doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.002

燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验

廖洋洋[1]　尤　泳[1]　王德成[1]　张学宁[1]　张海凤[1]　马文鹏[2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 为了更好地应用离散元法研究燕麦和箭筈豌豆种子的混播过程,提高种子离散元模型的准确性,结合实际试验和仿真试验对仿真参数进行了标定。通过抽样分别测量了燕麦和箭筈豌豆种子的本征参数,并建立了种子离散元模型。采用碰撞试验、斜面滑动试验和斜面滚动试验,分别对燕麦种子和箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间的碰撞恢复系数、静摩擦因数及滚动摩擦因数进行了标定,得到燕麦和箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间的碰撞恢复系数分别为 0.441、0.435,静摩擦因数分别为 0.506、0.454,滚动摩擦因数分别为 0.059、0.047。基于堆积试验,利用最陡爬坡试验和二次回归正交旋转组合试验方法,以混合种子堆积角的 EDEM 仿真值与实际值的相对误差为指标,确定种间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.320、0.327、0.042。利用螺旋排种装置对标定结果进行了验证,得到仿真试验与实际试验的混合种子质量流率平均相对误差为 1.76%,燕麦和箭筈豌豆种子的排种质量比平均相对误差为 2.03%,验证了仿真试验的可靠性,标定的结果可用于燕麦和箭筈豌豆种子混播过程的离散元仿真试验。

关键词: 燕麦种子; 箭筈豌豆种子; 混播; 离散元; 参数标定
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0014-09　　**OSID**:

Parameter Calibration and Experiment of Discrete Element Model for Mixed Seeds of Oat and Arrow Pea

LIAO Yangyang[1]　YOU Yong[1]　WANG Decheng[1]　ZHANG Xuening[1]　ZHANG Haifeng[1]　MA Wenpeng[2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*)

Abstract: In order to better apply the discrete element method to study the mixed sowing process of oat and arrow pea seeds and improve the accuracy of the seed discrete element model, the simulation parameters were calibrated combined with the actual test and simulation test. The intrinsic parameters of oat and arrow pea seeds were measured by sampling, and the seed discrete element model was established. Collision test, inclined plane sliding test and inclined plane rolling test were used to calibrate the collision restitution coefficient, static friction coefficient and rolling friction factor between seeds (oat seeds and arrow pea seeds) and ABS plastic plate, respectively, and oat and arrow pea seeds were obtained. The collision recovery coefficients with ABS plastic plates were 0.441 and 0.435, the static friction coefficients were 0.506 and 0.454, and the rolling friction coefficients were 0.059 and 0.047, respectively. Based on the stacking test, using the steepest climbing test and quadratic regression orthogonal rotation combination test method, and taking the relative error between the edem simulation value and the actual value of the stacking angle of mixed seeds as the index, the interspecific collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient were determined to be 0.320, 0.327 and 0.042, respectively. The calibration results were verified by the screw seed transmission device. The average relative error of the mixed seed mass flow rate between the simulation test and the actual test was 1.76%, and the average relative error of the seed transmission mass ratio of oat and arrow pea seeds was 2.03%. The reliability of the simulation test was verified. The calibration results can be used in the discrete element simulation test of the mixed sowing process of oat and arrow pea seeds.

Key words: oat seeds; arrow pea seeds; mixed sowing; discrete element; parameter calibration

收稿日期: 2022-03-11　修回日期: 2022-05-18
基金项目: 财政部和农业农村部:现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-34)
作者简介: 廖洋洋(1998—),男,博士生,主要从事草业机械研究,E-mail: 1950900484@qq.com
通信作者: 尤泳(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事草业机械研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

0　引言

豆科和禾本科牧草混播是一种重要的种植技术，是建立人工草地及建植人工草坪的重要手段，相比于牧草种子单播，混播能充分发挥不同牧草的优点，克服其缺点，达到优势互补的目的[1-3]。其中燕麦与箭筈豌豆具有较好的互补体系结构，因此成为重要的混播组合方式，而混播量及混播比例是影响混播效果的主要因素，其中燕麦和箭筈豌豆种子以质量比 1∶1进行混播产生的效益最高[4-7]。

近年来，随着数值模拟的发展，国内外学者应用离散元法对排种过程进行大量研究，用以探究种子的运动规律和排种机理，并优化排种装置[8-11]。在利用离散元法对排种过程进行数值模拟研究时，需要定义仿真模型的本征参数和接触参数，颗粒复杂的接触特性使其难以通过实际试验获得，因此有必要对接触参数进行标定及优化[12]。目前，国内外学者已经完成了对玉米[13-15]、水稻[16]、小麦[17]、三七[18]、苜蓿[19]、冰草[20]、绿豆[21]、大豆[22]、红三叶[23]等种子的离散元仿真参数的标定，并通过台架试验对标定接触参数进行验证，结果表明不同种子的接触参数差异显著。而对于两种及以上混合种子的接触参数标定少有研究，尤其是豆科和禾本科等形态特征不同的混合种子。

本文应用离散元法研究燕麦和箭筈豌豆种子的混播过程，以燕麦和箭筈豌豆质量比 1∶1混合的种子为研究对象，基于粘结模型分别建立燕麦和箭筈豌豆种子仿真模型，并对离散元混合种子的种间接触参数进行标定，利用台架试验验证仿真模型和仿真参数的可靠性，以期为豆科和禾本科等不同形态特征种子的同行混播过程中，应用离散元研究种子的运动特性及排种性能提供仿真参数参考。

1　种子离散元模型建立

1.1　种子物理模型

为了准确地建立燕麦种子和箭筈豌豆种子的离散元模型，分别对这两种种子尺寸轮廓进行实际测量。分别在去除杂质且颗粒饱满的燕麦种子和箭筈豌豆种子中，随机各取 100 粒，通过数显游标卡尺测量种子的长度、宽度以及厚度，通过测量得到燕麦种子的平均长度、宽度和厚度分别为 10.977、3.253、2.437 mm，箭筈豌豆种子的平均长度、宽度和厚度分别为 5.506、4.794、3.594 mm。随机各取 1 000 粒种子并分别分成 5 组，测得其千粒质量分别为 36.509、53.445 g；密度分别为 802、1 076.5 kg/m^3；含水率分别为 5.37%、5.48%。

利用 EDEM 仿真软件分别建立燕麦种子和箭筈豌豆种子的离散元模型，由于燕麦种子和箭筈豌豆种子都是不规则体，其离散元模型难以通过单个颗粒建立，因此采用多个球形颗粒聚合的方式来建立模型，以更精确地模拟实际的种子特性。燕麦种子和箭筈豌豆种子实物图和离散元模型如图 1、2 所示，在进行仿真试验时，由于种子表面的粘附力较小，因此种子颗粒的接触模型选取 Hertz - Mindlin (no slip)接触力学模型[24]。



图 1　燕麦种子的实物和离散元模型对比

Fig. 1　Comparison of physical objects and discrete element model of oat seeds



图 2　箭筈豌豆种子的实物和离散元模型对比

Fig. 2　Comparison of physical objects and discrete element model of arrow pea seeds

1.2　仿真试验参数

试验过程中，不仅有燕麦和箭筈豌豆混合种子间接触，还有这两种种子与装置材料接触间的作用力，本研究装置接触材料选用常见的 ABS 塑料，燕麦种子和箭筈豌豆种子与接触材料的特性参数如表 1 所示[18]，其中燕麦种子和箭筈豌豆种子的泊松比及剪切模量通过万能试验机测得。

表 1　仿真试验参数

Tab. 1　Simulation test parameters

材料	参数	数值
燕麦种子	泊松比	0.40
	剪切模量/Pa	1.1×10^8
	密度/(kg·m^{-3})	802
箭筈豌豆种子	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	2.7×10^8
	密度/(kg·m^{-3})	1 076.5
ABS 塑料	泊松比	0.34
	剪切模量/Pa	3×10^9
	密度/(kg·m^{-3})	1 250

2　接触参数标定

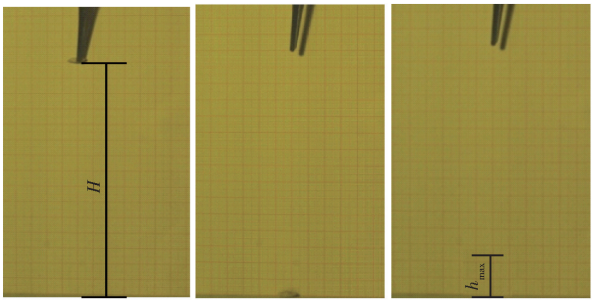
2.1　种子与材料间接触参数标定

2.1.1　碰撞恢复系数标定

通过自由落体碰撞法对种子与 ABS 塑料板间

的碰撞恢复系数进行标定,将材料板水平放置,分别将燕麦和箭筈豌豆种子从距材料平板 $H=150$ mm 的高度处自由下落,种子碰到材料平板进行反弹,通过高速摄像系统测定反弹的最大高度 h_{max},重复上述操作 5 次,分别计算平均值,试验如图 3 所示。碰撞恢复系数 e 为碰撞前后两物体接触点的法向相对分离速度 v_1 与法向相对接近速度 v_2 的比值,可表示为种子与材料平板碰撞反弹最大高度 h_{max} 与初始下落高度 H 的比值,其计算公式为

$$e=\frac{v_1}{v_2}=\sqrt{\frac{h_{max}}{H}} \tag{1}$$



(a) 初始点 (b) 碰撞点 (c) 反弹最高点

图 3 碰撞试验

Fig. 3 Crash test

通过实际试验得出的燕麦种子和箭筈豌豆种子在 ABS 塑料板上反弹最大高度分别为 20.8、16.6 mm。

在 EDEM 仿真试验中,为了避免干扰,除了种子与材料间碰撞恢复系数外,将其他接触参数均设置为 0。经过预仿真试验,设置燕麦种子和箭筈豌豆种子与材料板之间的碰撞恢复系数范围均为 0.4~0.7,设置间隔均为 0.05,碰撞恢复系数仿真试验设计如表 2 所示,每组分别进行 5 次重复试验后取平均值。

表 2 种子与 ABS 塑料板间碰撞恢复系数

Tab. 2 Collision recovery coefficient between seeds and ABS plastic plate

序号	碰撞恢复系数 e	燕麦种子反弹最大高度 h_{max1}/mm	箭筈豌豆种子反弹最大高度 h_{max2}/mm
1	0.40	16.92	14.88
2	0.45	20.43	18.44
3	0.50	25.41	22.30
4	0.55	31.92	29.42
5	0.60	39.14	37.78
6	0.65	42.07	46.13
7	0.70	47.76	56.68

将表 2 的仿真试验结果绘制成散点图并拟合,得到拟合曲线如图 4 所示,燕麦种子、箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间碰撞恢复系数与反弹最大高度 h_{max1}、h_{max2}的拟合方程分别为

$$h_{max1}=142.73e^2-52.07e+16.02 \quad (R^2=0.976) \tag{2}$$

$$h_{max2}=204.56e^2-83.70e+14.32 \quad (R^2=0.996) \tag{3}$$

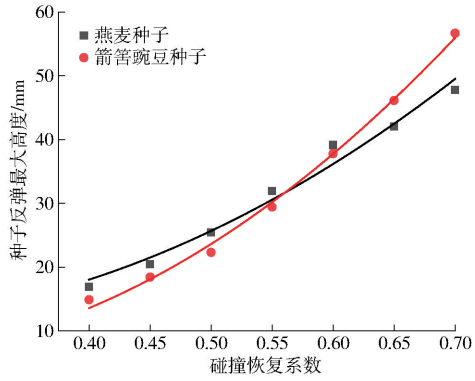


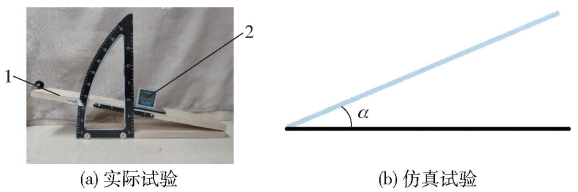
图 4 碰撞恢复系数与反弹最大高度拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of collision recovery coefficient and rebound maximum height

拟合方程的决定系数表明拟合方程的可靠度高。将实际试验测得反弹最大高度分别代入式(2)、(3),求得 $e_1=0.441$、$e_2=0.435$。分别以碰撞恢复系数 e_1、e_2 进行仿真试验,重复 5 次取平均值,得到反弹最大高度分别为 20.15、16.30 mm,与实测值的相对误差分别为 3.13%、3.49%,结果表明标定后的仿真试验结果与实际试验结果基本一致,因此确定燕麦种子、箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间碰撞恢复系数分别为 0.441、0.435。

2.1.2 静摩擦因数标定

通过斜面滑移试验来测定种子与材料板的静摩擦因数 μ_m,试验装置如图 5 所示。试验时,将材料平板固定在倾斜板上,倾斜板初始时水平放置,为了防止种子滚动影响静摩擦因数的测定,降低试验误差,将 4 粒种子粘结在一起形成长方体结构并放置在材料板的一端,然后缓慢匀速提升倾斜板的一端,使材料平板倾斜角逐渐增大,当种子开始滑移时立即停止提升,固定倾斜板并通过角度数显仪(韦度 4×90°,精度 0.05°,温州韦度电子有限公司)测量记录此时的斜面倾角 α,燕麦种子和箭筈豌豆种子重复试验 5 次并计算平均值,得到 ABS 塑料板斜面倾角分别为 26.4°、23.7°。



(a) 实际试验 (b) 仿真试验

图 5 静摩擦因数标定试验

Fig. 5 Calibration tests of static friction factor

1. 倾斜板 2. 角度数显仪

在进行 EDEM 仿真试验时,设置已经标定好的碰撞恢复系数,将静摩擦因数的范围设置为 0.1~

0.7 且间隔设置为 0.1，其余接触参数均设置为 0。每组试验重复进行 5 次取平均值，得到倾斜角与静摩擦因数的关系，将试验结果进行曲线拟合。将仿真试验结果绘制成散点图并拟合，得到拟合曲线如图 6 所示，燕麦种子、箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间静摩擦因数 μ_{m1}、μ_{m2} 与斜面倾角 α_1、α_2 的拟合方程分别为

$$\alpha_1 = -7.976\mu_{m1}^2 + 50.202\mu_{m1} + 3.029 \quad (R^2 = 0.996) \tag{4}$$

$$\alpha_2 = 2.262\mu_{m2}^2 + 43.833\mu_{m2} + 3.336 \quad (R^2 = 0.993) \tag{5}$$

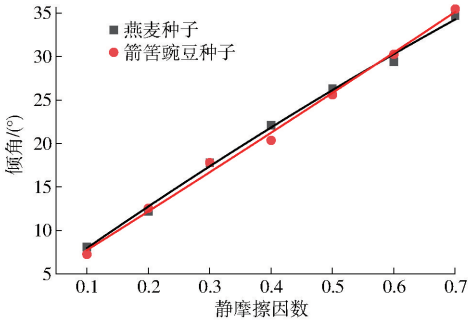


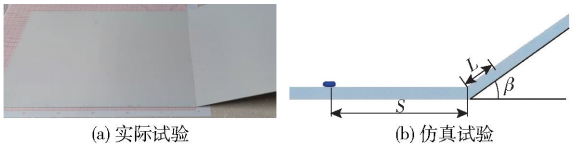
图 6　静摩擦因数与斜面倾角拟合曲线

Fig. 6　Fitting curves of static friction factor and slope angle

拟合结果表明，2 个拟合方程的决定系数 R^2 均接近于 1，表明拟合方程的可靠度高。将实际试验测得的斜面倾角分别代入式(4)、(5)，求得 μ_{m1} = 0.506、μ_{m2} = 0.454。分别进行仿真试验，重复 5 次取平均值，得到斜面倾角分别为 25.7°、24.5°，与实测值的相对误差分别为 2.7%、3.4%，表明标定后的仿真试验结果与实际试验结果基本一致，因此确定燕麦种子、箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间静摩擦因数分别为 0.506、0.454。

2.1.3　滚动摩擦因数标定

采用斜面滚动法来测定种子与材料平板间的滚动摩擦因数 μ_n，如图 7 所示。试验时，在倾斜角 β = 35°的斜面板上，在固定斜面滚动距离 L 处，将种子以初速度为 0 释放，使其沿斜面向下滚动，种子滚落至水平面后静止，测量种子的水平滚动距离 S。分别对燕麦种子和箭筈豌豆种子进行 5 次重复试验，取其平均值，测得燕麦种子和箭筈豌豆种子在 ABS 塑料板上水平滚动距离分别为 54.8、84.7 mm。



(a) 实际试验　　(b) 仿真试验

图 7　种子和材料板间滚动摩擦因数测定试验

Fig. 7　Determination tests of rolling friction factor between seed and material plate

进行 EDEM 仿真试验时，采用同样的方法分别设置已标定好的碰撞恢复系数和静摩擦因数，滚动摩擦因数的范围设置为 0.01 ~ 0.09，步长设置为 0.01，其余接触参数均设置为 0。每组试验重复5 次取平均值，将仿真试验结果绘制成散点图并拟合，得到拟合曲线如图 8 所示，燕麦种子、箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间滚动摩擦因数 μ_{n1}、μ_{n2} 与水平滚动距离 S_1、S_2 的拟合方程分别为

$$S_1 = 5\,347.403\mu_{n1}^2 - 1\,432.907\mu_{n1} + 121.045 \quad (R^2 = 0.981) \tag{6}$$

$$S_2 = 14\,352.814\mu_{n2}^2 - 2\,611.281\mu_{n2} + 175.736 \quad (R^2 = 0.993) \tag{7}$$

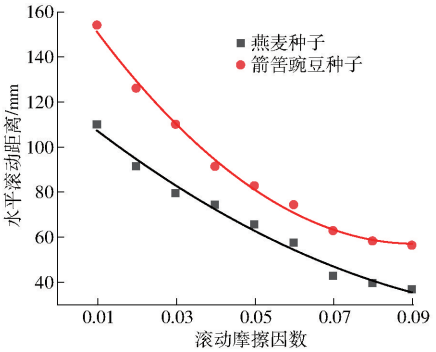


图 8　滚动摩擦因数与种子水平滚动距离拟合曲线

Fig. 8　Fitting curves of rolling friction factor and seed horizontal rolling distance

拟合结果表明，2 个拟合方程的决定系数 R^2 均接近于 1，表明拟合方程的可靠度高。将实际试验测得的种子水平滚动距离分别代入式(6)、(7)，求得 μ_{n1} = 0.059、μ_{n2} = 0.047。分别进行仿真试验，重复 5 次取平均值，得到水平滚动距离分别为 55.2、83.5 mm，与实测值的相对误差分别为 0.73%、1.42%，表明标定后的仿真试验结果与实际试验结果基本一致，因此确定燕麦种子、箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间滚动摩擦因数分别为 0.059、0.047。

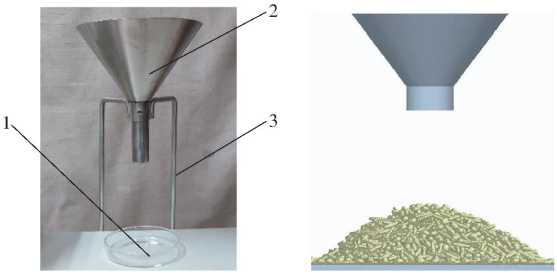
2.2　种间接触参数标定

由于在研究燕麦和箭筈豌豆种子的混播过程中，种子始终以这两种种子的混合态存在，混合种子间接触参数包括了燕麦种子间的接触参数、箭筈豌豆种子间的接触参数以及燕麦和箭筈豌豆种子间的接触参数，而在混播过程中不需要将 3 种接触参数分开单独考虑，只需考虑混合种子之间的接触参数，因此对燕麦种子和箭筈豌豆种子以质量比 1∶1 混合均匀后进行落种试验以测定混合种子间的平均接触参数。试验时，以混合种子堆积角实测值和仿真值的相对误差为试验指标，以混种的种间接触参数为试验因素，进行最陡爬坡试验、三因素二次旋转正交组合设计试验，并对试

验结果进行寻优,确定燕麦种子和箭筈豌豆种子混合后种间的仿真接触参数。

2.2.1 落种试验

落种试验装置主要由漏斗、透明圆盘以及支架组成,如图 9a 所示。试验时,先将漏斗下部封闭,将以燕麦种子和箭筈豌豆种子质量比 1∶1 混合后种子均匀加入漏斗,同时保证种子层的上表面水平,将漏斗下部迅速打开,混合种子落入圆盘,待种子不再下落时,透明圆盘上会形成种堆,如图 10a 所示。测量混合种子的堆积角,即透明圆盘水平面与种堆斜面所形成的锐角。



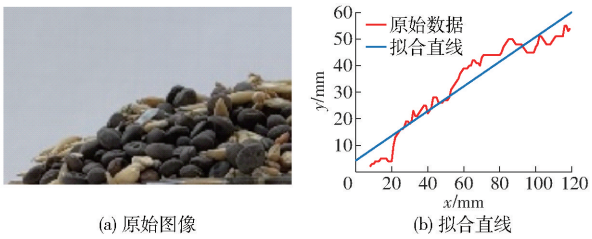
(a) 实际试验 (b) 仿真试验

图 9 堆积角试验

Fig. 9 Stacking angle tests

1. 透明圆盘 2. 漏斗 3. 支架

为减小误差,试验结束后利用 Matlab 将采集的种子堆的边缘图像进行去噪、灰度化和二值化处理,获取种堆边界曲线并进行拟合,拟合后的直线斜率即为种子堆积角的正切值,拟合直线如图 10b 所示。每组进行 5 次重复试验并计算平均值,得到实际测量的混合种子堆积角 θ 均值为 29.6°。



(a) 原始图像 (b) 拟合直线

图 10 种子堆积图像处理

Fig. 10 Image processing of seed stacking

2.2.2 最陡爬坡试验

根据前期的预试验以及查阅相关文献,确定混合种子之间的碰撞恢复系数的取值范围为 0.1 ~ 0.7,静摩擦因数的取值范围为 0.18 ~ 0.60,滚动摩擦因数的取值范围为 0.01 ~ 0.09。采用最陡爬坡试验确定二次回归正交旋转组合试验因素的零水平及最优值区间,最陡爬坡试验方案与结果如表 3 所示。由表 3 分析可知,堆积角相对误差先减小后增大,仿真试验 3 的相对误差最小,取试验 3 为中心点,设为中水平,选取试验 2、4 水平分别为低、高水平进行三因素二次旋转正交组合试验和回归模型分析。混合种子间碰撞恢复系数、静摩擦因数以及滚动摩擦因数的优化范围分别为 0.20 ~ 0.40、0.25 ~ 0.39、0.025 ~ 0.055。

表 3 最陡爬坡试验方案与结果

Tab. 3 Test scheme and results of the steepest climb

序号	种间碰撞恢复系数 e_x	种间静摩擦因数 μ_x	种间滚动摩擦因数 μ_z	仿真堆积角 θ'/(°)	相对误差 δ/%
1	0.10	0.18	0.010	19.3	34.80
2	0.20	0.25	0.025	23.3	21.28
3	0.30	0.32	0.040	28.2	4.73
4	0.40	0.39	0.055	34.8	17.57
5	0.50	0.46	0.070	36.4	22.97
6	0.60	0.53	0.085	37.1	25.34
7	0.70	0.60	0.100	40.0	35.14

2.2.3 二次回归正交旋转组合试验

以燕麦和箭筈豌豆混合种子间的碰撞恢复系数、静摩擦因数以及滚动摩擦因数为试验因素,仿真试验堆积角与台架试验堆积角的相对误差作为试验指标,进行三因素二次回归正交旋转组合试验,仿真试验因素编码如表 4 所示,仿真试验设计方案与结果如表 5 所示,A、B、C 为因素编码值。

表 4 仿真试验因素编码

Tab. 4 Coding of factors of simulation test

编码	因素		
	e_x	μ_x	μ_z
-1.682	0.20	0.25	0.025
-1	0.24	0.28	0.031
0	0.30	0.32	0.040
1	0.36	0.36	0.049
1.682	0.40	0.39	0.055

采用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合,得到回归方程的显著性检验结果如表 6 所示,根据表 6 可知,种间碰撞恢复系数、种间滚动摩擦因数对堆积角误差影响极显著,种间静摩擦因数、种间碰撞恢复系数和静摩擦因数的交互项(AB)对堆积角误差影响显著。对数据进行处理,可得到响应曲面如图 11 所示。由图可知,堆积角相对误差随着种间碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数增加均是先减小后增大,其中 AC、BC 对堆积角误差的影响不显著,可能是种间滚动摩擦因数这单一因素对堆积角相对误差影响较大,导致其交互作用影响较小。由响应面可知,种间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.26 ~ 0.36、0.28 ~ 0.36、0.038 ~ 0.046 时,堆积角相对误差较小。

在回归方程中去除不显著项后,拟合得到新的

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Test scheme and results

序号	因素			相对误差
	A	*B*	*C*	*δ*/%
1	−1	−1	−1	21.34
2	1	−1	−1	15.24
3	−1	1	−1	17.95
4	1	1	−1	19.61
5	−1	−1	1	17.64
6	1	−1	1	10.61
7	−1	1	1	14.53
8	1	1	1	9.41
9	−1.682	0	0	18.17
10	1.682	0	0	10.04
11	0	−1.682	0	13.87
12	0	1.682	0	7.91
13	0	0	−1.682	29.50
14	0	0	1.682	19.52
15	0	0	0	4.23
16	0	0	0	3.97
17	0	0	0	3.75
18	0	0	0	1.01
19	0	0	0	4.68
20	0	0	0	3.83
21	0	0	0	3.86
22	0	0	0	4.16
23	0	0	0	4.76

表 6　方差分析

Tab. 6　Regression equation analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方和	*F*	*P*
模型	1 237.54	9	137.50	64.39	0.0001 **
A	67.06	1	67.06	31.41	0.000 1 **
B	13.06	1	13.06	6.11	0.028 0 *
C	109.86	1	109.86	51.45	0.000 1 **
AB	11.69	1	11.69	5.47	0.035 9 *
AC	7.43	1	7.43	3.48	0.084 8
BC	3.50	1	3.50	1.64	0.222 9
A^2	176.66	1	176.66	82.73	0.000 1 **
B^2	76.75	1	76.75	35.94	0.000 1 **
C^2	781.50	1	781.50	365.99	0.000 1 **
残差	27.76	13	2.14		
失拟	17.93	5	3.59	2.92	0.086 3
误差	9.83	8	1.23		
总和	1 265.30	22			

注：* 表示影响显著（0.01 < *P* ≤ 0.05），** 表示影响极显著（*P* ≤ 0.01）。

回归方程为

$$\delta = 3.84 - 2.22A - 0.98B - 2.84C + 1.21AB + 3.33A^2 + 2.20B^2 + 7.01C^2 \quad (8)$$

该回归模型的 *P* 值小于 0.01，说明回归方程模型极显著，且失拟项的 *P* 值大于 0.05，说明所得回归方程(8)与实际拟合中非正常误差所占比例小，

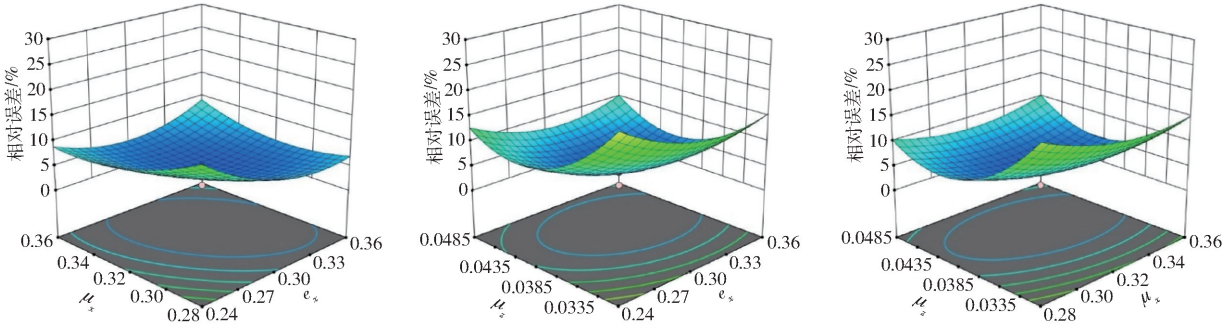


图 11　试验因素对堆积角响应曲面的影响

Fig. 11　Effects of test factors on stacking angle response surface

不存在其他影响指标的主要因素。回归方程的决定系数 $R^2 = 0.97$，表明回归方程的拟合程度高，能够准确地反映试验因素与堆积角相对误差间的关系，可用于堆积角的预测分析。

2.2.4　多目标优化参数

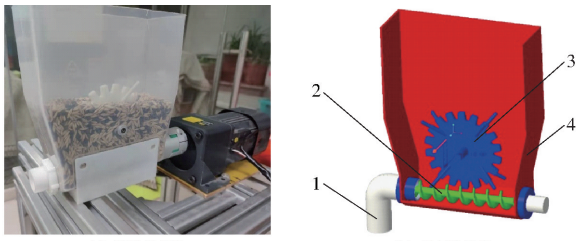
利用 Design-Expert 软件的优化模块，以堆积角相对误差的最小值为目标，对回归方程进行求解，分析响应曲面，对回归模型进行寻优。目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min \delta(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0.20 \leqslant e_x \leqslant 0.40 \\ 0.25 \leqslant \mu_x \leqslant 0.39 \\ 0.025 \leqslant \mu_z \leqslant 0.055 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

得到回归模型的最优参数组合为：种间碰撞恢复系数 0.320、种间静摩擦因数 0.327、种间滚动摩擦因数 0.042。将标定后的接触参数代入 EDEM 软件中进行 5 次堆积角仿真试验，测得堆积角平均值为 30.12°，与台架试验堆积角的相对误差为 1.76%，说明所得最优仿真接触参数组合与实际值基本一致，可用于后续的 EDEM 仿真试验。

3　验证试验

为了进一步验证燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型和接触参数的可靠性，利用螺旋排种装置对混合种子进行排种试验。螺旋排种装置采用 3D 打印，如图 12a 所示，该装置主要由种箱、搅种轮、螺旋输种轮、输种管及步进电机等组成，对燕麦种子和箭筈豌豆种子混合后的种子进行台架试验。该



(a) 实际试验 (b) 仿真试验

图 12 验证试验

Fig. 12 Verification test

1. 输种管 2. 螺旋输种轮 3. 搅种轮 4. 种箱

装置对豆科种子和禾本科种子的输种具有良好的适用性,且搅种轮可将种子进行搅拌使其混合均匀,使混合种子按比例均匀地排出。以混合种子的质量流率表征播种量,以燕麦种子和箭筈豌豆种子的输排质量比表征混播比例,因此以混合种子的质量流率和燕麦种子与箭筈豌豆种子的排种质量比为试验指标,在不同输种轮转速下进行实际台架试验和仿真试验,对比实测和仿真的质量流率和排种质量比。试验时,在种箱内各加入 1 kg 的燕麦种子和箭筈豌豆种子,启动步进电机,调节转速并设置转向,先使电机带动螺旋输种轮正转,此时不排种,并以此带动搅种轮对混合种子进行搅拌,待种子混合均匀后使电机反转,带动螺旋输种轮进行排种,待种子均匀排出时,利用下方圆盘收集种子,每隔 1 min 分别记录一次混合种子的总质量、燕麦种子的质量及箭筈豌豆种子的质量,并计算排种装置的质量流率和输种质量比,重复试验 5 次取其平均值。

建立简易的螺旋排种装置的三维模型,如图 12b 所示。利用 EDEM 软件将排种装置模型、燕麦种子和箭筈豌豆种子的离散元模型导入,结构材料设置成 ABS 塑料,并设置已经标定的接触参数,在仿真试验时首先在 EDEM 中同时生成 1 kg 的燕麦种子颗粒和 1 kg 的箭筈豌豆种子颗粒,待生成的颗粒均落入种箱后,使螺旋输种轮逆时针转动 5 s,此时不排种并带动搅种轮将种子均匀混合,而后使螺旋输种轮顺时针转动进行排种试验。输出混合种子的质量流率和燕麦种子与箭筈豌豆种子的质量,并计算质量比。

图 13 为试验指标的实测和仿真结果,结果表明,混合种子质量流率的实测值和仿真值与输种轮转速的变化趋势基本一致,平均相对误差为 1.76%,燕麦种子和箭筈豌豆种子的排种质量比的实测值与仿真值也基本一致,且接近于 1,平均相对误差为 2.03%,排种质量比在输种轮转速为 60 ~ 70 r/min 时,排种比例最接近于 1,混播效果最好。

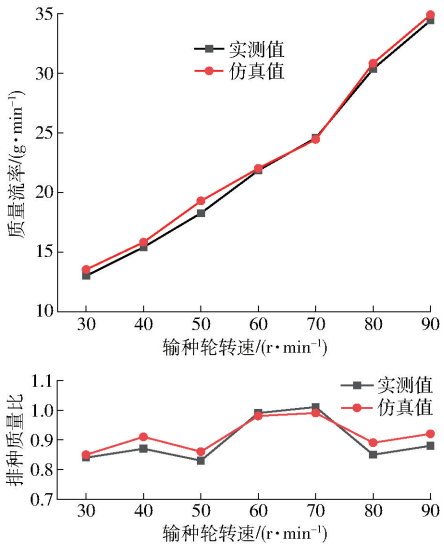


图 13 试验指标的实测和仿真结果

Fig. 13 Measured and simulated results of test indicators

试验指标的实测值和仿真值变化趋势基本一致,且相对误差均不大于 5%,表明燕麦种子和箭筈豌豆种子的离散元模型及接触参数的标定结果均可用于离散元仿真试验,可为后续研究混播过程中混合种子在排种器内的运动特性等仿真模拟提供理论支撑。

4 结论

(1)以燕麦种子和箭筈豌豆种子为研究对象,通过测量得到种子的物理参数,并采用 Hertz - Mindlin(no slip)模型以及多个球形颗粒聚合的方式,在 EDEM 软件中建立了燕麦种子和箭筈豌豆种子的离散元模型。

(2)采用台架试验与仿真试验相结合的方式,通过碰撞试验、斜面滑动试验和斜面滚动试验,对燕麦种子和箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间的碰撞恢复系数、静摩擦因数及滚动摩擦因数进行了标定。燕麦种子和箭筈豌豆种子与 ABS 塑料板间的碰撞恢复系数分别为 0.441、0.435,静摩擦因数分别为 0.506、0.454,滚动摩擦因数分别为 0.059、0.047。

(3)通过以燕麦和箭筈豌豆种子质量比 1∶1 混合的种子进行堆积试验,测得混合种子的实际堆积角为 29.6°,以种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数为试验因素,以堆积角实际值和 EDEM 仿真值的相对误差为试验指标,进行三因素二次旋转正交组合试验,建立因素和指标的数学模型,确定接触参数最优值为:种间碰撞恢复系数 0.320、种间静摩擦因数 0.327、种间滚动摩擦因数 0.042。

(4)利用螺旋排种装置对燕麦和箭筈豌豆的

混合种子进行实际排种试验和参数标定后仿真排种试验，以输种轮转速为试验因素，以混合种子的质量流率和排种质量比为试验指标。试验结果表明：仿真试验与台架试验的混合种子质量流率平均相对误差为 1.76%，燕麦种子和箭筈豌豆种子排种质量比的平均相对误差为 2.03%，且试验指标的总体变化趋势一致，验证了燕麦种子和箭筈豌豆种子离散元模型和接触参数的真实性和可靠性，研究结果可用于后续在混播过程中对种子的运动特性进行研究。

参 考 文 献

[1] 谢开云，赵云，李向林，等. 豆-禾混播草地种间关系研究进展[J]. 草业学报，2013，22(3)：284－296.
XIE Kaiyun，ZHAO Yun，LI Xianglin，et al. Research progress on interspecific relationship of bean－grass mixed grassland[J]. Journal of Grass Industry，2013，22(3)：284－296.（in Chinese）

[2] STURLUDÓTTIR E. Forage quality and yield in grass-legume mixtures in Northern Europe and Canada[D]. Reykjavik：University of Iceland，2011.

[3] 芦奕晓，牟乐，杨惠敏. 豆科与禾本科牧草混播改良土壤的研究进展[J]. 中国草地学报，2019，41(1)：94－100.
LU Yixiao，MU Le，YANG Huimin. Research progress of mixed planting of leguminous and gramineous forages to improve soil[J]. Chinese Journal of Grassland，2019，41(1)：94－100.（in Chinese）

[4] 黎松松. 混播箭筈豌豆或施肥对燕麦草地减肥增效的影响[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2021.
LI Songsong. Effects of mixed planting of arrow peas or fertilization on weight loss and synergy of oat grassland[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University，2021.（in Chinese）

[5] 崔莹. 燕麦和箭筈豌豆混播对人工草地生产性能及土壤性质的影响[D]. 兰州：甘肃农业大学，2014.
CUI Ying. Effects of mixed sowing of oats and arrow peas on the productivity and soil properties of artificial grassland[D]. Lanzhou：Gansu Agricultural University，2014.（in Chinese）

[6] 李满有，杨彦军，王斌，等. 干旱地区滴灌条件下燕麦与箭筈豌豆混播模式研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2021，49(12)：51－57，66.
LI Manyou，YANG Yanjun，WANG Bin，et al. Study on the mixed sowing mode of oats and peas with arrowhead under drip irrigation in arid areas[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2021，49(12)：51－57，66.（in Chinese）

[7] 祁亚淑，朱林，许兴. 宁夏绿洲禾豆牧草混播组合及其比例效应[J]. 草业科学，2015，32(9)：1463－1472.
QI Yashu，ZHU Lin，XU Xing. Mixed sowing combination of grass，bean and forage in Ningxia Oasis and its proportional effect[J]. Grass Industry Science，2015，32(9)：1463－1472.（in Chinese）

[8] 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]. 农业机械学报，2020，51(5)：54－66.
SHI Song，LIU Hu，WEI Guojian，et al. Optimization and experiment of air-suction seed metering device based on DEM－CFD for driving assisted seed filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(5)：54－66.（in Chinese）

[9] LEI X，HU H，WU W，et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering，2021，203(22)：22－33.

[10] ZHOU F，HU S，LIU Y，et al. CFD－DEM simulation of the pneumatic conveying of fine particles through a horizontal slit[J]. Particuology，2014，16(5)：196－205.

[11] YM A，MS B. Development of a robust Eulerian－Lagrangian model for the simulation of an industrial solid-fluid system[J]. Chemical Engineering Journal，2021，406：126841.

[12] 曾智伟，马旭，曹秀龙，等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：1－20.
ZENG Zhiwei，MA Xu，CAO Xiulong，et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(4)：1－20.（in Chinese）

[13] 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 of interspecific contact parameters of corn seed particle model based on discrete element[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(22)：36－42.（in Chinese）

[14] 刘瑞，李衍军，刘忠军，等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报，2021，52(增刊)：1－8，18.
LIU Rui，LI Yanjun，LIU Zhongjun，et al. Discrete element parameter analysis and calibration of coated corn seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(Supp.)：1－8，18.（in Chinese）

[15] MOHAMMAD M，TEKESTE M Z，ROSENTRATER K A. Calibration and validation of a discrete element model of corn using grain flow simulation in a commercial screw grain auger[J]. Transactions of the ASABE，2017，60(4)：1403－1415.

[16] 张荣芳，焦伟，周纪磊，等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：227－235.
ZHANG Rongfang，JIAO Wei，ZHOU Jilei，et al. Parameter calibration of discrete element model of rice seeds with different

filling particle radii[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 227 - 235. (in Chinese)

[17] 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.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Analysis and calibration of wheat discrete element parameters based on stacking test[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247 - 253. (in Chinese)

[18] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(2):123 - 132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Simulation parameter calibration and experiment of *Panax notoginseng* seeds based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123 - 132. (in Chinese)

[19] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 基于 RSM 和 NSGA - Ⅱ 的苜蓿种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(8):136 - 144.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration of discrete element model of alfalfa seeds based on RSM and NSGA - Ⅱ[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 136 - 144. (in Chinese)

[20] 侯占峰,戴念祖,陈智,等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(24):46 - 54.
HOU Zhanfeng, DAI Nianzu, CHEN Zhi, et al. Determination of physical property parameters of ice grass seeds and calibration of discrete element simulation parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 46 - 54. (in Chinese)

[21] 张胜伟,张瑞雨,陈天佑,等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):71 - 79.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CHEN Tianyou, et al. Discrete element simulation parameter calibration and seeding verification test of mung bean seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71 - 79. (in Chinese)

[22] GHODKI B M, PATEL M, NAMDEO R, et al. Calibration of discrete element model parameters: soybeans[J]. Computational Particle Mechanics, 2018, 6(1): 3 - 10.

[23] 戴念祖,侯占峰,仇义,等. 红三叶种子离散元仿真参数的标定与试验[J]. 河北农业大学学报,2021,44(6):92 - 98.
DAI Nianzu, HOU Zhanfeng, QIU Yi, et al. Calibration and experiment of discrete element simulation parameters of red clover seeds[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(6): 92 - 98. (in Chinese)

[24] VELICKY B, CAROLI C. Pressure dependence of the sound velocity in a two-dimensional lattice of Hertz - Mindlin balls: mean-field description[J]. Physical Review E, 2002, 65(2): 021307.