

张 涛,张万枝,陈志伟,等. 基于 EDEM 的勺带式马铃薯排种器充种性能仿真研究[J]. 江苏农业科学,2021,49(12):181-185.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.12.030

# 基于 EDEM 的勺带式马铃薯排种器充种性能仿真研究

张 涛<sup>1</sup>,张万枝<sup>1,2</sup>,陈志伟<sup>1</sup>,王鑫海<sup>1</sup>,徐 颖<sup>3</sup>,崔心杰<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院,山东泰安 271018; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京 210014;

3. 山东省滕州市农业农村综合服务中心,山东滕州 277500)

**摘要:**为提高勺带式马铃薯排种器充种性能,基于 EDEM 仿真软件建立了马铃薯离散元颗粒模型,通过跌落冲击试验与斜面法确定了马铃薯充种仿真试验关键参数;选取排种器倾斜角度、种勺运动速度以及供种速度进行单因素充种仿真试验。结果表明,当排种器倾斜角度 75°、排种带速度 0.5 m/s 及供种速度 15 个/s 时,充种性能最好,此时单粒充种比例为 17.5%、2 粒及 2 粒以上比例为 83.5%、未充种比例为 0。后续工作可在此基础上设计清种装置,以进一步增大单粒比例、减小多粒比例,更好地达到马铃薯精量播种要求。

**关键词:**马铃薯;排种装置;EDEM;仿真;排种效果

**中图分类号:** S223.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)12-0181-04

马铃薯是世界第四大粮食作物,但目前马铃薯种植机械化程度普遍不高,尤其是发展中国家机播率仅为 30%。马铃薯种植是马铃薯生产的重要环节,其中排种器又是马铃薯种植机械的核心部件。目前勺带式排种器是世界上最常用的排种装置。勺带式排种器具有操作简便、播种均匀、可靠性和作业效率高等优点<sup>[1]</sup>,但也存在着漏种和重种等缺点。为了提高勺带式排种性能,国内外学者对其进行了相关研究。刘以昌针对勺轮式排种器传动复杂等问题开展了试验研究,研制了传动系统简单、排种性能更佳的垂直式勺轮排种器<sup>[2]</sup>;吕金庆等学者针对传统排种器改进设计了双列交错式马铃薯排种器,对关键部件设计与优化,理论分析了主动轮和振动清种装置的性能特点<sup>[3]</sup>;王希英等改进设计了双列交错勺带式马铃薯精量排种器,优化了双勺交错排种总成、主动驱动总成和振动清种装置结构参数<sup>[4-5]</sup>。目前相关研究主要是针对排种器结构

进行优化改进,对关键部件和种薯间的相互作用研究较少。整个马铃薯排种过程可分充种、清种、携种、投种等环节,其中最重要的是充种环节。关键部件与种薯间的相互作用直接影响了马铃薯充种<sup>[6-9]</sup>。采用传统理论计算或试验法分析关键部件与种薯间的相互作用,费时费工。

离散单元法(Discrete Element Method, DEM)是目前一种比较新型的数值模拟仿真分析方法,主要用来分析比较复杂的运动规律和力学特征,在农业工程领域主要应用于土壤颗粒、小物料种子等方面的运动分析<sup>[10-11]</sup>。而鉴于马铃薯在排种过程中的运动也是属于散粒物料运动<sup>[12-14]</sup>,因此本研究在国内外研究的基础上,采用 EDEM 软件对勺带式马铃薯排种器充种性能进行仿真研究,分析探讨排种器角度、供种速度以及排种带速度对充种性能的影响,以期对勺带式马铃薯精量排种器设计及优化提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 马铃薯离散元颗粒模型建立

选用华北和西北地区普遍适种的优质高产商品薯“荷兰十五”作为试验样本,选取质量为 20~30 g 的马铃薯 500 粒。采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺对马铃薯三轴尺寸进行测量,结果见表 1。

由表 1 可见,马铃薯种薯的几何外形近似于椭球形,但其长轴两端大小并不相同。对于这种不规则椭球体,本研究首先在 EDEM 中建立一个半径为

收稿日期:2020-11-10

基金项目:中国博士后科学基金(编号:2020M681690);山东省自然科学基金(编号:ZR2019BC018);山东省农业重大应用技术创新项目(编号:SD2019NJ003);山东省现代农业产业技术体系薯类创新团队农业机械岗位专家项目(编号:SDAIT-16-10);“十三五”国家重点研发计划智能农机装备(编号:2017YFD0700705)。

作者简介:张 涛(1998—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事薯类机械设计。E-mail:1558935961@qq.com。

通信作者:张万枝,博士,硕士生导师,主要从事薯类机械理论与设计研究。E-mail:zhangwanzhi@163.com。

表 1 种薯形状尺寸

项目	长度	宽度	厚度
最大值	56.14	34.01	31.65
最小值	27.28	22.64	19.65
平均值	41.71	27.38	25.65

14 mm 的球体作为颗粒中心;其次保持  $x$  轴、 $z$  轴方向基本不变,在  $y$  轴方向上一次生成 8 个半径大小不同的球体(表 2),每个球体半径以及坐标位置均不相同,通过这种组合得到马铃薯颗粒模型(图 1)。

表 2 马铃薯颗粒建模参数

球体编号	位置 $x$ (mm)	位置 $y$ (mm)	位置 $z$ (mm)	球体半径 (mm)
球体 0	-0.009 888 580	-15.394 60	0.002 307 450	9.0
球体 1	-0.008 190 750	-12.394 60	0.001 872 630	11.0
球体 2	-0.005 643 990	-7.894 56	0.001 220 410	13.0
球体 3	-0.002 531 290	-2.394 56	0.000 423 248	14.0
球体 4	0.000 298 441	2.605 44	-0.000 301 444	14.5
球体 5	0.001 430 330	4.605 44	-0.000 591 321	14.5
球体 6	0.002 562 220	6.605 44	-0.000 801 198	14.5
球体 7	0.003 411 140	8.105 44	-0.001 098 610	13.0

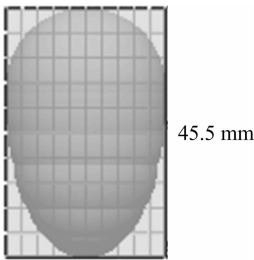


图1 马铃薯颗粒模型

1.2 充种性能仿真参数确定

充种是指种薯以一定速度从大种箱流向小种箱,然后种匀以一定速度向上舀取种薯。马铃薯属于散粒体,确定其与排种器间的力学特性参数对研究充种性能具有重要意义。马铃薯与排种器间的力学特性参数主要包括马铃薯-马铃薯间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数;马铃薯-种匀间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数以及马铃薯-种箱间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数。

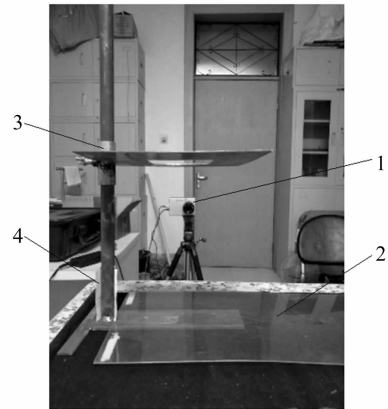
1.2.1 碰撞恢复系数确定 采用跌落冲击试验法确定马碰撞恢复系数。碰撞恢复系数是两物体碰撞后的分离速度与碰撞前的接近速度的比值。试验中,设被撞物料静止不动,将马铃薯从高度为  $H$

处静止释放,马铃薯做自由落体运动与碰撞物体发生碰撞,然后被弹起,高度为  $h$ 。根据能量守恒定律可得碰撞恢复系数计算公式为

$$C_r = \frac{(0 - v_1')}{(v_1 - 0)} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{h/H}。 \tag{1}$$

式中: $g$  为重力加速度; $v_1$  为马铃薯碰撞前的速度; $v_1'$  为马铃薯碰撞后的速度;被撞物料速度始终为 0; $H$  为 300 mm。

马铃薯碰撞恢复系数测定试验装置如图 2 所示,所采用设备有:高速摄像系统、自制跌落架、刻度纸、橡胶纸、塑料板、镀锌钢板。



1—高速摄像系统;2—塑料板;3—自制跌落架;4—刻度纸  
图2 碰撞恢复系数测定装置

分别测定马铃薯-马铃薯、马铃薯-塑料板、马铃薯-镀锌钢板的碰撞恢复系数。每种情况重复 5 次,取平均值,结果见表 3。

表 3 碰撞恢复系数测定结果

材料	碰撞恢复系数					
	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	平均
马铃薯-马铃薯	0.787	0.794	0.781	0.779	0.795	0.787
马铃薯-塑料	0.656	0.664	0.659	0.661	0.663	0.661
马铃薯-钢板	0.711	0.708	0.705	0.661	0.663	0.711

1.2.2 摩擦系数确定 采用斜面法来测定马铃薯与塑料板、镀锌钢板间的摩擦系数,测量装置如图 3 所示。

初始时,马铃薯在斜面上静止,马铃薯受到的摩擦力为

$$F_s = \mu_2 G \cos \alpha。 \tag{2}$$

式中: $F_s$  为摩擦力; $\mu_1$  为静摩擦系数; $G$  为马铃薯重力; $\alpha$  为斜面倾斜角。当  $\alpha$  增大到一定值时,马铃薯有向下滑动的趋势;此时为滑动摩擦角,对应的滑动摩擦系数为

$$\mu_2 = \tan \alpha。 \tag{3}$$



1—测量装置；2—三角板；3—马铃薯；4—镀锌钢板  
图3 静摩擦系数测定装置

每种材料重复试验 5 次,最终测得结果见表 4。

1.3 充种仿真模型建立

在 Solid Works 中建立马铃薯排种器三维模型 (图 4),设置排种带倾斜角度分别为 90°、75°、60°等 3 种情况,分别导入 EDEM 中。在 EDEM 中种箱设置为镀锌钢板材料、种勺和排种带为塑料材料;马铃薯颗粒间及与排种器间的接触模型均采用 Hertz - Mindlin 无滑移模型;选定转动轴并在 Dynamics 选项卡中设置转速分别为 0.4、0.5、0.6 m/s;在 Factories 模块中建立颗粒工厂,设定颗粒以动态方式生成;其他参数设置见表 5。为保证仿真的连续

表 4 摩擦系数测定结果

材料	静摩擦系数						滚动摩擦系数					
	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	平均值	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	平均值
马铃薯 - 马铃薯	0.455	0.457	0.449	0.452	0.446	0.452	0.019	0.025	0.028	0.018	0.023	0.023
马铃薯 - 塑料	0.519	0.512	0.514	0.518	0.519	0.516	0.299	0.294	0.305	0.302	0.301	0.3
马铃薯 - 钢板	0.441	0.439	0.456	0.452	0.446	0.447	0.268	0.265	0.272	0.271	0.265	0.268

性,设置时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%,总仿真时间为 20 s。在排种口处通过网格划分设置网格单元体,每次仿真结束均通过网格单元体对试验指标进行统计,为了便于观察,将种箱、导种管设置为网格显示。EDEM 仿真模型见图 5。

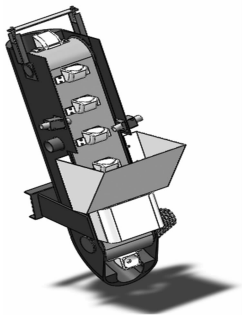


图4 排种器三维模型

表 5 其他参数设置

材料	泊松比	弹性模量 (Pa)	密度 (kg/m³)
马铃薯	0.57	1.34 × 10 <sup>6</sup>	1 048
塑料	0.35	1.30 × 10 <sup>9</sup>	1.2
钢板	0.3	7 070	7 800

材料	碰撞恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
马铃薯 - 马铃薯	0.787	0.452	0.023
马铃薯 - 塑料	0.661	0.519	0.300
马铃薯 - 钢板	0.711	0.447	0.268

2 充种仿真及结果分析

2.1 充种仿真试验

选取排种器倾斜角度、种勺运动速度以及供种速度进行单因素充种仿真试验。通过调节排种带 moving plane 运动速度控制其工作速度 (0.4、0.5、0.6 m/s);通过调节排种器整体倾斜角度控制取种舀勺角度 (90°、75°、60°);通过观察确定每个种勺里种薯是否为单粒、2 粒及 2 粒以上或未充种等状态。参考 GB/T 6242—2006《种植机械马铃薯种植机试验方法》和 NY/T 1415—2007《马铃薯种植机质量评价技术规范》,选取马铃薯种薯单粒充种比例  $Y_1$ 、2 粒及 2 粒以上比例  $Y_2$ 、未充种比例  $Y_3$  等 3 个指标为试验考核指标。

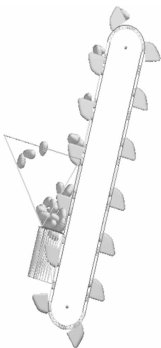


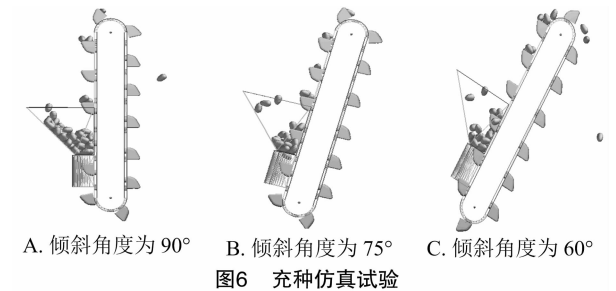
图5 EDEM 充种仿真模型

$$Y_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% ; \tag{4}$$

$$Y_2 = \frac{n_2}{N} \times 100\% ; \tag{5}$$

$$Y_3 = \frac{n_3}{N} \times 100\% . \tag{6}$$

式中: $n_1$  为马铃薯种薯单粒充种数; $n_2$  为 2 粒及 2 粒以上充种数; $n_3$  为未充种数。充种仿真试验如图 6 所示。



2.2 结果分析

2.2.1 排种带倾斜角度对充种运移性能的影响  
设定排种带倾斜角度分别为 90°、75°、60°,保持排种带运动速度为 0.4 m/s、供种速度为 15 个/s,结果见表 6。由表 6 可见,倾斜角度 60°时,种勺 2 粒及 2 粒以上充种比例最大(92.2%),但单粒充种比例较少(3.9%),同时存在未充种现象;倾斜角度 90°时,种勺单粒充种比例最大(25%),但未充种比例也最大(11.5%);倾斜角度 75°时,种勺单粒充种比例为 8.5%,2 粒及 2 粒以上比例为 91.5%,未充种比例为 0,充种性能最优。结果也证实了英国农业工程研究所的 L·P·帕夫顿等提出的“‘零速投种’并非要求种子落到地面时的水平分速度为零,种子落下时应该具有一定的垂直速度,但并不是 90°时播种质量是最好的,而是投种角度在 75°左右时最好,种子的平均位移最小”这一观点。

表 6 倾斜角度对充种运移性能的影响

倾斜角度	单粒充种 (%)	2 粒及 2 粒以上 (%)	未充种 (%)
60°	3.9	92.2	3.9
75°	8.5	91.5	0.0
90°	25.0	63.5	11.5

2.2.2 种勺运动速度对充种运移性能的影响  
设定种勺运动速度分别为 0.4、0.5、0.6 m/s,保持排种带倾斜角为 75°、供种速度为 15 个/s,结果见表 7。由表 7 可见,种勺运动速度为 0.4 m/s 时,单粒充种比例最低(8.5%),2 粒及 2 粒以上充种比例最

高(91.5%);种勺运动速度为 0.6 m/s 时,单粒充种比例为 10.4%,2 粒及 2 粒以上充种比例为 85.1%,但未充种比例为 5.5%;种勺运动速度为 0.5 m/s 时,单粒充种比例最高(17.5%),2 粒及 2 粒以上充种比例最低(83.5%),且不存在未充种现象,充种性能最优。

表 7 种勺运动速度对充种运移性能的影响

种勺运动速度 (m/s)	单粒充种 (%)	两粒及两粒以上 (%)	未充种 (%)
0.4	8.5	91.5	0
0.5	17.5	83.5	0
0.6	10.4	85.1	5.5

2.2.3 供种速度对充种运移性能的影响  
当向种箱里倒入种薯速度过快时,一方面会在种箱内产生结拱的现象,影响播种效果;另一方面,也会因为倒入速度过快使种箱内存有大量的种薯,当种勺舀取种薯时会有多个马铃薯种薯被舀取,从而增加了 2 粒及 2 粒以上所占比例。设定供种速度分别为 12 个/s、15 个/s、18 个/s,保持排种带倾斜角为 75°、种勺运动速度为 0.5 m/s,结果见表 8。由表 8 可见,供种速度为 12 个/s 时,单粒充种比例最大(21.5%),2 粒及 2 粒以上比例最小(74.9%),但未充种比例为 4.6%;供种速度为 18 个/s 时,单粒充种比例最小(12.3%),2 粒及 2 粒以上比例最大(87.7%),未充种比例为 0;供种速度为 15 个/s 时,单粒充种比例为 17.5%,2 粒及 2 粒以上比例为 83.5%,与供种速度为 18 个/s 时相比,单粒充种比例提高、2 粒及 2 粒以上比例下降,充种性能最优。

表 8 供种速度对充种运移性能影响

供种速度 (个/s)	单粒充种 (%)	2 粒及 2 粒以上 (%)	未充种 (%)
12	21.5	74.9	4.6
15	17.5	83.5	0
18	12.3	87.7	0

3 结论

基于 EDEM 仿真软件建立了马铃薯离散元颗粒模型,通过跌落冲击试验与斜面法确定了马铃薯充种仿真试验关键参数。选取排种器倾斜角度、种勺运动速度以及供种速度进行单因素充种仿真试验。结果表明,当排种器倾斜角度 75°、排种带速度 0.5 m/s 及供种速度 15 个/s 时,充种性能最好,此时单粒充种比例为 17.5%,2 粒及 2 粒以上比例为

牛天宝,朱云,王琼,等.三七烤房两向循环仿真研究[J].江苏农业科学,2021,49(12):185-189.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.12.031

# 三七烤房两向循环仿真研究

牛天宝,朱云,王琼,董国辉,赵新宇,陈飞扬,国腾飞  
(云南农业大学,云南昆明 650201)

**摘要:**为改进和优化三七密集烤房结构,提高烘烤质量,通过使用 CFD 方法分别对 2 种不同气流工作方式的烤房进行仿真模拟,根据仿真结果对烤房烘干室内温度场和气流速度场进行分析,提出不同气流工作方式对三七烘烤质量影响的假设,并根据速度云图和温度云图,提出了气流两向式烤房建设的方案,以及烘烤工艺改进意见,并进行了试验验证。结果表明,优化后的气流两向式烤房,其烘干室内温度分布均匀度得到了提高,烘干后三七含水率较为均衡。新型三七烤房气流两向循环使用效果优于旧式烤房,能够解决实际生产中的问题,促进三七的工业化加工的发展。

**关键词:**三七烤房;两向循环;流体仿真;温度;热风干燥

**中图分类号:**S226.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)12-0185-05

三七是我国传统名贵中药材,具有活血化瘀、消肿定痛的药用功效,是云南白药等多种药品的主要成分<sup>[1]</sup>,对多种疾病都具有良好的疗效。干燥是三七药材加工中的重要环节,干燥处理后的三七,药性可以得到保持,而且可以延长保存时间,不易腐败变质<sup>[2]</sup>。目前,中药材的干燥加工方式主要还是传统自然晾晒和烘房干燥<sup>[3]</sup>。在中药材干燥方面的研究,主要集中在西洋参、何首乌、人参等药

材,对于三七干燥的研究较少。

密集烤房采取热风干燥,具有易于控制、省工省力省时、装料大、烘烤质量高、节约能源等特点<sup>[4-5]</sup>。目前,密集烤房在国内外得到了广泛的推广和应用<sup>[6-9]</sup>,为实现工业化烘烤提供了基础,已经成为我国烘烤设备的发展方向。现存的密集烤房设备,在各个方面的研究已经取得了显著的效果,提高了烘烤质量和烘烤效率。但是针对三七密集烤房和三七烘烤工艺方面的研究较少,很多问题尚未解决。

为了提高三七烘烤质量和效率,众多学者已经对密集烤房进行了研究,区焕财等通过试验证明,影响三七干燥的因素依次排序为温度、风速、铺料密度<sup>[10]</sup>等。传统的气流上升和下降的工作方式,在

收稿日期:2020-10-17

基金项目:国家自然科学基金(编号:31860075)。

作者简介:牛天宝(1995—),男,河北衡水人,硕士研究生,主要从事农业机械化与装备工程研究。E-mail:1454334769@qq.com。

通信作者:朱云,硕士,副教授,主要从事农业机械与车辆工程研究。E-mail:1285050436@qq.com。

83.5%,未充种比例为0。

## 参考文献:

- [1]卢祺,安军锋,王安,等.马铃薯排种技术研究及展望[J].河北农机,2017(8):16-17.
- [2]刘以昌.勾轮式排种器工作原理的探讨[J].农机化研究,1988(2):34-38.
- [3]吕金庆,杨颖,李紫辉,等.舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(16):17-25.
- [4]王希英,唐汉,王金武,等.双列交错勾带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(11):82-90.
- [5]王希英.双列交错勾带式马铃薯精量排种器的设计与试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
- [6]王旭东,陈冠礼,凌轩,等.勾链式马铃薯播种机排种器性能试验[J].广东农业科学,2018,45(9):129-133.

- [7]杨锴,段宏兵,宋波涛,等.半杯勺式马铃薯排种器的设计与试验[J].华中农业大学学报,2018,37(2):103-109.
- [8]牛康,周利明,苑严伟,等.勾链式马铃薯排种器自补种系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(z1):76-83.
- [9]黄勇,赵晓雪,戚江涛,等.带勺式马铃薯排种装置的工作参数优化试验设计[J].农机化研究,2018,40(12):162-167.
- [10]郭小军,张海东,吴进玲,等.基于 EDEM 的勾轮式葵花排种器离散元仿真研究[J].中国农机化学报,2019,40(2):19-24.
- [11]王美美,王万章,杨立权,等.基于 EDEM 的玉米子粒建模方法的研究[J].河南农业大学学报,2018,52(1):80-84,103.
- [12]李紫辉,温信宇,吕金庆,等.马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J].农业机械学报,2019,50(3):1-16.
- [13]冯斌.收获期马铃薯块茎物理特性及损伤机理研究[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
- [14]冯斌,孙伟,石林榕,等.收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J].农业工程学报,2017,33(13):50-57.