

霍星辰,宋卫东,王明友,等.双孢菇麦粒菌种离散元分析参数试验研究及仿真标定[J].江苏农业科学,2019,47(18):271-276.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.18.058

双孢菇麦粒菌种离散元分析参数试验研究及仿真标定

霍星辰,宋卫东,王明友,王教领,丁天航,李 锋

(农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京 210014)

摘要:为确定双孢菇麦粒菌种 EDEM 离散元仿真参数,通过实测试验测得其 3 轴尺寸、含水率、千粒质量、颗粒密度等本征参数,借助 Matlab 图像处理技术测得双孢菇堆积角为 25.25° 。利用 EDEM 仿真软件设计 Plackett-Berman 试验和二次回归通用旋转组合试验,筛选显著因素并建立二次回归模型,进而得出双孢菇麦粒菌种离散元仿真分析参数最优组合,泊松比为 0.305,剪切模量为 5.07 MPa,颗粒密度为 $1\,916\text{ kg/m}^3$,种间碰撞恢复系数 0.5、滑动摩擦因数 0.4、滚动摩擦因数 0.018,种与塑料的碰撞恢复系数为 0.335,滑动摩擦因数为 0.55,滚动摩擦因数为 0.055。设计验证试验结果表明,该参数组合下的仿真试验和实测试验结果无显著差异。标定所得双孢菇麦粒菌种仿真分析参数组合可为麦粒菌种仿真试验提供参考。

关键词:双孢菇麦粒菌种;离散元;Matlab;堆积角;仿真标定

中图分类号:S220.1;O347.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)18-0271-06

双孢菇营养丰富,味道鲜美,是人们日常生活中主要消费的食用菌之一。双孢菇产地分布广泛,是全球性栽培的食用菌,其产量占食用菌总产量的 45% 左右^[1-3]。双孢菇在我国十分受欢迎,近年来,我国成为世界双孢菇年平均产量最大的国家,占世界双孢菇年产量的 70%^[4]。2016 年我国双孢菇产量达 254.69 万 t,位于香菇和平菇之后,居于第 3 位^[5]。但我国双孢菇生产水平落后,相关理论知识尚不完善。若要规范化标准化双孢菇生产的各个环节,包括拌料、培养料堆制与发酵、接种、播种、覆土、喷水、采收和清床,需要确定双孢菇及其麦粒菌种的表征参数。随着计算机技术的发展与广泛应用,仿真模拟技术在农业生产领域得到了巨大发展。随着有限元法和计算流体力学在工程上用于解决复杂机械系统问题之后,针对颗粒物料和岩土工程的离散元法也得到普遍应用。利用离散元法模拟分析可以获得颗粒物料复杂的运动信息、力学信息以及能量信息等,帮助解决产品设计、研发、优化过程中遇到的问题。仿真模拟参数直接决定了仿真的精度,所以进行离散元模拟分析之前需要获得准确的仿真参数^[6-10]。

双孢菇麦粒菌种是由麦粒经过温水浸泡、沥干、搅拌、装袋、灭菌、冷却、接种、发菌而形成的。特殊的制作流程使其含水率变高、弹性增大、质地变软,改变了其原有物料的参数,双孢菇麦粒菌种播种时不能完全参照小麦的物料参数,为了得到准确的离散元仿真结果,需要对麦粒菌种物料参数进行试验测量和仿真标定。鹿芳媛等通过内部坍塌法和侧壁坍塌法的堆积试验得出 2 种堆积角,利用 EDEM 设计仿真试验标定

不同含水率下水稻芽种离散元仿真接触参数^[11]。罗帅等设计 PB 试验和 Box-Benken 试验,标定了 JKR 粘结模型蚯蚓粪基质离散元仿真参数^[12]。贾富国等利用 Matlab 图像处理技术读取了稻谷颗粒物料堆积角^[13]。刘凡一等在最陡爬坡试验的基础上确定仿真离散元参数的区间,利用 Box-Benken 试验结果优化了小麦离散元仿真参数^[14]。王云霞等基于不同的接触材料设计仿真试验,得到不同的回归方程,联立求解标定了玉米种间滑动摩擦系数和滚动摩擦系数^[15]。李海伟利用 EDEM 软件批处理功能标定了散状物料 JKR 模型的能量密度、颗粒间的静摩擦系数和滚动摩擦系数^[16]。目前,国内外尚无关于双孢菇麦粒菌种离散元仿真参数的研究,本研究基于已有的对各类测量散状颗粒物料的物料参数的测定方法和仿真标定资料,在农业农村部南京农业机械化研究所实验室通过实测试验测定双孢菇麦粒菌种的部分本征参数,并结合麦粒菌种的实际轮廓,设计堆积角试验,采用图像处理技术和离散元软件 EDEM 对难以测量的本征参数和接触参数进行仿真标定。本研究为双孢菇麦粒菌种排种仿真试验提供依据,最大程度减小由于仿真参数造成的试验误差,并为后续双孢菇生产问题研究提供参考依据。

1 双孢菇麦粒菌种本征参数的实测试验测定

使用离散元分析软件 EDEM 进行仿真分析时,前处理部分包含 4 个子面板,分别是全局设置 (Globals)、粒子系统 (Particles)、几何体 (Geometry) 和粒子工厂 (Factories)。在全局设置中需要填写粒子和接触材料的本征参数,包括泊松比、密度和剪切模量,接触参数包括粒子间和粒子与接触材料的碰撞恢复系数、滑动摩擦系数以及滚动摩擦系数。麦粒菌种的泊松比和剪切模量不易通过试验方法测得,通过查找文献资料和基于试验所测得的含水率确定其范围,其中麦粒菌种的泊松比为 $0.16 \sim 0.45$,剪切模量为 $(1.5 \times 10^6) \sim (1 \times 10^7)\text{ Pa}$ ^[17-20],由于麦粒菌种具有吸水性,所以其密度用小米置换法测定^[21]。麦粒菌种排种器的排种轮材质为工程塑料,

收稿日期:2018-06-11

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201503137);国家食用菌产业技术体系项目(编号:CARS-20)。

作者简介:霍星辰(1992—),男,辽宁阜新新人,硕士研究生,主要从事农业机械化工程研究。E-mail:2572410338@qq.com。

通信作者:宋卫东,研究员,硕士生导师,主要从事食用菌栽培全程机械化技术与装备研究。E-mail:songwd@163.com。

其本征参数用 EDEM 软件自建材料库参数。粒子间和粒子与接触材料的接触参数包括碰撞恢复系数、滑动摩擦系数和滚动摩擦系数,均不易测量,需要进行标定。其中粒子和接触材料的碰撞恢复系数可以通过实测试验测定范围,进而减小误差。在粒子系统中需要定义粒子外形和尺寸,在颗粒工厂中需要定义粒子的质量,这些参数易通过试验测得。

1.1 麦粒菌种 3 轴尺寸的测定

测量麦粒菌种的几何尺寸即是测量长、宽、高 3 轴尺寸,随机选取 100 粒麦粒菌种,对种子表面进行适当清洁除杂,使用精度为 0.02 mm 的艾瑞泽电子游标卡尺分别测量麦粒菌种的长、宽、高,分别取平均值为 5.8、3.6、3.0 mm。根据所测得 3 轴尺寸,利用 EDEM 软件建立如图 1 所示麦粒菌种颗粒六球模型^[22],各球面尺寸及分布如图 2 所示。

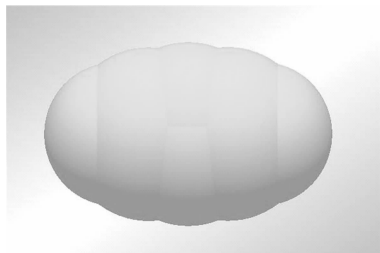


图1 颗粒离散元模型

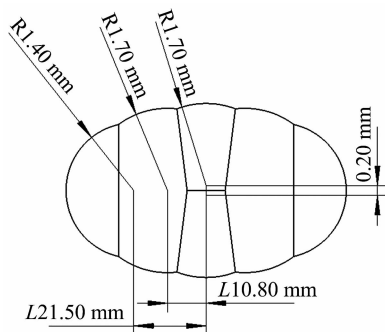


图2 颗粒模型尺寸分布

1.2 千粒质量、含水率与颗粒密度的测定

千粒质量是颗粒物料重要的本征参数之一,首先对麦粒菌种进行清洗筛选,去除杂质和破碎的颗粒,随机数出 1 000 粒干净无损伤的麦粒菌种,用上海良平 JY5002 电子秤(精度 0.01 g)称质量,试验重复 10 次,均值为 58.23 g。

利用奥豪斯 MB27 快速水分测定仪测出麦粒菌种的含水率,试验进行 5 次,测得平均值为 42.11%。可以看出,经过特殊加工制作的双孢菇麦粒菌种的含水率比正常小麦的含水率高出很多。

颗粒密度同样是颗粒物料的重要参数。采用小米置换法测量麦粒菌种的颗粒密度,既可以很好地填充麦粒菌种颗粒间隙,又可以避免因麦粒菌种吸水而造成的测量误差。首先用安衡电子秤(精度 0.1 g)测量出 200 mL 标准纸杯的质量 m_1 ,然后向纸杯内倒满小米将杯口刮平,称量纸杯和小米的总质量,测量 5 次并计算均值为 m_2 。随机选出适量麦粒菌种颗粒,清洁去杂质后称得质量为 m_3 。倒出纸杯内的部分小米,将刚才称得的麦粒菌种颗粒放入纸杯中,再倒满小米并将

杯口刮平后称质量,此过程同样重复 5 次并取平均值,测得装满麦粒菌种和小米的纸杯质量为 m_4 ,最后计算麦粒菌种颗粒密度

$$\rho = m_3(m_2 - m_1) / [v(m_2 + m_3 - m_4)]。$$

试验测得 m_1 为 5.2 g、 m_2 为 209.0 g、 m_3 为 10.0 g、 m_4 为 214.0 g、 v 为 200 mL,计算所得颗粒密度为 1 916 kg/m³。

1.3 麦粒菌种堆积角的测定

堆积角是物料堆积时所形成的圆锥体母线与地面所成的夹角,其作为物料的本征参数主要受自身属性影响。物料堆积角主要反映物料的内摩擦性能,通常内摩擦性能越大,堆积角越大^[23-24]。国内外学者研究表明,通过堆积角试验可以探究物料的内摩擦特性,标定物料接触参数。

本试验采用侧壁坍塌法^[25]进行堆积角试验,在工程塑料材质的方形盒内填充已经筛选好的双孢菇麦粒菌种,待麦粒菌种稳定后将一侧的挡板撤掉,盒内麦粒菌种向撤掉挡板的方向坍塌形成堆积角。在正对着麦粒堆的方向对堆积角进行拍照,对所获得的图片首先用 Photoshop CS6 软件裁剪所需要测得的堆积角部分,然后再使用快速选择工具选择出麦粒堆轮廓,获得 1 张相对纯净的麦粒菌种堆积角图片。将图片在 Matlab R2017b 中打开,经过灰度处理、二值化处理,利用 edge 函数提取边界,利用 polyfit 函数对边界进行线性拟合,得出麦粒菌种堆积角边界一次线性回归拟合方程,进而算出堆积角,图像处理和计算结果如图 3 所示。试验进行 5 次并取平均值,得双孢菇麦粒菌种堆积角为 25.25°。

2 麦粒菌种接触参数的测定与仿真标定

2.1 麦粒菌种与接触材料碰撞恢复系数测定

碰撞恢复系数为物料的弹性参数之一,表示物料发生碰撞后形变恢复的能力,碰撞系数越大,物料恢复形变的能力越强,弹性越好。发生完全弹性碰撞(物体碰撞后,形变能够恢复,没有能量损失)时,碰撞恢复系数为 1;完全非弹性碰撞(碰撞两物体结合到一起)时,碰撞恢复系数为 0,其他非弹性碰撞时,碰撞恢复系数在 0~1 之间。碰撞恢复系数定义为碰撞前后两物体在接触点的法向方向上分离速度与接近速度之比。碰撞恢复系数可用数学公式表示为。

$$C_r = \frac{u_{2n} - u_{1n}}{v_{2n} - v_{1n}}。$$

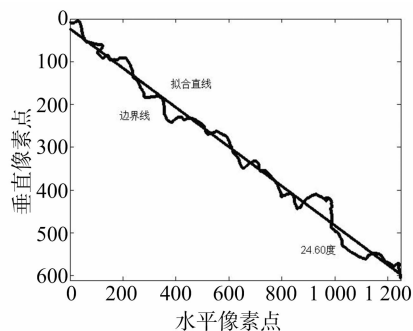
式中: C_r 表示碰撞恢复系数; u_{1n} 、 u_{2n} 表示分离速度; v_{1n} 、 v_{2n} 表示接近速度^[26-27]。

首先筛选出用于碰撞恢复系数试验的麦粒菌种,剔除掉形状不规则、尺寸偏大或偏小的麦粒菌种。麦粒菌种颗粒从高度为 H 的试验板自由落体落下,并与安装在试验支架上与水平方向呈 45°角的塑料板碰撞,经反弹后落到表面涂有洗洁精的收集板上。为减小个别籽粒带来的试验误差,每次试验选取已经分组的 20 粒种子,以收集板上落点聚集性较好的(>80%)区域的中心点为测量点,测试 2 组在收集板不同高度时的水平距离 s_1 、 s_2 和竖直距离 h_1 、 h_2 。测量碰撞恢复系数的装置和原理图分别如图 4、图 5 所示。

物料从试验支架顶部的投种板上自由落下,在与碰撞板碰撞之前速度为 $v_0 = \sqrt{2gH}$,与碰撞板碰撞后做抛物线运动,将运动分解为水平方向上的速度 v_x 和竖直方向上的速度 v_y ,



a. 原始图像



b. Matlab 计算结果



c. Photoshop 提取



d. 灰度处理

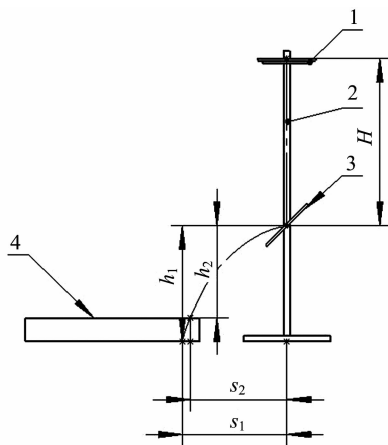


e. 二值化处理

图3 Matlab 图像处理



图4 碰撞恢复系数测试装置



1—投种板; 2—试验支架; 3—碰撞板; 4—载物台

图5 碰撞恢复系数测试原理

抛物线运动方程为 $s = v_x t$ 、 $h = v_y t + 1/2 g t^2$, 通过测量不同载物台高度试验条件下的水平和竖直位移 s_1 、 s_2 、 h_1 、 h_2 , 并联立上述公式解得 v_x 和 v_y 为

$$v_x = \sqrt{\frac{g s_1 s_2 (s_1 - s_2)}{2(h_1 s_2 - h_2 s_1)}}, v_y = \frac{h_1 v_x}{s_1} - \frac{g s_1}{2 v_x}$$

根据碰撞恢复系数定义, 并结合平面几何三角形公式, 计算得碰撞恢复系数 c_r 为

$$c_r = \frac{\sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} \cdot \cos \left[45^\circ + \arctan \left(\frac{v_y}{v_x} \right) \right]}{v_0 \cdot \sin 45^\circ}$$

试验进行 5 次测得麦粒菌种与工程塑料最小碰撞系数为 0.250, 最大碰撞系数为 0.420, 试验结果如表 1 所示。

表 1 碰撞恢复系数

试验次数	h_1	h_2	s_1	s_2	v_x	v_y	c_r
1	0.2	0.16	0.176	0.157	0.891	0.045	0.349
2	0.2	0.16	0.183	0.166	1.101	0.390	0.293
3	0.2	0.16	0.175	0.152	1.118	0.510	0.250
4	0.2	0.16	0.173	0.156	0.799	-0.137	0.386
5	0.2	0.16	0.181	0.164	0.802	-0.219	0.420

2.2 离散元分析接触参数标定仿真试验

利用 EDEM 2.7 软件, 建立图 1 所示麦粒菌种颗粒离散元模型, 通过上文实测试验及查阅国内外相关文献材料确定双孢菇麦粒菌种离散元仿真参数如表 2 所示。利用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型, 在 SolidWorks 建立侧壁坍塌法堆

积角试验的方形盒子并导入 EDEM, 在工厂平面生成麦粒菌种颗粒填充方形盒子, 撤掉一侧挡板形成麦粒堆, 进而实现堆积角试验的仿真。仿真固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 25%, 数据保存间隔为 0.5 s, 最小网格直径设置为 3R, 针对笔者自己的电脑设置仿真引擎为 40 核。

表 2 离散元仿真参数

仿真参数	数值	类型
麦粒菌种泊松比	0.16 ~ 0.45	变量
塑料泊松比	0.4	定量
麦粒菌种剪切模量 (Pa)	$1.5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$	变量
塑料剪切模量 (Pa)	1×10^8	定量
麦粒菌种密度 (kg/m ³)	1 916	定量
塑料密度 (kg/m ³)	1 500	定量
种间碰撞恢复系数	0.1 ~ 0.9	变量
种与塑料碰撞恢复系数	0.25 ~ 0.42	变量
种间滑动摩擦因数	0.1 ~ 1.0	变量
种与塑料滑动摩擦因数	0.1 ~ 1.0	变量
种间滚动摩擦因数	0.01 ~ 0.10	变量
种与塑料滚动摩擦因数	0.01 ~ 0.10	变量

2.3 仿真试验设计与数据分析处理

2.3.1 Plackett – Burman 筛选显著影响因子 双孢菇麦粒菌

种各个离散元仿真参数均对侧壁坍塌法堆积角试验结果有一定影响,但重要性各不相同。以双孢菇麦粒菌种离散元仿真参数中的 8 个变量为真实因子,选取 3 个虚拟因子,利用 SAS 9.4 设计 Plackett – Burman 试验,筛选对麦粒菌种堆积角影响显著的因子。利用 EDEM 进行仿真各参数组堆积角 Plackett – Burman 试验,并将试验结果以图片形势保存,再用 Matlab R2017b 对图像进行处理,得出各组试验堆积角。试验设计及仿真结果如表 3 所示,利用 SAS 9.4 软件进行显著性分析,处理数据结果如表 4 所示。显著性分析结果表明,影响因子 e (种间滑动摩擦系数) 和影响因子 g (种间滚动摩擦系数) 显著性水平达到 0.1,所以将这二者作为影响麦粒菌种堆积角的重要影响因子,这也验证了物料堆积角主要反映物料的内摩擦性能,并推测可知麦粒菌种在形成堆积角的过程中,存在多种运动状态,主要运动为种间的相对滑动和滚动,在外部环境条件一定的情况下,堆积角的大小由麦粒菌种间滑动摩擦系数和滚动摩擦系数共同决定。

表 3 Plackett – Berman 试验设计及结果

试验编号	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	y
1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	13.98
2	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	13.61
3	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	27.36
4	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	13.71
5	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	39.48
6	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	31.16
7	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	15.31
8	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	38.59
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	30.58
10	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	40.34
11	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	22.86
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	12.48

注: a —泊松比; b —剪切模量; c —虚拟因子; d —种间碰撞恢复系数; e —种间滑动摩擦系数; f —虚拟因子; g —种间滚动摩擦系数; h —种与塑料碰撞恢复系数; i —虚拟因子; j —种与塑料滑动摩擦系数; k —种与塑料滚动摩擦系数; y —堆积角。

表 4 Plackett – Berman 试验显著性分析

变量	自由度	参数估计	标准误差	t 值	P 值
截距	1	24.955 00	1.303 63	19.14	0.000 3
a	1	0.425 00	1.303 63	0.33	0.765 8
b	1	0.008 33	1.303 63	0.01	0.995 3
d	1	0.258 33	1.303 63	0.20	0.855 6
e	1	9.630 00	1.303 63	7.39	0.005 1
g	1	3.471 67	1.303 63	2.66	0.076 1
h	1	0.175 00	1.303 63	0.13	0.901 7
j	1	1.123 33	1.303 63	0.86	0.452 2
k	1	-0.293 33	1.303 63	-0.23	0.836 4

2.3.2 回归试验设计与分析 针对 Plackett – Berman 试验结果,对麦粒菌种种间滑动摩擦系数、种间滚动摩擦系数和堆积角建立回归模型。利用 SAS 9.4 进行二次回归通用旋转组合试验设计,经查阅相关试验设计文献可知 $p=2$ 因素通用回归旋转组合试验设计选 $L_4(2^3)$ 正交表, $m_e=2^2=4$,星号点 $2 * p=4$,中心点试验次数 $m_0=5$,试验次数 $n=m_e+2p+m_0$,主轴点位置 $\gamma=1.414\ 2$ 。因素 a 、 b 最高最低水平分别编码

γ 、 $-\gamma$,中值编码 0,根据经验公式计算出编码 1 和 -1 时 a 、 b 因素的值,根据二次回归通用旋转组合试验表设计试验并分析数据结果。试验设计及分析数据结果如表 5、表 6、表 7 所示。由表 7 可知,方差分析结果显示,总模型显著度 <0.01 ,种间滑动摩擦因数和种间滚动摩擦因数对堆积角影响极显著。失拟检验显著度为 $0.066\ 0 > 0.05$,模型不失拟, R^2 为 $0.979\ 3$ 接近于 1,变异系数 CV 为 $2.479\ 2\%$,较小,说明二次回归模型拟合良好。由编码参数估计可以看出,种间滑动摩擦系数 a 的二次项估计不显著,其余均显著。由实际参数估计得到回归方程各参数值,进而得出关于堆积角 y 、种间摩擦系数 a 和种间滚动摩擦系数 b 的回归方程为 $y = 24.422\ 405 + 2.630\ 586a - 94.341\ 820b + 108.035\ 679ab + 1\ 134.892\ 223b^2$ 。利用逐步筛选法剔除不显著的自变量,优化回归模型。在优化模型分析中,优化回归模型同样显著并不失拟,变异系数 CV 减小为 2.39% ,模型可靠性进一步增加。得到优化回归方程为 $y = 23.953\ 15 + 4.525\ 48a - 91.762\ 80b + 107.901\ 20ab + 1\ 111.863\ 00b^2$ 。

表 5 二次回归通用旋转组合试验因子编码表

编码	<i>a</i>	<i>b</i>
$-\gamma$	0.100	0.010 0
-1	0.232	0.023 2
0	0.550	0.055 0
1	0.868	0.086 8
γ	1.000	0.100 0

注：*a*—种间滑动摩擦系数；*b*—种间滚动摩擦系数； $\gamma=1.414\ 2$ 。

2.3.3 回归模型交互效应分析 应用 Design Expert 10 绘制堆积角 γ 与种间滑动摩擦系数 *a*、种间滚动摩擦系数 *b* 交互作用三维回归模型图,如图 6 所示,可以清楚观察 2 个参数的交互效应。从整体上看,随着 2 个参数的增加,堆积角也呈现增大的趋势。当参数 *a* 取小值时,休止角随着参数 *b* 的增加而增加的趋势小于当参数 *a* 取较大值时,该趋势对于参数 *b* 也同样适用。

表 7 二次回归通用旋转组合设计数据分析结果

项目	自由度	平方和	均方和	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	<i>R</i> ²	变异系数 <i>CV</i> (%)
总模型	5	168.022 725		66.3	<0.000 1		
失拟检验	3	2.858 318	0.952 773	5.53	0.066 0	0.979 3	2.479 2
总模型	4	167.81	41.95	89.34	<0.000 1		
失拟检验	4	3.07	0.77	4.45	0.088 7	0.978 1	2.390 0

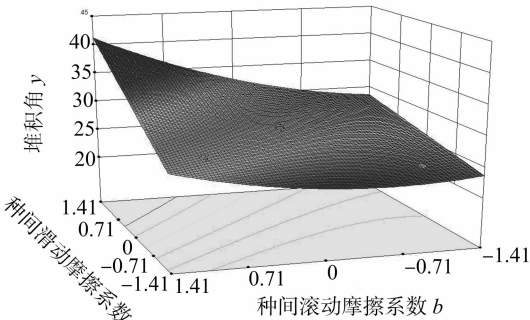


图6 *a*、*b*交互作用三维回归模型

3 种间滑动摩擦系数测定与参数验证

3.1 种间滑动摩擦系数实测试验测定

上文的实测试验测出目标麦粒菌种堆积角为 25.25°,仿真试验得出麦粒菌种堆积角与种间滑动摩擦系数和种间滚动摩擦系数的回归方程,所以,知道 2 个参数之一即可得到另一

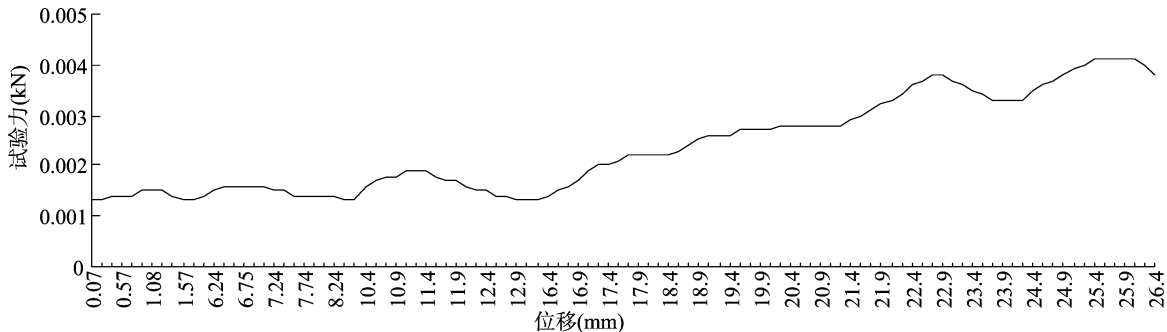


图7 力与位移关系曲线

表 6 二次回归通用旋转组合试验设计

试验编号	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i> 编码	<i>b</i> 编码	<i>y</i>
1	0.868	0.086 8	1	1	35.65
2	0.868	0.023 2	1	-1	27.78
3	0.232	0.086 8	-1	1	27.76
4	0.232	0.023 2	-1	-1	24.26
5	1.000	0.055 0	1.414 2	0	33.99
6	0.100	0.055 0	$-1.414\ 2$	0	23.23
7	0.550	0.100 0	0	1.414 2	34.63
8	0.550	0.010 0	0	$-1.414\ 2$	26.49
9	0.550	0.055 0	0	0	27.95
10	0.550	0.055 0	0	0	27.35
11	0.550	0.055 0	0	0	27.67
12	0.550	0.055 0	0	0	28.10
13	0.550	0.055 0	0	0	28.44

个参数值,因种间滑动摩擦因数相对易测量,利用实测试验测定其值,并标定种间滚动摩擦因数。在塑料瓶外壁用万能胶沾满麦粒菌种,静置,待麦粒菌种与瓶身粘牢后测得总质量 *m*。再通过万能试验机匀速拉动沾满麦粒菌种的塑料瓶在铺满麦粒菌种的桌面上匀速前进,得到试验力与位移变化曲线如图 7 所示。试验力在位移为 16.405 mm 处开始逐渐增加,原因是随着麦粒菌种塑料瓶移动,麦粒菌种在瓶子前进方向逐渐堆积影响瓶子前进,计算位移为 0~16.405 mm 时试验力的平均值作为拉力,根据力的平衡原理以及摩擦力计算公式得试验力 $F=f=N\mu=mg\mu$,进而计算得出种间滑动摩擦因数 μ 值。试验测得麦粒菌种塑料瓶质量 $m=0.378\text{ kg}$,试验力 $F=1.5\text{ N}$, $\mu=0.4$ 。

3.2 离散元仿真参数组合确定及试验验证

通过实测试验测得双孢菇麦粒菌种 3 轴尺寸、含水率、密度、种与塑料碰撞恢复系数、种间滑动摩擦因数等参数。Plackett-Burman 试验结果表明,种间滑动摩擦因数和种间滚动摩擦系数对堆积角影响显著,其他未通过实测试验测量的

非显著参数则取中间值,根据二次回归通用旋转组合试验得出的回归方程以及种间摩擦系数,利用 Matlab 求解方程得出种间滚动摩擦系数一个解为 0.018,另一个解为 0.026。利用以上离散元仿真参数,设计提升圆筒法的堆积角实测试验和仿真试验验证参数的可行性。预先在工程塑料的圆筒填充双孢菇麦粒菌种,待稳定后快速提起圆筒,筒内麦粒菌种形成堆积角,同样利用 Matlab 图像处理测量堆积角,试验进行 10 次并取平均值,测得提升圆筒法堆积角为 23.23°。提升圆筒法堆积角试验与侧壁坍塌法堆积角试验所得堆积角有差异,可能是圆筒提升速度等因素造成,有待后续深入研究。采用以上参数利用 EDEM 进行提升圆筒法堆积角仿真试验,种间滚动摩擦因数为 0.018 时进行 10 次试验,0.026 时进行 10 次试验,利用 Matlab 分别测得各次试验堆积角,测得种间滚动摩擦因数为 0.018 时堆积角平均值为 23.082°,种间滚动摩擦因数为 0.026 时堆积角平均值为 23.498°。利用 SAS 9.4 软件进行 t 检验,分别对不同滚动摩擦因数试验结果与实测结果对比分析,种间滚动摩擦因数为 0.018、0.026 时的显著性分别为 0.218、0.090,均大于 0.05,仿真试验结果与实测试验结果无显著差异,当滚动摩擦因数为 0.018 时,仿真试验堆积角更接近真实值,所以标定双孢菇麦粒菌种种间滚动摩擦因数为 0.01。

4 结论

本研究针对双孢菇麦粒菌种本征参数和接触参数进行了实测试验测定,测得双孢菇麦粒菌种 3 轴尺寸分别为 5.8、3.6、3.0 mm,千粒质量为 58.23 g,含水率为 42.11%,密度为 1 916 kg/cm³,麦粒菌种与工程塑料的碰撞恢复系数为 0.335,种间滑动摩擦系数为 0.4。

利用 Matlab 图像处理技术测得双孢菇侧壁坍塌法堆积角为 25.25°,并提出了一种测量散粒物料堆积角的方法,利用 edge 函数提取边界,利用 polyfit 函数进行拟合。这种方法精度高,拟合效果好,为散粒物料堆积角处理提供了一种思路。

通过 Plackett – Berman 试验验证堆积角的形成主要受到种间滑动摩擦因数和滚动摩擦因数影响,由此可推测双孢菇麦粒菌种形成堆积角过程的主要运动为种间的相对滑动和滚动。而其他非显著参数在离散元仿真时取中间水平。

通过二次回归通用旋转组合试验,得出了双孢菇麦粒菌种堆积角与种间滑动摩擦因数和种间滚动摩擦因数回归方程,并标定种间滚动摩擦因数的估计值。进而得出双孢菇麦粒菌种离散元仿真分析参数最优组合:双孢菇麦粒菌种泊松比为 0.305,剪切模量为 5.07 MPa,密度为 1 916 kg/m³,种间碰撞恢复系数为 0.5,种间滑动摩擦因数为 0.4,种间滚动摩擦因数为 0.018,种与塑料的碰撞恢复系数为 0.335,种与塑料滑动摩擦因数为 0.550,种与塑料滚动摩擦系数为 0.055。

参考文献:

- [1]陈 璋. 双孢菇液体菌种培养条件及熟料栽培的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017:4 – 5.
- [2]杨丰菊,谢新华,王赵改,等. 乳酸钙 – 曲酸真空渗透处理对双孢菇采后品质及微观结构的影响[J]. 中国食品学报,2015,15(9):

165 – 172.

- [3]靳祯亮,黄琦辉,周巧丽,等. 麦角硫因处理对采后双孢菇品质的影响[J]. 中国食品学报,2017,17(3):194 – 200.
- [4]Ren G Y, Zeng F L, Duan X, et al. The effect of glass transition temperature on the procedure of microwave – freeze drying of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Drying Technology, 2015, 33(2):169 – 175.
- [5]中国食用菌产业年鉴编辑委员会. 中国食用菌产业年鉴(2016) [M]. 北京:食用菌市场编辑部,2016:291 – 293.
- [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.
- [7]王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践 [M]. 西安:西北工业大学出版社,2010:1 – 2.
- [8]胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真 [M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010:1 – 2.
- [9]廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(2):109 – 114.
- [10]马 征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报,2013,44(2):22 – 29.
- [11]鹿芳媛,马 旭,谭德妍,等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2):93 – 99.
- [12]罗 帅,袁巧霞,Shaban G,等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报,2018,49(4):343 – 350.
- [13]贾富国,韩燕龙,刘 扬,等. 稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J]. 农业工程学报,2014,30(11):254 – 260.
- [14]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.
- [15]王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22):36 – 42.
- [16]李海伟. 散状物料流动性能试验方法的研究及 EDEM 仿真 [D]. 太原:太原科技大学,2016:38 – 44.
- [17]单贺年,严晓婕,程绪铎. 围压与含水率对小麦堆弹性模量影响的实验研究[J]. 粮食储藏,2013,42(6):33 – 37.
- [18]路修强. 基于 CFD – DEM 耦合小麦收获机清选装置仿真分析与优化 [D]. 泰安:山东农业大学,2017:34 – 35.
- [19]雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作原理 [D]. 武汉:华中农业大学,2017:46 – 47.
- [20]李兴凯. 小区小麦育种收获机的设计及脱输性能仿真研究 [D]. 兰州:甘肃农业大学,2016:32 – 34.
- [21]林天然,金 铁. 添加蓝莓大米膨化产品的制作及特性研究 [J]. 延边大学学报(农学版),2017,39(2):76 – 81,93.
- [22]王 扬,吕凤妍,徐天月,等. 大豆籽粒形状和尺寸分析及其建模[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(2):507 – 517.
- [23]赵学钢. 农业物料学 [M]. 北京:机械工业出版社,1987:90 – 91.
- [24]Guo Z G, Chen X L, Liu H F, et al. Theoretical and experimental investigation on angle of repose of biomass – coal blends [J]. Fuel, 2014, 116:131 – 139.
- [25]田晓红,谭 斌,刘 明,等. 漏斗法粮食休止角测量结果的影响因素研究[J]. 中国粮油学报,2011,26(10):108 – 113.
- [26]王成军,李耀明,马履中,等. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报,2012,28(11):274 – 278.
- [27]黄小毛,查显涛,潘海兵,等. 油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J]. 农业工程学报,2014,30(24):22 – 29.