doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.015

# 水稻制繁种联合收获脱出物离散元仿真参数标定与试验

杨然兵[1,2]　梁昌敢[1,2]　青苡任[1,2]　陈栋泉[2,3]　陈　路[1,2]　冼舒琪[4]　武继龙[1,2]

(1.海南大学机电工程学院,海口 570228;2.农业农村部热带高效农业智能装备重点实验室,儋州 571737;
3.海南大学信息与通信工程学院,海口 570228;4.海南大学生命健康学院,海口 570228)

**摘要**:良种是实现作物稳产增收的根本基础,制繁种水稻是保障国家粮食安全的重要支撑,实现低损、高净度的收获是保障其战略价值得以实现的必然要求。制繁种水稻较常规稻结实率低、瘪谷比例高,易导致清选环节的损失率与含杂率偏高,由于缺乏准确的脱出物离散元仿真模型参数,仿真结果与实际作业存在较大差异,限制了清选装置的设计与优化。采用离散元法对水稻制繁种联合收获脱出物的接触参数进行系统标定,利用质构仪和自制试验台分别测定各制繁种水稻脱出物的本征参数、接触参数与悬浮速度;以制繁种水稻混合脱出物物理堆积角为参照,开展了 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验,确定了对制繁种水稻混合脱出物堆积角影响显著的参数及取值范围;利用 Design-Expert 软件中的优化模块,以制繁种水稻混合脱出物物理堆积角为目标值进行寻优,确定了制繁种水稻混合脱出物最佳接触参数组合。标定结果表明:显著性参数最优组合为籽粒-瘪谷静摩擦因数为 0.87、瘪谷-瘪谷碰撞恢复系数为 0.45、瘪谷-瘪谷滚动摩擦因数为 0.037。在接触参数最优组合条件下,开展了堆积角和悬浮速度仿真验证试验。试验结果表明:制繁种水稻混合脱出物仿真堆积角与物理堆积角误差为 0.57%;水稻籽粒、茎秆、瘪谷的悬浮速度仿真值与物理值的相对误差分别为 1.37%、1.95%、3.73%。在标定参数组合下,基于 CFD-DEM 开展了水稻制繁种联合收获清选装置气固耦合仿真试验,并进行了台架验证试验。仿真结果表明:清选环节籽粒损失率为 0.17%、含杂率为 0.58%,与台架试验相对误差分别为 5.56% 和 4.92%,验证了标定参数的准确性,可为水稻制繁种联合收获离散元仿真研究提供基础参数。

**关键词**:制繁种水稻;联合收获;脱出物;离散元;参数标定;清选

**中图分类号**:S225.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)09-0159-13　　**OSID**:

# Calibration and Experiment on DEM Parameters for Threshing Materials in Seed-production Rice Combine Harvesting

YANG Ranbing[1,2]　LIANG Changgan[1,2]　QING Yiren[1,2]　CHEN Dongquan[2,3]　CHEN Lu[1,2]
XIAN Shuqi[4]　WU Jilong[1,2]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
2. *Key Laboratory of Tropical High-efficiency Agricultural Intelligent Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou* 571737, *China*
3. *School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
4. *School of Life and Health Sciences, Hainan University, Haikou* 570228, *China*)

**Abstract**: High-quality seeds are fundamental to achieving stable crop yields, and seed-production rice plays a critical role in ensuring national food security. Compared with conventional rice, seed-production rice is characterized by a lower seed-setting rate and a higher proportion of unfilled grains, which often leads to increased grain loss and impurity rates during combine harvesting. However, the lack of accurate discrete element method (DEM) parameters for threshed materials results in discrepancies between simulation predictions and actual harvesting performance, thereby restricting the effectiveness of simulation-based cleaning device design and optimization. To address this issue, the contact parameters of threshed materials from seed-production rice combine harvesting were systematically calibrated by using DEM. The intrinsic parameters, contact parameters, and suspension velocity of filled grains, straw

收稿日期:2026-01-28　修回日期:2026-01-31

**基金项目**:国家自然科学基金项目(52305252)和国家重点研发计划项目(2023YFD2000400)

**作者简介**:杨然兵(1979—),男,教授,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail:yangranbing@163.com

**通信作者**:青苡任(1990—),女,副教授,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail:jsuyirenq@163.com

segments, and unfilled grains were experimentally determined. Taking the physical repose angle of mixed threshed materials as the calibration response indicator, Plackett – Burman, steepest ascent, and Box – Behnken experimental designs were successively employed to screen and optimize the significant contact parameters. The optimal parameter combination was obtained by using the optimization module of Design-Expert software. The optimal parameter set included a static friction coefficient of 0.87 between filled and unfilled grains, a restitution coefficient of 0.45 between unfilled grains, and a rolling friction coefficient of 0.037 between unfilled grains. The relative error between simulated and physical repose angles was 0.57%, while the relative errors of simulated suspension velocities for filled grains, straw segments, and unfilled grains were 1.37%, 1.95%, and 3.73%, respectively. Based on the calibrated parameters, CFD – DEM coupled simulations of the cleaning process in a seed-production rice combine harvester were conducted and validated by bench tests. The simulated grain loss rate and impurity rate were 0.17% and 0.58%, respectively, with relative errors of 5.56% and 4.92% compared with experimental results. These findings confirmed the accuracy and applicability of the calibrated parameters and provided reliable fundamental parameters for CFD – DEM coupled simulation and optimization of seed-production rice combine harvesting.

**Key words**: seed-production rice; combine harvest; threshed materials; discrete element; parameter calibration; cleaning

## 0 引言

种业是农业的“芯片”[1],制繁种水稻作为保障国家粮食安全的重要基础,主要分布于江苏、四川、海南等稻作区。制种水稻采用杂交种植工艺,需人工辅助授粉来保障种子质量和产量。制种水稻对损失率和含杂率的要求更为严格,但由于父母本行比大、授粉不均匀等问题,导致制种水稻的结实率低、瘪谷比例高,致使清选难度大[2-3]。在联合收获中,清选装置的性能直接决定收获质量,其优化设计通常借助高精度仿真模型来完成。然而,制繁种水稻脱出物成分复杂,各组分间力学特性差异显著,传统物理试验难以准确获取其微观接触参数,导致仿真模型精度不足。开展脱出物离散元仿真参数标定,有助于提升清选过程仿真的可靠性,为优化清选装置性能、降低收获损失提供关键支撑。

近年来,离散元法(Discrete element method, DEM)被农业工程领域的学者广泛应用于标定不同物料的离散元模型仿真参数[4-8]。目前针对离散元仿真参数标定的研究中,大多标定对象为单一种子、茎秆和两种混合物料[9-21],而对于标定 3 种及以上混合物料仿真参数,尤其是标定制繁种水稻脱出物的接触参数鲜有报道。

针对水稻制繁种联合收获脱出物成分复杂、微观接触参数难以精准获取,且现有研究鲜有针对多组分混合物料离散元参数系统标定的问题,本文系统开展各水稻脱出物(籽粒、茎秆、瘪谷)的本征参数、接触参数与悬浮速度测定。以混合脱出物物理堆积角为参照,采用 Plackett – Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box – Behnken 试验筛选并优化对堆积角影响显著的接触参数,通过堆积角仿真试验验证标定参数的可靠性。进一步结合悬浮速度仿真验证试验以及 CFD – DEM 气固耦合清选仿真与台架试验验证标定参数在清选仿真中的准确性,以期为水稻制繁种联合收获离散元仿真模拟提供基础参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2025 年 6 月在海南大学坝头南繁试验基地使用 4LZ – 7G2A(G4)型全喂入式纵轴流水稻联合收获机,对沭优糯 81 号制繁种水稻进行田间收获试验。父母本行比为 1∶10,母本行距 15 cm、株距 12 cm。从获取的试验材料中随机选取 1 kg 水稻脱出物,重复 5 次,将其分类得到水稻籽粒、茎秆、瘪谷和轻质杂余。称量结果显示,各组分质量分数分别为 78.2%、11.5%、5.9% 和 4.4%。由于颖壳、碎叶等轻质杂余占比小且易被气流吹走,对清选几乎无影响,故本研究仅对水稻籽粒、茎秆和瘪谷进行参数测定分析。

### 1.2 水稻脱出物本征参数测定

#### 1.2.1 水稻脱出物基本物性参数测定

从获取的水稻脱出物中随机选取 50 g 籽粒、50 g 茎秆和 30 g 瘪谷,使用德力西数显游标卡尺(精度 0.01 mm)分别测量其几何尺寸。按照 GB/T 3543.6 中规定的物料水分测定方法,采用直接干燥法测量[22],在博迅 BGZ – 30 型电热鼓风干燥箱(精度 ±1℃)中以 105℃恒温烘干 8 h,根据烘干前后质量计算各水稻脱出物含水率,重复 5 次。采用排水法测量脱出物密度[23],使用力辰高精度电子天平(精度 0.01 mg)称量若干随机选取的水稻脱出物样

品，随后将其缓缓投入盛有 50 mL 水的 100 mL 量筒中，待液面稳定且无气泡溢出后读取体积增量，重复 5 次。测量结果如表 1 所示。

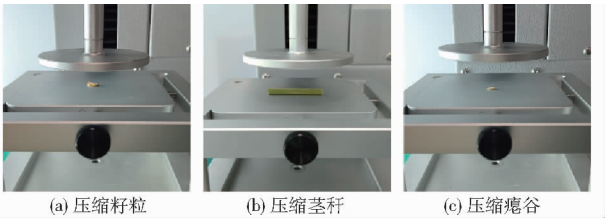
**表 1　各水稻脱出物基本物性参数测量结果**

**Tab. 1　Measured results of basic physical properties of various rice threshed materials**

| 参数 | 脱出物 | | |
|---|---|---|---|
| | 籽粒 | 茎秆 | 瘪谷 |
| 长度/mm | 6.98 | 45.52 | 6.92 |
| 宽度/mm | 3.29 | | 3.28 |
| 厚度(直径)/mm | 2.44 | 3.52 | 1.56 |
| 含水率/% | 27.93 | 71.18 | 50.81 |
| 密度/(kg·m$^{-3}$) | 1 102 | 212 | 178 |

### 1.2.2　力学特性测定

水稻脱出物力学特性参数包括泊松比、弹性模量和剪切模量等。本文采用 TMS－Pro 型质构仪(力分辨率 0.01 $g$，位移精度 0.001 mm)对水稻籽粒、茎秆和瘪谷进行径向平板全压缩试验[24]，以测定其弹性模量、泊松比及剪切模量。试验前，使用数显游标卡尺(精度 0.01 mm)测量样品初始长度和横截面尺寸，将样品水平放置于质构仪平台中央，采用直径 75 mm 的平板压头沿厚度方向压缩，压缩速度 5 mm/min，起始力 0.5 N，压缩至明显变形或破裂后停止，试验过程如图 1 所示。



(a) 压缩籽粒　(b) 压缩茎秆　(c) 压缩瘪谷

图 1　各水稻脱出物压缩试验

Fig. 1　Compression tests of various rice threshed materials

试验过程中同步记录载荷-位移数据，随后测量变形后的轴向和径向尺寸，重复试验 5 次，取平均值，各参数计算公式为

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon_r}=\frac{FH_0}{A\Delta H} \tag{1}$$

式中　$E$——弹性模量，MPa

$\sigma$——最大应力，Pa

$\varepsilon_r$——纵向应变

$F$——施加的最大载荷，N

$A$——接触面积，m$^2$

$\Delta H$——水稻脱出物厚度(直径)变化量，mm

$H_0$——水稻脱出物原始厚度(直径)，mm

$$\nu=\left|\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_r}\right|=\frac{H_0\Delta L}{L_0\Delta H} \tag{2}$$

式中　$\nu$——泊松比

$\varepsilon_t$——横向应变

$\Delta L$——水稻脱出物长度变化量，mm

$L_0$——水稻脱出物原始长度，mm

$$G=\frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3}$$

式中　$G$——剪切模量，MPa

计算结果如表 2 所示。

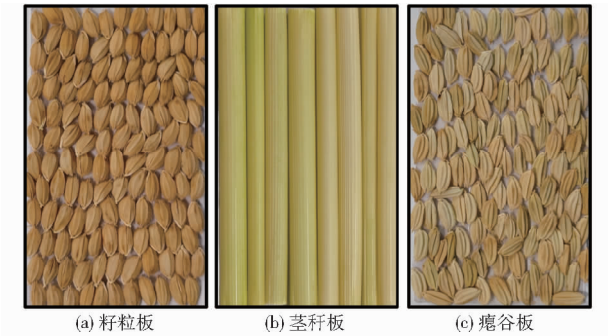
**表 2　各水稻脱出物力学特性参数**

**Tab. 2　Mechanical properties of various rice threshed materials**

| 脱出物 | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 剪切模量/MPa |
|---|---|---|---|
| 籽粒 | 206.46 | 0.31 | 78.8 |
| 茎秆 | 2.78 | 0.39 | 1.0 |
| 瘪谷 | 3.78 | 0.35 | 1.4 |

## 1.3　水稻脱出物接触参数测定

水稻脱出物接触参数主要包括静摩擦因数、滚动摩擦因数及碰撞恢复系数等。参考文献[16,25]，本文通过坡度试验、滚动试验和下落试验对脱出物各组分间接触参数进行测定。试验时，分别用胶水将水稻籽粒、茎秆和瘪谷紧密整齐地粘附在纸板上，制成 3 种物料种群板用作材料板面，如图 2 所示。



(a) 籽粒板　(b) 茎秆板　(c) 瘪谷板

图 2　物料种群板

Fig. 2　Material population board

### 1.3.1　静摩擦因数

采用 MGO－000－0032 型角度调节平台(调节范围 0°～90°)测量各水稻脱出物与材料板面的静摩擦因数，试验装置如图 3 所示。




图 3　坡度试验

Fig. 3　Inclined plane test

1. 角度调节平台　2. 材料板面　3. 数显倾角仪　4. 待测物料

以钢板-籽粒为例进行坡度试验,钢板作为材料板面,将其固定于可调角度的平台上,初始保持水平。将籽粒平放于钢板上,缓慢调节平台角度,直至籽粒发生或趋向滑动,记录数显倾角仪读数。每组试验重复 10 次,静摩擦因数计算公式为

$$\mu_s = \tan\theta \tag{4}$$

式中 $\mu_s$——静摩擦因数

$\theta$——物料开始滑动时的平台倾角,(°)

采用相同的流程对其他静摩擦因数进行测量,结果如表 3 所示。

**表 3 各水稻脱出物静摩擦因数**

**Tab. 3 Static friction coefficients of various rice threshed materials**

| 接触物料 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
|---|---|---|---|---|
| 钢板-籽粒 | 0.46 | 0.63 | 0.55 | 0.02 |
| 钢板-茎秆 | 0.41 | 0.50 | 0.44 | 0.01 |
| 钢板-瘪谷 | 0.54 | 0.72 | 0.62 | 0.05 |
| 籽粒-籽粒 | 0.72 | 0.93 | 0.85 | 0.04 |
| 籽粒-茎秆 | 0.45 | 0.72 | 0.58 | 0.06 |
| 籽粒-瘪谷 | 0.81 | 0.97 | 0.90 | 0.06 |
| 茎秆-茎秆 | 0.43 | 0.61 | 0.51 | 0.03 |
| 茎秆-瘪谷 | 0.55 | 0.87 | 0.65 | 0.07 |
| 瘪谷-瘪谷 | 0.88 | 1.05 | 0.97 | 0.06 |

### 1.3.2 滚动摩擦因数

采用 FASTCAM - MH6 型高速摄像机(最低分辨率 1 920 像素 ×1 400 像素)测量各水稻脱出物与材料板面的滚动摩擦因数,试验装置如图 4 所示。

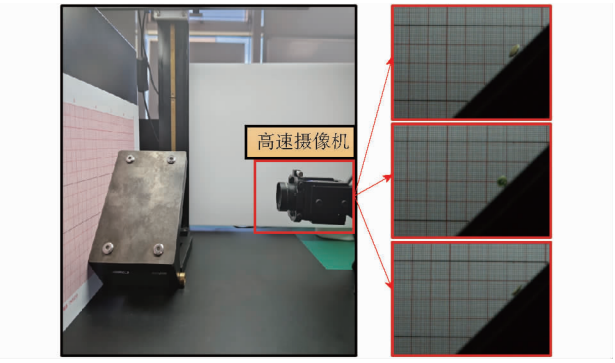



图 4 滚动试验

Fig. 4 Rolling friction test

以钢板-籽粒为例进行滚动试验,钢板作为材料板面,将其固定在倾角为 45°的角度调节平台上,从距底端 40 mm 处释放单粒籽粒,在重力作用下沿斜面自由滚动至底部。运动过程由高速摄像机记录,结合帧率与网格坐标,计算籽粒滚至底部前后 5 帧的平均速度,作为瞬时速度,每组试验重复 10 次,取平均值,采用相同的流程对其他滚动摩擦因数进行测量,结果如表 4 所示。滚动摩擦因数依据动能定理计算,公式为

$$\mu_r = \frac{gh - \frac{1}{2}v_0^2}{gL\cos\phi} \tag{5}$$

式中 $\mu_r$——滚动摩擦因数

$g$——重力加速度,m/s$^2$

$h$——释放高度,m

$v_0$——物体滚动至底部的瞬时速度,m/s

$L$——物体沿斜面滚动距离,m

$\phi$——斜坡倾角,(°)

**表 4 各水稻脱出物滚动摩擦因数**

**Tab. 4 Rolling friction coefficients of various rice threshed materials**

| 接触物料 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
|---|---|---|---|---|
| 钢板-籽粒 | 0.014 | 0.027 | 0.021 | 0.002 |
| 钢板-茎秆 | 0.012 | 0.024 | 0.018 | 0.001 |
| 钢板-瘪谷 | 0.017 | 0.029 | 0.024 | 0.003 |
| 籽粒-籽粒 | 0.025 | 0.042 | 0.034 | 0.003 |
| 籽粒-茎秆 | 0.022 | 0.038 | 0.031 | 0.004 |
| 籽粒-瘪谷 | 0.024 | 0.045 | 0.037 | 0.005 |
| 茎秆-茎秆 | 0.021 | 0.036 | 0.029 | 0.002 |
| 茎秆-瘪谷 | 0.023 | 0.045 | 0.035 | 0.005 |
| 瘪谷-瘪谷 | 0.026 | 0.048 | 0.040 | 0.006 |

### 1.3.3 碰撞恢复系数

采用自制的下落试验台测量各水稻脱出物与材料板面的碰撞恢复系数,试验装置如图 5 所示。

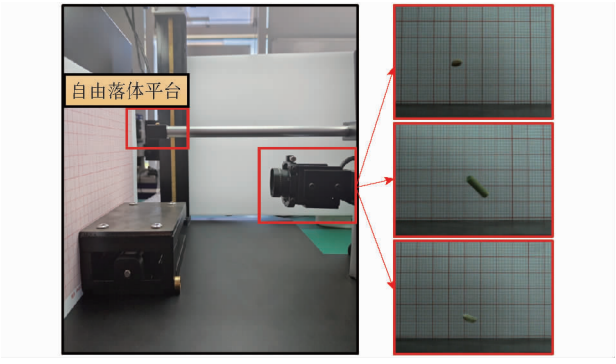



图 5 下落试验

Fig. 5 Drop impact test

以钢板-籽粒为例进行下落试验,钢板作为材料板面,将其固定于可调角度平台上,并调节至与地面平行。在钢板正上方 100 mm 处安装自由落体平台,将籽粒置于平台上自然下落,使用高速摄像机记录物料与钢板碰撞后的最大反弹高度,每组试验重复 10 次,取平均值,采用相同的流程对碰撞恢复系数进行测量,碰撞恢复系数计算公式为

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \tag{6}$$

式中 $e$——碰撞恢复系数

$h_1$——下落前的初始高度,m

$h_2$——反弹最大高度，m

结果如表 5 所示。

**表 5　各水稻脱出物碰撞恢复系数**

**Tab. 5　Restitution coefficients of various rice threshed materials**

| 接触物料 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
|---|---|---|---|---|
| 钢板-籽粒 | 0.46 | 0.70 | 0.56 | 0.04 |
| 钢板-茎秆 | 0.22 | 0.46 | 0.35 | 0.01 |
| 钢板-瘪谷 | 0.33 | 0.54 | 0.47 | 0.02 |
| 籽粒-籽粒 | 0.42 | 0.61 | 0.52 | 0.06 |
| 籽粒-茎秆 | 0.25 | 0.49 | 0.40 | 0.07 |
| 籽粒-瘪谷 | 0.39 | 0.55 | 0.48 | 0.02 |
| 茎秆-茎秆 | 0.17 | 0.41 | 0.32 | 0.06 |
| 茎秆-瘪谷 | 0.24 | 0.47 | 0.39 | 0.08 |
| 瘪谷-瘪谷 | 0.28 | 0.56 | 0.45 | 0.05 |

### 1.4　水稻脱出物悬浮速度测定

为研究水稻脱出物在风选过程中的空气动力特性，采用自制悬浮速度测量装置测量各水稻脱出物的悬浮速度，试验装置如图 6 所示。试验时，将适量物料置于盛料网上，逐步增大气流风速，当物料全部稳定悬浮于锥形观察管内某一高度范围内时，读取风速测量仪测得的空气流速并计算物料所在位置的横截面积。试验重复 10 次，取平均值，结果如表 6 所示。根据密封通风管道各断面流量相等的原理[26]，悬浮速度计算公式为

$$v_i = \frac{S_1 v_1}{S_i} \tag{7}$$

式中　$v_i$——物料悬浮位置风速，m/s

$S_1$——锥形观察管小端面积，$m^2$

$v_1$——锥形观察管小端风速，m/s

$S_i$——物料悬浮位置断面面积，$m^2$

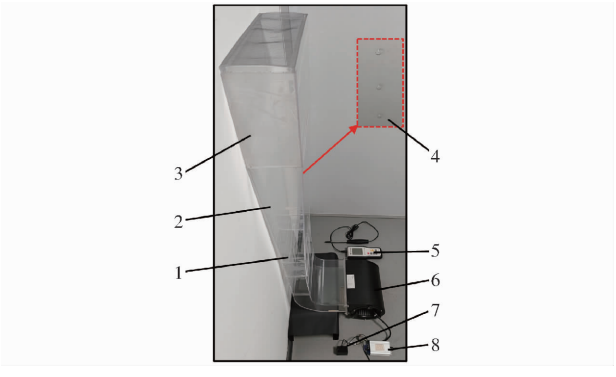



图 6　悬浮速度测量装置

Fig. 6　Suspension velocity measurement device

1. 下稳流管　2. 锥形观察管　3. 上稳流管　4. 测风口　5. 风速测量仪　6. 离心风机　7. 启动电容器　8. 风机调速器

## 2　水稻脱出物模型建立及仿真参数标定

堆积角（休止角）指物料在重力作用下自由堆积时形成的表面与水平面之间的最大夹角，能够综合反映其流动与摩擦特性及颗粒间相互作用，是离散元仿真中校准微观接触参数的关键工具，被广泛应用于离散元仿真参数的标定与验证[27]。接触参数的准确性直接影响物料在仿真中的运动行为，而物料的运动行为又直接关系到清选过程中含杂率、损失率的结果。针对水稻脱出物这类复杂混合物，通过堆积角标定脱出物各组分准确接触参数，是构建可靠离散元模型的必要前提，直接决定后续清选仿真模拟的准确性。

**表 6　各水稻脱出物悬浮速度**

**Tab. 6　Suspension velocities of various rice threshed materials**　m/s

| 脱出物 | 最小值 | 最大值 |
|---|---|---|
| 籽粒 | 5.43 | 10.65 |
| 茎秆 | 2.45 | 5.74 |
| 瘪谷 | 1.68 | 4.22 |

### 2.1　水稻脱出物实际堆积角测量

采用提升法对水稻混合脱出物进行堆积角试验。试验中，为了方便观察物料堆积情况，将 400 粒籽粒、150 根长度为 15 mm 茎秆和 600 粒瘪谷置于尺寸为 80 mm × 30 mm × 60 mm 的透明亚克力方盒中，以 0.05 m/s 匀速抬升活动侧壁，物料在重力作用下自然堆积，直至稳定，每组重复 5 次。试验结束后，正视拍照后应用 Matlab R2020b 软件对堆积图像进行灰度化和二值化处理，提取轮廓坐标点并线性拟合，由斜率反正切计算得到堆积角。试验过程如图 7 所示，测得混合脱出物实际堆积角平均值为 26.31°。

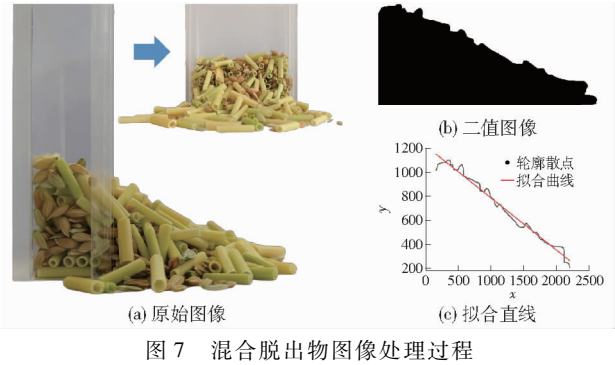



图 7　混合脱出物图像处理过程

Fig. 7　Image processing of mixed threshed material

### 2.2　水稻脱出物离散元模型建立

为准确模拟水稻脱出物的实际堆积效果，结合前期测量的基本物性参数，采用 Solidworks 2023 软件建立了水稻瘪谷模型。依据表 1 数据，瘪谷模型尺寸为 7 mm × 3.3 mm × 1.5 mm。完成建模后，将瘪谷模型以 IGS 格式导入 EDEM 2022.2 软件，运用填充法生成其离散元模型。为提高仿真效率，对水稻籽粒和茎秆模型进行了简化处理：籽粒（尺寸为

7 mm×3.3 mm×2.5 mm)与茎秆(尺寸为 15 mm×3.5 mm)均采用球体颗粒堆叠构建,各水稻脱出物离散元模型如图 8 所示。

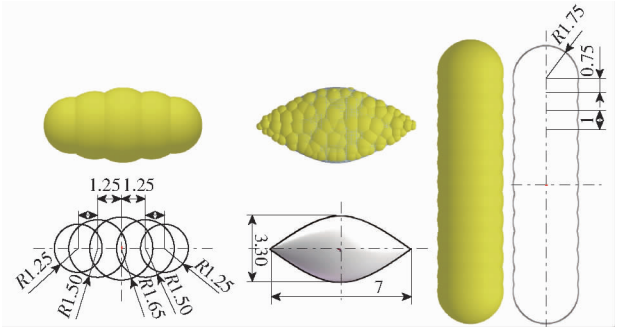



图 8 各水稻脱出物离散元模型

Fig. 8 Discrete element model of various rice threshed material

在 EDEM 2022.2 软件中,采用 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型进行水稻脱出物堆积角仿真试验,建立与物理试验相同参数的亚克力方盒与钢板模型,其中亚克力材料泊松比、密度、剪切模量分别设置为 0.35、1 070 kg/m$^3$、1×10$^3$ MPa[28];钢板材料泊松比、密度、剪切模量分别设置为 0.30、7 850 kg/m$^3$、1.1×10$^4$ MPa[29]。基于前期本征参数测定结果以及文献[16,30],得到水稻脱出物堆积角仿真参数如表 7 所示。仿真时,在方盒上方建立虚拟颗粒工厂,以自由落体方式在 1 s 内动态生成脱出物颗粒,待容器填满并静止后以 0.05 m/s 匀速提升活动侧壁,水稻籽粒、茎秆和瘪谷生成速率分别为 400 粒/s、150 根/s 和 600 粒/s,仿真总时长 3 s,步长1×10$^{-6}$ s,结果如图 9 所示。

### 2.3 水稻脱出物离散元仿真参数标定

#### 2.3.1 Plackett-Burman 试验

为减少试验次数,采用 Design-Expert 12.0 软件进行 Plackett-Burman 筛选试验,以水稻混合脱出物堆积角为响应值,筛选出对混合脱出物堆积角影响显著的参数。将表 7 中的仿真参数 $x_1$~$x_9$按最大值(1)、最小值(-1)进行编码,编码结果如表 8 所示,分别测量左右两侧的堆积角,然后取平均值,Plackett-Burman 试验结果如表 9 所示(表中 $X_1$~$X_9$为 $x_1$~$x_9$的编码值),方差分析得到各参数的影响效果如表 10 所示。

由表 10 可知,根据贡献率进行显著性排序,在水稻脱出物堆积试验中 $X_2$、$X_7$、$X_9$对堆积角的影响较为显著,因此只考虑这 3 个因素进行最陡爬坡试验,其余非显著性因素取中间水平:$x_1$取 0.48,$x_3$取 0.037,$x_4$取 0.39,$x_5$取 0.65,$x_6$取 0.035,$x_8$取 0.97。

#### 2.3.2 最陡爬坡试验

在 Plackett-Burman 试验的基础上,对筛选出来的 3 个显著性影响参数(籽粒-瘪谷静摩擦因数 $x_2$、瘪谷-瘪谷碰撞恢复系数 $x_7$、瘪谷-瘪谷滚动摩擦因数 $x_9$)进行最陡爬坡试验,试验方案及结果如表 11 所示。随着 3 个试验因素数值逐渐增大,堆积

表 7 各水稻脱出物堆积角仿真参数

Tab. 7 Simulation parameters for repose angles of various rice threshed materials

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 籽粒泊松比 | 0.31 |
| 籽粒密度/(kg·m$^{-3}$) | 1 102 |
| 籽粒剪切模量/MPa | 78.8 |
| 籽粒-籽粒碰撞恢复系数 | 0.52 |
| 籽粒-茎秆碰撞恢复系数 | 0.40 |
| 籽粒-瘪谷碰撞恢复系数 $x_1$ | 0.39~0.55 |
| 籽粒-钢板碰撞恢复系数[30] | 0.56 |
| 籽粒-PMMA 碰撞恢复系数[16] | 0.54 |
| 籽粒-籽粒静摩擦因数 | 0.85 |
| 籽粒-茎秆静摩擦因数 | 0.58 |
| 籽粒-瘪谷静摩擦因数 $x_2$ | 0.81~0.97 |
| 籽粒-钢板静摩擦因数[30] | 0.55 |
| 籽粒-PMMA 静摩擦因数[16] | 0.50 |
| 籽粒-籽粒滚动摩擦因数 | 0.034 |
| 籽粒-茎秆滚动摩擦因数 | 0.031 |
| 籽粒-瘪谷滚动摩擦因数 $x_3$ | 0.024~0.045 |
| 籽粒-钢板滚动摩擦因数[30] | 0.021 |
| 籽粒-PMMA 滚动摩擦因数[16] | 0.020 |
| 茎秆泊松比 | 0.39 |
| 茎秆密度/(kg·m$^{-3}$) | 212 |
| 茎秆剪切模量/MPa | 1.0 |
| 茎秆-茎秆碰撞恢复系数 | 0.32 |
| 茎秆-瘪谷碰撞恢复系数 $x_4$ | 0.24~0.47 |
| 茎秆-钢板碰撞恢复系数[30] | 0.35 |
| 茎秆-PMMA 碰撞恢复系数[16] | 0.32 |
| 茎秆-茎秆静摩擦因数 | 0.51 |
| 茎秆-瘪谷静摩擦因数 $x_5$ | 0.55~0.87 |
| 茎秆-钢板静摩擦因数[30] | 0.44 |
| 茎秆-PMMA 静摩擦因数[16] | 0.45 |
| 茎秆-茎秆滚动摩擦因数 | 0.029 |
| 茎秆-瘪谷滚动摩擦因数 $x_6$ | 0.023~0.045 |
| 茎秆-钢板滚动摩擦因数[30] | 0.018 |
| 茎秆-PMMA 滚动摩擦因数[16] | 0.016 |
| 瘪谷泊松比 | 0.35 |
| 瘪谷密度/(kg·m$^{-3}$) | 178 |
| 瘪谷剪切模量/MPa | 1.4 |
| 瘪谷-瘪谷碰撞恢复系数 $x_7$ | 0.28~0.56 |
| 瘪谷-钢板碰撞恢复系数[30] | 0.47 |
| 瘪谷-PMMA 碰撞恢复系数[16] | 0.46 |
| 瘪谷-瘪谷静摩擦因数 $x_8$ | 0.88~1.05 |
| 瘪谷-钢板静摩擦因数[30] | 0.62 |
| 瘪谷-PMMA 静摩擦因数[16] | 0.59 |
| 瘪谷-瘪谷滚动摩擦因数 $x_9$ | 0.026~0.048 |
| 瘪谷-钢板滚动摩擦因数[30] | 0.024 |
| 瘪谷-PMMA 滚动摩擦因数[16] | 0.022 |



图 9　堆积角仿真试验

Fig. 9　Simulation test of repose angle

**表 8　Plackett－Burman 试验方案**

**Tab. 8　Plackett－Burman test scheme**

| 试验参数 | 编码 | |
|---|---|---|
| | －1 | 1 |
| $x_1$ | 0. 39 | 0. 55 |
| $x_2$ | 0. 81 | 0. 97 |
| $x_3$ | 0. 024 | 0. 045 |
| $x_4$ | 0. 24 | 0. 47 |
| $x_5$ | 0. 55 | 0. 87 |
| $x_6$ | 0. 023 | 0. 045 |
| $x_7$ | 0. 28 | 0. 56 |
| $x_8$ | 0. 88 | 1. 05 |
| $x_9$ | 0. 026 | 0. 048 |

**表 9　Plackett－Burman 试验结果**

**Tab. 9　Plackett－Burman test results**

| 序号 | 试验参数 | | | | | | | | | 堆积角 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $\theta$/(°) |
| 1 | 1 | 1 | 1 | －1 | －1 | －1 | 1 | －1 | 1 | 28. 96 |
| 2 | －1 | 1 | －1 | 1 | 1 | －1 | 1 | 1 | 1 | 29. 28 |
| 3 | 1 | －1 | －1 | －1 | 1 | －1 | 1 | 1 | －1 | 24. 51 |
| 4 | －1 | －1 | 1 | －1 | 1 | 1 | －1 | 1 | 1 | 24. 32 |
| 5 | －1 | 1 | 1 | －1 | 1 | 1 | 1 | －1 | －1 | 26. 85 |
| 6 | 1 | －1 | 1 | 1 | －1 | 1 | 1 | 1 | －1 | 25. 05 |
| 7 | －1 | －1 | －1 | －1 | －1 | －1 | －1 | －1 | －1 | 23. 24 |
| 8 | －1 | 1 | 1 | 1 | －1 | －1 | －1 | 1 | －1 | 25. 19 |
| 9 | 1 | 1 | －1 | 1 | 1 | 1 | －1 | －1 | －1 | 25. 67 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | －1 | －1 | 1 | －1 | 1 | 1 | 26. 40 |
| 11 | 1 | －1 | 1 | 1 | 1 | －1 | －1 | －1 | 1 | 26. 01 |
| 12 | －1 | －1 | －1 | 1 | －1 | 1 | 1 | －1 | 1 | 26. 74 |

**表 10　Plackett－Burman 试验参数显著性分析**

**Tab. 10　Significance analysis of Plackett－Burman test parameters**

| 参数 | 效应 | 均方和 | 贡献率 | 显著性排序 |
|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0. 16 | 0. 08 | 0. 23 | 8 |
| $X_2$ | 2. 08 | 12. 98 | 36. 80 | 1 |
| $X_3$ | 0. 09 | 0. 02 | 0. 07 | 9 |
| $X_4$ | 0. 61 | 1. 12 | 3. 16 | 4 |
| $X_5$ | 0. 18 | 0. 09 | 0. 27 | 7 |
| $X_6$ | －0. 36 | 0. 39 | 1. 10 | 6 |
| $X_7$ | 1. 76 | 9. 29 | 26. 34 | 3 |
| $X_8$ | －0. 45 | 0. 62 | 1. 75 | 5 |
| $X_9$ | 1. 87 | 10. 45 | 29. 63 | 2 |

角相对误差呈先减小后增加的变化趋势，3 号试验中相对误差最小，为 2. 20%，故以 3 号试验中的各参数数值作为试验的中心点，2 号试验和 4 号试验分别为低水平和高水平进行 Box－Behnken 响应面试验。

**表 11　最陡爬坡试验设计方案及结果**

**Tab. 11　The steepest climbing test design scheme and results**

| 序号 | 试验参数 | | | 堆积角 | 相对误 |
|---|---|---|---|---|---|
| | $x_2$ | $x_7$ | $x_9$ | $\theta$/(°) | 差/% |
| 1 | 0. 81 | 0. 28 | 0. 026 0 | 23. 37 | 11. 17 |
| 2 | 0. 85 | 0. 35 | 0. 031 5 | 24. 92 | 5. 28 |
| 3 | 0. 89 | 0. 42 | 0. 037 0 | 26. 89 | 2. 20 |
| 4 | 0. 93 | 0. 49 | 0. 042 5 | 28. 39 | 7. 91 |
| 5 | 0. 97 | 0. 56 | 0. 048 0 | 29. 52 | 12. 20 |

### 2. 3. 3　Box－Behnken 试验

利用 Design-Expert 12. 0 软件进行三因素三水平响应曲面试验设计，中心水平设置 5 组重复，共进行 17 组混合脱出物堆积角仿真试验，试验设计方案与结果如表 12 所示。对 Box－Behnken 试验结果进行多元回归拟合，得到混合脱出物堆积角与 3 个显著性参数二阶回归方程为

$$\theta = -207.33 + 515.71x_2 - 29.63x_7 - 338.88x_9 + 48.21x_2x_7 + 1\,602.27x_2x_9 - 1\,376.62x_7x_9 - 325.47x_2^2 + 70.77x_7^2 - 3\,330.58x_9^2 \quad (8)$$

**表 12　Box－Behnken 试验设计方案及结果**

**Tab. 12　Box－Behnken experiment design scheme and results**

| 序号 | $X_2$ | $X_7$ | $X_9$ | 堆积角 $\theta$/(°) | 相对误差/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | －1 | －1 | 0 | 23. 88 | 9. 24 |
| 2 | 1 | －1 | 0 | 24. 80 | 5. 74 |
| 3 | －1 | 1 | 0 | 26. 93 | 2. 36 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 28. 39 | 7. 91 |
| 5 | －1 | 0 | －1 | 23. 75 | 9. 73 |
| 6 | 1 | 0 | －1 | 24. 40 | 7. 26 |
| 7 | －1 | 0 | 1 | 26. 00 | 1. 18 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 28. 06 | 6. 65 |
| 9 | 0 | －1 | －1 | 23. 09 | 12. 24 |
| 10 | 0 | 1 | －1 | 26. 93 | 2. 36 |
| 11 | 0 | －1 | 1 | 26. 97 | 2. 51 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 28. 69 | 9. 05 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 25. 87 | 1. 67 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 26. 00 | 1. 18 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 25. 73 | 2. 20 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 26. 76 | 1. 71 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 26. 51 | 0. 76 |

由表 13 模型方差分析结果可知，籽粒－瘪谷静摩擦因数 $x_2$、瘪谷－瘪谷碰撞恢复系数 $x_7$、瘪谷－瘪谷滚动摩擦因数 $x_9$ 对堆积角影响极显著；$x_7x_9$、$x_2^2$ 对堆积角影响显著；$x_2x_7$、$x_2x_9$、$x_7^2$、$x_9^2$ 对堆积角影响不显著。该堆积角拟合回归模型 $P < 0.000\,1$，表明该模型拟合良好；决定系数 $R^2 = 0.977\,9$，校正决定系

表 13 Box－Behnken 试验回归模型方差分析

Tab. 13 Variation analysis of Box－Behnken quadratic model

| 方差来源 | 均方 | 自由度 | 平方和 | $P$ |
|---|---|---|---|---|
| 模型 | 4.65 | 9 | 41.84 | <0.000 1 ** |
| $x_2$ | 3.24 | 1 | 3.24 | 0.001 8 ** |
| $x_7$ | 18.6 | 1 | 18.6 | <0.000 1 ** |
| $x_9$ | 16.68 | 1 | 16.68 | <0.000 1 ** |
| $x_2x_7$ | 0.072 9 | 1 | 0.072 9 | 0.486 2 |
| $x_2x_9$ | 0.497 | 1 | 0.497 | 0.096 5 |
| $x_7x_9$ | 1.12 | 1 | 1.12 | 0.023 5 * |
| $x_2^2$ | 1.14 | 1 | 1.14 | 0.022 7 * |
| $x_7^2$ | 0.506 3 | 1 | 0.506 3 | 0.094 0 |
| $x_9^2$ | 0.042 7 | 1 | 0.042 7 | 0.591 2 |
| 残差 | 0.134 9 | 7 | 0.944 6 | |
| 失拟项 | 0.056 2 | 3 | 0.168 5 | 0.831 8 |
| 纯误差 | 0.194 | 4 | 0.776 1 | |
| 总和 | | 16 | 42.78 | |

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

数 $R^2_{adj}=0.949\,5$，表明拟合方程拟合程度较好；变异系数为 1.41%，精确度为 21.073 8，表明本试验具有较高的可靠性和精确度。

应用 Design-Expert 12.0 软件绘制 3 个显著性因素交互作用堆积角响应曲面，如图 10 所示。由图 10a 可知，当 $x_2$ 一定时，堆积角随着 $x_7$ 的增加而显著升高，表明 $x_7$ 对堆积角影响极显著；而当 $x_7$ 一定时，堆积角随着 $x_2$ 的增加呈先增后减的趋势，对堆积角的影响较小。由图 10b 可知，当 $x_2$ 一定时，堆积角随着 $x_9$ 的增加而显著升高，表明 $x_9$ 对堆积角影响极显著；当 $x_9$ 一定时，堆积角随着 $x_2$ 的增加呈先升后降的变化趋势。由图 10c 可知，当 $x_7$ 一定时，堆积角随着 $x_9$ 的增加显著升高；当 $x_9$ 一定时，堆积角随 $x_7$ 的增加显著升高，两者存在显著交互作用。

### 2.3.4 参数优化

利用 Design-Expert 12.0 软件的优化模块，以物理试验测定的混合脱出物堆积角（26.31°）为目标值进行寻优，得到一组最优参数组合：籽粒-瘪谷静摩擦因数 $x_2$ 为 0.87、瘪谷-瘪谷碰撞恢复系数 $x_7$ 为 0.45、瘪谷-瘪谷滚动摩擦因数 $x_9$ 为 0.037。

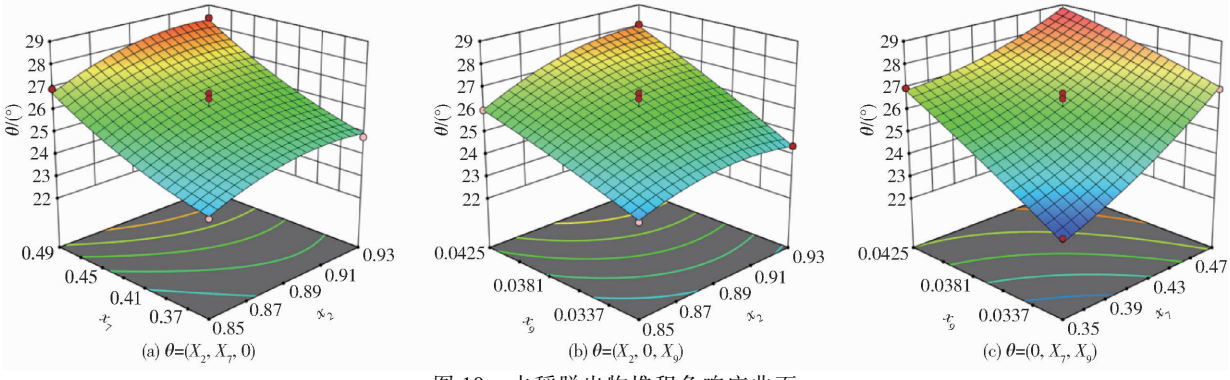



图 10 水稻脱出物堆积角响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of repose angle of rice threshed material

## 3 验证试验

### 3.1 堆积角验证试验

为验证标定参数的可靠性，在 EDEM 2022.2 中设置优化后的参数，其余接触参数取中值，在颗粒工厂中 1 s 内生成 400 粒籽粒、150 根茎秆和 600 粒瘪谷，试验重复 3 次，测得堆积角分别为 26.03°、26.84°、25.62°，平均值为 26.16°，与物理试验结果的相对误差为 0.57%，堆积形态对比如图 11 所示，表明标定的参数可靠。

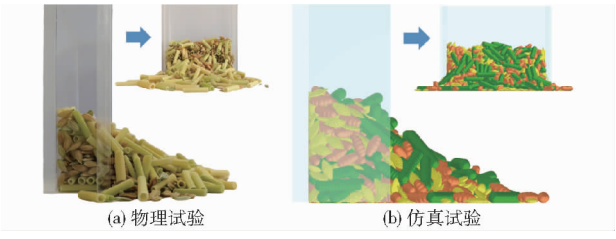



图 11 物理试验与仿真试验对比

Fig. 11 Comparison between physical experiments and simulation experiments

### 3.2 悬浮速度仿真验证试验

为探究水稻脱出物的空气动力学特征，给气固耦合清选仿真提供可靠的仿真模型，基于 EDEM－Fluent 气固两相流耦合方法开展悬浮速度仿真验证试验。物料颗粒本征参数和接触参数均采用前文标定结果，在 EDEM 2022.2 中建立水稻脱出物离散元模型，悬浮速度测量装置按照比例 1∶1 进行几何建模，并导入 Workbench 2021 R1 进行网格划分，生成的网格模型以 MSH 格式导入 Fluent 中进行气相数值模拟，气固耦合计算采用 Euler－Lagrange 模型。仿真中，入风口设置为速度入口，出风口设置为压力出口。根据试验测得的悬浮速度范围，分别选取籽粒、茎秆、瘪谷的仿真入口风速为：10.0、5.0、3.5 m/s。

Fluent 的计算时间步长设置为 $1\times10^{-4}$ s，为 EDEM 时间步长的 100 倍，时间步数为 $5\times10^{4}$ 步，仿真总时长为 5 s，数据保存间隔为 0.01 s。

物料颗粒在距入风口 100 mm 的下稳流管段处生成，在气流作用下沿锥形观察管向上运动，当所受流体曳力与重力达到动态平衡时，颗粒在一定高度范围内呈现稳定悬浮状态，并伴随小幅上下波动，仿真结果如图 12 所示。

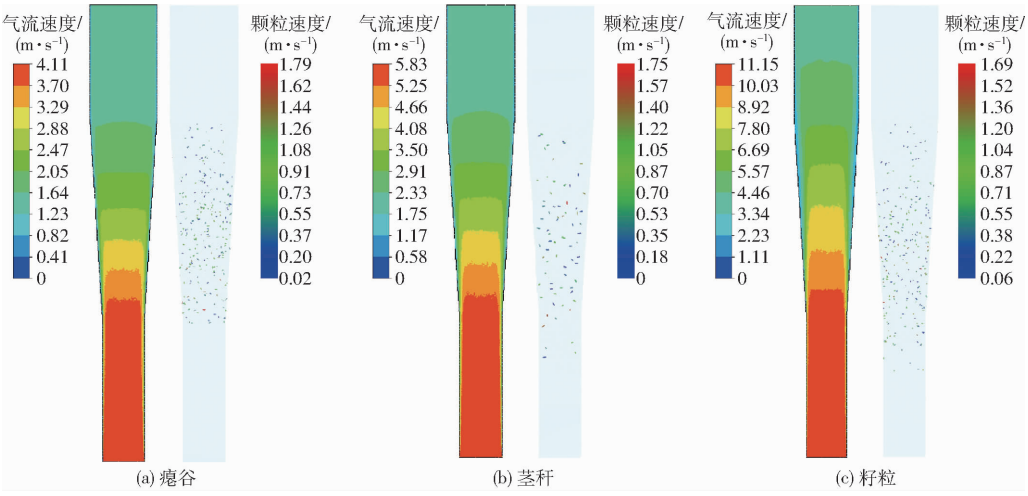



图 12　各水稻脱出物悬浮位置与速度流场分布

Fig. 12　Suspension positions and velocity field distributions of various rice threshed materials

由图 12 可知，锥形观察管内气流速度沿高度方向呈现明显梯度分布，靠近入风口区域气流速度较大，沿管道向上逐渐减小，与悬浮速度测量装置内的实际流场特征一致。在同一横截面内，空气流速由管道中心向管壁方向呈递减分布。该流场特性使颗粒在气流作用下不仅产生向上的运动趋势，同时受到径向速度梯度影响，表现出向管壁方向的迁移行为。在对应入口风速条件下，颗粒运动至局部气流速度低于其悬浮速度的区域时，沿锥形观察管壁下滑，并在重力与流体曳力共同作用下重新进入高速气流区，形成周期性的上下浮动运动，最终在一定高度范围内实现稳定悬浮。不同脱出物的稳定悬浮高度存在明显差异：籽粒主要分布于流场下部气流速度较大的区域，而茎秆和瘪谷则在较高位置形成稳定悬浮区间。根据颗粒稳定悬浮位置获取对应的空气流速范围，采用悬浮速度范围中心值进行相对误差计算[31]，公式为

$$\varepsilon=\frac{|v_m-v_n|}{v_n}\times100\% \tag{9}$$

式中　$\varepsilon$——相对误差，%

$v_m$——仿真试验悬浮速度中心值，m/s

$v_n$——物理试验悬浮速度中心值，m/s

试验结果如表 14 所示，水稻籽粒、茎秆、瘪谷的悬浮速度仿真值分别为 8.15、4.18、2.84 m/s，与物理值的相对误差分别为 1.37%、1.95%、3.73%，这表明仿真模型能够合理反映不同脱出物在气流作用下的受力差异及其悬浮行为。

**表 14　各水稻脱出物悬浮速度对比**

**Tab. 14　Comparison of suspension velocities of various rice threshed materials**　m/s

| 试验对象 | 悬浮速度范围 | | 悬浮速度中心值 | |
|---|---|---|---|---|
| | 仿真值 | 物理值 | 仿真值 | 物理值 |
| 籽粒 | 5.58 ~ 10.50 | 5.43 ~ 10.65 | 8.15 | 8.04 |
| 茎秆 | 2.57 ~ 5.79 | 2.45 ~ 5.74 | 4.18 | 4.10 |
| 瘪谷 | 1.62 ~ 4.06 | 1.68 ~ 4.22 | 2.84 | 2.95 |

### 3.3　CFD－DEM 气固耦合清选仿真验证试验

此外，基于清选装置实机结构，构建了水稻脱出物清选离散元仿真模型，如图 13 所示。通过 CFD－DEM 气固耦合仿真模拟脱出物在清选室的运动状态，并将损失率与含杂率的仿真结果与实测结果进行对比分析。

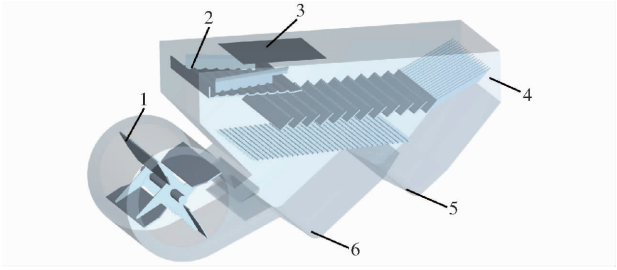



图 13　清选仿真模型

Fig. 13　Cleaning simulation model

1. 风机　2. 振动筛　3. 颗粒工厂　4. 排杂口　5. 杂余输送搅龙　6. 籽粒输送搅龙

#### 3.3.1　模型搭建及参数设置

在保证仿真精度的前提下，利用 Solidworks 2023 对清选装置进行模型简化，在 Workbench 2021 R1 的 Mesh 模块中采用四面体非结构网格对清选模

型进行划分[32]，并对叶轮、振动筛等位置局部加密处理，网格总数约为 $3\times10^6$，将网格模型保存为 MSH 文件，如图 14 所示。水稻脱出物颗粒模型依据前期标定结果建立，籽粒与茎秆由多球聚合而成，瘪谷则基于几何模型在 EDEM 2022.2 中填充生成。

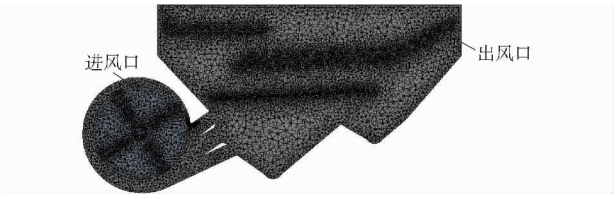



图 14 网格模型

Fig. 14 Mesh model

将 MSH 文件导入 Fluent 软件中进行气相数值模拟参数设置，采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型[33]，基于压力的瞬态求解器，重力加速度方向为 $Y$ 轴负方向，大小为 9.81 m/s$^2$。将进风口设定为压力入口，总压为零，出风口设定为压力出口，风机叶轮区域设置为动参考坐标系，转速为 1 300 r/min，此时清选室内的气流分布能够较好地满足清选作业所需的风速条件。将 MSH 文件导入 EDEM 软件中进行固相数值模拟参数设置，采用 Hertz－Mindlin（no slip）接触模型[34]，物料颗粒本征参数和接触参数均基于前文标定结果。颗粒由振动筛上方颗粒工厂生成，初始速度设置为零，以模拟实际喂入过程。CFD－DEM 耦合计算选用 Eulerian 模型，Fluent 的计算时间步长设置为 $1\times10^{-4}$ s，为 EDEM 时间步长的 100 倍，时间步数为 $3\times10^4$ 步，仿真总时长为 3 s，数据保存间隔为 0.01 s，以准确捕捉清选过程中气固两相流动及物料运动分离行为。

### 3.3.2 仿真结果分析

仿真结果如图 15 所示，根据 1.1 节中统计的脱出物各组分质量分数在颗粒工厂中动态生成，水稻籽粒、茎秆和瘪谷质量分数分别为 82%、12% 和 6%。通过前期堆积角标定的接触参数，为脱出物在清选室内的分层、滑移等运动行为提供了理论支撑。由于脱出物各组分间以及与振动筛的接触参数不同，其在气流与振动筛协同作用下的运动行为表现出显著差异：在持续振动下抛撒、松散，大部分茎秆与瘪谷随气流从排杂口排出，籽粒则透过筛孔落入输送搅龙，总体来看耦合仿真可以较为准确地反应脱出物在清选室的运动状态。在 EDEM 2022.2 后处理模块 Grid Bin Group 统计籽粒输送搅龙和出风口处各脱出物的质量，清选环节水稻籽粒损失率和含杂率计算公式为

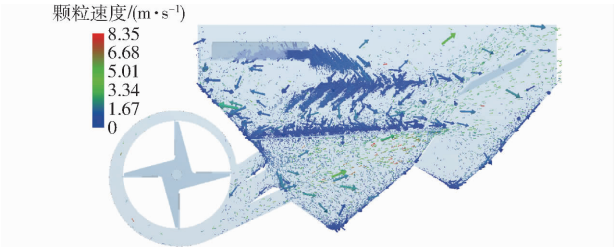



图 15 仿真结果

Fig. 15 Results of simulation

$$\begin{cases} Y_1=\dfrac{m_0}{m_1}\times100\% \\ Y_2=\dfrac{m_2}{m_3}\times100\% \end{cases} \tag{10}$$

式中 $Y_1$——损失率，%

$m_0$——出风口籽粒质量，g

$m_1$——颗粒工厂生成的籽粒质量，g

$Y_2$——含杂率，%

$m_2$——籽粒输送搅龙茎秆与瘪谷总质量，g

$m_3$——籽粒输送搅龙脱出物总质量，g

计算得到水稻籽粒损失率为 0.17%，含杂率为 0.58%。

### 3.4 台架验证试验

依托海南大学智能农机装备团队自主研制的综合籽粒脱粒清选试验台开展台架试验，该试验台由输送带、脱粒分离装置、离心风机和振动筛等关键部件组成，如图 16 所示，工作参数可通过控制柜实时调控。

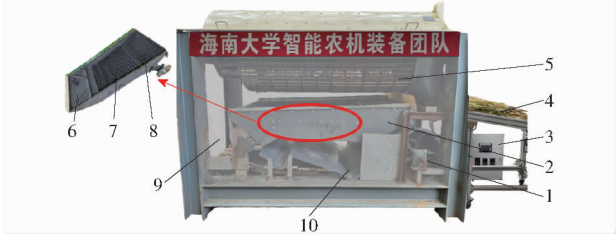



图 16 台架试验

Fig. 16 Bench test

1. 离心风机 2. 振动筛 3. 控制柜 4. 输送带 5. 纵轴流脱粒分离装置 6. 抖动板 7. 鱼鳞筛 8. 尾筛 9. 透明侧板 10. 籽粒输送搅龙

试验结束后，分别收集出风口及籽粒输送搅龙处的物料，经分选、称量后计算，在风机转速 1 300 r/min、振动筛振频 6 Hz 时，清选环节水稻籽粒损失率为 0.18%，含杂率为 0.61%。仿真试验与台架试验所获得的损失率与含杂率相对误差分别为 5.56% 和 4.92%，进一步验证了接触参数标定的可靠性和准确性。

## 4 结论

（1）以水稻制繁种联合收获脱出物为研究对象，系统开展了各脱出物本征参数、接触参数与悬浮

速度测定。测得水稻籽粒、茎秆、瘪谷的泊松比分别为 0.31、0.39、0.35；剪切模量分别为 78.8、1.0、1.4 MPa；测得钢板与籽粒、茎秆、瘪谷静摩擦因数分别为 0.46～0.63、0.41～0.50、0.54～0.72；籽粒与籽粒、茎秆、瘪谷静摩擦因数分别为 0.72～0.93、0.45～0.72、0.81～0.97；茎秆与茎秆、瘪谷静摩擦因数分别为 0.43～0.61、0.55～0.87；瘪谷与瘪谷静摩擦因数为 0.88～1.05。钢板与籽粒、茎秆、瘪谷滚动摩擦因数分别为 0.014～0.027、0.012～0.024、0.017～0.029；籽粒与籽粒、茎秆、瘪谷滚动摩擦因数分别为 0.025～0.042、0.022～0.038、0.024～0.045；茎秆与茎秆、瘪谷滚动摩擦因数分别为 0.021～0.036、0.023～0.045；瘪谷与瘪谷滚动摩擦因数为 0.026～0.048。钢板与籽粒、茎秆、瘪谷碰撞恢复系数分别为 0.46～0.70、0.22～0.46、0.33～0.54；籽粒与籽粒、茎秆、瘪谷碰撞恢复系数分别为 0.42～0.61、0.25～0.49、0.39～0.55；茎秆与茎秆、瘪谷碰撞恢复系数分别为 0.17～0.41、0.24～0.47；瘪谷与瘪谷碰撞恢复系数为 0.28～0.56。籽粒、茎秆、瘪谷悬浮速度分别为 5.43～10.65、2.45～5.74、1.68～4.22 m/s。

(2)开展了水稻脱出物离散元仿真参数标定，通过 Plackett－Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box－Behnken 试验确定了对混合脱出物堆积角影响显著参数及取值范围，通过 Design-Expert 12.0 软件优化模块得到显著性参数最佳组合参数为：籽粒-瘪谷静摩擦因数为 0.87、瘪谷-瘪谷碰撞恢复系数为 0.45、瘪谷-瘪谷滚动摩擦因数为 0.037。

(3)开展了堆积角验证试验，在最优组合参数下仿真堆积角平均值为 26.16°，与物理试验结果的相对误差为 0.57%。为验证水稻脱出物的空气动力学特征，开展了悬浮速度仿真验证试验，得到水稻籽粒、茎秆、瘪谷的悬浮速度仿真值分别为 8.15、4.18、2.84 m/s，与物理值的相对误差分别为 1.37%、1.95%、3.73%。结合标定的水稻脱出物不同组分间接触参数，开展了基于 CFD－DEM 气固耦合清选仿真和台架验证试验。结果表明：清选仿真试验水稻籽粒损失率为 0.17%，含杂率为 0.58%；仿真试验与台架试验籽粒损失率与含杂率相对误差分别为 5.56% 和 4.92%。表明标定的水稻脱出物接触参数可为水稻制繁种联合收获过程的离散元仿真研究提供基础参数。

## 参　考　文　献


[1] 贾冠清，刁现民. 中国谷子种业创新现状与未来展望[J]. 中国农业科学，2022，55(4)：653－665.
JIA Guanqing, DIAO Xianmin. Current status and perspectives of innovation studies related to foxtail millet seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(4): 653－665. (in Chinese)

[2] 刘爱民，肖层林，廖伏明. 杂交水稻制种产业回顾及持续发展对策[J]. 杂交水稻，2023，38(3)：154－158.
LIU Aimin, XIAO Cenglin, LIAO Fuming. Review of hybrid rice seed production industry and countermeasures for sustainable development[J]. Hybrid Rice, 2023, 38(3): 154－158. (in Chinese)

[3] 唐文帮，陈晓军，张桂莲，等. 杂交水稻机械化制种现状与技术突破[J]. 中国稻米，2022，28(5)：20－27.
TANG Wenbang, CHEN Xiaojun, ZHANG Guilian, et al. Present situation and technical breakthrough of hybrid rice mechanized seed production[J]. China Rice, 2022, 28(5): 20－27. (in Chinese)

[4] LI S, HUAN X, WANG T, et al. Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108644.

[5] CHEN Z, DUAN A, LIU Y, et al. Discrete element contact model and parameter calibration of sticky particles and agglomerates [J]. Journal of Terramechanics, 2024, 116: 100998.

[6] 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.

[7] LIANG Rongqing, CHEN Xuegeng, ZHANG Bingcheng, et al. Calilbration and test of the contact parameters for chopped cotton stems based on discrete element method[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(5): 1－8.

[8] BAHRAMI M, NADERI-BOLDAJ M, GHANBARIAN D, et al. Simulation of plate sinkage in soil using discrete element modelling: calibration of model parameters and experimental validation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 203: 104700.

[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] 侯占峰，戴念祖，陈智，等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报，2020，36(24)：46－54.
HOU Zhanfeng, DAI Nianzu, CHEN Zhi, et al. Measurement and calibration of physical property parameters for *Agropyron* seeds in a discrete element simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 46－54. (in Chinese)

[11] 刘大为,段佳鹏,陈星宇,等. 基于 EDEM 的稻种离散元摩擦参数标定[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(2):189 - 195.
LIU Dawei, DUAN Jiapeng, CHEN Xingyu, et al. Calibration of friction parameters of seed particle models of hybrid rice based on EDEM[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(2): 189 - 195. (in Chinese)

[12] 闫建伟,魏松,胡冬军,等. 白萝卜种子颗粒模型离散元接触参数标定与试验[J]. 中国农业科技导报,2022,24(5):119 - 128.
YAN Jianwei, WEI Song, HU Dongjun, et al. Calibration and testing of discrete element contact parameters for white radish seed particle models[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022,24(5): 119 - 128. (in Chinese)

[13] 孙凯,于建群,赵瑾汶,等. 面向切割过程仿真的小麦茎秆模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报,2025, 56(7): 116 - 127.
SUN Kai, YU Jianqun, ZHAO Jinwen, et al. Parameter calibration and experimental validation of wheat straw model for cutting process simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 116 - 127. (in Chinese)

[14] 杜哲,李邓辉,李心平,等. 茶茎秆离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):311 - 320.
DU Zhe, LI Denghui, LI Xinping, et al. Calibration and experiment of discrete element model parameters for tea stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 311 - 320. (in Chinese)

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

[16] YANG R, WANG P, QING Y, et al. Establishment of whole-rice-plant model and calibration of characteristic parameters based on segmented hollow stalks[J]. Agriculture, 2025, 15(3): 327.

[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] 罗伟文,申海洋,顾满,等. 湿黏地播后镇压过程土壤-小麦交互模型参数标定[J]. 农业机械学报,2024, 55(增刊 1): 147 - 155.
LUO Weiwen, SHEN Haiyang, GU Man, et al. Parameter calibration of discrete element model for wet clay soil - wheat mixture for simulating compaction process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 147 - 155. (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] 郭辉,韩骏轩,吕增帅,等. 联合收获油葵脱出物离散元模型构建与参数标定[J]. 农业机械学报,2025,56(5):319 - 330.
GUO Hui, HAN Junxuan, LÜ Zengshuai, et al. Discrete element model construction and parameter calibration of combined harvest oil sunflower extract[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 319 - 330. (in Chinese)

[21] 舒彩霞,杨佳,万星宇,等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(9):34 - 43.
SHU Caixia, YANG Jia, WAN Xingyu, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 34 - 43. (in Chinese)

[22] 朱惠斌,李镕东,白丽珍,等. 不同含水率下水稻秸秆的离散元参数标定[J]. 南京农业大学学报,2025,48(5):1180 - 1191.
ZHU Huibin, LI Rongdong, BAI Lizhen, et al. Calibration of discrete element parameters of rice straw under different moisture contents[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(5): 1180 - 1191. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 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)

[25] 徐常塑.割前脱粒凹体梳齿增流式割台梳运机理研究与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
XU Changsu. Research and experiment on the stripping mechanism of concave combs and increasing flow header for stripping prior to cutting[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[26] 侯华铭,崔清亮,郭玉明.全喂入谷子联合收获机脱出物含水率对其悬浮特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(24):29-35.
HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming. Effects of moisture contents of threshed materials from whole-feeding combine for foxtail millet on their suspension characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 29-35. (in Chinese)

[27] 赵宏波,王学振,郑智旗,等.农业装备领域离散元法应用研究进展[J].农业机械学报,2025,56(7):1-19.
ZHAO Hongbo, WANG Xuezhen, ZHENG Zhiqi, et al. Research status and progress of discrete element method applications in agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 1-19. (in Chinese)

[28] 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)

[29] 万星宇,舒彩霞,徐阳,等.油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(14):27-35.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27-35. (in Chinese)

[30] 原建博,吴崇友,李骅,等.我国南方两种水稻脱出物物理特性测定与分析[J].农机化研究,2018,40(2):154-159.
YUAN Jianbo, WU Chongyou, LI Hua, et al. Determination and analysis of two kinds of threshed rice physical properties in South China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 154-159. (in Chinese)

[31] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等.基于 EDEM-Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J].农业机械学报,2020,51(3):69-77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM-Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):69-77. (in Chinese)

[32] 臧英,张美林,黄子顺,等.基于 CFD-DEM 的气送式稻麦兼用型高速播种机种子减速器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):222-234.
ZANG Ying, ZHANG Meilin, HUANG Zishun, et al. Design and test of seed reducer for air-fed rice-wheat high-speed seeder based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 222-234. (in Chinese)

[33] LI J, HUANG Z, JIANG Y, et al. Design and test of a precision air-suction maize seed-metering device for plot planting based on CFD-DEM coupling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 238: 110888.

[34] QIAO Y, HUANG S, YANG C, et al. Calibration and testing of discrete element simulation parameters for ultrasonic vibration-cutter-soil interaction model[J]. Agriculture, 2025, 15(1):20.