余参参,段宏兵,蔡兴奎,等.基于离散元仿真参数的微型薯物料测定[J].华中农业大学学报,2021,40(1):210-217. DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.01.026

# 基于离散元仿真参数的微型薯物料测定

余参参<sup>1</sup>,段宏兵<sup>1,2</sup>,蔡兴奎<sup>2</sup>,徐涛<sup>1</sup>,姚飞虎<sup>1</sup>,陈志惠<sup>1</sup>,严福勇<sup>1</sup> 1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.农业农村部马铃薯生物学与生物技术重点实验室,武汉 430070

摘要 以脱毒微型马铃薯(简称"微型薯")"大西洋""中薯 5 号"和"华薯 1 号"为研究对象,以离散元 软件 EDEM 中微型薯仿真研究所需的相关参数为目标,测定 3 种微型薯的物理力学特征参数和接触力学 参数。采用响应曲面法设计试验,以静摩擦系数、滚动摩擦系数为试验变量,以堆积角为试验指标,将上述测 定后的参数输入 EDEM 进行仿真,求取微型薯之间的滚动摩擦系数。以堆积角为响应值,使用圆筒提升法验 证仿真结果的可信度。结果表明:与试验实际堆积角相比,不同品种的微型薯仿真结果差异均低于 3%,仿真 结果可靠。

关键词 马铃薯;微型薯;物料测定;离散元仿真;静摩擦系数;滚动摩擦参数;堆积角;脱毒种薯;机械 化播种

中图分类号 S 532 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2021)01-0210-08

我国马铃薯种植面积与产量均居世界首位,但 单产与世界平均水平仍有差距。实践证明,采用脱 毒微型马铃薯(简称"微型薯")代替切块薯增产效果 显著,单位面积产量一般可增加 30%~50%,高的 可增产 3~4 倍[1-2]。通过对脱毒种薯的扩繁而形成 优质商品种薯,是降低种薯成本的有效手段。现阶 段适用于脱毒种薯的机械化播种机具较少,因而造 成脱毒种薯的种植过程机械化水平较低。同时由于 脱毒种薯块茎的形状差异较大,农业生产中急需微 型薯播种与分级技术与装备[3]。随着数字仿真技术 的发展,离散元应用在作物与作物之间、作物与机械 设备之间的仿真研究渐多。研究表明,机械设备的 离散元仿真分析结果与种子物理特性存在较大联 系<sup>[4-5]</sup>。目前部分学者针对种子的物理特征参数和 部分接触力学参数进行了标定,结果均表明离散元 仿真的平均误差值较小,基本与试验一致,可以缩短 研究周期[6-7]。由于微型薯颗粒个体差异较大,品 种、含水率等对物料参数的测定结果影响巨大,因 此,本研究以3种不同品种的微型薯为研究对象,以 离散元软件 EDEM 中微型薯机械设备研究所需的 相关仿真参数为目标,对微型薯的物理力学特征参 数和接触力学参数进行测定分析,旨在为微型薯相关 机械设备在 EDEM 中的仿真参数的设置提供参考。

## 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

由于不同品种的微型薯差异较大,因此,试验用 薯选取种植相对广泛且具有一定代表性的"大西洋" "中薯5号"和"华薯1号",3种种薯均取自华中农 业大学农业农村部马铃薯生物学与生物技术重点实 验室种植基地。采样方法为:选取种植基地某处大 棚内长势较为稳定的区域,随机选取半径2.0 m范围 采挖3个品种的种薯,直至各收集500个种薯为止, 现场收集的种薯经标记后进行测量并记录数据,测 量后置于冷库储存备用。测试结果显示,3种种薯 含水率分别为71.75%~83.65%、75.45%~82.58% 和74.49%~80.48%。

### 1.2 微型薯特征参数测定

1)形态参数与质量的测量。对采集的"大西洋" "中薯5号""华薯1号"样品各500个进行三轴尺 寸、曲率半径和质量测量。质量测定采用"苦竹"电 子秤,精度0.01g;采用"艾瑞泽"数显游标卡尺测量 种薯三轴尺寸,可测量三轴极限尺寸,精度0.01 mm;曲率半径选用"天目"多功能数显半径测试仪,

收稿日期: 2019-11-21

余参参,E-mail: 1506989148@qq.com

基金项目:湖北省科技创新重大项目(2016ABA092);国家马铃薯现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P08)

通信作者:段宏兵,E-mail: duanhb@mail.hzau.edu.cn

其可针对不同的圆弧形面和测量精度选用不同跨度 的量爪,精确读出种薯的外圆弧半径,精度0.005 mm。三轴尺寸和曲率半径的测量均分别选取长、 宽、高3个方向进行(图1)。



X 为测量时长度方向,Y 为宽度方向,Z 为高度方向,测量三轴尺 寸时分别选取每个方向上的 2 个顶点进行测量,顶点选取如 1、2 所 示;测量曲率半径时,将量爪的中心分别与所测种薯 3 个方向的中心 对齐后读取数据。X is the length direction, Y is the width direction, and Z is the height direction. When measuring triaxial dimensions, select two vertices in each direction for measurement. The vertices are selected as sign 1 and 2; when measuring the radius of curvature, measure data is recorded after the center of the paw is aligned with the center of the three directions.

#### 图1 微型薯特征

#### Fig.1 Minituber's characteristics

微型薯的三轴尺寸分布统计见图2,曲率半径

与质量概率分布统计情况见图 3。图 2 显示,3 个品种的微型薯尺寸多分布在宽度 10~28 mm、厚度 10~26 mm、长度 13~40 mm,均占比 90%以上,其中宽度主要集中在 12~18 mm,占比 60%以上,厚度集中在 12~18 mm,占比 70%以上,长度集中在 16~25 mm,占比 50%左右。

图 3 显示,"大西洋"3 个方向的曲率半径相差 较大,符合程度较低,即3个方向的外圆弧半径差异 较大,长度方向的尺寸大于宽度和高度,且高度方向 和宽度方向尺寸较为接近,整体形状呈长椭圆形。 "华薯1号"和"中薯5号"3个方向的曲率半径符合 程度较高,即各个方向上的弯曲程度相近,三轴尺寸 差别相对较小,相对来说外形偏圆,但"中薯5号"曲 率半径较"华薯1号"符合程度更高,圆度更高,截面 规则。"华薯1号"虽外形近圆,但其表面有小凹坑, 截面形状有边角,近似椭圆形。不同品种的微型薯 质量分布呈现出相似的变化规律,3个品种的种薯 峰值均处于 3~5g,质量在 10g 以下的种薯均占比 90%以上;"中薯5号"质量分布范围最广,最小的不 足1g,最大的超过40g。综上,同一品种的微型薯 个体差异大,但基本符合正态分布;品种间形状差异 较大,总体变化规律相似。



图 2 三轴尺寸概率分布

Fig.2 Probability distribution of triaxial dimensions



A:"大西洋" "Daxiyang"; B:"中薯5号" "Zhongshu No.5"; C:"华薯1号" "Huashu No.1"; D:微型薯质量 Weight.

图 3 曲率半径和质量的概率分布



2)密度测量。由于微型薯表面较为光滑,体积 较小,无疏松孔隙,液体难以浸润,可采用量筒法测 量相关参数。随机选取3种微型薯各100个,选用 量程1500 mL的量筒和精度为0.01g的电子秤,对3 个品种的微型薯进行体积和质量的测量,试验重复5 次,测量结果取平均值。"大西洋""中薯5号""华薯1 号"的密度分别为1068、1044、1056 kg/m<sup>3</sup>。

3)剪切模量、泊松比的测定。本研究讨论在不 超过屈服载荷下微型薯的弹性变形能力,采用万能 试验机测量种薯破裂瞬间的相关数据,进而计算剪 切模量和泊松比。试验仪器为瑞格尔生产制造的 RGB-3005型万能试验机,可施加 0~5 kN 载荷。 根据需要选用 90 mm 平板压头,通过该压缩仪器获 得计算所需的横向变形量、纵向变形量、试验载荷力 等数据参数,加载速度固定为 10 mm/min。试验用 种薯为测量物理力学特征参数时所用种薯,放置 1 个月后进行压缩试验测量(图 4)。由于微型薯形 状大小差异较大,考虑该差异可能对试验所测结果 产生影响,试验时根据微型薯种植要求按质量小于 3 g、3~5 g 和 6~10 g 标准分组进行试验。



# 图 4 压缩试验

Fig.4 Compression test

剪切模量是剪切变形时剪切应力与剪切应变的 比值<sup>[8]</sup>,其公式为:

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

式(1)中:E为弹性模量,MPa;µ为泊松比;G 为剪切模量。由式(1)知,剪切模量可通过对弹性模 量、泊松比的数值计算得到,泊松比、弹性模量参考 文献[8]方法测定。

将3种微型薯按照质量差异分9组进行试验, 每组测量50个,分别得9组剪切模量、泊松比和弹 性模量。对各个品种的微型薯按质量分级段进行试验,结果发现弹性模量、泊松比与质量无关。如表1 所示,仅列出了质量不一的"大西洋"的试验结果,试验结果统计仅取平均值。试验结果显示,同一品种 间不同质量的微型薯,其弹性模量、泊松比及剪切模

量无明显变化,但不同品种间差异较明显。

表 1 微型薯的剪切模量和泊松比

Table 1 Shear modulus and Poisson's ratio for potato minitubers

品种 Variety		剪切模量/ MPa Shear modulus	泊松比 Poisson's ratio	弹性模量/ MPa Elastic modulus
"大西洋" "Daxiyang"	<3 g 3~5 g 6~10 g 平均 Avg.	0.756 0.755 0.751 0.750	0.330 0.328 0.335 0.330	1.965 2.008 2.005 1.993
"中薯 5 号" "Zhongshu No.5"		0.690	0.400	1.934
"华薯 1 号" "Huashu No. 1"		0.650	0.500	1.956

### 1.3 微型薯接触力学参数的测定

测定 3 种微型薯("大西洋""中薯 5 号"和"华薯 1 号")分别与 3 种材料(钢板、ABS 和各自品种微型 薯薯群)的碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系 数。为消除微型薯的形状和质量影响,挑选大小相 近、质量相当的种薯进行试验。当微型薯薯群作为 试验材料时需要挑选大小相近,形状相同的若干较 大微型薯粘结在一起。

1)碰撞恢复系数测定。如果物体与固定平面碰 撞,则碰撞前后固定平面的速度均为 0,此时碰撞恢 复系数可表示为:

$$C_{\rm r} = v_1 / v_0$$
 (2)

式(2)中: $v_0$ 为碰撞前微型薯的速率, $m/s;v_1$ 为 碰撞后微型薯的速率,m/s。碰撞试验装置如图 5 所示,以"华薯 1 号"与 3 种材料的碰撞为例。

试验全程采用高速摄影拍摄,频率为1000 fps/s。微型薯从同一高度(400 mm)由静止开始做 自由落体运动,与碰撞材料接触后碰撞产生回弹力 使之向上运动,整个运动过程能量守恒,碰撞恢复系 数可由公式(3)得:

$$C_{\rm r} = \frac{v_1}{v_0} = \frac{\sqrt{2gh_2}}{\sqrt{2gh_1}} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$
(3)

式(3)中:g 为重力加速度,9.8 m/s<sup>2</sup>;h<sub>2</sub>为碰撞 后回弹高度,m;h<sub>1</sub>为碰撞前下落高度,m。当碰撞 材料为微型薯薯群时,下落的种薯碰撞到微型薯薯 群上任一种薯为有效试验,种薯下落到薯与薯之间 的空隙时无效,不计入试验。每个品种的微型薯与 3 种碰撞材料均取 20 次有效试验,每次试验重复 5 次。试验结果显示:"大西洋""中薯 5 号""华薯 1 号"与钢板、ABS 和各自品种微型薯薯群间的碰撞 恢复系数分别为:0.577、0.482、0.449;0.564、0.480、 0.460;0.562、0.459、0.440。



A:"华薯 1 号"与 ABS 碰撞 Collision between "Huashu No.1" and ABS; B:"华薯 1 号"与"华薯 1 号"碰撞 Collision between "Huashu No.1" and "Huashu No.1"; C:"华薯 1 号"与钢板碰撞 Collision between "Huashu No.1" and steel plate; 1.碰撞材料 Collision material; 2.刻 度尺 Scale; 3.碰撞的微型薯 Collision of minitubers; 4.试验台架 Experiment shelf.

#### 图 5 碰撞恢复系数测量

Fig.5 Measurement of collision recovery coefficient

2)静摩擦系数测定。微型薯置于倾斜材料上, 重力分解为与斜面平行的力 $F_1$ 和与斜面垂直的力  $F_2$ ,最大静摩擦力f与 $F_1$ 大小相等,方向相反,即  $F_1 = f = mg \sin \alpha$ ,此时斜面的倾角与最大静摩擦存 在以下关系:

 $\mu = f/F_2 = mg\sin\alpha/(mg\cos\alpha) = \tan\alpha \tag{4}$ 

因此,可采用静摩擦测量装置进行测量。测量 时将3种材料依次置于斜板上固定,微型薯(为消除 滚动摩擦的影响,挑选各自品种代表且大小相近的 4个种薯粘连在一起为1组)放置在固定好的材料 上,放置位置相同,均为斜板300mm处。缓慢调节 斜板角度,直至微型薯和材料存在滑动趋势时停止 角度调节,记录此时底板与材料之间高度 h,由 α= arctan(h/300)计算得到倾斜角度,即为静摩擦系 数。每个品种的种薯选取10组进行试验,每组试验 重复20次取平均值。结果显示:"大西洋""中薯5 号""华薯1号"与钢板、ABS和各自品种微型薯薯 群间的静摩擦系数分别为:0.469、0.493、0.434; 0.386、0.390、0.356;0.426、0.411、0.38。

3)滚动摩擦系数测定。当点或线接触的两物体 在法向和转矩作用下产生相对滚动时,其表面会产 生阻碍相对运动趋势的形变,可用滚动摩擦力衡 量<sup>[9]</sup>。滚动摩擦系数的测定可采用斜面滚动法。微 型薯的滚动距离和滚动时间经高速摄像记录后,由 式(5)计算相应的滚动摩擦系数。试验装置同静摩 擦试验装置,材料固定在斜板上,微型薯放置在材料 上同一位置由静止释放,以0m/s开始在材料上运 动。高速摄影记录滚动过程,利用帧数变化来计算 滚动时间。设置相机帧数 200 fps/s,从微型薯开始 滚动时间。设置相机帧数 200 fps/s,从微型薯开始 滚动时间。设置相机帧数 200 mm 时的帧数为止,帧数差即为滚动时间,滚动距离 200 mm。微型薯滚动的过程中满足:

$$\mu = \tan\theta - \frac{2S}{gt^2 \cos\theta} \tag{5}$$

式(5)中:μ 为滚动摩擦系数;θ 为斜面夹角, (°);S 为滚动距离,m;g 为重力加速度,9.8 m/s<sup>2</sup>;t 为滚动时间,s。

微型薯的弹性模量较钢板、ABS小,微型薯运动时可忽略微观变形和弹性滞后,只有可能产生些 许滑动影响试验结果。当倾斜角度较大时,滑动影 响越大。为了降低这种影响,对3种微型薯进行预 滚动,选取3种微型薯都能滚动的最小角度(16°)进 行滚动试验;每个品种进行30次重复滚动试验取平 均值。结果显示:"大西洋""中薯5号"和"华薯1 号"与钢板、ABS间的滚动摩擦系数分别为:0.119、 0.120;0.067、0.089;0.076、0.082。

#### 1.4 仿真试验

1)仿真颗粒模型设置。根据各微型薯的物理力 学特征参数建立微型薯颗粒模型,各品种按比例产 生不同尺寸的种薯颗粒(图 6)。

2)堆积角仿真参数。由于微型薯之间的滚动摩 擦系数影响因素太多,难以直接测量,而堆积角与物 料的摩擦特性有很大关系<sup>[10-11]</sup>,因此,目前通用的方 法是采用离散元软件 EDEM 建立测量堆积角模型, 并输入微型薯间的静摩擦系数、微型薯间的滚动摩 擦系数以及微型薯和 ABS 间滚动摩擦系数进行仿 真试验,改变 EDEM 软件中的各摩擦系数,得到不 同的物料堆积模型,测得对应物料堆积模型的堆积 角。选取当仿真结果的堆积角与实际试验中的堆积 角近似相等时的滚动摩擦系数作为物料间的实际滚 动摩擦系数。

由于微型薯间滚动摩擦系数较小,故前期仿真 试验优先确定其范围为 0.01~0.11,仿真时按照优 先确定的范围将其等分设置为 3 个水平;微型薯间 静摩擦系数、微型薯与 ABS 间滚动摩擦系数的设置 前述试验测得的参数(表 2)为基础值上下浮动各 0.05。以堆积角 $\theta$ 为目标值,在 Design Expert 软件中 分别对 3 种微型薯开展三因素三水平响应面设计,每 组试验 17 组,3 组试验共计 51 组。每组试验重复 3 次取平均值。其余各仿真参数设置如表 2 所示。



A:"大西洋" "Daxiyang"; B:"华薯1号" "Huashu No.1"; C:"中薯5号" "Zhongshu No.5".

#### 图 6 仿真颗粒模型

Fig.6 Simulation particle model

表 2 堆积角仿真参数设置

 Table 2
 Simulation parameter setting for stacking

	仿真参数 Simulation parameter								
品种 Variety	泊松比	密度/	度/ 剪切模量/	碰撞恢复系数 Collision recovery		静摩擦系数 Static friction		滚动摩擦系数 Rolling friction	
	ratio	(kg/m°) Density	Mpa - Shear modulus	ABS	微型薯之间 Minituber	ABS	微型薯之间 Minituber	ABS	微型薯之间 Minituber
"大西洋""Daxiyang"	0.33	1 068	0.75	0.482	0.449	0.493	0.434	0.120	
"中薯5号" "Zhongshu No.5"	0.40	1 044	0.69	0.480	0.460	0.390	0.356	0.089	0.010~0.110
"华薯 1 号" "Huashu No. 1"	0.50	1 056	0.65	0.459	0.440	0.411	0.380	0.082	
ABS	0.394	1 180	318.90						

3)堆积角试验。堆积角试验采用抽板法
(图7)。仿真接触模型选择无滑移 Hertz-Mindlin,材料为 ABS,在软件 Geometry 页面中创建 1 个 200 mm×150 mm×150 mm 无盖长方体,一个虚拟的四边形盖板作为种薯下落到长方体内的基准平面。颗粒工厂设为动态,种薯的总质量 3.0 kg,根据种薯的实际几何尺寸设置,种薯按照一定的数量比例以500 个/s 的速度填充长方体内部,填充时间为 5 s。待种薯填满盒内后,创建 1 个四边形置于长方体底面充当承接掉落种薯的地板,设置长方体的一侧面以 0.1 m/s 的速度向上运动,使种薯能以较缓的速度从盒中自由散落在地板上,仿真时间设置为 10 s, 待种薯静止后测量堆积角度。真实试验与软件仿真模型相同,对 3 种微型薯进行 5 次抽板法的重复试 2.1 验,得平均值θ,见式(6)~(8)。



图 7 堆积角试验 Fig.7 Stacking angle test

$0.384 \leqslant A_1 \leqslant$	50.484	
$0.010 \leqslant B_1 \leqslant$	0.110	(6)
$\left]0.070\leqslant C_{1}\leqslant$	0.170	(0)
$\theta = 24.351^{\circ}$		
$0.306 \le A_2 \le$	0.406	
$0.010 \leqslant B_2 \leqslant$	0.110	(7)
$\left]0.039 \leqslant C_2 \leqslant \right]$	0.139	(1)
$\theta = 21.658^{\circ}$		
[0.330≪A₃≪	<b>0.</b> 430	
$0.010 \leqslant B_{3} \leqslant$	0.110	(0)
$\int 0.032 \leqslant C_3 \leqslant$	0.132	(8)
$\theta = 22.575^{\circ}$		

## 2 结果与分析

### 2.1 响应面试验

响应面试验设计结果见表 3(以"大西洋"为例),对试验结果进行方差分析,发现自变量中"大西 洋"间滚动摩擦系数(B<sub>1</sub>)极显著(P<0.000 1),失拟 项为 0.038,该方程拟合较好,比较可靠,结果表明因 素 B<sub>1</sub>对堆积角的结果影响较大,"大西洋"间静摩擦 系数(A<sub>1</sub>)、"大西洋"与 ABS 间滚动摩擦系数(C<sub>1</sub>)影 响较小。为了得到合理的堆积角,仿真与试验结果 均采用 MATLAB 对图片进行处理<sup>[12]</sup>,提取边界后 进行直线拟合,获取堆积角的真实角度(图 8)。

表 3	"大西洋"微型薯仿真试验设计及结果
Table 3	Simulation test design and results of "Deviveng

20020 0		test atsign a		2 min, mig
试验序号	因素	响应值 θ/(°)		
Number	$A_1$	$B_1$	$C_1$	Response
1	0(0.434)	-1(0.010)	-1(0.069)	20.741
2	0	1(0.110)	1(0.169)	30.653
3	0	0(0.060)	0(0.119)	28.132
4	0	-1	1	22.575
5	0	0	0	27.043
6	0	1	-1	30.080
7	-1(0.384)	-1	0	21.314
8	0	0	0	27.617
9	-1	0	-1	26.184
10	1(0.484)	0	1	28.476
11	0	0	0	27.387
12	0	0	0	28.361
13	1	0	-1	27.330
14	1	-1	0	21.830
15	-1	0	1	28.075
16	-1	1	0	30.825
17	1	1	0	31.226

注:表中  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 分別为"大西洋"间静摩擦系数、"大西洋"间 滚动摩擦系数、"大西洋"与 ABS 间滚动摩擦系数。Note:  $A_1$  is the static friction coefficient between "Daxiyang",  $B_1$  is the rolling friction coefficient between "Daxiyang",  $C_1$  is the rolling friction coefficient between "Daxiyang" and ABS.



A:堆积角 Stacking angle; B:提取边界 Extraction boundary; C:直线拟合 Straight line fitting.

#### 图 8 堆积角测量

Fig.8 Measurement of the stacking angle

使用软件的优化功能分析确定符合的参数,以 自变量 A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>的变化范围为基础,将实际堆积角 作为响应值(目标)对回归模型求解(式 6)。式(6) 中,A、B、C分别为微型薯间静摩擦系数、微型薯间 滚动摩擦系数、微型薯与 ABS 间滚动摩擦系数;1、 2、3分别为"大西洋""中薯 5号"和"华薯 1号",如 A<sub>1</sub>为"大西洋"间静摩擦系数。确定"大西洋""中薯 5号"和"华薯 1号"与各自品种间的滚动摩擦系数 分别为 0.031、0.020 和 0.024。

#### 2.2 试验结果验证

在几何体模块新建一个仿真模型(图 9A),创建 一个 500 mm×500 mm 的四边形底面置于圆筒底 部,一个无底无盖圆筒 200 mm(半径)×350 mm (高),将前述试验测得的物理力学特征参数、接触力 学参数和仿真得到的微型薯间的滚动摩擦系数输入 EDEM 软件参数设置中,其余相关设置参见表 2。 设置微型薯颗粒的总质量为 2.0 kg,仿真时间 10 s。 待种薯填满圆筒且稳定后,设置圆筒以 0.1 m/s 的 速度向上做线性运动,直至仿真结束,测得"大西洋" "中薯 5 号""华薯 1 号"的仿真堆积角分别为 23.377°、19.824°和 20.913°。

实际试验(图 9B)与仿真试验方法一致,进行 5 次重复试验后得"大西洋""中薯 5 号""华薯 1 号"的 堆积角分别为 23.778°、19.423°和 21.314°,与仿真的 堆积角试验结果相比,相对误差分别为 1.69%、 2.06%、1.88%,表明采用此方法可得到较为相似的 结果,与实际情况相符,即微型薯离散元颗粒参数可 为 EDEM 模拟仿真微型薯颗粒与机械设备优化提 供参考。



A:仿真试验 Simulation test; B 真实试验 Actual test. 图 9 圆筒提升试验 Fig.9 Lifting test of the cylinder

## 3 讨 论

本研究测量了湖北地区常见3种微型薯("大西 洋""中薯5号""华薯1号")的物理力学特征参数, 包括其基本物理特征参数(三轴尺寸、质量、曲率半 径)、密度、泊松比和剪切模量。测试结果表明,密 度、剪切模量和泊松比与微型薯的基本物理特征参

数相关性较小,但基本物理特征参数差异较大,品种 差异较大。在设计、仿真计算时可以根据用户需求 选择所需参数。3种微型薯和各自品种微型薯薯群 之间的接触力学参数较钢板、ABS均低,3种微型薯 和 ABS 的静、动摩擦系数均高于钢板,但碰撞恢复 系数则呈相反趋势, ABS 均低于钢板。"大西洋"的 接触力学参数均高干"中薯5号"和"华薯1号",3 种材料中"大西洋"与钢板的接触力学参数最大,与 ABS 和微型薯薯群之间的接触力学参数依次降低, 表明其弹性恢复性能最好,摩擦力较大,相对不容易 损伤,但流动性较差,机械化播种性能差。"中薯5 号"和"华薯1号"的接触力学参数差异较小,"中薯 5号"略大于"华薯1号"。不同品种对接触力学参 数影响大,在设计、仿真时要充分考虑品种差异,不 能忽略。采用响应曲面法设计试验,以静摩擦系数、 滚动摩擦系数为试验变量,堆积角为试验指标,根据 试验因素与变量的二阶回归方程进行方差分析,结 果表明,各品种微型薯之间的滚动摩擦系数差异极 显著。利用 Design Expert 软件中的优化模块将试 验测得的实际堆积角作为响应值对得到的回归模型 求解,确定了"大西洋""中薯5号""华薯1号"与各 自品种间的滚动摩擦系数分别为 0.031、0.020 和 0.024。通过圆筒提升试验对仿真得到的滚动摩擦系 数进行验证,结果显示仿真结果与试验结果的差异 均小于3%,说明本研究所测定的微型薯颗粒实际 参数可作为 EDEM 软件中仿真参数使用,仿真结果 误差较小。

## 参考文献 References

- [1] 袁赜.脱毒马铃薯高产种植技术[J].吉林农业,2014(6):65.
   YUAN Y.High-yield planting technology of virus-free potato
   [J].Jilin agriculture,2014(6):65(in Chinese).
- [2] 冯洁,曹琳琳,王越,等.无糖组织培养技术在马铃薯种苗快繁中的应用[J].华中农业大学学报,2019,38(6):62-69.FENG J, CAO L L,WANG Y, et al.Application of sugar-free micropropagation on potato seedlings rapid propagation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 132-138(in Chinese with English abstract).
- [3] 张新明.2017年广东省马铃薯产业现状、存在问题及发展建议 [C]//中国作物学会马铃薯专业委员会.马铃薯产业与脱贫攻 坚(2018).中国作物学会马铃薯专业委员会:中国作物学会马

铃薯专业委员会,2018:78-81.ZHANG X M.The current situation, problems and development suggestions of the potato industry in Guangdong Province in 2017[C]//Potato Professional Committee of China Crop Society. Potato industry and poverty alleviation (2018). Potato Professional Committee of China Crop Society:Potatoes of China Crop Society Professional Committee,2018:78-81(in Chinese).

- [4] 郭小军,张海东,吴进玲,等.基于 EDEM 的勺轮式葵花排种器 离散元仿真研究[J].中国农机化学报,2019,40(2):19-24.
  GUO X J,ZHANG H D,WU J L,et al.Discrete element simulation of a spoon-wheel sunflower seeder based on EDEM[J].
  Journal of Chinese agricultural mechanization,2019,40(2):19-24(in Chinese with English abstract).
- [5] BALEVICIUS R.SIELAMOWICZ I, MROZ Z. 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.
- [6] 张涛,刘飞,赵满全,等.大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定[J].中国农业大学学报,2017,22(9):86-92. ZHANG T,LIU F,ZHAO M Q, et al. Determination and discrete element simulation calibration of physical parameters of soybean seed and seed metering device[J].Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9):86-92(in Chinese with English abstract).
- [7] 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. LIU W Z,HE J, LI H W,et al.Simulation parameter calibration of micro-potato based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural machinery,2018,49(5):125-135(in Chinese with English abstract).
- [8] 李里特.食品物性学[M].北京:中国农业出版社,2001.LILT. Food properties[M].Beijing:China Agriculture Press,2001(in Chinese).
- [9] 汪志城、滚动摩擦机理和滚动摩擦系数[J].上海机械学院学报, 1993(4):35-43. WANG Z C. Rolling friction mechanism and rolling friction coefficient[J]. Journal of Shanghai Institute of Machinery, 1993(4):35-43(in Chinese).
- [10] MASSON S, MARTINEZ J.Effect of particle mechanical properties on silo flow and stresses from distinct element simulations[J]. Powder technology, 2000, 109(1):164-178.
- [11] GONZALEZ C, RAMIREZ A, GALLEGO E, et al. Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos[J].Chemical engineering science, 2011, 66(21), 5116-5124.
- [12] FRACZK J.ZLOBECKI A, ZEMANEK J. Assessment of angle of repose of granular plant material using computer image analysis[J].Journal of food engineering,2006,83(1):17-22.

## Discrete element simulation parameters-based measurement of materials for potato minituber

YU Cancan<sup>1</sup>, DUAN Hongbing<sup>1,2</sup>, CAI Xingkui<sup>2</sup>, XU Tao<sup>1</sup>, YAO Feihu<sup>1</sup>, CHEN Zhihui<sup>1</sup>, YAN Fuyong<sup>1</sup>

 1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
 2.Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Potato Biology and Biotechnology, Wuhan 430070, China

**Abstract** Parameters of physical and mechanical characteristics are indispensable in designing potato minituber related mechanical equipment planter and classifier. Parameters of the contact mechanics are indispensable in developing simulation technology as well. The virus-free potato minitubers (referred as "minituber") including "Daxiyang", "Zhongshu No.5" and "Huashu No.1" and the relevant parameters required for discrete element software EDEM in potato minituber were used to measure physical parameters and contact mechanical parameters of three kinds of potato minitubers. Self-made equipment was used to measure and calculate the triaxial dimensions, weight, radius of curvature, density, Poisson's ratio and shear modulus. The contact mechanical parameters of three kinds of minitubers and three materials (steel plate, ABS and the same variety potato minitubers) including the collision recovery coefficient were measured by using a self-made collision device. The static friction coefficient was measured by using the method of sliding on an inclined plane. The combination of rolling on an inclined plane and high-speed photography was used to record the rolling distance and measure the rolling friction coefficient of potato minituber, steel plates or ABS. The response surface method was used to design the test by using coefficient of static friction and coefficient of rolling friction as test variables, and the stacking angle as test index. The parameters measured in the above experiment were input into the EDEM for simulation to obtain coefficient of the rolling friction in minitubers. Using the stacking angle as the response value, and the credibility of the simulation results was verified by raising a round pipe slowly. Results showed that density, shear modulus and Poisson's ratio had little correlation with the basic parameters of physical characteristics of minitubers. The triaxial dimensions, weight and radius of curvature were quite different. The varieties were different as well. The contact mechanical parameters of the three types of minitubers and their own same variety were lower than those of the steel plate and ABS. The coefficients of static and dynamic friction of the three types of minitubers and ABS were higher than that of the steel plate. The collision recovery coefficient showed the opposite trend. ABS was lower than the steel plate. The contact mechanical parameters of "Daxiyang" were higher than those of "Zhongshu No.5" and "Huashu No.1". Among the three materials, the contact mechanical parameters with the steel plate were the largest, indicating that its elastic recovery performance is the best, with relatively large friction and relative difficulty to be damaged. The fluidity and the mechanized seeding performance was poor. The difference of contact mechanical parameters between "Zhongshu No.5" and "Huashu No.1" was small. The measurement results of different varieties of minitubers were quite different. Users can select the required parameters in the text according to their needs. The variety should be fully considered in the design and simulation calculations. Compared with the actual accumulation angle of the experiment, the simulation results of different varieties of potato minituber were less than 3%, indicating that the results are reliable and the actual parameters of the minituber particles measured can be used as simulation parameters in the EDEM software.

**Keywords** potato; potato minituber; measurement of materials; discrete element simulation; coefficient of static friction; rolling friction parameters; stacking angle; virus free seed potato; mechanized sowing