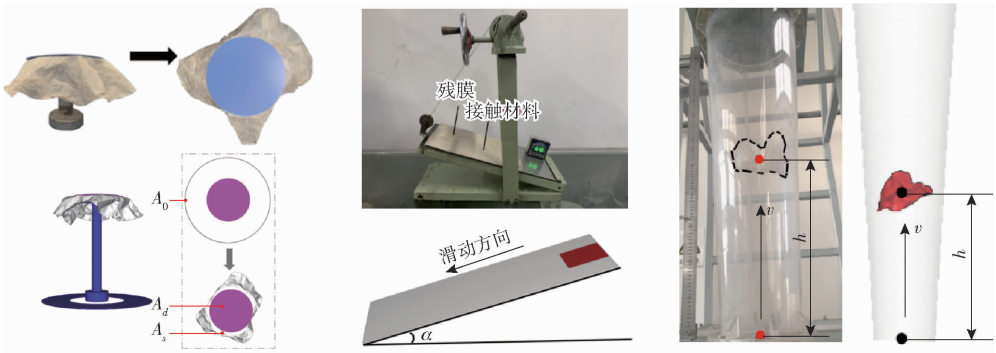
残膜的悬垂系数按照标准 GB/T 23329—2009《纺织品 织物悬垂性的测定》采用图像法测定（图 2a）[12]。制备直径为 24 cm 的圆形试样（标称厚度：0.01 mm），要求残膜试样表面无明显褶皱、孔洞。样本平均质量为 0.744 g。测试装置采用自制的悬垂系数试验台。将试样放于下夹持盘并使上夹持盘覆盖且同心。通过高清手机（型号：iPhone；系统：iOS 16.6）采集试样投影图像。将投影图作为草图图像导入 Solidworks 软件，利用草图工具对投影轮廓进行跟踪与投影面积测量。每个试样正、反两面各测 3 次，共 60 次取均值，残膜悬垂系数 D 计算公式为

$$D = \frac{A_s - A_d}{A_0 - A_d} \tag{1}$$

式中　A_s——残膜试样悬垂后投影面积，cm^2

A_d——夹持盘面积，cm^2

A_0——残膜试样初始面积，cm^2



(a) 悬垂试验 (b) 摩擦试验 (c) 悬浮试验

图 2 物性参数测定试验

Fig. 2 Determination of physical property parameters

1.2.2 摩擦试验

残膜的摩擦因数采用斜面法测定(图 2b)[14,17]。参考 GB/T 10006—2021《塑料 薄膜和薄片 摩擦系数的测定》,薄膜与接触材料有效接触尺寸为 63 mm×63 mm,制备残膜待测试样。分别制备残膜接触材料试样和亚克力板接触材料试样,要求能完全覆盖测试平台台面。测试装置采用自制的斜面仪。调整测试平台与水平面的夹角,当残膜开始产生滑动时,测量平台倾角,记为残膜与接触材料的摩擦角。残膜与待测材料间摩擦因数 μ 计算公式为

$$\mu = \tan\alpha \tag{2}$$

式中 α——残膜与待测材料间的摩擦角

每个待测试样进行 3 次重复试验,作为 1 组。对残膜、亚克力板表面的摩擦性能测试各进行 10 组,分别计算平均值。

1.2.3 悬浮试验

残膜悬浮速度采用气吸悬浮法测定(图 2c)[15],采用 1.2.1 节中的残膜圆形试样进行试验。测试装置为农业物料悬浮试验台(型号:WXS-1;生产厂家:黑龙江省农业机械工程科学研究院)。

试验时,将残膜试样放入悬浮试验台的筛网上,调整悬浮管道内的风速,观察残膜在锥形管内的运动状况,待残膜稳定在锥形管某一高度时,其中心位置所在高度记为当前悬浮高度,同时记录实时气流速度。对每个残膜样本重复 10 次试验,共进行 100 次。残膜料群流动试验与残膜悬浮试验方法一致。根据 1.1 节中残膜尺寸比例共取 5 g 不同尺寸分布的残膜,将其轻轻混合,作为残膜料群试样。试验重复 10 次。单片残膜及残膜料群悬浮速度 H 计算公式为

$$H = v\left(\frac{190}{190 + 2h\tan\beta}\right)^2 \tag{3}$$

式中 v——风速传感器反馈的实时气流速度,m/s

h——残膜悬浮高度,mm

β——锥形管锥度,取 3.5°

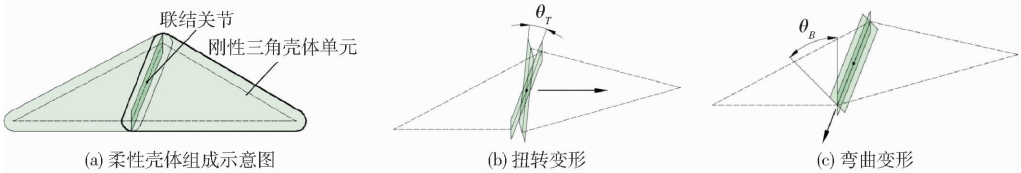
1.3 仿真试验

1.3.1 残膜离散元模型

Rocky 是一种基于离散元法的颗粒动力学仿真软件,可用于模拟颗粒和不连续材料的运动,其提供的 Shell 模型可用于模拟柔性薄片状物料[18]。

1.3.1.1 基础模型

通过 Spaceclaim 创建与物理试验一致的.stl 格式的片状模型,导入 Rocky 软件进行网格划分与多单元联结,从而实现柔性残膜模型构建,该模型由与残膜等厚度的二维三角网格组成,如图 3a 所示。当受到外界激励时,联结关节产生扭转变形(图 3b)或弯曲变形(图 3c),进而实现残膜在外力作用下的柔性变形模拟[18-19]。建立的残膜模型如图 4 所示。



(a) 柔性壳体组成示意图 (b) 扭转变形 (c) 弯曲变形

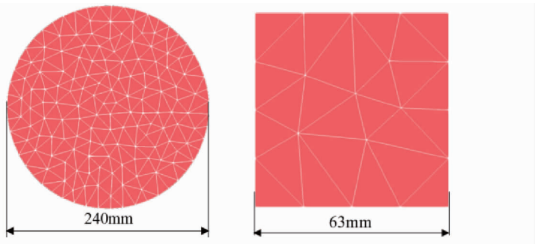
图 3 壳体组成及形变示意图

Fig. 3 Composition and deformation of shell

1.3.1.2 接触模型

考虑到残膜是一种可压缩、易变形材料,残膜模型的法向接触力模型确定为“Hysteretic Linear spring”模型[20];切向接触力模型确定为“Linear Spring Coulomb Limit”模型[21]。

法向接触模型方程为



(a) 残膜圆形模型　(b) 残膜方形模型

图 4　残膜离散元模型

Fig. 4　Discrete element models of residual film

$$F_n^t=\begin{cases}\max(K_{nl}s_n^t,F_n^{t-\Delta t}+K_{nu}\Delta s_n) & (\Delta s_n\geqslant 0)\\ \min(F_n^{t-\Delta t}+K_{nu}\Delta s_n,\lambda K_{nl}s_n^t) & (\Delta s_n<0)\end{cases} \tag{4}$$

其中　$\Delta s_n=s_n^t-s_n^{t-\Delta t}$

式中　F_n^t、$F_n^{t-\Delta t}$——颗粒处于时间 t、$t-\Delta t$ 的法向接触力，N

Δt——时间步长，s

Δs_n——时间步长内法向接触的重叠变化量，颗粒间靠近时为正，远离时为负，m

s_n^t、$s_n^{t-\Delta t}$——颗粒处于时间 t、$t-\Delta t$ 的重叠量，m

K_{nl}、K_{nu}——颗粒加载和卸载时接触刚度，N/m

λ——无量纲常数，取 0.001

切向接触模型方程为

$$\begin{cases}F_\tau^t=\min(|F_{\tau,e}^t|,f_kF_n^t)\dfrac{F_{\tau,e}^t}{|F_{\tau,e}^t|}\\ F_{\tau,e}^t=F_\tau^{t-\Delta t}-K_\tau\Delta s_\tau\end{cases} \tag{5}$$

式中　F_τ^t、$F_\tau^{t-\Delta t}$——颗粒处于时间 t、$t-\Delta t$ 的切向接触力，N

$F_{\tau,e}^t$——颗粒处于弹性摩擦时切向接触力，N

f_k——接触过程中滑动的摩擦因数

K_τ——切向刚度，N/m

Δs_τ——时间步长内切向接触重叠变化量，m

1.3.1.3　标定参数范围确定

残膜模型本征参数包含密度、杨氏模量、泊松比。设定残膜密度为 165 ~ 207 kg/m^3，杨氏模量为 1.2 ~ 1.8 MPa，泊松比为 0.232 ~ 0.348[14]。查阅亚克力板材料特性，亚克力板（PMMA）材料密度为 1 190 kg/m^3，杨氏模量为 2.6 GPa，泊松比为 0.32。残膜模型组成参数包含平均基本壳体单元面积和弹性比。初步设定残膜基本壳体单元面积为 25 ~ 50 mm^2、弹性比为 0.5 ~ 1。残膜模型接触参数包含静摩擦因数、动摩擦因数、恢复系数。根据 1.2.2 节试验结果，设定膜间静摩擦因数为 0.417 ~ 0.625、动摩擦因数为 0.373 ~ 0.559，残膜与亚克力板的静摩擦因数为 0.499 ~ 0.748、动摩擦因数为 0.458 ~ 0.687。残膜碰撞时会产生形变，近似于完全非弹性碰撞。因此，其恢复系数取 0.1。

1.3.2　仿真试验方法

1.3.2.1　悬垂仿真试验

以物理试验为基础（图 2a），在 Rocky 软件中，导入 Solidworks 软件中建立的悬垂装置. stl 模型文件。按照试验方案设置残膜离散元模型的本征参数、组成参数和接触参数。采用特定位置方式生成残膜离散元模型，导入 Microsoft Excel 软件中设定的残膜壳体位置信息. csv 格式文件。时间步长为 0.05 s，模拟时间为 5 s。待仿真结束后，提取残膜模型的最小俯视图，根据式（1）计算得残膜的悬垂系数。

1.3.2.2　摩擦仿真试验

以物理试验为基础（图 2b），将斜面. stl 模型文件导入 Rocky 软件中。按照试验方案设置残膜离散元模型参数和导入残膜位置信息。时间步长为 0.01 s，模拟时间为 60 s。斜面以恒角速度 0.01 rad/s 向上提升，直至残膜发生相对位移后停止计算。此时斜面与水平面的夹角为残膜与接触材料间的摩擦角。

1.3.2.3　悬浮仿真试验

以物理试验为基础（图 2c），采用 Rocky 离散元与 Fluent 流体力学仿真软件耦合的方法模拟残膜的悬浮试验过程。在求解过程中，颗粒相用力学平衡方程求解，气相用 Navier - Stokes 方程求解[22]。将 Solidworks 软件中建立的农业物料悬浮试验台. stl 模型文件导入 ANSYS Workbench 软件中抽取流体域，设置圆筒的底部为流场的气流速度入口，顶部为压力出口。将流体域模型进行非结构化网格划分。在 Fluent 求解模块中，选择瞬态时间模式，采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型，设置边界条件。按照试验方案在 Rocky 中设置残膜离散元模型参数，导入残膜位置信息。采用 Fluent Two Way 进行 Rocky DEM 和 Fluent 的耦合仿真，模拟时间为 50 s。待残膜模型在圆筒中稳定于某一位置时，停止计算。此时模型中心位置所处高度的气流速度为残膜离散元模型的悬浮速度。

1.3.3　试验方案设计

为确定影响残膜悬浮系数、摩擦角和悬浮速度的显著性参数，采用 Design-Expert 13 软件进行 Plackett - Burman Design（PBD）试验，初步筛选需要标定的关键参数。PBD 试验因素编码如表 1 所示。

基于 PBD 试验筛选出的因素，设置 5 个水平梯度，通过 Steepest climbing design（SCD）试验逼近因

表 1 PBD 因素编码

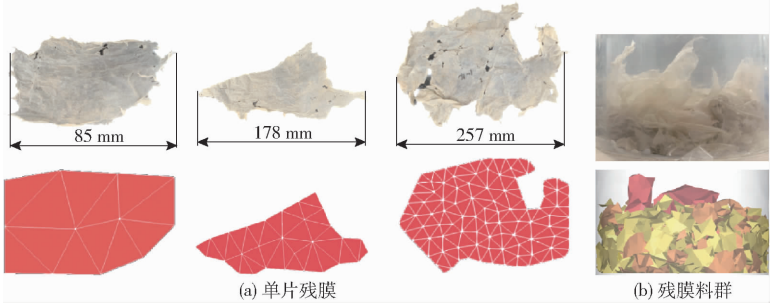
Tab. 1 PBD factors codes

因素	编码		
	-1	0	1
基本壳体单元面积 x_1/mm^2	25	37.5	50
弹性比 x_2	0.5	0.75	1
密度 x_3/(kg·m^{-3})	165	186	207
杨氏模量 x_4/MPa	1.2	1.5	1.8
泊松比 x_5	0.232	0.290	0.348
残膜-残膜静摩擦因数 x_6	0.417	0.521	0.625
残膜-残膜动摩擦因数 x_7	0.373	0.466	0.559
残膜-PMMA 静摩擦因数 x_8	0.499	0.6235	0.748
残膜-PMMA 动摩擦因数 x_9	0.458	0.5275	0.687

素的最优取值范围。为进一步明确因素的影响显著性、因素之间的交互作用,对 PBD 试验和 SCD 试验筛选出的关键参数及参数最优水平范围进行 Step central composite design (SCCD)试验,建立待标定参数与悬垂系数、摩擦因数及悬浮速度的回归模型。

1.3.4 验证试验

对单片残膜标定后的参数组合是否适用于残膜料群的模拟进行验证。在气流作用下,料群在悬浮试验台竖直管道内的集体运动行为与残膜的变形、膜间的摩擦及气流速度等均有关。通过残膜料群流动仿真试验,从料群悬浮速度及在气流作用下的动态变化过程两个角度与物理试验进行对比,验证标定参数的准确性。具体过程为:分别随机选取最长边在(50,100] mm、(100,200] mm 及在(200,+∞) mm内的残膜各 1 片(图 5)。基于优化后的参数组合,结合残膜实际形态,建立具有粒径分布的不规则柔性残膜模型(图 5a)。根据 1.1 节中残膜尺寸比例,在悬浮试验台仿真模型中,采用 Rocky 软件"Continuous injection"功能生成 5 g 残膜,自由堆积后构成残膜料群离散元模型(图 5b)。按照 1.3.2.3 节进行残膜料群的验证试验。悬浮状态下,残膜料群通常呈近球形的料团形态,取料团中心位置所处高度对应的气流速度为残膜料群的悬浮速度。



(a) 单片残膜 (b) 残膜料群

图 5 残膜实际形态与离散元模型

Fig. 5 Actual morphology and discrete element model of residual film

2 结果与分析

2.1 物理试验结果

如表 2 所示,残膜悬垂系数均值为 0.397;膜间静摩擦因数、动摩擦因数均值为 0.417、0.373,摩擦角为 22.636°。膜-PMMA 的静摩擦因数、动摩擦因数均值为 0.499、0.458;单片残膜悬浮速度均值为 2.327 m/s,料群悬浮速度均值为 2.987 m/s,与文献[13,23]测定的残膜悬浮速度基本吻合。

表 2 物理试验结果

Tab. 2 Physical test results

参数		最大值	最小值	平均值
悬垂系数		0.419	0.356	0.397
膜间	静摩擦因数	0.425	0.412	0.417
	动摩擦因数	0.383	0.364	0.373
膜-PMMA	静摩擦因数	0.507	0.487	0.499
	动摩擦因数	0.466	0.450	0.458
单片残膜悬浮速度/(m·s^{-1})		2.770	1.680	2.327
残膜料群悬浮速度/(m·s^{-1})		3.370	2.550	2.987

2.2 仿真试验结果

2.2.1 PBD 试验结果与分析

通过 PBD 试验对参数进行显著性筛选分析,试验设计及结果如表 3 所示,表中 X_1 ~ X_9 分别表示各因素 x_1 ~ x_9 编码值,Y_1、Y_2、Y_3 为悬垂系数、摩擦角、悬浮速度,方差分析结果如表 4 所示。

由方差分析可知,悬垂系数、摩擦角的模型 P 值均小于 0.05、悬浮速度的模型 P 值小于 0.01,表明模型均能很好地反映影响因子显著性情况;悬垂系数、摩擦角、悬浮速度失拟项均大于 0.05,说明建立的模型拟合度高。在悬垂系数试验结果方差分析中,X_2 的 P 值小于 0.01、X_4 的 P 值小于 0.05,表明弹性比和杨氏模量对残膜悬垂系数有显著影响,其中弹性比的影响极显著。在摩擦角试验结果方差分析中,X_6 的 P 值小于 0.01、X_7 的 P 值小于 0.05,表明静摩擦因数和动摩擦因数对残膜摩擦角影响显著。在悬浮速度试验结果方差分析中,X_1、X_3 的 P 值均小于 0.01,表明基本壳体单元面积和密度对残膜悬

表 3　Plackett－Burman Design 试验设计和结果

Tab. 3　Plackett－Burman Design trial design and results

序号	因素									Y_1	Y_2/(°)	Y_3/(m·s^{-1})
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9			
1	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	−1	0.287	30.753	1.403
2	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	0.268	30.710	1.410
3	1	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	0.152	30.626	1.493
4	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	1	0.332	28.986	1.165
5	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	0.110	30.626	1.296
6	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	0.197	31.258	1.146
7	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	0.169	28.943	1.367
8	1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	0.242	30.285	1.387
9	1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	0.226	28.855	1.546
10	−1	1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	0.403	22.490	1.301
11	1	−1	1	1	1	−1	−1	−1	1	0.197	22.294	1.543
12	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0.195	22.490	1.152
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.231	26.657	1.371
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.225	26.885	1.359

表 4　PBD 试验结果方差分析

Tab. 4　ANOVA of PBD test results

来源	悬垂系数 Y_1		摩擦角 Y_2		悬浮速度 Y_3	
	F	P	F	P	F	P
模型	9.20	0.047 1 *	6.41	0.028 7 *	47.09	0.004 5 **
X_1	5.29	0.105 0	0.801 7	0.411 6	254.99	0.000 5 **
X_2	53.52	0.005 3 **	1.01	0.360 3	7.32	0.073 4
X_3	0.428 1	0.559 6	1.50	0.274 8	148.68	0.001 2 **
X_4	12.59	0.038 1 *	0.898 9	0.386 6	1.81	0.270 9
X_5	0.265 7	0.641 8	1.18	0.326 6	4.00	0.139 2
X_6	6.95	0.077 9	27.08	0.003 5 **	0.589 2	0.498 6
X_7	0.796 0	0.438 0	12.41	0.016 9 *	0.320 6	0.610 8
X_8	0.141 9	0.731 5			5.78	0.095 6
X_9	2.84	0.190 5			0.292 8	0.626 0
失拟项	70.17	0.084 1	134.71	0.064 5	10.46	0.213 5
R^2	0.965		0.900		0.993	

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

浮速度影响极显著。因此，将 X_1、X_2、X_3、X_4、X_6、X_7 确定为待标定关键参数。

为了确定最陡爬坡试验因素水平，对因素 X_1、X_2、X_3、X_4、X_6、X_7进行单因素效应分析，如图 6 所示。

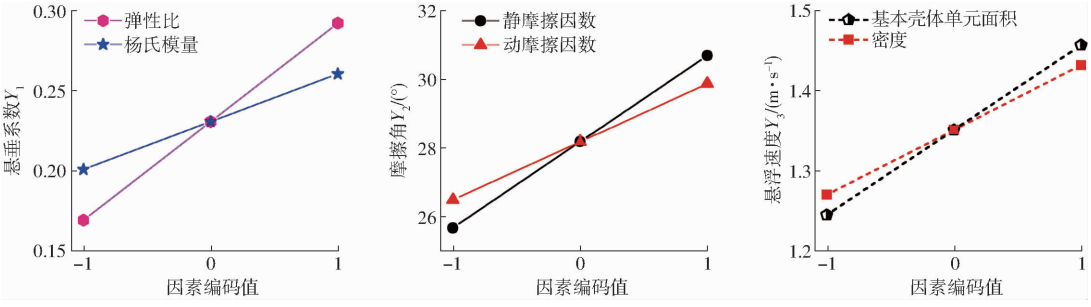


图 6　单因素项对评价指标的影响

Fig. 6　Influence of single factor item on evaluation index

在其余参数取中间水平值的情况下，X_2、X_4与 Y_1之间呈正相关，且物理试验值（$Y_1=0.363$）在筛选试验获得仿真值范围（$0.110<Y_1<0.403$）内。因此，最陡爬坡试验中 x_2最低水平值确定为 0.5、x_4最低水平值确定为 1.2 MPa。X_6、X_7与 Y_2之间呈正相关，且物理试验值（$Y_2=22.636°$）在筛选试验获得仿真值范围（$22.294°<Y_2<31.258°$）内。因此，最陡爬坡试验中 x_6最低水平值确定为 0.417、x_7最低水平值确定为 0.373。X_1、X_3与 Y_3之间呈正相关，且物理试验值（$Y_3=2.327$ m/s）大于筛选试验获得仿真值范围（$1.146\ \text{m/s}<Y_3<1.546\ \text{m/s}$）。因此，最陡爬坡试验中 x_1最低水平值确定为 50 mm^2、x_3最低水平值确定为 207 kg/m^3。其它非显著因素取物理试验值。SCD 试验方案与结果如表 5 所示。

表 5　SCD 试验方案与结果

Tab. 5　SCD test program and results

序号	因素						悬垂系数 Y_1	悬垂系数相对误差 μ_1/%	摩擦角 Y_2/(°)	摩擦角相对误差 μ_2/%	悬浮速度 Y_3/(m·s^{-1})	悬浮速度相对误差 μ_3/%
	基本壳体单元面积 x_1/mm^2	弹性比 x_2	密度 x_3/(kg·m^{-3})	杨氏模量 x_4/MPa	膜间静摩擦因数 x_6	膜间动摩擦因数 x_7						
1	50	0.500	207	1.2	0.417	0.373	0.145	63.48	21.949	3.03	1.509	35.15
2	80	0.625	217	2.2	0.437	0.393	0.155	60.96	22.831	0.86	1.791	23.03
3	110	0.750	227	3.2	0.457	0.413	0.251	36.78	23.893	5.55	1.975	15.13
4	140	0.875	237	4.2	0.477	0.433	0.408	2.77	24.560	8.50	2.197	5.59
5	170	1.000	247	5.2	0.497	0.453	0.370	6.80	25.548	12.86	2.305	0.95

2.2.2 SCD 试验结果与分析

由表5可知,随着 x_1、x_2、x_3、x_4、x_6、x_7逐步递增,Y_1呈先增后减趋势,μ_1呈先减后增趋势,在第4组 μ_1取最小值;Y_2呈不断递增趋势,μ_2呈先减后增趋势,在第2组 μ_2取最小值;Y_3呈不断递增趋势,μ_3呈不断递减的趋势,在第5组 μ_3取最小值。因此,选择第2组、第5组分别作为 -1、1 水平。

由于待标定参数较多,且 PBD 试验已确定悬垂系数和悬浮速度均与组成参数、本征参数有关,摩擦角仅与接触参数有关。采用分步中心组合试验法(SCCD),先对本征参数和组成参数等基本参数进行标定,确定最优参数组合,再对接触参数进行标定。SCCD 试验因素编码如表6所示。

表6 SCCD 试验因素编码

Tab.6 SCCD test factors coding

编码	因素(本征参数、组成参数)				编码	因素(接触参数)	
	基本壳体单元面积 x_1/mm²	弹性比 x_2	密度 x_3/(kg·m⁻³)	杨氏模量 x_4/MPa		残膜-残膜静摩擦因数 x_6	残膜-残膜动摩擦因数 x_7
-1.547	55	0.549 8	209	1.4	-1.414	0.425	0.381
-1	80	0.625 0	217	2.2	-1	0.437	0.393
0	125	0.762 5	232	3.7	0	0.467	0.423
1	170	0.900 0	247	5.2	1	0.497	0.453
1.547	195	0.975 2	255	6.0	1.414	0.509	0.465

2.2.3 SCCD 试验结果与分析

(1)基本参数的 CCD 试验结果与分析

基于 PBD 与 SCD 试验分析,以 X_1、X_2、X_3、X_4为试验因素,以悬垂系数 Y_1和悬浮速度 Y_3为响应指标,开展 CCD 试验寻求基本参数最优参数组合,设计方案与结果如表7所示。

对试验结果进行方差分析(表8),Y_1、Y_3对应回归模型均 $P<0.01$,表明悬垂系数、悬浮速度模型极显著;其决定系数 R^2分别为0.871、0.996,表明相应模型至少可以预测85%以上观测数据的变异性。悬垂系数试验中,在 $P<0.01$ 水平下,X_1、X_4、X_4^2影响极显著;在 $0.01<P<0.05$ 水平下,X_2、X_2^2影响显著。由此可知,采用 PBD 因子筛选试验、SCD 最陡爬坡试验及 CCD 试验的组合试验设计能够更全面地获取对悬垂系数的显著影响因素。

悬浮速度试验中,在 $P<0.01$ 水平下,X_1、X_3、X_1X_3、X_2X_3、X_1^2、X_3^2影响极显著;在 $0.01<P<0.05$ 水平下,X_2X_4、X_4^2影响显著。则悬垂系数、悬浮速度回归方程 Y_1、Y_3分别为

$$\begin{aligned}Y_1 = {} & -5.898\,2 - 0.002\,8x_1 + 1.863\,6x_2 + 0.048\,6x_3 + \\ & 0.107\,5x_4 + 0.001\,5x_1x_2 + 3.240\,7\times10^{-6}x_1x_3 + \\ & 0.000\,2x_1x_4 + 0.002\,9x_2x_3 - 0.053\,0x_2x_4 + \\ & 0.000\,4x_3x_4 - 2.124\,1\times10^{-6}x_1^2 - 1.554\,1x_2^2 - \\ & 0.000\,1x_3^2 - 0.018\,4x_4^2 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}Y_3 = {} & -5.220\,4 + 0.012\,6x_1 - 0.826\,7x_2 + 0.049\,2x_3 + \\ & 0.036\,7x_4 - 0.001\,4x_1x_2 - 0.000\,02x_1x_3 + 0.000\,03x_1x_4 + \\ & 0.006\,8x_2x_3 + 0.047\,3x_2x_4 - 0.000\,1x_3x_4 - 0.000\,01x_1^2 - \\ & 0.516\,2x_2^2 - 0.000\,09x_3^2 - 0.005\,9x_4^2 \end{aligned} \tag{7}$$

由于待标定参数较多,且 PBD 试验已确定悬垂系数和悬浮速度均与组成参数、本征参数有关,摩擦角仅与接触参数有关。采用分步中心组合试验法(SCCD),先对本征参数和组成参数等基本参数进行标定,确定最优参数组合,再对接触参数进行标定。SCCD 试验因素编码如表6所示。

表7 本征参数和组成参数标定的 CCD 试验设计方案及结果

Tab.7 Design scheme and results of CCD test for calibration of intrinsic and constituent parameters

序号	因素				Y_1	Y_3/(m·s⁻¹)
	X_1	X_2	X_3	X_4		
1	-1	-1	-1	-1	0.311	1.824
2	1	-1	-1	-1	0.165	2.178
3	-1	1	-1	-1	0.396	1.788
4	1	1	-1	-1	0.268	2.13
5	-1	-1	1	-1	0.261	2.094
6	1	-1	1	-1	0.165	2.363
7	-1	1	1	-1	0.289	2.093
8	1	1	1	-1	0.214	2.348
9	-1	-1	-1	1	0.461	1.827
10	1	-1	-1	1	0.339	2.167
11	-1	1	-1	1	0.350	1.808
12	1	1	-1	1	0.391	2.135
13	-1	-1	1	1	0.351	2.018
14	1	-1	1	1	0.303	2.361
15	-1	1	1	1	0.452	2.123
16	1	1	1	1	0.351	2.363
17	-1.547	0	0	0	0.415	1.886
18	1.547	0	0	0	0.419	2.346
19	0	-1.547	0	0	0.317	2.159
20	0	1.547	0	0	0.397	2.133
21	0	0	-1.547	0	0.389	1.927
22	0	0	1.547	0	0.341	2.312
23	0	0	0	-1.547	0.246	2.130
24	0	0	0	1.547	0.411	2.145
25	0	0	0	0	0.424	2.177
26	0	0	0	0	0.399	2.158
27	0	0	0	0	0.413	2.164

表 8　CCD 试验结果方差分析

Tab.8　Analysis of variance of CCD test results

来源	悬垂系数 Y_1		悬浮速度 Y_3	
	F	P	F	P
模型	5.79	0.002 1 **	218.14	<0.000 1 **
X_1	11.49	0.005 4 **	1 830.52	<0.000 1 **
X_2	5.89	0.031 9 *	1.28	0.279 5
X_3	3.50	0.085 9	1 131.65	<0.000 1 **
X_4	36.02	<0.000 1 **	0.009 4	0.924 5
X_1X_2	0.740 8	0.406 3	4.74	0.050 2
X_1X_3	0.040 9	0.843 2	15.40	0.002 0 **
X_1X_4	1.54	0.238 0	0.211 4	0.653 9
X_2X_3	0.313 9	0.585 6	12.00	0.004 7 **
X_2X_4	1.02	0.332 0	5.72	0.034 1 *
X_3X_4	0.538 2	0.477 3	0.587 3	0.458 3
X_1^2	0.113 1	0.742 5	21.39	0.000 6 **
X_2^2	5.28	0.040 4 *	4.10	0.065 8
X_3^2	4.14	0.064 5	18.68	0.001 0 **
X_4^2	10.42	0.007 2 **	7.62	0.017 2 *
失拟项	14.12	0.067 9	3.18	0.262 6
R^2	0.871		0.996	

以悬垂系数物理试验平均值 0.397、悬浮速度物理试验平均值 2.327 m/s 分别为响应目标，运用 Design-Expert 13 软件约束求解工具在物理试验平均值上下限 1% 范围内进行寻优，设定约束条件为

$$\begin{cases} 0.393 \leqslant Y_1 \leqslant 0.400 \\ 2.304\ \text{m/s} \leqslant Y_3 \leqslant 2.350\ \text{m/s} \\ 55.398\ 2\ \text{mm}^2 \leqslant x_1 \leqslant 194.602\ \text{mm}^2 \\ 0.549\ 828 \leqslant x_2 \leqslant 0.975\ 172 \\ 208.799\ \text{kg/m}^3 \leqslant x_3 \leqslant 255.201\ \text{kg/m}^3 \\ 1.379\ 94\ \text{MPa} \leqslant x_4 \leqslant 6.020\ 06\ \text{MPa} \end{cases} \tag{8}$$

求得基本参数最优组合为：$x_1 = 174.017\ \text{mm}^2$、$x_2 = 0.850$、$x_3 = 238.583\ \text{kg/m}^3$、$x_4 = 5.676\ \text{MPa}$，悬垂系数为 0.404、悬浮速度为 2.361 m/s，与物理试验值的相对误差分别为 1.763%、1.461%，表明建立的回归模型均具有可靠性。

(2)接触参数标定的 CCD 试验结果与分析

在基本参数校正基础上，以膜间静摩擦因数 X_6、动摩擦因数 X_7 为试验因素，摩擦角 Y_2 为响应指标，设计方案与结果如表 9 所示。

表 9　接触参数标定的 CCD 试验设计方案及结果

Tab.9　Design scheme and results of CCD test for calibration by contact parameters

序号	因素		Y_2/(°)
	X_6	X_7	
1	−1	−1	22.587
2	1	−1	24.891
3	−1	1	24.513
4	1	1	25.033
5	−1.414	0	23.074
6	1.414	0	25.361
7	0	−1.414	23.750
8	0	1.414	25.080
9	0	0	23.845
10	0	0	23.797
11	0	0	23.893

对摩擦角回归模型进行方差分析，如表 10 所示，Y_2 对应回归模型 $P<0.01$，表明摩擦角回归模型极显著。摩擦角回归模型的决定系数 R^2 为 0.995，失拟项为 0.179 5($P>0.05$)，表明回归模型拟合程度较高。因素项 X_6、X_7、X_6X_7、X_6^2、X_7^2 均 $P<0.01$，表明对摩擦角影响均极显著。则摩擦角回归方程为

$$Y_2 = 2.353 + 57.208x_6 - 5.863x_7 - 495.556x_6x_7 + 190.208x_6^2 + 299.931x_7^2 \tag{9}$$

表 10　接触参数 CCD 试验结果方差分析

Tab.10　Variance analysis of CCD test results for contact parameters

	模型	X_6	X_7	X_6X_7	X_6^2	X_7^2	失拟项
F	209.09	615.2	261.38	106.69	22.19	55.18	4.73
P	<0.000 1 **	<0.000 1 **	<0.000 1 **	0.000 1 **	0.005 3 **	0.000 7 **	0.179 5

以摩擦角物理试验平均值 22.636°为响应值，在其上下限 1% 范围内进行参数寻优，设定约束条件为

$$\begin{cases} 22.410° \leqslant Y_2 \leqslant 22.862° \\ 0.425 \leqslant x_6 \leqslant 0.509 \\ 0.381 \leqslant x_7 \leqslant 0.465 \end{cases} \tag{10}$$

求得接触参数最优组合为：$x_6 = 0.437$、$x_7 = 0.397$，相应的摩擦角为 22.617°，与物理试验平均值的相对误差为 0.08%，表明采用建立的回归模型进行摩擦角预测可靠性高。

2.3　验证试验结果

标定参数组合下料群模拟悬浮速度均值为 2.892 m/s、物理悬浮速度均值为 2.987 m/s，两者间相对误差为 3.18%，表明标定的参数组合可行。残膜料群在气流作用下的运动过程如图 7 所示，当气流速度较小时，残膜料群呈现出整体向上漂移的状态(图 7a)，原因是残膜料群的初始堆积密度较高，残膜之间存在较大的表面摩擦力；随着气流速度逐渐增加，残膜料团悬停在某一位置(图 7b)。料团表面残膜的排列方式略有调整、有松动的迹象。原因

是料团表面的残膜受到的摩擦力是单面的,随着气流作用力的增强逐渐被克服;随着气流速度持续增加,残膜料群开始膨胀、松动(图 7c)。边缘的残膜逐层脱离料群,随气流运移至锥形管顶部。残膜料团变小、逐渐解体(图 7d),表明料群集体运动行为与物理试验基本一致,均具有残膜料群团聚运移、悬浮、膨胀松动及逐渐解体等运动特征,表明所标定的参数组合及建立的残膜离散元模型可用于研究残膜料群运动特性,指导膜杂分离装置优化设计。

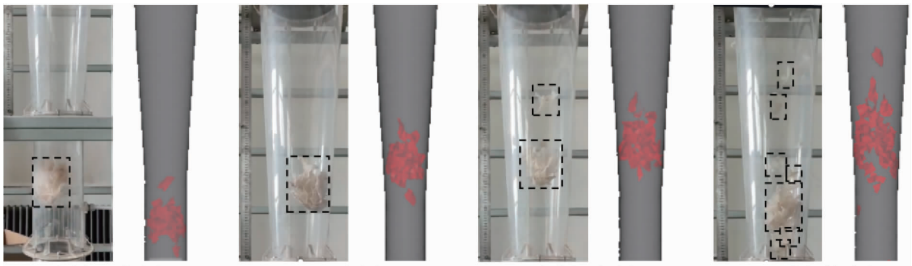


图 7 残膜料团在气流作用下的运动

Fig. 7 Movement of residual film material group under airflow

3 结论

(1)通过悬垂系数、摩擦因数及悬浮速度的物理试验分别测得残膜悬垂系数为 0.356 ~ 0.419,平均值为 0.397;膜间静摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.412 ~ 0.425、0.364 ~ 0.383,平均值分别为 0.417、0.373;残膜悬浮速度为1.680 ~ 2.770 m/s,平均值为 2.327 m/s;残膜料群悬浮速度为 2.550 ~ 3.370 m/s,平均值为 2.987 m/s。

(2)在 Rocky、Rocky - Fluent 中分别进行残膜悬垂、摩擦及悬浮的离散元仿真试验。通过因子筛选试验得到对残膜悬垂系数影响较为显著的因素分别为弹性比和杨氏模量;对残膜摩擦角影响较为显著的因素分别为静摩擦因数、动摩擦因数;对残膜悬浮速度影响较为显著的因素分别为基本壳体单元面积和密度。通过中心组合试验得到残膜离散元模型的最佳参数组合为:基本壳体单元面积174.017 mm^2、弹性比 0.850、密度 238.583 kg/m^3、杨氏模量5.676 MPa、泊松比 0.232、膜间静摩擦因数 0.437、膜间动摩擦因数 0.397,相应的悬垂系数为 0.404、摩擦角为 22.617°、悬浮速度为2.361 m/s。

(3)对标定后的单片残膜离散元模型进行料群流动试验验证,结果表明,标定参数组合下料群悬浮速度均值为 2.892 m/s,与物理试验均值误差为 3.18%;残膜料群在气流作用力、膜间表面摩擦力及重力作用下表现出与物理试验一致的团聚运移、悬浮、膨胀松动及逐渐解体等运动特征,验证标定参数及所建模型的可靠性及适用性。

参 考 文 献

[1] 王保力,马瑛,和伟康. 新疆棉花生产面源污染防控的理论模式分析[J]. 中国农学通报,2018,34(23):99 - 103.
WANG Baoli, MA Ying, HE Weikang. Non-point source pollution control of cotton production in Xinjiang: theoretical model analysis[J]. Chin. Agric. Sci. Bull.,2018,34(23):99 - 103. (in Chinese)

[2] 杨凯,师勇强,王文魁,等. 棉田废弃聚乙烯农膜回收再利用发展现状[J]. 中国棉花,2023,50(6):33 - 37.
YANG Kai, SHI Yongqiang, WANG Wenkui, et al. Development status of recycling and reusing of waste polyethylene agricultural film in cotton field[J]. Chin. Cotton,2023,50(6):33 - 37. (in Chinese)

[3] 张加凡,梁静,罗守杨,等. 农田残膜污染现状及其治理对策[J]. 土壤与作物,2022,11(4):385 - 397.
ZHANG Jiafan, LIANG Jing, LUO Shouyang, et al. Current situation and countermeasures of residual plastic film pollution in farmland[J]. Soils and Crops,2022,11(4):385 - 397. (in Chinese)

[4] MENG X Y, CHEN H Q, HAN Y L, et al. Separation characteristics of white rice in an indented cylinder separator with a baffle[J]. Biosystems Engineering,2022,216:46 - 64.

[5] 陈永,高晓勋,金鑫,等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(12):58 - 69.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(12):58 - 69. (in Chinese)

[6] ZHANG S W, ZHANG R Y, CAO Q Q, et al. A calibration method for contact parameters of agricultural particle mixtures inspired by the Brazil nut effect (BNE): the case of tiger nut tuber-stem-soil mixture[J]. Comput. Electron. Agric.,2023,212:108112.

[7] LI J L, LU Y T, PENG X B, et al. Discrete element method for simulation and calibration of cotton stalk contact parameters

[J]. Biores. ,2023,18(1):400 – 416.
[8] ZHOU P F, LI Y P, LIANG R Q, et al. Calibration of contact parameters for particulate materials in residual film mixture after sieving based on EDEM[J]. Agriculture,2023,13(5):13050959.
[9] GUO W S, HU C, HE X W, et al. Construction of virtual mulch film model based on discrete element method and simulation of its physical mechanical properties[J]. Int. J. Agric. Biol. Eng. ,2020,13(4):211 – 218.
[10] 申世龙,张佳喜,蒋永新,等. 基于离散元方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. Research on tensile properties of residual film in the tillage layer based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):132 – 141. (in Chinese)
[11] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Sci. ,2004,301(5672): 838.
[12] 翁艳芳,吴岚,钱士明,等. 真丝绸面料的风格整理技术研究[J]. 丝绸,2011,48(4):4 – 8,16.
WENG Yanfang, WU Lan, QIAN Shiming, et al. Research on the style finishing technology for silk fabrics[J]. Silk, 2011, 48(4):4 – 8,16. (in Chinese)
[13] 李凯凯,彭强吉,牛萌萌,等. 基于 CFD – DPM 的风选设备参数仿真计算方法[J]. 农业装备与车辆工程,2023,61(6):1 – 6.
LI Kaikai, PENG Qiangji, NIU Mengmeng, et al. Simulation calculation method of parameters of air separation equipment based on CFD – DPM[J]. Agric. Equip. & Vehicle Eng. ,2023,61(6):1 – 6. (in Chinese)
[14] 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)
[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] LIANG R Q, ZHANG L P, JIA R, et al. Study on friction characteristics between cotton stalk-residual film-external contact materials[J]. Industry Crops and Products,2024,209:118022.
[17] ZHANG B C, LIANG R Q, LI J L, et al. Test and analysis on friction characteristics of major cotton stalk cultivars in Xinjiang [J]. Agriculture,2022,12(7):906.
[18] 金浩,蒋明洋,徐超,等. 基于离散元法的柔性片烟建模及仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(5):563 – 571.
JIN Hao, JIANG Minyang, XU Chao, et al. Modelling and simulation parameters calibration of flexible tobacco strips based on discrete element[J]. J. Shenyang Agricultural University,2023,54(5):563 – 571. (in Chinese)
[19] 潘凡达,沈凯,樊虎,等. 基于 Rocky DEM 的松散润叶筒内抄板作用的模拟与优化[J]. 化学反应工程与工艺,2024, 40(1):66 – 76.
PAN Fanda, SHEN Kai, FAN Hu, et al. Simulation and optimization of the shovelling plate effect in conditioning cylinder using Rocky DEM[J]. Chem. React. Eng. Technol. ,2024,40(1):66 – 76. (in Chinese)
[20] FREIREICH B, LITSTER J, WASSGREN C. Using the discrete element method to predict collision-scale behaviour: a sensitivity analysis[J]. Chem. Eng. Sci. ,2009,64:3407 – 3416.
[21] EL-EMAM M A, SHI W D, ZHOU L. CFD – DEM simulation and optimization of gas-cyclone performance with realistic macroscopic particulate matter[J]. Advanced Powder Technol. ,2019,30(11):2686 – 2702.
[22] 杨晓燕,钱丹,楼晓华,等. 风速对毛豆颗粒流态化行为影响的仿真分析[J]. 包装与食品机械,2024,42(1):95 – 100.
YANG Xiaoyan, QIAN Dan, LOU Xiaohua, et al. Simulation analysis on the influence of wind speed on fluidization characteristics of soybean particles[J]. Packaging and Food Mach. ,2024,42(1):95 – 100. (in Chinese)
[23] 石鑫,杨豫新,牛长河,等. 基于 Fluent 分析的棉田废地膜秸秆分离装置设计[J]. 江苏农业学报,2023,39(4):1062 – 1071.
SHI Xin, YANG Yuxin, NIU Changhe, et al. Design of separation device for waste film and straw in cotton field based on Fluent analysis[J]. Jiangsu J. Agric. Sci. ,2023,39(4):1062 – 1071. (in Chinese)