doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.014

苜蓿种荚分离清选离散元模型参数标定与试验

张　庆[1,2]　孙立皓[1]　樊向东[3]　马骋昊[1]　胡建良[4]　刘金龙[2]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部牧草种子生产加工机械装备重点实验室, 石嘴山 753400;
3. 石嘴山市畜牧水产技术推广服务中心, 石嘴山 753000; 4. 石家庄鑫农机械有限公司, 石家庄 052400)

摘要: 为了更好地利用离散元法研究苜蓿种荚在机械梳脱后的动态分离清选过程,提高离散元仿真分析的准确性,采用试验和仿真的方法开展了螺旋卷曲形状的苜蓿种荚离散元模型参数标定研究。采用斜面法与平板碰撞法测定了种荚-种荚和种荚-钢板间的静摩擦因数、滚动摩擦因数和碰撞恢复系数,通过漏斗掉落法测得苜蓿种荚的实际堆积角为 33.19°。在 EDEM 中基于多球体快速填充构建了螺旋卷曲苜蓿种荚离散元模型,利用 Plackett-Burman 试验筛选出对堆积角影响显著的泊松比、种荚-种荚静摩擦因数、种荚-种荚滚动摩擦因数、种荚-钢板静摩擦因数,并通过最陡爬坡试验和 CCD 正交试验确定了其最优值分别为 0.200、0.501、0.500、0.218,仿真与试验堆积角的最大相对误差为 1.2%。采用标定参数开展了苜蓿种荚分离清选离散元仿真分析,与田间试验相比分离率最大相对误差为 6.76%,验证了标定优化后参数的可行性和准确性,可为苜蓿种荚分离清选离散元仿真以及关键结构优化设计提供支撑。

关键词: 苜蓿种荚; 分离清选; 参数标定; 离散元

中图分类号: S225.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0156-09　　**OSID**:

Calibration and Experiment of Discrete Element Model Parameters for Alfalfa Seed Pod Separation and Cleaning

ZHANG Qing[1,2]　SUN Lihao[1]　FAN Xiangdong[3]　MA Chenghao[1]　HU Jianliang[4]　LIU Jinlong[2]

(1. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Forage Seed Production and Processing Machinery and Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shizuishan* 753400, *China*
3. *Shizuishan Animal Husbandry and Aquatic Products Technology Promotion and Service Center, Shizuishan* 753000, *China*
4. *Shijiazhuang Xinnong Machinery Co., Ltd., Shijiazhuang* 052400, *China*)

Abstract: In order to enhance the application of the discrete element method (DEM) in investigating the dynamic separation and cleaning process of alfalfa seed pods following mechanical combing detachment, and improve the accuracy of DEM-based simulations, a study was conducted to calibrate the parameters of a helical-curled alfalfa seed pod DEM model by using combination of experimental and simulation approaches. The static friction coefficient, rolling friction coefficient, and restitution coefficient for pod-pod and pod-steel plate interactions were measured by using the inclined plane method and the flat plate collision method. The actual repose angle of alfalfa pods was determined as 33.19° via the funnel drop method. A discrete element model of spiral-curled alfalfa pods was then developed by using a multi-sphere fast-packing approach in EDEM. Sensitivity analysis via Plackett-Burman experimental design identified four parameters with significant effects on the repose angle: Poisson's ratio, pod-pod static friction coefficient, pod-pod rolling friction coefficient, and pod-steel plate static friction coefficient. These parameters were further optimized through steepest ascent experiments and central composite design (CCD), yielding optimal values of 0.200, 0.501, 0.500, and 0.218, respectively. The maximum relative error between the simulated and experimental repose angles was 1.2%, validating the calibration accuracy. DEM simulations of the pod separation and cleaning process were subsequently performed. Field experiments confirmed the reliability of the calibrated parameters, with the maximum relative error

收稿日期: 2025-08-24　修回日期: 2025-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001902)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)

作者简介: 张庆(1986—),男,副教授,博士,主要从事饲草种子机械化收获关键技术与装备研究,E-mail: zhangqingbit@cau.edu.cn

in separation rate of 6.76%. The research result can provide a robust methodological framework for DEM-based analysis and optimization of alfalfa seed pod separation systems, offering critical parameter references for future research and engineering applications.

Key words: alfalfa seed pod; separation and cleaning; parameter calibration; discrete element method

0　引言

苜蓿是一种优质的多年生豆科草本植物,富含植物蛋白等营养物质[1]。随着我国苜蓿种植面积的不断增大,对于苜蓿种子机械收获设备的需求也在不断增加[2]。苜蓿种子颗粒包裹在螺旋种荚内,在机械化采收时往往是以种荚的形态收集在储仓内,苜蓿种荚在收获机分离清选装置内受到复杂的动态分离力作用,包括种荚与种荚之间、种荚与清选装置之间的作用力。

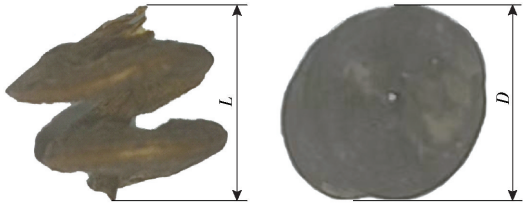
离散元法在农业领域中得到了广泛应用[3],该方法分析苜蓿种荚的动态分离清选过程,不仅有助于揭示苜蓿种荚在复杂外载荷作用下的分离清选机理和运动规律,也有利于分离清选装置结构和工作参数的优化设计。文献[4]利用图像采集的方式对大豆外形特征进行精确提取,完成了低含水率大豆离散元参数标定。文献[5]通过剪切试验和压缩试验标定了玉米离散元模型的摩擦因数和刚度,并通过筒仓卸料与斗装试验进行了验证。目前对于苜蓿相关的离散元建模与参数标定主要集中于在植株茎秆、种子颗粒等方面。文献[6]以苜蓿现蕾期茎秆为研究对象,构建了苜蓿茎秆柔性离散元模型并开展了剪切仿真试验,仿真与试验结果的相对误差仅为0.86%。文献[7]通过构建空心茎秆离散元模型,对苜蓿茎秆压扁调制过程进行了模拟。文献[8-9]基于紫花苜蓿种子颗粒物理特性试验构建了苜蓿种子离散元仿真模型,为播种分析提供了模型支撑。当前,国内外苜蓿种子机械化收获采净率普遍较低,机械-植株-气流耦合致损机理和物料输运特性仍不清晰,直接影响了苜蓿种子采净率水平的提升[10]。采用离散元方法展开苜蓿种子机械梳脱和气流输运过程的动态仿真分析,是探究其致损机理和输运过程的有力工具和方法。而其中苜蓿种荚离散元模型是重要的基础模型,对其展开相关的建模方法和参数标定研究具有重要意义。

针对苜蓿种荚与常规种子不同的螺旋弯曲外形,其物理特性更为复杂等相关问题,本文开展苜蓿种荚分离清选离散元模型参数标定研究。首先试验测定苜蓿种荚的本征特性,随后基于多球体快速填充构建螺旋卷曲苜蓿种荚离散元模型,利用 Plackett-Burman 试验筛选出对堆积角影响显著的参数,结合最陡爬坡试验和响应面优化仿真试验确定苜蓿种荚的泊松比、剪切模量、碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等物理参数。最终,通过对比堆积角实际值与仿真值,验证所标定参数的有效性和准确性。

1　苜蓿种荚物理参数测定

1.1　物理与尺寸参数测量

试验材料选取内蒙古鄂托克旗牧草良种繁育与示范基地所种植的苜蓿种荚,采用随机抽样法选取50 粒未破损种荚制作为试验样本,苜蓿种荚呈螺旋弯曲结构,如图 1 所示。测得苜蓿种荚的平均密度和千粒质量分别为 895 kg/m^3、28.62 g,平均含水率为 12.10%。采用游标卡尺测量其外形尺寸,结果如表 1 所示。



(a) 正视图　　(b) 俯视图

图 1　苜蓿种荚特征

Fig. 1　Alfalfa seed pod characteristics

表 1　苜蓿种荚尺寸

Tab. 1　Alfalfa seed pod dimensions

项目	高度/mm	直径/mm	圈数
最大值	4.72	5.30	3.0
最小值	3.05	4.40	1.5
平均值	4.21	4.86	2.5
标准差	0.67	0.32	0.5

1.2　剪切模量与泊松比测量

泊松比是指种荚在某一方向上受到拉伸或压缩载荷时,横向变形量与纵向变形量之比,该参数反映了种荚在一个方向上受力时,其在其它方向上的形变程度[11-12]。剪切模量是描述种荚在剪切力作用下的变形特性,是表征种荚弹性行为的重要参数之一。通过压缩试验可获得种荚泊松比与剪切模量。

利用万能试验仪(图 2)对苜蓿种荚进行力学性能测试,以 3 mm/min 的加载速度均匀施加载荷,并重复进行 20 次试验,得到苜蓿种荚泊松比为 0.3 ~ 0.5,剪切模量为 150 ~ 400 MPa。

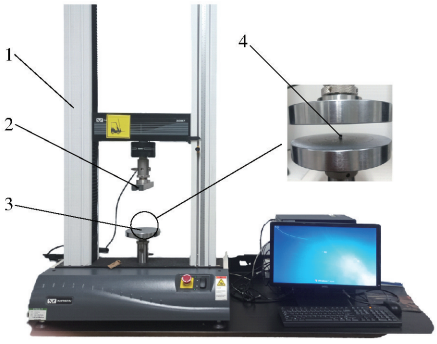


图 2 万能试验仪

Fig. 2 Universal test stand

1. 万能试验台 2. 上压盘 3. 固定底座 4. 苜蓿种荚

1.3 静摩擦因数测定

静摩擦因数是指最大静摩擦力与接触间压力的比值[13],苜蓿种荚-钢板静摩擦因数以及种荚-种荚静摩擦因数测定采用静摩擦因数测量仪(如图 3 所示),测量前将支撑板调整至水平状态,将苜蓿种荚放置于支撑板上表面,缓慢抬升支撑板,当苜蓿种荚开始有向下运动的趋势时,读取此时支撑板所抬升角度。再将苜蓿种荚均匀粘贴在尺寸 13 cm×11 cm 的板材上,将种荚板固定于支撑板上,抬升支撑板直至种荚出现向下运动的趋势时,记录此时支撑板的抬升角度。静摩擦因数计算公式为

$$\mu_1 = \tan\theta \tag{1}$$

式中 μ_1——种荚静摩擦因数

θ——支撑面与水平面夹角,(°)

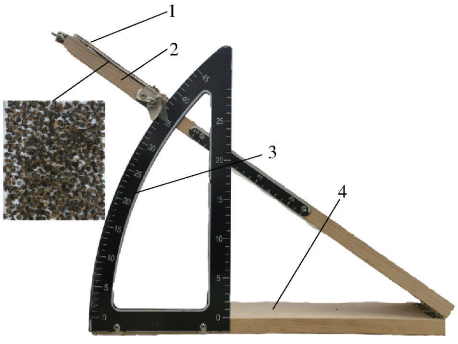


图 3 物料静摩擦因数测量试验装置

Fig. 3 Staticfriction coefficient testing device for materials

1. 种荚板 2. 支撑板 3. 角度仪 4. 底板

考虑到苜蓿种荚的形态和结构差异,随机选取 30 粒种荚,将其放置于种荚板不同位置,每粒种子重复试验 3 次,测量后将数据代入式(1)得到苜蓿种荚-钢板的静摩擦因数为 0.2~0.4,苜蓿种荚-种荚的静摩擦因数为 0.5~0.8。

1.4 滚动摩擦因数

滚动摩擦因数与种荚质量、形状特征等有关,采用斜面滚动[14-15]方法测定苜蓿种荚与钢板滚动摩擦因数,试验装置如图 4 所示。该装置由倾斜钢板、水平钢板以及倾斜支架组成。测试时将待测种荚样品置于倾斜钢板上,使其由静止状态自由滚动至水平钢板上。当样品在水平钢板上停止运动后,测量其滚动距离,滚动摩擦因数计算公式为

$$\mu_2 = \frac{D_1 \sin\alpha}{D_1 \cos\alpha + L_1} \tag{2}$$

式中 μ_2——动摩擦因数

α——钢板倾斜角度,(°)

D_1——种荚在倾斜钢板上的距离,mm

L_1——种荚在水平钢板上的移动距离,mm

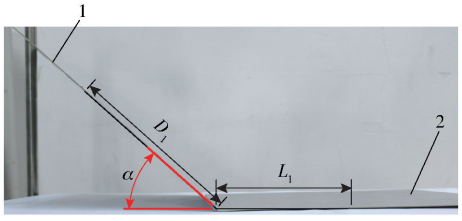


图 4 种荚滚动摩擦因数测量装置

Fig. 4 Seed pod kinetic friction coefficient measuring device

1. 倾斜钢板 2. 水平钢板

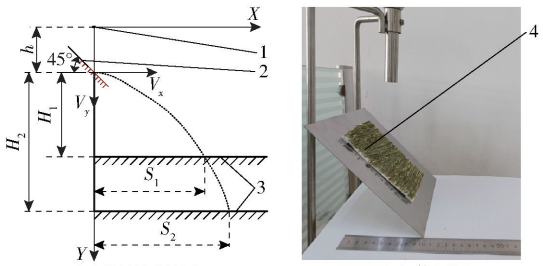
随机选取多粒种荚重复试验 15 次,测得种荚-钢板滚动摩擦因数为 0.2~0.4,由于种荚-种荚滚动摩擦因数测量难度较高、测量误差较大,因此查阅文献[16]确定苜蓿种荚间的滚动摩擦因数为 0.5~0.7。

1.5 碰撞恢复系数测定

碰撞恢复系数是散粒体分析中的重要参数,用以衡量物体碰撞后变形恢复的能力。对于特定材料的物体,碰撞恢复系数是指碰撞后两物体的分离速度与碰撞前的接近速度之比[17-20],通常用 e 表示。采用自由落体法测量苜蓿种荚碰撞恢复系数时,由于种荚表面凹凸不平,互相碰撞时会出现多点碰撞现象,种荚的回弹路径难以保持竖直向上,导致测量误差较大。因此,采用平板碰撞的方式对碰撞恢复系数进行测量,基本原理及装置设置如图 5 所示。试验时,钢板以 45°角固定,随机选取 40 粒苜蓿种荚在距钢板 h 处自由释放,种荚与钢板发生碰撞后掉落至接料钢板,更改接料板高度重复试验,测量种荚间碰撞恢复系数时,将钢板替换为由种荚粘贴形成的底板,重复上述步骤。

种荚与钢板碰撞后做斜抛运动,将种荚速度分解为 X 方向的水平运动(初速度为 V_x)和沿 Y 方向的竖直运动(初速度为 V_y)。通过改变接料钢板高度 H_i,分别测得两次碰撞后的水平位移量 S_i。

种荚-种荚间的碰撞恢复系数可通过将种荚均匀粘附于钢板,并利用种荚撞击颗粒板的方法进行测定。选取 10 粒种荚,每粒种荚重复 3 次试验,测得种荚与钢板的碰撞恢复系数为 0.1~0.4。而种



(a) 测量原理图　　(b) 装置图

图 5　种荚碰撞恢复系数试验原理图

Fig. 5　Schematics of coefficient of restitution test for seed pods

1. 苜蓿种荚　2. 碰撞钢板　3. 接料板　4. 种荚底板

荚与种荚间的碰撞恢复系数为 0.1 ~ 0.5。

1.6　堆积角试验

散粒体物料堆积角受颗粒自身特征和环境等影响，反映物料散落性能和摩擦特性。采用漏斗堆积方法[21-23]进行苜蓿种荚堆积角试验，试验过程中，将锥形圆筒固定于钢板上方 100 mm 处，圆筒内最小直径为 20 mm，总高为 200 mm，将种荚倒入锥形漏斗内，使其在重力作用下沿漏斗自由下落至钢板表面，并自然堆积形成锥形。当种荚完全静止后，对形成的堆积锥体进行拍照，以获取堆积角数据（如图 6 所示）。



图 6　苜蓿种荚堆积角试验

Fig. 6　Angle of repose measurement for alfalfa seed pods

图 7a 显示苜蓿种荚堆积所形成的轮廓线条并非直线，而是具有一定的弯曲性。为减小堆积角测量误差，采用多角度平面拍摄结合图像处理技术，以数学拟合方法提取更为准确的堆积角轮廓曲线，从而获得可靠的堆积角数据。针对提取的轮廓曲线，采用最小二乘法进行线性拟合，并将拟合方程的斜率转化为苜蓿种荚的堆积角，堆积图像处理过程及获得的轮廓曲线拟合图像如图 7 所示，重复试验 5 次最终得到苜蓿种荚堆积角平均值为 33.19°。

2　苜蓿种荚离散元模型参数标定

2.1　离散元模型建立

由于苜蓿种荚外形呈现螺旋弯曲状，无法直接使用单个标准颗粒进行建模。首先构建苜蓿种荚的三维模型，并在 EDEM 中采用多球体自动填充进行模型快速填充[24-25]，将颗粒平滑值设置为 4.6。因

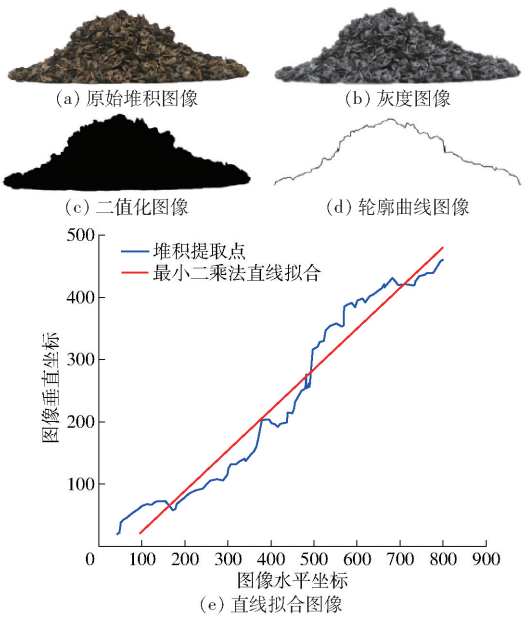


图 7　苜蓿种荚实际堆积角提取

Fig. 7　Empirical determination of angle of repose for alfalfa seed pods

此，在保证颗粒模型精度的情况下，应该尽量减少基础球体数量，并适当增加基础球体半径。最终设置最小基础球体半径为 0.38 mm，并对局部颗粒位置与尺寸进行手动调整，以确保模型准确性和合理性，苜蓿种荚实物与离散元模型如图 8 所示。



(a) 种荚实物图　　(b) 种荚离散元模型

图 8　苜蓿种荚实物图与离散元模型

Fig. 8　Alfalfa seed pod physical map and discrete element model

由于苜蓿颗粒间含水率较少，由湿度引起的颗粒间粘附作用较小，可以忽略不计。因此，在离散元建模过程中，苜蓿种荚颗粒间采用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型进行模拟，以更加准确地描述其接触作用。在参数标定过程中，不仅要考虑种荚间接触的相互作用，还需要考虑种荚与试验材料之间的接触特性。为此，采用常见的 45 号钢作为试验材料，材料密度为 7 850 kg/m^3、泊松比为 0.30、剪切模量为 7.85 × 10^4 MPa。

为确保仿真试验与物理试验的可比性和一致性，种荚堆积角离散元仿真采用与物理试验相同的试验方法，并严格控制试验变量保持一致。在仿真过程中，以动态方式生成总质量为 35 g 的苜蓿种荚颗粒，仿真时间为 4 s，步长为 4.31 × 10^{-7} s，网格尺

寸为最小颗粒半径的 8.5 倍,以确保计算精度和稳定性。EDEM 中堆积角仿真模拟如图 9 所示。

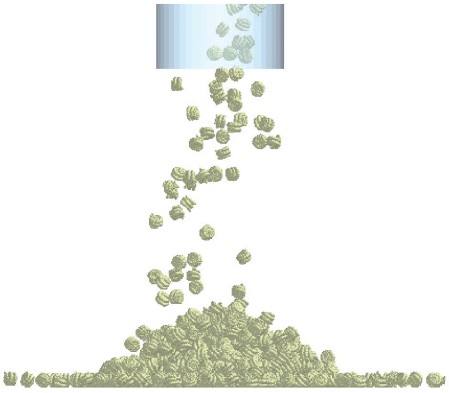


图 9 堆积角仿真模拟图

Fig. 9 Simulation diagram of angle of repose

2.2 Plackett – Burman 试验

通过 Design-Expert 软件进行试验设计,以苜蓿种荚堆积角作为响应值,选择 8 个可能影响堆积角的参数进行 Plackett – Burman 试验。分析各因素对苜蓿种荚堆积角的影响程度,筛选出对苜蓿种荚堆积角存在显著性影响的因素。如表 2 所示,将每个参数范围值的最大、最小值分别编码为 1、–1。

表 2 Plackett – Burman 试验因素编码

Tab. 2 Plackett – Burman experimental factors codings

因素	编码	
	–1	1
泊松比 x_1	0.20	0.50
剪切模量 x_2/MPa	150	400
种荚间碰撞恢复系数 x_3	0.10	0.50
种荚间静摩擦因数 x_4	0.50	0.80
种荚间滚动摩擦因数 x_5	0.50	0.70
种荚与钢板碰撞恢复系数 x_6	0.10	0.40
种荚与钢板静摩擦因数 x_7	0.20	0.40
种荚与钢板滚动摩擦因数 x_8	0.20	0.40

Plackett – Burman 试验的具体设计方案与结果如表 3 所示,表中 $X_1 \sim X_8$ 分别表示泊松比、剪切模量、种夹间碰撞恢复系数、种夹间静摩擦因数、种荚间滚动摩擦因数、种荚与钢板碰撞恢复系数、种荚与钢板静摩擦因数、种荚与钢板滚动摩擦因数编码值。对仿真所得到的堆积角图像拟合求解得到种荚堆轮廓,拟合曲线得到仿真试验堆积角度平均值。

使用 Design-Expert 对 Plackett – Burman 试验结果进行显著性分析,结果如表 4 所示。由表 4 分析可得,仿真参数 X_1、X_4、X_5 和 X_7 的 P 值均小于 0.01,表明其对苜蓿种荚堆积角的影响极显著。因此在设计试验时主要围绕这 4 个极显著参数进行优化和标定。

表 3 Plackett – Burman 试验设计与结果

Tab. 3 Plackett – Burman experimental design and results

试验序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	堆积角/(°)
1	1	1	–1	1	1	1	–1	–1	50.24
2	–1	1	1	–1	1	1	1	–1	43.69
3	1	–1	1	1	–1	1	1	1	37.43
4	–1	1	–1	1	1	–1	1	1	38.16
5	–1	–1	1	–1	1	1	–1	1	38.69
6	–1	–1	–1	1	–1	1	1	–1	31.72
7	1	–1	–1	–1	1	–1	1	1	43.28
8	1	1	–1	–1	–1	1	–1	1	45.27
9	1	1	1	–1	–1	–1	1	–1	37.98
10	–1	1	1	1	–1	–1	–1	1	52.65
11	1	–1	1	1	1	–1	–1	–1	47.78
12	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	51.65

表 4 Plackett – Burman 试验参数显著性分析

Tab. 4 Plackett – Burman experimental parameters significance analysis

因素	效应值	均方和	P	贡献率/%	显著性排序
X_1	4.507	60.930	0.001 4	12.852	3
X_2	0.863	2.236	0.114 0	0.472	6
X_3	–2.127	13.568	0.012 2	2.862	5
X_4	7.22	156.385	0.000 3	32.987	2
X_5	8.103	196.992	0.000 2	41.552	1
X_6	0.587	1.033	0.230 1	0.218	7
X_7	3.697	40.996	0.002 5	8.647	4
X_8	–0.333	0.333	0.456 1	0.070	8

注:$0.01 < P \leqslant 0.05$ 表示影响显著,$P \leqslant 0.01$ 表示影响极显著,下同。

2.3 最陡爬坡试验与结果分析

最陡爬坡试验以仿真试验得到的堆积角与物理试验所测量堆积角的相对误差作为评价指标,用以确定显著性因素的最优区间范围。非显著的参数 x_2、x_3、x_6、x_8 均取其平均值,分别为 275 MPa、0.30、0.25、0.30。最陡爬坡试验方案与结果如表 5 所示,随着参数 x_1、x_4、x_5 和 x_7 增大,苜蓿种荚堆积角仿真试验与实测堆积角的误差呈现出先减小后增大的趋势,其中方案 2 的相对误差最小,表明方案 2 更加接近最优值。因此选择方案 2 的参数作为响应面试验的中心点。为避免局部最优解的情况,进一步扩展参数水平范围,选择方案 1 与方案 3 作为低水平与高水平进行优化。

2.4 CCD 试验设计

通过 Design-Expert 软件,根据最陡爬坡试验结果设计试验,并以物理试验堆积角与仿真试验堆积角的相对误差作为评价指标进行显著性参数的响应面试验设计,标定苜蓿种荚仿真参数。因素编码如表 6 所示。

表 5　最陡爬坡试验设计方案与结果

Tab. 5　Steepest climb experimental design and results

序号	因素				堆积角/(°)	相对误差 δ/%
	x_1	x_4	x_5	x_7		
1	0.20	0.50	0.50	0.20	31.44	5.27
2	0.26	0.56	0.54	0.24	34.49	3.92
3	0.32	0.62	0.58	0.28	40.50	22.02
4	0.38	0.68	0.62	0.32	45.49	37.06
5	0.42	0.74	0.66	0.36	50.86	53.24
6	0.50	0.80	0.70	0.40	53.64	61.61

表 6　CCD 试验因素编码

Tab. 6　CCD experimental parameters and coding

编码	x_1	x_4	x_5	x_7
−2	0.14	0.44	0.46	0.16
−1	0.20	0.50	0.50	0.20
0	0.26	0.56	0.54	0.24
1	0.32	0.62	0.58	0.28
2	0.38	0.68	0.62	0.32

响应面试验设计方案及结果如表 7 所示，共进行 27 次仿真试验，其中中心水平设计 3 组重复试验。

表 7　CCD 试验方案与结果

Tab. 7　CCD experimental design and results

序号	因素				堆积角/(°)	相对误差 δ/%
	X_1	X_4	X_5	X_7		
1	1	1	1	−1	39.37	18.62
2	0	0	2	0	38.80	16.90
3	1	−1	−1	−1	32.07	3.37
4	−1	−1	1	1	38.64	16.42
5	0	−2	0	0	36.20	9.07
6	1	1	1	1	42.30	27.45
7	1	−1	1	−1	38.23	15.19
8	1	1	−1	−1	39.54	19.13
9	−1	−1	1	−1	38.44	15.82
10	−1	1	1	−1	41.86	26.12
11	−1	1	−1	−1	34.94	5.27
12	0	0	−2	0	34.90	5.15
13	0	0	0	−2	33.99	2.41
14	−1	1	1	1	43.86	32.15
15	−1	1	−1	1	39.88	20.16
16	0	0	0	0	39.05	17.66
17	−1	−1	−1	−1	33.13	0.18
18	0	2	0	0	42.18	27.09
19	1	−1	1	1	44.80	34.98
20	1	1	−1	1	36.82	10.94
21	0	0	0	0	38.98	17.45
22	0	0	0	2	42.30	27.45
23	2	0	0	0	35.76	7.74
24	−1	−1	−1	1	35.65	7.41
25	−2	0	0	0	38.60	16.30
26	0	0	0	0	37.54	13.11
27	1	−1	−1	1	37.84	14.01

根据试验结果，进行了苜蓿种荚堆积角对 4 个显著性因素的二次多元回归方程分析，回归模型方差分析结果如表 8 所示，该回归模型 P 值为 0.027 9，失拟项 0.119 6，回归模型显著，失拟项不显著，表明回归模型拟合较好。其中 X_5 对苜蓿种荚堆积角的影响极显著，4 个因素之间交互作用对苜蓿种荚堆积角的影响由大到小为 X_1X_4、X_4X_7、X_4X_5、X_1X_7、X_5X_7、X_1X_5。

表 8　CCD 试验方差分析

Tab. 8　CCD experimental analysis of variance

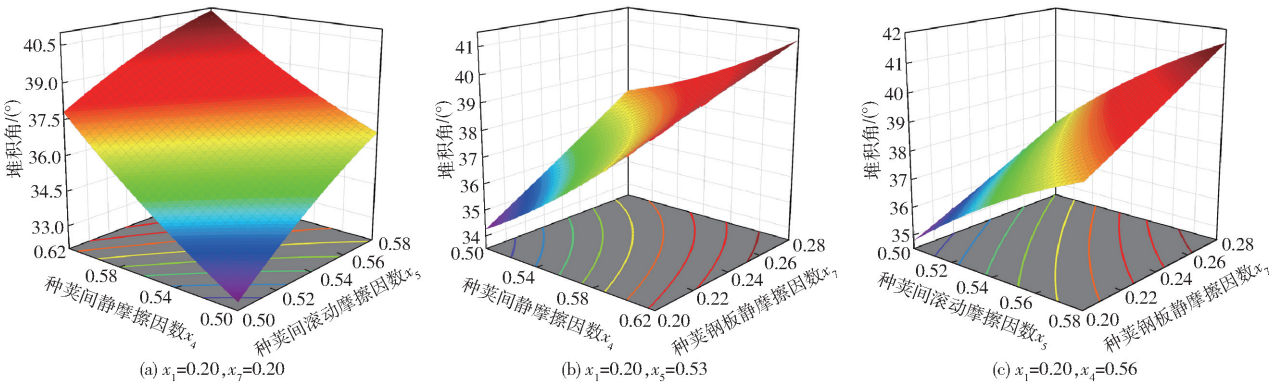
方差源	均方	平方和	P
模型	209.58	14.97	0.027 9
X_1	0.051 3	0.051 3	0.919 4
X_4	41.95	41.95	0.012 1
X_5	86	86	0.001 2
X_7	62.82	62.82	0.003 6
X_1X_4	5.75	7.75	0.295 9
X_1X_5	0.037 1	0.037 1	0.931 5
X_1X_7	0.522 0	0.522 0	0.747 5
X_4X_5	1.7	1.7	0.563 7
X_4X_7	3.91	3.91	0.385 0
X_5X_7	0.088 5	0.088 5	0.894 4
X_1^2	0.956 7	0.956 7	0.663 6
X_4^2	1.8	1.8	0.551 8
X_5^2	1.85	1.85	0.547 1
X_7^2	0.001 85	0.001 85	0.951 5
残差	57.74	4.81	
失拟项	56.29	5.63	0.119 6
纯误差	1.45	0.7264	
总和	267.32		

对试验数据进行分析处理，得到响应曲面如图 10 所示。从图中可以看出，苜蓿种荚堆积角随着种荚间静摩擦因数 x_4、滚动摩擦因数 x_5 和种荚与钢板静摩擦因数 x_7 增加而不断增大。由图 10a 所示，相较于 x_5，x_4 响应面曲线相对更加陡峭，表明其对堆积角的影响更为显著；从图 10b 和图 10c 可以看出，x_4、x_7 及 x_5、x_7 两组呈相似变化趋势，表明这些因素对堆积角影响程度基本相同。

响应面试验结果表明，离散元模型各个因素之间存在交互作用，为获取最佳的苜蓿种荚堆积角参数组合，以实际堆积角 33.19° 为优化目标，采用 Design-Expert 进行求解，目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \theta = 33.19^\circ \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0.20 \leqslant x_1 \leqslant 0.32 \\ 0.50 \leqslant x_4 \leqslant 0.62 \\ 0.50 \leqslant x_5 \leqslant 0.58 \\ 0.20 \leqslant x_7 \leqslant 0.28 \end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

最终选取苜蓿种荚泊松比为 0.200，种荚间静



(a) x_1=0.20,x_7=0.20　(b) x_1=0.20,x_5=0.53　(c) x_1=0.20,x_4=0.56

图 10　试验因素对种荚堆积角影响的响应曲面

Fig. 10　Response surface analysis of experimental factors affecting seed pod angle of repose

摩擦因数为 0.501,种荚间滚动摩擦因数为 0.500,种荚与钢板静摩擦因数为 0.218 时,可以得到最优解。

3　试验验证

为验证标定参数的有效性,将得到的离散元模型最优解参数代入 EDEM 中进行仿真验证,重复 3 次仿真计算得到的苜蓿种荚仿真堆积角为 33.04°、32.79°、33.39°,与实际物理试验测得的堆积角相比,其最大相对误差为 1.2%,堆积形态对比如图 11 所示,验证了所标定的离散元模型参数的有效性和准确性。

另外一方面,基于清选装置实机结构,构建了苜蓿种荚分离清选过程的离散元仿真模型,用以模拟不同钉齿滚筒转速下的分离清选过程,并将种茎分离率的仿真结果与实测结果进行对比分析。分离清选装置的三维模型如图 12 所示,苜蓿种荚与不同长度茎秆在颗粒工厂生成,经由搓擦刮板输运至钉齿滚筒,经螺旋输送器输运至筛网上方,在筛网与钉齿的共同作用下实现分离。金属外壳结构材料设置成 45 号钢、苜蓿种荚接触参数设置为标定所得最优参数,开展相应的离散元仿真分析。



(a) 物理试验

(b) 仿真试验

图 11　物理试验与仿真试验对比

Fig. 11　Comparison between physical experiments and simulation experiments

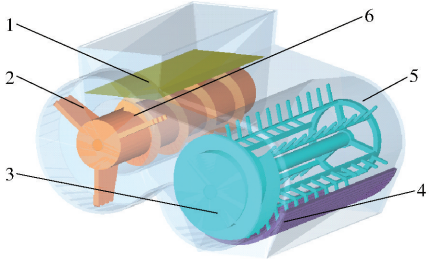
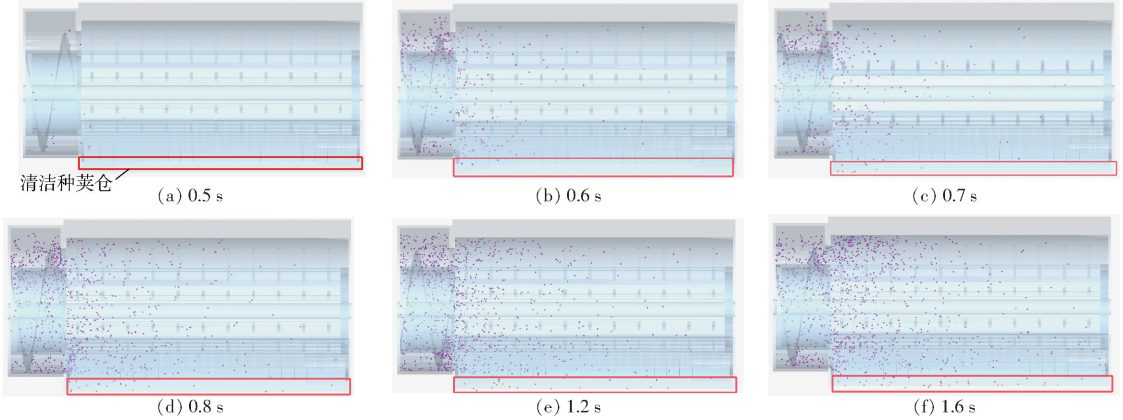


图 12　种荚分离仿真模型

Fig. 12　Seed pod separation simulation model

1. 颗粒工厂　2. 搓擦刮板　3. 钉齿滚筒　4. 清选筛网　5. 清选仓室　6. 分离仓室

种荚分离仿真过程如图 13 所示,由仿真结果可



(a) 0.5 s　(b) 0.6 s　(c) 0.7 s

(d) 0.8 s　(e) 1.2 s　(f) 1.6 s

图 13　种荚清选分离过程

Fig. 13　Process of seed pod cleaning and separation

以看出，种荚在 0.5 s 时开始进入清选仓室，并随着随钉齿滚筒的旋转运动而在筛网上部移动。到 0.6 s 时有部分种荚通过筛网下落，尚未下落的种荚仍随滚筒的运动不断向后移动，逐渐在筛网上部分布均匀。至 0.7 s 开始有大量种荚通过筛网下落，表明此时种荚分离过程开始进入高峰期。随着时间推移，0.8 ~ 1.0 s 种荚不断通过筛网。整体来看，种荚的分离主要发生在筛网前部区域，部分种荚在筛网中部以及后部掉落，其余破碎杂物仍留在筛网上部最终通过样机后部的脱出口排出。

在内蒙古鄂托克旗中国农业科学院畜牧研究所牧草良种繁育与示范基地开展了苜蓿种子田间试验，并完成了苜蓿种荚与茎秆分离率的试验测定，田间试验过程与种荚测试样品如图 14 所示，试验过程中喂入物料为种荚与茎秆的混合物。



(a) 田间试验　　(b) 取样

图 14　苜蓿种子田间试验

Fig. 14　Field experiment of alfalfa seeds

在种子堆内分点，按照国标采用四分法取样，每次样品不少于 50 g，计算算术平均值。计算式为

$$J = \frac{W_j}{W_y} \times 100\% \tag{4}$$

式中　J——种荚与茎秆的分离率，%

W_j——净种荚质量，g

W_y——样品质量，g

图 15 为不同转速下种荚与茎秆的分离率实测值与仿真值对比，可以看出分离率的实测与仿真结果变化趋势基本一致，两者的最大相对误差出现在滚筒转速为 450 r/min 时，误差为 6.76%。这表明所构建的苜蓿种荚离散元模型具有较好的准确性，可为后续研究苜蓿种荚在清选装置内部的分离清选机理和运动特性规律提供准确有效的离散元模型支撑。

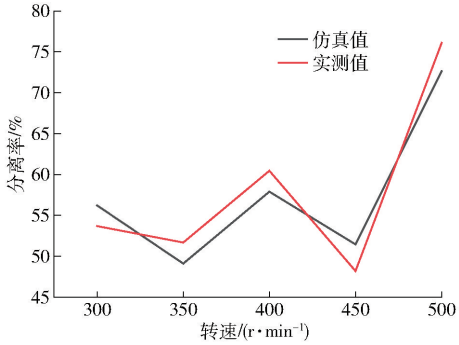


图 15　仿真与试验分离率对比

Fig. 15　Comparison of separation rates between simulation and test

4　结论

(1)以苜蓿种荚为研究对象，完成了苜蓿种荚几何参数测定和三维模型构建，通过试验测定了种荚间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.464、0.709、0.634，建立了苜蓿种荚离散元模型。

(2)开展了苜蓿种荚的堆积角试验，测得种荚堆积角为 33.19°。完成了苜蓿种荚堆积角离散元仿真试验，以堆积角实际值和 EDEM 仿真值的相对误差为试验指标，进行正交组合试验，确定接触参数最佳组合，堆积角仿真测试结果与实际试验的最大相对误差为 1.2%。

(3)开展种荚与茎秆分离清选离散元仿真分析和苜蓿种子田间采收试验，结果表明，种荚与茎秆分离率的仿真与试验结果最大相对误差为 6.76%，且试验总体变化趋势一致，验证了种荚离散元模型的准确性和可靠性。

参　考　文　献

[1]　陶莎，王玉庭，张峭. 国内苜蓿草供需现状及中美贸易摩擦带来的影响与对策[J]. 畜牧与饲料科学，2019，40(10)：46 - 50.
TAO Sha，WANG Yuying，ZHANG Qiao. Situation of domestic alfalfa market and the impact from sino-us trade frictions and its countermeasures[J]. Animal Husbandry and Feed Science，2019，40(10)：46 - 50. (in Chinese)

[2]　王德成，贺长彬，武红剑，等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：1 - 25.
WANG Decheng，HE Changbin，WU Hongjian，et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(8)：1 - 25. (in Chinese)

[3]　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)

[4]　NGUYEN T X，LE L M，NGUYEN T C，et al. Characterization of soybeans and calibration of their DEM input parameters[J]. Particulate Science and Technology，2020，39(5)：530 - 548.

[5]　COETZEE C J，ELS D X J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2009，65(2)：198 - 212.

[6] 陈涛,衣淑娟,李衣菲,等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(5):91 - 100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91 - 100. (in Chinese)
[7] 王林,张克平,杨君乾. 基于离散元法苜蓿压扁调制过程仿真分析与试验[J]. 东北农业大学学报,2023,54(4):86 - 96.
WANG Lin, ZHANG Keping, YANG Junqian. Simulation analysis and experiment of alfalfa flattening modulation process based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(4): 86 - 96. (in Chinese)
[8] 刘敏,侯占峰,马学杰,等. 基于离散元的紫花苜蓿种子仿真参数标定与试验[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):168 - 175.
[9] 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 Wengpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA - Ⅱ[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 136 - 144. (in Chinese)
[10] 潘烤鑫,张庆,尤泳,等. 小粒径苜蓿种子机械梳脱增流式收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(2):342 - 356.
PAN Kaoxin, ZHANG Qing, YOU Yong, et al. Design and experiment of flow-enhanced mechanical combining harvester for small-seeded alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 342 - 356. (in Chinese)
[11] CHEN K, YIN X, MA W, et al. Contact parameter calibration for discrete element potato minituber seed simulation[J]. Agriculture, 2024, 14(12): 2298.
[12] 涂鸣,曹涛,万志华,等. 菱角离散元粘结参数标定与剪切试验[J]. 华中农业大学学报,2023,42(4):270 - 278.
TU Ming, CAO Tao, WAN Zhihua, et al. Calibration and shear experiments of discrete element bonding parameters for water caltrop[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(4): 270 - 278. (in Chinese)
[13] XIE K, ZHANG Z, WANG F, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of *Panax notoginseng* root[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(4): 13 - 23.
[14] 虎小雅,高垚垚,王昱潭,等. 基于 EDEMpy 的枸杞离散元仿真参数标定与试验[J]. 农机化研究,2024,46(9):30 - 38.
HU Xiaoya, GAO Yaoyao, WANG Yutan, et al. Discrete element simulation parameters calibration and experimentation of *Lycium barbarum* based on EDEMpy[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(9): 30 - 38. (in Chinese)
[15] 王小勇,余志,张德,等. 炒青绿茶离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报,2024,55(8):418 - 427.
WANG Xiaoyong, YU Zhi, ZHANG De, et al. Calibration of simulation parameters for roasted green tea based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 418 - 427. (in Chinese)
[16] 陈文星. 苜蓿种子全喂入联合收获脱出物清选试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
CHEN Wenxing. Experimental study on the separation of octcrops from alfalfa seed feeding combined harvester[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[17] 陈永,高晓勋,金鑫,等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(12):58 - 69.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and anslysis of seeding parameters of cyperus esculentus seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 58 - 69. (in Chinese)
[18] 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 - 135,142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 - 135, 142. (in Chinese)
[19] DING Xinting, WANG Binbin, HE Zhi, et al. Fast and precise DEM parameter calibration for Cucurbita ficifolia seeds[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 258 - 276.
[20] 王万章,刘婉茹,袁玲合,等. 基于 EDEM 的收获期小麦植株离散元参数标定[J]. 河南农业大学学报,2021,55(1):64 - 72.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Calibration of discrete element parameters of wheat plants at harvest period based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(1): 64 - 72. (in Chinese)
[21] 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. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123 - 132. (in Chinese)
[22] 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)
[23] QIAO Y, HUANG S, YANG C, et al. Calibration and testing of discrete element simulation parameters for ultrasonic Vibration-Cutter-Soil interaction model[J]. Agriculture, 2025, 15(1): 20.
[24] WANG Xuefeng, WU Wenbin, JIA Huapo. Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11: 7751 - 7764.
[25] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 93 - 99. (in Chinese)