

制种玉米离散元柔性模型构建与试验

常磊磊 赵武云 史瑞杰 戴飞 刘小龙 任晓靖

(甘肃农业大学机电工程学院,兰州 730070)

摘要: 针对制种玉米剥皮过程籽粒损失率和破损率较高及建模精度不足等问题,本文基于离散元法构建制种玉米果穗柔性复合体模型。通过物理试验测定制种玉米果穗各部分本征参数及接触参数,基于 Hertz - Mindlin with Bonding V2 接触模型构建苞叶-籽粒-穗芯柔性复合体离散元模型,采用 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 响应面试验相结合的方法对玉米芯轴和籽粒等关键粘结参数进行标定优化,建立了能够准确表征剥皮过程籽粒脱落和破损行为的离散元模型。结果表明,玉米芯轴三点弯曲仿真试验与物理试验最大载荷相对误差为 3.89%,籽粒压缩仿真试验与物理试验相对误差为 8.79%,籽粒脱落试验与物理试验轴向和切向相对误差为 7.58%、6.89%,参数标定精度较高。在制种玉米果穗剥皮仿真试验验证中籽粒脱落率和破损率为 1.774%、0.457%,台架试验籽粒脱落率和破损率分别 1.697% 和 0.432%,相对误差为 4.54%、5.79%,均满足制种玉米剥皮质量标准,表明模型能够较真实反映剥皮过程的籽粒脱落与破损特征,为制种玉米果穗精细化建模和剥皮装置优化设计提供参考依据。

关键词: 柔性模型; 玉米果穗; 离散元法; 接触参数; 剥皮验证

中图分类号: S226.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)08-0173-10

OSID:



Development and Experimental Validation of Flexible Discrete Element Model for Seed Maize Ears

CHANG Leilei ZHAO Wuyun SHI Ruijie DAI Fei LIU Xiaolong REN Xiaojing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming to address high kernel loss and breakage rates during seed maize husking and insufficient modeling precision, a flexible composite discrete element method (DEM) model for seed maize ears was developed. The intrinsic parameters and contact parameters of different components of seed maize ears were determined through physical experiments. A flexible composite DEM model comprising bract - kernel - cob was constructed based on the Hertz - Mindlin with Bonding V2 contact model. The combination of Plackett - Burman design, steepest ascent method, and Box - Behnken response surface methodology was employed to calibrate and optimize the key bonding parameters of cob shaft and kernels, establishing a DEM model capable of accurately characterizing kernel detachment and breakage during husking. The simulation results showed high calibration accuracy, with relative errors of 3.89% for cob shaft three-point bending, 8.79% for kernel compression, and 7.58% and 6.89% for kernel detachment in axial and tangential directions respectively compared with physical experiments. In husking simulation validation, kernel detachment and breakage rates were 1.774% and 0.457% respectively, compared with bench test results of 1.697% and 0.432%, with relative errors of 4.54% and 5.79%. All results met seed maize husking quality standards, confirming the model realistically reflects kernel detachment and breakage characteristics during husking. The research result can provide reliable reference for refined modeling of seed maize ears and optimization design of husking devices.

Key words: flexible model; maize ear; DEM; contact parameters; husking verification

收稿日期: 2025 - 09 - 22 修回日期: 2025 - 11 - 27

基金项目: 甘肃省研产融合科技攻关赋能计划项目(25FNNF001 - 2)、甘肃省重大专项(26ZDNA005、25ZDNF001 - 1、24ZD13NA019)、甘肃省重点研发计划项目(26YFNA020)、甘肃省农机研发制造推广应用一体化试点项目(1 - 1 - 1)、甘肃省青年博士支持项目(2026QB - 052)和兰州市青年科技人才创新专项(2025 - QN - 089)

作者简介: 常磊磊(1998—),男,硕士生,主要从事农业工程技术与装备研究,E-mail: sash2053@163.com

通信作者: 史瑞杰(1993—),男,讲师,博士,主要从事种业智能化收获加工技术与装备研究,E-mail: shirj@gsau.edu.cn

0 引言

种业作为国家基础性、战略性产业,优质且足量的种子是保障粮食安全的基石^[1]。制种玉米作为培育优质种子的专用原料,其高产性能、抗病特性及广泛适应性,构成了现代杂交玉米种业规模化生产核心^[2]。我国制种玉米主产区主要分布于甘肃、新疆及黑龙江等地,其中甘肃种植面积占全国的35.81%。然而,在制种玉米机械化收获过程中,剥皮装置作业时落粒损失和籽粒损伤等问题日益突出^[3],严重影响种子质量和经济效益。

离散元法在农业工程中被广泛应用。通过将介质离散为相互作用的颗粒单元,构建可靠模型模拟农业装备与物料间的接触、摩擦和粘结等作用力,实现装备-物料互作仿真^[4]。赵宏波等^[5]综述了离散元法在农业装备领域的应用,指出该方法在收获损伤等方面已取得显著成果,但在复杂结构建模仍面临挑战。近年来,针对玉米果穗离散元研究不断深入,YU等^[6-7]采用自主开发的离散元软件 AgriDEM,建立了籽粒及芯轴 DEM 模型,并进行了参数标定。李洪成等^[8]基于离散元法实现了玉米籽粒破碎模型参数标定,结果表明实测值与仿真值具有较好的一致性。HAN等^[9]构建了玉米果穗离散元模型,为脱粒装置优化提供参考。刘磊等^[10]基于 DEM 构建果穗与剥皮机构离散元模型,探讨剥皮辊参数对籽粒损伤与脱落的影响。SHI等^[11]对玉米籽粒进行离散元仿真参数标定与排种试验验证,为玉米精量化播种提供了理论依据。崔涛等^[12]通过参数标定构建玉米果穗离散元模型,为脱粒提供理论依据。陈舜等^[13]对鲜食玉米果穗剥皮过程进行仿真并设计剥皮样机。陈俊志等^[14]运用 DEM-MBD 联合仿真模拟制种玉米剥皮机构互作过程,旨在降低剥皮过程籽粒损失。尽管现有研究在建模与仿真方面取得一定进展,但多存在模型结构简化、果穗建模常以单一棒体代替真实结构,难以还原剥皮过程中复杂的接触行为,无法直观捕捉籽粒掉落与破损等关键特征。

针对上述问题,本文以收获期制种玉米果穗为研究对象,通过物理试验测定制种玉米果穗各部分本征特性和接触参数参数,基于 Hertz-Mindlin with Bonding V2 接触模型建立苞叶-籽粒-穗芯柔性复合体离散元模型,采用响应面法对芯轴和籽粒关键粘结参数进行标定与优化,建立能够准确表征剥皮过程籽粒脱落和破损行为离散元模型,并通过剥皮台架试验对模型进行验证,以期对制种玉米果穗精细化建模与剥皮装置优化提供理论依据与技术支持。

1 本征参数与接触参数测定

1.1 基本特性参数

制种玉米相对于大田玉米在物理特性上呈显著差异(图1)。制种玉米通常收获较早以保证种子活力,导致含水率较高,果穗长度较短、基部直径较小,籽粒形状与排列较为不规则,密度和硬度普遍更高,同时苞叶层数少厚度薄,且籽粒与芯轴间粘结力更弱,剥皮作业时籽粒更易脱落和破损。

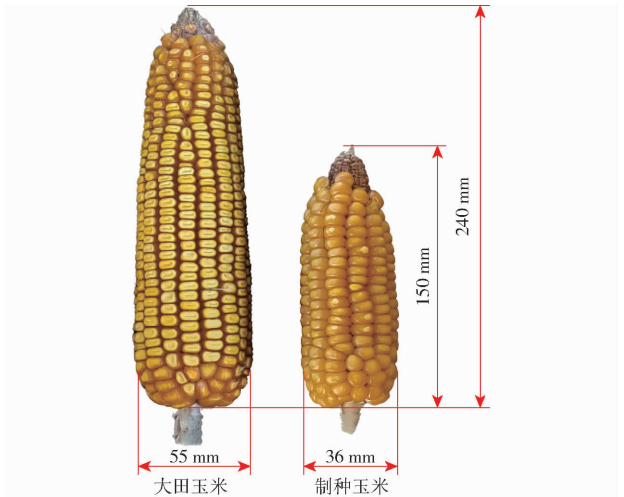


图1 大田玉米与制种玉米对比

Fig.1 Field corn vs seed corn

为测定收获期制种玉米果穗本征参数,于2024年9月在甘肃省张掖市试验田随机掰取100个无虫害且带苞叶的成熟制种玉米果穗作为试验样本,并用密封袋储存后放置阴凉处,所有试验均在5 d内完成。使用数显游标卡尺及刻度尺分别测定玉米果穗各部分参数取均值,结果如表1所示。

表1 制种玉米果穗物理参数

Tab.1 Physical parameters of seed maize mm

参数	芯轴	籽粒	苞叶
大端直径	25	36	40
小端直径	20	25	35
整体长度	150	150	200

采用 YGS-505 型快速水分仪测定玉米芯、籽粒和苞叶含水率^[15],称量精度为0.005 g,水分解析精度为0.01%。称取10~30 g样品,在105℃±2℃条件下干燥45 min,重复3次,测得芯、籽和叶含水率分别为42.35%、25.83%和38.56%。采用液体排水法^[16]计算得芯、籽和叶密度分别为0.309、1.231、0.426 g/cm³。

1.2 力学特性测试

1.2.1 苞叶力学特性试验

考虑到最外层苞叶易受环境影响、最内层苞叶发育不充分且力学性能不稳定,选取中间第3层苞

叶作为试验对象。采用 WDW-1E 型微机控制电子万能试验机,在苞叶中部选取结构完整区域制备纵向 (80 mm × 20 mm × 0.4 mm) 和横向 (50 mm × 30 mm × 0.4 mm) 试样,夹具初始距离为 50 mm,拉伸速度为 5 mm/min,试样拉伸至断裂并自动记录载荷-位移数据,每组试验重复 5 组并取均值作为试验结果,拉伸试验见图 2。

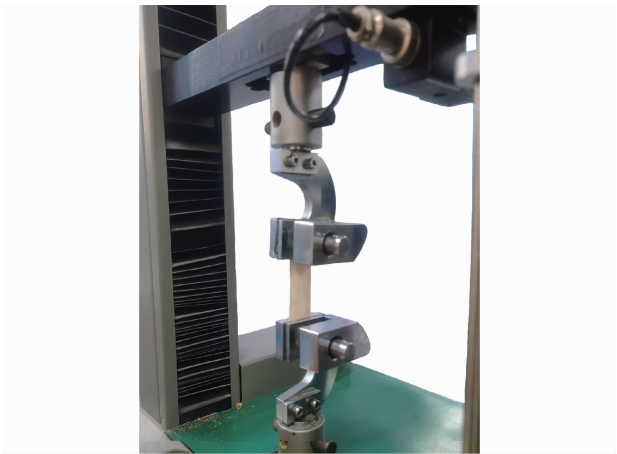


图 2 制种玉米苞叶拉伸试验

Fig.2 Tensile test of husk of seed maize

试验结果表明,纵向断裂载荷、拉伸强度和弹性模量为 69.11 N、8.65 MPa 和 317.73 MPa,横向分别为 11.76 N、1.28 MPa 和 46.14 MPa,纵向力学性能显著优于横向,表明在剥皮作业中横向撕裂较纵向撕裂更易实现。

1.2.2 籽粒与芯轴力学特性试验

为研究籽粒与芯轴力学特性,随机选取不同部位完整籽粒,并将玉米芯切割成 30 mm 段并磨平两端以确保受力均匀。采用 TA.XT Plus 型质构仪(测试范围 0.5 ~ 10 kg,精度 0.1 g),使用平面探头以速度 5 mm/min 进行压缩试验,触发力设为 0.05 N,每组重复 3 次并取平均值,如图 3 所示。试验结果表明,制种玉米籽粒压缩破裂载荷和弹性模量为 314.49 N、366.31 MPa;玉米芯径向与轴向压缩破裂载荷为 133.92、2 998.63 N,弹性模量分别为 122.02、91.04 MPa。

玉米果穗泊松比和剪切模量计算式为

$$\left\{\begin{aligned}\varepsilon_w &= \frac{W_1 - W_2}{W_1} \\ v_b &= -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_v} \\ \varepsilon_v &= \frac{V_1 - V_2}{V_1} \\ G_b &= \frac{E_b}{2(1 + v_b)}\end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中 v_b ——泊松比

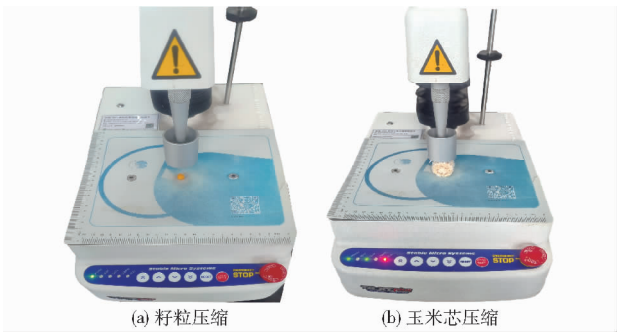


图 3 制种玉米籽粒与玉米芯压缩试验

Fig.3 Compression experiment of kernels and cobs

- ε_w 、 ε_v ——横、纵向应变
- W_1 、 W_2 ——试验前后横向宽度,mm
- V_1 、 V_2 ——试验前后纵向长度,mm
- G_b ——剪切模量,MPa
- E_b ——弹性模量,MPa

由式(1)计算并取均值得到制种玉米苞叶、籽粒、玉米芯泊松比为 0.28、0.36 和 0.25,剪切模量为 71.07、134.67、42.62 MPa。

1.3 接触参数测定试验

剥皮过程,苞叶主要与分流板(钢)和剥皮辊(橡胶)接触,籽粒和芯轴主要与剥皮辊接触,故测定苞叶、籽粒、芯分别与钢、橡胶之间的碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数。

1.3.1 碰撞恢复系数

采用自由落体法测定碰撞恢复系数^[17],装置如图 4 所示。将钢质和橡胶测试板分别水平固定于实验台上,待测物料通过夹具在设定高度自由释放,利用高速摄像机记录物料完整的碰撞及反弹过程,使用运动分析软件 Tracker 逐帧分析视频,通过标记点追踪确定反弹最高点,当标记点在连续 3 帧中垂直位移变化小于 0.5 mm 时,判定为反弹最高点。由于测试板视为静止,则其计算式为

$$e = \left| \frac{w_2 - w_1}{u_1 - u_2} \right| = \frac{\sqrt{2gh_2}}{\sqrt{2gh_1}} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (2)$$

- 式中
- e ——碰撞恢复系数
 - g ——重力加速度, m/s^2
 - h_1 ——碰撞前下落高度, m
 - h_2 ——碰撞后上升高度, m
 - u_1 、 u_2 ——碰撞前两物体速度, m/s
 - w_1 、 w_2 ——碰撞后两物体速度, m/s

试验重复 5 次取平均值,由式(2)计算得籽粒与橡胶碰撞恢复系数为 0.16,玉米芯与橡胶碰撞恢复系数为 0.18。由于玉米苞叶质量较轻,碰撞后反弹不明显,难以通过自由落体法准确测定其碰撞恢复系数,参照文献[18]取苞叶与钢、橡胶碰撞恢复系数为 0.08 和 0.05。

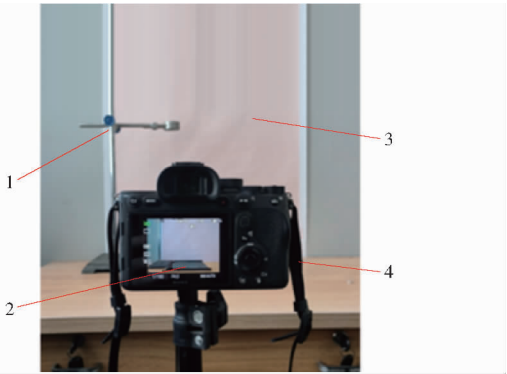


图 4 碰撞恢复系数测定

Fig. 4 Collision recovery coefficient determination

1. 限高架 2. 测试板 3. 坐标纸 4. 高速相机

1.3.2 静摩擦因数

采用斜面提升法定制种玉米果穗与接触部件间静摩擦因数^[19],试验装置如图 5 所示。将测试板一端垫高形成斜面,待测物料置于斜面上并用小木块适当阻挡以防滚动。缓慢抬高测试板一端,当观察到物料在重力作用下刚出现滑动趋势时停止抬高,用量角器测量斜面与水平面夹角。重复试验 5 次取平均值,静摩擦因数计算式为

$$\mu_1 = \tan\theta_1 \tag{3}$$

式中 μ_1 ——静摩擦因数
 θ_1 ——斜面与水平面夹角

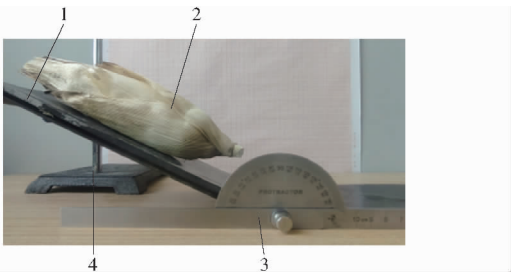


图 5 静摩擦因数测定

Fig. 5 Determination of static friction coefficient

1. 测试板 2. 待测物 3. 量角器 4. 底座

由式(3)计算得玉米苞叶与钢、橡胶静摩擦因数为 0.45 和 0.51,籽粒与橡胶静摩擦因数为 0.46,玉米芯与橡胶静摩擦因数为 0.68。

1.3.3 滚动摩擦因数

在静摩擦因数测定装置基础上,于斜面下方增设水平测试板,确保斜面与平面自然过渡。将待测物料置于斜面较高位置,自由释放使其滚下,测量物料在水平板上的滚动距离。根据能量守恒定律,物料重力势能转化为克服滚动摩擦力所做功^[20],计算式为

$$\mu_2 = \frac{h_3 \sin\theta_1}{s \cos\theta_1 + h_3 \cos\theta_1} \tag{4}$$

式中 μ_2 ——滚动摩擦因数

h_3 ——物料滚落高度,mm
 s ——水平面滚动距离,mm

重复试验 5 次并取平均值,由式(4)计算得苞叶与钢、橡胶滚动摩擦因数分别为 0.06 和 0.08,籽粒与橡胶滚动摩擦因数为 0.05,玉米芯与橡胶滚动摩擦因数为 0.07。

2 离散元模型构建

2.1 Hertz – Mindlin with Bonding V2 接触模型

采用离散元软件 EDEM 中 Hertz – Mindlin with Bonding V2 接触模型构建苞叶–籽粒–穗芯柔性复合模型^[21]。该接触模型在原始 Bonding 模型基础上进一步改进,能够在 GPU 加速模式下高效计算,颗粒间通过平行粘结键连接,当颗粒进入接触并满足粘结条件时生成粘结键,由法向和切向刚度参数计算接触力与转矩,并随外力变化实时更新^[22]。当外力引起内应力超过设定的临界强度时,粘结键断裂并失去粘结作用。计算式为

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n S_n A \delta_t \\ \delta F_t = -v_t S_t A \delta_t \\ \delta M_n = -\omega_n S_t J \delta_t \\ \delta M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta_t \end{cases} \tag{5}$$

其中
$$\begin{cases} A = \pi R_B^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_B^4 \\ R_B = \lambda \min(R_1, R_2) \end{cases} \tag{6}$$

式中 δM_n 、 δM_t ——单个时间步长法向、切向转矩, N·m

δF_n 、 δF_t ——单个时间步长法向、切向力, N
 S_n 、 S_t ——单位面积法向、切向刚度, N/m³
 ω_n 、 ω_t ——法向、切向角速度, rad/s
 v_n 、 v_t ——法向、切向速度, m/s
 R_1 、 R_2 ——颗粒物理半径, mm
 A ——粘结键横截面积, mm²
 R_B ——粘结键半径, mm
 λ ——粘结半径系数
 δ_t ——时间步长, s
 J ——惯性矩, m⁴

在粘结模型中,当粘结键受到的法向或切向应力超过其最大临界值 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ 时,粘结键将发生断裂,约束条件为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < -\frac{F_n}{A} + \frac{2M_t}{J}R_B \\ \tau_{\max} < -\frac{F_t}{A} + \frac{2M_n}{J}R_B \end{cases} \tag{7}$$

2.2 粘结模型参数设定

采用 Hertz – Mindlin with Bonding V2 模型进行制种玉米果穗柔性建模时,需确定颗粒间粘结键的关键参数,包括单位面积法向刚度 S_n 、单位面积切向刚度 S_t 、法向临界应力 $\sigma_{\max}$ 、切向临界应力 $\tau_{\max}$ 和粘结半径 R_B ^[23–24]。计算式为

$$\left\{\begin{aligned} S_n &= \frac{4}{3} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} R \\ R &= \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ S_t &= \frac{3 S_n (E_1 + E_2)}{(1-\nu_1) E_1 + (1+\nu_2) E_2} \\ \sigma_{\max} &= \frac{F_{N\max}}{\pi R_B^2} \\ \tau_{\max} &= \frac{F_{T\max}}{\pi R_B^2} \end{aligned}\right. \quad (8)$$

式中 $\nu_1、\nu_2$ ——泊松比 $E_1、E_2$ ——弹性模量,MPa
 $F_{N\max}$ ——最大法向力,N
 $F_{T\max}$ ——最大切向力,N

基于前期物理特性试验结果,通过式(8)及文献[25–27],得到制种玉米果穗粘结模型仿真参数,如表 2 所示。

表 2 颗粒间粘结参数

Tab.2 Parameters of Hertz – Mindlin bonding between particles

参数	单位面积 法向刚度/ (N·m ⁻³)	单位面积 切向刚度/ (N·m ⁻³)	临界法向 应力/ Pa	临界切向 应力/Pa	粘结键 半径/ mm
芯-芯	1.723 × 10 ⁷	4.039 × 10 ⁷	7.569 × 10 ⁶	3.380 × 10 ⁵	1.123
芯-籽	3.122 × 10 ⁶	6.979 × 10 ⁶	5.126 × 10 ⁴	2.564 × 10 ⁴	1.123
芯-叶	2.001 × 10 ⁶	4.757 × 10 ⁶	3.147 × 10 ⁵	1.728 × 10 ⁵	0.842
籽-籽	8.872 × 10 ⁶	1.957 × 10 ⁷	1.984 × 10 ⁵	1.984 × 10 ⁵	2.246
籽-苞	4.136 × 10 ⁵	9.375 × 10 ⁵	4.490 × 10 ³	4.490 × 10 ³	0.842
叶-叶	2.505 × 10 ⁶	6.013 × 10 ⁶	3.104 × 10 ⁵	5.001 × 10 ⁴	0.842

2.3 玉米果穗离散元柔性模型构建

基于制种玉米果穗物理特性,确定穗行数为 12 行,行粒数为 40,籽粒总数为 480。以马齿型玉米籽粒为原型,建立苞叶-籽粒-穗芯复合体柔性模型,构建籽粒几何形态、排列结构及其在穗轴上的分布方式。实物测量与图像分析表明,籽粒尺寸由基部至顶部呈非线性递减趋势。为精确描述该结构规律,采用指数函数对籽粒缩放因子进行拟合建模,以准确反映籽粒尺寸变化规律和剥皮过程因尺寸差异引起的接触行为变化。其表达式为^[28]

$$i = S_{\min} + (S_{\max} - S_{\min}) \frac{1 - e^{-K \frac{i_1 - 1}{n - 1}}}{1 - e^{-K}} \quad (9)$$

式中 i ——第 i 个籽粒缩放因子
 $S_{\max}$ ——最大籽粒缩放因子,对应穗基部,取 1
 $S_{\min}$ ——最小籽粒缩放因子,对应穗顶,取 0.38
 n ——单行籽粒总数,取 36
 K ——指数变化控制参数,取 2
 i_1 ——籽粒在一行内排列编号,取 1,2,⋯,36

针对传统颗粒填充方法无法满足颗粒规则排布和分层建模需求的问题,采用网格划分结合用户定义函数(UDF)程序实现颗粒坐标确定和快速填充^[29]。通过 Solidworks 软件构建制种玉米苞叶-籽粒-穗芯三维模型并完成装配,分别保存为 *.x_t 格式文件。

采用 ANSYS Workbench 的 Mesh 模块加载各部分 *.x_t 文件,设置材料属性为 Fluent,执行网格剖分并进行质量检查并导出为 Mesh 文件格式。利用 ANSYS Fluent 加载各部分 mesh 文件。通过用户自定义功能菜单加载 CalcRadius.c 文件,执行 CalcRadius Volume 函数获取颗粒坐标数据,保存以备后续颗粒填充使用。

在 EDEM 软件中,采用球形颗粒建立制种玉米穗芯-籽粒-苞叶的 Bulk Materials,定义各部分材料属性及接触参数。导入果穗三维模型并设置为 Physical 属性,通过快速填充 API 完成各部分颗粒填充,并基于 Hertz – Mindlin with Bonding V2 模型设置粘结参数完成粘结,模型如图 6 所示。

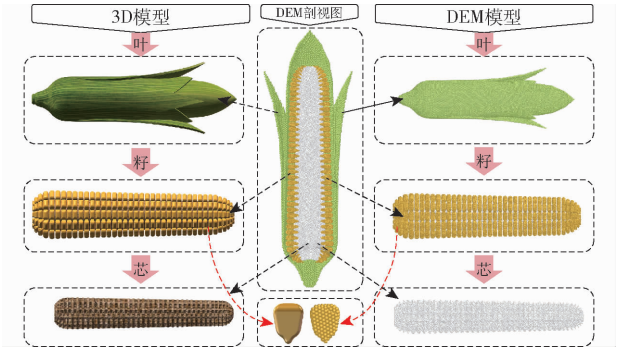


图 6 制种玉米果穗模型

Fig.6 Seed maize ear model

3 离散元接触参数优化

制种玉米机械化剥皮过程籽粒损伤和落粒损失是影响种子品质的关键因素。剥皮过程玉米芯轴作为籽粒载体,其力学特性直接影响籽粒在外力作用下的脱落行为,而籽粒自身力学特性则决定其在剥皮过程的破损程度^[30]。因此重点对玉米芯轴和籽粒的粘结参数进行标定优化,建立能够真实反映剥皮过程籽粒脱落和破损行为的离散元模型,为制种玉米剥皮工艺仿真提供可靠的理论基础。

3.1 玉米芯轴粘结参数标定

采用三点弯曲仿真试验进行玉米芯轴粘结参数标定。在 EDEM 中导出玉米芯轴“Simulation Deck”文件并设仿真时间为 0 s,导入弯曲夹具模型并调整位置^[31]。试验装置以刀具为中心建立水平支座,支座两点间距为 70 mm,刀具运动速度为 5 mm/s,仿真计算时间步长为 4×10^{-6} s,如图 7 所示。

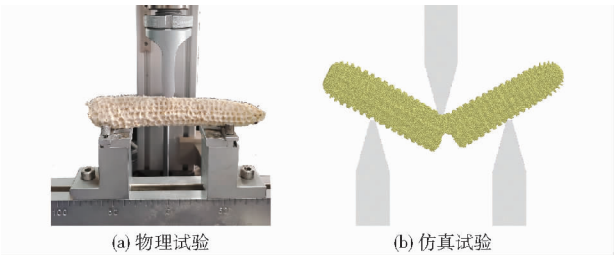


图 7 玉米芯轴三点弯曲试验

Fig.7 Three-point bending test of corn cob shaft

3.1.1 Plackett – Burman 试验设计

采用 Plackett – Burman 试验设计筛选对玉米芯轴力学响应具有显著影响的粘结参数。利用 Design-Expert 软件设计试验方案,以玉米芯轴所受平均最大载荷为响应值,参考各因素试验值及文献[12 – 14,18,32]确定各因素水平,试验因素编码如表 3 所示。取 1 个中心点水平,共设计 13 次试验,进行弯曲试验仿真模拟,试验结果及方差分析结果见表 4 和表 5。 $X_1 \sim X_5$ 为因素编码值。

表 3 Plackett – Burman 试验因素编码

参数	编码	
	- 1	1
单位面积法向刚度 $x_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	1×10^7	1×10^9
单位面积切向刚度 $x_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	1×10^7	1×10^9
临界法向应力 x_3/Pa	7×10^6	5×10^8
临界切向应力 x_4/Pa	3×10^5	5×10^6
粘结键半径 x_5/mm	1.000	1.123

表 4 Plackett – Burman 试验设计与结果

序号	因素					最大载荷 F/N
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
1	1	-1	1	1	-1	74.0
2	-1	1	1	-1	1	64.8
3	1	-1	-1	-1	1	51.2
4	-1	1	1	1	-1	63.6
5	1	1	-1	1	1	85.2
6	-1	-1	1	-1	1	45.6
7	-1	-1	-1	-1	-1	34.4
8	1	1	1	-1	-1	90.8
9	0	0	0	0	0	56.8
10	1	1	-1	-1	-1	79.2
11	-1	1	-1	1	1	54.0
12	-1	-1	-1	1	-1	31.6
13	1	-1	1	1	1	76.4

表 5 Plackett – Burman 试验方差分析结果

Tab.5 ANOVA of Plackett – Burman test					
参数	SS	df	MS	F	P
模型	4 056.8	5	811.4	48.62	<0.000 1 **
x_1	2 208.7	1	2 208.7	132.34	<0.000 1 **
x_2	1 289.6	1	1 289.6	77.27	0.000 1 **
x_3	528.0	1	528.0	31.64	0.001 3 **
x_4	29.5	1	29.5	1.76	0.232 3
x_5	1.08	1	1.1	0.065	0.807 7

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$),下同。

由表 5 可知,模型 $P < 0.000 1, R^2 = 0.975 9$,表明回归模型极显著且拟合度良好。显著性分析表明, x_1, x_2 和 x_3 对响应值影响显著($P < 0.01$)。由图 8 可知, x_1, x_2 和 x_3 标准化效应点离拟合线较远,均超过 t 值为显著因子,且影响效应均为正,进一步表明其显著性。在后续试验中不考虑非显著性因素影响,均取中间水平,即 $x_4 = 2.65 \times 10^6 \text{ Pa}, x_5 = 1.061 5 \text{ mm}$ 。

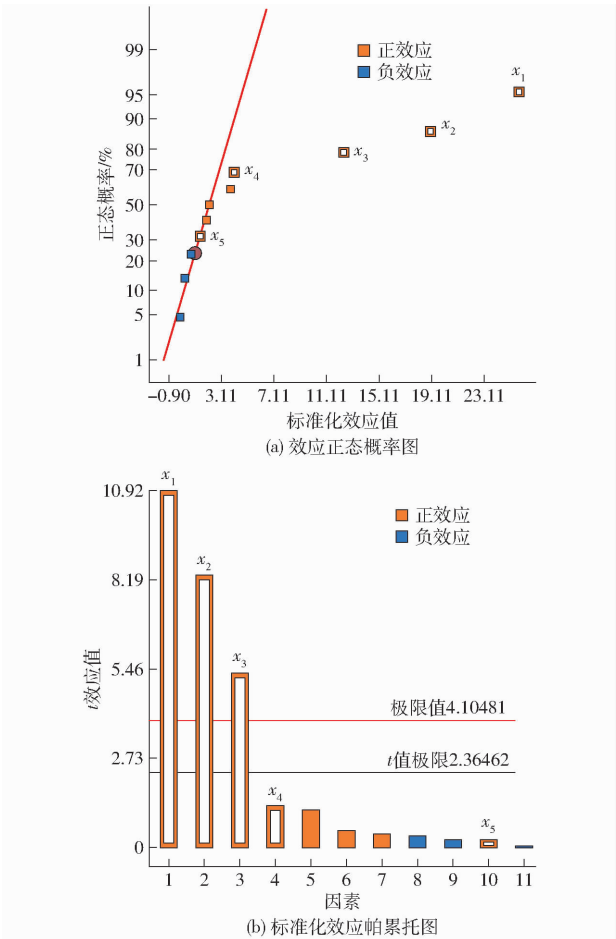


图 8 标准化正态概率效应图

Fig.8 Normal probability effect diagrams of standardized effect

3.1.2 最陡爬坡试验设计

根据 Plackett – Burman 试验结果,进行最陡爬坡试验,根据 PB 试验确定显著因素范围,采用等差

数列方法确定爬坡路径,试验结果如表 6 所示。由表 6 可知,相对误差先减小后增大,第 5 组相对误差最小,故选取试验 5 为中间水平,试验 4 和试验 6 分别为低水平和高水平设计 Box – Behnken 试验^[33]。

表 6 最陡爬坡试验设计与结果

Tab.6 Steepest ascent test design and results

序号	因素			最大载荷 <i>F</i> /N	相对误差 η /%
	$x_1/(N\cdot m^{-3})$	$x_2/(N\cdot m^{-3})$	x_3/Pa		
1	1×10^7	1×10^7	7×10^6	35.2	54.87
2	2×10^8	2×10^8	1×10^8	47.5	39.10
3	4×10^8	4×10^8	2×10^8	56.7	27.31
4	6×10^8	6×10^8	3×10^8	66.4	14.87
5	8×10^8	8×10^8	4×10^8	86.3	10.64
6	1×10^9	1×10^9	5×10^8	92.6	18.72

3.1.3 Box – Behnken 响应面试验

根据最陡爬坡试验,以试验 5 为中心点进行 Box – Behnken 响应面试验设计,以 x_1 、 x_2 和 x_3 为试验因素建立三因素三水平响应面试验设计。试验设计及结果见表 7。

表 7 Box – Behnken 试验设计及其结果

Tab.7 Box – Behnken experimental and results

序号	因素			最大载荷 <i>F</i> /N	相对误差 η /%
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	1	0	71.1	8.85
2	1	0	-1	71.7	8.08
3	0	-1	-1	75.3	3.46
4	0	1	-1	70.6	9.49
5	1	0	1	89.3	14.49
6	0	0	0	87.2	11.79
7	0	0	0	87.2	11.79
8	-1	-1	0	74.6	4.36
9	1	-1	0	72.8	6.67
10	-1	0	-1	73.1	6.28
11	0	-1	1	85.3	9.36
12	0	0	0	87.2	11.79
13	0	0	0	87.2	11.79
14	0	0	0	87.2	11.79
15	-1	0	1	83.6	7.18
16	0	1	0	89.1	14.23
17	1	1	0	88.2	13.08

Box – Behnken 试验方差分析结果如表 8 所示。由表 8 可知,芯轴最大载荷二次回归模型呈极显著性($P<0.000\ 1$),决定系数 $R^2=0.987\ 4$,校正决定系数 $R^2_{adj}=0.987\ 4$,表明回归模型精度较高。其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 和 X_2^2 极显著,交互项均不显著($P>0.05$)。各因素间交互作用较弱,最优区域均位于中等水平附近,说明模型具有较好的稳定性和预测精度,能够较准确地反映制种玉米芯轴在受力过程中的实际力学响应特征。

表 8 Plackett – Burman 试验方差分析结果

Tab.8 ANOVA of Plackett – Burman test

参数	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	173.1	9	19.2	61.1	<0.000 1 **
X_1	30.81	1	30.8	97.9	<0.000 1 **
X_2	59.41	1	59.4	188.8	<0.000 1 **
X_3	40.5	1	40.5	128.7	<0.000 1 **
X_1X_2	0.922	1	0.92	2.9	0.130 8
X_1X_3	7.45	1	7.45	23.7	0.180 8
X_2X_3	0.336	1	0.34	1.1	0.335 6
X_1^2	14.33	1	14.3	45.6	0.000 3 **
X_2^2	12.24	1	12.2	38.9	0.000 4 **
X_3^2	3.8	1	3.8	12.1	0.010 3 *
残差	2.20	7	0.315		
失拟	2.20	3	0.374		
纯误差	0	4	0		
总和	175.3	16			

注：* 表示影响显著($0.01\leq P<0.05$)。

根据 Box – Behnken 试验结果及二次回归方程,以试验所得堆积角相对误差 η 最小为目标,对因素 X_1 、 X_2 和 X_3 进行最优解分析,设定优化目标及约束条件为

$$\begin{cases} \min \eta(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

最终得到果穗芯轴单位面积法向刚度、单位面积切向刚度和临界法向应力为 $9.87\times10^8\text{ N/m}^3$ 、 $6.16\times10^8\text{ N/m}^3$ 和 $3.09\times10^8\text{ Pa}$,与实测最大载荷相对误差为 3.89%,误差较小,仿真优化结果为制种玉米芯轴参数优化提供了可靠的理论参考。

3.2 玉米籽粒参数标定

针对制种玉米剥皮过程籽粒破损严重问题,需对籽粒进行参数标定。在 EDEM 中导出单个籽粒几何模型及试验装置,设定上压盘加载速度 2 mm/s,通过 bonding 键断裂情况判定籽粒破坏情况。每组参数进行重复试验,取 bonding 键断裂时最大载荷作为响应值,用于参数标定。

籽粒标定过程与芯轴类似,采用响应面法优化流程对参数进行标定^[34]。通过 PB 试验筛选显著因素,最陡爬坡试验逼近最优区域,基于 Box – Behnken 响应面试验建立回归模型并求解最优参数组合^[35]。标定后参数见表 9,仿真结果与物理试验均值 314.49 N 的相对误差为 8.79%,标定结果可靠。

3.3 籽粒-芯轴粘结参数标定

制种玉米剥皮过程中,籽粒-芯轴间的粘结强度

表 9 玉米籽粒粘结参数

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m ⁻³)	5.29 × 10 ⁸
单位面积切向刚度/(N·m ⁻³)	2.75 × 10 ⁷
临界法向应力/Pa	5.46 × 10 ⁶
临界切向应力/Pa	4.58 × 10 ⁶
粘结半径系数	2

对籽粒脱落起决定性作用。为准确模拟籽粒脱落特征,需对籽粒-芯轴粘结参数进行标定。

基于标定的籽粒及芯轴参数,建立籽粒-芯轴连接的离散元仿真模型。设置加载装置下压速度为 5 mm/min,分别对单个籽粒切向与轴向施加垂直压力,直至籽粒与芯轴完全分离,记录最大压力,仿真试验如图 9 所示。基于标定的籽粒及芯轴参数,建立籽粒-芯轴连接的离散元仿真模型。设置加载装置下压速度为 5 mm/min,分别对单个籽粒切向与轴向施加垂直压力,直至籽粒与芯轴完全分离,记录最大压力。粘结参数优化流程与上述类似。

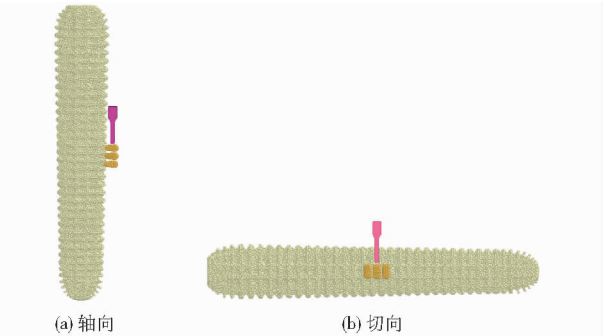


图 9 籽粒-芯轴粘结仿真试验

优化后粘结参数如表 10 所示,仿真结果表明籽粒轴向和切向脱落载荷为 21.85、10.86 N,与物理试验结果(轴向 20.31 N,切向 10.16 N)相对误差分别为 7.58% 和 6.89%,参数标定结果可靠。

表 10 籽粒-芯轴粘结参数

参数	数值
单位面积法向刚度/(N·m ⁻³)	6.85 × 10 ⁸
单位面积切向刚度/(N·m ⁻³)	8.36 × 10 ⁷
临界法向应力/Pa	3.59 × 10 ⁷
临界切向应力/Pa	2.25 × 10 ⁷
粘结半径系数	0.85

4 试验验证

为验证制种玉米果穗离散元柔性模型参数标定结果,以籽粒破损率和损失率为评价指标,采用仿真与台架试验进行对比验证。

4.1 仿真试验

基于标定参数,建立制种玉米复合体离散元模型进行剥皮仿真。以课题组剥皮试验台架为原型简化建模(图 10),将剥皮机构零件导入 EDEM,设置剥皮辊转速 450 r/min、辊间隙 0 mm、仿真时间 4 s、时间步 4 × 10⁻⁶ s,采用 GPU 加速求解。

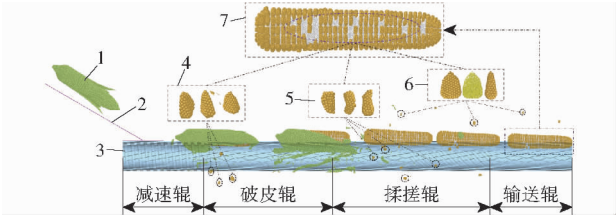


图 10 制种玉米果穗剥皮仿真示意图

Fig. 10 Simulation diagram of seed maize ear peeling
1. DEM 模型 2. 导流板 3. 剥皮辊 4. 夹带损失籽粒 5. 破损籽粒 6. 掉落籽粒 7. 剥皮后的制种玉米

剥皮辊包括减速辊、破皮辊、揉搓辊和输送辊。减速辊缓冲稳定输送;破皮辊快速破开外层苞叶,但易导致部分籽粒受力脱落;揉搓辊完成剩余苞叶清除,但此段伴随果穗跳动导致籽粒飞溅增加落粒损失;最终经过完整剥皮处理的果穗由输送辊平稳送入粮仓。脱落籽粒可分 3 类:直接落入收集箱的完整籽粒、被挤压产生机械损伤的籽粒、以及因高速辊碰撞弹飞的籽粒。仿真结果与实际剥皮过程保持较高一致性,验证了所建离散元模型在剥皮及籽粒脱落损伤过程中的真实性与可靠性。

4.2 台架试验

为减小其他因素对试验结果的影响,保证试验数据可靠性,台架试验设置与仿真参数一致,选取与仿真模型尺寸相近的制种玉米果穗进行台架试验(图 11)。

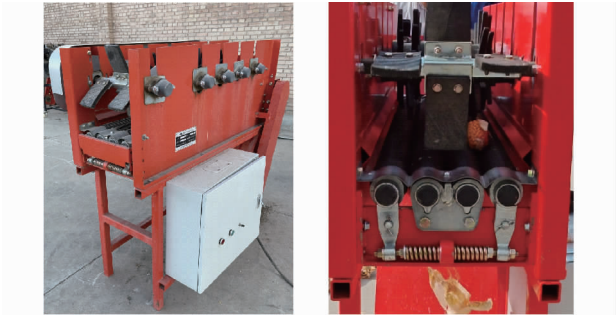


图 11 台架试验

Fig. 11 Bench test

筛选含水率为 25% ~ 35%、穗行数为 12 行、完整无病虫害、无机械损伤、苞叶层数完整的同等规格果穗。台架试验每组喂入 20 个经过筛选的果穗,共进行 5 组重复试验并取平均值。设置剥皮辊转速为 450 r/min,辊间隙 0 mm,每组剥皮结束后,使用精度为 0.01 g 的电子天平分别称量掉落籽粒和破损籽

粒质量,并计算籽粒脱落率和籽粒破损率,结果见表 11。仿真试验与台架试验籽粒脱落率和破损率相对误差分别为 4.54% 和 5.79%,验证了离散元模型可靠性。

表 11 试验结果
Tab.11 Trial results %

序号	脱落率	破损率
1	1.653	0.425
2	1.725	0.391
3	1.713	0.376
均值	1.697	0.432
仿真值	1.774	0.457
相对误差	4.54	5.79

5 结论

(1)以制种玉米果穗为研究对象,通过物理试

验测定制种玉米果穗的基本力学特性与接触参数,并基于离散元法建立了制种玉米果穗苞叶-籽粒-穗芯柔性复合体模型,采用指数函数描述籽粒尺寸变化规律,结合网格划分和用户定义函数实现了颗粒精确定位和快速填充,为制种玉米果穗精细化建模提供有益参考。

(2)采用响应面法对穗芯和籽粒关键粘结参数进行了标定优化。结果表明,芯轴三点弯曲仿真试验与物理试验相对误差为 3.89%,籽粒压缩仿真试验与物理试验相对误差为 8.79%,籽粒-芯轴轴向和切向脱落仿真试验与物理试验相对误差分别为 7.58% 和 6.89%,参数标定精度较高。

(3)仿真试验与台架试验籽粒脱落率和破损率相对误差为 4.54% 和 5.79%,表明模型能够准确模拟剥皮过程籽粒的脱落和破损行为,为制种玉米剥皮装置优化和精细化建模提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 常婉秋,姚宇,席晓杰,等. 基于迁移学习和非监督分类的制种玉米遥感识别方法[J]. 农业机械学报, 2024,55(8): 181 – 195.
CHANG Wanqiu, YAO Yu, XI Xiaojie, et al. Remote sensing identification for seed maize with integrated migration learning and unsupervised classification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8):181 – 195. (in Chinese)

[2] GAO Z, LU C, LI H, et al. A corn seed spacing detection method based on image stitching and YOLOX[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109087.

[3] 陈俊志,史瑞杰,戴飞,等. 移动式制种玉米剥皮机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5):331 – 342.
CHEN Junzhi, SHI Ruijie, DAI Fei, et al. Design and experiment of mobile seed corn husker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5):331 – 342. (in Chinese)

[4] 徐天月,于涵,黄东岩,等. 基于离散元法的油橄榄果实建模及杨氏模量参数灵敏度的分析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(9): 175 – 182.
XU Tianyue, YU Han, HUANG Dongyan, et al. Modeling of olive fruit based on discrete element method and analysis of the sensitivity of Young’s modulus parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(9): 175 – 182. (in Chinese)

[5] 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 Xuezheng, 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)

[6] YU Y, FU H, YU J. DEM-based simulation of the corn threshing process[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26(5): 1400 – 1409.

[7] 于亚军,周海玲,付宏,等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 167 – 174.
YU Yajun, ZHOU Hailing, FU Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particle agglomerate[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 167 – 174. (in Chinese)

[8] 李洪成,曾荣,牛智有,等. 玉米籽粒冲击破碎中的 Ab – T10 破碎模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 437 – 444.
LI Hongcheng, ZENG Rong, NIU Zhiyou, et al. Calibration of Ab – T10 breakage model parameters based on maize kernels impact experiments[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 437 – 444. (in Chinese)

[9] HAN D, ZHOU Y, NIE J, et al. DEM model acquisition of the corn ear with bonded particle model and its simulated parameters calibration[J]. Granular Matter, 2024, 26(2): 54.

[10] 刘磊,杜岳峰,栗晓宇,等. 基于离散元法的种子玉米剥皮过程籽粒损失分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (增刊 2): 28 – 38.
LIU Lei, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Analysis and experiment on kernel loss of seed corn during peeling based on DEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 28 – 38. (in Chinese)

[11] SHI L, YANG X, ZHAO W, et al. Investigation of interaction effect between static and rolling friction of corn kernels on

- repose formation by DEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(5): 238–246.
- [12] 崔涛, 荆茂盛, 张东兴, 等. 玉米果穗离散元模型构建与脱粒仿真验证[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 33–46.
CUI Tao, JING Maosheng, ZHANG Dongxing, et al. Construction of the discrete element model for maize ears and verification of threshing simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 33–46. (in Chinese)
- [13] 陈舜, 易克传, 张新伟, 等. 高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 30–42.
CHEN Shun, YI Kechuan, ZHANG Xinwei, et al. Design and test of longitudinal axial flow high and low roller type fresh corn flexible peeling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2): 30–42. (in Chinese)
- [14] 陈俊志, 史瑞杰, 戴飞, 等. 制种玉米与剥皮机构互动过程仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 91–100.
CHEN Junzhi, SHI Ruijie, DAI Fei, et al. Simulation and experiment on interaction process between seed corn and corn husking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 91–100. (in Chinese)
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 农业机械试验条件试验方法: GB/T 5262—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 粮油检验 粮食、油料相对密度的测定试验方法: GB/T 5518—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [17] 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)
- [18] CHEN J, SHI R, ZHAO W, et al. Simulation and experiment of kernel loss during peeling of seed maize based on DEM–MBD coupling[J]. Biosystems Engineering, 2025, 257: 104225.
- [19] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123–132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123–132. (in Chinese)
- [20] 马永财, 戚艳, 王汉羊, 等. 玉米秸秆-牛粪混料离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 441–450, 504.
MA Yongcai, QI Yan, WANG Hanyang, et al. Discrete element simulation parameter calibration and experiment of corn straw–cow manure mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 441–450, 504. (in Chinese)
- [21] 李骅, 孟煜柏, 齐新丹, 等. 基于 Bonding V2 模型的蒜种离散元建模与参数标定[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 150–157, 169.
LI Hua, MENG Yubai, QI Xindan, et al. Discrete element modelling method and parameter calibration of garlic species based on Bonding V2 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 150–157, 169. (in Chinese)
- [22] 周俊, 孙文涛, 梁子安. 收获期菊芋根-块茎离散元柔性模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 124–132.
ZHOU Jun, SUN Wentao, LIANG Zi'an. Construction of discrete element flexible model for *Jerusalem artichoke* root–tuber at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 124–132. (in Chinese)
- [23] 代斌豪, 赵建国, 郝建军, 等. 玉米立式双轴对旋除草机结构设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(8): 185–197.
DAI Binhao, ZHAO Jianguo, HAO Jianjun, et al. Structural design and test of maize vertical double-shaft counter-rotating weeding machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(8): 185–197. (in Chinese)
- [24] CHANG Leilei, SHI Ruijie, DAI Fei, et al. Header parameters optimization for quinoa mechanical harvesting using neural network and approximation modeling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110472.
- [25] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 146–155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 146–155. (in Chinese)
- [26] LI X, DU Y, LIU L, et al. Research on the constitutive model of low-damage corn threshing based on DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106722.
- [27] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36–42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36–42. (in Chinese)

LUO Jiaqi, CHEN Zeshuai, ZOU Zhengping, et al. Statistics on geometric uncertainties of casting blades in low-pressure turbines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(6): 310–325. (in Chinese)

[24] 颜勇, 祝培源, 宋立明, 等. 基于非平稳高斯过程的叶栅加工误差不确定性量化[J]. 推进技术, 2017, 38(8): 1767–1775.
YAN Yong, ZHU Peiyuan, SONG Liming, et al. Uncertainty quantification of cascade manufacturing error based non-stationary Gaussian process[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(8): 1767–1775. (in Chinese)

[25] 邬晓敬. 气动外形优化设计中的不确定性及高维问题研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.
WU Xiaojing. Research on uncertainty and high-dimensional problems in aerodynamic shape optimization design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)

(上接第 182 页)

[28] 于亚军, 周海玲, 付宏, 等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 167–174.
YU Yajun, ZHOU Hailing, FU Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particles agglomerate[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 167–174. (in Chinese)

[29] 梁树建, 刘立晶, 刘芳建, 等. 菠菜根土复合体离散元模型建立与标定试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(5): 38–49.
LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. Establishment and calibration experiment of the discrete element model for spinach root-soil complex[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(5): 38–49. (in Chinese)

[30] 刘磊, 刘理汉, 杜岳峰, 等. 基于 TRIZ 理论的种子玉米剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 131–141.
LIU Lei, LIU Lihan, DU Yuefeng, et al. Design and experiment of seed corn peeling mechanism based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 131–141. (in Chinese)

[31] 夏俊芳, 张朋, 苑宏文, 等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 174–184.
XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 174–184. (in Chinese)

[32] HAN D, ZHOU Y, NIE J, et al. DEM model acquisition of the corn ear with bonded particle model and its simulated parameters calibration[J]. Granular Matter, 2024, 26(2): 54.

[33] 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)

[34] 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 method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Suppl 1): 69–77. (in Chinese)

[35] 王小勇, 余志, 张德, 等. 炒青绿茶离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 418–427.
WANG Xiaoyong, YU Zhi, ZHANG De, et al. Calibration of simulation parameters for roasted green tea based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 418–427. (in Chinese)