

张国忠, 张清洪, 焦俊, 等. 鲜莲籽离散元仿真参数标定 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(1): 170-178.
ZHANG Guozhong, ZHANG Qinghong, JIAO Jun, et al. Parameters calibration of discrete element simulation for fresh lotus seeds[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(1): 170-178.

鲜莲籽离散元仿真参数标定

张国忠^{1,2}, 张清洪^{1,2}, 焦俊^{1,2}, 陈亚欣^{1,2}, 梁升¹, 刘浩蓬^{1,2}

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

摘要:【目的】确定鲜莲籽机械化加工过程中离散元仿真模型参数, 为鲜莲籽机械化加工仿真试验提供数据参考。【方法】本研究利用 EDEM 仿真软件开展鲜莲籽离散元仿真参数标定。以产自湖北洪湖的‘太空莲 36 号’为试验对象, 通过落种试验测定鲜莲籽实际落种的堆积角和休止角。基于 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型进行鲜莲籽落种仿真试验, 以鲜莲籽堆积角和休止角的实测值与仿真值之间的误差为试验指标, 通过 Plackett-Burman 试验确定对堆积角和休止角影响显著的接触参数, 通过最陡爬坡试验确定鲜莲籽离散元模型最优接触参数组合。采用料斗进行实际落种验证试验, 以莲籽落种速率为试验指标, 对比实际与仿真落种验证试验莲籽落种速率, 验证最优参数组合可靠性。【结果】莲籽间静摩擦系数、莲籽间滚动摩擦系数对堆积角影响极显著 ($P<0.01$); 莲籽间滚动摩擦系数对休止角影响极显著 ($P<0.01$), 莲籽间静摩擦系数、莲籽-有机玻璃静摩擦系数对休止角影响显著 ($P<0.05$)。最优接触参数组合为莲籽间静摩擦系数 0.4、莲籽间滚动摩擦系数 0.02、莲籽-有机玻璃静摩擦系数 0.4。落料验证试验结果表明, 实际试验与仿真试验的鲜莲籽落种速率最大相对误差不超过 3.65%。【结论】标定的鲜莲籽离散元仿真模型接触参数准确可靠, 研究结果可为莲籽加工机械的结构优化设计提供数据参考。

关键词: 鲜莲籽; EDEM; 堆积角; 休止角; 参数标定
中图分类号: S226 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2023)01-0170-09

Parameters calibration of discrete element simulation for fresh lotus seeds

ZHANG Guozhong^{1,2}, ZHANG Qinghong^{1,2}, JIAO Jun^{1,2}, CHEN Yaxin^{1,2}, LIANG Sheng¹, LIU Haopeng^{1,2}
(1 College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: 【Objective】To determine the parameters of discrete element simulation model in the mechanized processing of fresh lotus seeds, and provide data references for the mechanized processing simulation test of fresh lotus seeds. 【Method】The calibration of discrete element simulation parameters of fresh lotus seeds was carried out by EDEM simulation software. The accumulation angle and repose angle of the actual fresh lotus seeds were measured by seed drop test with ‘Space lotus 36’ from Honghu, Hubei. Based on the Hertz-Mindlin (no slip) contact model, a simulation test of fresh lotus seed drop was conducted, and the error between the measured and simulated values of fresh lotus seed accumulation angle and repose angle was used as the test index to determine the contact parameters with significant effects on accumulation angle and repose angle

收稿日期: 2022-04-08 网络首发时间: 2022-10-19 17:31:47
首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20221019.1336.004.html>
作者简介: 张国忠, 教授, 博士, 主要从事农业机械化与自动化研究, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn; 通信作者: 刘浩蓬, 工程师, 主要从事农业机械化与自动化研究, E-mail: liuhaopeng@mail.hzau.edu.cn
基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系专项 (CARS-24-D-02)

through the Plackett-Burman test. The steepest climb test was conducted to determine the optimal contact parameter combinations in discrete element model for fresh lotus seeds. The actual seed drop verification test was carried out using the hopper with seed drop rate as the test index. The seed drop rates in actual and simulated seed drop verification tests were compared to verify the reliability of the optimal parameter combination. 【Result】 The effects of static friction coefficient between lotus seeds and rolling friction coefficient between lotus seeds on the accumulation angle were highly significant ($P<0.01$); The effects of rolling friction coefficient between lotus seeds on the repose angle were highly significant ($P<0.01$), and the effects of static friction coefficient between lotus seeds and static friction coefficient between lotus seeds and plexiglass on the repose angle were significant ($P<0.05$). The optimal combination of contact parameters was 0.4 for static friction coefficient between lotus seeds, 0.02 for rolling friction coefficient between lotus seeds, and 0.4 for static friction coefficient between lotus seeds and plexiglass. The results of the drop verification test showed that the maximum relative error of fresh lotus seed drop rate between the actual test and the simulation test was not exceeding 3.65%. 【Conclusion】 The contact parameters of the calibrated discrete element simulation model for fresh lotus seeds are accurate and reliable, and the findings can provide data references for the structural design optimization of lotus seed processing machinery.

Key words: Fresh lotus seed; EDEM; Accumulation angle; Repose angle; Parameter calibration

莲籽, 别名莲实、水芝丹^[1-2], 含有丰富的营养成分, 食用价值高, 有益于人体健康。鲜莲籽是指莲花盛开 13~16 d 的乳熟期莲籽, 此时莲籽充满汁水, 清甜, 几乎不含淀粉, 最宜鲜食, 广受人们的喜爱^[3-4]。乳熟期莲籽壳薄、鲜脆, 物理特性表现为抗压强度差、抗剪强度低, 这些特性造成鲜莲籽在剥壳、通芯等加工过程中易出现挤压破碎、高损失率等问题^[5]。

针对上述问题, 国内外学者对莲籽的物料特性进行了相关研究。马秋成等^[6]研究了莲仁在挤压载荷作用下的破碎机理, 从不同轴向测定了莲仁的弹性模量。侯群喜等^[5]测定了不同成熟度莲籽的外形尺寸和含水率, 并开展了莲籽单轴压缩试验, 结果表明压缩载荷与莲籽成熟度成正相关。谢丽娟^[7]对莲壳进行力学分析, 确定了莲籽脱壳的最佳施力方式; 谢丽娟等^[8]在莲籽短轴方向施加 3 种不同载荷, 分析计算莲籽应力、应变情况, 建立了莲籽压缩的有限元模型。徐谐庆等^[9]将传送带与刀具结合, 采用环切的方式设计了莲籽脱壳机械。梁诗华等^[10]总结了莲籽的物理机械特性及脱壳技术, 为莲籽脱壳机械的设计提供了依据。上述研究多集中于莲籽力学特性, 而关于莲籽摩擦接触参数的研究鲜有报道。近些年离散元法仿真软件 EDEM 在农业物料参数标定领域得到了广泛的研究与应用。廖宜涛等^[11]应用 HerIz-Mindlin(no slip) 基本模型和 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型进行饲料油菜茎秆颗粒堆积仿真试验与弯曲破坏仿真试验, 标定了饲料油菜茎秆的基本接触参数, 建立了饲料油菜

茎秆破碎离散元仿真模型。马文鹏等^[12]以苜蓿种子休止角和堆积角的实测值与仿真值误差为指标, 开展苜蓿种子落种堆积试验, 采用非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 进行多目标寻优计算, 获取最优苜蓿种子离散元模型接触参数组合。Ucgul 等^[13]在考虑土壤塑性变形的条件下, 采用 hysteretic spring 接触模型, 将仿真试验结果与实际试验结果对比, 改善了测量拉力与垂直力之间的相关性。彭才望等^[14]以黑水虻处理的猪粪有机肥颗粒为研究对象, 选取 Hertz-Mindlin with JKR 模型, 采用圆筒提升堆积物理试验标定了黑水虻处理的含水率为 43.6% 的猪粪有机肥仿真参数。上述研究为相关领域开展后续技术仿真研究提供了重要的物料特性参数以及仿真模型。由于莲籽获取受时间限制且成本较高, 开展鲜莲籽机械化加工技术仿真研究具有重要理论与实际应用意义, 为此, 本文对鲜莲籽摩擦接触参数进行了相关研究, 采用 EDEM 软件和 Hertz-Mindlin(no slip) 基本模型, 结合鲜莲籽落种测试物理试验, 通过因素显著性筛选和最陡爬坡试验, 确定碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数等离散元仿真模型基本接触参数, 以期为建立莲籽离散元仿真模型提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用产自湖北洪湖的‘太空莲 36 号’, 该品种属于浅水类莲籽品种, 生长势较强, 花果期、

采摘期长, 结实率较高, 平均每莲蓬结 17~18 颗莲籽, 干产可达 $90\sim100\text{ kg/hm}^2$ ^[15]。随机选择 20 个莲花盛开 15 d 后的莲蓬, 取出莲籽, 测量并记录外形尺寸。试验用鲜莲籽尺寸分布符合统计学规律, 经统计分析获得莲籽短轴长度分布在 14.2~22.6 mm, 平均值为 18.4 mm, 长轴长度分布在 18.9~28.1 mm, 平均值为 23.6 mm。采用干燥法测得莲仁含水率 (w) 为 82.33%~86.47%, 莲壳含水率 (w) 为 72.11%~75.42%。

1.2 压缩与堆积试验

1.2.1 本征参数测定 如图 1 所示, 在 TMS-Pro 质构仪 (FTC 公司, 美国) 上, 圆盘压头尺寸 (φ) 为 75 mm×5 mm, 设置压缩速度为 50 mm/min, 位移触发起点压缩力 (F) 为 0.1 N, 加载位移为 8 mm, 试验重复 10 次。通过平板压缩试验前、后莲籽在短轴方向上的高度和直径变化, 计算得到鲜莲籽弹性模量和泊松比分别为 1.34 MPa 和 0.3。

1.2.2 休止角测定 鲜莲籽摩擦堆积角、休止角通过实际落种试验测定^[12]。落种试验装置如图 2a 所示, 台架长 (a_1) 为 590 mm, 宽 (b_1) 为 280 mm, 高 (h_1) 为 1 400 mm。种箱材料为有机玻璃, 长 (a_2) 为 500 mm, 宽 (b_2) 为 200 mm, 高 (h_2) 为 610 mm。落种盘直径 (a_3) 为 300 mm, 高 (h_3) 为 70 mm。挡板位于种箱底部中心位置, 长 (a_4) 为 100 mm, 宽 (b_2) 为 200 mm, 挡板一侧固定于种箱底部, 另一侧安装有旋转开关与种箱底部连接。试验时, 先关闭

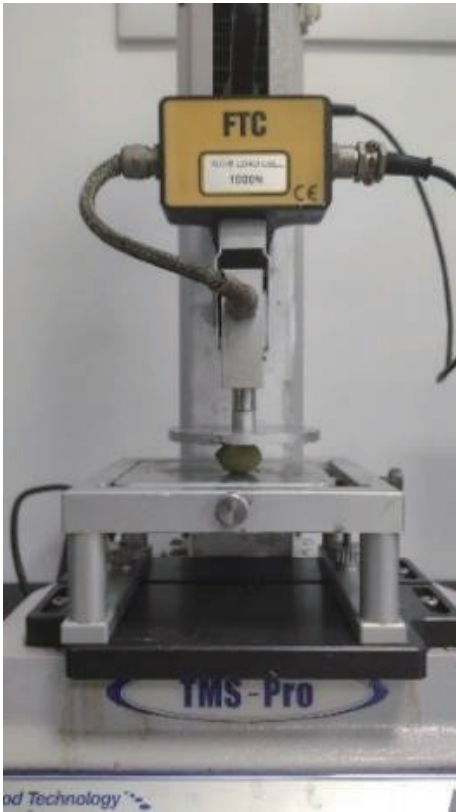
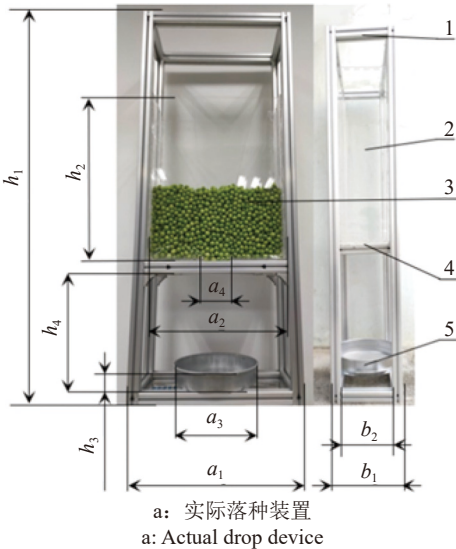


图 1 鲜莲籽短轴压缩试验装备

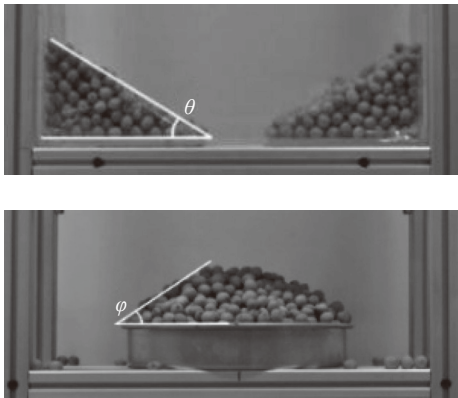
Fig. 1 Equipment for short axis compression of fresh lotus seeds

种箱底部挡板开关, 调整落种盘位于挡板正下方, 落种盘底面到挡板的距离 (h_4) 为 300 mm。向种箱内均匀加入 18 kg 新鲜莲籽, 使莲籽上表面水平, 打



a: 实际落种装置
a: Actual drop device

1: 台架, 2: 种箱, 3: 鲜莲籽, 4: 挡板, 5: 落种盘, a_1 : 台架长度, a_2 : 种箱长度, a_3 : 落种盘直径, a_4 : 挡板长度, b_1 : 台架宽度, b_2 : 种箱宽度、挡板宽度, h_1 : 台架高度, h_2 : 种箱高度, h_3 : 落种盘高度, h_4 : 挡板到落种盘底面的距离, θ : 休止角, φ : 堆积角



b: 试验结果
b: Test result

1: Bench, 2: Seed box, 3: Fresh lotus seeds, 4: Baffle, 5: Seed drop tray, a_1 : Length of benchtop, a_2 : Length of seed box, a_3 : Diameter of seed drop tray, a_4 : Length of bench, b_1 : Width of bench, b_2 : Width of seed box and baffle, h_1 : Height of bench, h_2 : Height of seed box, h_3 : Height of seed drop tray, h_4 : Distance from baffle to bottom of seed drop tray, θ : Repose angle, φ : Accumulation angle

图 2 实际落种试验
Fig. 2 Actual drop test

开挡板开关, 莲籽在重力作用下落入盘中, 种箱内剩余莲籽受种箱两侧及底面的支持力对称形成梯形种堆。梯形种堆斜面与种箱底面的夹角记为休止角 (θ), 落种盘底面与种堆斜面的夹角记为堆积角 (φ), 如图 2b 所示。

为减少人为测量误差, 本文采用计算机图像处理方法对鲜莲籽摩擦堆积角、休止角进行统一测量, 使用型号为 MV-EM120M 工业相机垂直于莲籽堆侧面获取图像数据 (图 3a), 并将获取的图像数据导入计算机进行分析计算。基于 Python 语言在 Pychram 软件编译环境下编写图像处理程序, 调用 OpenCV 计算机视觉库中的相关算法进行图像处理。以箱体右侧莲子图像的休止角测量的图像处理过程为例, 首先, 采用基于局部灰度直方图的自适应阈值算法 (Adaptive threshold algorithm) 分割出莲籽堆与背景, 考虑到莲籽图像中不同位置的像素颜色分布的复杂度不同, 针对每个像素点自适应设置局部阈值, 能克服全局阈值的不足, 提高检测精度;

采用自适应阈值算法得到莲籽堆的二值化图像, 处理后的二值化图像如图 3b 所示。其次, 利用中值滤波算法 (medianBlur) 和形态学闭运算 (MORPH_CLOSE) 对此二值化图像进行去噪处理和形态学处理, 保持图像边缘特性的同时消除多余噪点, 也不会使图像产生显著的模糊, 对去噪后的莲籽堆二值化图像选用相比 Sobel 和 Laplacian 算子等鲁棒性更好的 Canny 边缘检测算子进行轮廓提取处理, 获取到种堆边界曲线, 如图 3c 所示。最后, 运用 fitline 拟合函数将提取到的轮廓曲线作为二维点集进行最小二乘法拟合, 得到一条拟合的直线, 如图 3d 所示, 直线斜率即莲籽实际休止角的正切值^[16]。通过同样的方法可以测量出图像中莲籽的堆积角。每次试验分别测量种箱两侧休止角与落种盘前后左右 4 个方向的堆积角, 试验重复 10 次取平均值, 结果如表 1 所示; 计算得到实际试验中莲籽休止角和堆积角平均值分别为 35.95° 和 30.20°。

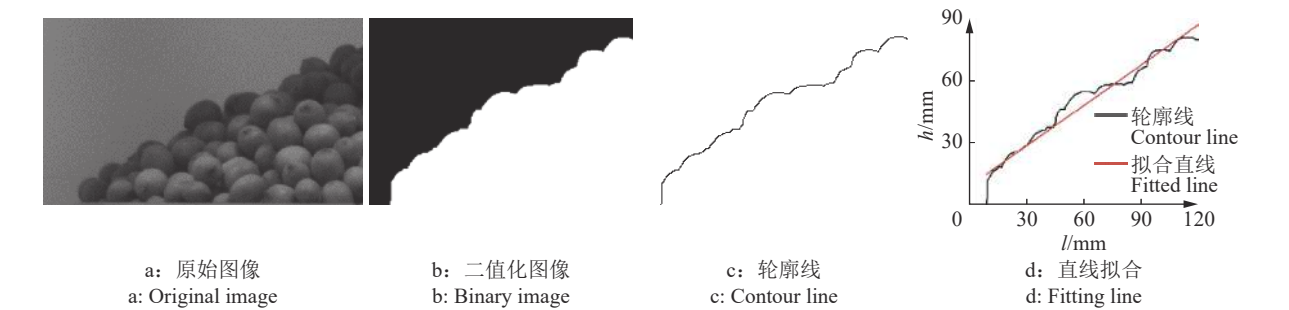


图 3 种堆图像处理
Fig. 3 Processing of seed pile image

表 1 鲜莲籽实际落种试验堆积角和休止角测量结果						
Table 1 Measurement results of accumulation angle and repose angle of fresh lotus seeds in actual seed drop test						
试验编号 Test No.	堆积角 Accumulation angle				休止角 Repose angle	
					1	2
	1	2	3	4	1	2
1	31.47	28.97	29.96	26.50	38.73	35.42
2	29.70	28.22	26.27	29.62	31.78	37.98
3	27.91	31.49	23.97	33.84	32.98	36.84
4	30.26	35.43	29.42	29.36	36.66	33.09
5	28.52	24.97	32.76	33.83	33.25	36.99
6	34.32	27.34	27.56	28.50	38.39	37.86
7	32.89	29.84	29.43	32.89	36.23	34.54
8	32.92	33.37	32.34	29.62	33.29	37.03
9	31.90	32.54	26.32	30.14	41.89	35.59
10	31.85	31.44	27.03	33.19	34.37	36.00
平均值 Average	30.20				35.95	

1.3 仿真模型参数标定试验设计

1.3.1 落种仿真试验 在 EDEM 软件中, 应用 Hertz-Mindlin (no slip) 基本模型进行鲜莲籽落种仿真试验^[12]。根据如图 4a 所示的鲜莲籽实物图, 定义与莲籽莲芯重合的径为莲籽长轴, 通过莲籽莲芯并垂直于莲芯的径为莲籽短轴。如图 4b 所示, 利用球形颗粒组合的方法建立鲜莲籽仿真模型。根据测量统计的鲜莲籽外形尺寸, 建立长 23.6 mm、宽 18.4 mm 鲜莲籽模型, 以该模型为原型, 以原型中 0.8~1.2 倍半径的颗粒生成不同尺寸的鲜莲籽模型, 其中, 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 倍颗粒半径的鲜莲籽模型分别占莲籽总数的 5%、10%、60%、10%、5%。将试验台架三维仿真模型导入 EDEM, 设置莲籽颗粒生成方式为静态生成, 生成时间为 0.5 s, 颗粒初始下落速度为竖直向下 0.1 m/s, 总质量为 18 kg。待莲籽颗粒全部生成并在种箱

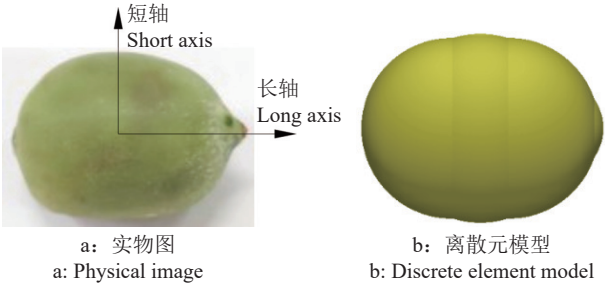


图 4 鲜莲籽离散元模型

Fig. 4 Discrete element model of fresh lotus seed

内处于静止堆积状态时，打开种箱底部挡板，莲籽落入盘中，仿真试验过程与实际试验相同，如图 5 所示。

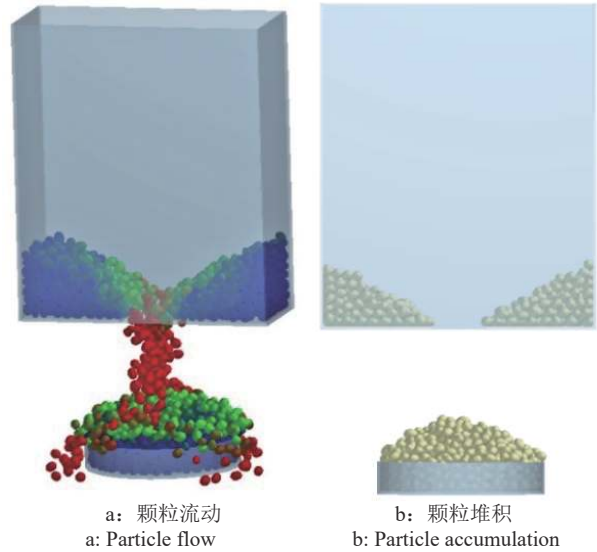


图 5 落种仿真试验

Fig. 5 Simulated seed dropping test

1.3.2 Plackett-Burman 试验 应用 Design-Expert 软件设计 Plackett-Burman 试验，以鲜莲籽落种试验休止角和堆积角为响应值，筛选出对响应值影响显著的仿真参数。结合前期物理试验和文献 [12, 17-20] 确定本研究中各仿真参数的取值范围，其中本征参数取值：莲籽泊松比 0.3，莲籽弹性模量 1.34 MPa，莲籽密度 1050 kg·m⁻³，有机玻璃泊松比 0.393，有机玻璃弹性模量 3.4×10³ MPa，有机玻璃密度 1180 kg·m⁻³；接触参数取值范围：莲籽间碰撞恢复系数 (x_1) 取 0.1~0.5，莲籽间静摩擦系数 (x_2) 取 0.3~0.9，莲籽间滚动摩擦系数 (x_3) 取 0.01~0.10，莲籽-有机玻璃碰撞恢复系数 (x_4) 取 0.1~0.5，莲籽-有机玻璃静摩擦系数 (x_5) 取 0.3~0.9，莲籽-有机玻璃动摩擦系数 (x_6) 取 0.01~0.10。仿真试验优化的 6 个参数 x_1 ~ x_6 分别选择上、下限 2 个数值作为高、低 2 个水平，共设计

16 组试验。

1.3.3 最陡爬坡试验 针对 Plackett-Burman 试验筛选出来的显著参数进行最陡爬坡试验，确定最优解 [21]。首先针对“1.3.2”所有参数范围进行最陡爬坡试验 I，确定最优解邻近区域，再针对该区域进行最陡爬坡试验 II。其中显著性参数设定步长值逐步增加，非显著性参数取 Plackett-Burman 试验中间水平，建立莲籽落种试验模型，展开堆积角与休止角的仿真分析，计算仿真试验与实际落种试验堆积角与休止角的相对误差，确定最优参数组合。

2 结果与分析

2.1 Plackett-Burman 试验

以影响鲜莲籽颗粒落种试验的基本接触参数 (x_1 ~ x_6) 作为试验因素，进行 Plackett-Burman 试验，每组试验采集堆积角前后左右 4 个、休止角左右 2 个，取平均值，试验结果如表 2 所示。

通过方差分析得到各参数的影响效果如表 3 所示。由表 3 可知， x_2 和 x_3 对堆积角影响极显著 ($P<0.01$)； x_3 对休止角影响极显著 ($P<0.01$)， x_2 和 x_5 对休止角影响显著 ($P<0.05$)，其余参数影响较小。因此在最陡爬坡试验中对 x_2 、 x_3 、 x_5 这 3 个影响显著的接触参数进行优化。其余非显著性因素取中间水平，即 x_1 取 0.3， x_4 取 0.3， x_6 取 0.055。

2.2 最陡爬坡试验

由于 x_2 、 x_3 、 x_5 对堆积角和休止角的效应都是正值，即堆积角、休止角随参数的增加而增大，故试验设计参数值递增。首先在整个参数取值范围内进行最陡爬坡试验 I，选取最显著参数 x_3 的步长 $\Delta x_3=0.015$ ，其余显著参数步长按照公式 (1) 计算 [22]。

$$\Delta x_i = \frac{\hat{\beta}_i}{\hat{\beta}_j / \Delta x_j}, i, j = 1, 2, \cdots, k, \text{ 且 } i \neq j, \quad (1)$$

式中， Δx_j 为选取参数步长； Δx_i 为其余参数步长； $\hat{\beta}_j$ 为选取参数取值范围，此处选择 $j=3$ ； $\hat{\beta}_i$ 为其余参数取值范围。

设计 7 组仿真试验进行最陡爬坡试验 I，每组试验重复 1 次，测量 4 个堆积角、2 个休止角，取平均值。观察并计算各试验中堆积角和休止角的相对误差。

结果表明：随着 x_2 、 x_3 和 x_5 的增大，堆积角和

表 2 Plackett-Burman 试验设计与结果¹⁾
Table 2 Design and results of Plackett-Burman test scheme

试验编号 Test No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	堆积角/(°) Accumulation angle	休止角/(°) Repose angle
1	0.5	0.3	0.10	0.5	0.3	0.01	32.24	35.10
2	0.1	0.9	0.01	0.1	0.9	0.10	35.78	36.03
3	0.5	0.9	0.10	0.5	0.9	0.10	44.56	50.07
4	0.5	0.9	0.10	0.1	0.9	0.01	47.02	49.41
5	0.5	0.3	0.01	0.1	0.9	0.01	25.04	27.62
6	0.5	0.3	0.10	0.1	0.3	0.10	34.48	35.01
7	0.5	0.9	0.01	0.5	0.3	0.01	31.39	22.80
8	0.5	0.9	0.01	0.1	0.3	0.10	32.66	29.52
9	0.1	0.9	0.01	0.5	0.9	0.01	28.58	32.92
10	0.5	0.3	0.01	0.5	0.9	0.10	24.02	32.17
11	0.1	0.3	0.01	0.5	0.3	0.10	25.53	27.68
12	0.1	0.3	0.10	0.5	0.9	0.01	39.48	40.63
13	0.1	0.3	0.10	0.1	0.9	0.10	37.71	38.43
14	0.1	0.9	0.10	0.5	0.3	0.10	44.42	40.10
15	0.1	0.9	0.10	0.1	0.3	0.01	46.27	44.42
16	0.1	0.3	0.01	0.1	0.3	0.01	30.09	28.64

1) x_1 : 莲籽间碰撞恢复系数, x_2 : 莲籽间静摩擦系数, x_3 : 莲籽间滚动摩擦系数, x_4 : 莲籽-有机玻璃碰撞恢复系数, x_5 : 莲籽-有机玻璃静摩擦系数, x_6 : 莲籽-有机玻璃动摩擦系数
1) x_1 : Coefficient of collision recovery between lotus seeds, x_2 : Coefficient of static friction between lotus seeds, x_3 : Coefficient of rolling friction between lotus seeds, x_4 : Coefficient of collision recovery between lotus seeds and plexiglass, x_5 : Coefficient of static friction between lotus seeds and plexiglass, x_6 : Coefficient of dynamic friction between lotus seeds and plexiglass

表 3 Plackett-Burman 试验参数显著性分析¹⁾
Table 3 Significance analysis of Plackett-Burman test parameters

	方差来源 Source of variance	自由度 Degree of freedom	均方和 Sum of square	F	P
堆积角 Accumulation angle	模型 Model	6	137.22	21.49	<0.000 1**
	x_1	1	16.91	2.65	0.138 0
	x_2	1	240.95	37.74	0.000 2**
	x_3	1	541.61	84.84	<0.000 1**
	x_4	1	22.16	3.47	0.095 3
	x_5	1	1.63	0.26	0.625 3
	x_6	1	0.06	0.01	0.927 2
	残差 Residual	9	6.38		
休止角 Repose angle	总和 Total	15			
	模型 Model	6	134.13	9.90	0.001 6**
	x_1	1	3.20	0.24	0.638 9
	x_2	1	99.95	7.37	0.023 8*
	x_3	1	573.48	42.31	0.000 1**
	x_4	1	3.62	0.27	0.617 8
	x_5	1	121.06	8.93	0.015 2*
	x_6	1	3.49	0.26	0.624 2
	残差 Residual	9	13.55		
	总和 Total	15			

1) x_1 : 莲籽间碰撞恢复系数, x_2 : 莲籽间静摩擦系数, x_3 : 莲籽间滚动摩擦系数, x_4 : 莲籽-有机玻璃碰撞恢复系数, x_5 : 莲籽-有机玻璃静摩擦系数, x_6 : 莲籽-有机玻璃动摩擦系数; “*” 和 “**” 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著(F 检验)
1) x_1 : Coefficient of collision recovery between lotus seeds, x_2 : Coefficient of static friction between lotus seeds, x_3 : Coefficient of rolling friction between lotus seeds, x_4 : Coefficient of collision recovery between lotus seeds and plexiglass, x_5 : Coefficient of static friction between lotus seeds and plexiglass, x_6 : Coefficient of dynamic friction between lotus seeds and plexiglass; “*” and “**” indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively (F test)

休止角相对误差先减小后增大 (表 4)。选取试验 2 各参数值为中心, 进行最陡爬坡试验 II, 选取参数 x_3 的步长 $\Delta x_3=0.05$, 设计 5 组仿真试验, 为减少试验误差, 每组试验重复 4 次, 测量 16 个堆积角、8 个休止角, 取平均值, 计算与实际试验堆积角、休止角的相对误差, 试验设计与结果如表 5

所示。
由表 5 可知, 在试验 3 中, x_2 取 0.4、 x_3 取 0.02、 x_5 取 0.4。此参数组合仿真试验数据与实际试验数据相对误差最小, 堆积角相对误差为 3.66%, 休止角相对误差为 1.83%, 可认为此参数组合为最优解。

表 4 最陡爬坡试验 I 设计方案及相对误差¹⁾
Table 4 Steepest climb test I design scheme and relative error

试验编号 Test No.	x_2	x_3	x_5	堆积角/% Accumulation angle	休止角/% Repose angle
1	0.3	0.010	0.3	11.51	6.68
2	0.4	0.025	0.4	9.79	6.27
3	0.5	0.040	0.5	13.39	18.62
4	0.6	0.055	0.6	24.29	29.31
5	0.7	0.070	0.7	31.54	38.57
6	0.8	0.085	0.8	38.73	41.71
7	0.9	0.100	0.9	43.89	46.34

1) x_2 : 莲籽间静摩擦系数, x_3 : 莲籽间滚动摩擦系数, x_5 : 莲籽-有机玻璃静摩擦系数
1) x_2 : Coefficient of static friction between lotus seeds, x_3 : Coefficient of rolling friction between lotus seeds, x_5 : Coefficient of static friction between lotus seeds and plexiglass

表 5 最陡爬坡试验 II 设计方案及相对误差¹⁾
Table 5 Design scheme and relative error of steepest climb test II

试验编号 Test No.	x_2	x_3	x_5	堆积角/% Accumulation angle	休止角/% Repose angle
1	0.30	0.01	0.30	12.43	13.49
2	0.35	0.02	0.35	7.07	8.27
3	0.40	0.02	0.40	3.66	1.83
4	0.45	0.03	0.45	4.48	8.49
5	0.50	0.03	0.50	10.38	12.53

1) x_2 : 莲籽间静摩擦系数, x_3 : 莲籽间滚动摩擦系数, x_5 : 莲籽-有机玻璃静摩擦系数
1) x_2 : Coefficient of static friction between lotus seeds, x_3 : Coefficient of rolling friction between lotus seeds, x_5 : Coefficient of static friction between lotus seeds and plexiglass

2.3 验证试验

为进一步验证鲜莲籽离散元模型及仿真参数的可靠性, 确定建立的鲜莲籽离散元接触模型具有普遍适用性, 采用料斗进行落种验证试验^[23]。鲜莲籽料斗落种过程主要受莲籽间以及莲籽与料斗间相互挤压、相互摩擦的影响。莲籽落种速率可以反映莲籽与料斗的摩擦程度。本试验以莲籽落种速率为试验指标, 对比相同质量鲜莲籽落种速率的实测值与仿真值。料斗材料为有机玻璃, 料斗尺寸为进料口 410 mm×410 mm、出料口 100 mm×100 mm、高

435 mm、出料口斜面角度 45°, 如图 6a 所示。试验时, 首先用挡板堵住出料口, 在料斗内加入 10 kg 鲜莲籽, 打开出料口, 记录排种过程, 试验重复 10 次。将料斗和鲜莲籽的离散元模型导入 EDEM 软件, 接触参数按标定的数值进行设置, 即 x_1 为 0.3, x_2 为 0.4, x_3 为 0.02, x_4 为 0.3, x_5 为 0.4, x_6 为 0.055, 其他参数与设置条件不变, 通过料斗排种的仿真试验与实际试验对比验证, 仿真试验如图 6b 所示。
取莲籽均匀下落阶段, 莲籽排种前后料斗内莲

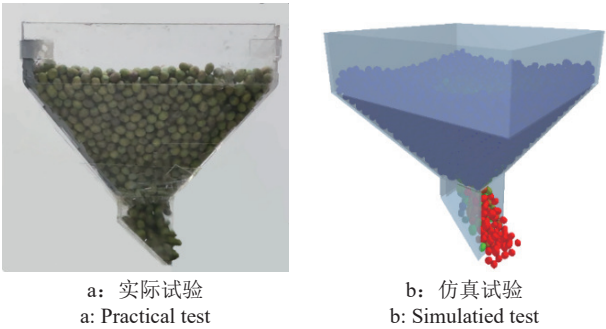


图 6 验证试验

Fig. 6 Validation test

籽质量差与排种时间的比值记为莲籽落种速率, 计算公式如下:

$$v = \frac{m_0 - m}{\Delta t}, \tag{2}$$

式中, v 为莲籽落种速率, kg/s ; m_0 为莲籽总质量,

kg ; m 为料斗内剩余莲籽质量, kg ; Δt 为排种时间, s 。
由公式 (2) 可得:

$$m = -v\Delta t + m_0. \tag{3}$$

试验过程中, 记录料斗内剩余莲籽质量 m 随排种时间 Δt 的变化, 将排种过程中线性较好的区间进行线性拟合^[24], 得到实测与仿真试验中, 料斗内剩余莲籽质量 m 与排种时间 Δt 的函数关系, 结合公式 (3) 计算可得实际试验与仿真试验莲籽落种速率。10 组实测料斗排种试验与仿真料斗排种试验的相对误差值如表 6 所示, 绘制实际排种试验排种速率误差最大的 1 组和仿真排种试验料斗内剩余莲籽质量与排种时间的函数关系, 如图 7 所示。由表 6 可知实测与仿真试验莲籽落种速率相对误差为 0.12%~3.65%, 表明该鲜莲籽离散元模型和接触参数可用于离散元仿真试验。

表 6 料斗排种试验实测值与仿真值误差表

Table 6 Error table of measurement value and simulation value in hopper seeding test

试验 Test	试验编号 Test No.	斜率/排种速率(v)/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) Slope/seed discharge rate	截距/莲籽总质量(m_0)/ kg Intercept/total mass of lotus seeds	R^2	相对误差/% Relative Error	
					v	m_0
仿真 Simulated		1.672	10.167	0.999 9		
实测 Actual	1	1.634	10.098	0.999 4	2.30	0.68
	2	1.659	10.174	0.999 1	0.75	0.07
	3	1.670	10.063	0.999 3	0.12	1.02
	4	1.636	10.027	0.999 4	2.18	0.39
	5	1.652	10.169	0.999 1	1.17	0.02
	6	1.643	10.209	0.999 2	1.73	0.41
	7	1.663	10.068	0.998 6	0.52	0.97
	8	1.632	10.199	0.999 3	2.40	0.31
	9	1.611	10.019	0.999 3	3.65	1.46
	10	1.642	9.982	0.999 4	1.81	1.82

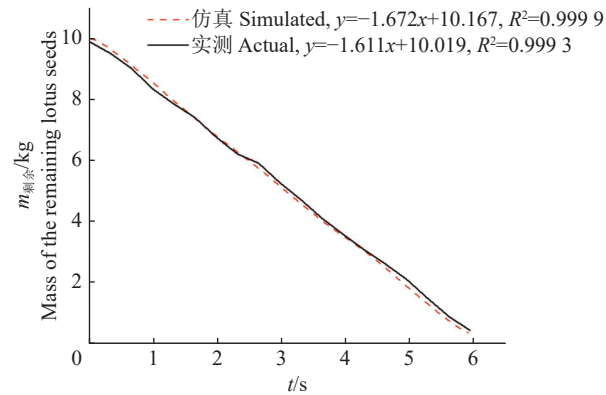


图 7 实测与仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of actual and simulated result

3 结论与讨论

本研究针对鲜莲籽在加工过程中的送料环节易堆积堵塞的问题, 通过落种堆积试验确定了鲜莲籽离散元接触模型参数, 为鲜莲籽加工机械的优化设计提供依据。本文首先通过物理试验测定得到鲜莲籽的弹性模量为 1.34 MPa、泊松比为 0.3、休止角为 35.95°、堆积角为 30.20°。然后采用 Hertz-Mindlin(no slip) 模型, 以休止角和堆积角为试验指标进行了仿真落种试验。通过 Plackett-Burman 试验筛选出对堆积角影响显著的因素为 x_2 、 x_3 ; 对休止角影响显著的因素为 x_2 、 x_3 和 x_5 。通过 2 次最陡

爬坡试验优化参数范围, 得到最佳仿真参数组合: x_2 为 0.4、 x_3 为 0.02、 x_5 为 0.4, 此时堆积角误差为 3.66%, 休止角误差为 1.83%。最后采用料斗落种试验对仿真参数进行试验验证, 搭建料斗落种试验平台进行落种验证试验, 同时在 EDEM 软件中进行仿真试验; 结果表明, 鲜莲籽落种速率的实际值与仿真值最大相对误差为 3.65%, 说明标定的参数准确、可靠。

离散元参数标定可为农业物料的生产加工过程仿真提供数据参考。本研究仅确定了鲜莲籽接触参数, 后期将通过弯曲破坏仿真分析继续标定鲜莲籽离散元模型, 为加工过程中莲籽的挤压破损提供模型参数, 为鲜莲籽加工机械的结构优化提供理论依据。此外, 莲籽脱壳后, 莲壳、莲仁具有完全不同的物料特性, 莲籽深加工主要是加工莲仁, 后续也需对莲仁开展进一步研究。

致谢: 感谢华中农业大学现代农业工程实验室吴兰兰老师给予的支持和帮助!

参考文献:

[1] 郑宝东, 郑金贵, 曾绍校. 我国主要莲子品种中三种功效成分的研究[J]. *营养学报*, 2004, 26(2): 158-160.

[2] 郑宝东. 莲子科学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 21-47.

[3] ZHANG Y, ZENG H L, WANG Y, et al. Structural characteristics and crystalline properties of lotus seed resistant starch and its prebiotic effects[J]. *Food chemistry*, 2014, 155: 311-318.

[4] BHAT R, SRIDHAR K R. Nutritional quality evaluation of electron beam-irradiated lotus (*Nelumbo nucifera*) seeds[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(1): 174-184.

[5] 侯群喜, 曾荣, 张国忠, 等. 不同成熟度莲籽力学特性试验[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(5): 159-166.

[6] 马秋成, 郭耿君, 马婕, 等. 莲仁力学特性参数测定及挤压破碎特性试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 263-271.

[7] 谢丽娟. 莲子破裂最佳位置的有限元模拟及试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.

[8] 谢丽娟, 宗力. 莲子受力有限元分析[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(6): 94-97.

[9] 徐谐庆, 饶洪辉, 李涛, 等. 全自动莲子剥壳去皮机的设

计与试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 28-34.

[10] 梁诗华, 林毅鑫, 范泽泽, 等. 鲜莲剥壳技术研究进展与探讨[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(4): 603-607.

[11] 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.

[12] 马文鹏, 尤泳, 王德成, 等. 基于 RSM 和 NSGA-II 的苜蓿种子离散元模型参数标定[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 136-144.

[13] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 121: 105-117.

[14] 彭才望, 许道军, 贺喜, 等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 212-218.

[15] 郭访全, 钟艳. 太空莲 36 号高产栽培技术[J]. *农家致富顾问*, 2016(8): 4.

[16] 张刘炜, 王海滨, 郭艳玲, 等. 基于响应面法的蓝莓离散元参数标定[J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(5): 540-548.

[17] 马秋成, 卢安舸, 高连兴, 等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 297-303.

[18] 马秋成, 雷林韬, 卢安舸, 等. 基于 CFD-DEM 耦合法的莲子壳仁分离装置优化与试验分析[J]. *食品与机械*, 2016, 32(12): 87-91.

[19] 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.

[20] 侯群喜. 小型鲜食莲籽剥壳通芯一体机设计及剥壳性能试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.

[21] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(24): 46-54.

[22] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 218-231.

[23] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫琴, 等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(23): 30-38.

[24] 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.

【责任编辑 李庆玲】