

荸荠离散元仿真参数标定与试验

张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 董 昭, 张清洪, 周 勇

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 针对荸荠深加工中机械去皮、切块等技术与装备研发缺乏离散元仿真模型与参数、难以通过仿真指导装置设计与优化的问题, 该研究开展了荸荠的离散元参数标定与试验研究。借助三维扫描逆向建模技术获得荸荠轮廓, 通过物理试验测得其本征参数和基本接触参数, 通过质构仪测得刀片对荸荠的最大剪切力为 67.2 N。应用 Hertz-Mindlin with bonding 模型对荸荠进行建模, 以最大剪切力为评价指标, 对粘结参数进行虚拟标定试验, 采用二水平析因试验和最陡爬坡试验筛选显著性因素, 通过响应面法设计试验和优化求解, 并进行仿真验证。结果显示, 仿真值和实测最大剪切力相对误差为 0.89%。进行不同刀片的剪切试验, 结果表明, 仿真值与实测最大剪切力相对误差不高于 7.41%。研究结果表明, 该研究所建荸荠模型与参数标定结果可用于离散元仿真研究, 对荸荠去皮、切块加工装置设计具有指导意义。

关键词: 离散元; 剪切; 荸荠; 参数标定; 粘结模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.005

中图分类号: S226.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-11-0041-10

张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 荸荠离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 41-50.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.005 <http://www.tcsae.org>

Zhang Guozhong, Chen Liming, Liu Haopeng, et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 41-50. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.005 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

荸荠 (Chinese water chestnut) 又名马蹄、水栗、乌芋等, 是重要的水生蔬菜, 广泛种植于长江流域及以南地区^[1-2], 年产量超过 80 万吨, 且近年来种植面积呈稳定增长态势^[3], 具有广阔市场潜力。荸荠难以长期储存, 多以鲜食供应市场^[4-6], 附加值较低不利于产业发展, 目前荸荠深加工需求迫切但发展缓慢, 去皮、切块等环节机械化程度低是其主要限制^[7-8]。

近年来, 离散元法及仿真软件 EDEM 在农业领域中的应用为农业物料与机械部件接触特性的研究提供了新途径, 对农机研发起到促进作用^[9-11]。目前已有学者完成了诸如土壤^[12]、稻谷^[13]、马铃薯^[14]、玉米秸秆^[15]等物料的离散元建模与仿真研究。其中基于 Hertz-Mindlin (no slip) 建立的模型在 EDEM 中被视为一个整体, 可对物料的输送、分级、播种等过程进行仿真分析和优化设计, 而对于去皮、切块等过程的研究, 需建立可破碎的离散元模型^[16-17], 如苑进等建立菠菜根柔性体离散元模型, 对收获过程中菠菜根、土壤与根切铲之间的相互关系进行研究, 揭示了根切铲的工作机理, 为菠菜收获机根切机构的研制提供理论指导^[18]; 焦俊等建立莲藕主藕体模型并进行参数标定, 为莲藕机械化收获过程仿真研究以及莲藕损伤、破坏途径与因素的分析提供参考^[19]。此类

基于 Hertz-Mindlin with bonding 原理建立的模型在受到外力时, 颗粒间的粘结键随之发生变化, 可用于揭示物料和机械部件接触时的作用机理, 对装置的研发设计具有指导意义。

本文以荸荠为研究对象, 采用物理试验获得其本征参数和基本接触参数; 借助三维反求技术获得荸荠轮廓, 导入 EDEM 离散元仿真软件中建立荸荠模型; 通过质构仪获得刀片对荸荠的最大剪切力, 以此为参照, 进行粘结参数虚拟标定试验, 获取可用于离散元仿真的荸荠参数。通过不同刀片对荸荠的剪切试验, 验证荸荠建模与参数标定的可靠性, 揭示不同刀片剪切荸荠的受力过程变化规律, 以期对荸荠去皮、切块等机械化作业提供准确可靠的仿真模型和参数标定方法, 为机械装置设计提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选用华中农业大学工学院水生蔬菜生产机械化研究与示范基地的团风荸荠, 该品种整体呈扁球状, 底部有凹陷, 顶部芽数为 3~5 个^[20-21]。为兼顾不同个体间的差异, 本研究取市售中等尺寸荸荠样本 100 个, 采用干燥法测定其平均含水率为 84.92%, 用游标卡尺测量其外形尺寸, 统计得到横径均值为 45.76 mm, 平均高度为 25.33 mm。

1.2 本征参数

本征参数包括密度、泊松比和弹性模量。其中密度 ρ 由排水法测得, 计算公式为

收稿日期: 2022-02-15 修订日期: 2022-05-28

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系专项 (CARS-24-D-02); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (T201934)

作者简介: 张国忠, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备设计与测控。Email: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

式中 m 为荸荠的质量, g; v 为荸荠排水体积, cm^3 。

利用高精度电子秤 (精度 0.01 g) 称量荸荠质量, 采用量筒获得荸荠的排水体积。为降低读数误差, 5 个荸荠作为一组, 随机选取 100 个荸荠, 分成 20 组, 密度测量结果为 1.06 g/cm^3 , 变异系数为 4.01% 。

泊松比 μ 是指荸荠在单向受拉或受压时, 横向变形量与轴向变形量之比, 是反映荸荠横向变形的弹性指数。试验时选取荸荠果肉制作边长 10 mm 的立方体标准试样, μ 的计算公式为

$$\mu = \left| \frac{\delta_1}{\delta_2} \right| = \frac{W_1 - W_2}{L_1 - L_2} \quad (2)$$

式中 δ_1 为荸荠横向变形量, mm ; δ_2 为荸荠轴向变形量, mm ; W_1 、 W_2 分别为荸荠压缩前、后的横向尺寸, mm ; L_1 、 L_2 分别为荸荠压缩前、后的轴向尺寸, mm 。

弹性模量 E 反映荸荠抵抗弹性变形的能力, 通过压缩试验获得, 其计算公式为

$$E = \frac{F \cdot L}{S \cdot \Delta L} \quad (3)$$

式中 F 为荸荠弹性变形阶段最大承受力, N ; L 为样本初始长度, mm ; S 为样本横截面积, mm^2 ; ΔL 为样本压缩前、后长度差, mm 。

本研究通过 TMS-Pro 质构仪单轴压缩试验测量荸荠泊松比和弹性模量, 如图 1 所示, 质构仪末端选取平板压头, 加载速率 5 mm/min [22], 试验重复 20 次, 得到荸荠样本的泊松比为 0.395 、弹性模量为 5.433 MPa 。

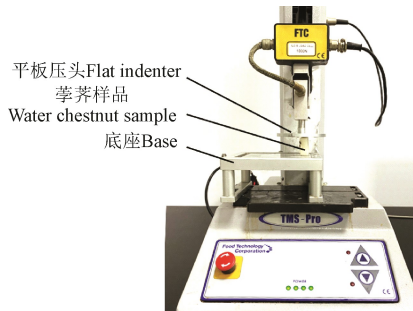


图 1 单轴压缩试验

Fig.1 Uniaxial compression test

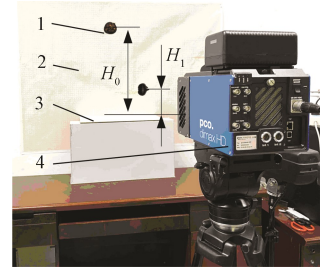
1.3 基本接触参数

1.3.1 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数表征物料碰撞后的恢复能力, 只与材料本身有关, 其数值为碰撞前后两物体在接触点处的法向相对分离速度与法向相对接近速度之比, 本研究涉及荸荠之间的接触以及荸荠和不锈钢之间的接触, 借助高速摄影机和坐标纸对该参数进行测量 [23-24]。

测量荸荠和不锈钢板之间的碰撞恢复系数时, 如图 2 所示, 将荸荠提升至固定高度 H_0 并调整姿势, 使其释放后呈自由落体运动并与不锈钢板径向碰撞, 反弹后记录反弹高度 H_1 , 荸荠和不锈钢之间恢复系数 e_1 由下式计算

$$e_1 = \sqrt{\frac{H_1}{H_0}} \quad (4)$$



1.荸荠 2.坐标纸 3.不锈钢板 4.高速摄影机

1. Water chestnut 2. Coordinate paper 3. Stainless steel plate 4. High-speed camera

注: H_0 为荸荠初始位置的高度, mm ; H_1 为荸荠碰撞后反弹高度, mm 。

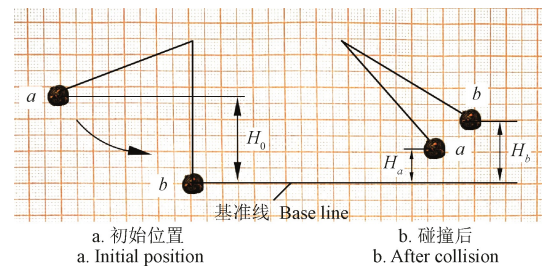
Note: H_0 is initial position height of water chestnut, mm ; H_1 is rebound height of water chestnut after collision, mm .

图 2 荸荠与不锈钢板间的碰撞恢复系数测量

Fig.2 Test of collision recovery coefficient between water chestnut and stainless steel plate

试验重复 20 次, 测得荸荠和不锈钢板间的碰撞恢复系数 $e_1=0.598$ 。

荸荠之间的碰撞恢复系数采用细线悬挂法测量 [25], 如图 3 所示, 使荸荠 b 自然悬挂并保持静止, 将荸荠 a 提升至固定高度 H_0 后将其释放, 采取径向碰撞的方式, 两个荸荠碰撞后由于惯性会继续摆动, 摆动程度反映荸荠间碰撞恢复特性。



注: H_a 为碰撞后荸荠 a 摆动至最高点与基准线的距离, mm ; H_b 为碰撞后荸荠 b 摆动至最高点与基准线的距离, mm 。

Note: H_a is distance from the highest point of water chestnut a swing to the base line after collision, mm ; H_b is distance from the highest point of water chestnut b swing to the base line after collision, mm .

图 3 荸荠间的碰撞恢复系数测量

Fig.3 Test of collision recovery coefficient between water chestnuts

碰撞过程由高速摄影机拍摄, 结合坐标纸计算 2 个荸荠碰撞后摆动至最高点与基准线的距离 H_a 、 H_b , 荸荠之间的碰撞恢复系数 e_2 计算公式为

$$e_2 = \frac{\sqrt{H_b} - \sqrt{H_a}}{\sqrt{H_0}} \quad (5)$$

试验随机选取 20 个荸荠, 计算得出荸荠之间的碰撞恢复系数 $e_2=0.512$ 。

1.3.2 摩擦系数

参考 GB/T 10006-2021《塑料薄膜和薄片摩擦系数的测定》, 采用 TM2101-T5 摩擦系数测定仪对摩擦系数进行测量 [26], 该装置可自动计算两接触部件的静摩擦系数

和动摩擦系数。测量时将荸荠外表皮制成均匀薄片并粘贴在试验装置上, 为避免物料含水率变化的影响, 测量需在短时间内完成, 试验重复 20 次测得荸荠之间、荸荠和不锈钢之间的摩擦系数如表 1 所示。

表 1 摩擦系数测量结果
Table 1 Test results of friction coefficients

材质 Materials	静摩擦系数 Coefficient of static friction	动摩擦系数 Coefficient of dynamic friction
荸荠-荸荠 Water chestnut-water chestnut	0.656	0.489
荸荠-不锈钢 Water chestnut-stainless steel	0.721	0.628

1.4 粘结参数与标定试验

1.4.1 粘结参数

首先通过 TMS-Pro 质构仪对荸荠进行剪切试验, 获得反映粘结参数的实际参考值, 以新鲜荸荠为对象, 采用自制刀具对其进行剪切, 如图 4 所示。

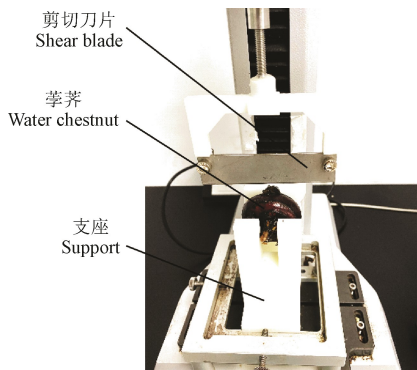


图 4 荸荠剪切试验

Fig.4 Shear test of water chestnut

试验时质构仪末端以 400 mm/min 的速度运行, 由于荸荠果实较脆, 剪切过程的受力曲线在荸荠裂开时达到峰值, 不同个体间峰值出现位置没有固定规律, 故本研究仅选取剪切力最大值作为评价指标。试验重复 20 次, 统计获得刀片对荸荠的最大剪切力为 67.2 N, 以此作为粘结参数的物理参考值进行虚拟标定试验。

1.4.2 单因素试验

根据 Hertz-Mindlin with bonding 模型^[27-28], 颗粒间粘结键的断裂与颗粒接触半径 x_1 、单位面积法向刚度 x_2 、单位面积切向刚度 x_3 、临界法向应力 x_4 、临界切向应力 x_5 和粘结半径 x_6 有关。结合团队前期研究结果, 参考力学特性相近的物料仿真参数^[19,29-30], 初步设定荸荠离散元仿真粘结参数范围, 如表 2 所示, 通过单因素试验分析各因素对最大剪切力的影响, 并确定参数范围。

表 2 荸荠粘结模型参数
Table 2 Parameters of bond model for water chestnut

参数 Parameters	数值 Value
颗粒接触半径 Particle contact radius x_1/mm	1.2 ~ 2.0
单位面积法向刚度 Normal stiffness per unit area $x_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$1.0\times 10^7 \sim 9.0\times 10^8$
单位面积切向刚度 Shear stiffness per unit area $x_3/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$1.0\times 10^7 \sim 9.0\times 10^8$
临界法向应力 Critical normal stress x_4/Pa	$1.0\times 10^6 \sim 90.0\times 10^6$
临界切向应力 Critical shear stress x_5/Pa	$1.0\times 10^6 \sim 90.0\times 10^6$
粘结半径 Bonding radius x_6/mm	1.2 ~ 2.0

在 EDEM 离散元软件中开展单因素仿真试验, 以最大剪切力为评价指标, 因素 x_1 和 x_6 平均取 5 个点, 因素 $x_2 \sim x_5$ 范围较大, 为兼顾不同数量级, 分别对每个数量级端点和中间位置取点, 如表 3 所示, 试验时固定因素均取 3 水平, 即颗粒接触半径 x_1 为 1.6 mm、单位面积法向刚度 x_2 为 $1.0\times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、单位面积切向刚度 x_3 为 $1.0\times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、临界法向应力 x_4 为 $10.0\times 10^6 \text{ Pa}$ 、临界切向应力 x_5 为 $10.0\times 10^6 \text{ Pa}$ 、粘结半径 x_6 为 1.6 mm。

表 3 单因素试验水平
Table 3 Single factor test level

水平 Level	x_1/mm	$x_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$x_3/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	x_4/Pa	x_5/Pa	x_6/mm
1	1.2	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^6	1.0×10^6	1.2
2	1.4	5.0×10^7	5.0×10^7	5.0×10^6	5.0×10^6	1.4
3	1.6	1.0×10^8	1.0×10^8	10.0×10^6	10.0×10^6	1.6
4	1.8	5.0×10^8	5.0×10^8	50.0×10^6	50.0×10^6	1.8
5	2.0	9.0×10^8	9.0×10^8	90.0×10^6	90.0×10^6	2.0

1.4.3 二水平析因试验

二水平析因试验可以在影响因素较多的情况下快速筛选出对试验指标影响显著的因素, 根据单因素试验结果确定各参数的范围, 设计二水平析因试验共 16 组。

1.4.4 最陡爬坡试验

针对二水平析因试验筛选出的显著性影响因素进行最陡爬坡试验, 以快速确定最优值的邻近区域, 试验时非显著因素均取单因素试验中的固定水平。

1.4.5 Box-Behnken 响应曲面试验

为得到最佳仿真参数, 根据 Box-Behnken 原理设计响应曲面试验, 以二水平析因试验筛选出的显著性影响因素 x_2 、 x_3 和 x_6 为影响因素, 根据最陡爬坡试验结果缩小其范围, 以试验 1 和 3 中的水平为上下限进行响应面试验, 中心水平设置 3 次重复, 以实测和仿真最大剪切力间的相对误差 e 为响应, 其计算式如下:

$$e = \frac{|F_a - F_b|}{F_a} \times 100\% \quad (6)$$

式中 e 为相对误差, %; F_a 为实测剪切力最大值, N; F_b 为仿真试验中的最大剪切力, N。

1.5 仿真模型建立

1.5.1 荸荠模型

荸荠外形不规则, 无法通过常规建模还原其实际特征, 为获得荸荠精确轮廓, 提高仿真准确性, 本研究选取外形尺寸接近平均值的新鲜荸荠, 采用 EinScan-Pro 手持式 3D 扫描仪进行扫描, 得到荸荠的精确轮廓, 封装点云数据, 通过 Geomagic Wrap 3D 软件处理三维扫描数据, 删除扫描异常点、填充缺口, 然后生成栅格拟合曲面得到可编辑的模型文件, 导入 EDEM 生成离散元模型并添加粘结键, 如图 5 所示。

荸荠离散元仿真模型建立过程为: 在 EDEM 中建立边长为 100 mm 的 box 几何体, 将处理后的荸荠模型导入其内部区域并设定类型为 virtual, 在 box 内部生成大量颗粒 (20 000 个), 颗粒受到重力作用下落在 box 内密实堆积, 待其稳定后, 将荸荠外壳设置为 physical 类型, 同

时将 box 更改为 virtual 类型, 多余颗粒在重力作用下离开仿真计算域自动消失, 至内部颗粒自由运动达到稳定状态, 生成 bonding 键将颗粒聚合, 删除荸荠外壳得到由颗粒组成的荸荠模型。在离散元中颗粒半径越小, 仿真模拟越接近真实情况, 但计算量也会急剧增加^[31-32]; 结合实际剪切时的刀片厚度以及荸荠外形参数, 将颗粒半径设置为 1 mm, 最终组成荸荠的颗粒数量为 4 352 个, 共生成粘结键 18 254 个, 平均每个颗粒粘结键数量超过 4.1 个, 粘结充分^[33-35]。

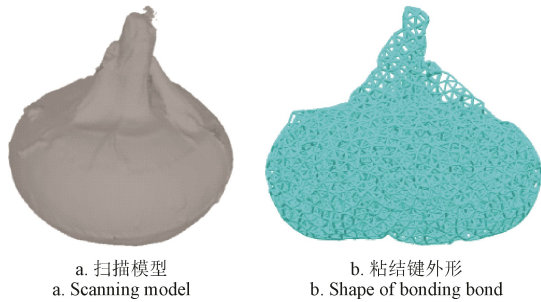


图 5 荸荠建模过程

Fig.5 Modeling process of water chestnut

1.5.2 剪切模型

通过 SolidWorks 建立刀具和支撑底座模型, 所有尺寸均与实际试验一致, 将其保存为 step 格式导入 EDEM 中, 设定刀具加载速度 400 mm/min, 方向垂直向下, 进行剪切试验离散元仿真。

1.6 标定结果验证

为检验标定出的参数能否用于荸荠剪切仿真研究, 使用回归方程求解预测的参数进行仿真, 并与实测值对比,

验证荸荠离散元建模和参数标定的准确性; 建立不同参数的刀片, 分别使用质构仪和 EDEM 软件对荸荠进行剪切试验, 进一步分析荸荠建模与参数标定的可靠性, 并揭示不同刀片对荸荠的剪切过程受力规律, 为荸荠加工装置设计提供参考。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

单因素试验结果如图 6 所示, 各因素对最大剪切力影响程度不同, 其中颗粒接触半径 x_1 (图 6a)、临界法向应力 x_4 (图 6d)、临界切向应力 x_5 (图 6e) 取不同水平时仿真结果变化较小, 表明其对剪切力影响较小, 且 3 组试验结果都介于 60~70 N, 接近实测最大剪切力, 表明各因素的固定水平接近正确参数, 参数范围选取合理; 随着单位面积法向刚度 x_2 增加, 剪切力逐渐增大 (图 6b), 当 x_2 介于 $1.0 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8$ N/m³ 时, 仿真结果与实测值最接近; 随着单位面积切向刚度 x_3 增加, 剪切力逐渐增大 (图 6c), 当 x_3 介于 $1.0 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8$ N/m³ 时, 仿真结果与实测值最为接近; 随着粘结半径 x_6 增加, 剪切力逐渐增大 (图 6f), 当 x_6 介于 1.6~1.8 mm 时, 仿真结果与实测值最接近。

2.2 二水平析因试验结果与分析

二水平析因试验方案和结果如表 4 所示, 试验结果方差分析如表 5 所示, 各因素对最大剪切力的影响效应均为非负, 模型决定系数 $R^2=0.926 4$, 试验结果可靠; x_2 和 x_3 的 $P<0.01$, 对剪切力影响极显著; 因素 x_6 的 $P<0.05$, 对剪切力影响显著; x_1 、 x_4 、 x_5 的 $P>0.05$, 对剪切力的影响不显著。

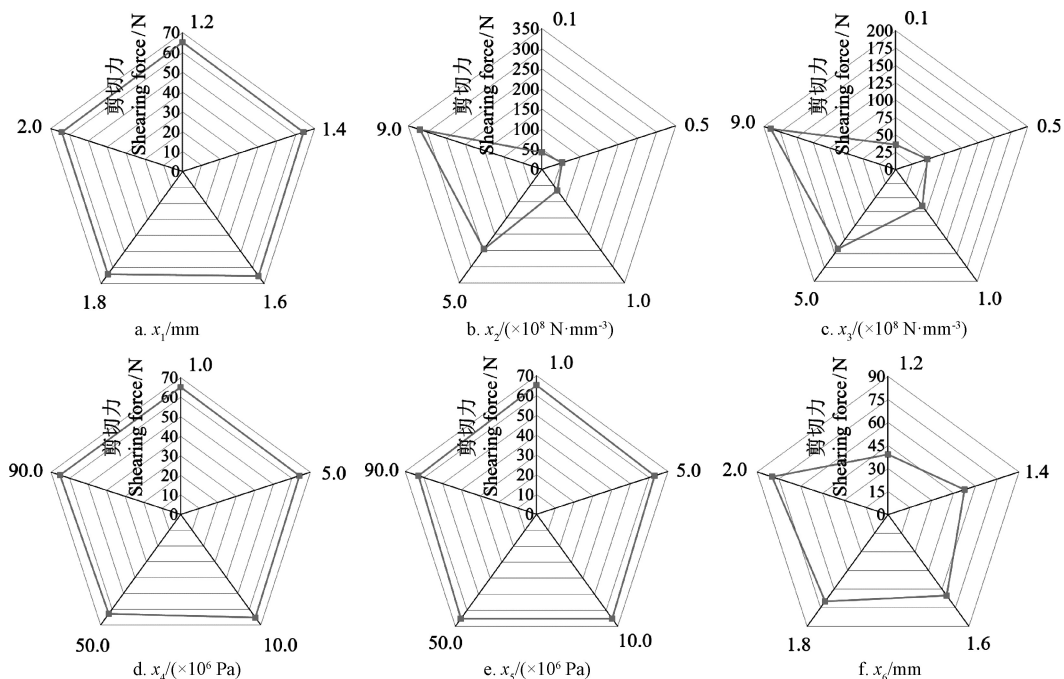


图 6 单因素试验结果

Fig.6 Results of single factor test

表 4 二水平析因试验方案与结果
Table 4 Schemes and results of two-level factorial test

序号 No.	x_1/mm	$x_2/(\times 10^8 \text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$x_3/(\times 10^8 \text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$x_4/(\times 10^6 \text{Pa})$	$x_5/(\times 10^6 \text{Pa})$	x_6/mm	剪切力 Shearing force/N
1	1.6	1.0	5.0	10.0	50.0	1.8	142.6
2	1.6	1.0	1.0	50.0	10.0	1.8	66.1
3	1.8	1.0	5.0	50.0	10.0	1.6	141.5
4	1.8	1.0	1.0	50.0	50.0	1.8	66.1
5	1.6	1.0	5.0	50.0	50.0	1.6	141.5
6	1.6	5.0	5.0	50.0	10.0	1.8	398.4
7	1.8	1.0	5.0	10.0 ⁶	10.0	1.8	142.6
8	1.6	5.0	1.0	10.0	50.0	1.8	274.3
9	1.6	5.0	1.0	50.0	50.0	1.6	241.5
10	1.8	5.0	1.0	10.0	10.0	1.8	274.3
11	1.8	1.0	1.0	10.0	50.0	1.6	64.1
12	1.6	5.0	5.0	10.0	10.0	1.6	236.8
13	1.8	5.0	5.0	10.0	50.0	1.6	236.8
14	1.6	1.0	1.0	10.0	10.0	1.6	64.1
15	1.8	5.0	5.0	50.0	50.0	1.8	398.4
16	1.8	5.0	1.0	50.0	10.0	1.6	241.5

表 5 二水平析因试验方差分析
Table 5 Analysis of variance of two-level factorial test

来源 Source	效应 Stdized effect	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model		6	27 989.62	18.88	0.000 1
x_1	0.00	1	0.00	0.00	1.000 0
x_2	183.90	1	135 300.00	91.25	<0.000 1
x_3	68.05	1	18 523.21	12.49	0.006 4
x_4	32.70	1	4 277.16	2.89	0.123 6
x_5	0.00	1	0.00	0.00	1.000 0
x_6	49.65	1	9 860.49	6.65	0.029 7
残差 Residual		9	1 482.50		

注：P<0.01（极显著），0.01≤P<0.05（显著），下同。
Note: P<0.01(extremely significant), 0.01≤P<0.05 (significant), the same below.

2.3 最陡爬坡试验

根据二水平析因试验结果，选取对最大剪切力影响显著的参数 x_2 、 x_3 、 x_6 进行最陡爬坡试验，非显著因素 x_1 、 x_4 、 x_5 均设置为单因素试验中的固定水平，方案和结果如表 6 所示。随着各因素水平增加，刀片对荸荠的剪切力逐渐增大，其中试验 1 和 2 仿真剪切力最大值分别为 31.9 和 74.8 N，试验 2 结果和实测最大剪切力较为接近，不利于开展响应曲面设计，因此适当扩大因素范围将试验 1 和 3 中的因素水平作为后续 Box-Behnken 试验的低水平和高水平。

表 6 最陡爬坡试验方案与结果
Table 6 Schemes and results of steepest climb test

试验序号 Test No.	$x_2/(\times 10^8 \text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$x_3/(\times 10^8 \text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	x_6/mm	剪切力 Shearing force/N
1	0.5	0.5	1.50	31.9
2	1.3	1.3	1.58	74.8
3	2.1	2.1	1.66	108.5
4	2.9	2.9	1.74	160.8
5	3.7	3.7	1.82	204.8
6	4.5	4.5	1.90	432.7

2.4 响应曲面试验结果与分析

为得到荸荠离散元模型仿真参数的最优组合，根据二水平析因试验和最陡爬坡试验结果对显著性因素进行 Box-Behnken 试验，试验结果如表 7 所示，对试验结果进行回归拟合，得到以刀片对荸荠的最大剪切力为响应值、以 x_2 、 x_3 、 x_6 为变量的回归方程为

$$Y = 1055.89 + 4.26 \times 10^{-7} x_2 + 7.81 \times 10^{-7} x_3 - 1417.07 x_6 - 3.52 \times 10^{-17} x_2 x_3 - 1.64 \times 10^{-7} x_2 x_6 - 2.54 \times 10^{-7} x_3 x_6 + 3.59 \times 10^{-16} x_2^2 - 5.59 \times 10^{-16} x_3^2 + 476.56 x_6^2 \quad (7)$$

表 7 响应曲面试验方案与结果
Table 7 Schemes and results of response surface test

序号 No.	$x_2/(\times 10^8 \text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$x_3/(\times 10^8 \text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	x_6/mm	剪切力 Shearing force/N	相对误差 Relative error e/%
1	1.3	0.5	1.66	60.0	10.71
2	0.5	2.1	1.58	71.4	6.25
3	0.5	1.3	1.50	54.9	18.30
4	2.1	1.3	1.66	101.3	50.74
5	0.5	0.5	1.58	35.9	46.58
6	2.1	2.1	1.58	108.7	61.76
7	1.3	2.1	1.50	89.8	33.63
8	2.1	1.3	1.50	101.2	50.60
9	1.3	0.5	1.50	47.9	28.72
10	1.3	2.1	1.66	95.4	41.96
11	0.5	1.3	1.66	59.2	11.90
12	1.3	1.3	1.58	73.8	9.82
13	1.3	1.3	1.58	73.8	9.82
14	1.3	1.3	1.58	73.8	9.82
15	2.1	0.5	1.58	74.1	10.27

在 Design-Expert 软件中对 Box-Behnken 响应曲面试验结果进行方差分析，结果如表 8，模型决定系数 R^2 为 0.992 2，拟合性较好；模型显著且失拟项不显著，不存在其他主要因素影响该试验的响应值； x_2 和 x_3 均对剪切力有极显著影响（ $P<0.01$ ）， x_6 影响较大（ $P=0.055\ 4$ ，接近临界值 0.05）， x_2 、 x_3 和 x_6 的交互作用以及 x_2 、 x_3 和 x_6 的平方项影响均不显著（ $P>0.05$ ）。根据回归方程分别得到各因素交互作用对最大剪切力和相对误差 e 影响的响应面图，如图 7 所示。

表 8 响应曲面方差分析
Table 8 Analysis of response surface variance

来源 Source	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	9	695.40	70.40	<0.000 1
x_2	1	3 357.90	339.92	<0.000 1
x_3	1	2 715.84	274.92	<0.000 1
x_6	1	61.05	6.18	0.055 4
$x_2 x_3$	1	0.20	0.02	0.891 7
$x_2 x_6$	1	4.41	0.45	0.533 6
$x_3 x_6$	1	10.56	1.07	0.348 5
x_2^2	1	19.53	1.98	0.218 7
x_3^2	1	47.19	4.78	0.080 5
x_6^2	1	34.35	3.48	0.121 2
残差 Residual	5	9.88		
失拟项 Lack of fit	3	16.46		
纯误差 Pure error	2	0.00		

粘结半径固定时, 单位面积法向刚度和单位面积切向刚度的响应曲面如图 7a 和 7d 所示, 当单位面积法向刚度不变时, 剪切力随着单位面积切向刚度增大逐渐增加, 相对误差先减小后增加; 当单位面积切向刚度不变时, 剪切力随着单位面积法向刚度增大逐渐增加, 相对误差呈现先减小后增加的趋势, 且变化趋势明显。

单位面积切向刚度固定时, 单位面积法向刚度和粘结半径的响应曲面如图 7b 和 7e 所示, 当单位面积法向刚度不

变时, 剪切力随粘结半径增大逐渐增加, 相对误差先减小后增加; 当粘结半径不变时, 剪切力随着单位面积法向刚度增大逐渐增加, 相对误差先减小后增加。

单位面积法向刚度固定时, 单位面积切向刚度和粘结半径的响应曲面如图 7c 和 7f 所示, 当单位面积切向刚度不变时, 剪切力随粘结半径增大逐渐增加, 相对误差先减小后增加; 当粘结半径不变时, 剪切力随单位面积切向刚度增大逐渐增加, 相对误差先减小后增加。

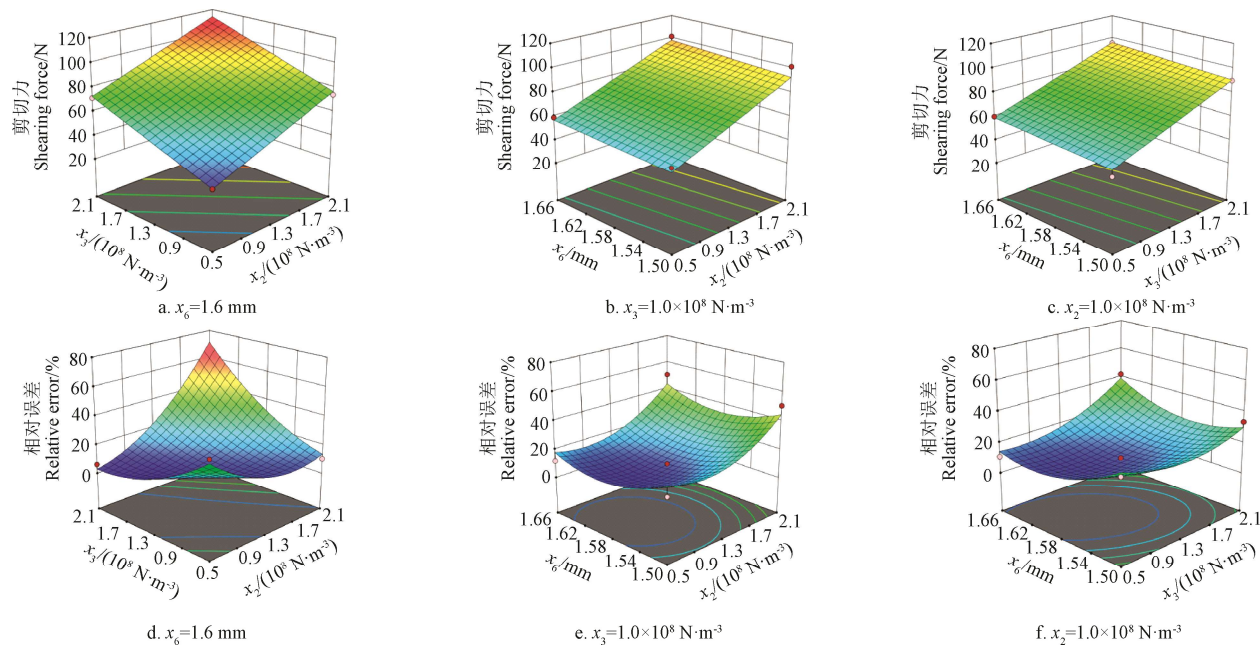


图 7 交互因素对剪切力和相对误差的响应面图

Fig.7 Response surface diagram of interaction factors to shearing force and relative error

3 验证试验

3.1 最优参数与模型验证

以刀片对荸荠的实际最大剪切力为依据, 对仿真参数进行优化, 借助 Design-Expert 软件对拟合出的方程进行数值求解, 设置优化目标为 67.2 N, 得到显著性参数的最佳组合: 单位面积法向刚度 x_2 为 $1.185 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、单位面积切向刚度 x_3 为 $9.091 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结半径 x_6 为 1.655 mm, 其余各因素均取单因素试验中的固定值, 使用最佳参数进行仿真验证测试, 得到仿真剪切力最大值为 67.8 N, 与实测最大剪切力相对误差为 0.89%, 仿真试验与实测结果基本一致, 表明荸荠建模与标定的参数准确可靠, 可通过离散元仿真模拟荸荠剪切过程。

3.2 不同刀片剪切试验

为进一步分析荸荠粘结模型在不同工况下的可靠性, 设计不同刃口曲线的刀片, 如图 8 所示, 分别进行剪切仿真试验与实际试验, 结果如表 9 所示, 相对误差均低于 10%, 该试验表明本研究荸荠建模和参数标定可靠, 在使用不同刃口曲线的刀片剪切荸荠时, 仍能较好的预测其对荸荠的最大剪切力, 可用于指导荸荠加工装置设计。

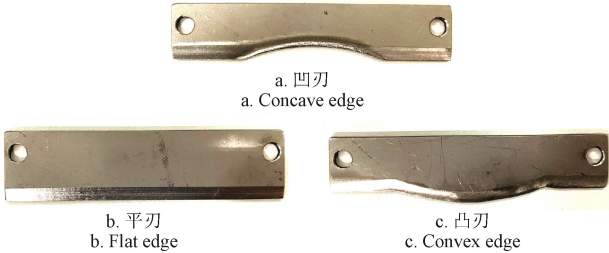


图 8 不同刃口曲线刀片

Fig.8 Curved blade with different edge

表 9 不同刀片对荸荠的最大剪切力对比

Table 9 Comparison of maximum shearing force of different blades on water chestnut

刃口 Blade edge	仿真值 Simulation value/N	实测值 Actual value/N	相对误差 Relative error/%
凸刃 Convex edge	56.1	59.5	5.71
平刃 Flat edge	67.8	67.2	0.89
凹刃 Concave edge	88.4	82.3	7.41

通过 EDEM 后处理功能分析不同刀片对荸荠的剪切力变化规律, 剪切力变化曲线如图 9 所示。

与平刃刀相比, 凹刃刀增加了 30.38%对荸荠的最大剪切力, 且二者剪切过程受力曲线均在临界点之后迅速下降, 应力较为集中, 剪切过程不稳定, 对荸荠剪切效

果和刀片寿命均有较大影响;在使用凸刃刀剪切荸荠时,受力过程曲线更加平缓,无明显的突降环节,与平刃刀相比,凸刃刀片可降低 20.86%对荸荠的最大剪切力,因此在对荸荠进行切块、去皮等操作时,应优先选用凸刃刀片。

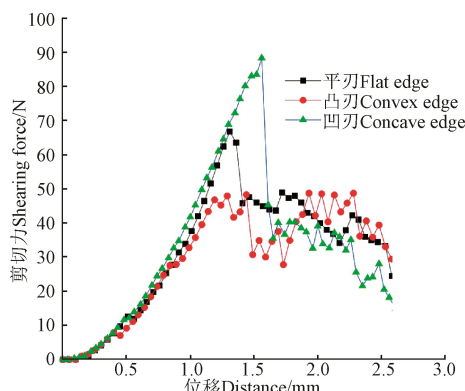


图 9 不同刀片对荸荠的剪切力

Fig.9 Shearing force of different blades on water chestnut

4 结 论

本文基于 Hertz-Mindlin with bonding 模型,结合物理试验与虚拟标定试验,对荸荠离散元仿真参数进行标定,得到了荸荠粘结模型的最佳参数组合并进行验证,主要结论如下:

1) 经测量荸荠平均横径 45.76 mm、高度 25.33 mm、密度 1.06 g/cm^3 、泊松比 0.395、弹性模量 5.433 MPa;通过物理试验测得刀片对荸荠的最大剪切力为 67.2 N,荸荠之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、动摩擦系数分别为 0.512、0.656、0.489;荸荠和不锈钢之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、动摩擦系数分别为 0.598、0.721、0.628。

2) 结合团队前期研究基础,初步选取荸荠仿真参数范围,通过单因素试验分析各因素对剪切力的影响趋势并缩小参数范围;采用二水平析因试验筛选得到显著性因素为单位面积法向刚度、单位面积切向刚度和粘结半径。

3) 通过最陡爬坡试验进一步缩小显著性参数范围,建立显著性因素与最大剪切力之间的二次回归模型,最佳参数组合为:单位面积法向刚度 $1.185 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、单位面积切向刚度 $9.091 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、粘结半径 1.655 mm,使用最佳参数进行仿真验证,得到仿真值与实测最大剪切力相对误差为 0.89%,验证了荸荠建模与标定参数的可靠性。

4) 建立不同刃口曲线的刀片,分别进行仿真与实测试验,结果表明,所建立的模型在使用不同刃口曲线的刀片剪切荸荠时,仿真值和实测最大剪切力间的相对误差不高于 7.41%,仿真结果可靠,且凸刃刀的剪切过程更加稳定,与平刃刀相比可降低 20.86%对荸荠的最大剪切力。所建立的仿真模型可为荸荠机械去皮、切块等装置的设计以及仿真研究提供参考。

【参 考 文 献】

[1] 王川,刘辉,王丽伟,等. 荸荠收获机的总体设计[J]. 中

国农机化学报, 2017, 38(1): 22-26.

Wang Chuan, Liu Hui, Wang Liwei, et al. Overall design of water chestnut harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 22-26. (in Chinese with English abstract)

[2] 李旭,王锐,廖剑,等. 水生蔬菜产业生产机械化技术概况[J]. 长江蔬菜, 2018(14): 50-54.

Li Xu, Wang Rui, Liao Jian, et al. Technology overview on production mechanization of aquatic vegetable industry[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2018(14): 50-54. (in Chinese with English abstract)

[3] 汪建红. 荸荠皮色素提取新方法及其稳定性、抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 104-110.

Wang Jianhong. Novel method of pigment extraction from eleocharis tuberosa peel and analysis of its stability and antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2021, 42(13): 104-110. (in Chinese with English abstract)

[4] 黄宁,李素云,黎进. 黏性土壤荸荠机械化采收模式探索[J]. 农业工程, 2017, 7(1): 23-25.

Huang Ning, Li Suyun, Li Jin. Exploration of mechanized harvesting model for water chestnut in cohesive soil[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(1): 23-25. (in Chinese with English abstract)

[5] 胡铭文,王宏勋,易阳,等. 不同切割方式对鲜切荸荠贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 26-33.

Hu Mingwen, Wang Hongxun, Yi Yang, et al. Effect of cutting styles on the storage quality of fresh-cut water chestnut[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(1): 26-33. (in Chinese with English abstract)

[6] 孟秀梅,赵文超,张兰,等. 荸荠预处理条件优化[J]. 食品工业, 2022, 43(1): 126-129.

Meng Xiumei, Zhao Wenchao, Zhang Lan, et al. Optimization of pretreatment conditions of water chestnut[J]. The Food Industry, 2022, 43(1): 126-129. (in Chinese with English abstract)

[7] 刘小林,孟祥志. 荸荠的资源开发利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(3): 212-217.

Liu Xiaolin, Meng Xiangzhi. Progress research on resource development and utilization of water chestnut[J]. Food Research and Development, 2021, 42(3): 212-217. (in Chinese with English abstract)

[8] 梁方,马丽筠,郭洲,等. 荸荠去皮机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 163-168.

Liang Fang, Ma Lijun, Guo Zhou, et al. Design and experiment of water chestnut peeler[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 163-168. (in Chinese with English abstract)

[9] 方梅,郁志宏,张文杰,等. 盘刀式铡草机粉碎物料运动

- 过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 76-84.
- Fang Mei, Yu Zhihong, Zhang Wenjie, et al. Analysis and experiments of the movement process for the shredded material of disc knife chaff cutter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 76-84. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王加一, 赵淑红, 高连龙, 等. 玉米垄作随动自调刃口角被动圆盘式破茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 59-67.
- Wang Jiayi, Zhao Shuhong, Gao Lianlong, et al. Design and experiment of passive disc cutting blade in corn ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [11] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
- Zeng Zhiwei, Ma Xu, Cao Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1-20. (in Chinese with English abstract)
- [12] 高建民, 刘兴达, 齐惠冬, 等. 斜置潜土逆旋转耕抛土仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 54-63.
- Gao Jianmin, Liu Xingda, Qi Huidong, et al. Simulation and experiment of soil casting during oblique submerged reversely rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(13): 54-63. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王宝龙, 王在满, 罗锡文, 等. 杂交稻气力滚筒集排式排种器楔形搅种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 1-8.
- Wang Baolong, Wang Zaiman, Luo Xiwen, et al. Design and experiment of wedge churning device for pneumatic cylinder-type seed metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王凤花, 熊海辉, 赖庆辉, 等. 马铃薯收获机挖掘装置智能设计系统与评价方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 86-97.
- Wang Fenghua, Xiong Haihui, Lai Qinghui, et al. Intelligent design system and evaluation method of potato harvester excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 86-97. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵淑红, 高连龙, 袁溢文, 等. 基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 53-62.
- Zhao Shuhong, Gao Lianlong, Yuan Yiwen, et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(20): 53-62. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郝建军, 龙思放, 李浩, 等. 机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 34-42.
- Hao Jianjun, Long Sifang, Li Hao, et al. Development of discrete element model and calibration of simulation parameters for mechanically-harvested yam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(20): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [17] 谢东波, 张春岭, 吴晓庆, 等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 47-57.
- Xie Dongbo, Zhang Chunling, Wu Xiaoqing, et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 47-57. (in Chinese with English abstract)
- [18] 苑进, 李金光, 邹明亮, 等. 基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 85-98.
- Yuan Jin, Li Jinguang, Zou Liangliang, et al. Optimal design of spinach root-cutting shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 85-98. (in Chinese with English abstract)
- [19] 焦俊, 张国忠, 杜俊, 等. 莲藕主藕体弯曲破坏离散元仿真分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 217-225.
- Jiao Jun, Zhang Guozhong, Du Jun, et al. Discrete element simulation of bending failure of main lotus root[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 217-225. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈子林. 荸荠采收机设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- Chen Zilin. Design and Experimental Study on Water Chestnut Harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [21] 白晶雨. 荸荠农艺性状的鉴定评价与遗传多样性分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- Bai Jingyu. Identification and Genetic Diversity Analysis of Agronomic Traits in Chinese Water Chestnut[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 36-44.

- Hao Jianjun, Wei Wenbo, Huang Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 36-44. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘羊, 宗望远, 马丽娜, 等. 采用高速摄影技术测定油菜籽粒三维碰撞恢复系数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 44-53.
- Liu Yang, Zong Wangyuan, Ma Lina, et al. Determination of three-dimensional collision restitution coefficient of oil sunflower grain by high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 44-53. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王立军, 刘天华, 冯鑫, 等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 313-322.
- Wang Lijun, Liu Tianhua, Feng Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(20): 313-322. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125-135.
- Liu Wenzheng, He Jin, Li Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125-135. (in Chinese with English abstract)
- [26] 郑侃, 李宇飞, 夏俊芳, 等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向匀土刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 63-73.
- Zheng Kan, Li Yufei, Xia Junfang, et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 63-73. (in Chinese with English abstract)
- [27] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [28] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 基于 Plackett-Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 221-231.
- Zhu Huibin, Qian Cheng, Bai Lizhen, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett-Burman design and response surface methodology[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12): 221-231. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李金光, 刘雪美, 邹亮亮, 等. 菠菜主根离散元建模方法与试验验证[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 181-185, 191.
- Li Jinguang, Liu Xuemei, Zou Liangliang, et al. Discrete element modeling method and experimental verification of spinach main-root[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 181-185, 191. (in Chinese with English abstract)
- [30] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73-82.
- Liao Yitao, Liao Qingxi, Zhou Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [31] 周龙. 基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Zhou Long. DEM-based Modelling of Maize Seeds and the Simulation Analysis and Experimental Study of the Seed-Sowing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [32] 盛越. 基于离散元法的秸秆饲料收获机改进设计与试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Sheng Yue. Improved Design and Experimental Research of Straw Forage Harvester Based on Discrete Element Method[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [33] 赵淑红, 刘汉朋, 杨超, 等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 75-87.
- Zhao Shuhong, Liu Hanpeng, Yang Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75-87. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 227-235.
- Zhang Rongfang, Jiao Wei, Zhou Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 227-235. (in Chinese with English abstract)
- [35] 马帅, 徐丽明, 袁全春, 等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 40-49.

Ma Shuai, Xu Liming, Yuan Quanchun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning

components[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(1): 40-49. (in Chinese with English abstract)

Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut

Zhang Guozhong, Chen Liming, Liu Haopeng, Dong Zhao, Zhang Qinghong, Zhou Yong

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Water chestnut has been one of the most important aquatic vegetables in Asian countries. Annual production of more than 800 000 tons can be found in the south of the Yangtze River Valley. The edible flesh of the water chestnut is the crisp and tasty bulbous underground with a smooth reddish-brown surface. However, the current deep-processing of the water chestnut completely depends on manual work. The water chestnut industry has been severely limited to labor-intensive, high-cost, and small-scale production at present. It is very necessary to develop the agricultural machinery for the large-scale production of water chestnuts. Fortunately, discrete element simulation (DEM) can be widely used for the optimal design of mechanized progress. In this study, a DEM model was established to determine the key parameters in the peeling and slicing process of water chestnut using the calibration of EDEM software. A series of virtual calibration experiments were conducted to obtain the accurate shape of fresh water chestnut using 3D scanning reverse modeling. The physical tests were carried out for the geometric size of the water chestnut, the parameters of mechanical properties (density, Poisson's ratio, modulus of elasticity), and the basic contact parameters (coefficient of collision recovery, coefficient of static friction, and coefficient of dynamic friction) between a water chestnut and stainless steel. The shear test showed that the average of the maximum force of the blade on water chestnut measured by texture analyzer was 67.2 N, taking as the reference of the virtual calibration experiment. A Hertz-mindlin with the bonding model was established for the water chestnut in EDEM software. A virtual calibration experiment was designed with the shear stress of water chestnut as the evaluation index. A single factor test was used to determine the influence range of each factor, including the particle contact radius, normal stiffness per unit area, shear stiffness per unit area, critical normal stress, critical shear stress, and bonded disk radius. Among them, the normal stiffness per unit area, shear stiffness per unit area, and bonded disk radius were selected as the significant factors after the two-level test. The steepest climb test combined with the response surface (Box-Behnken Design) test was utilized to further reduce the range of the significant parameters. The optimized results demonstrated that the total model decision coefficient R^2 of quadratic regression was 0.992 2, indicating a better fitting performance. An optimum combination of parameters was obtained with the objective of the minimum shear force: the normal stiffness per unit area was $1.185 \times 10^8 \text{ N/m}^3$, the shear stiffness per unit area was $9.091 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, and the bonded disk radius was 1.655 mm (the rest of the other non-significant factors was the median), the particle contact radius was 1.6 mm, the critical normal stress was $10.0 \times 10^6 \text{ Pa}$, and the critical shear stress was $10.0 \times 10^6 \text{ Pa}$. The optimized parameters were simulated to verify by the field measurement, where the relative error between the simulated value and the measured maximum shearing force was 0.89%, indicating the correct model and reliable calibration parameters. Different blade curves were also used in the EDEM software and texturing instrument, in order to verify the generality of water chestnut modeling. The relative error between simulation and measured values was not more than 7.41%. The more stable stress curve of the convex blade without the sudden change of force can be expected to prolong the serving life of the blade. The convex edge can greatly contribute to reducing the maximum force in the process of water chestnut cutting. The finding can provide a strong reference for the design of various devices during water chestnut production.

Keywords: discrete element; shear; water chestnut; parameter calibration; bonding model