doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.032

基于离散元法的谷子脱出物建模与参数标定

张东明[1]　黄紫阳[1]　陈一夫[1]　衣淑娟[1]　李衣菲[1,2]

(1.黑龙江八一农垦大学工程学院,大庆 163319;2.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

摘要:针对谷子联合收获过程中清选环节对多组分异质颗粒缺乏精准建模与参数支撑的问题,本文开展了谷子脱出物建模与参数标定。基于谷子脱出物组成特性,构建了籽粒、谷码和茎秆 3 类典型颗粒模型,采用离散元方法结合自动填充技术分别进行球体、异形体和圆柱体建模,并通过填充球面数量与形态差异度分析优化建模形态。在颗粒物理参数测定基础上,以休止角为指标,采用 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡法与 Box-Behnken 响应面优化相结合的参数标定方法,实现了籽粒、谷码、短茎秆接触参数修正,仿真与实际休止角平均误差分别为 1.94%、3.72%、1.16%。为验证模型精度,开展高速摄像验证试验,利用 TEMA 软件提取颗粒轨迹并与仿真结果进行对比,结果显示 3 类颗粒轨迹重合度均大于 0.75,所得平均绝对误差与均方根误差均处于较低水平,说明仿真轨迹在幅值与趋势方面均与实测结果高度一致,验证了模型预测动态行为的精度与可行性。研究结果表明,本文所构建的建模方法与标定参数具备良好的物理一致性与工程适用性,可为谷子清选过程颗粒动力学仿真与机理研究提供支撑。

关键词:谷子;联合收获;谷子脱出物;离散元建模;参数标定

中图分类号:S515　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0354-12　　**OSID**:

Discrete Element Method Based Modeling and Parameter Calibration for Millet Threshing Mixture

ZHANG Dongming[1]　HUANG Ziyang[1]　CHEN Yifu[1]　YI Shujuan[1]　LI Yifei[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
2. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of lack of accurate modeling and parameter support for multi-component heterogeneous particles in the clearing link during the combined millet harvesting process, a research on the modeling and parameter calibration of grain threshing mixture was carried out. Based on the compositional characteristics of millet threshing mixture, three types of typical particle models were constructed for seeds, millet panicle clusters and stalks, and the discrete element method combined with the auto-filling technology was used to model spheres, heteromorphs and cylinders, respectively, and the modeling morphology was optimized through the analysis of the number of filled spherical surfaces and the degree of morphological differences. Based on the determination of physical parameters of particles, using the angle of repose as an index, the parameter calibration method combining Plackett-Burman test, the steepest ascent test and Box-Behnken response surface optimization was adopted to realize the correction of contact parameters of seeds, millet panicle clusters and short stalks, and the average errors of simulation and actual angle of repose were 1.94%, 3.72% and 1.16%, respectively. In order to verify the accuracy of the model, high-speed camera validation tests were carried out, and the particle trajectories were extracted by using TEMA software and compared with the simulation results. The results showed that the overlap of the three types of particle trajectories was greater than 0.75, and the obtained mean absolute error and root mean square error were at a low level, indicating that the simulation

收稿日期:2025-05-15　修回日期:2025-06-24

基金项目:黑龙江省博士后科学基金项目(LBH-Z24251)、大庆市指导性科技项目(zd-2025-033)、学成、引进人才科研启动计划项目(XYB202309)和"三纵"青创人才项目(ZRCQC202304)

作者简介:张东明(1994—),男,讲师,博士,主要从事农作物收获技术与装备研究,E-mail:1105561622@qq.com

通信作者:衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事农作物收获技术与装备研究,E-mail:yishujuan_2005@126.com

trajectories were highly consistent with the measured results in terms of amplitude and trend, which verified the accuracy, and the model constructed was highly consistent with the measured results. The results showed that the modeling method and calibration parameters constructed had good physical consistency and engineering applicability, which can provide effective support for the particle dynamics simulation and mechanism research of millet cleaning process.

Key words: millet; combine harvest; millet threshing mixture; modeling by discrete element method; parametric calibration

0　引言

谷子是我国重要的小籽粒杂粮作物之一，近年来在保障粮食多样化供给与推进生态农业发展中发挥着积极作用[1]。而谷子籽粒粒径小、脱出物成分复杂，导致清选作业一直是联合收获的难点所在[2]。谷子脱出物作为清选作业的直接对象，主要由籽粒、谷码、短茎秆等组成，不同组分颗粒尺寸、形状和物理属性差异显著，影响物料流运动规律与筛分行为[3-5]。因此，谷子脱出物建模与参数标定，不仅有助于揭示清选过程中物料接触、跳动与分层机制，也为深入开展谷子清选筛分机理研究和设备优化设计提供理论基础和数据支撑[6-8]。

近年来，离散元方法（Discrete element method，DEM）作为一种以颗粒为基本单元，模拟颗粒系统中相互作用、运动行为及力学响应的数值模拟技术，已被广泛应用于农业工程环节[9-14]。针对农作物复杂物料建模的需求，离散元建模技术也在异形颗粒方面取得了持续进展。为弥补单球体模型精度不足，多球体填充法被广泛应用于豆荚、玉米种子等建模中，兼顾形貌拟合与数值稳定性。凸包、多面体、分层建模等方法进一步提升了几何保真度与接触行为真实性，为农作物脱出物异形颗粒建模提供了理论支持[15-18]。

然而，仅具几何逼真性的模型仍难以实现高精度仿真，接触参数标定是确保离散元物理一致性与工程适用性的关键环节[19-22]。常用方法包括物理测量、虚拟试验及基于休止角的反向推导，近年来统计学设计（如 Plackett－Burman、响应面法）在多参数协同优化中亦展现出良好效果[23-25]。尽管已有研究在农业物料建模与参数标定方面积累了经验，但在小籽粒杂粮如谷子脱出物异形建模与动态验证上仍相对薄弱，因此，构建高精度模型并开展系统参数标定对提升清选仿真准确性和揭示分离机制具有重要意义。

本文以龙谷 31 号谷子脱出物为研究对象，根据其特性参数，分别对籽粒、谷码、短茎秆进行建模与参数标定。构建籽粒、谷码和短茎秆离散元模型，采用 Plackett－Burman 试验、最陡爬坡试验与响应面优化方法对接触参数进行系统标定，以期为谷子清选机理揭示与清选装置优化提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　谷子脱出物成分与试验材料

谷子脱出物是指谷子在联合收获过程中经收割、运输、脱粒分离后的产物。处于脱粒分离装置中的谷子，在脱粒滚筒与凹板筛配合下，经过打击、碾压、揉搓等作用，由籽粒、谷码、短茎秆以及刺毛、颖壳、等细小杂余组成的脱出物透过凹板筛进入清选装置中。以龙谷 31 号为研究对象，选用其脱出物中主要组成成分，即籽粒、谷码、短茎秆为试验材料。谷子脱出物及各组成成分如图 1 所示。

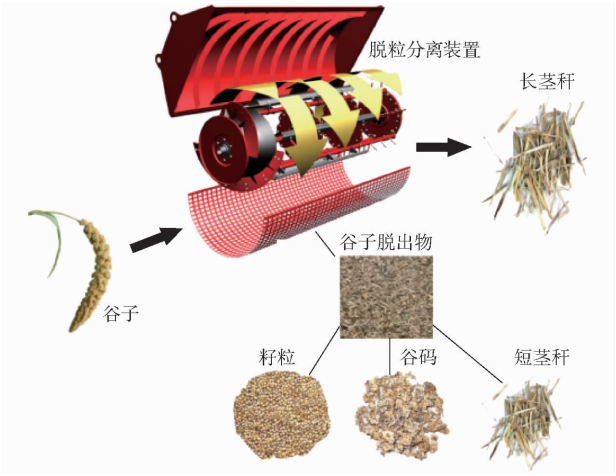

图 1　谷子脱出物及各组成成分

Fig. 1　Millet threshing mixture and its constituents

1.2　特性参数测定方法

1.2.1　形状几何尺寸

谷子籽粒呈类球形，体积尺寸较小。为更清晰地描述谷子籽粒外形特性，测量谷子籽粒外形几何尺寸，即长度、宽度、高度。所取样本籽粒数量为 100，利用精度 0.01 mm 电子游标卡尺分别对样本籽粒进行三轴尺寸测定。

谷码是脱粒时籽粒未完全从枝梗上分离，形成具有多个籽粒和细小枝梗共同组成的团状结构。由于谷码形成条件的随机性，其形状尺寸具有不规则和不确定性。为系统描述谷码尺寸形态，脱粒后在滚筒下方均匀取样，选取样本覆盖主要粒径区间并

具代表性。图像识别结果显示,谷码可分为类球体、类长方体、类锥体和类椭球体 4 类结构,如图 2 所示,每类选取 100 个样本测量其长、宽、高。

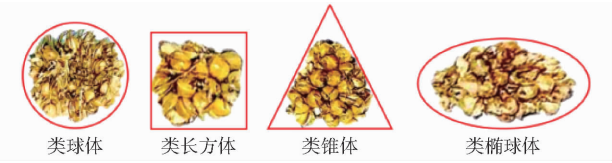

图 2 谷码形态结构

Fig. 2 Structure of millet panicle cluster morphology

短茎秆是脱粒时被打碎的茎秆,主要为长条形结构,可视为短圆柱体。沿脱粒滚筒轴向随机选取 10 个点,分别在每个点下方取 30 个茎秆,测量其长度、截面直径。

1.2.2 休止角

休止角又称堆积角,反映颗粒物料内摩擦特性及散落性能。采用 100 mL 内径 40 mm 量筒与 45 号钢板作为主要试验器具,对籽粒、谷码和短茎秆进行测定,谷码与茎秆样品尺寸控制在规定误差范围内。试验过程中,物料自量筒中自然堆积形成圆锥体,测量其母线与水平面夹角,即为休止角。

1.2.3 摩擦因数

为表征谷子脱出物各成分颗粒间以及与设备材料表面之间的摩擦行为,开展静摩擦角与动摩擦角的测定试验。试验设备为自制斜面仪,如图 3 所示。斜面仪角度测量采用数显角度尺,最小角度分度为 0.01°,试验过程中采用人工观察结合视频记录以降低主观误差,提高测量精度。

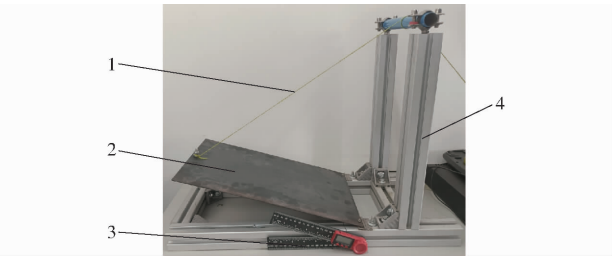

图 3 自制斜面仪

Fig. 3 Homemade inclinometer

1. 牵引绳 2. 钢板 3. 数显角度尺 4. 支架

静摩擦因数测定通过缓慢提升钢板至物料临界滑动,如图 4 所示,记录此时与水平面夹角 α_1,静摩擦因数计算式为

$$f_1 = \tan\alpha_1 \tag{1}$$

式中 f_1——静摩擦因数

α_1——静摩擦临界角,(°)

依据上述方法测定了不同组分间的静摩擦因数。以籽粒-籽粒为例,在底板表面黏附籽粒层并进行测试,其余组分测量方法相同。

滚动摩擦因数测试采用与静摩擦因数相同的装置与方法,选用形态规则、球形度较高的籽粒、谷码样本及截面圆整的茎秆进行测试。为提高参数工程适用性,对部分样本形貌适当调整。试样布置后,缓慢升高斜面角,直到试样达到临界状态并发生滚动,如图 5 所示。记录发生滚动时与水平面夹角 α_2,滚动摩擦因数计算式为

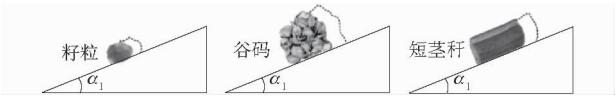

图 4 物料临界滑动状态

Fig. 4 Critical sliding state of material

$$f_2 = r\tan\alpha_2 \tag{2}$$

式中 f_2——滚动摩擦因数

r——球体回转半径,mm

α_2——滚动临界角,(°)

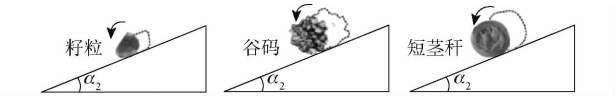

图 5 物料临界滚动状态

Fig. 5 Critical rolling state of material

1.2.4 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数是分析谷子脱出物颗粒之间及与接触表面之间的碰撞行为的关键参数[26]。本研究壁面材料选用振动筛与脱出物直接接触材料 45 号钢。颗粒间碰撞恢复系数测定试验设备为自制气吹式碰撞测定装置,如图 6 所示。

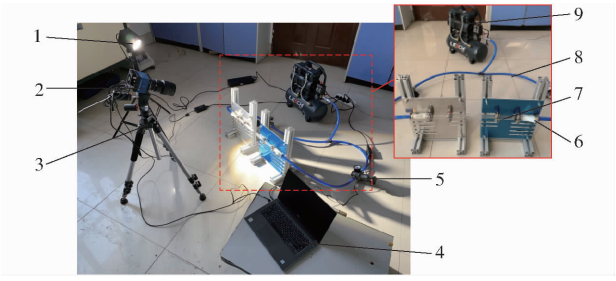

图 6 气吹式碰撞恢复系数测定装置

Fig. 6 Air-blown collision recovery coefficient measuring device

1. 照明灯 2. 高速摄像机 3. 支架 4. 拍摄系统 5. 调压阀 6. 进料口 7. 玻璃轨道 8. 输气管 9. 气泵

为测定颗粒间及颗粒与壁面间的碰撞恢复系数,分别开展气流驱动平抛试验与自由落体碰撞试验。前者通过调整玻璃轨道水平并控制两侧气流,使物料沿轨道平抛,利用高速摄像记录碰撞过程,提取运动参数计算碰撞恢复系数,计算式为

$$e = \frac{V_{p1} - V_{p2}}{V_{p3} - V_{p4}} \tag{3}$$

式中 e——物料间碰撞恢复系数

V_{p1}——物料 1 碰撞后速度,m/s

V_{p2}——物料 2 碰撞后速度，m/s
V_{p3}——物料 1 碰撞前速度，m/s
V_{p4}——物料 2 碰撞前速度，m/s

颗粒与壁面间碰撞恢复系数测定试验设备为自由落体式碰撞恢复系数测定装置，如图 7 所示。将物料自由释放至水平钢板，拍摄其反弹过程，提取位移与高度变化计算恢复系数，计算式为

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}} \tag{4}$$

式中　H——物料下落高度，mm
h——物料回弹高度，mm



图 7　自由落体式碰撞恢复系数测定装置

Fig. 7　Free-fall collision recovery coefficient measuring device

1. 拍摄系统　2. 高速摄像机　3. 照明灯　4. 钢板　5. 背景刻度板

1.2.5　泊松比

为完善谷子脱出物颗粒力学参数建模，对典型代表性样本泊松比进行了测定。泊松比是描述材料弹性特性的基本参数之一[27-28]，试验设备为电子万能材料试验机，如图 8 所示。

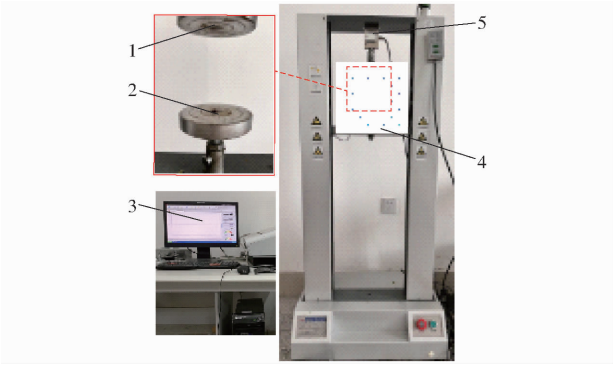

图 8　电子万能材料试验机

Fig. 8　Micro-control electronic universal material testing machine

1. 上端压头　2. 下端圆台　3. 数据采集系统　4. 活动横梁　5. 力传感器

泊松比测定采用万能试验机以压缩速度 5 mm/min对籽粒、谷码和茎秆进行单向压缩试验。试验前测量样品初始尺寸，按设定位移压缩至目标变形量(籽粒 0.8 mm、谷码 3.2 mm、茎秆 2.5 mm)，记录变形前后尺寸，计算泊松比，计算式为

$$\nu = \left|\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right| = \left|\frac{(W_1 - W_2)/W_1}{(L_1 - L_2)/L_1}\right| \tag{5}$$

式中　ν——泊松比
ε_1——物料横向直径应变
ε_2——物料轴向长度应变
L_1——压缩前物料长度，mm
L_2——压缩后物料长度，mm
W_1——压缩前物料直径，mm
W_2——压缩后物料直径，mm

1.2.6　剪切模量

剪切模量是表征颗粒材料刚性的重要参数。采用与泊松比测定相同的单向压缩试验方法，通过分析弹性阶段载荷与变形量，计算各组分弹性模量与剪切模量，计算式为

$$E = \frac{F}{A\varepsilon} \tag{6}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{7}$$

式中　E——弹性模量，MPa
F——物料受到的轴向载荷，N
A——接触面积，mm^2
ε——应变　　G——剪切模量，MPa

1.3　离散元建模方法

采用 EDEM 软件对谷子脱出物中籽粒、谷码、短茎秆建模，可采用手动填充和自动填充 2 种方法构建球体。手动填充方法需依据目标几何轮廓，逐一设定填充球体半径、坐标及数量等参数，适用于颗粒形状规则性较高的情形，如籽粒建模。但对于形态复杂多变的颗粒，该方法效率较低，应用受限，因此，对谷码茎秆颗粒建模可适当采用自动填充以提升建模效率。自动填充建模通过三维建模软件构建几何模型并导入 EDEM，设置填充参数后，依据网格轮廓自动生成颗粒球体，实现复杂异形颗粒高效建模。

1.4　参数标定方法

采用 Plackett - Burman 试验方法筛选关键参数，最陡爬坡法逼近最优区域，最终通过 Box - Behnken 响应面优化获得参数组合[29-30]。标定内容包括颗粒间及颗粒与钢板间的静摩擦因数、滚动摩擦因数与碰撞恢复系数。

2　结果与分析

2.1　特性参数测定结果

2.1.1　形状几何尺寸

根据本文测定方法测得籽粒长度、宽度、高度平均值分别为 1.56、1.52、1.47 mm。测得样本中类球

体、类长方体、类锥体、类椭球体谷码长度最低值分别为 3.89、4.88、3.26、5.14 mm，最高值分别为 11.03、11.17、10.58、12.87 mm；宽度最低值分别为 3.56、3.09、3.11、3.72 mm，最高值分别为 10.84、10.96、11.43、9.60 mm；高度最低值分别为 3.67、3.42、4.91、3.58 mm，最高值分别为 11.26、10.80、12.33、10.24 mm。统计分析谷码长、宽、高分布概率密度如表 1 ~ 3 所示。

表 1 谷码长度分布概率密度

Tab. 1 Probability density of millet panicle cluster length distribution

长度/mm	分布概率密度/%			
	类球体	类长方体	类锥体	类椭球体
0 ~ 5	13	5	19	0
5 ~ 7	32	32	36	28
7 ~ 9	33	36	24	45
≥9	22	27	21	27

表 2 谷码宽度分布概率密度

Tab. 2 Probability density of millet panicle cluster width distribution

宽度/mm	分布概率密度/%			
	类球体	类长方体	类锥体	类椭球体
0 ~ 5	10	7	24	17
5 ~ 7	28	36	45	40
7 ~ 9	37	35	20	36
≥9	25	22	11	7

表 3 谷码高度分布概率密度

Tab. 3 Probability density of millet panicle cluster height distribution

高度/mm	分布概率密度/%			
	类球体	类长方体	类锥体	类椭球体
0 ~ 5	14	13	1	6
5 ~ 7	37	27	17	40
7 ~ 9	28	42	43	36
≥9	21	18	39	18

测得整体样本短茎秆长度、截面直径最低值分别为 7.14、1.52 mm，最高值分别为 128.53、5.98 mm。统计分析茎秆长度分布概率密度如表 4 所示。在短茎秆长度分布中，长度小于等于 10 mm 的碎茎秆不包括质量轻、体积小的细碎杂余，因为在联合收获风筛清选环节中易随细杂余被排出，不作为影响清选分离性能的主要颗粒成分，也未纳入建模对象范围。

表 4 短茎秆长度分布概率密度

Tab. 4 Probability density of short stalk length distribution

长度/mm	分布概率密度/%	长度/mm	分布概率密度/%
0 ~ 10	6	70 ~ 90	19
10 ~ 30	18	90 ~ 110	5
30 ~ 50	23	≥110	2
50 ~ 70	27		

2.1.2 休止角

根据上文测定步骤使物料从量筒内自然下落并形成稳定的圆锥堆体，如图 9 所示。



图 9 谷子脱出物自然堆积

Fig. 9 Natural accumulation of millet threshing mixture

为了提高休止角测量准确性，对物料堆积圆锥体边缘轮廓进行了图像提取与拟合处理，如图 10 所示。

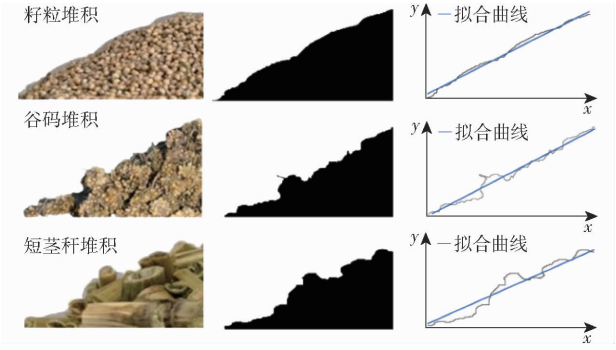

图 10 谷子脱出物休止角提取拟合过程

Fig. 10 Fitting procedure for extracting angle of repose of millet threshing mixture

采用相机对堆积成型后的圆锥体进行正面拍摄，获取原始图像数据；对图像进行预处理，包括图像灰度化、二值化操作，以生成清晰的物料边界轮廓图。基于二值图像，通过像素点扫描提取锥体外缘轮廓线，并采用最小二乘法对提取的边界数据进行线性拟合。最终，根据拟合直线斜率计算堆积体与水平面夹角。籽粒、谷码、短茎秆休止角测定试验均进行 5 次重复试验取平均值，测得籽粒、谷码、茎秆休止角分别为 27.85°、30.90°、24.14°。

2.1.3 摩擦因数

通过统计各组测试数据，得到谷子脱出物各组成成分与钢板之间以及不同组分相互作用下的静摩擦因数与滚动摩擦因数见表 5、6。

2.1.4 碰撞恢复系数

通过本文测定方法获取颗粒间以及颗粒与壁面间碰撞恢复系数如表 7、8 所示。

2.1.5 泊松比与剪切模量

根据万能试验机压缩试验步骤，对每种物料进行 10 次泊松比测定试验，并以各组数据平均值作为

表 5　静摩擦因数测定结果

Tab. 5　Static friction coefficient measurement results

物料-物料	静摩擦因数	物料-钢板	静摩擦因数
籽粒-籽粒	0.49 ~ 0.73	籽粒-钢板	0.41 ~ 0.69
籽粒-谷码	0.59 ~ 0.81	谷码-钢板	0.45 ~ 0.78
籽粒-茎秆	0.50 ~ 0.74	茎秆-钢板	0.38 ~ 0.74
谷码-茎秆	0.53 ~ 0.87		
谷码-谷码	0.61 ~ 0.78		
茎秆-茎秆	0.51 ~ 0.77		

表 6　滚动摩擦因数测定结果

Tab. 6　Rolling friction coefficient measurement results

物料-物料	滚动摩擦因数	物料-钢板	滚动摩擦因数
籽粒-籽粒	0.01 ~ 0.07	籽粒-钢板	0.01 ~ 0.05
籽粒-谷码	0.01 ~ 0.07	谷码-钢板	0.02 ~ 0.09
籽粒-茎秆	0.02 ~ 0.09	茎秆-钢板	0.01 ~ 0.04
谷码-茎秆	0.02 ~ 0.08		
谷码-谷码	0.01 ~ 0.09		
茎秆-茎秆	0.01 ~ 0.07		

表 7　谷子脱出物颗粒间碰撞恢复系数测定结果

Tab. 7　Measurement results of coefficient of recovery of inter-particle collisions of threshing mixture of millet

项目	碰撞恢复系数	项目	碰撞恢复系数
籽粒-籽粒	0.38 ~ 0.42	籽粒-谷码	0.24 ~ 0.33
谷码-谷码	0.26 ~ 0.31	谷码-茎秆	0.24 ~ 0.39
茎秆-茎秆	0.30 ~ 0.45	籽粒-茎秆	0.28 ~ 0.40

表 8　谷子脱出物颗粒与钢板间碰撞恢复系数测定结果

Tab. 8　Measurement results of collision recovery coefficients between millet threshing mixture particles and steel plates

项目	碰撞恢复系数
籽粒-钢板	0.38 ~ 0.48
谷码-钢板	0.26 ~ 0.38
茎秆-钢板	0.32 ~ 0.46

最终结果。测定结果表明，谷子籽粒、谷码和茎秆泊松比为 0.39、0.36 和 0.25。并结合式(6)、(7)计算得各组分材料弹性模量和剪切模量。结果表明，谷子籽粒弹性模量平均值为 1.46 MPa，剪切模量平均值为 0.53 MPa；谷码弹性模量平均值为 0.42 MPa，剪切模量平均值为 0.15 MPa；茎秆弹性模量平均值为 3.60 MPa，剪切模量平均值为 1.44 MPa。

2.2　离散元建模结果

2.2.1　籽粒建模

在谷子脱出物各组分中，籽粒质量占比较大、数量最多，是颗粒系统主要组成部分。虽外形非标准球体，但球形度较高。为控制建模复杂度与计算量，采用等效单球体模型，球体半径设定为 0.75 mm。

2.2.2　谷码建模

谷码具有较高的形态复杂性与结构多样性，可归类为异形颗粒。在建模前，基于前期谷码形态特性研究，对大量样本进行结构统计分析，将其归纳为 4 类典型几何形状：球体、长方体、锥体和椭球体。考虑谷码粒径范围较大(3 mm≤R_{gm}≤13 mm)，选取在统计中占比较高的 8 mm 粒径样本为代表，确定各类形状边界轮廓尺寸，并据此建立基础几何模型。在此基础上，对于粒径不等于 8 mm 的谷码颗粒(R_{gm}≠8 mm)，采用等比例缩放方式调整几何尺寸，从而在统一建模框架下实现不同尺寸谷码颗粒形状表达。

采用自动填充方法，以 4 类典型谷码几何轮廓网格为边界，设定网格单元数、最小颗粒尺寸和平滑值等参数生成等效模型。综合考虑形貌复杂性与计算效率，三轴网格单元数设为 30，最小颗粒尺寸为 0 mm 以确保填充完整。平滑值大于 1 时可减少球体数量但降低表面逼真度，变化曲线如图 11 所示。

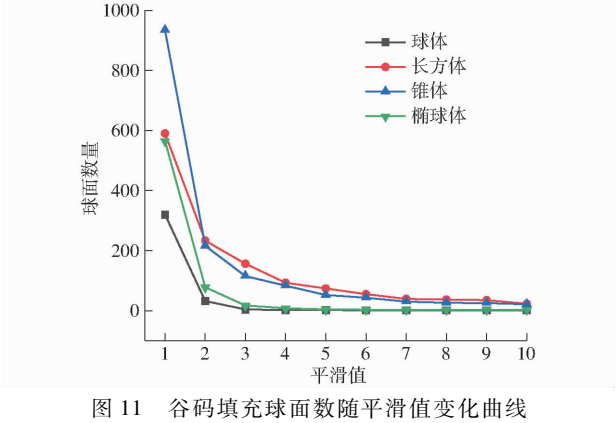

图 11　谷码填充球面数随平滑值变化曲线

Fig. 11　Variation curves of number of filled spheres with smoothing value for millet panicle clusters

为了确定颗粒模型最终形态，需要对不同平滑值下自动填充的颗粒模型进行分析。通过构建形态差异度指标(Discrepancy of shape index，DSI)评价建模颗粒与实际颗粒轮廓之间的差异。采用 ImageJ 图像分析软件，将谷码颗粒图像轮廓转为二值图，再与不同平滑值下建模结果投影进行重叠，计算实际轮廓面积以及建模轮廓与实际轮廓并集、交集面积，计算式为

$$DSI = \frac{A_u - A_i}{A_a} \times 100\% \tag{8}$$

式中　DSI——形态差异度指标，%

A_u——建模轮廓与实际轮廓并集面积，mm^2

A_i——建模轮廓与实际轮廓交集面积，mm^2

A_a——实际轮廓面积，mm^2

DSI 越小表示拟合越好。图 12 以类锥体颗粒

为例,展示了利用 ImageJ 软件分析功能对实际颗粒与不同平滑值仿真颗粒灰度处理、二值化处理后轮廓面积计算过程,填充球面数量(N)与形态差异度指标(DSI)数据见表 9。

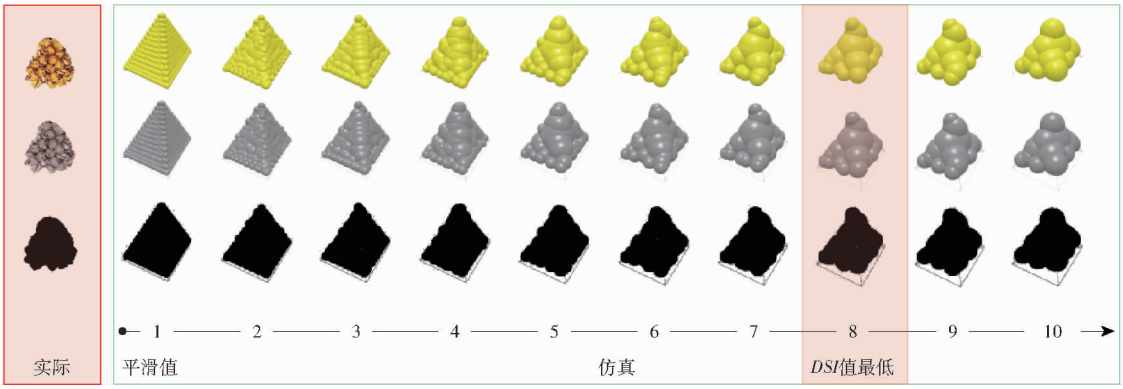

图 12 类锥体颗粒灰度、二值化处理

Fig. 12 Cone-like particle grayscale and binarization processing

表 9 谷码模型填充球面数量与形态差异度指标结果

Tab. 9 Number of filled spheres and degree of morphological variability of millet panicle cluster model

平滑值	球体		长方体		锥体		椭球体	
	N	DSI/%	N	DSI/%	N	DSI%	N	DSI/%
1	320	1.96	590	9.13	934	9.04	565	4.81
2	32	1.92	233	9.05	216	8.86	78	4.62
3	4	1.88	156	8.81	115	8.72	17	4.15
4	2	1.88	93	8.25	83	7.56	8	3.58
5	2	1.88	74	7.64	52	6.21	4	3.06
6	1	1.85	55	6.63	43	5.12	3	2.89
7	1	1.85	39	6.09	30	3.43	3	3.11
8	1	1.85	37	5.13	26	2.61	3	3.25
9	1	1.85	35	3.82	25	3.09	3	3.79
10	1	1.85	23	2.02	21	3.83	3	5.17

为优化谷码典型异形体建模形式,基于自动填充技术,考察不同平滑值下球面填充数量及其对应形态差异度指标,评估各模型几何逼真度与建模合理性。结果表明:球体模型在不同平滑值下 DSI 波动较小,形态差异不明显,最终采用单球面建模以兼顾精度与效率。长方体模型 DSI 随平滑值增加而减小,平滑值为 10 时最小,显著优于 3% 阈值。锥体与椭球体模型 DSI 均呈先降后升趋势,在平滑值为 8 和 6 时出现最小值,对应模型形态误差最低。

综上所述,结合 DSI 评估结果与球面填充数量的综合考虑,确定谷码建模参数如下:球体模型采用单球填充方式;长方体、锥体与椭球体模型分别采用平滑值为 10、8、6 的自动填充结构。最终谷码典型颗粒建模效果如图 13 所示。

2.2.3 短茎秆建模

短茎秆建模将其简化为理想圆柱体刚体,忽略破碎或弯曲等形态变化。建模可采用自动或手动填充 2 种方式,前者在三维圆柱模型内自动生成球体,后者则沿轴向均匀布置球体。2 种方法均能有效表达结构特征,短茎秆模型如图 14 所示。

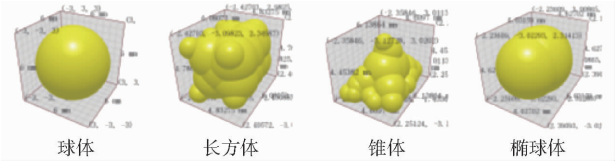

图 13 谷码模型

Fig. 13 Millet panicle cluster model

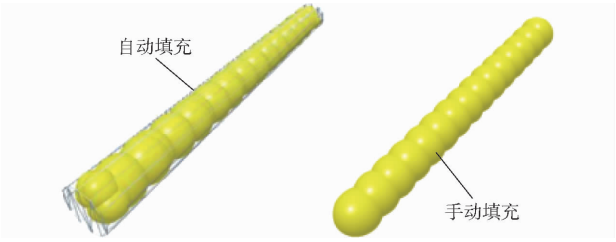

图 14 短茎秆模型

Fig. 14 Short stalk model

2.3 参数标定结果与误差分析

2.3.1 Plackett - Burman 试验

参数标定需综合考虑材料属性与接触力学特性对仿真精度的影响。采用的基础参数包括泊松比、剪切模量和密度,如表 10 所示,接触参数包括静摩擦因数、动摩擦因数和恢复系数。为分析接触参数对休止角模拟的影响,采用 Plackett - Burman 试验设计,以模拟堆积角为响应指标,开展显著性筛选。

表 10 离散元仿真试验颗粒与几何体基础参数

Tab. 10 Discrete element method for simulating experimental particles and geometry base parameters

参数	数值	参数	数值
籽粒泊松比	0.39	茎秆泊松比	0.25
籽粒剪切模量/MPa	1.46	茎秆剪切模量/MPa	1.44
籽粒密度/(kg·m^{-3})	1 200	茎秆密度/(kg·m^{-3})	300
谷码泊松比	0.36	45 号钢泊松比	0.28
谷码剪切模量/MPa	0.42	45 号钢剪切模量/GPa	209
谷码密度/(kg·m^{-3})	800	45 号钢密度/(kg·m^{-3})	7 850

在籽粒颗粒参数标定中，选取籽粒-籽粒与籽粒-钢板之间的静摩擦因数、动摩擦因数及碰撞恢复系数 6 个因素作为研究变量，方案如表 11 所示。依据 Plackett－Burman 设计原理制定试验方案，仿真模拟并记录各组条件下的堆积角响应，结果见表 12。

表 11　Plackett－Burman 试验编码

Tab. 11　Plackett－Burman test code table

因素	编码		因素	编码	
	－1	1		－1	1
籽粒与籽粒静摩擦因数 x_1	0.45	0.75	籽粒与 45 号钢静摩擦因数 x_2	0.40	0.70
籽粒与籽粒滚动摩擦因数 x_3	0.01	0.09	籽粒与 45 号钢滚动摩擦因数 x_4	0.01	0.05
籽粒与籽粒碰撞恢复系数 x_5	0.35	0.43	籽粒与 45 号钢碰撞恢复系数 x_6	0.35	0.50

表 12　Plackett－Burman 试验方案与结果

Tab. 12　Plackett－Burman test program and results

序号	因素						休止角
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	θ_1/(°)
1	0.75	0.70	0.01	0.05	0.43	0.50	32.37
2	0.45	0.70	0.09	0.01	0.43	0.50	30.48
3	0.75	0.40	0.09	0.05	0.35	0.50	34.52
4	0.45	0.70	0.01	0.05	0.43	0.35	31.39
5	0.45	0.40	0.09	0.01	0.43	0.50	29.16
6	0.45	0.40	0.01	0.05	0.35	0.50	30.59
7	0.75	0.40	0.01	0.01	0.43	0.35	27.48
8	0.75	0.70	0.01	0.01	0.35	0.50	21.47
9	0.75	0.70	0.09	0.01	0.35	0.35	24.69
10	0.45	0.70	0.09	0.05	0.35	0.35	30.88
11	0.75	0.40	0.09	0.05	0.43	0.35	35.64
12	0.45	0.40	0.01	0.01	0.35	0.35	24.62

利用 Design-Expert 软件对各因素效应分别进行显著性检验和 t 检验，结果如表 13 所示。

表 13　Plackett－Burman 试验结果显著性检验

Tab. 13　Plackett－Burman test results significance test

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	185.94	6	30.99	18.42	0.002 9 **
x_1	0.075	1	0.075	0.045	0.840 9
x_2	9.59	1	9.59	5.70	0.062 5
x_3	25.38	1	25.38	15.08	0.011 6 *
x_4	117.13	1	117.13	69.62	0.000 4 **
x_5	32.51	1	32.51	19.32	0.007 **
x_6	1.26	1	1.26	0.75	0.426 2

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。

各接触参数因素对休止角 θ_1 的影响程度由大到小依次为 x_4、x_5、x_3、x_2、x_6、x_1。其中，x_4 与 x_5 对应 P 值均小于 0.01，表明其对堆积角具有极显著影响；x_3 对应 P 值小于 0.05，说明其影响显著。

2.3.2　最陡爬坡试验与参数优化

基于 Plackett－Burman 试验结果，x_1、x_2、x_6 对模拟堆积角影响不显著，故固定其取值为 0.60、0.55 和 0.425。以 x_3、x_4、x_5 为进一步优化的关键因素，分别设定初始值为 0.01、0.01 和 0.035，对应步长为 0.02、0.01 和 0.02，开展最陡爬坡（Steepest ascent）试验，以探索更接近实测值的最优参数组合。试验设计方案及结果见表 14。

表 14　最陡爬坡试验方案与结果

Tab. 14　Steepest climb test protocol and results

序号	因素			休止角	相对误差
	x_3	x_4	x_5	θ_1/(°)	δ/%
1	0.01	0.01	0.35	23.36	16.12
2	0.03	0.02	0.37	25.27	9.26
3	0.05	0.03	0.39	28.96	3.99
4	0.07	0.04	0.41	30.78	10.52
5	0.09	0.05	0.43	31.83	14.3

根据最陡爬坡试验结果，试验因素编码如表 15 所示，试验方案与仿真结果见表 16，方差分析结果见表 17。

表 15　Box－Behnken 试验因素编码

Tab. 15　Box－Behnken test factors and levels coding

编码	因素		
	x_3	x_4	x_5
－1	0.03	0.02	0.37
0	0.05	0.03	0.39
1	0.07	0.04	0.41

表 16　Box－Behnken 试验方案与结果

Tab. 16　Box－Behnken test program and results

序号	因素			休止角
	x_3	x_4	x_5	θ_1/(°)
1	0.03	0.03	0.37	26.86
2	0.03	0.03	0.41	29.67
3	0.07	0.03	0.37	29.32
4	0.07	0.03	0.41	31.46
5	0.05	0.02	0.37	26.57
6	0.05	0.02	0.41	28.74
7	0.05	0.04	0.37	30.88
8	0.05	0.04	0.41	31.71
9	0.03	0.02	0.39	25.97
10	0.07	0.02	0.39	26.71
11	0.03	0.04	0.39	27.01
12	0.07	0.04	0.39	32.38
13	0.05	0.03	0.39	29.42
14	0.05	0.03	0.39	30.09
15	0.05	0.03	0.39	29.59
16	0.05	0.03	0.39	30.23
17	0.05	0.03	0.39	29.88

表 17 籽粒休止角方差分析结果

Tab. 17 Analysis of variance of angle of repose of seeds

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	59.72	9	6.64	33.1	<0.000 1 **
x_3	13.42	1	13.42	66.92	<0.000 1 **
x_4	24.47	1	24.47	122.02	<0.000 1 **
x_5	7.90	1	7.90	39.40	0.000 4 **
x_3x_4	5.36	1	5.36	26.73	0.001 3 **
x_3x_5	0.11	1	0.11	0.56	0.478 7
x_4x_5	0.45	1	0.45	2.24	0.178 2
x_3^2	4.09	1	4.09	20.42	0.002 7 **
x_4^2	2.96	1	2.96	14.77	0.006 4 **
x_5^2	0.94	1	0.94	4.67	0.067 5
残差	1.4	7	0.2		
失拟项	0.95	3	0.32	2.78	0.174 3
纯误差	0.46	4	0.11		
总和	61.13	16			

由表 17 可知，所建立的籽粒休止角回归模型整体显著（$P<0.000\ 1$），失拟项不显著（$P=0.174\ 3$），表明模型拟合良好，具有较高的预测精度。进一步分析表明，籽粒与籽粒滚动摩擦因数（x_3）、籽粒与 45 号钢滚动摩擦因数（x_4）、籽粒与籽粒碰撞恢复系数（x_5）、x_3 与 x_4 交互项（x_3x_4），以及 x_3^2 与 x_4^2 对籽粒休止角 θ_1 具有显著影响。剔除非显著因子后，建立基于显著性因素的籽粒休止角回归预测模型，其模型为

$$\theta_1 = -2.47 + 131.42x_3 + 373.71x_4 + 49.69x_5 + 5\,787.5x_3x_4 - 2\,402.96x_3^2 - 8\,136.84x_4^2 \quad (9)$$

以物理试验测得休止角平均值 27.85°为目标值，基于回归模型进行最优参数反求，获得籽粒与籽粒滚动摩擦因数、籽粒与 45 号钢滚动摩擦因数及籽粒与籽粒碰撞恢复系数最优组合分别为 0.03、0.04 和 0.39。代入模型式（9）计算得理论堆积角为 27.850 1°，与实测值相对误差极小，验证了所构建模型的准确性与可靠性。

在此基础上，参照籽粒休止角参数标定方案，进一步开展谷码、短茎秆及其混合物参数标定仿真试验，依次完成关键接触参数显著性分析与优化。各组分最终确定接触力学参数为：籽粒与籽粒静摩擦因数 0.55、籽粒与籽粒动摩擦因数 0.03、籽粒与籽粒碰撞恢复系数 0.39、籽粒与 45 号钢静摩擦因数 0.56、籽粒与 45 号钢动摩擦因数 0.04、籽粒与 45 号钢碰撞恢复系数 0.45、谷码与谷码静摩擦因数 0.71、谷码与谷码动摩擦因数 0.05、谷码与谷码碰撞恢复系数 0.28、谷码与 45 号钢静摩擦因数 0.59、谷码与 45 号钢动摩擦因数 0.03、谷码与 45 号钢碰撞恢复系数 0.32、茎秆与茎秆静摩擦因数 0.60、茎秆与茎秆动摩擦因数 0.04、茎秆与茎秆碰撞恢复系数 0.39、茎秆与 45 号钢静摩擦因数 0.61、茎秆与 45 号钢动摩擦因数 0.02、茎秆与 45 号钢碰撞恢复系数 0.41、籽粒与谷码静摩擦因数 0.52、籽粒与谷码动摩擦因数 0.04、籽粒与谷码碰撞恢复系数 0.30、籽粒与茎秆静摩擦因数 0.58、籽粒与茎秆动摩擦因数 0.03、籽粒与茎秆碰撞恢复系数 0.36、谷码与茎秆静摩擦因数 0.65。

采用标定后接触参数进行仿真休止角试验，获得仿真籽粒、谷码、短茎秆休止角分别为 27.31°、32.05°、23.86°，与实际休止角平均误差分别为 1.94%、3.72%、1.16%，表明了仿真所得接触参数可靠性。

3 验证试验

3.1 颗粒建模参数验证试验

平滑值对谷码模型形貌及球面数量影响显著，分别为类球体、类长方体、类锥体与类椭球体模型设定平滑值 6、10、8、6。为验证其合理性，采用控制变量法开展不同平滑值条件下的休止角仿真，保持其他参数一致，并与实测结果进行误差对比分析，探究平滑值对建模精度的影响，如图 15 所示。

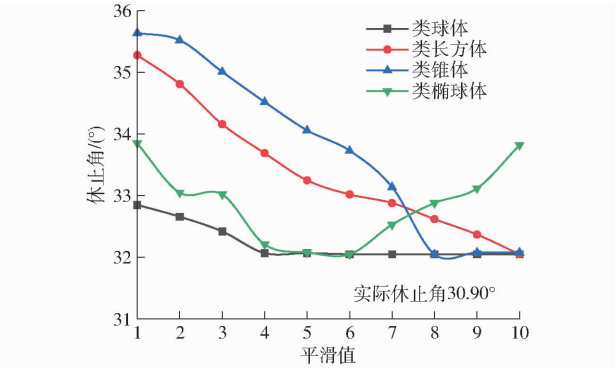

图 15 控制变量条件下仿真休止角随平滑值变化曲线

Fig. 15 Change curves of simulated angle of repose with ratio of smoothed values under control variable condition

由图 15 可知，类球体模型在不同平滑值下休止角变化较小，表现出良好的稳定性；类长方体模型休止角随平滑值增大单调下降；类锥体和类椭球体模型分别呈减缓和平稳上升趋势。结果表明，在平滑值下构建的模型误差最小，仿真精度优于其他设置。

3.2 高速摄像验证试验

为验证所获得接触参数的有效性和仿真精度，开展了基于高速摄像技术的颗粒运动行为验证试验，试验台架如图 16 所示。为确保验证试验与实际作业场景的一致性，振动台工况参数依据风筛式谷子清选装置典型作业参数设定，参照文献[2]将振动条件设定为振幅 20 mm、频率 7 Hz，为验证仿真参

数的合理性，试验中将谷子籽粒、谷码与茎秆颗粒均匀铺设于振动台表面，以速度 800 f/s 拍摄多个振动周期内的运动过程，并设置标尺作为空间参照。图像序列经 TEMA 软件处理后，提取代表性颗粒运动轨迹与动态特征，确保试验与仿真在动力学响应上的可比性。



图 16　高速摄像验证试验台架

Fig. 16　High-speed camera verification test rig

1. 清选装置　2. 高速摄像机　3. 拍摄系统　4. 支架　5. 照明灯

在单个振动周期内，筛体运动可划分为 4 个阶段：向上加速、向上减速、向下加速及向下减速。不同阶段导致颗粒压实、松散与抛离等行为交替发生，粒群密度和孔隙率随之变化。籽粒、谷码与茎秆均表现出相似的阶段性运动规律，籽粒因粒形均匀，特征更为明显。为进一步验证上述运动机制及参数标定结果准确性，采用离散元仿真方法对 3 类颗粒动态行为进行模拟分析。

仿真过程中振动条件与高速摄像试验一致，接触参数依据前述标定结果设定。如图 17 所示，对比仿真视频与实测图像，粒群分布状态在同一时刻具有较好一致性。进一步提取典型颗粒运动位移，得到籽粒、谷码及茎秆的实测与仿真轨迹曲线如图 18 所示，验证颗粒运动行为的一致性。

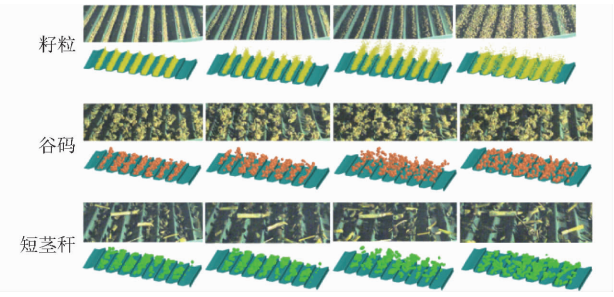

图 17　颗粒实际运动与仿真运动对比

Fig. 17　Comparison of actual and simulated particle motion

3.3　颗粒轨迹重合度分析

通过轨迹重合度分析（Trajectory overlap index，TOI）对 3 类颗粒实际与仿真运动轨迹一致性作定量分析。在轨迹重合度分析过程中，考虑到颗粒初始位置存在一定波动，采用统一的时间区间与空间参考点对轨迹数据进行处理，对比颗粒在主运动方向上的趋势一致性及幅值变化，并通过 TOI、平均绝对误差（Mean absolute error，MAE）、均方根误差（Root mean square error，RMSE）对仿真轨迹与实测轨迹之间的一致性进行量化分析。

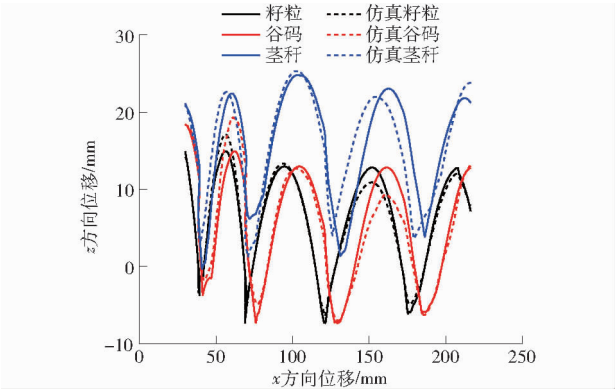

图 18　颗粒实际运动轨迹与仿真运动轨迹曲线

Fig. 18　Curves of actual and simulated particle trajectories

分析结果显示，籽粒、谷码、茎秆实际运动轨迹与仿真运动重合度分别为 0.90、0.83、0.78，均大于 0.75。MAE 分别为 0.73、1.68、3.04 mm，说明籽粒平均每一个时刻仿真轨迹与实际轨迹位置差值不到 1 mm，谷码仿真轨迹与实际轨迹平均位置差值约为 1.68 mm，茎秆颗粒仿真与实际轨迹平均差值约为 3 mm。对于谷子籽粒这类尺寸通常在 1.5 mm 左右的小粒径作物来说，这种误差已经处于粒径尺度一半，表明仿真建模及参数标定精度极高；谷码作为籽粒与小段梗轴的结合体，具有一定的异形结构特征，误差 1.68 mm 属于相对合理范围，表明仿真结果可以较好反映其真实运动轨迹；茎秆颗粒长度普遍大于 10 mm，存在较大结构不规则性和振动响应复杂性，误差 3.04 mm 仍具有较好的工程可接受性。RMSE 分别为 0.97、2.16、3.93 mm，说明籽粒仿真轨迹与实际轨迹之间的误差波动非常小，绝大多数时间点的误差都控制在 1 mm 左右；谷码误差波动略大于籽粒，轨迹拟合质量处于良好水平；茎秆颗粒具有较强的不规则性（如弯曲、不对称截面、纤维毛刺等），其在筛面上的运动会产生更加复杂的碰撞、滚动、旋转耦合行为，虽然其误差在三者中最大，但仍具备较高的参考价值。综上所述，谷子脱出物颗粒实际轨迹与仿真轨迹一致度较高，验证了所建立的仿真模型与参数设置具有较高可靠性。

4　结论

（1）基于谷子联合收获过程中脱出物多组分异质颗粒的物理特性，构建了籽粒、谷码与短茎秆 3 类典型颗粒的离散元建模方案。结合颗粒形态实际特征，实现了 3 类颗粒高精度建模。

（2）以仿真休止角与实测值的一致性为标定依

据,构建了以 Plackett－Burman 试验、最陡爬坡法与 Box－Behnken 响应面优化方法相结合的接触参数优化流程,实现了对接触力学参数的系统标定。标定结果显示,籽粒、谷码和茎秆颗粒仿真休止角与实测值平均误差分别为 1.94%、3.72% 和 1.16%,验证了所建立参数体系的准确性与通用性。

(3)开展了高速摄像验证试验,提取颗粒运动轨迹,并与仿真轨迹进行对比分析。结果表明,籽粒、谷码和茎秆颗粒轨迹重合度(TOI)分别为 0.90、0.83 和 0.78,均大于 0.75,MAE 分别为 0.73、1.68、3.04 mm,RMSE 分别为 0.97、2.16、3.93 mm,验证了仿真轨迹在时间序列与空间幅值上的高度一致性。结果表明,建立的建模与标定方法具有良好的物理一致性与工程适应性,为谷子清选过程中基于离散元方法的动态过程分析提供了可靠的模型基础和数据支撑。

参 考 文 献

[1] 李昊阳,孔雨尧,周永明,等. 我国谷子产业标准化现状分析及对策建议[J]. 标准科学,2024,31(增刊 2):70－77.
LI Haoyang, KONG Yuyao, ZHOU Yongming, et al. Analysis of standardization status of millet industry in china and countermeasures[J]. Standard Science,2024,31(Supp. 2):70－77. (in Chinese)

[2] 张东明. 谷子风筛式清选装置筛分机理与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.
ZHANG Dongming. Study on working mechanism and experimental research of cleaning device for millet[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[3] 王飞,阿力木·买买提吐尔逊,张俊三,等. 玉米籽粒收获机组合筛面预筛分式清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):135－147,166.
WANG Fei, ALIMU Maimaitituersun, ZHANG Junsan, et al. Design and experiment of pre-screening cleaning device for combined screen surface of corn grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5):135－147,166. (in Chinese)

[4] 徐鹏庆,戴飞,赵武云,等. 胡麻脱粒清选装置作业过程仿真与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):161－171.
XU Pengqing, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Simulation analysis and experiment of operation process of flax threshing and cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 161－171. (in Chinese)

[5] 侯华铭,崔清亮,陈益胜,等. 谷子收获机风筛式清选装置试验[J]. 农业工程,2022,12(8):93－98.
HOU Huaming, CUI Qingliang, CHEN Yisheng, et al. Experiment on air and screen cleaning device of foxtail millet combine harvester[J]. Agricultural Engineering,2022,12(8):93－98. (in Chinese)

[6] 冯鑫,王立军,于琨蒙,等. 玉米籽粒清选波浪筛机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4):142－154.
FENG Xin, WANG Lijun, YU Kunmeng, et al. Design and experiment of mechanism of wave screen for maize grain cleaning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):142－154. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 王立军,于泳涛,张帅,等. 蚯蚓运动特征仿生筛筛上玉米脱出物运动特性研究[J]. 农业机械学报,2022,53(3):158－166.
WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Motion charateristics of maize mixture on bionic screen based on earthworm motion characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 158－166. (in Chinese)

[9] FANG M, YU Z, ZHANG W, et al. Friction coefficient calibration of corn stalk particle mixtures using Plackett－Burman design and response surface methodology[J]. Powder Technology,2022,396:731－742.

[10] GHODKI B M, PATEL M, NAMDEO R, et al. Calibration of discrete element model parameters: soybeans[J]. Computational Particle Mechanics,2019,6:3－10.

[11] 王慕川,衣淑娟,李衣菲,等. 指夹式排种器亚高速导种管设计与试验[J]. 农机化研究,2025,47(8):140－148.
WANG Muchuan, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Design and experiment of sub-high-speed seed guide tube of finger pickup seed dispenser[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(8):140－148. (in Chinese)

[12] 顿国强,郭娜,纪欣鑫,等. 红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):77－86,97.
DUN Guoqiang, GUO Na, JI Xinxin, et al. Design and experiment of side-hung seed-rowing spoon type precision seed metering device for radish[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(5):77－86,97. (in Chinese)

[13] 顿国强,吴星澎,纪欣鑫,等. 双摆盘式大豆小区排种器的仿真优化[J]. 中国农业科技导报,2024,26(6):82－90.
DUN Guoqiang, WU Xingpeng, JI Xinxin, et al. Simulation and optimization of soybean plot metering device with double swing plate[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2024,26(6):82－90. (in Chinese)

[14] 李晓晖,魏忠彩,苏国梁,等. 基于气固耦合的气筛式马铃薯清选装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):96－108.
LI Xiaohui, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Parameter optimization and experiment of air-screen potato-stone cleaning device based on gas-solid coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):96－108. (in Chinese)

[15] 陈林,余南辉,王立宗,等.米糠和碎米的接触参数测量与离散元仿真标定[J].中国农业科技导报,2024,26(2):127－136.
CHEN Lin, YU Nanhui, WANG Lizong, et al. Measurement of contact parameters and discrete element simulation calibration of rice bran and broken rice[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2024,26(2):127－136. (in Chinese)

[16] HAN S,WANG C,LIU X,et al. Generating realistic DEM shape using improved spherical harmonic reconstruction considering form, roundness, and roughness[J]. Powder Technology,2025,455:120755.

[17] 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)

[18] 陈龙,吴顺川,金爱兵.颗粒离散元分层建模法及颗粒尺寸效应[J].西南交通大学学报,2022,57(5):1086－1095.
CHEN Long, WU Shunchuan, JIN Aibing. Particle discrete element layered modeling method and particle size effect[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022,57(5):1086－1095. (in Chinese)

[19] 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)

[20] FAN M,SU D,CHEN X. Framework for incorporating multi-level morphology of particles in DEM simulations: independent control of polydisperse distributions of roundness and roughness while preserving form distributions in granular materials[J]. Acta Geotechnica,2024,19(7):4557－4580.

[21] 李光,李紫迪.烟丝离散元接触参数标定及其破碎模型构建[J].沈阳农业大学学报,2025,56(1):59－72.
LI Guang, LI Zidi. Calibration of discrete elemental contact parameters of tobacco and its breakage model construction[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2025,56(1):59－72. (in Chinese)

[22] ZHAO J, YU Jianqun, SUN K,et al. Modeling and verifying wheat roots using AgriDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2025,41(3):63－72.

[23] MA Z,LI Y,XU L. Discrete-element method simulation of agricultural particles' motion in variable-amplitude screen box[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,118:92－99.

[24] 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)

[25] 张宏建,陈修波,李宏立,等.控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J].农业机械学报,2024,55(6):80－90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):80－90. (in Chinese)

[26] WANG L,LI R,WU B,et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particuology,2018,38:185－195.

[27] 陈涛,衣淑娟,李衣菲,等.苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J].农业机械学报,2023,54(5):91－100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):91－100. (in Chinese)

[28] 李涛,王振华,翟改霞,等.苜蓿草植株离散元模型建立与参数标定[J].农业机械学报,2024,55(增刊 2):187－199.
LI Tao, WANG Zhenhua, ZHAI Gaixia, et al. Establishment and parameter calibration of discrete element model of alfalfa plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 2):187－199. (in Chinese)

[29] WENSRICH C M, KATTERFELD A. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM[J]. Powder Technology,2012,217:409－417.

[30] PASHA M,HARE C,GHADIRI M,et al. Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater[J]. Powder Technology,2016,296:29－36.