

收获期豌豆籽粒离散元仿真参数标定

张克平,侯传凯,孙步功,苏占科

(甘肃农业大学机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:针对收获期豌豆籽粒在脱粒与清选仿真模拟中缺乏准确离散元仿真参数的难题,采用物理试验和仿真试验相结合的方法对豌豆籽粒仿真参数进行标定。以籽粒堆积角为评价指标,通过 Plackett-Burman 试验筛选显著性参数,借助最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验得到显著性参数最优组合,通过仿真试验标定非显著性参数。结果表明:籽粒间碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数分别为 0.364、0.519 和 0.444;豌豆籽粒-钢碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数分别为 0.505、0.462 和 0.090;物理和仿真试验堆积角分别为 19.841° 和 19.714°,其相对误差为 0.64%。研究可为豌豆机械化收获过程离散元仿真分析提供参考。

关键词:豌豆籽粒;参数标定;堆积角;仿真试验

中图分类号:S225.6 **文献标志码:**A

Discrete element simulation parameter calibration of pea grains at harvest time

ZHANG Keping, HOU Chuankai, SUN Bugong, SU Zhanke

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

Abstract: To solve the lack of accurate discrete element parameters in simulation of threshing and cleaning of pea grains at harvest time, the parameters of pea grains were calibrated by combining physical and simulation test. The significant parameters were chosen by using the Plackett-Burman test while the evaluation index was the grain stacking angle. The optimal combination of significance parameters was found by applying the steepest climbing test and the Box-Behnken test, and the simulation test was used to calibrate the non-significant parameters. The results showed that the inter grain collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient were 0.364, 0.519, and 0.444 respectively. The recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient of the pea-steel collision were 0.505, 0.462, and 0.090 respectively. Moreover, the stacking angles of physical and simulation test were 19.841° and 19.714° respectively, with a relative error of 0.64%. The study provides a reference for discrete element simulation analysis of the mechanized harvesting of pea.

Keywords: pea grain; parameter calibration; stacking angle; simulation experiment

豌豆是一年生或越年生草本植物,是集粮、菜、肥、饲于一体的多用途作物,豌豆生长周期短、营养价值高,可作为豆粕和玉米等原料的替代物,从而有效降低饲料成本^[1-2]。豌豆作物具有后熟特性,收获期豌豆籽粒含水率高且跨度大,机械化收获过程中易发生籽粒损伤现象,尤其在玉米/豌豆间作种植模式下,先熟的豌豆作物收获作业空间狭窄,通用谷物收获机械适用性较低,仍然以人工收获为

主,劳动强度大且作业效率低。

豌豆籽粒和茎秆的物理和生物力学特性研究可为相关收获机械的研发提供理论依据。代治国等^[3]对豌豆籽粒进行了压缩和剪切试验,探讨了豌豆籽粒的含水率与破碎负载、弹性模量、剪切力、剪切强度、硬度之间的函数关系;王君等^[4]通过对豌豆茎秆剪切和拉伸试验,发现豌豆茎秆的抗剪强度随含水率的增大呈先上升后下降的趋势,有利于确

定豌豆收割的最佳时期;Dange 等^[5]利用钟摆式动态试验仪对不同处理条件下的豌豆茎秆所需的力和能量进行了研究,得到切削速度、叶片斜角、含水量、茎径是影响豌豆茎秆切削能量和力的主要制约因素。近年来,离散元法在农作物收获机械设计 and 仿真分析中的应用日益广泛^[6],为了使仿真更贴近实际,分析过程中需要设置精确的农业物料参数,Balevicius 等^[7]通过豌豆和玻璃板的滑动试验测得两者之间的静摩擦系数;Azadbakht 等^[8]通过冲击和摩擦试验探究了水分和能量对豌豆脱粒的影响,结果显示豆荚脱粒量随着冲击能和摩擦能的增大而增加,籽粒摩擦系数随其含水量的增加而增大,而对于收获期豌豆离散元仿真参数的标定鲜有报道。

本研究拟采用物理试验和仿真试验相结合的方法对豌豆籽粒离散元仿真参数进行标定,首先通过台架试验确定参数区间,依次通过 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验以及 Box-Behnken 试验筛选对豌豆籽粒堆积角影响显著的参数并对其进行最优化处理,非显著参数则由离散元仿真来标定。研究结果可为豌豆机械化收获过程的离散元仿真分析提供参考,进而为豌豆收获机械的设计和优化提供依据。

1 试验材料及物性参数

1.1 豌豆籽粒物性参数

试验所用收获期豌豆于 2021 年 7 月 30 日采自甘肃省定西市渭源县试验田,利用电热鼓风机干燥箱和分析天平(精度 0.1 mg)测定其含水率为 20.94%~25.69%。豌豆籽粒的物性参数主要包括百粒质量、三轴尺寸、密度、泊松比和弹性模量等,随机选取 5 组豌豆籽粒,每组 100 粒,利用电子天平(精度 0.01 g)测其百粒质量并取均值;利用数显游标卡尺(精度 0.01 mm)测量三轴尺寸并取均值,利用量筒(精度 1 ml)测定密度;利用质构仪(TA.XT plus, 距离精度 0.001 mm,力量精度 0.1 g)对豌豆籽粒开展压缩试验获取其泊松比和弹性模量^[9-10]。豌豆籽粒的基本物性参数列于表 1。

1.2 豌豆籽粒自然堆积角

豌豆籽粒的堆积角通过圆筒提升试验测量。将钢制圆筒(内径 65 mm,高 180 mm)垂直放置在水平钢板上,上部与自动伸缩杆相连,圆筒内装填满籽粒后以 $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度向上提升^[11],豌豆籽粒自由下落在水平钢板上形成一个锥形颗粒堆,待其静止后用相机拍摄颗粒堆的正视照片(图 1),通过 Origin 2018 软件处理得到颗粒堆积角度,试验重复

10 次并取其平均值,得到豌豆籽粒堆积角为 19.841° 。

表 1 豌豆籽粒基本物性参数

参数 Parameter	值 Value
三轴尺寸(长 $L \times$ 宽 $K \times$ 厚 H) Triaxial dimension/mm	8.22 \times 6.98 \times 6.67
百粒质量 Hundred grain mass/g	31.230
泊松比 Poisson's ratio	0.302
密度 Density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.191
弹性模量 Elastic modulus/MPa	36.835

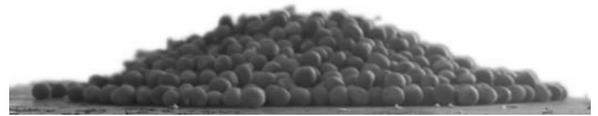


图 1 豌豆籽粒堆积试验

Fig.1 Pea grain stacking experiment

2 碰撞恢复系数与摩擦系数试验法标定

2.1 碰撞恢复系数

2.1.1 豌豆籽粒-钢板碰撞恢复系数 碰撞恢复系数按照其表达的物理性质可分为 3 种,即运动学恢复系数、动力学碰撞恢复系数和能量恢复系数。运动学恢复系数定义为两物体在碰撞后质心的法向分速度与碰撞前的质心法向分速度的比值,此方法主要针对球状近刚性物体的低速碰撞问题,测定出只与材料相关的恢复系数的数值^[12]。

试验装置及其原理如图 2 所示,颗粒自距离地面高 $2h$ 处释放,在重力作用下与距离地面 h 并倾斜 45° 的钢板发生碰撞,最终籽粒落在初始释放位置水平距离 L 的地面^[13]。由此可得,碰撞恢复系数可以简化为:

$$e = \frac{v'_N}{v_N^0} = \frac{v' \sin 45^\circ}{v \sin 45^\circ} = \frac{v'}{v} = \frac{L}{2h} \quad (1)$$

式中, v'_N 为颗粒碰撞后法向分速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_N^0 为颗粒碰撞前法向分速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v' 为籽粒碰撞后水平速度分量 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v 为碰撞前垂直速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); h 为颗粒距碰撞板的垂直距离与颗粒碰撞后非自由落体的垂直高度 (mm); L 为颗粒碰撞后非自由落体的水平距离 (mm)。

根据上述原理测量豌豆籽粒与钢板的碰撞恢复系数,释放高度取 300 mm,自由下落过程重复 10 次,测量弹出水平距离获得最大值和最小值,根据式(1)计算豌豆籽粒-钢板的碰撞恢复系数取值范围为 0.460~0.613。

2.1.2 豌豆籽粒间碰撞恢复系数 采用碰撞弹出法测量豌豆籽粒间的碰撞恢复系数^[14]。测量之前制作豌豆籽粒碰撞板,取一块 70 mm×55 mm 白纸,将预先挑选好的豌豆籽粒用双面胶粘在纸上,尽可能减小豌豆籽粒间的空隙,制作的豌豆籽粒碰撞板如图 3 所示。试验时将制作好的碰撞板粘在图 2 所示测试装置的倾斜 45°钢板上,重复 2.1.1 节中相同试验步骤测得豌豆籽粒间碰撞恢复系数范围为 0.274~0.488。

2.2 静摩擦系数

2.2.1 豌豆籽粒-钢板静摩擦系数 静摩擦系数是物体所受到的最大静摩擦力与法向压力的比值,常用测量方法为斜面滑动法,其测试原理如图 4 所示,豌豆籽粒在斜面上静止时,受到重力 mg (N)、静摩擦力 f (N)、斜面对豌豆的支撑力 N (N),将籽粒的重力分解为垂直于斜面的力 T (N) 和平行于斜面的力 F (N),当斜面角度 θ (°) 小于滑动的临界角度时,

平行于斜面的力 F 小于物体受到的静摩擦力 f ,物体在斜面上保持静止不动,随着斜面角度 θ 增大,增加到大于临界角度,斜面上的力 F 也增加到大于颗粒与斜面之间的静摩擦力,颗粒开始沿斜面向下滑动。故静摩擦系数 f_s 与斜面角度 θ 的关系可按式 (2) 表示:

$$f_s = \frac{mg \sin \theta}{(mg \cos \theta)} = \tan \theta \quad (2)$$

使用斜面滑动法测定豌豆籽粒与钢板的静摩擦系数,豌豆籽粒近似圆形,稍微施加外力就会做滚动运动,在试验过程中为了防止豌豆籽粒发生滚动,降低试验误差使参数与实际值更接近,将几个豌豆籽粒粘结成矩形,如图 5 所示,试验开始时,将钢板水平放置,把粘结成矩形的豌豆籽粒放置在钢板不转动的一侧,缓慢抬动钢板,使钢板绕转动轴侧做匀速圆周运动,当粘结籽粒有滑动的趋势时停止转动,并记录钢板与水平面的角度,试验重复 10 次,测得豌豆籽粒-钢板静摩擦系数范围为 0.412~0.573。

2.2.2 豌豆籽粒间静摩擦系数 采用斜面滑动法测量豌豆籽粒间静摩擦系数^[15]。如图 6 所示,将图 3 中制作好的豌豆籽粒测试板粘在匀速运动的钢板上,将一粒豌豆籽粒放在测试板上,使钢板匀速运动直到放上的豌豆籽粒开始滑动时停止运动,并记录钢板转过的角度,试验重复 10 次,测得豌豆籽粒间静摩擦系数范围为 0.287~0.657。

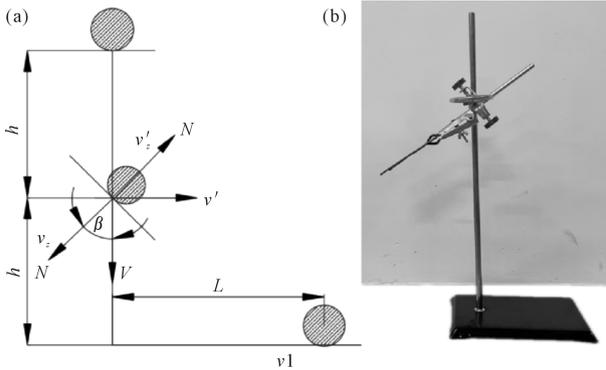


图 2 碰撞恢复系数原理图 (a) 及其测试装置 (b)

Fig.2 Collision recovery coefficient schematic diagram (a) and its test device (b)

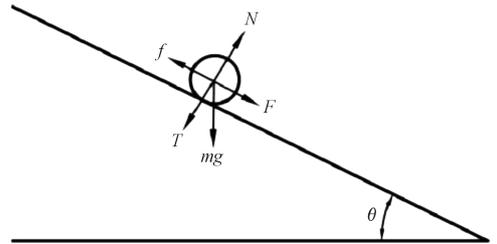


图 4 静摩擦系数测试原理图

Fig.4 Schematic diagram of static friction coefficient test

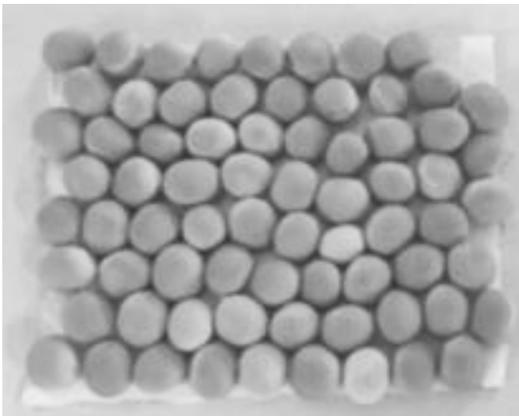


图 3 豌豆籽粒测试板

Fig.3 Pea grain test board

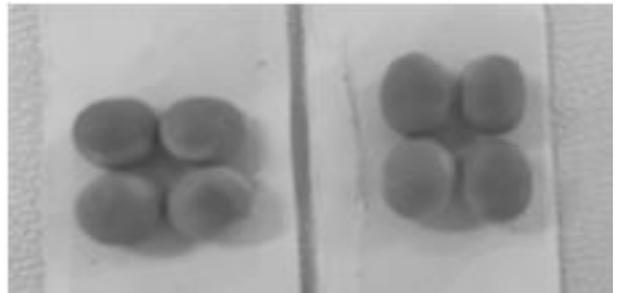


图 5 豌豆籽粒矩形板

Fig.5 Pea grain rectangular plate

2.3 滚动摩擦系数

2.3.1 豌豆籽粒-钢板滚动摩擦系数 滚动摩擦是指当一个物体在另一物体表面作无滑动的滚动或有滚动的趋势时,由于物体在接触部分受压发生形变而产生阻碍滚动的作用,豌豆籽粒与钢板的滚动摩擦系数通过斜面滚动法和能量守恒定律相结合测定。将豌豆籽粒从一固定倾斜角度 θ 为 16° 钢板以初速度 0 沿着钢板滚动,由于摩擦力存在,豌豆籽粒停在水平钢板的某一位置,豌豆籽粒在倾斜钢板上滚过距离为 $S=200$ mm,在水平钢板上滚过距离为 L 。滚动摩擦系数 μ 可以由能量守恒定律求得(式 3),试验重复 10 次,测得豌豆籽粒-钢板滚动摩擦系数范围为 0.068~0.139。

$$mgS\sin\theta = \mu mg(S\cos\theta + L) \quad (3)$$

2.3.2 豌豆籽粒间滚动摩擦系数 采用初始滚动时刻内近似能量守恒获得的滚动摩擦系数来预估真实值^[11]。测试板由平放缓慢转动,物料受重力而滚动,如果在倾斜面上开始滚动的一微小角度 α ($^\circ$),其速度由零增加,速度变化极小,此时假设动能为 0。所以测量物料的重力势能等于其在滚动中损失的能量,由以上分析并简化可得滚动摩擦系数计算公式(式 4),试验重复 10 次取平均值,测得豌豆籽粒间滚动摩擦系数范围为 0.337~0.627。

$$\mu = \tan\alpha \quad (4)$$

3 碰撞恢复系数与摩擦系数离散元法标定

3.1 仿真模型

3.1.1 豌豆籽粒离散元模型 豌豆籽粒的基本物性参数已经通过试验测定,由于其外形近似椭球形,为了便于在离散元仿真软件中建立豌豆籽粒的颗粒模型,前文已对其长度 L 、宽度 K 、厚度 H 尺寸测定,取其长轴长度 $a=L$,短轴长度 $b=(K+H)/2$ ^[16],由此得到豌豆籽粒模型长轴和短轴长度分别为 8.220 mm 和 6.825 mm。在 EDEM 软件中通过多球颗粒组合功能建立豌豆籽粒的离散元模型,如图 7 所示。

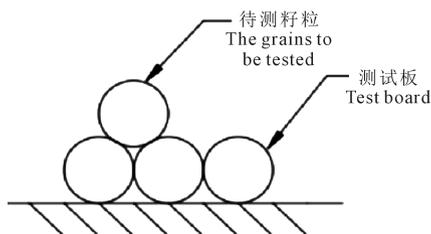


图 6 籽粒间静摩擦系数测试原理图

Fig.6 Test schematic diagram of coefficient of static friction between grains

3.1.2 仿真参数 在建立仿真模型时,颗粒之间、颗粒-钢板之间的相互作用影响较大,在仿真参数标定试验时,为了提高软件仿真效率,采用固定尺寸的豌豆籽粒离散元模型^[17]。本研究中通过台架试验和相关文献确定各仿真参数如表 2 所示。

3.1.3 圆筒提升模型 在 EDEM 中等尺寸建立无底圆筒以及矩形底板,圆筒上侧建一颗粒工厂,颗粒生成方式为 dynamic,颗粒的生成速率为 $3\ 000$ 个 $\cdot s^{-1}$,生成数量不限,时间步长 1.55×10^{-5} s,网格尺寸为最小颗粒半径的 3 倍,待颗粒填满圆筒后停止继续生成颗粒,静置 3 s 待生成颗粒沉积,尽可能减小空隙使其达到平衡。以与台架试验相同的速度提升圆筒,颗粒下落在底板上形成颗粒堆,如图 8 所示。

3.2 影响显著性参数筛选试验

应用 Design-Expert 10 软件进行影响显著性参数筛选试验,以豌豆籽粒的堆积角为响应值,通过 Plackett-Burman 试验筛选出对豌豆籽粒堆积角影响显著的参数,如表 3 所示,试验变量的最大值、中



图 7 豌豆籽粒离散元模型

Fig.7 Discrete element model of pea grain

表 2 离散元仿真参数

Table 2 Discrete element simulation parameters

仿真参数 Simulation parameter	值 Value
豌豆籽粒泊松比 Poisson's ratio of pea seeds	0.302 ^a
钢板泊松比 Poisson's ratio of steel plate	0.3 ^b
豌豆籽粒弹性模量 Elastic modulus of pea grain/Pa	3.684×10^7 ^a
钢板剪切模量 Shear modulus of steel plate/Pa	7.94×10^{10} ^b
豌豆籽粒密度 Pea seed density/($kg \cdot m^{-3}$)	1191 ^a
钢板密度 Steel plate density/($kg \cdot m^{-3}$)	7850 ^b
豌豆籽粒-钢板碰撞恢复系数 A Pea grain-steel plate restitution coefficient A	0.46~0.613 ^c
豌豆籽粒-钢板静摩擦系数 B Pea grain-steel plate static friction coefficient B	0.412~0.573 ^c
豌豆籽粒-钢板滚动摩擦系数 C Pea grain-steel plate rolling friction coefficient C	0.068~0.139 ^c
豌豆籽粒-豌豆籽粒碰撞恢复系数 D Pea grain-pea grain restitution coefficient D	0.274~0.488 ^c
豌豆籽粒-豌豆籽粒静摩擦系数 E Pea grain-pea grain static friction coefficient E	0.287~0.657 ^c
豌豆籽粒-豌豆籽粒滚动摩擦系数 F Pea grain-pea grain rolling friction coefficient F	0.337~0.627 ^c

注:a 表示台架试验测定,b 表示查文献所得,c 表示试验变量。

Note: a represents the measured value of bench test, b represents the value obtained from literature review, and c represents the test variable.

间值、最小值分别编码+1、0、-1。仿真试验方案与结果列于表 4,待仿真试验结束后,采用台架物理试验测堆积角的方法,测量豌豆籽粒的仿真堆积角。

利用 Design-Expert 10 软件对仿真堆积角结果进行分析,如表 5 所示,豌豆籽粒与豌豆籽粒静摩擦系数(E)和豌豆籽粒与豌豆籽粒滚动摩擦系数(F)对豌豆籽粒堆积角影响极显著,豌豆籽粒与豌豆籽粒碰撞恢复系数(D)则影响显著。而其余参数影响相对较小,对于影响较小的仿真参数标定则采用前述台架试验与之后模拟仿真台架试验相结合来完成。

3.3 非显著性参数仿真标定

3.3.1 豌豆籽粒-钢板碰撞恢复系数仿真试验标定

仿真试验如图 9 所示,取释放高度为 300 mm,

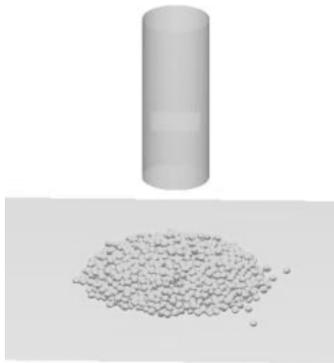


图 8 豌豆籽粒堆积角仿真模型

Fig.8 Simulation model of pea grain stacking angle

表 3 Plackett-Burman 试验参数

Table 3 Parameters of the Plackett-Burman test

仿真参数 Simulation parameter	水平 Level		
	-1	0	+1
豌豆籽粒-钢板碰撞恢复系数 A Pea grain-steel plate restitution coefficient A	0.46	0.5365	0.613
豌豆籽粒-钢板静摩擦系数 B Pea grain-steel plate static friction coefficient B	0.412	0.4925	0.573
豌豆籽粒-钢板滚动摩擦系数 C Pea grain-steel plate rolling friction coefficient C	0.068	0.1035	0.139
豌豆籽粒-豌豆籽粒碰撞恢复系数 D Pea grain-pea grain restitution coefficient D	0.274	0.3810	0.488
豌豆籽粒-豌豆籽粒静摩擦系数 E Pea grain-pea grain static friction coefficient E	0.287	0.4720	0.657
豌豆籽粒-豌豆籽粒滚动摩擦系数 F Pea grain-pea grain rolling friction coefficient F	0.337	0.4820	0.627

因豌豆籽粒和钢板的静摩擦系数、滚动摩擦系数对籽粒碰撞弹出距离无影响,为避免干扰,除了豌豆籽粒与钢板碰撞恢复系数外,其他参数值均为 0。将前述通过台架试验测定的豌豆籽粒和钢板碰撞恢复系数取值范围 0.460~0.613,分为 7 组仿真试验,每组试验重复 5 次并取平均值,试验设计方案及结果列于表 6,其中 Y_1 为每组进行多次仿真试验得到籽粒与板碰撞后弹出距离的均值,每组弹出距离由 EDEM 软件后处理工具 Ruler 测量得到。

以豌豆籽粒与钢板碰撞恢复系数 A 为试验因素,弹出距离 Y_1 为评价指标,对表 6 中的数据进行二次多项式曲线拟合见式(5),二者关系可靠度较高。将 $Y_1 = 170.7$ mm 代入式(5)得到 $A = 0.505$,在

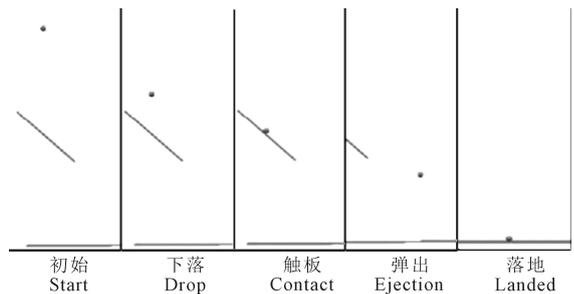


图 9 碰撞恢复系数仿真试验

Fig.9 Simulation test of collision recovery coefficient

表 4 Plackett-Burman 试验方案及结果

Table 4 Plackett Burman test scheme and results

序号 Number	A	B	C	D	E	F	堆积角 $\theta/(^\circ)$ Stacking angle
1	1	-1	-1	-1	1	-1	20.163
2	-1	1	1	1	-1	-1	18.744
3	0	0	0	0	0	0	17.722
4	1	1	-1	1	1	1	19.908
5	1	1	1	-1	-1	-1	17.742
6	-1	-1	-1	1	-1	1	17.209
7	1	-1	1	1	-1	1	15.941
8	-1	-1	1	-1	1	1	18.811
9	1	1	-1	-1	-1	1	16.307
10	-1	1	-1	1	1	-1	21.433
11	-1	-1	-1	-1	-1	-1	16.541
12	-1	1	1	-1	1	1	19.728
13	1	-1	1	1	1	-1	21.788

表 5 Plackett-Burman 试验参数显著性分析

Table 5 Significance analysis of Plackett-Burman test parameters

参数 Parameter	自由度 Degrees of freedom	平方和 Sum of squares	F 值 F value	P 值 P value	效应 Effect	影响率% Contribution	显著性排序 Rank of significance
A	1	0.032	0.091	0.7747	-0.10	0.073	6
B	1	0.97	2.79	0.1559	0.57	2.23	4
C	1	0.12	0.34	0.5844	0.20	0.27	5
D	1	2.74	7.88	0.0377	0.96	6.31	3
E	1	31.19	89.79	0.0002	3.22	71.92	1
F	1	6.03	17.36	0.0088	-1.42	13.91	2

仿真试验中将豌豆籽粒与钢板碰撞恢复系数设定为该值,在释放高度为 300 mm 的条件下进行 5 次试验并取平均值,得到弹出距离为 172.4 mm,与真实台架试验得到的弹出距离相对误差为 0.996%。表明标定后的仿真试验结果和真实台架试验基本相同,所以碰撞恢复系数 $A=0.505$ 。

$$Y_1 = -231.37A^2 + 517.17A - 31.301$$

$$R^2 = 0.9864 \quad (5)$$

3.3.2 豌豆籽粒-钢板静摩擦系数仿真试验标定
在 EDEM 仿真中,采用多球组合的方式生成 4 个豌豆籽粒且其排列成矩形,如图 10 所示。仿真参数设置如下:豌豆籽粒与钢板碰撞恢复系数为已标定为 0.505,豌豆籽粒与钢板静摩擦系数将台架试验确定的范围分为 6 组,试验时每组测 5 次并取平均值,试验方案与结果列于表 7,为了避免干扰则其余参数均为 0。

表 6 碰撞恢复系数仿真试验方案与结果
Table 6 Collision recovery coefficient simulation test scheme and results

序号 Number	碰撞恢复系数 A Collision recovery coefficient A	弹出距离 Y_1 /mm Ejection distance
1	0.460	159.467
2	0.486	163.333
3	0.511	170.383
4	0.537	181.271
5	0.562	187.660
6	0.588	193.320
7	0.613	197.700



图 10 静摩擦系数仿真试验

Fig.10 Static friction coefficient simulation test

表 7 静摩擦系数仿真试验方案与结果
Table 7 Static friction coefficient simulation test scheme and results

序号 Number	静摩擦系数 B Static friction coefficient B	倾斜角度 Y_2 /(°) Tilt angle
1	0.412	22.911
2	0.444	24.608
3	0.476	26.080
4	0.509	27.950
5	0.541	30.009
6	0.573	31.280

以豌豆籽粒与钢板静摩擦系数 B 为试验因素、倾斜角度 Y_2 为评价指标,倾斜角度由 EDEM 软件后处理工具 Protractor 测量得到。对表 7 中的数据进行二次多项式曲线拟合见式(6),二者关系可靠度较高。将 $Y_2=25.5^\circ$ 代入式(6)得到 $B=0.462$,在仿真试验中将豌豆籽粒与钢板静摩擦系数设定为该值,进行 5 次试验并取平均值,仿真试验倾斜角度为 25.814° ,与台架试验相对误差 1.231%,表明标定后的仿真试验结果和真实台架试验值接近,所以静摩擦系数 $B=0.462$ 。

$$Y_2 = 3.8554B^2 + 49.28B + 1.9226$$

$$R^2 = 0.9972 \quad (6)$$

3.3.3 豌豆籽粒-钢板滚动摩擦系数仿真试验标定
在 EDEM 软件中构建一倾斜角度为 16° 的长方形钢板(200 mm×300 mm),与之相接一个 400 mm×800 mm 的水平钢板,如图 11 所示。仿真参数设置如下:碰撞恢复系数 $A=0.505$,静摩擦系数 $B=0.462$,将台架试验得到的滚动摩擦系数区间分为 6 份,试验方案与结果列于表 8,为了避免干扰,其余参数均为 0。

以豌豆籽粒与钢板滚动摩擦系数 C 为试验因素、滚动距离 Y_3 为评价指标,每组试验的水平滚动距离由 EDEM 软件后处理工具 Ruler 测量得到。对表 8 中的数据进行二次多项式曲线拟合见式(7),二者关系可靠度较高。将 $Y_3=394.21$ mm 代入式(7)得到 $C=0.09$,在仿真试验中将豌豆籽粒与钢板滚动摩擦系数设定为该值,进行 5 次试验并取平均值,仿真试验水平滚动距离 388.617 mm,与台架试验相对误差 1.439%,表明标定后的仿真试验结果和



图 11 滚动摩擦系数仿真试验

Fig.11 Simulation test of rolling friction coefficient

表 8 滚动摩擦系数仿真试验方案与结果
Table 8 Rolling friction coefficient simulation test scheme and results

序号 Number	滚动摩擦系数 C Rolling friction coefficient C	滚动距离 Y_3 /mm Rolling distance
1	0.068	575.233
2	0.082	445.650
3	0.096	352.233
4	0.111	278.710
5	0.125	226.247
6	0.139	179.825

真实台架试验接近,所以滚动摩擦系数 $C=0.09$ 。

$$Y_3 = 51621C^2 - 16112C + 1427$$

$$R^2 = 0.9984 \quad (7)$$

3.4 最陡爬坡试验

由表 5 可知豌豆籽粒间静摩擦系数 E 和碰撞恢复系数 D 对堆积角效应为正值,滚动摩擦系数 F 的效应为负值,对这 3 个显著性参数进行最陡爬坡试验,以堆积角相对误差为评价标准,确定仿真参数最优范围,试验方案与结果列于表 9,可知 4 号的相对误差最小,故将 4 号作为后续 Box-Behnken 响应面试验的中心点。

3.5 Box-Behnken 试验及回归模型

根据最陡爬坡试验结果,开展 Box-Behnken 堆积角仿真试验,试验设计方案及结果列于表 10。利用 Design-Expert 10 软件对表 10 中的数据进行分

析,得到豌豆籽粒堆积角 θ 与 3 个显著性参数的二阶回归方程为:

$$\theta = 42.81395 - 75.81167D + 42.64176E - 85.93713F + 114.62916DE - 235.76584DF - 79.45014EF + 166.07626D^2 - 41.62253E^2 + 226.31540F^2 \quad (8)$$

Box-Behnken 试验的方差分析结果如表 11 所示,可知 D 、 E 、 F 、 DF 、 F^2 的 $P < 0.01$,表明对堆积角具有极显著影响, DE 的 $P < 0.05$,表明对堆积角具有显著影响,各参数之间交互项对堆积角的影响如图 12 所示(分别在 $F = 0.453$ 和 $E = 0.509$ 两种情况下绘制),该拟合模型 $P < 0.01$,失拟项 $P = 0.1489 > 0.05$,表明模型良好,且没发生失拟现象,变异系数 ($CV = 1.52\%$) 低代表试验可靠,决定系数 $R^2 = 0.9659$,校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.9221$,近似等于 1。

表 9 最陡爬坡试验方案与结果

Table 9 Test scheme and results of steepest climb

序号 Number	籽粒间恢复系数 D Coefficient of restitution between grains D	籽粒间静摩擦系数 E Coefficient of static friction between grains E	籽粒间滚动摩擦系数 F Coefficient of rolling friction between grains F	堆积角 $\theta/(^\circ)$ Stacking angle	相对误差/% Relative error
1	0.274	0.287	0.627	17.615	11.219
2	0.317	0.361	0.569	18.758	5.458
3	0.360	0.435	0.511	19.144	3.513
4	0.403	0.509	0.453	19.288	2.787
5	0.446	0.583	0.395	20.907	5.373
6	0.489	0.657	0.337	21.560	8.664

表 10 Box-Behnken 试验设计方案及结果

Table 10 Box-Behnken test design scheme and results

序号 Number	籽粒间恢复系数 D Coefficient of restitution between grains D	籽粒间静摩擦系数 E Coefficient of static friction between grains E	籽粒间滚动摩擦系数 F Coefficient of rolling friction between grains F	堆积角 $\theta/(^\circ)$ Stacking angle
1	0	0	0	19.616
2	1	0	-1	22.798
3	0	-1	-1	19.919
4	0	0	0	19.561
5	0	0	0	20.074
6	-1	-1	0	19.094
7	1	1	0	21.435
8	-1	1	0	19.591
9	0	0	0	19.959
10	0	0	0	19.893
11	0	1	-1	22.475
12	0	1	1	20.107
13	1	0	1	19.515
14	1	-1	0	19.479
15	0	-1	1	18.915
16	-1	0	1	20.156
17	-1	0	-1	21.087

表 11 Box-Behnken 试验回归模型方差分析

Table 11 Variance analysis of Box-Behnken test regression model

方差源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	18.81	9	2.09	22.03	0.0002
<i>D</i>	1.36	1	1.36	14.34	0.0068
<i>E</i>	4.81	1	4.81	50.67	0.0002
<i>F</i>	7.19	1	7.19	75.83	<0.0001
<i>DE</i>	0.53	1	0.53	5.61	0.0497
<i>DF</i>	1.38	1	1.38	14.58	0.0066
<i>EF</i>	0.47	1	0.47	4.90	0.0624
<i>D</i> ²	0.40	1	0.40	4.19	0.0800
<i>E</i> ²	0.22	1	0.22	2.31	0.1727
<i>F</i> ²	2.44	1	2.44	25.73	0.0014
残差 Residual	0.66	7	0.095		
失拟项 Lack of fit	0.47	3	0.16	3.14	0.1489
纯误差 Pure error	0.20	4	0.049		
总和 Sum	19.47	16			

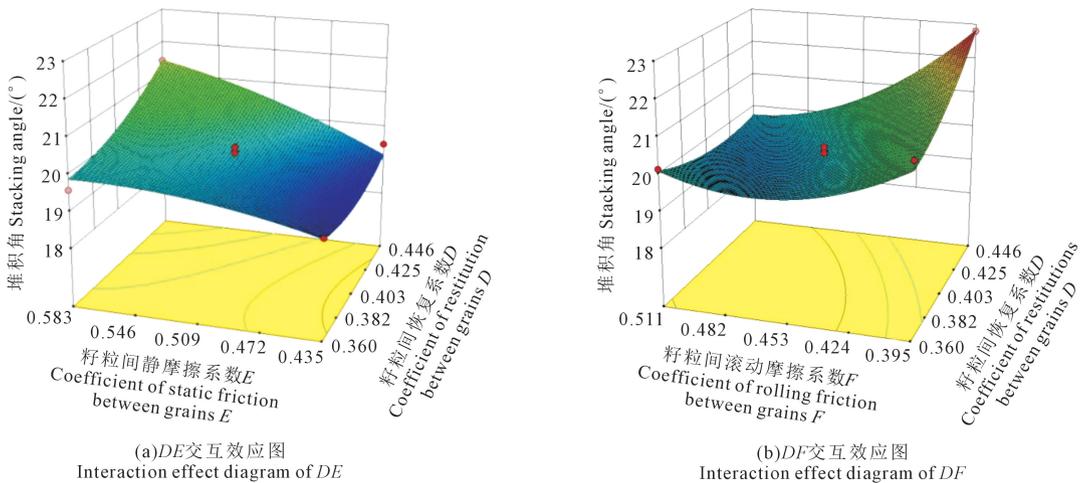


图 12 DE 和 DF 交互效应图

Fig.12 Interaction effect diagram of DE and DF

由图 12 中 DE 交互效应图可知,随着籽粒间恢复系数 D 和静摩擦系数 E 的增加,籽粒堆积角增加,当两参数中任意一个取较大值时,籽粒堆积角随另一参数增加而增大的速率越明显。从 DF 交互效应图趋势可知,当籽粒间恢复系数 D 取定值时,籽粒堆积角随滚动摩擦系数 F 的增大而减小,当滚动摩擦系数 F 取定值时,籽粒堆积角随恢复系数 D 变化波动较小。

3.6 仿真参数最优组合与试验验证

在 Design-Expert 10 软件中,为了得到使仿真试验与物理试验最接近的最优参数组合,以物理试验堆积角 19.841°为目标,对回归方程(8)优化求解,得到最佳参数组合;豌豆籽粒间碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别是 0.364、0.519、0.444。以此参数作为仿真参数进行多组仿真试验,

得到堆积角仿真均值 19.714°与实际堆积角相对误差为 0.64%。

4 结 论

1) 豌豆籽粒间、豌豆籽粒-钢间碰撞恢复系数范围分别为 0.274~0.488、0.460~0.613;静摩擦系数范围分别为 0.287~0.657、0.412~0.573;滚动摩擦系数范围分别为 0.337~0.627、0.068~0.139。

2) 对豌豆籽粒堆积角影响显著的参数有豌豆籽粒-豌豆籽粒碰撞恢复系数、豌豆籽粒-豌豆籽粒静摩擦系数、豌豆籽粒-豌豆籽粒滚动摩擦系数;而豌豆籽粒-钢板碰撞恢复系数、豌豆籽粒-钢板静摩擦系数、豌豆籽粒-钢板滚动摩擦系数对堆积角影响不显著。

3) 以实际堆积角为目标,通过最陡爬坡试验和

Box-Behnken 试验得到显著性参数的最优组合: 豌豆籽粒-豌豆籽粒碰撞恢复系数为 0.364, 豌豆籽粒-豌豆籽粒静摩擦系数为 0.519, 豌豆籽粒-豌豆籽粒滚动摩擦系数为 0.444; 非显著性参数通过仿真试验标定: 豌豆籽粒-钢碰撞恢复系数 0.505、静摩擦系数 0.462、滚动摩擦系数 0.090, 与实测值的相对误差分别为 0.966%、1.233% 和 1.439%。以标定的参数进行堆积角仿真试验, 得到最优组合下堆积角均值为 19.714° , 与台架试验相对误差为 0.64%。

参考文献:

- [1] 高小丽, 杨文才. 播期、密度、氮肥对豌豆产量和品质的影响[J]. 西藏农业科技, 2020, 42(4): 18-23.
GAO X L, YANG W C. Influence of different sowing time, density and nitrogen fertilizer application on yield and quality of pea [J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2020, 42(4): 18-23.
- [2] 赵建华, 孙建好, 李伟绮. 覆膜对玉米 || 豌豆作物生产力及间作互作的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 164-169.
ZHAO J H, SUN J H, LI W Q. Effect of film mulching on productivity and interspecific interaction in maize-pea intercropping system [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 164-169.
- [3] 代治国, 雷昌浩, 刘开生, 等. 豌豆子粒的力学性能试验分析[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(2): 461-464, 479.
DAI Z G, LEI C H, LIU K S, et al. Analyzing mechanical properties of pea [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(2): 461-464, 479.
- [4] 王君, 张克平, 张锋伟, 等. 豌豆茎秆力学特性试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 103-107.
WANG J, ZHANG K P, ZHANG F W, et al. Experiment on mechanical properties of pea stalks [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12): 103-107.
- [5] DANGE A R, THAKARE S K, RAO B I. Cutting energy and force as required for Pigeon pea stems [J]. Journal of Agricultural Technology, 2011, 7(6): 1485-1493.
- [6] 王志鹏, 李永祥, 徐雪萌. 基于堆积实验的小米离散元参数标定[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 115-120.
WANG Z P, LI Y X, XU X M. Parameter calibration of millet discrete element based on stacking experiment [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(2): 115-120.
- [7] BALEVICIUS R, SELAMOWICZ I, MRÓZ Z, et al. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin; a comparison of the DEM model results with the experimental measurements [J]. Powder Technology, 2011, 214(3): 322-336.
- [8] AZADBAKHT M, TAJARI N, ALIMORADZADE R. Mechanical properties of pea pods (*Pisium sativum* Var. Shamshiri) [J]. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2014, 8(1): 110-114.
- [9] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.
LIU F Y, ZHANG J, LI B, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 247-253.
- [10] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35-42.
SHI L R, SUN W, ZHAO W Y, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 35-42.
- [11] 马彦华, 宋春东, 宣传忠, 等. 苜蓿秸秆压缩仿真离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 22-30.
MA Y H, SONG C D, XUAN C Z, et al. Parameters calibration of discrete element model for alfalfa straw compression simulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 22-30.
- [12] 姚文莉, 岳嵘. 有争议的碰撞恢复系数研究进展[J]. 振动与冲击, 2015, 34(19): 43-48.
YAO W L, YUE R. Advance in controversial restitution coefficient study for impact problems [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(19): 43-48.
- [13] 杨立权, 王万章, 张红梅, 等. 切流-横轴流玉米脱粒系统改进设计及台架试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 35-43.
YANG L Q, WANG W Z, ZHANG H M, et al. Improved design and bench test based on tangential flow-transverse axial flow maize threshing system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 35-43.
- [14] 田剑锋, 石林榕, 杨小平, 等. 党参种子的离散元仿真参数标定与试验验证[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 240-249.
TIAN J F, SHI L R, YANG X P, et al. Calibration and experimental validation of discrete element simulation parameters for codonopsis pilosula seed [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 240-249.
- [15] 吴孟宸, 从锦玲, 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.
WU M C, CONG J L, YAN Q, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(23): 30-38.
- [16] 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, 142.
LIU W Z, HE J, LI H W, 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, 142.
- [17] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 46-54.
HOU Z F, DAI N Z, CHEN Z, et al. Measurement and calibration of physical property parameters for Agropyron seeds in a discrete element simulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 46-54.