

联合收获油葵脱出物离散元模型构建与参数标定

郭 辉^{1,2} 韩骏轩¹ 吕增帅³ 董远德^{1,2} 郭烈红¹ 周 稳¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆农垦科学院作物研究所, 石河子 832000)

摘要: 针对油葵联合收获清选装置在离散元仿真时缺乏准确模型的问题, 本文以联合收获油葵脱出物为对象, 采用离散元法对不同种类油葵脱出物模型接触参数进行分类标定。通过对随机选取的油葵脱出物进行分类, 确定了油葵脱出物主要组成成分及质量占比; 利用数显游标卡尺、万能试验机和自制试验台等仪器确定了各油葵脱出物本征参数和接触参数; 以各油葵脱出物物理堆积角为基础, 开展了 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验, 确定了对各油葵脱出物堆积角影响显著的参数及取值范围; 利用 Design-Expert 软件中的优化模块, 以各油葵脱出物物理堆积角为目标值进行寻优, 确定了各油葵脱出物较优参数组合分别为油葵籽粒剪切模量 7.35×10^7 Pa、油葵籽粒-钢材碰撞恢复系数 0.295、油葵籽粒-油葵籽粒静摩擦因数 0.669、油葵碎葵盘剪切模量 1.94×10^7 Pa、油葵碎葵盘-钢材碰撞恢复系数 0.467、油葵碎葵盘-钢材静摩擦因数 0.436、油葵茎秆剪切模量 7.39×10^7 Pa、油葵茎秆-钢材静摩擦因数 0.553、油葵茎秆-油葵茎秆静摩擦因数 0.775; 利用各较优参数组合对油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆以及油葵脱出物混料进行仿真堆积试验, 试验结果表明, 仿真堆积角与物理堆积角误差分别为 0.66%、0.96%、0.64%、1.15%。

关键词: 油葵; 联合收获; 脱出物; 离散元; 参数标定

中图分类号: S225.5⁺9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0319-12

OSID:



Discrete Element Model Construction and Parameter Calibration of Combined Harvest Oil Sunflower Extract

GUO Hui^{1,2} HAN Junxuan¹ LÜ Zengshuai³ DONG Yuande^{1,2} GUO Liehong¹ ZHOU Wen¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. Institute of Crop Research, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: Aiming to address lack of accurate modeling in discrete element simulation analysis for cleaning devices in combined oil sunflower harvest, the combined-harvested oil sunflower extracts were taken as object. A discrete element method was used to categorize and calibrate contact parameters for various oil sunflower extract models. The randomly selected oil sunflower extracts were classified, its main components were identified, and the corresponding mass fractions were determined using digital calipers, a universal testing machine, and a custom test platform measure intrinsic and contact parameters of each oil sunflower extract. Plackett - Burman, the steepest ascent, and Box - Behnken tests were proceeded based on each extract's physical repose angle. Parameters with significant effects on extract repose angle were identified and their valid ranges were defined. An optimization module in Design-Expert software was employed and physical repose angle of each extract was treated as the objective value. The optimal parameter sets were determined as follows: oil sunflower seed shear modulus was 7.35×10^7 Pa, oil sunflower seed - steel restitution coefficient was 0.295, oil sunflower seed - oil sunflower seed static friction coefficient was 0.669, crushed oil sunflower head shear modulus was 1.94×10^7 Pa, crushed oil sunflower head - steel restitution coefficient was 0.467, crushed oil sunflower head - steel static friction coefficient was 0.436, oil sunflower stalk shear modulus was 7.39×10^7 Pa, oil sunflower stalk - steel static friction coefficient was 0.553, and oil sunflower stalk - oil sunflower stalk

收稿日期: 2025-01-07 修回日期: 2025-01-26

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02008-5)和新疆维吾尔自治区油料产业技术体系项目(XJARS-05-11)

作者简介: 郭辉(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事油料作物智能化收获关键技术研究,E-mail: gh97026@126.com

static friction coefficient was 0.775. Simulation stacking tests were conducted on oil sunflower seeds, crushed oil sunflower heads, stalks, and mixed extracts based on each optimal parameter set. Results showed that errors between simulated and physical repose angles were 0.66%, 0.96%, 0.64% and 1.15%, respectively. These findings can serve as a reference for discrete element simulation research of combined oil sunflower harvest.

Key words: oil sunflower; combine harvest; extraction components; discrete element; parameter calibration

0 引言

油葵,又称油用向日葵,是我国四大油料作物之一,主要种植在内蒙古、新疆、河北和甘肃等地区,其中新疆地区油葵种植面积达到 $1.2137\times10^5\text{ hm}^{2[1]}$,且种植面积仍在逐年递增。因此,加快推进油葵联合收获机发展,是扩大油葵产业规模的重要保障。清选装置作为油葵联合收获机中的关键组成部件,其清选性能直接影响油葵含杂率和损失率^[2-3]。油葵在经过脱粒装置连续打击揉搓后,变成由籽粒、碎葵盘、茎秆和其余轻质杂余等组成的脱出物料,这些脱出物料在清选时相互之间会发生摩擦碰撞等运动^[4],而利用现有的传统试验不能直接获取各油葵脱出物之间的接触参数。因此,采用离散元法对联合收获油葵脱出物模型进行参数标定,可以在缩短试验时间的同时为联合收获清选仿真提供更精准的模型参数,对改进和优化清选装置有重要意义。

近年来,众多国内外学者在农业工程领域利用离散元法对多种农作物的物料特性进行了参数标定^[5-8]。文献[9-12]以食用向日葵籽粒、玉米颗粒、绿豆种子为研究对象,利用 EDEM 离散元仿真软件对各物料种子颗粒参数进行了标定;文献[15-16]以柑橘茎秆、三七茎秆、新疆棉花秸秆、香蕉秸秆为研究对象,利用 EDEM 离散元仿真软件对各物料茎秆参数进行了标定;文献[17-21]以玉米-土壤混料、食葵脱出物、油菜脱出物、燕麦-箭筈豌豆混料、玉米秸秆-牛粪混料为研究对象,利用 EDEM 离散元仿真软件对不同混料之间的参数进行了标定。综上所述,国内外学者大多是针对单一物料种子颗粒、单一物料茎秆或两种物料组成的混合物料进行标定,而对于分类标定 3 种及以上混合物料接触参数,尤其是标定不同种类油葵脱出物接触参数鲜有报道。

本文以联合收获油葵脱出物为研究对象,利用物料特性测定试验分别确定各油葵脱出物的本征参数和接触参数,采用 EDEM 2022 离散元仿真软件对各油葵脱出物进行 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验,对各油葵脱出物参数进行标定。为了使建立的油葵脱出物模型参数更精

准,对油葵籽粒进行本征参数及接触参数标定与试验。通过堆积角仿真试验验证标定参数可靠性,以期油葵联合收获离散元仿真试验提供基础参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用自走式油葵联合收获机于 2024 年 9 月在新疆农垦科学院作物研究所二轮试验地获取试验材料,收获品种为新垦油 XKY1502 油葵,平均种植密度 $15\sim18\text{ 株/m}^2$,平均株高为 $1\,863.42\text{ mm}$ 。从获取的试验材料中随机选取 $1\,000\text{ g}$ 油葵脱出物,重复 5 次。将每次选取的油葵脱出物进行分类,得到油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆和轻质杂余等 4 种成分,使用金诺 TD50002 型电子天平(精度 0.01 g)对每种脱出物进行称量,得到油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆和轻质杂余质量百分比分别为 76.21% 、 10.36% 、 7.65% 、 5.78% 。由于油葵脱出物中的轻质杂余在清选过程中会被风机直接吹出,对实际清选指标几乎没有影响,故本文只对油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆进行参数测定分析,油葵脱出物如图 1 所示。



图 1 油葵脱出物
Fig.1 Oil sunflower extracts

1.2 油葵脱出物本征参数测定

1.2.1 几何尺寸及数量百分比

从获取的油葵脱出物中随机选取油葵籽粒 300 粒 、油葵碎葵盘 100 块 和油葵茎秆 100 根 ,通过 WWS-WMS1 型数显游标卡尺(精度 0.02 mm)分别测量油葵籽粒与油葵碎葵盘长度、宽度和厚度、油葵茎秆长度和直径,将测量完成的各油葵脱出物按不同几何尺寸进行分类,并对各油葵脱出物在每个尺寸区间内频数进行统计,计算其占比,如表 1 所示。

1.2.2 含水率与密度

从获取的油葵脱出物中随机选取油葵籽粒 50 g 、

表 1 各油葵脱出物几何尺寸及数量百分比
Tab.1 Geometric size and number percentage of each oil sunflower extract

脱出物料	长度/mm	宽度/mm	厚度(茎秆直径)/mm	数量百分比/%
油葵籽粒	[10,12]	[5,7]	[3,5]	94.2
	>12	>7	>5	5.8
油葵碎葵盘	[30,40]	[20,30]	[15,25]	30.9
	(40,50]	(30,40]	[15,25]	37.6
	(50,60]	(40,50]	[15,25]	25.7
	>60	>50	>25	5.8
油葵茎秆	[25,35]		[10,12]	31.8
	(35,45]		[10,12]	33.3
	(45,55]		[10,12]	28.7
	>55		>12	6.2

油葵碎葵盘 100 g 和油葵茎秆 100 g,使用 DHG - 9240A 型电热恒温鼓风干燥箱(控温精度 ±1℃)对选取的各油葵脱出物进行干燥^[22],通过干燥前后质量得到各油葵脱出物含水率,重复 5 次。采用埋沙法^[23],利用天玻 250 mL 量筒(精度 2 mL)分别对随机选取的各油葵脱出物进行体积测量,通过测得的体积与质量计算得到各油葵脱出物密度,重复 5 次。平均含水率与密度如表 2 所示。

表 2 各油葵脱出物平均含水率与密度
Tab.2 Aaverage moisture content and density of each oil sunflower extract

脱出物料	含水率/%	密度/(kg·m ⁻³)
油葵籽粒	21.61	958
油葵碎葵盘	36.54	812
油葵茎秆	42.21	342

1.2.3 力学特性测定

在新疆智能农业装备重点实验室内进行各油葵脱出物力学特性测定。随机从获取的油葵脱出物中选取油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆作为试验对象,通过压缩试验对各油葵脱出物力学特性参数(泊松比、弹性模量、剪切模量)进行测量与计算。

使用瑞格尔 RGM - 4002 型微机控制电子万能试验机对前期选取的试验对象进行压缩试验,试验前先测量油葵脱出物初始几何尺寸,将测量后脱出物平放于万能试验机平台中心位置,利用压缩圆头(直径 100 mm)对脱出物进行压缩,其中压缩速度为 10 mm/min,试验过程如图 2 所示,压缩试验后再对油葵脱出物几何尺寸进行测量,得到压缩前后脱出物几何尺寸,每种油葵脱出物各进行 10 次试验取平均值^[24]。计算油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆平均泊松比、弹性模量和剪切模量,计算式^[19]为

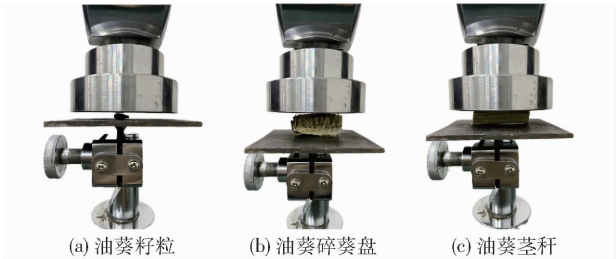


图 2 各油葵脱出物压缩试验

Fig.2 Compression test of oil sunflower extracts

$$\left\{\begin{aligned}\nu &= \left| \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon} \right| \\ \varepsilon_w &= \frac{\Delta W}{W_1} \\ \varepsilon &= \frac{\Delta T}{T_1}\end{aligned}\right. \tag{1}$$

$$\left\{\begin{aligned}E &= \frac{\sigma}{\varepsilon} \\ \sigma &= \frac{F}{A}\end{aligned}\right. \tag{2}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{3}$$

- 式中
- ν ——泊松比
- ε_w ——油葵脱出物纵向应变
- ε ——油葵脱出物横向应变
- ΔW ——油葵脱出物受压后纵向变化量,mm
- W_1 ——油葵脱出物受压前纵向初始长度,mm
- ΔT ——油葵脱出物受压后横向变化量,mm
- T_1 ——油葵脱出物受压前横向初始长度,mm
- E ——弹性模量,MPa
- σ ——最大应力,MPa
- F ——最大载荷,N
- A ——接触面积,mm²
- G ——剪切模量,MPa

计算结果如表 3 所示。

表 3 各油葵脱出物力学特性参数
Tab.3 Mechanical properties of oil sunflower extract parameters

脱出物料	泊松比	弹性模量/MPa	剪切模量/MPa
油葵籽粒	0.36	262.5	96.5
油葵碎葵盘	0.33	106.7	40.1
油葵茎秆	0.28	118.5	46.3

1.3 油葵脱出物接触参数测定

1.3.1 静摩擦因数

通过自制静摩擦因数测量装置以及带电子角度传感器的 SW - TA100 型激光测距仪(角度精度 0.1°),对不同油葵脱出物与钢材以及不同油葵脱出物相互之间的静摩擦因数进行测量^[25],测量装置如图 3 所示。

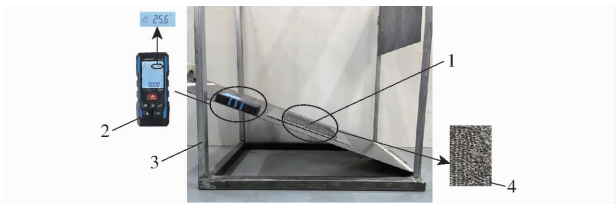


图 3 油葵脱出物静摩擦因数试验装置

Fig.3 Oil sunflower extract static friction coefficient test device

1. 待测物料 2. SW-TA100 型激光测距仪 3. 试验台 4. 物料种群板

测量开始前先将待测板放置水平位置,随后缓慢调节待测板角度,当观察到待测物料发生滑动时停止调节,并记录此时待测板倾斜角,每组试验重复 10 次(油葵碎葵盘正面和反面各重复 10 次试验取均值),通过倾斜角可计算得各物料之间的静摩擦因数,计算式为

$$f_s = \tan\alpha \tag{4}$$

式中 f_s ——静摩擦因数
 α ——切面与水平夹角, (°)

计算结果如表 4 所示。

表 4 各油葵脱出物静摩擦因数

Tab.4 Static friction coefficient of each oil sunflower extract

接触物料	最大值	最小值	平均值
钢材与油葵籽粒	0.49	0.30	0.395
钢材与油葵碎葵盘	0.56	0.36	0.460
钢材与油葵茎秆	0.68	0.24	0.460
油葵籽粒与油葵籽粒	0.76	0.64	0.700
油葵籽粒与油葵碎葵盘	0.59	0.51	0.550
油葵籽粒与油葵茎秆	0.61	0.47	0.540
油葵茎秆与油葵茎秆	0.82	0.66	0.740
油葵茎秆与油葵碎葵盘	0.89	0.83	0.860
油葵碎葵盘与油葵碎葵盘	0.90	0.82	0.860

1.3.2 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数是指碰撞后油葵脱出物水平方向速度 v_x 与碰撞前油葵脱出物垂直方向速度 v_0 比值^[26]。采用自由落体法对不同油葵脱出物碰撞恢复系数进行测定,测量原理图如图 4 所示。

试验对象从前期收集的油葵脱出物中随机选取,试验开始前,将待测油葵脱出物放置距离撞击板中心 h 的物料盒中,撞击板倾斜角设为 45° ,拉开物料盒下方钢板后,油葵脱出物在垂直方向 y 以自由落体的运动方式掉落,直至与撞击板发生碰撞。碰撞后,油葵脱出物以抛物线运动轨迹,落至于水平方向 x 距离撞击板中心 s 的粘板上,此过程假设油葵脱出物做匀变速曲线运动即平抛运动。将该曲线运动分解为水平、竖直两个方向直线运动,其中水平方

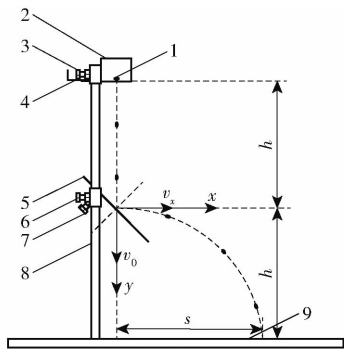


图 4 油葵脱出物碰撞恢复系数测量原理图

Fig.4 Oil sunflower extract collision recovery coefficient measurement schematic

1. 待测物料 2. 物料盒 3、6、7. 调节螺母 4. 可拉式钢板 5. 撞击板 8. 支架 9. 粘板

向做匀速直线运动,竖直方向做匀变速直线运动(即自由落体运动,初速度为零)。根据运动学原理可得

$$\begin{cases} v_0 = gt_0 \\ h = \frac{1}{2}gt_0^2 \\ s = v_x t \\ t = t_0 \end{cases} \tag{5}$$

式中 v_0 ——油葵脱出物碰撞前垂直方向速度, m/s
 t_0 ——油葵脱出物自由下落时间, s
 h ——油葵脱出物碰撞前与撞击板之间高度, m
 s ——油葵脱出物水平方向运动位移, m
 v_x ——油葵脱出物碰撞后水平方向速度, m/s
 t ——油葵脱出物碰撞后自由下落时间, s

试验利用自制试验台与高速摄像机(OLYMPUS i-SPEED TR 型)完成,每组试验重复 10 次(油葵碎葵盘正面和反面各重复 10 次试验取均值),可计算得油葵脱出物碰撞恢复系数,计算式为

$$e = \frac{v_x}{v_0} = \frac{s}{2h} \tag{6}$$

式中 e ——油葵脱出物碰撞恢复系数
计算结果如表 5 所示。

表 5 各油葵脱出物碰撞恢复系数

Tab.5 Collision recovery coefficient of each oil sunflower extract

接触物料	最大值	最小值	平均值
钢材与油葵籽粒	0.64	0.28	0.460
钢材与油葵碎葵盘	0.54	0.46	0.500
钢材与油葵茎秆	0.52	0.44	0.480
油葵籽粒与油葵籽粒	0.58	0.35	0.465
油葵籽粒与油葵碎葵盘	0.69	0.57	0.630
油葵籽粒与油葵茎秆	0.54	0.46	0.500
油葵茎秆与油葵茎秆	0.49	0.42	0.455
油葵茎秆与油葵碎葵盘	0.46	0.35	0.405
油葵碎葵盘与油葵碎葵盘	0.62	0.53	0.575

2 油葵脱出物离散元接触参数标定

2.1 堆积角试验

为验证仿真堆积角试验中各脱出物堆积角,从收集的油葵脱出物中随机选取油葵籽粒 2 000 粒、油葵碎葵盘 100 块和油葵茎秆 300 根作为试验对象,利用圆筒提升法分别对油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆以及油葵脱出物混料 500 g(油葵籽粒-油葵碎葵盘-油葵茎秆)进行堆积角试验,其中油葵籽粒所用圆筒材料为 Q235,内径为 60 mm,高度为 150 mm;油葵碎葵盘所用圆筒材料为 Q235,内径为 150 mm,高度为 300 mm;油葵茎秆以及油葵脱出物混料(油葵籽粒-油葵碎葵盘-油葵茎秆)所用圆筒

材料为 Q235,内径为 120 mm,高度为 300 mm。

试验过程中,圆筒上升速度为 0.05 m/s,待油葵脱出物堆积完全并静置 1 min 后,对其正视拍照并测量堆积斜面与水平面夹角,每组试验重复 10 次。利用 Matlab R2018a 软件对图像进行处理(灰度处理、二值化处理),再通过 bwperim 函数对二值图像进行轮廓提取^[27],各油葵脱出物图像处理过程如图 5 所示,随后将提取的边缘轮廓导入至 Origin 2022 软件,利用图像数字化工具转换为坐标数据并进行线性拟合,再将得到的斜率转换为角度,即为油葵脱出物堆积角^[28],得到油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆和油葵脱出物混料堆积角平均值分别为 31.65°、25.04°、31.43°和 32.17°。

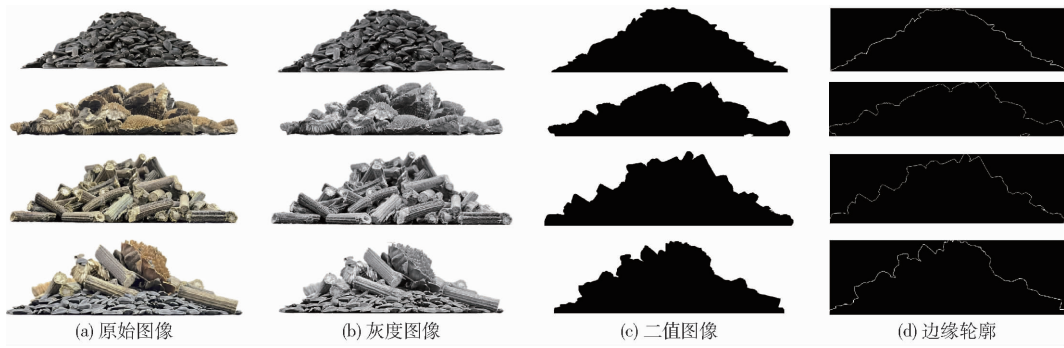


图 5 各油葵脱出物图像处理过程

Fig. 5 Image processing process of each oil sunflower extract

2.2 离散元仿真模型建立

为模拟实际脱出物堆积效果,结合前文对脱出物几何尺寸及各尺寸数量占比测量统计情况,利用 Solidworks 2020 三维建模软件对油葵籽粒和碎葵盘进行建模,根据表 1 建立油葵籽粒尺寸为 11 mm × 6 mm × 4 mm;油葵碎葵盘尺寸分别为 65 mm × 45 mm × 20 mm、55 mm × 35 mm × 20 mm、45 mm × 25 mm × 20 mm 将建立完成的油葵脱出物模型以 IGES 格式分别导入 EDEM 2022 软件中,运用自动填充方法得到油葵籽粒和油葵碎葵盘离散元模型,如图 6 所示,其中 65 mm × 45 mm × 20 mm、55 mm × 35 mm × 20 mm 和 45 mm × 25 mm × 20 mm 的油葵碎葵盘生成数量分别占总生成量的 27.3%、39.9% 和 32.8%。

为简化模型提高效率,茎秆模型采用圆形颗粒组合方式形成,根据表 1 分别建立尺寸为 50 mm × 11 mm、40 mm × 11 mm、30 mm × 11 mm,如图 6 所示,其中 50 mm × 11 mm、40 mm × 11 mm 和 30 mm × 11 mm 油葵茎秆生成数量分别占总生成量的 30.6%、35.5% 和 33.9%。

在 EDEM 2022 软件中,采用 Hertz - Mindlin(no slip)模型进行油葵脱出物仿真堆积角试验,各脱出物填充数量、钢制圆筒和底板参数均与实际堆积角试验中的数据一致,其中钢制材料泊松比、密度和剪切模量分别设置为 0.30、7 850 kg/m³、1.1 × 10¹⁰ Pa^[29]。通过前期本征参数测定结果以及文献[28,30],得出油葵脱出物堆积角仿真参数如表 6 所示,为减少试验次数,不同物料之间接触参数

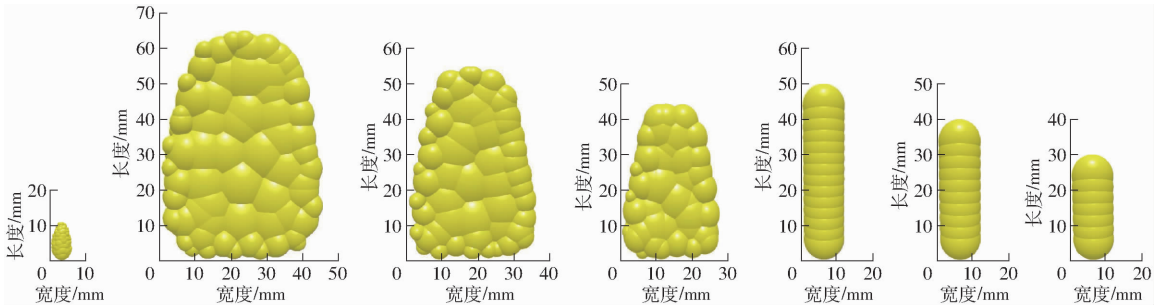


图 6 各油葵脱出物离散元模型

Fig. 6 Discrete element model of oil sunflower extracts

表 6 各油葵脱出物堆积角仿真参数

Tab.6 Simulation parameters of accumulation angle of each oil sunflower extract

参数	数值
油葵籽粒泊松比 X_1	0.3 ~ 0.5
油葵籽粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	958
油葵籽粒剪切模量 X_2/Pa	$5\times10^7\sim2\times10^8$
油葵籽粒-钢材碰撞恢复系数 X_3	0.28 ~ 0.64
油葵籽粒-油葵籽粒碰撞恢复系数 X_4	0.35 ~ 0.58
油葵籽粒-油葵碎葵盘碰撞恢复系数	0.62
油葵籽粒-油葵茎秆碰撞恢复系数	0.47
油葵籽粒-钢材静摩擦因数 X_5	0.30 ~ 0.49
油葵籽粒-油葵籽粒静摩擦因数 X_6	0.64 ~ 0.76
油葵籽粒-油葵碎葵盘静摩擦因数	0.57
油葵籽粒-油葵茎秆静摩擦因数	0.56
油葵籽粒-钢材滚动摩擦因数 ^[28]	0.05
油葵籽粒-油葵籽粒滚动摩擦因数 ^[28]	0.05
油葵籽粒-油葵碎葵盘滚动摩擦因数 ^[30]	0.02
油葵籽粒-油葵茎秆滚动摩擦因数 ^[30]	0.02
油葵碎葵盘泊松比 X_7	0.3 ~ 0.5
油葵碎葵盘密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	712
油葵碎葵盘剪切模量 X_8/Pa	$1\times10^7\sim1\times10^8$
油葵碎葵盘-钢材碰撞恢复系数 X_9	0.46 ~ 0.54
油葵碎葵盘-油葵茎秆碰撞恢复系数	0.39
油葵碎葵盘-油葵碎葵盘碰撞恢复系数 X_{10}	0.53 ~ 0.62
油葵碎葵盘-钢材静摩擦因数 X_{11}	0.36 ~ 0.56
油葵碎葵盘-油葵茎秆静摩擦因数	0.86
油葵碎葵盘-油葵碎葵盘静摩擦因数 X_{12}	0.82 ~ 0.90
油葵碎葵盘-钢材滚动摩擦因数 ^[30]	0.01
油葵碎葵盘-油葵茎秆滚动摩擦因数 ^[30]	0.02
油葵碎葵盘-油葵碎葵盘滚动摩擦因数 ^[30]	0.03
油葵茎秆泊松比 X_{13}	0.2 ~ 0.4
油葵茎秆密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	342
油葵茎秆剪切模量 X_{14}/Pa	$1\times10^7\sim1\times10^8$
油葵茎秆-钢材碰撞恢复系数 X_{15}	0.44 ~ 0.52
油葵茎秆-油葵茎秆碰撞恢复系数 X_{16}	0.42 ~ 0.49
油葵茎秆-钢材静摩擦因数 X_{17}	0.24 ~ 0.68
油葵茎秆-油葵茎秆静摩擦因数 X_{18}	0.66 ~ 0.82
油葵茎秆-钢材滚动摩擦因数 ^[30]	0.01
油葵茎秆-油葵茎秆滚动摩擦因数 ^[30]	0.01

取中值。

仿真过程中,油葵脱出物模型以自由落体的运动方式从圆筒上方颗粒工厂中动态生成,待填充完成且油葵脱出物模型完全静止后,圆筒将匀速升起,其中速度为 0.05 m/s,整个仿真过程为 5 s,油葵脱出物模型完全堆积后,测量堆积斜面与水平面的夹角,各脱出物仿真堆积角如图 7 所示。



图 7 各油葵脱出物仿真堆积角

Fig.7 Simulated accumulation angle of each oil sunflower extract

2.3 仿真模型接触参数标定

2.3.1 Plackett – Burman 试验

通过 Design-Expert 13.0.1 软件中的 Plackett – Burman 模块,以各油葵脱出物的堆积角为响应值,筛选出对各油葵脱出物堆积角影响显著的参数。将表 6 中的 $X_1\sim X_6$ 、 $X_7\sim X_{12}$ 、 $X_{13}\sim X_{18}$ 按最大值(1)、最小值(-1)进行编码,试验因素编码如表 7 所示,试验结果如表 8 所示, $x_1\sim x_6$ 、 $x_7\sim x_{12}$ 、 $x_{13}\sim x_{18}$ 为因素编码值。其中每组试验堆积角均取左右两侧堆积角平均值。

利用 Design-Expert 13.0.1 对试验结果进行方差分析,得到各参数影响效果如表 9 所示。根据贡献率进行显著性排序,在油葵籽粒堆积试验中 X_2 、 X_3 、 X_6 对堆积角的影响较为显著,在油葵碎葵盘堆积试验中 X_8 、 X_9 、 X_{11} 对堆积角的影响较为显著,在油葵茎秆堆积试验中 X_{14} 、 X_{17} 、 X_{18} 对堆积角的影响较为显著,因此对于油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆分别只考虑与之相对应的 3 个较显著的因素进行最陡爬坡试验。

2.3.2 最陡爬坡试验

为确定通过 Plackett – Burman 试验对油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆分别筛选出的 3 个显著性参数最优值,将其余各油葵脱出物中的参数分别

表 7 Plackett – Burman 试验因素编码

Tab.7 Plackett – Burman experimental factors and coding

油葵籽粒			油葵碎葵盘			油葵茎秆		
因素	编码		因素	编码		因素	编码	
	-1	1		-1	1		-1	1
X_1	0.3	0.5	X_7	0.3	0.5	X_{13}	0.2	0.4
X_2/Pa	5×10^7	2×10^8	X_8/Pa	1×10^7	1×10^8	X_{14}/Pa	1×10^7	1×10^8
X_3	0.28	0.64	X_9	0.46	0.54	X_{15}	0.44	0.52
X_4	0.35	0.58	X_{10}	0.53	0.62	X_{16}	0.42	0.49
X_5	0.30	0.49	X_{11}	0.36	0.56	X_{17}	0.24	0.68
X_6	0.64	0.76	X_{12}	0.82	0.90	X_{18}	0.66	0.82

表 8 Plackett – Burman 试验结果
Tab.8 Plackett – Burman test results

序号	油葵籽粒							油葵碎葵盘							油葵茎秆						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	堆积角/ ($^{\circ}$)	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	堆积角/ ($^{\circ}$)	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	堆积角/ ($^{\circ}$)
1	1	1	-1	1	1	1	33.74	1	1	-1	1	1	1	28.83	1	1	-1	1	1	1	35.41
2	-1	1	1	-1	1	1	36.24	-1	1	1	-1	1	1	31.76	-1	1	1	-1	1	1	34.98
3	1	-1	1	1	-1	1	34.36	1	-1	1	1	-1	1	26.65	1	-1	1	1	-1	1	29.25
4	-1	1	-1	1	1	-1	32.89	-1	1	-1	1	1	-1	30.12	-1	1	-1	1	1	-1	30.57
5	-1	-1	1	-1	1	1	32.59	-1	-1	1	-1	1	1	29.69	-1	-1	1	-1	1	1	33.56
6	-1	-1	-1	1	-1	1	33.75	-1	-1	-1	1	-1	1	24.37	-1	-1	-1	1	-1	1	27.01
7	1	-1	-1	-1	1	-1	30.71	1	-1	-1	-1	1	-1	26.23	1	-1	-1	-1	1	-1	26.91
8	1	1	-1	-1	-1	1	35.24	1	1	-1	-1	-1	1	27.72	1	1	-1	-1	-1	1	29.64
9	1	1	1	-1	-1	-1	35.74	1	1	1	-1	-1	-1	29.11	1	1	1	-1	-1	-1	26.96
10	-1	1	1	1	-1	-1	34.28	-1	1	1	1	-1	-1	27.06	-1	1	1	1	-1	-1	25.82
11	1	-1	1	1	1	-1	32.58	1	-1	1	1	1	-1	28.23	1	-1	1	1	1	-1	26.19
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	29.64	-1	-1	-1	-1	-1	-1	22.87	-1	-1	-1	-1	-1	-1	24.93

表 9 Plackett – Burman 试验参数显著性分析
Tab.9 Significance analysis of Plackett – Burman test parameters

油葵籽粒					油葵碎葵盘					油葵茎秆				
因素	标准化 效应	平方和	贡献 率/%	显著性 排序	因素	标准化 效应	平方和	贡献 率/%	显著性 排序	因素	标准化 效应	平方和	贡献 率/%	显著性 排序
X_1	0.50	0.74	1.59	5	X_7	0.15	0.07	0.10	6	X_{13}	-0.42	0.53	0.36	5
X_2/Pa	2.42	17.52	37.80	1	X_8/Pa	2.76	22.86	32.43	2	X_{14}/Pa	2.59	20.10	13.60	3
X_3	1.64	8.04	17.34	3	X_9	2.06	12.73	18.06	3	X_{15}	0.38	0.44	0.30	6
X_4	0.24	0.17	0.37	6	X_{10}	-0.35	0.38	0.53	5	X_{16}	-0.455	0.62	0.42	4
X_5	-0.71	1.51	3.26	4	X_{11}	2.85	24.31	34.49	1	X_{17}	4.00	48.04	32.51	2
X_6	1.68	8.47	18.27	2	X_{12}	0.90	2.43	3.45	4	X_{18}	4.75	67.55	45.72	1

取中间值(X_1 取 0.4, X_4 取 0.465, X_5 取 0.395, X_7 取 0.4, X_{10} 取 0.575, X_{12} 取 0.86, X_{13} 取 0.3, X_{15} 取 0.48, X_{16} 取 0.455),设计最陡爬坡试验方案,方案与结果如表 10 所示。

由表 10 可知,随着油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵籽粒各显著性参数增大,仿真堆积角与物理堆积角相对误差呈先减小后增大趋势。其中油葵籽粒在试验 2 时相对误差最小,为 3.38%;油葵碎葵盘在试验 7 时相对误差最小,为 3.55%;油葵茎秆在试验 13 时的相对误差最小,为 2.93%。故油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆分别选取试验 2、7、13 参数为中间水平,以试验 1、6、12 参数分别为低水平,以试验 3、8、14 参数分别为高水平进行后续的 Box – Behnken 试验。

2.3.3 Box – Behnken 试验

利用 Design-Expert 13.0.1 进行 Box – Behnken 试验设计,每个脱出物各进行 17 组仿真试验,试验因素编码如表 11 所示,试验方案与结果如表 12 所示。

对Box – Behnken试验结果进行多元回归拟合，

表 10 最陡爬坡试验设计方案及结果
Tab.10 Design scheme and results of the steepest climbing test

脱出物料	序号	因素			堆积角/ ($^{\circ}$)	相对误差/ %
		X_2/Pa	X_3	X_6		
油葵籽粒	1	5.000×10^7	0.28	0.64	30.02	5.15
	2	8.750×10^7	0.37	0.67	32.82	3.38
	3	1.250×10^8	0.46	0.70	34.09	7.71
	4	1.625×10^8	0.55	0.73	35.92	13.49
	5	2.000×10^8	0.64	0.76	37.09	17.19
脱出物料	序号	因素			堆积角/ ($^{\circ}$)	相对误差/ %
		X_8/Pa	X_9	X_{11}		
油葵碎葵盘	6	1.00×10^7	0.46	0.36	23.27	7.07
	7	3.25×10^7	0.48	0.41	25.93	3.55
	8	5.50×10^7	0.50	0.46	28.28	12.94
	9	7.75×10^7	0.52	0.51	30.49	21.77
	10	1.00×10^8	0.54	0.56	32.68	30.51
脱出物料	序号	因素			堆积角/ ($^{\circ}$)	相对误差/ %
		X_{14}/Pa	X_{17}	X_{18}		
油葵茎秆	11	1.00×10^7	0.24	0.66	25.05	20.30
	12	3.25×10^7	0.35	0.70	28.74	8.56
	13	5.50×10^7	0.46	0.74	30.51	2.93
	14	7.75×10^7	0.57	0.78	33.54	6.71
	15	1.00×10^8	0.68	0.82	35.62	13.33

表 11 Box – Behnken 试验因素编码

Tab. 11 Box – Behnken experimental factors and coding

脱出物料	编码	因素		
		X_2/Pa	X_3	X_6
油葵籽粒	−1	5.000×10^7	0.28	0.64
	0	8.750×10^7	0.37	0.67
	1	1.250×10^8	0.46	0.70
脱出物料	编码	因素		
		X_8/Pa	X_9	X_{11}
油葵碎葵盘	−1	1.00×10^7	0.46	0.36
	0	3.25×10^7	0.48	0.41
	1	5.50×10^7	0.50	0.46
脱出物料	编码	因素		
		X_{14}/Pa	X_{17}	X_{18}
油葵茎秆	−1	3.25×10^7	0.35	0.70
	0	5.50×10^7	0.46	0.74
	1	7.75×10^7	0.57	0.78

表 12 Box – Behnken 试验方案与结果

Tab. 12 Box – Behnken experimental design and results

序号	油葵籽粒					油葵碎葵盘					油葵茎秆				
	x_2	x_3	x_6	堆积角/ (°)	相对误差/ %	x_8	x_9	x_{11}	堆积角/ (°)	相对误差/ %	x_{14}	x_{17}	x_{18}	堆积角/ (°)	相对误差/ %
1	−1	−1	0	30.42	3.89	−1	−1	0	23.12	7.67	−1	−1	0	28.44	9.51
2	1	−1	0	33.83	6.89	1	−1	0	28.43	13.54	1	−1	0	33.35	6.11
3	−1	1	0	31.07	1.83	−1	1	0	25.57	2.12	−1	1	0	29.89	4.90
4	1	1	0	33.85	6.95	1	1	0	27.58	10.14	1	1	0	33.08	5.25
5	−1	0	−1	29.32	7.36	−1	0	−1	23.37	6.67	−1	0	−1	27.24	13.33
6	1	0	−1	32.89	3.92	1	0	−1	26.02	3.91	1	0	−1	32.05	1.97
7	−1	0	1	30.48	3.70	−1	0	1	24.52	2.08	−1	0	1	27.96	11.04
8	1	0	1	33.93	7.20	1	0	1	28.18	12.54	1	0	1	33.13	5.41
9	0	−1	−1	30.06	5.02	0	−1	−1	23.91	4.51	0	−1	−1	27.42	12.76
10	0	1	−1	33.56	6.04	0	1	−1	26.62	6.31	0	1	−1	30.93	1.59
11	0	−1	1	33.86	6.98	0	−1	1	27.15	8.43	0	−1	1	30.71	2.29
12	0	1	1	34.06	7.62	0	1	1	25.68	2.56	0	1	1	28.72	8.62
13	0	0	0	32.53	2.78	0	0	0	25.76	2.88	0	0	0	30.61	2.61
14	0	0	0	32.87	3.85	0	0	0	26.24	4.79	0	0	0	30.09	4.26
15	0	0	0	32.90	3.95	0	0	0	25.83	3.16	0	0	0	30.34	3.47
16	0	0	0	32.79	3.60	0	0	0	25.97	3.71	0	0	0	29.83	5.09
17	0	0	0	31.99	1.07	0	0	0	25.80	3.04	0	0	0	30.66	2.45

由表 13 可知,油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆回归模型 P 分别为 0.001 9、<0.000 1 和 <0.000 1,各油葵脱出物回归模型均极显著 ($P < 0.01$);失拟项分别为 0.101 7、0.212 2 和 0.362 5,各油葵脱出物失拟项均不显著 ($P > 0.05$);决定系数 R^2 分别为 0.938 1、0.988 5 和 0.982 6,决定系数均接近 1,表示各油葵脱出物的回归方程拟合程度均较好。交互项 X_3X_6 对油葵籽粒堆积角影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$),交互项 X_8X_9 和 X_9X_{11} 对油葵碎葵盘堆积角影响极显著 ($P < 0.01$),交互项 $X_{17}X_{18}$ 对油葵茎秆堆积角影响极显著 ($P < 0.01$),油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆变异系数分别为 1.79%、0.95% 和

分别以各油葵脱出物对应的 3 个显著性参数为自变量,以各油葵脱出物的堆积角为响应值,得到油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆堆积角二元回归方程分别为

$$R_1 = 32.62 + 1.65x_2 + 0.5463x_3 + 0.8125x_6 - 0.1575x_2x_3 - 0.03x_2x_6 - 0.825x_3x_6 - 0.7768x_2^2 + 0.4532x_3^2 - 0.1842x_6^2 \quad (7)$$

$$R_2 = 25.92 + 1.70x_8 + 0.355x_9 + 0.7012x_{11} - 0.825x_8x_9 + 0.2525x_8x_{11} - 1.05x_9x_{11} - 0.0313x_8^2 + 0.2862x_9^2 - 0.3662x_{11}^2 \quad (8)$$

$$R_3 = 30.31 + 2.26x_{14} + 0.3375x_{17} + 0.36x_{18} - 0.43x_{14}x_{17} + 0.09x_{14}x_{18} - 1.38x_{17}x_{18} + 0.767x_{14}^2 + 0.117x_{17}^2 - 0.978x_{18}^2 \quad (9)$$

1.26%,表示各油葵脱出物试验具有较高可靠性,精确度分别为 11.61、26.79 和 21.15,说明各油葵脱出物试验精确度较高。

应用 Design-Expert 13.0.1 软件分别绘制油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆对应的 3 个显著性因素交互作用堆积角响应曲面,如图 8 所示。

由图 8a 可知,当 X_2 或 X_3 一定时,响应值随着 X_3 或 X_2 增加呈上升趋势;由图 8b 可知,当 X_2 或 X_6 一定时,响应值随着 X_6 或 X_2 增加均呈上升趋势;由图 8c 可知,当 X_3 一定时,响应值随着 X_6 增加呈上升趋势,但随着 X_3 增加,响应值上升趋势变缓。当 X_6 一定时,响应值随着 X_3 增加而增加,但随着 X_6 增加,

表 13 Box – Behnken 试验回归模型方差分析

Tab.13 Box – Behnken test regression model analysis of variance

油葵籽粒					油葵碎葵盘					油葵茎秆				
方差来源	均方	自由度	平方和	P	方差来源	均方	自由度	平方和	P	方差来源	均方	自由度	平方和	P
模型	3.97	9	35.74	0.0019**	模型	4.04	9	36.38	<0.0001**	模型	6.38	9	57.38	<0.0001**
X_2	21.81	1	21.81	<0.0001**	X_8	23.22	1	23.22	<0.0001**	X_{14}	40.86	1	40.86	<0.0001**
X_3	2.39	1	2.39	0.0324*	X_9	1.01	1	1.01	0.0047**	X_{17}	0.911	1	0.911	0.0404*
X_6	5.28	1	5.28	0.0055**	X_{11}	3.93	1	3.93	<0.0001**	X_{18}	1.04	1	1.04	0.0317*
X_2X_3	0.10	1	0.10	0.6043	X_8X_9	2.72	1	2.72	0.0003**	$X_{14}X_{17}$	0.74	1	0.74	0.0583
X_2X_6	0.004	1	0.004	0.9206	X_8X_{11}	0.26	1	0.26	0.0794	$X_{14}X_{18}$	0.03	1	0.03	0.6505
X_3X_6	2.72	1	2.72	0.0250*	X_9X_{11}	4.37	1	4.37	<0.0001**	$X_{17}X_{18}$	7.56	1	7.56	0.0002**
X_2^2	2.54	1	2.54	0.0287*	X_8^2	0.004	1	0.004	0.8020	X_{14}^2	2.48	1	2.48	0.0044**
X_3^2	0.87	1	0.87	0.1532	X_9^2	0.35	1	0.35	0.0485*	X_{17}^2	0.06	1	0.06	0.5481
X_6^2	0.14	1	0.14	0.5357	X_{11}^2	0.57	1	0.57	0.0185*	X_{18}^2	4.03	1	4.03	0.0012**
残差	0.34	7	2.36		残差	0.06	7	0.42		残差	0.15	7	1.01	
失拟项	0.60	3	1.78	0.1017	失拟项	0.09	3	0.27	0.2122	失拟项	0.17	3	0.52	0.3625
误差	0.14	4	0.58		误差	0.04	4	0.15		误差	0.12	4	0.49	
总和		16	38.10		总和		16	36.81		总和		16	58.39	

注：**表示影响极显著($P<0.01$)；*表示影响显著($0.01\leq P<0.05$)。

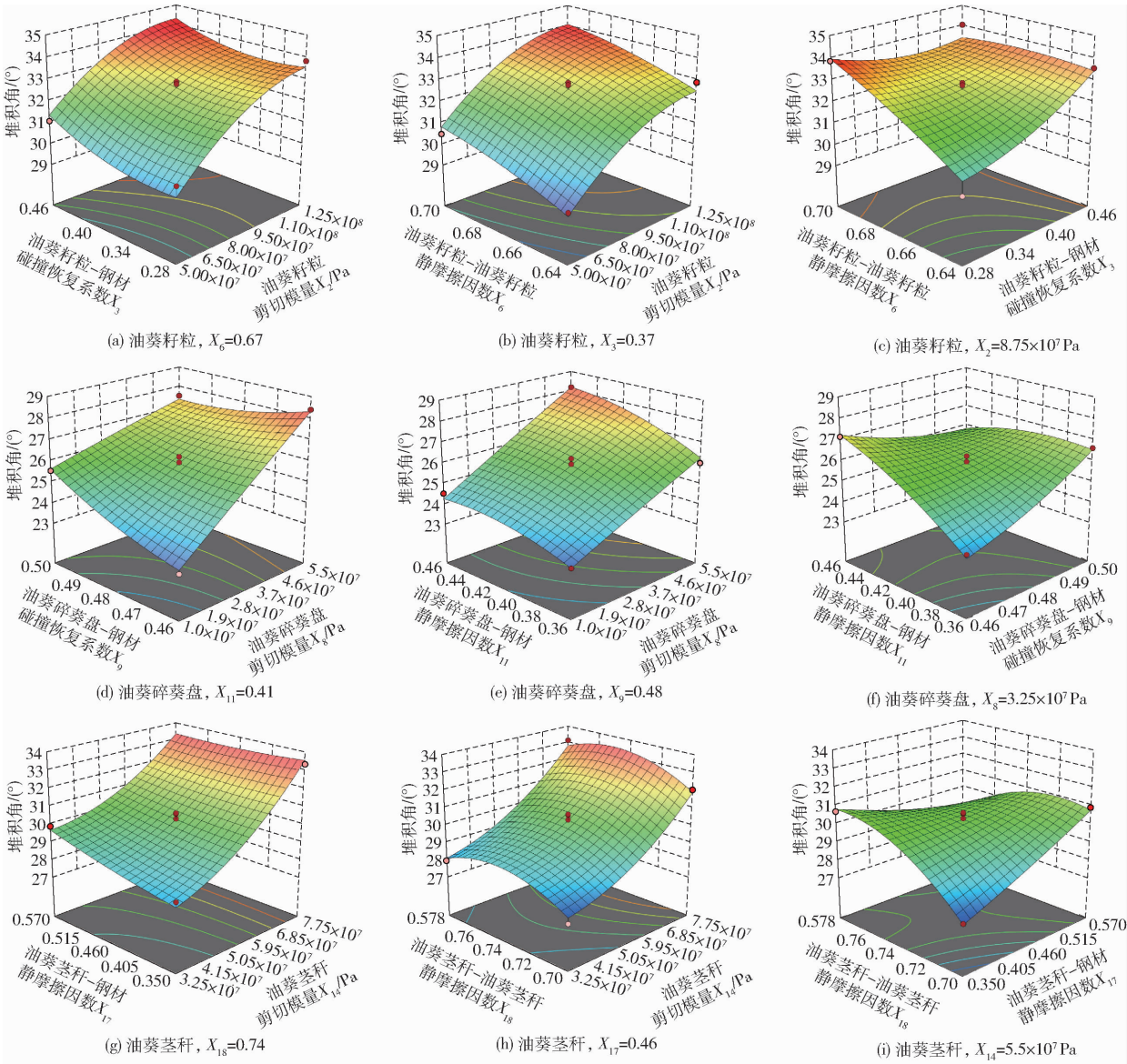


图 8 各油葵脱出物交互响应曲面

Fig.8 Interactive response surfaces of each oil sunflower extract

响应值上升趋势逐渐变为下降趋势。

由图 8d 可知,当 X_8 一定时,响应值随着 X_9 增加而增加,但随着 X_8 增加,响应值上升趋势逐渐变为下降趋势。当 X_9 一定时,响应值随着 X_8 增加呈上升趋势,但随着 X_9 增加,响应值上升趋势变缓;由图 8e 可知,当 X_8 或 X_{11} 一定时,响应值随着 X_{11} 或 X_8 增加呈上升趋势;由图 8f 可知,当 X_9 一定时,响应值随着 X_{11} 增加呈上升趋势,但随着 X_9 增加,响应值上升趋势逐渐变为下降趋势。当 X_{11} 一定时,响应值随着 X_9 增加呈上升趋势,但随着 X_{11} 增加,响应值上升趋势逐渐变为下降趋势。

由图 8g 可知,当 X_{14} 一定时,响应值随着 X_{17} 增加呈上升趋势,但随着 X_{14} 增加,响应值上升趋势逐渐变为下降趋势。当 X_{17} 一定时,响应值随着 X_{14} 的增加呈上升趋势。由图 8h 可知,当 X_{14} 一定时,响应值随着 X_{18} 增加呈先上升后下降的趋势。当 X_{18} 一定时,响应值随着 X_{14} 增加呈上升趋势;由图 8i 可知,当 X_{17} 一定时,响应值随着 X_{18} 增加呈上升趋势,但随着 X_{17} 增加,响应值上升趋势逐渐变为下降趋势。当 X_{18} 一定时,响应值随着 X_{17} 增加呈上升趋势,但随着 X_{18} 增加,响应值上升趋势逐渐变为下降趋势。

3 堆积角仿真试验与验证

利用 Design-Expert 13.0.1 软件中的优化模块,以各油葵脱出物物理堆积角为目标值进行寻优,在油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆中各得到一组与物理堆积角较为相近的一组解,即油葵籽粒剪切模量 X_2 为 7.35×10^7 Pa、油葵籽粒-钢材碰撞恢复系数 X_3 为 0.295、油葵籽粒-油葵籽粒静摩擦因数 X_6 为 0.669;油葵碎葵盘剪切模量 X_8 为 1.94×10^7 Pa、油葵碎葵盘-钢材碰撞恢复系数 X_9 为 0.467、油葵碎葵盘-钢材静摩擦因数 X_{11} 为 0.436;油葵茎秆剪切模量 X_{14} 为 7.39×10^7 Pa、油葵茎秆-钢材静摩擦因数 X_{17} 为 0.553、油葵茎秆-油葵茎秆静摩擦因数 X_{18} 为 0.775。

在 EDEM 2022 中设置上述较优参数,其余接触参数取中间水平,油葵籽粒(2 000 粒)、油葵碎葵盘(100 块)、油葵茎秆(300 根)以及油葵脱出物混料(500 g)仿真堆积角如图 9 所示,其中油葵脱出物混料中油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆按 1.1 节中的质量百分比在颗粒工程中生成,生成百分比分别为 80%、11% 和 8%。试验重复 3 次,堆积角取平均值如表 14 所示。

由表 14 可知,油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆和油葵脱出物混料的仿真堆积角与物理堆积角相对误差分别为 0.66%、0.96%、0.64%、1.15%。结果

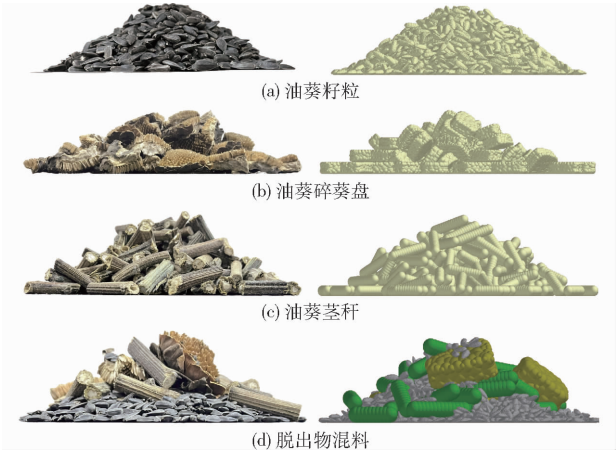


图 9 物理堆积角与仿真堆积角验证
Fig. 9 Physical stacking angle and simulation stacking angle verification

表 14 各油葵脱出物堆积角验证结果
Tab. 14 Verification results of stacking angle of each oil sunflower extract

试验对象	仿真堆积角/ (°)	物理堆积角/ (°)	相对误差/ %
油葵籽粒	31.86	31.65	0.66
油葵碎葵盘	25.28	25.04	0.96
油葵茎秆	31.23	31.43	0.64
脱出物混料	32.54	32.17	1.15

表明,用各油葵脱出物的模型标定接触参数具有可靠性。

4 结论

(1) 以油葵联合收获期脱出物(油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆)为研究对象,通过物理试验对各油葵脱出物进行了本征参数和接触参数测定。测得钢材与籽粒、碎葵盘、茎秆静摩擦因数分别为 0.30 ~ 0.49、0.36 ~ 0.56、0.24 ~ 0.68;籽粒与籽粒、碎葵盘、茎秆静摩擦因数分别为 0.64 ~ 0.76、0.51 ~ 0.59、0.47 ~ 0.61;茎秆与茎秆、碎葵盘静摩擦因数分别为 0.66 ~ 0.82、0.83 ~ 0.89;碎葵盘与碎葵盘静摩擦因数为 0.82 ~ 0.90;钢材与籽粒、碎葵盘、茎秆碰撞恢复系数分别为 0.28 ~ 0.64、0.46 ~ 0.54、0.44 ~ 0.52;籽粒与籽粒、碎葵盘、茎秆碰撞恢复系数分别为 0.35 ~ 0.58、0.57 ~ 0.69、0.46 ~ 0.54;茎秆与茎秆、碎葵盘碰撞恢复系数分别为 0.42 ~ 0.49、0.35 ~ 0.46;碎葵盘与碎葵盘碰撞恢复系数为 0.53 ~ 0.62。

(2) 通过 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验确定了对各油葵脱出物堆积角影响显著参数及取值范围。利用 Design-Expert 13.0.1 进行三因素三水平响应曲面试验设计,分别建立各油葵脱出物堆积角与显著性参数之间的回归

模型,对各回归模型进行方差分析以及交互效应分析。

(3)以油葵籽粒、油葵碎葵盘和油葵茎秆物理堆积角为目标进行寻优,得到油葵籽粒显著性参数较优组合为油葵籽粒剪切模量为 7.35×10^7 Pa、油葵籽粒-钢材碰撞恢复系数为 0.295、油葵籽粒-油葵籽粒静摩擦因数为 0.669;油葵碎葵盘显著性参数较优组合为油葵碎葵盘剪切模量为 1.94×10^7 Pa、油葵碎葵盘-钢材碰撞恢复系数为 0.467、油葵碎葵

盘-钢材静摩擦因数为 0.436;油葵茎秆显著性参数较优组合为油葵茎秆剪切模量为 7.39×10^7 Pa、油葵茎秆-钢材静摩擦因数为 0.553、油葵茎秆-油葵茎秆静摩擦因数为 0.775。利用各显著性参数较优组合对油葵籽粒、油葵碎葵盘、油葵茎秆和油葵脱出物混料进行仿真堆积角试验,与物理堆积角误差为 0.66%、0.96%、0.64%、1.15%。验证试验结果表明,标定的各油葵脱出物离散元仿真参数可为油葵联合收获过程中的机械化操作仿真提供参考价值。

参 考 文 献

[1] 新疆维吾尔自治区统计局,国家统计局新疆调查总队. 新疆统计年鉴. 2021[M]. 北京:中国统计出版社,2021.

[2] 张学军,张云赫,史增录,等. 油葵联合收获机清选装置结构优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):103-113. ZHANG Xuejun, ZHANG Yunhe, SHI Zenglu, et al. Optimization and experiment of oil sunflower combined harvester cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 103-113. (in Chinese)

[3] 郝建军,魏文波,秦家辉,等. 切流式油葵脱粒筛分机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):139-148. HAO Jianjun, WEI Wenbo, QIN Jiahui, et al. Design and test of cut-flow type oil sunflower threshing and screening machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 139-148. (in Chinese)

[4] 马少腾,张学军,朱兴亮,等. 油葵联合收获机脱粒装置的设计[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(3):176-181. MA Shaoteng, ZHANG Xuejun, ZHU Xingliang, et al. Design of threshing device for oil sunflower combine harvester [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(3): 176-181. (in Chinese)

[5] LI D, WANG R, ZHU Y, et al. Calibration of simulation paramecers for fresh tea leaves based on the discrete element method [J]. Agriculture, 2024, 14(1):148.

[6] ZHAO Z, WU M, JIANG X. A review of contact models' properties for discrete element simulation in agricultural engineering [J]. Agriculture, 2024, 14(2): 238.

[7] LI S, HUAN X, WANG T, et al. Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108644.

[8] 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)

[9] WANG Shuai, YU Zhihong, ZHANG Wenjie. Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107012.

[10] ZHAO Xuan, BAI Hongbin, LIU Fei, et al. DEM modelling methods and trait analysis of sunflower seed [J]. Biosystems Engineering, 2025, 250: 39-48.

[11] 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 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (Supp. 1): 69-77. (in Chinese)

[12] 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)

[13] WANG Yi, ZHANG Yitan, YANG Yan, et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification [J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 400-414.

[14] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等. 三七茎秆离散元参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(11):61-70,91. ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61-70, 91. (in Chinese)

[15] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):76-84,108. ZHANG Jiayi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76-84, 108. (in Chinese)

[16] 张喜瑞,胡旭航,刘俊孝,等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(5):121-130. ZHANG Xirui, HU Xuhan, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5):

121 – 130. (in Chinese)

[17] ZHOU Long, DONG Qiu, YU Jianqun, et al. Validation and calibration of maize seed-soil inter-parameters based on the discrete element method[J]. Agronomy, 2023, 13:2115.

[18] SUN Xiaoxiao, LI Bin, LIU Yang, et al. Parameter measurement of edible sunflower exudates and calibration of discrete element simulation parameters[J]. Processes, 2022,10:185.

[19] 舒彩霞, 杨佳, 万星宇,等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 34 – 43. SHU Caixia, YANG Jia, WAN Xingyu, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 34 – 43. (in Chinese)

[20] 廖洋洋, 尤泳, 王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 14 – 22. LIAO Yangyang, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration and experiment of discrete element model for mixed seeds of oat and arrow pea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 14 – 22. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 张云赫. 油葵联合收获机清选装置的设计与试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. ZHANG Yunhe. Design and experimental study of cleaning device for oil sunflower combine harvester[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[23] 马少腾, 朱兴亮, 张学军,等. 油葵籽粒物理特性的测定[J]. 农机化研究, 2020, 42(8): 192 – 196. MA Shaoteng, ZHU Xingliang, ZHANG Xuejun, et al. Determination of physical properties of oil sunflower seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 192 – 196. (in Chinese)

[24] KHODABAKHSHIAN R. Poisson’s ratio of pumpkin seeds and their kernels as a function of variety, size, moisture content and loading rate[J]. Agricultural Engineering International the CIGR Journal, 2012, 14(3): 203 – 209.

[25] 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 Zhanfeng, DAI Nianzu, CHEN Zhi, et al. Measurement of physical parameters of Agropyron seeds and parameter calibration of discrete element simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 46 – 54. (in Chinese)

[26] 彭才望, 周婷, 宋世圣,等. 基于 Herz 接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 125 – 134. PENG Caiwang, ZHOU Ting, SONG Shisheng, et al. Measurement and analysis of restitution coefficient of black soldier fly larvae in collision models based on Hertz contact theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 125 – 134. (in Chinese)

[27] MILLER D, FIMBINGER E, BRAND C. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis[J]. Powder Technology, 2021, 383: 598 – 605.

[28] 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 CSAE, 2021, 37(12): 36 – 44. (in Chinese)

[29] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳,等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27 – 35. WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27 – 35. (in Chinese)

[30] 孙晓晓. 食葵收获机清选装置的设计与试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022. SUN Xiaoxiao. Design and experimental study on cleaning device of edible sunflower harvester[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)