

不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定

张荣芳¹ 焦伟¹ 周纪磊¹ 祁兵² 刘虎¹ 夏倩倩²

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 气固两相流耦合仿真被广泛运用在气力式排种器工作过程的研究中,因确定性颗粒轨道数值计算模型的需求,种子多采用颗粒聚合的方法建模,该方法采用的填充球颗粒半径越小、数量越多就越能接近种子的真实形态,但会造成仿真计算资源过度消耗、仿真时间增长。为研究不同填充球半径的水稻种子模型对颗粒间的动力学响应特性的影响,寻找种子模型最佳的填充球颗粒数量,本文以水稻种子为研究对象,借助三维扫描与逆向拟合的方法获取种子外形轮廓,分别采用不同半径(0.30、0.21、0.18、0.16、0.15 mm)的球颗粒对其进行填充,形成气固耦合的水稻颗粒粘团聚模型。采用无底圆筒提升、滑落堆积的真实试验与仿真测定,采用曲面响应法,以休止角为指标,标定出不同填充球颗粒半径种子模型的种间静摩擦因数和动摩擦因数;通过圆筒提升和滑落堆积试验对参数进行验证,以仿真试验休止角的变异系数为指标,结果表明随着填充球半径的减小,仿真结果越接近真实值;通过水稻正压式排种器气固两相流耦合仿真进行验证,以充种率为指标,结果表明填充颗粒半径为0.21 mm,仿真时长与仿真精度最优。

关键词: 水稻种子; 离散元模型; 标定; 填充颗粒半径

中图分类号: TP391.9; O347.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0227-09

Parameter Calibration and Experiment of Rice Seeds Discrete Element Model with Different Filling Particle Radius

ZHANG Rongfang¹ JIAO Wei¹ ZHOU Jilei¹ QI Bing² LIU Hu¹ XIA Qianqian²

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: The coupled simulation of gas-solid two-phase flow was widely used in the study of the working process of pneumatic seed metering devices, the seed model was mostly modeled by particle aggregation formed through particle aggregation without overlapping. The simulation seed model would be closer to the real shape of the seed with smaller radius and larger number of filled spherical particles by this method. But the simulation computing resources would be overconsumed and the simulation time would be increased as the method was used. The rice seeds were taken as research object in order to study the effect of rice seed models with different filling sphere radii on the dynamic response characteristics between particles and find the optimal number of filled balls for the seed model. The bonding aggregation model of rice particles for gas-solid coupling was formed by filling with spherical particles of different radii (0.30 mm, 0.21 mm, 0.18 mm, 0.16 mm and 0.15 mm) after the shape of the seed was got with the aid of 3D scanning and inverse fitting method. The static friction coefficient and dynamic friction coefficient of seed model filled with balls of different radii were calibrated by lifting with bottomless cylinder, sliding accumulation between real test and simulation, using the curve surface correspondence method and the index was the angle of repose. The results showed that the simulation time and simulation accuracy were the best when the filled particle radius was 0.21 mm verified by the gas-solid two-phase flow coupling simulation test of the rice seed metering device with positive pressure as the indicator was seed filling rate.

Key words: rice seeds; discrete element model; calibration; filler particles radius

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700701)、山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020622)、国家自然科学基金项目(51505243)和山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2018E18)

作者简介: 张荣芳(1985—),女,工程师,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: 523829575@qq.com

通信作者: 祁兵(1986—),男,副研究员,主要从事精量播种技术装备研究,E-mail: qb0823521@163.com

0 引言

在农业工程领域,农业物料颗粒作为农业机械化装备的工作介质,其接触关系和动态响应特性直接关系到农业装备的工作效率和作业性能,因而有关农业物料颗粒的运动和动力学响应特性的研究得到了相关学者的广泛关注^[1]。

由于计算机技术的飞速发展,离散元法在农业颗粒物料建模仿真研究中有着越来越多的应用。CUNDALL等^[2]于1979年首次提出离散元模型,后被其他学者研究和改进。初期大部分科研工作者在离散元建模仿真中选择用球形颗粒代替颗粒物料。实际问题中,对于清选、分级的模拟,获得准确的形状模型是一个重要前提^[3]。形状简单的球形颗粒无法真实模拟玉米、花生、水稻等具有非规则外形颗粒间的碰撞、翻滚等特性^[4-6]。ABBASPOUR-FARD^[7]和KRUGGEL-EMDEN等^[8]提出一种颗粒聚合体方法(Multi-sphere method, MSM)对表面较圆滑的农业物料(如:水果、蔬菜等)进行离散单元法颗粒模拟。随着离散单元理论的完善与颗粒建模精度的要求提高,一种逆向造型技术被应用于离散元建模。李骅等^[3]首次运用逆向工程构建谷粒的三维模型,有效提高了颗粒模型精度。刘彩玲等^[9]、原建博等^[10]运用逆向工程理论,使用三维激光扫描技术获得水稻的点云数据,导入逆向工程软件(Geomagic Studio)中进行数据处理,得到种子轮廓模型及其空间坐标信息,最后建立水稻种子的三维离散元模型。

在基于确定性颗粒轨道模型的气固两相流耦合仿真中,由于EDEM采用表面网格来描述边界表面,从而实现与CFD流体网格的边界表面元素的点对点耦合,采用抽样点来表示颗粒体积,但这样会造成颗粒体积必须小于控制微元体积(流场内网格体积)^[11-12]。对于此问题目前主要是简化流场和种子无重叠聚集粘结建模,因流场简化是将流场网格划分大于颗粒体积,对流场精度影响较大,因此大部分研究选择颗粒粘结的方法进行种子建模。根据已建立的三维模型压缩仿真模型,在EDEM软件中基于颗粒粘结模型,采用网格快速填充法和颗粒替换法,得到数百个小颗粒粘结而成种子颗粒模型。若仅考虑模型与真实物料的相似度,填充颗粒半径越小颗粒数目越多,得到的离散元模型与真实的物料越有较高的匹配精度。但填充颗粒越多计算量就越大,计算所用时间越长^[13-15]。对于填充颗粒粒径大小如何影响EDEM模拟仿真精度尚未有研究报道。

本文以水稻为研究对象,通过三维激光扫描技

术重构水稻模型,运用离散单元法中颗粒快速填充建立同一水稻种子5种不同填充球半径的三维模型,分别采用圆筒提升试验和滑落堆积试验对不同填充颗粒球数的水稻模型进行主要参数标定,通过对比真实测试与仿真试验数据,分析不同填充颗粒球半径对仿真精度的影响,借助气固两相流耦合仿真分析,确定最佳水稻模型最佳填充球半径,以研究模型填充颗粒大小对EDEM仿真精度的影响提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验方法

休止角是表征颗粒物料流动、摩擦等特性的宏观参数,与接触材料和物料本身物理特性有关^[16]。本文重点研究在不同填充球粒径下的水稻种子模型仿真时休止角与真实试验的休止角误差变化情况。

首先通过真实试验测定2种试验方法下的水稻种群休止角,然后建立不同填充颗粒粒径的水稻种子模型,并以种间静摩擦因数和滚动摩擦因数为试验因素进行仿真试验,以2种试验方法下真实测量的休止角为目标值,运用响应面法建立2个主要接触参数的二元回归方程,求解不同填充颗粒粒径下水稻种子仿真时种间静摩擦因数和滚动摩擦因数两个变量。最后根据2个主要接触参数的标定结果,分析不同填充颗粒球半径对仿真休止角稳定性的影响。

1.2 休止角测量试验

试验材料选取“瀑布稻”水稻种子,千粒质量31.03 g。两种试验装置的材料均为有机玻璃板,试验装置如图1a,由物料特性测试台、有机玻璃无底圆筒、种群滑落堆积装置等组成;提升法测试时将有机玻璃无底圆筒落下与底面有机玻璃板贴合,将一定数量的水稻种子倒入圆筒内,由电机带动圆筒以0.5 m/s匀速提升,种子自然滑落并堆积,种群堆积

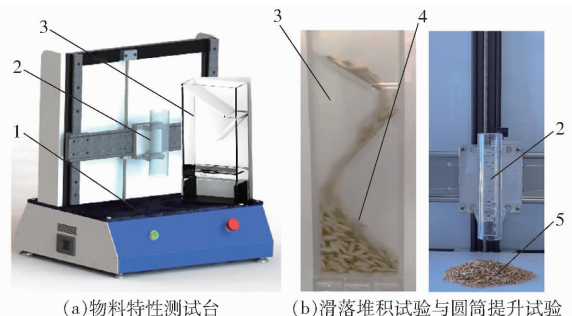


图1 水稻休止角测试试验

Fig. 1 Test of rice stacking angle

1. 种子物料特性测试台 2. 有机玻璃无底圆筒 3. 种群滑落堆积装置 4. 滑落堆积的种子 5. 提升堆积的种子

斜面与水平面的夹角即为提升试验休止角；滑落堆积试验装置由抽板和壳体组成，壳体长、宽、高分别为 110、60、400 mm，试验时把种子放入装置中，待种群稳定后，向外抽出抽板可使种子沿漏料孔滑动散落并堆积，种群斜面与水平面的夹角即为种群休止角；两种测试形成的休止角如图 1b。

1.3 仿真模型

1.3.1 水稻填充球数量确定

在离散元软件 EDEM 中创建颗粒模型时，颗粒模型还原程度越高，建模所需基础球形颗粒单元的数量越多，则仿真所需时间越长，效率越低^[17]，但建模时填充球太少会增大模型误差，造成仿真分析时种间接触参数设置误差较大。

水稻填充球数量计算式为

$$N = \frac{\alpha V_{\text{Real}}}{V_{\text{Fraction}}} \quad (1)$$

其中 $V_{\text{Fraction}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (2)$

式中 α ——填充体积分数

V_{Real} ——被填充物体的实际体积

N ——填充颗粒球数量

V_{Fraction} ——填充颗粒球体积

r ——填充颗粒球半径

填充体积分数 $\alpha = 56\%$ 时填充效果达到最好，本文创建的水稻籽粒模型可通过三维软件 SolidWorks 分析得到水稻籽粒体积 V_{Real} 为 23.228 mm^3 ，采用填充球体半径分别为 0.30、0.21、0.18、0.16、0.15 mm，经计算对应球半径与数量如表 1 所示。

表 1 水稻种子仿真模型对应填充球半径与数量

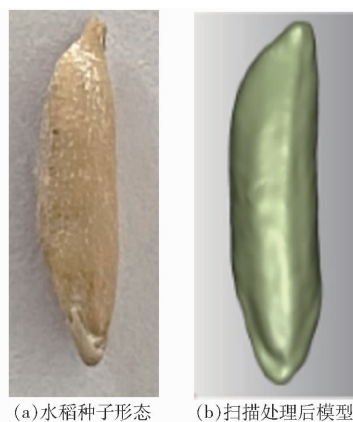
Tab.1 Rice seed simulation model corresponded to radius and number of filling balls

填充颗粒半径/mm	0.30	0.21	0.18	0.16	0.15
填充数量/个	115	335	532	758	920

1.3.2 水稻种子颗粒模型构建

采用逆向工程理论，运用三维激光扫描仪获得种子的三维点云数据。通过固定插针将水稻种子固定在工作台上的一个参照物上，放置在镜头前合适位置，采用蓝光拍照式扫描方式，通过多个视角拍摄水稻种子的每个侧面，将点云数据文件导入逆向工程软件并对其进行噪声删除、对齐、合并、封装、精确曲面、格式转换等一系列处理^[18-19]，重构水稻三维实体模型，试验选取一般尺寸、无残缺、有代表性的水稻籽粒，其外形轮廓如图 2a 所示。通过三维光栅扫描处理后获得的水稻籽粒扫描模型如图 2b 所示。

将 SolidWorks 软件中导出的格式为 .stl 的水稻籽粒三维模型作为几何体导入到 EDEM 软件中，通



(a) 水稻种子形态 (b) 扫描处理后模型

图 2 水稻种子扫描建模过程

Fig.2 Scanned modeling process of rice seed kernel

过调整视图使水稻横放，以使球颗粒生成过程中可充分填充到各个区域，在模具内部上端定义颗粒工厂，动态生成的球颗粒以一定的初速度运动，颗粒粘结模型为 Hertz - Mindlin with bonding，为使球颗粒填充流动性较好，设定较小的碰撞恢复系数以及动、静摩擦因数，为使填充空隙更致密，重力加速度设置较大。待球颗粒填充满模型后，在 EDEM 后处理界面中导出所有球颗粒球心坐标 .csv 格式的数据文件，利用 API 文件对生成的大颗粒用小颗粒进行替换，替换位置为大颗粒的中心坐标，对替换的颗粒加载较大的 Bonding 力，使颗粒之间发生黏结，完成水稻种子耦合仿真模型的创建，结果如图 3 所示。

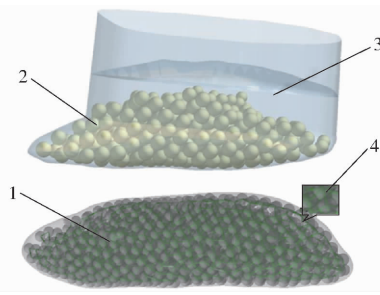


图 3 水稻种子仿真模型

Fig.3 Rice seed simulation model

- 1. 堆积粘结后的种子模型
- 2. 填充颗粒球
- 3. 填充挤压模具
- 4. 粘键

EDEM 仿真填充完成后，将仿真时间归零，导出 .xml 格式的 dec 文件，将处理后的球颗粒球心坐标数据插入 dec 文件中，在新建的 EDEM 文件 particle 项中导入此 dec 文件后，EDEM 软件会自动生成水稻籽粒模型，并将其作为颗粒模板直接调用。最终得到水稻种子不同填充数目的黏结模型如图 4 所示。

2 仿真标定预试验

2.1 仿真标定预试验方案

EDEM 软件中颗粒参数众多，为准确寻找仿真参数中具有显著性效应的参数及范围，以填充球半

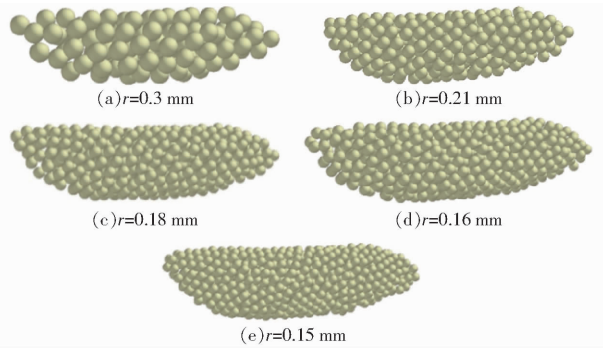
图4 不同填充球半径 r 的水稻模型

Fig. 4 Rice models with different filling radii

径 $r=0.21\text{ mm}$ 的水稻模型为例安排仿真试验,进行 Plackett - Burman 试验和最陡爬坡试验设计。仿真试验形成的水稻颗粒堆休止角用 Matlab 图像处理方法进行相应处理(图 5),取两侧休止角正切值的平均值。



图5 仿真休止角图像处理

Fig. 5 Simulation repose angle image processing

2.2 仿真显著性参数确定试验

以 Design-Expert 软件进行 Plackett - Burman 试验设计,选取 EDEM 软件中 8 个真实参数和 3 个虚

拟参数;每个参数设置高、低 2 个水平,以编码 1 和 -1 形式表示,如表 2 所示。

表 2 Plackett - Burman 试验参数

Tab. 2 Parameters of Plackett - Burman test

参数	低水平(-1)	高水平(1)
水稻泊松比 X_1	0.2	0.5
水稻剪切模量 X_2/Pa	1.81×10^7	1.81×10^8
水稻-水稻恢复系数 X_3	0.1	0.8
水稻-有机板恢复系数 X_4	0.2	0.9
水稻-水稻滚动摩擦因数 X_5	0	0.02
水稻-水稻静摩擦因数 X_6	0.01	0.42
水稻-有机板滚动摩擦因数 X_7	0.02	0.06
水稻-有机板静摩擦因数 X_8	0.3	0.56
虚拟参数 X_9, X_{10}, X_{11}	-1	1

Plackett - Burman 试验设计及结果如表 3 所示,利用 Design-Expert 软件对该结果进行方差分析,可得各参数的影响效果如表 4 所示。各参数对试验指标休止角影响的大小,由方差分析表中变量的显著性 P 值确定。由表 4 可知,水稻-水稻静摩擦因数、水稻-水稻滚动摩擦因数、水稻-有机板静摩擦因数对颗粒堆积休止角影响显著,分别为 $P=0.0007$ 、 $P=0.0067$ 、 $P=0.0371$,而其他因素影响较小。为提高后续仿真试验的效率和精度,将显著性检验水平设置为 0.01,剔除一般显著的影响因素,将水稻-水稻静摩擦因数、水稻-水稻滚动摩擦因数 2 个因素

表 3 Plackett - Burman 试验设计与结果

Tab. 3 Design and results of Plackett - Burman test

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	休止角正切值
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0.373 2
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	0.474 2
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	0.293 5
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	0.201 5
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	0.375 8
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	0.326 0
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	0.129 8
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	0.227 3
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0.126 6
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	0.056 6
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	0.169 2
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.120 3

通过仿真试验重点标定。

2.3 显著性参数范围确定试验

根据 Plackett - Burman 试验筛选出的极显著性参数,应用圆筒提升仿真试验进行最陡爬坡试验,以最快的速度逼近各显著因素的最佳区域。显著性参数按照选定的步长逐步增加,以因素效应值确定变化步长。按参数范围值由小到大逐步增加数值,观察试验与仿真得到的休止角的相对误差,直到该相

对误差达到最小值后又逐步增大。

最陡爬坡试验设计及结果如表 5 所示。该结果表明随着水稻-水稻滚动摩擦因数(X_5)、水稻-水稻静摩擦因数(X_6)增加休止角逐渐增大,真实试验与仿真得到的水稻颗粒堆休止角的相对误差先减小后增加。在 3 号水平时,该相对误差最小,由此可知,最优值区间在试验 3 附近,因此选取试验 3 附近的范围进行后续的响应面设计。

表 4 Plackett – Burman 试验参数显著性分析

Tab.4 Plackett – Burman test parameter significance analysis

参数	均方和	F	P
X_1	4.594×10^{-3}	7.63	0.070 0
X_2	1.673×10^{-4}	0.28	0.634 6
X_3	1.156×10^{-3}	1.92	0.259 8
X_4	9.633×10^{-5}	0.16	0.715 9
X_5	0.027	45.51	0.006 7
X_6	0.13	221.84	0.000 7
X_7	4.378×10^{-3}	7.27	0.074 0
X_8	7.752×10^{-3}	12.88	0.037 1

注： $P < 0.01$ 为差异极显著， $0.01 < P < 0.05$ 为差异显著。

表 5 最陡爬坡试验设计与结果

Tab.5 Design and results of the steepest ascent test

序号	水稻-水稻 静摩擦因数	水稻-水稻 滚动摩擦因数	休止角正 切值	相对 误差/%
1	0.005	0	0.083	73.7
2	0.025	0.003	0.284	9.8
3	0.045	0.006	0.302	4.1
4	0.065	0.009	0.401	27.3
5	0.085	0.012	0.425	34.9
6	0.105	0.015	0.432	37.1

3 仿真标定试验

3.1 仿真参数设置

经过仿真预试验确定仿真标定参数为水稻与水稻静摩擦因数、水稻与水稻滚动摩擦因数，其余参数由文献[20]获得，如表 6 所示。

表 6 离散元仿真所需参数

Tab.6 Parameters required for discrete element simulation

参数	数值
水稻泊松比	0.25
水稻剪切模量/Pa	1.81×10^8
水稻种子密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 098
有机玻璃泊松比	0.5
有机玻璃剪切模量/Pa	1.77×10^8
有机玻璃密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 180
水稻与水稻碰撞恢复系数	0.421
水稻与有机玻璃碰撞恢复系数	0.519
水稻与有机玻璃静摩擦因数	0.252
水稻与有机玻璃滚动摩擦因数	0.026

3.2 仿真标定试验方案

根据水稻种子两种休止角的测量试验方法要求，以 1:1 的比例建立 2 个几何模型(图 6)，以填充球半径 $r = 0.21 \text{ mm}$ 的水稻模型为例对水稻种子 EDEM 仿真过程中的颗粒间静摩擦因数和滚动摩擦

因数两物性参数进行标定，选用通用旋转中心组合试验设计对水稻-水稻静摩擦因数和滚动摩擦因数进行标定。

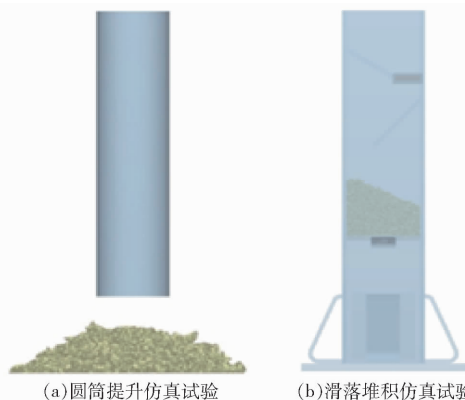


图 6 休止角仿真试验

Fig.6 Stack angle simulation experiment

根据仿真预试验结果，确定填充球半径 $r = 0.21 \text{ mm}$ 的水稻模型种子间静摩擦因数范围为 $0.025 \sim 0.075$ ，种子间滚动摩擦因数为 $0.003 \sim 0.011$ ，设计水稻-水稻静摩擦因数和水稻-水稻滚动摩擦因数的仿真试验因素编码，如表 7 所示。

表 7 仿真试验因素编码

Tab.7 Coding of factors

编码	因素	
	水稻-水稻静摩擦因数	水稻-水稻滚动摩擦因数
1.414	0.085 35	0.012 156
1	0.075	0.011
0	0.050	0.007
-1	0.025	0.003
-1.414	0.014 65	0.000 84

3.3 仿真标定目标值获取

采集两种真实试验方法下的休止角图像，利用 Matlab 对采集图像进行处理(图 7)，依次对图像进行去噪处理、灰度化、二值化处理，然后通过边缘检测提取休止角边缘曲线，利用最小二乘法对边界点进行直线拟合，拟合的直线斜率即为所要测得的休止角正切值^[21]，10 次测量结果如表 8 所示，求均值得到 2 种试验方法下休止角正切值分别为 0.315 0、0.577 5。

3.4 不同模型仿真标定结果与分析

应用 Design-Expert 软件进行通用旋转中心组合试验设计，选取水稻颗粒间静摩擦因数和滚动摩擦因数为试验因素，两种测量方法的休止角为评价指标，根据试验要求每种水稻模型共设计 13 组仿真试验，仿真完成后对不同填充球数的模型按上述真实试验过程进行仿真并导出仿真后的图像，为获取水稻的仿真休止角，采用 Matlab 图像处理技术对仿

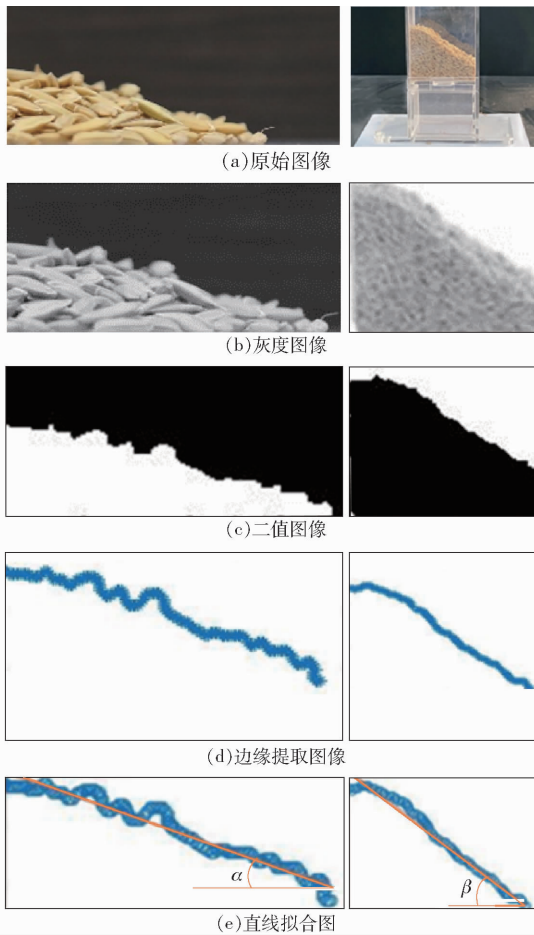


图7 2种方法下的休止角图像处理

Fig.7 Image analysis by Matlab with two types of materials

表8 两种试验方法下的休止角测量结果

Tab.8 Measurement results of stacking angle under two experimental conditions

试验序号	提升试验休止角正切值	抽板试验休止角正切值
1	0.337 9	0.584 2
2	0.348 3	0.600 4
3	0.303 6	0.563 1
4	0.302 9	0.574 2
5	0.313 1	0.587 2
6	0.323 2	0.578 6
7	0.302 0	0.580 1
8	0.310 6	0.562 7
9	0.304 3	0.576 3
10	0.303 2	0.568 9
均值	0.315 0	0.577 5
标准差	0.008 141	0.007 943

真图像进行提取,并得到不同填充模型的休止角正切值,结果见表9, A 、 B 为因素编码值。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对仿真试验结果进行方差分析,发现两试验模型均为极显著 ($P < 0.01$),说明此试验合理有效。对指标有显著影响的所有因素均已考虑到,得出拟合较好且具有实际分析意义的因素编码值的回归方程^[22]

表9 仿真试验方案设计与结果

Tab.9 Simulation experiment plan and result

序号	因素		提升试验	滑动散落
	A	B	休止角正切值 R_1	法休止角正切值 R_2
1	-1	-1	0.269	0.459
2	1	-1	0.309	0.512
3	-1	1	0.308	0.467
4	1	1	0.396	0.674
5	-1.414	0	0.258	0.477
6	1.414	0	0.378	0.689
7	0	-1.414	0.294	0.470
8	0	1.414	0.385	0.569
9	0	0	0.311	0.539
10	0	0	0.304	0.564
11	0	0	0.307	0.589
12	0	0	0.312	0.569
13	0	0	0.316	0.570

$$R_1 = 0.31 + 3.72 \times 10^{-2}A + 3.18 \times 10^{-2}B + 1.2 \times 10^{-2}AB + 1.24 \times 10^{-2}B^2 \quad (3)$$

$$R_2 = 0.57 + 6.99 \times 10^{-2}A + 3.88 \times 10^{-2}B + 3.8 \times 10^{-2}AB + 2.95 \times 10^{-2}B^2 \quad (4)$$

利用 Design-Expert 8.0.6 软件的优化模块,使仿真结果最接近试验所得的水稻种子休止角,对回归模型进行有约束目标的优化求解。

$$\begin{cases} R_1(A, B) = 0.315 \\ R_2(A, B) = 0.5775 \\ -1.414 \leq A \leq 1.414 \\ -1.414 \leq B \leq 1.414 \end{cases} \quad (5)$$

由此得到优化结果为水稻-水稻静摩擦因数为 0.056,水稻-水稻滚动摩擦因数为 0.006 44,此时休止角仿真结果满足目标指标。按照上述办法,分别对其他 4 种不同填充颗粒球半径的水稻离散元模型进行水稻间静摩擦因数和滚动摩擦因数的标定,标定结果如表 10 所示。

表10 不同水稻离散元模型标定物性参数结果

Tab.10 Calibration results of physical parameters of different rice discrete element models

填充颗粒半径/ mm	水稻-水稻静摩擦 因数	水稻-水稻滚动 摩擦因数
0.30	5.92×10^{-2}	7.17×10^{-3}
0.21	5.61×10^{-2}	6.44×10^{-3}
0.18	5.79×10^{-2}	6.12×10^{-3}
0.16	4.72×10^{-2}	5.81×10^{-3}
0.15	3.81×10^{-2}	5.78×10^{-3}

4 模型填充颗粒数对仿真精度的影响

4.1 种子堆积休止角试验

为了验证标定试验获得的接触参数的准确性,

分析不同颗粒填充数对仿真精度的影响,采用圆筒提升和滑落堆积试验,对不同填充颗粒数的种子模型进行验证试验,每次试验重复 8 次,均以休止角的正切值为指标,采用图像处理技术对仿真图像进行处理,通过边界提取与拟合的方法获得休止角正切值,结果如表 11 所示。

表 11 不同填充模型仿真结果与实际试验结果对比

Tab. 11 Simulation results of different filling models compared with actual test results

参数	填充颗粒球半径/mm				
	0.30	0.21	0.18	0.16	0.15
R_1	0.299	0.306	0.319	0.317	0.318
R_1 与真实值相对误差/%	4.11	1.73	2.43	1.87	1.96
R_2	0.555	0.565	0.592	0.591	0.588
R_2 与真实值相对误差/%	3.95	2.12	2.58	2.39	1.86

从表 11 可以看出,随着填充颗粒球半径的减少,填充球数量的提高,仿真休止角与真实试验的误差变小,在 $r=0.30$ mm 时,休止角相对误差较大,当 $r=0.21$ mm 时休止角相对误差开始降低,并与其他填充半径的模型较接近。以不同填充颗粒半径为变量,以每次试验休止角的均值为指标,对其标准差和因素显著性(LSD)进行分析,结果如图 8 所示。

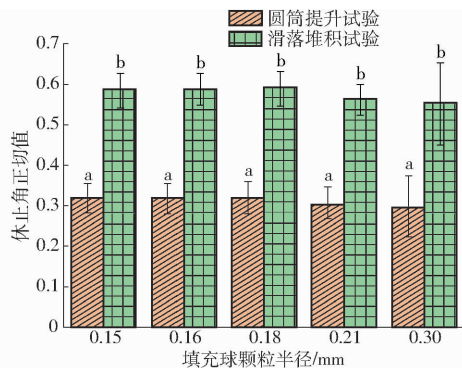


图 8 不同填充颗粒球半径对仿真试验休止角的影响

Fig. 8 Influence of filling particle balls with different radii on angle of repose during simulation

结果表明,虽然 $r=0.30$ mm 模型的仿真试验休止角与其他填充半径的模型及真实试验数据差距较大,但填充颗粒球半径因素对仿真休止角影响却不显著,原因为该模型的重复试验数据组内差异较大,其圆筒提升试验休止角正切值标准差为 0.075,滑落堆积试验休止角正切值标准差为 0.102,均明显高于其他填充半径的种子模型,分析结果表明,采用 $r=0.30$ mm 为填充半径的种子模型仿真数据稳定性较差。

4.2 水稻气固两相流耦合仿真试验

为了进一步验证不同颗粒填充数对仿真精度的影响,进行了气固两相流耦合仿真试验(图 9)。试

验排种器采用的是农业农村部南京农业机械化研究所研制的水稻正压式精量排种器。该排种器利用正压气流将种子压在型孔上,完成种子充填,因此对其充种环节重点分析。为建立真实试验与仿真试验之间的联系,采用漏充率作为真实测试与仿真试验的指标。

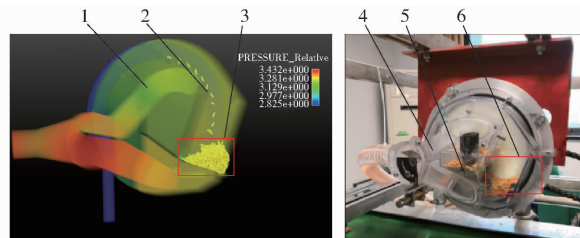


图 9 排种器气固耦合仿真分析与真实试验

Fig. 9 Gas - solid coupling simulation analysis and experiment of seed metering device

- 1. 气流场 2. 水稻种子粘结构型 3. 仿真充种判定区 4. 排种器正压腔室 5. 真实测试水稻种子 6. 真实测试充种判定区

以型孔离开充种区的位置作为初始点,以完全脱离种群为终止点,划定充种率观察判定区。排种器工作过程中,采用摄像机进行拍摄,将离开判定区型孔无种子的情况判定为漏充^[23],漏充型孔数与总型孔数的比值为漏充率,漏充率计算公式为

$$K_m = n_m / N_p \times 100\% \quad (6)$$

式中 K_m ——漏充率,% n_m ——漏充型孔数
 N_p ——记录的总型孔数

待排种器工作稳定后再开始记录,但由于受计算资源的限制,仿真时间较短,因此以连续两个型孔有种子作为触发条件,统计有效型孔数,漏充率、漏充型孔数的计算方法与真实测试一致。

水稻正压式精量排种器工作气压 3.5 kPa,排种盘转速 20 r/min,型孔数 36 个,共进行 3 次测试,每次测试检测不低于 250 个型孔,试验采用“瀑布稻”水稻种子。试验结果:排种器漏充率平均值为 8.01%。

气固两相流耦合仿真设定排种盘转速 20 r/min,进气口压力 3.5 kPa,颗粒场仿真时间步长为 1×10^{-5} s,气流场仿真时间步长为 5×10^{-4} s,水稻种子数为 150 个,仿真总时间 4 s。试验结果如表 12 所示。

试验结果表明,随着填充颗粒球半径降低,有效型孔数逐渐提高,漏充率指标也越接近真实测试结果,证明降低填充颗粒球半径、增加填充颗粒数可以使种子外形更加接近于真实情况,但同时会大幅增加仿真时间。随着填充颗粒球半径的提高,仿真时间会大幅下降,但仿真精度也会下降,当 $r=0.3$ mm,仿真试验漏充率为 14.29%,远高于真实值。

表 12 不同填充颗粒球半径对气固耦合仿真试验的影响
Tab.12 Influence of filling particle balls with different radii on gas-solid coupling simulation test

参数	填充颗粒球半径/mm				
	0.15	0.16	0.18	0.21	0.30
有效型孔数	48	47	45	36	35
漏充型孔数	4	4	4	3	5
漏充率/%	8.33	8.51	8.89	8.33	14.29
相对误差/%	3.99	6.24	13.48	3.99	78.40
仿真时间/h	170.8	114.9	98.4	84.5	47.1

当 $r=0.21$ mm 时,仿真试验漏充率为 8.33%,相对误差 3.99%,在兼顾仿真时间的前提下,该填充颗粒球半径最佳。

5 结论

(1)采用颗粒聚合粘结的方法,建立 5 种不同填充颗粒球半径的水稻种子模型,通过响应面法,分

别建立了圆筒提升试验休止角、滑落堆积试验休止角与水稻种间主要接触参数的回归方程,分别标定了不同填充颗粒球半径的水稻种子模型种间静摩擦因数与滚动摩擦因数。

(2)分别采用圆筒提升和滑落堆积试验对标定结果进行验证,仿真与试验结果对比最大相对误差小于等于 4.11%,通过因素显著性分析结果表明,随着填充颗粒球半径增大、填充颗粒数的减少,仿真数据稳定性有所下降。

(3)进行水稻气固两相流耦合仿真试验,分析不同填充颗粒球半径的水稻种子模型对仿真精度的影响,以漏充率为指标,对比了真实测试与仿真试验的数据,结果表明随着填充颗粒球半径的提高,仿真时间大幅下降,但仿真精度也下降,当填充颗粒球半径 $r=0.21$ mm 时,仿真耗时较低且仿真精度较高,仿真试验相对误差为 3.99%。

参 考 文 献

- [1] 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):22-29.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 22-29. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.005. (in Chinese)
- [2] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1):47-65.
- [3] 李骅,尹文庆,高翔,等. 基于逆向工程的谷粒三维模型的构建[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(12):201-206.
LI Hua, YIN Wenqing, GAO Xiang, et al. Construction of three-dimensional model of grain based on reverse engineering[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed), 2011, 39(12):201-206. (in Chinese)
- [4] 于亚军,周海玲,付宏,等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):167-174.
YU Yajun, ZHOU Hailing, FU Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particles agglomer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8):167-174. (in Chinese)
- [5] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉大学出版社,2010.
- [6] 贾富国,韩燕龙,刘扬,等. 稻谷颗粒物料休止角模拟预测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11):254-260.
JIA Fuguo, HAN Yanlong, LIU Yang, et al. Simulation prediction method of repose angle for rice particle materials[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11):254-260. (in Chinese)
- [7] ABBASPOUR-FARD M H. Theoretical validation of a multi-sphere, discrete element model suitable for biomaterials handling simulation[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(2):153-161.
- [8] KRUGGEL-EMDEN H, RICKELT S, WIRTZ S, et al. A study on the validity of the multi-sphere discrete element method[J]. Powder Technology, 2008, 188(2):153-165.
- [9] 刘彩铃,王亚丽,宋建农,等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15):294-300.
LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15):294-300. (in Chinese)
- [10] 原建博,李骅,吴崇友,等. 基于离散单元法的水稻籽粒快速颗粒建模研究[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(6):1151-1158.
YUAN Jianbo, LI Hua, WU Chongyou, et al. Study on apace particle modeling of rice grain basis on the discrete element method[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, 41(6):1151-1158. (in Chinese)
- [11] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):62-69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62-69. (in Chinese)

- [12] 刘佳. 机械气力组合式精密排种器设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
LIU Jia. Design and research of the mechanical-pneumatic combined precision seed-metering device [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [13] 张民, 姚珺, 李明. 种子休止角与静滑动摩擦系数测量仪[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(11): 42-45.
ZHANG Min, YAO Jun, LI Ming. An angle of repose and static coefficient of friction measurement device for seeds [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2012, 50(11): 42-45. (in Chinese)
- [14] 赵永志, 江茂强, 徐平, 等. 颗粒堆内微观力学结构的离散元模拟研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1819-1825.
ZHAO Yongzhi, JIANG Maoqiang, XU Ping, et al. Discrete element simulation of the microscopic mechanical structure insandpile[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1819-1825. (in Chinese)
- [15] 韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 173-179.
HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 173-179. (in Chinese)
- [16] 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.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese)
- [17] 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.
WANG Meimei, WANG Wanzhang, YANG Liqun, et al. Research of discrete element modeling method of maize kernel based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(1): 80-84. (in Chinese)
- [18] LI Hua, QIAN Yan, CAO Peng, et al. Calculation method of surface shape feature of rice seed based on point cloud[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 416-423.
- [19] 李聪波, 顾小进, 李玲玲, 等. 逆向工程辅助零部件再制造关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 143-150.
LI Congbo, GU Xiaojin, LI Lingling, et al. Key technologies and applications of the reverse engineering aided used part remanufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(1): 143-150. (in Chinese)
- [20] 鹿芳媛, 马旭, 谭穗妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 93-99.
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 93-99. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.012. (in Chinese)
- [21] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 292-303.
- [22] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125-135.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125-135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180514&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.014. (in Chinese)
- [23] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM - CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54-66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM - CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54-66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200506&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.006. (in Chinese)