

基于非球形颗粒模型的胡麻脱粒物振动分选仿真与试验

宋学锋, 戴飞^{*}, 史瑞杰, 王锋, 张锋伟, 赵武云

(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为提高仿真中胡麻脱粒物形状真实程度, 减小仿真建模误差, 该研究基于开源离散元法框架, 采用超二次曲面单元法建立了胡麻脱粒物不同组分的非球形颗粒, 对多级振动筛分过程进行了仿真与试验研究。研究中分析了一级筛、二级筛的筛面物料分布情况、不同物料的透筛率及含杂率, 并开展了试验验证。仿真结果表明: 超二次曲面法建立的非球形颗粒能很好地模拟真实物料的物理特性; 一级筛中籽粒、短茎秆透筛率分别为 99.08%、66.49%, 蒴果可被分选; 二级筛中籽粒、短茎秆透筛率分别为 96.38%、4.79%, 短茎秆可被分选。被分选的物料在激振作用下可在对应的筛面发生利于筛分的迁移。不同物料的含杂率统计结果分别为籽粒 4.87%, 短茎秆 21.95%, 蒴果 3.38%。验证试验结果表明, 胡麻脱粒物不同组分的透筛率、含杂率仿真与试验值的相对偏差均小于 10%。研究结果证明超二次曲面法建立的非球形颗粒模型适用于振动分选作业。

关键词: 离散元法; 试验; 振动; 非球形颗粒; 胡麻; 超二次曲面单元

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.005

中图分类号: S225.99

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0039-08

宋学锋, 戴飞, 史瑞杰, 等. 基于非球形颗粒模型的胡麻脱粒物振动分选仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 39-46. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.005 http://www.tcsae.org

Song Xuefeng, Dai Fei, Shi Ruijie, et al. Simulation and experiment of the vibration separation of flax threshing material using non-spherical particles model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 39-46. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.005 http://www.tcsae.org

0 引言

胡麻 (*Linum usitatissimum* L.) 又称亚麻, 是一年生或多年生的草本植物, 作为最古老的种植作物之一, 被广泛用于油脂、纺织和食品工业^[1]。甘肃省是中国重要的胡麻种植区, 种植面积约占全国 30% 以上^[2]。现阶段胡麻收获过程仍以分段收获为主, 胡麻收获后还需进行分离清选作业, 以去除籽粒中的杂余。然而, 因人工劳动强度大、收获作业及产后加工机械化装备率低等问题, 严重制约了中国胡麻产业化发展进程^[3]。

谷物分选是联合收获机田间作业的核心步骤^[4], 也是产后加工环节中去除杂质的重要手段。振动筛分是主要的谷物分选方式之一, 其不需考虑筛分对象的悬浮速度, 筛分设备结构简单, 驱动方式易实现, 具有非常广泛的适用性。目前在花生收获机^[5]、玉米籽粒收获机^[6]、田螺脱壳清洗机^[7]、大白菜种子收获机^[8]及其他常见的谷物联合收获机^[9]中广泛使用。在振动筛分研究中, 离散元法 (Discrete Element Method, DEM) 建模技术是常被采用的一种辅助研究手段, 该方法可建立农业生产中不同的

物料形状, 如杂交稻种子^[10-12]、小麦籽粒^[13]、玉米籽粒^[14]、玉米茎秆^[14]等。然而, 以上物料及茎秆形状均采用多球面聚合法进行构建, 在结构上与真实物料具有一定差异, 导致计算过程耗时久、数据量大、颗粒形状拟合度低等问题出现。相比较而言, 超二次曲面颗粒建模技术则具有更高的形状拟合度及更高效的计算效率。根据相关学者在堆积试验中得出的研究结论, 颗粒模型的多球面数量与仿真耗时成正比, 球面数量变化可显著影响仿真时间; 但超二次曲面构建的物料形状拟合度更高, 改变颗粒形状对仿真耗时显著性影响较小^[15]。此外, 在转鼓试验中也得出相同的结论。如果减少球面数量, 则会缩短仿真耗时, 但此过程将会降低计算结果精度^[16]; 如果增加球面数量可提高颗粒形状拟合度, 但却比使用超二次曲面颗粒仿真耗时更久^[17]。所以, 采用更加准确及高效的颗粒形状建模方法对振动筛分模拟研究具有重要意义。

本研究基于开源 DEM 框架, 拟采用超二次曲面建模技术构建胡麻脱粒物不同组分的非球形颗粒, 对脱粒物在振动分选过程中的筛面分布、透筛率及含杂率进行量化研究, 获取胡麻脱粒物不同组分振动分选特性数据及规律, 并且开展验证试验, 以证明超二次曲面构建非球形颗粒在振动筛分仿真中的准确性, 为胡麻及小籽粒谷物振动分选机设计提供参考。

1 非球形颗粒模型

1.1 超二次曲面控制方程

超二次曲面是在椭球形方程基础上拓展得到的, 最

收稿日期: 2022-01-26 修订日期: 2022-04-22

基金项目: 甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目 (Gaufx-03Y01); 甘肃农业大学青年导师基金项目 (GAU-QDFC-2021-08); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目 (CARS-14-1-28)。

作者简介: 宋学锋, 讲师, 研究方向为农业物料流中数学建模与计算机仿真。Email: songxf@gsau.edu.cn

*通信作者: 戴飞, 副教授, 博士, 研究方向为小差异混杂特色经济作物收获。Email: daifei@gsau.edu.cn

早是由 Barr^[18]在 1981 年提出,可以很好的描述空间类球形颗粒凸面与凹面形状,根据不同物料的形状只需调节形状控制方程中相关参数即可,相较于传统多球面聚合方法建立颗粒模型更加便捷及准确。目前在农业物料领域可对块状、棒状、片状、椭球状物料进行仿真研究。超二次曲面控制方程^[19]如下:

$$f(x, y, z) = \left(\left| \frac{x}{a} \right|^{n_1} + \left| \frac{y}{b} \right|^{n_2} \right)^{\frac{n_1}{n_2}} + \left| \frac{z}{c} \right|^{n_1} - 1 = 0 \quad (1)$$

式中 x 、 y 、 z 分别表示 3 个空间坐标值; a 、 b 和 c 是颗粒在 3 个空间方向的半轴长, mm; n_1 和 n_2 为控制颗粒形状的参数。

式(1)中 n_1 和 n_2 取不同值时可得到不同的空间几何形状。当 $n_1 = n_2$ 时, 将得到椭球形; 当 $n_1 \gg 2$, 而 $n_2 = 2$ 时, 将得到圆柱形几何体; 当 $n_2 \gg 2$, 而 $n_1 = 2$ 时, 将得到块状几何体; 本研究中胡麻脱粒物主要包含片状籽粒、圆柱状短茎秆、椭球状蒴果, 结构形态上符合超二次曲面方程控制的几何形态, 因此采用式(1)控制生成胡麻脱粒物的不同组分。

1.2 颗粒间接触判断及接触力

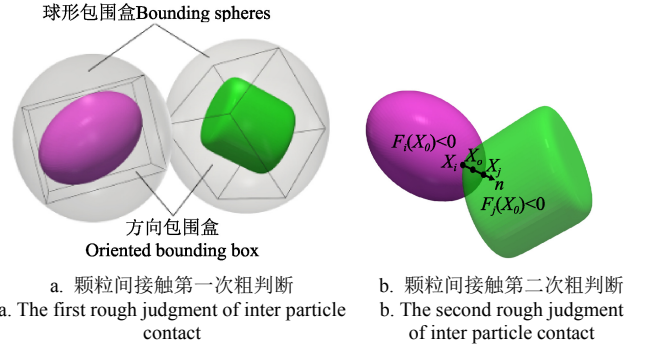
在离散元法中, 颗粒的直线运动和旋转运动遵守牛顿第二定律, 颗粒受到外力作用后发生位移变化。在计算颗粒受力之前, 必需先进行接触判断, 以确定计算域中颗粒与颗粒、颗粒与几何体的接触关系。相邻接触判断对于计算颗粒受力是第一个过程。在球形颗粒接触判断时, 因其表面任一点到球心距离都相等, 所以只需比较颗粒中心距与两颗粒半径和就可判断两颗粒是否接触。然而非球形颗粒形状较复杂, 表面点距颗粒中心并不相等, 所以, 在接触判断中不能采用与球形颗粒一样的接触判断算法^[19]。并且, 因非球形颗粒的复杂性, 对颗粒间的搜索所消耗的时间将占据大部分的求解计算时间, 计算效率也受到颗粒形状、搜索算法、边界条件等的直接影响^[19]。现有学者已提出了适用于不同工况的接触算法, 如邻居列表法^[20], 关联单元法^[21], 无二分搜寻法^[22]以及 Munjiza-Rougier 线性接触检测算法^[23]。本研究采用目前较成熟的非球形颗粒接触判断算法, 首先球形包围盒包裹超二次曲面颗粒进行颗粒间第一次接触粗判断(图 1a), 该接触判断过程中基于球形颗粒接触判断理论。方向包围盒对颗粒间接触作用进行第二次粗判断, 若两颗粒在空间向量上的投影发生重叠, 则判为接触(图 1b)。经过前两个过程的接触粗判断后, 非线性牛顿迭代方程作为颗粒间第三次接触判断。

在计算颗粒间重叠量时采用中间接触算法^[24], 接触非线性方程^[25]可表示为

$$\begin{cases} \nabla F_i(\mathbf{X}) + \lambda^2 \nabla F_j(\mathbf{X}) = 0 \\ \nabla F_i(\mathbf{X}) - \nabla F_j(\mathbf{X}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{X} = (x, y, z)^T$, 为颗粒表面点坐标集, mm; $\nabla F(\mathbf{X})$ 为超二次曲面方程的一阶导函数; λ^2 为非负倍数; i 和 j 分别为不同的颗粒。

当颗粒接触后, 重叠部分的中点 \mathbf{X}_0 满足 $F_i(\mathbf{X}_0) = F_j(\mathbf{X}_0) < 0$, 即表示颗粒发生了接触^[26](图 1b)。



注: \mathbf{X}_0 为颗粒 i 和 j 接触重叠量的中点; \mathbf{X}_i 和 \mathbf{X}_j 分别为颗粒 i 和颗粒 j 表面坐标; F_i 和 F_j 分别为颗粒 i 和 j 的超二次曲面控制方程。
Note: \mathbf{X}_0 is the midway of the contact overlap of particles i and j ; \mathbf{X}_i and \mathbf{X}_j are the coordinates of the surface points of particles i and j , respectively; F_i and F_j are super-quadratic equations for particles i and j , respectively.

图 1 颗粒间接触判断过程

Fig.1 Determination process of inter particle contact

颗粒间一旦发生接触, 便伴随着相互作用的力与力矩发生。非球形颗粒间接触力学模型由球形颗粒接触力学模型发展而来, 力与力矩的计算采用非线性弹性-阻尼模型。颗粒间法向力 $F_{n,ij}$ 由法向弹性力 $F_{n,ij}^e$ 与法向阻尼力 $F_{n,ij}^d$ 组成, 计算式分别为^[26]

$$F_{n,ij}^e = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

$$F_{n,ij}^d = C_n \left(8m^* E^* \sqrt{R^*} \delta_n \right)^{\frac{1}{2}} \cdot v_{n,ij} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} E^* = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \\ R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \\ m^* = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \end{cases} \quad (5)$$

式中 E^* 为等效颗粒弹性模量, MPa; R^* 为等效颗粒半径, mm; m^* 为等效颗粒质量, kg; E 为颗粒材料的弹性模量, MPa; ν 为颗粒材料的泊松比; R_i 、 R_j 分别为颗粒 i 与颗粒 j 在局部接触点处曲率半径, mm; δ_n 为法向重叠量, mm; C_n 为法向阻尼系数; m_i 、 m_j 为颗粒 i 与颗粒 j 的质量, kg; $v_{n,ij}$ 为法向相对速度, m/s。

颗粒间切向力 $F_{t,ij}$ 由切向弹性力 $F_{t,ij}^e$ 与切向阻尼力 $F_{t,ij}^d$ 组成, 计算式分别为

$$F_{t,ij}^e = \mu_s \left| F_{n,ij}^e \right| (1 - (1 - \min(\delta_t, \delta_{t,max}) / \delta_{t,max})^{\frac{3}{2}}) \cdot \bar{\mathbf{t}} \quad (6)$$

$$F_{t,ij}^d = C_t (6\mu_s m^* \left| F_{n,ij}^e \right| \sqrt{1 - \min(\delta_t, \delta_{t,max}) / \delta_{t,max}})^{\frac{1}{2}} \cdot v_{t,ij} \quad (7)$$

式中 μ_s 为滑动摩擦系数; δ_t 为切向相对位移, mm; $\delta_{t,max}$ 为切向最大位移量, mm; $\bar{\mathbf{t}}$ 为切向单位矢量, mm; C_t

为切向粘滞系数； $v_{t,ij}$ 为单元间切向相对速度，m/s。

当颗粒间发生相对滚动时，摩擦作用会产生滚动摩擦转矩 $M_{r,ij}$ ，其计算式为

$$M_{r,ij} = \mu_r R_i \left| F_{n,ij} \right| \hat{\omega}_{ij} \tag{8}$$

式中 μ_r 为滚动摩擦系数； $\hat{\omega}_{ij}$ 为相对转速，rad/s。

1.3 仿真参数设置

为减少非球形颗粒在计算中产生的存储数据量并提高仿真速度，双层振动筛分选作业中共生成 5 000 个非球形物料，其中籽粒体积分数占 80%，茎秆占 10%，蒴果占 10%，对应的籽粒数量共 3 148 个，茎秆 1 728 个，蒴果 124 个。颗粒间接触力计算时，选择适用于超二次曲面颗粒的 Gran surface super-quadric model 非线性模型计算颗粒间不同接触情况下的力与力矩，该模型是在传统 Hertz-Mindling 接触模型基础上改进所得。接触力计算时，由接触模型计算非球形颗粒接触点处平均曲率或高斯曲率做为Hertz接触模型中所需的颗粒半径。其中法向力包括弹性和阻尼力，切向力包括剪切力和阻尼力，此时的剪切力即为颗粒接触时切向位移的体现。此外，设置振动筛工作频率为 5 Hz，振幅为 15 mm，仿真时间步长为 5×10^{-6} s，仿真共进行 7 s。仿真中待筛体稳定运行后再生成胡麻脱粒物。

2 仿真方法与结果分析

2.1 仿真模型

2.1.1 双层振动筛模型

本研究采用课题组自行研制的双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机（图 2a），该机由喂料装置、控制系统、多级筛箱、双风道分选装置、传动装置等部件组成。筛箱结构如图 2b 所示。多层筛分装置主要利用振动分选原理完成胡麻脱粒物料不同组分分选过程。多层筛分装置包含三级筛网，位于顶部的一级筛网长 350 mm，宽 350 mm，表面分布着长腰型冲孔筛，筛孔尺寸能允许胡麻茎秆与籽粒穿过，将脱粒物中蒴果分离。位于下层的二级筛网长 700 mm，宽 350 mm，表面分布着半径为 2.75 mm 的圆孔，该层可将穿过一级筛网的茎秆与籽粒分离，其中籽粒穿过二级筛网到达收集箱，茎秆随着筛网

振动逐步迁移至二级筛收集槽中。不同级筛网固定在筛箱中，为了达到更好的筛分效果，筛箱安装时与水平面成 3° 夹角。筛箱振动由电机变频器控制，振动频率 2~6 Hz，振幅 5~15 mm。筛分作业中一级筛网和二级筛网可有效分选胡麻脱粒物，到达三级筛网的物料主要是籽粒，分选作业在本级筛网中并不明显，而透过筛网的籽粒全部收集在筛箱底层的收集槽中。所以，本研究中重点以一级筛网和二级筛网为研究对象。

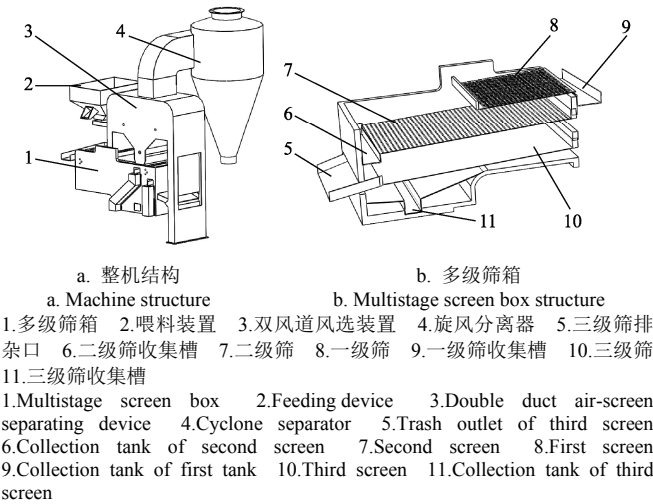


图 2 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机示意图
Fig.2 Structure diagrams of double duct air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material

2.1.2 胡麻脱粒物非球形离散元模型

胡麻脱粒物主要包含籽粒、茎秆、蒴果及灰尘颗粒。灰尘颗粒因形状较小，将采用气力分选原理去除，不在本研究范围内。所以，本研究只针对胡麻籽粒、茎秆、蒴果进行筛分分选。胡麻脱粒物不同成分按超二次曲面原理建立非球形颗粒，胡麻籽粒为片状，茎秆为圆柱状，蒴果为椭球状（表 1）。经过手工测量不同组分外形尺寸及参考相关文献^[27-28]得到各组分 x （宽）、 y （厚）、 z （高）半轴参数。 x 、 z 轴方向与表 1 中物料放置形态保持一致， y 轴垂直 xz 平面指向平面内部。建模中具体形状参数和物性参数如表 1^[29]所示。

表 1 胡麻脱粒物形状参数及物性参数
Table 1 Shape parameters and physical property parameters of flax threshing material

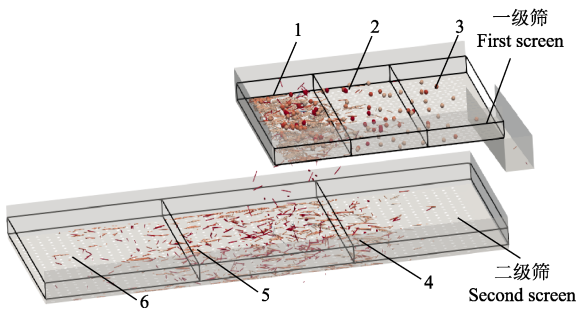
物料 Material	形状参数 Shape parameters					物性参数 Physical property parameters				实物 Materials	模型 Models
	x 半轴 x semi-axis /mm	y 半轴 y semi-axis /mm	z 半轴 z semi-axis /mm	n_1	n_2	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus/MPa	密度 Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	单粒质量 Single grain mass/g		
籽粒 Seed	1.195	0.425	2.415	2	2	0.40	10	1 150	0.005 9		
短茎秆 Short stalks	0.500	0.500	7.500	20	2	0.25	100	650	0.015		
蒴果 Whole fruit	3.000	3.000	3.500	2	2	0.25	12	550	0.073		

2.2 仿真方法

为了便于分析筛面上物料在不同区域的分布，将一级筛与二级筛分别沿筛面出口方向划分为 3 个统计区域，如图 3 所示。其中一级筛每个统计区域尺寸为 116 mm×

350 mm×20 mm（长×宽×高），依次编号为统计区域 1、2、3；二级筛每个统计区域尺寸为 234 mm×350 mm×20 mm（长×宽×高），依次编号为统计区域 4、5、6。位于统计区域以外的物料不计入数据。对整个仿真过程中

不同时刻物料在筛面的分布情况进行量化分析,以物料完全落在一级筛面时定义为仿真的初始时刻。选取仿真过程的初始($t=0.15\text{ s}$)、中间($t=3.5\text{ s}$)及终点($t=7.0\text{ s}$)3个时刻分别提取每个统计区域内的筛面物料数据。



注: 1、2、3、4、5、6 分别为统计区域。

Note: 1、2、3、4、5 and 6 are the statistical regions respectively.

图3 两级筛面物料统计区域示意图

Fig.3 Statistical region diagram of materials on two-stage screen surface

研究中以透筛率及含杂率为筛分性能评价指标,其中透筛率 ε 定义为穿过筛孔的物料数量与喂入总数的比值^[30],用式(9)表示。

$$\varepsilon = \frac{n_i}{N_i} \times 100\% \quad (9)$$

式中 n_i 为透过筛子的物料质量, g; N_i 为喂入的物料总质量, g。

物料在筛面聚集未被振动分离前,不同物料的空间方向杂乱,同时,一级筛与二级筛之间存在垂直方向130 mm的空间距离,穿过一级筛的物料向二级筛运动时空间方向也会发生变化。所以,振动筛分中部分物料并不能受筛孔尺寸限制而被分选,导致同种物料中发生含杂情况。含杂率 η 的高低也是评价振动分选质量的关键指标之一,由式(10)计算得到^[31]。

$$\eta = \frac{G_{q1}}{G_q + G_{q1}} \times 100\% \quad (10)$$

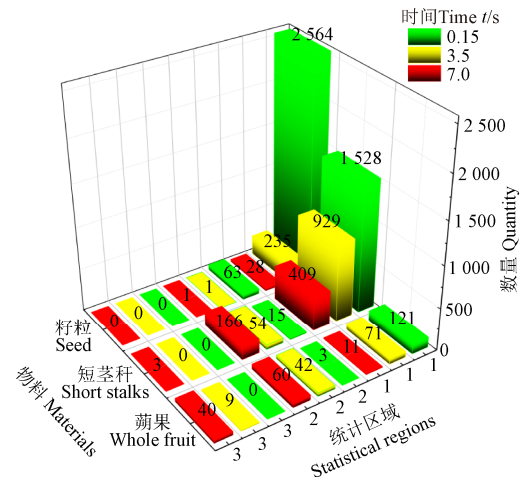
式中 G_q 为分选物料质量, g; G_{q1} 为物料中含杂质量, g。

2.3 仿真结果

2.3.1 筛面物料分布

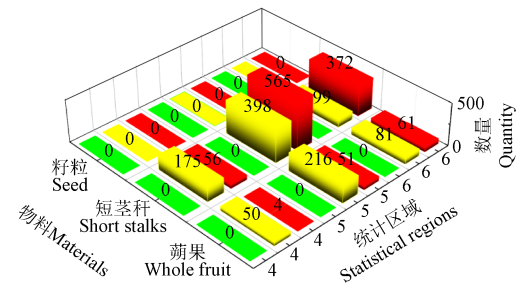
分别提取 $t=0.15$ 、3.5及7.0 s每个统计区域内筛面物料数据,得到图4所示的统计数据柱状图。结合图5a分析可知,仿真开始时生成的胡麻脱粒物主要分布在1区中,该区域将包含绝大部分数量的籽粒、短茎秆及蒴果。从图4a中可以看出,一级筛中籽粒数量在1区中从仿真开始到结束由2564个迅速减少为28个,而2、3区中只含有极少籽粒,说明胡麻籽粒在1区中能很好的被分离,并穿过一级筛。而短茎秆相对籽粒的外形尺寸有所不同,仿真初始时刻,短茎秆相互混杂集中在1区,2、3区中较少。随着筛面的激振作用,自仿真开始至结束,1区内短茎秆由1528个减少为409个。筛面的激振作用不仅使短茎秆发生了空间方向的变化,还

使短茎秆发生了筛面迁移。在图中,2区内的短茎秆由初始的15个增加为166个,3区内增加了3个短茎秆。短茎秆在一级筛的筛面迁移也有助于胡麻脱粒物的快速分选。对于蒴果而言,外形尺寸较筛孔大,无论蒴果空间方向如何变化都不能穿过筛孔。从图4a可以看出,在筛面激振作用下,1区中蒴果数量由121个变为11个,不断减少。1区中减少的蒴果不断迁移至2区及3区中(图5b、5c)。至仿真结束,2区中含有蒴果60个,3区中含有蒴果40个。随着时间的变化蒴果从生成位置整体向集料槽方向移动,证明蒴果可从一级筛中被分离。



a. 一级筛不同区域内物料数量

a. Quantity of materials in different regions of first screen



b. 二级筛不同区域内物料数量

b. Quantity of materials in different regions of second screen

图4 不同筛面物料数量

Fig.4 Quantity of materials on different screen surfaces

二级筛4区的正上方主要是一级筛的2区和3区,穿过一级筛的物料将集中在二级筛的5区和6区。从图5b、图6a中可以看出,仿真初始时刻因胡麻脱粒物未完全生成,因此4、5及6区中没有籽粒、短茎秆。随着筛箱的振动,4区中籽粒由50个减少为4个,短茎秆由175个减少为56个。5区因正上方是胡麻脱粒物大量聚集的位置, $t=3.5\text{ s}$ 时籽粒数量增加为216个,仿真结束时减少为51个,这个过程大部分籽粒将受激振作用穿过筛孔。6区中籽粒至仿真结束含有61个,结合图6c可以看出,部分籽粒在筛面发生滞留,主要集中于筛面与壁面交接位置。短茎秆在二级筛中因形状尺寸将被分离,所以5区中短茎秆由398个增加至565个,6区中由99个增加至372个。结合图6b、6c,说明短茎秆整体向收

集槽方向发生了迁移。

综合以上分析可知，一级筛可对蒴果进行分离，二

级筛可对短茎秆进行分离。被分选的材料在激振作用下可在对应的筛面发生利于筛分的迁移。

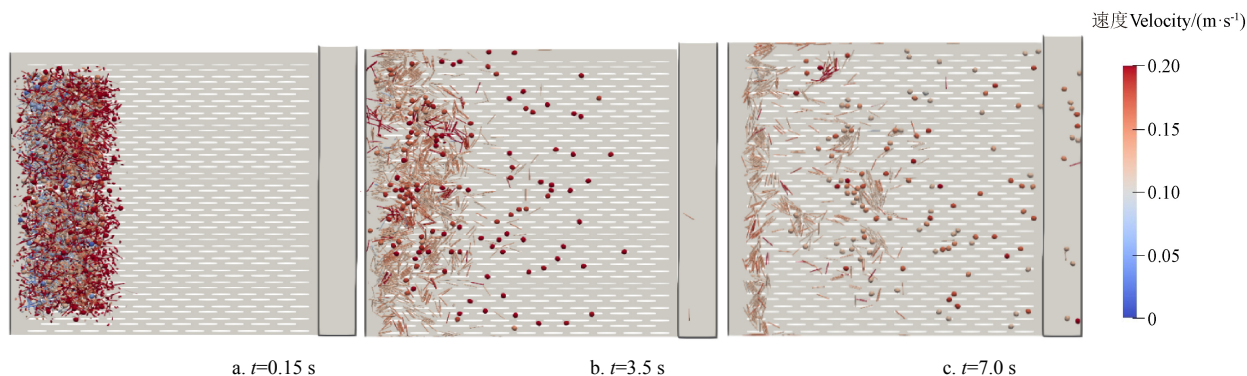


图 5 不同时刻一级筛面物料分布

Fig.5 Distribution of first screen surface materials at different times (t)

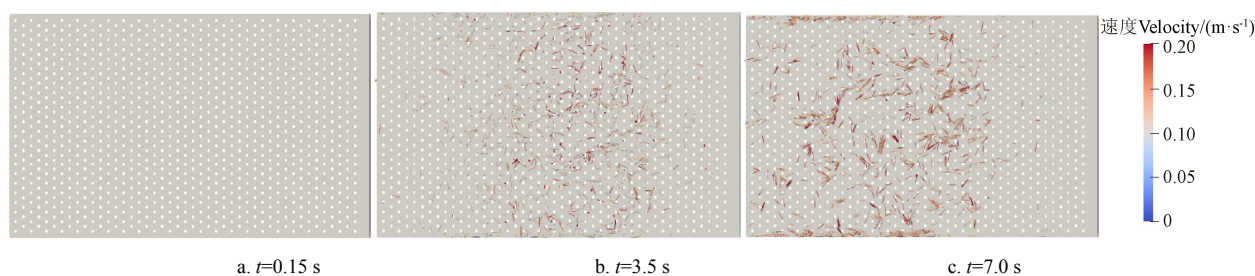


图 6 不同时刻二级筛面物料分布

Fig.6 Distribution of second screen surface materials at different times (t)

2.3.2 不同物料透筛率

经过统计计算，可得籽粒与短茎秆在不同筛面的透筛率（图 7）。一级筛将从胡麻脱粒物中分离籽粒与短茎秆，而保留蒴果。 $t=7$ s 时，一级筛中含有 29 个籽粒，579 个茎秆，111 个蒴果。经过统计，穿过一级筛的籽粒数量为 3 119 个，由式（9）计算可得籽粒在一级筛的透筛率为 99.08%，说明一级筛能够对籽粒进行很好的筛分。此外，穿过一级筛的短茎秆数量为 1 149 个，透筛率为 66.49%，低于籽粒透筛率。这是由于仿真初始时刻胡麻脱粒物在空间随机生成，相互混和在一起，这种无序的交织较难在短时间内彻底分离。同时，短茎秆在外形上长宽比大，在筛面激振作用下不易发生空间方向的变化，短时间内不能嵌入筛孔中。综合来看，随着进一步的筛面激振作用，短茎秆的团聚情况会逐渐减弱，透筛率将进一步增加。

二级筛主要对短茎秆与籽粒进行筛分，短茎秆保留在筛面，随着振动逐渐运动至筛面末端的收集盒，而籽粒则穿过筛孔到达收集箱。 $t=7$ s 时，二级筛中含有 113 个籽粒，954 个茎秆。经过计算得到籽粒透筛率为 96.38%，说明穿过一级筛的绝大部分籽粒都能穿过二级筛进入收集箱。少数籽粒在二级筛面运动时向筛面两侧发生位移，集中在筛面与壁面交接位置。相反，穿过二级筛的短茎秆数量为 55 个，透筛率为 4.79%，说明绝大部分短茎秆被二级筛阻挡，只有少数短茎秆在下落过程中会发生空间方向变化，进而穿过二级筛筛孔，产生透筛情况。

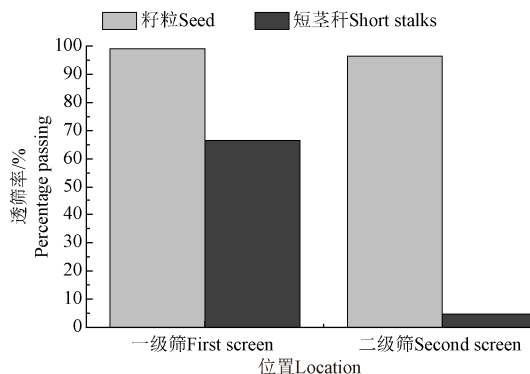


图 7 籽粒与短茎秆在不同筛面的透筛率

Fig.7 Percentage passing of seed and short stalks on different screening surfaces

2.3.3 含杂率

一级筛的收集槽主要收集蒴果，经过统计，收集槽中含有蒴果 13 个，质量为 0.95 g，含有短茎秆 2 个，质量为 0.03 g，经计算蒴果中含杂率为 3.06%。二级筛出口收集槽主要收集短茎秆，经统计短茎秆含有 80 个，质量 1.20 g，籽粒含有 51 个，质量 0.30 g，含杂率为 20.05%。短茎秆中含杂率较高是因为籽粒密度较茎秆大，短茎秆要发生空间方向及筛面位移变化所需时间较长。仿真 7 s 时间相对较短，大部分短茎秆还滞留在一级筛面及二级筛面的 4、5 区，未进入收集槽。所以，短时间内茎秆含杂率较高属于正常现象。穿过二级筛掉落的籽粒为 3 012 个，质量 17.77 g，其中含有短茎秆 55 个，质量为 0.83 g，

籽粒含杂率为 4.44%。

3 试验验证

3.1 试验方案

参照 GB/T 5983—2013《种子清选机试验方法》^[32]要求在甘肃农业大学实验基地对仿真得到的胡麻脱粒物透筛率、含杂率进行试验验证。试验材料选用陇亚 14 号胡麻收获期脱粒物，脱粒物成分组成与仿真过程保持一致，其中籽粒为 3 148 个，短茎秆为 1 728 个，蒴果为 124 个。试验前将胡麻脱粒物混合均匀备用，调节振动筛与水平面为 3° 倾角，筛箱振动频率为 5 Hz，最后调试机器进行空转检查。待筛箱稳定工作后，将脱粒物倾倒在一级筛中，筛分作业持续 7 s 后即停止（图 8）。为防止上层筛面上滞留的物料从筛孔掉落影响下层筛面统计数据的准确性，数据统计时由最底层收集槽向一级筛面方向进行统计。

3.2 试验结果

分别依据式（9）、式（10）计算透筛率及含杂率，试验重复 3 次，结果取平均值。试验数据经过整理，透筛率如表 2 所示，一级筛中籽粒、短茎秆透筛率数据相对偏差分别为 0.42%、2.95%，二级筛中籽粒、短茎秆透

筛率数据偏差分别为 1.85%、4.36%。对各收集槽中物料质量进行统计，由 JA3003 电子称（实际精度值为 0.001 g）对物料质量称重，其中一级筛收集槽中蒴果质量为 1.000 g，其他物料质量为 0.035 g；二级筛收集槽中短茎秆质量为 1.280 g，其他物料质量为 0.360 g；三级筛收集槽中籽粒质量为 17.400 g，其他物料质量为 0.890 g。经计算，籽粒、短茎秆及蒴果含杂率分别为 4.87%、21.95%、3.38%，数据相对偏差分别为 8.83%、8.67%、9.38%及。综上所述，仿真与试验数据相比偏差较小，透筛率、含杂率数据相对偏差均 <10%，证明非球形模型适用于胡麻振动筛分作业。

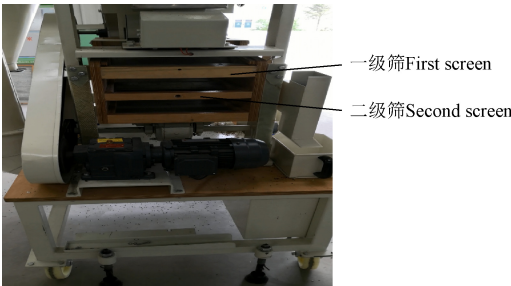


图 8 振动筛分性能试验
Fig.8 Vibration screening performance experiment

表 2 透筛率仿真与试验数据对比
Table 2 Comparison between simulation and experiment data of percentage passing

组分 Component	一级筛透筛率 Percentage passing of first screen			二级筛透筛率 Percentage passing of second screen		
	仿真值 Simulation values/%	试验值 Experimental values/%	相对偏差 Relative deviation/%	仿真值 Simulation values/%	试验值 Experimental value/%	相对偏差 Relative deviation/%
籽粒 Seed	99.08	99.50	0.42	96.38	98.20	1.85
短茎秆 Short stalks	66.49	68.51	2.95	4.79	4.59	4.36

4 结 论

1) 基于超二次曲面理论建立了胡麻脱粒物不同组分的非球形离散元模型，该模型从形状尺寸上更加接近真实物料外形结构，从仿真数据分析可以看出，超二次曲面的非球形颗粒能很好的模拟真实物料的物理特性。

2) 对一级筛与二级筛分别建立了数据统计区域，经过分析可知，一级筛可以分选蒴果，籽粒及短茎秆可穿过筛面；二级筛可分选短茎秆，籽粒可穿过筛面。被分选的物料在激振作用下可在对应的筛面发生利于筛分的迁移。进一步数据分析可知，一级筛中籽粒透筛率为 99.08%，短茎秆由于需更长的激振作用，在本研究的仿真时间内透筛率为 66.49%。二级筛中籽粒透筛率为 96.38%，短茎秆透筛率为 4.79%，说明可从籽粒中分离。最后对不同物料的含杂率进行了统计，其中籽粒为 4.44%，短茎秆为 20.05%，蒴果为 3.06%。

3) 对仿真过程进行了试验验证，对比仿真数据与试验数据，结果表明一级筛中籽粒透筛率偏差为 0.42%，短茎秆透筛率偏差为 2.95%；二级筛中籽粒透筛率偏差为 1.85%，短茎秆透筛率偏差为 4.36%；籽粒含杂率偏差为 8.83%，短茎秆含杂率偏差为 8.67%，蒴果含杂率为 9.38%。整体误差均 <10%。

研究中涉及的物料均来源于田间，物料原始外形各异，如蒴果根部与茎秆连接部位存在少量叶片，但在仿真中为简化模型，并不能将这部分细节表现，仿真模型与真实蒴果存在较小差异。同时，胡麻脱粒物中成分复杂，鉴于建模技术具有一定局限，研究中只能选取具有代表性的物料进行分析。此外，试验研究中受客观条件限制，在规定时间内停机统计各筛面物料数量较难实现，导致缺少与仿真中物料数量对比的试验数据，从而无法得到不同时间点仿真指标的误差结果。但综合分析可知，该方法完全适应不同农业生产环节中涉及的非球形物料仿真。

[参 考 文 献]

[1] 万楚筠, 黄凤洪, 张明, 等. 亚临界流体萃取胡麻籽低温压榨饼中油脂[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 324-331. Wan Chuyun, Huang Fenghong, Zhang Ming, et al. Subcritical fluid extraction of oil from cold press linseed cake[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 324-331. (in Chinese with English abstract)

[2] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117-125, 247. Dai Fei, Fu Qiufeng, Zhao Wuyun, et al. Design and test of

- double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117-125, 247. (in Chinese with English abstract)
- [3] 戴飞, 赵武云, 刘国春, 等. 胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 140-147. Dai Fei, Zhao Wuyun, Liu Guochun, et al. Design and experiment of separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 140-147. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘鹏, 金诚谦, 刘政, 等. 大豆联合收获机田间清选作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 35-45. Liu Peng, Jin Chengqian, Liu Zheng, et al. Optimization of field cleaning parameters of soybean combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 35-45. (in Chinese with English abstract)
- [5] 胡志超, 陈有庆, 王海鸥, 等. 振动筛式花生收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 114-117. Hu Zhichao, Chen Youqing, Wang Hai'ou, et al. Design and experimental research on vibrating type peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 114-117. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王立军, 马杨, 冯鑫, 等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 89-100. Wang Lijun, Ma Yang, Feng Xin, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 89-100. (in Chinese with English abstract)
- [7] 高英武, 陈振宇, 高兴宇, 等. 田螺脱壳清洗机振动筛的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007(5): 121-125. Gao Yingwu, Chen Zhenyu, Gao Xingyu, et al. Design and experiment of vibrating screen of shelling washer for field-snail[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007(5): 121-125. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王升升, 陈盼, 卢梦晴, 等. 大白菜种子收获分离清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 181-190. Wang Shengsheng, Chen Pan, Lu Mengqing, et al. Design and experiment of separation and cleaning device for Chinese cabbage seeds harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 181-190. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王立军, 宋良来, 冯鑫, 等. 谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 1-17. Wang Lijun, Song Lianglai, Feng Xin, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- [10] 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25. Lu Fangyuan, Ma Xu, Qi Long, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(10): 17-25. (in Chinese with English abstract)
- [11] 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 振动式水稻精密播种装置机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 119-128, 214. Lu Fangyuan, Ma Xu, Qi Long, et al. Theory and experiment on vibrating small-amount rice sowing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 119-128, 214. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 79-84. Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79-84. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘凡一, 张舰, 陈军. 小麦籽粒振动筛分黏弹塑性接触模型构建及其参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 37-43. Liu Fanyi, Zhang Jian, Chen Jun. Construction of visco-elasto-plasticity contact model of vibratory screening and its parameters calibration for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 37-43. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王立军, 彭博, 宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 90-96. Wang Lijun, Peng Bo, Song Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 90-96. (in Chinese with English abstract)
- [15] Soltanbeigi B, Podlozhnyuk A, Papanicolopoulos S, et al. DEM study of mechanical characteristics of multi-spherical and superquadric particles at micro and macro scales[J]. Powder Technology, 2018, 329: 288-303.
- [16] Liu Z H, Ma H Q, Zhao Y Z. Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres, multi-super-ellipsoids, and polyhedrons[J]. Powder Technology, 2021, 390: 34-49.
- [17] You Y, Zhao Y. Discrete element modelling of ellipsoidal particles using super-ellipsoids and multi-spheres: A comparative study[J]. Powder Technology, 2018, 331: 179-191.
- [18] Barr A H. Superquadrics and angle-preserving transformations[J]. Computer Graphics and Applications, 1981, 1(1): 11-23.
- [19] Wang S Q, Fan Y N, Ji S Y. Interaction between super-quadric particles and triangular elements and its application to hopper discharge[J]. Powder Technology, 2018, 339: 534-549.
- [20] Verlet L. Computer 'experiment' on classical fluids. I: Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules[J]. Health Physics, 1967, 22(1): 79-85.
- [21] Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 117(1): 1-19.
- [22] Munjiza A, Andrews K R F. NBS contact detection algorithm for bodies of similar size[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1998, 43(1): 131-149.
- [23] Munjiza A, Rougier E, John N W M. MR linear contact detection algorithm[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 66(1): 46-71.
- [24] Podlozhnyuk A, Pirker S, Kloss C. Efficient implementation of superquadric particles in discrete element method within an open-source framework[J]. Computational Particle

- Mechanics, 2017, 4(1): 101-118.
- [25] Wang S Q, Yan Y, Ji S Y. Transition of granular flow patterns in a conical hopper based on superquadric DEM simulations[J]. Granular Matter, 2020, 22(4): 79.
- [26] 王嗣强, 季顺迎. 基于超二次曲面的颗粒材料缓冲性能离散元分析[J]. 物理学报, 2018, 67(9): 182-193.
Wang Siqiang, Ji Shunying. Discrete element analysis of buffering capacity of non-spherical granular materials based on super-quadric method[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(9): 182-193. (in Chinese with English abstract)
- [27] 戴飞. 胡麻脱粒物料分离清选机理与关键技术研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
Dai Fei. Study on the Separating-Cleaning Mechanism and Key Technology of Flax Threshing Material[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [28] Dai F, Song X F, Guo W J, et al. Simulation and test on separating cleaning process of flax threshing material based on gas-solid coupling theory[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 73-81.
- [29] Dai F, Song X F, Shi R J, et al. Migration law of flax threshing materials in double channel air-and-screen separating cleaner[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 92-102.
- [30] Chen B, Yan J W, Mo W, et al. DEM simulation and experimental study on the screening process of elliptical vibration mechanical systems[J]. Journal of Vibroengineering, 2019, 21(8): 2025-2038.
- [31] 廖庆喜, 王昌, 何坤, 等. 油菜联合收获后含杂油菜籽复清机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 175-185, 232.
Liao Qingxi, Wang Chang, He Kun, et al. Design and experiment on re-cleaning machine for rapeseed after combine harvesting[J]. 2021, 52(10): 175-185, 232. (in Chinese with English abstract)
- [32] 中国国家标准化管理委员会, 种子清选机试验方法: GB/T 5983-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

Simulation and experiment of the vibration separation of flax threshing material using non-spherical particles model

Song Xuefeng, Dai Fei^{*}, Shi Ruijie, Wang Feng, Zhang Fengwei, Zhao Wuyun

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

Abstract: Flax is one of the five major oil crops in China. However, the local planting areas are mostly mountainous and hilly landform, and the harvesting process is excessively dependent on manual operation. Due to the problems of high labor intensity and low rate of mechanized equipment for harvesting operation, the development process of flax industrialization in China is seriously restricted. At present, the flax harvest process is still dominated by segmented harvest, and the threshing material formed after flax harvest needs to be separated and cleaned to remove the impurities in the grain. According to different principles, grain separated process can be divided into vibration screening and pneumatic sorting. Discrete element modeling technology is an auxiliary research method widely used in vibration screening research, which can establish various material shapes in agricultural production. However, the existing research methods use the multi-spherical aggregation method to fit the shape of grain and stalks, which is different from the real material in structure. On this basis, in order to improve the shape reality of flax threshing material and reduce the simulation modeling error, based on the open source discrete element method framework, the non-spherical particles of different components of flax threshing material were established by using the super-quadric surface element method, and the multi-stage vibration screening process was simulated and experimentally studied. In this study, the distribution of materials on the screen surface of the first screen and the second screen, the percentage passing and impurity content of different materials were analyzed, and the experimental verification was carried out. Different shapes of flax threshing could be constructed by changing the parameters of the super-quadric control equation. According to the volume fraction of different components of flax threshing, 3 148 grains, 1 728 stems and 124 fruits were generated in the simulation, respectively. In order to facilitated the analysis of simulation data, the primary screen and the secondary screen were divided into three different data statistical areas. The vibrating screening process was mainly analyzed from the material distribution on the screen surface, the screening rate of different materials and the impurity content. The results showed that the non-spherical particles of super-quadric surface could well simulate the physical properties of real materials; The percentage passing of seed and short stalks in the first screen was 99.08% and 66.49%, respectively, and the whole fruit could be sorted; In the second screen, the percentage passing of seed and short stalks were 96.38% and 4.79%, respectively, and the short stalks could be sorted. The sorted material could migrate on the corresponding screen surface under the excitation, which was conducive to screening. The impurity contents of different materials were counted, including 4.87% for seed, 21.95% for short stalks and 3.38% for whole fruit. Then the simulation process was experimented and verified. The composition and quantity of flax thresher in the test were consistent with the simulation, and the different components were mixed evenly before the experiment. In addition, the equipment must be subject to idle commissioning before the threshing material were dumped into the first screen. After the experiment, counting the quantity of different materials from the bottom collecting tank to the first screen. The experiment results showed that the relative data deviations of percentage passing and impurity content of different components of flax threshing materials were less than 10%. Although the modeling method used in the study has good shape fitting degree for non-spherical particles, it still had some limitations, which were discussed in this study. The results showed that the non-spherical particles established by the super-quadric surface method could be applied to the simulation of non-spherical materials involved in different agricultural production process.

Keywords: discrete element method; experiment; vibration; non-spherical particle; flax; super-quadric element