

饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定

廖宜涛^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 周 宇¹ 王在腾¹ 蒋亚军¹ 梁 方^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对饲料油菜机械化收获中的切碎、抛送等关键环节离散元仿真缺乏准确模型的问题,以抽薹期饲料油菜茎秆为研究对象,利用 EDEM 仿真软件开展饲料油菜茎秆破碎离散元仿真模型参数标定研究。试验测定了饲料油菜本征参数,应用 Hertz - Mindlin 基本模型进行饲料油菜茎秆颗粒堆积仿真试验,通过二水平因子试验、最陡爬坡试验和响应面曲面试验,确定了饲料油菜茎秆颗粒碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数等基本接触参数。在此基础上,应用 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型进行饲料油菜茎秆弯曲破坏仿真试验,通过响应面分析确定了饲料油菜茎秆颗粒法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力与临界切向应力等饲料油菜茎秆破碎离散元仿真模型的主要参数。以确定的参数进行堆积角仿真试验,结果表明,仿真结果与实测值相对误差为 2.27%;不同直径油菜茎秆破碎仿真试验表明,仿真结果与实测值相对误差不大于 4.21%,说明标定方法正确可行,标定参数准确可靠。

关键词: 饲料油菜; 收获; 堆积角; 茎秆切碎; 离散元参数标定

中图分类号: S817.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0073-10

OSID:



Parameters Calibration of Discrete Element Model of Fodder Rape Crop Harvest in Bolting Stage

LIAO Yitao^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} ZHOU Yu¹ WANG Zaiteng¹ JIANG Yajun¹ LIANG Fang^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Existing development for chopping and throwing components in harvester of fodder rape crop, which employs discrete element simulation, has persistent challenges that use the accurate parameters to construct the right model, highlighting a need for calibration of model parameters. Taking the rape crop stalks in the bolting stage as research object, the parameters calibration of discrete element simulation model was carried out by using the EDEM simulation software. In the first step, the diameter, density, Poisson's ratio and other mechanical and physical properties of the rape crop stalk were determined. Next, a cylindrical lifting physical test of the rape crop stalk particles was implemented. Simultaneously, a series of virtual simulation experiments on the particles pile-up by using the Hertz - Mindlin basic model was carried out in EDEM. The arrangement of the experiments was followed the regular two-level factorial design, the steepest ascent design and the response surface methodology, and the basic contact parameters of the stalk particle model, such as collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient, were determined. Subsequently, a three-point bending failure test of the rape crop stalk was implemented and a series of virtual simulation experiments on bending stalk using the Hertz - Mindlin with bonding contact model were carried out in EDEM. The response surface methodology was applied to determine the bonding parameters such as normal stiffness, tangential stiffness, normal stress and tangential stress of feed rape stalk particle model. Finally, simulation experiments were carried out using the obtained parameters, including the stalk particles accumulation test and the bending stalk test. Compared with the physical test results, the error between the simulation and the physical test value

收稿日期: 2020-01-21 修回日期: 2020-03-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662018JC005)、湖北省现代农业产业技术体系(高效冬春饲用作物)项目、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)和湖北省自然科学基金项目(2018CFB343)

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,副教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: liaoyitao@mail.hzau.edu.cn

of the angle of repose was 2.27%; the error between the simulation and the physical test value of the bending broken force was less than 4.21%. The results showed that the calibration method was correct and the calibration model was accurate. The research provided basic parameters for the discrete element simulation analysis of mechanized harvesting process of fodder rape crop in bolting stage, and provided a method for parameters calibration of discrete element simulation model for chopping stalk crops.

Key words: fodder rape crop; harvest; angle of repose; chopping stalk; parameters calibration of discrete element model

0 引言

油菜是我国区域分布最广、播种面积最大的油料作物,但受农村劳动力转移、生产过程机械化水平低、种植规模小、进口油料冲击等多重因素的影响,油菜纯油用经济效益不高^[1]。油菜饲料化利用是油菜全价值链开发利用的新路径,主要是在冬春季节刈割抽薹或花期的油菜,全株用于鲜喂或青贮饲喂牲畜,其中薹期油菜鲜嫩多汁,特别适合鲜喂。在冬春季节,饲喂肉牛每日增加 5 kg 的新鲜油菜,日增重率可提高 30% 以上^[2];饲喂哺乳母羊,每日添加 1 kg 的新鲜油菜,能有效促进产后体重恢复,明显提高羊乳中的脂肪和总固含量^[3];以 50% 比例油菜,混合稻草、菌渣等为主原料发酵制成的全混合日粮饲喂湖羊,与经青贮玉米为主原料的全日混粮相比,湖羊生长速度和屠宰性状没有显著差异^[4]。饲料油菜产量高、营养丰富、成本低,利用水稻、玉米、大豆等作物收获后的土地空闲期种植,可有效缓解牲畜在冬春季节的青饲料缺乏问题,具有良好的经济、生态和社会效益,极具发展潜力^[5-6]。

饲料油菜生物量大,人工收获效率低、劳动强度大,机械化收获是促进饲料油菜快速发展的关键。前期研究表明,饲料油菜是含水率高、脆嫩易切断、易挤压破损的作物,使用现有饲草收获机械进行收获存在过度切碎成糊状、揉搓挤压营养流失、输送通道易堵塞等问题^[7]。研制新型饲料油菜收获机械需要对其切碎、抛送、集料、卸料等多个部件进行结构参数与工作参数的优化设计。近年来,离散元法及其仿真软件 EDEM 在农业机械领域得到了广泛应用^[8-13]。应用离散元法研究饲料油菜茎秆与收获机械的作用机理,可为机具设计与优化提供理论依据,提高研发效率。

饲料油菜的茎秆脆嫩,表面蜡质层、角质层和表皮组织薄,茎秆内外未出现髓腔和木质化,可以用同一属性颗粒近似构建油菜茎秆物料模型。切碎后的油菜茎秆是散粒体颗粒,在 EDEM 软件中可以采用 Hertz - Mindlin 基本模型;可以通过添加粘结参数 Hertz - Mindlin with bonding 模型,模拟物料破坏过程^[14-17]。离散元仿真模型参数包括材料泊松比、剪

切模量和密度等本征参数,碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数等基本接触参数,以及模型的法向与切向接触刚度、法向与切向应力等粘结参数,参数的准确性直接影响仿真结果的可靠性^[18-21]。

饲料油菜是一种新型青饲料作物,其物料特性与已有研究物料差异较大,相关研究较少,且缺乏类似物料参考。本文以薹期饲料油菜茎秆为研究对象,以 EDEM 仿真软件为平台,先采用 Hertz - Mindlin 基本模型,结合饲料油菜茎秆堆积角测试物理试验,通过因素显著性筛选和响应曲面试验,确定碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数等离散元仿真模型基本接触参数;再采用 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型,结合饲料油菜茎秆弯曲破坏试验,通过响应曲面试验确定法向与切向接触刚度、法向与切向应力等粘结参数。以期为薹期饲料油菜机械化收获过程的离散元仿真分析提供基本参数,并为茎秆类作物切碎过程离散元仿真研究提供模型参数标定方法。

1 材料与方法

1.1 参数测定

1.1.1 饲料油菜本征参数

试验选用华中农业大学现代农业试验基地种植的“华油杂 62”优质双低油菜,该品种用于饲用,具有产量高、营养指数高的特点^[22-23]。种植时采用 2BFQ - 6 型油菜精量联合直播机播种,播种量 5.25 kg/hm²,同步施复合肥 675 kg/hm²;平均生长密度 46.5 株/m²。由于油菜茎秆底部粗壮、顶部细弱,测量统计其茎秆平均直径为 15.18 mm;通过体积计算和质量测定计算薹期茎秆密度为 1 049 kg/m³。

选取油菜茎秆植株中间段直径约 15 mm 的茎秆,制作长度为 20 mm 的圆柱颗粒,利用 TMS-Pro 型质构仪(FTC 公司,美国)进行平板单轴压缩试验,设置压缩速度为 5 mm/min,加载位移为 4 mm,试验重复 10 次;通过单轴压缩试验前后高度和直径的变化,计算得到盛花期饲料油菜茎秆弹性模量、剪切模量和泊松比分别为 16.61 MPa、5.89 MPa 和 0.41,变异系数分别为 9.65%、9.21% 和 7.77%。

1.1.2 茎秆堆积角

茎秆堆积角通过圆筒提升法试验^[24]。获得根据饲料油菜鲜喂及青贮的切碎长度要求,将抽薹期饲料油菜的茎秆预制为长度 30、40、50、60 mm 共 4 种颗粒样品,按等质量比例混合均匀;试验时,将钢质圆筒(内径 300 mm、高 150 mm)固定在万能材料试验机上,使底面与试验台接触,向钢质圆筒内填充饲料油菜颗粒样品直至填满,将钢质圆筒以 0.05 m/s 的速度向上提升,使样品形成一个颗粒堆,如图 1 所示。试验重复 5 次,测量颗粒堆堆积角,统计平均值 θ_0 为 33.10°,变异系数为 1.27%。



图 1 饲料油菜茎秆颗粒堆积试验

Fig. 1 Angle of repose for fodder rape stalk particles

1.1.3 茎秆破碎物理参数

为获得反映粘结模型的法向与切向刚度、法向与切向应力准确参考值,利用 TMS-Pro 质构仪(FTC 公司,美国)以有支撑切割方式慢速对茎秆施加载荷,记录加载过程弯曲破坏最大载荷作为茎秆破坏力参考值。对薹期饲料油菜茎秆进行预制,获得长度 60 mm、平均直径 15 mm 的饲料油菜茎秆进行试验,固定支撑两点间距为 40 mm,以 0.003 m/s 速度进行加载,如图 2 所示。试验重复 5 次,统计最大破坏力平均值为 49.94 N,变异系数为 4.41%。

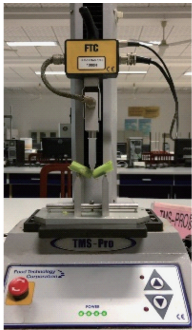


图 2 饲料油菜茎秆破坏试验

Fig. 2 Bending broken test of fodder rape stalk

1.2 仿真模型

1.2.1 茎秆颗粒堆积角仿真模型

在 EDEM 软件中,应用 Hertz - Mindlin 模型进行饲料油菜茎秆堆积仿真试验。该模型在计算饲料油菜茎秆颗粒与颗粒之间的运动与受力时,实质上是 将饲料油菜茎秆颗粒之间的运动与受力过程进行分解,分别为饲料油菜茎秆颗粒间的法向运动、饲料油菜茎秆颗粒间的切向运动和饲料油菜茎秆颗粒间

的滚动运动。饲料油菜颗粒近似圆柱体,为匹配实际圆筒提升试验中饲料油菜茎秆堆积状态,采用球颗粒组合的方式^[25-26],建立如图 3 所示不同长度饲料油菜茎秆模型,为简化模型,茎秆颗粒直径取 15 mm。结合离散元仿真农业物料和藤茎类物料离散元仿真参数^[27-28],确定本研究中各仿真参数的变化范围如表 1 所示。

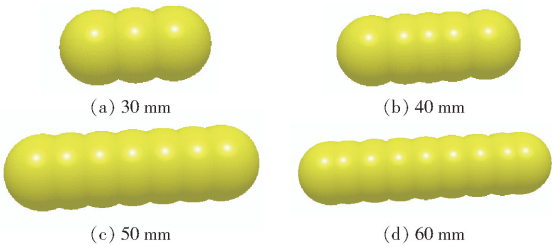


图 3 饲料油菜茎秆颗粒几何模型

Fig. 3 Particle model of fodder rape stalk

表 1 茎秆颗粒堆积角仿真模型参数

Tab. 1 Parameters of angle of repose simulation model for fodder rape stalk particles

参数	数值
饲料油菜泊松比 ν_1	0.41 ^a
钢板泊松比 ν_2	0.30 ^b
饲料油菜剪切模量 G_1/Pa	5.89×10^{6a}
钢板剪切模量 G_2/Pa	7.94×10^{10b}
饲料油菜密度 $\rho_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 049 ^a
钢板密度 $\rho_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850 ^b
饲料油菜茎秆间碰撞恢复系数 x_1	0.3 ~ 0.7 ^c
饲料油菜茎秆间静摩擦因数 x_2	0.5 ~ 0.9 ^c
饲料油菜茎秆间滚动摩擦因数 x_3	0.05 ~ 0.15 ^c
饲料油菜茎秆-钢碰撞恢复系数 x_4	0.3 ~ 0.7 ^c
饲料油菜茎秆-钢静摩擦因数 x_5	0.5 ~ 0.9 ^c
饲料油菜茎秆-钢滚动摩擦因数 x_6	0.05 ~ 0.15 ^c

注:a 表示该项为物理试验测定,b 表示该项为查阅文献获得,c 表示该项为试验变量,其范围为该变量取值的上下限。下同。

在 EDEM 软件中,建立与圆筒一致的虚拟圆柱体作为颗粒工厂(内径 300 mm、高 150 mm),颗粒工厂采用动态生成,生成速度为 0.4 kg/s,生成时间为 4 s,饲料油菜茎秆颗粒总量为 1.6 kg。为了保证饲料油菜茎秆颗粒快速稳定,设定颗粒初始下落速度为 1 m/s,颗粒生成完成且稳定后,以 0.05 m/s 的速度向上提升圆筒,仿真颗粒从圆筒底部流出,最终形成一个稳定的颗粒堆,模型如图 4 所示。

1.2.2 茎秆破碎仿真模型

饲料油菜在收获中涉及到切断过程,采用 Hertz - Mindlin 模型建立颗粒模型是一个整体,进行断裂过程数值计算无效,无法用于饲料油菜切碎过程模拟仿真。在 Hertz - Mindlin 模型基础上,加入了颗粒间粘结作用,即采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型,形成具有一定机械强度的粘连颗粒体模型。以该

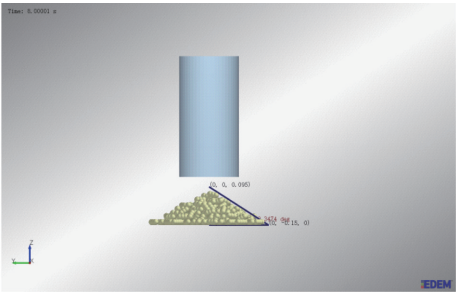


图4 茎秆颗粒堆积角仿真模型

Fig.4 Simulation model of angle of repose for fodder rape stalk particles

颗粒体模拟生成秸秆,当颗粒间承受的应力达到设置的极限应力时,粘结就被破坏,破坏后的粒子间不再存在粘结力,可用于物料的破碎过程仿真研究。

建模过程如图5所示。先用小颗粒粘结法生成茎秆模型,替代球形颗粒组合法建立的茎秆模型,具体流程是在 EDEM 中建立直径 2 mm 的小颗粒模型和直径为 15 mm、长度为 60 mm、关于原点中心对称的圆柱体模型,使用小颗粒对圆柱体进行填充^[29];再通过三维软件 Pro/E 建立刀具模型,导入 EDEM 中;最后在 EDEM 中以刀具为中心建立两支撑板,支撑板之间间距为 40 mm,设定刀具运动速度为 0.003 m/s,方向垂直向下,建立茎秆弯曲破坏仿真模型,设置仿真计算固定时间步长为 4×10^{-7} s。仿真模型基本接触参数采用已确定的 Hertz - Mindlin 模型参数,粘结参数参考藤茎类物料仿真参数^[25],取值范围如表 2 所示。

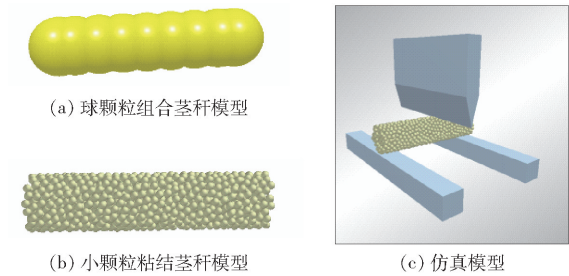


图5 饲料油菜茎秆弯曲破坏仿真模型

Fig.5 Bending broken models of fodder rape stalk

表2 茎秆弯曲破坏仿真模型粘结参数
Tab.2 Bonding parameters of bending broken simulation model for fodder rape stalk particle

参数	数值
法向接触刚度 $x_7/(N \cdot m^{-1})$	$1 \times 10^9 \sim 7 \times 10^9$ ^c
切向接触刚度 $x_8/(N \cdot m^{-1})$	$1 \times 10^8 \sim 9 \times 10^8$ ^c
临界法向应力 x_9/MPa	10 ~ 70 ^c
临界切向应力 x_{10}/MPa	1 ~ 9 ^c

1.3 参数标定试验设计

1.3.1 基本接触参数标定

(1)二水平因子试验设计:应用 Design-Expert

10.0.4 软件进行二水平因子试验设计,筛选显著影响堆积角的参数。根据表 1 给定的参数建立茎秆颗粒模型开展堆积角仿真试验,其中 $x_1 \sim x_6$ 分别选择上、下限两个数值作为高、低两个水平;设计 16 次试验。

(2)最陡爬坡试验:针对筛选出的主要参数,进行最陡爬坡试验,以确定最优值临近区域。其中非显著性基本接触参数取二水平因子试验中的中间水平,显著性参数按设定步长逐步增加,建立茎秆颗粒模型开展堆积角仿真分析,记录仿真试验得到的堆积角与物理试验相对误差变化,根据相对误差的变化趋势确定最优值临近区域。

(3)基本接触参数响应曲面试验:基于二水平因子试验和最陡爬坡试验结果,根据 Box - Behnken Design(BBD)设计原理,取显著性参数最优值临近区域的高水平值、中心点和低水平值为响应曲面试验设计的高、中、低 3 个水平,开展堆积角仿真试验。仿真模型中的非显著性参数取值同最陡爬坡试验。

1.3.2 粘结参数响应曲面试验

根据 Hertz - Mindlin with bonding 模型计算原理可知,颗粒间粘结键的断裂与法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力、临界切向应力等 4 个粘结参数相关。为保证参数标定过程中参数范围的可靠性,避免参数取值超过范围造成不良影响,根据中心组合设计(Central composite design,CCD)原理,结合表 2 中参数上下限数值设计响应曲面试验;以标定的基本接触参数和设定的粘结参数建立模型,开展饲料油菜茎秆破碎仿真试验与分析,粘结参数编码如表 3 所示。

表3 粘结模型参数编码
Tab.3 Coding of bonding parameters

编码	参数			
	$x_7/(N \cdot m^{-1})$	$x_8/(N \cdot m^{-1})$	x_9/MPa	x_{10}/MPa
-1.546	1.00×10^9	1.00×10^8	10.0	1.00
-1	2.06×10^9	2.41×10^8	20.6	2.41
0	4.00×10^9	5.00×10^8	40.0	5.00
1	5.94×10^9	7.59×10^8	59.4	7.59
1.546	7.00×10^9	9.00×10^8	70.0	9.00

2 结果与分析

2.1 基本接触参数标定

2.1.1 堆积角影响参数筛选

对影响茎秆颗粒堆积角的基本接触参数:饲料油菜茎秆间碰撞恢复系数 x_1 、饲料油菜茎秆间静摩擦因数 x_2 、饲料油菜茎秆间滚动摩擦因数 x_3 、饲料油菜茎秆-钢碰撞恢复系数 x_4 、饲料油菜茎秆-钢静

摩擦因数 x_5 、饲料油菜茎秆-钢滚动摩擦因数 x_6 作为试验因素,进行二水平部分因子试验设计,试验设计与仿真结果如表 4 所示,方差分析得到各参数的影响效果如表 5 所示。

表 4 二水平因子试验设计与结果

Tab. 4 Regular two-level factorial design and results							
序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	堆积角 $\theta/(^{\circ})$
1	0.7	0.5	0.05	0.7	0.9	0.15	35.25
2	0.3	0.9	0.15	0.3	0.5	0.05	40.60
3	0.7	0.5	0.15	0.7	0.5	0.05	33.46
4	0.3	0.9	0.05	0.3	0.9	0.15	44.41
5	0.3	0.9	0.15	0.7	0.5	0.15	38.46
6	0.3	0.5	0.15	0.7	0.9	0.05	45.53
7	0.7	0.5	0.05	0.3	0.9	0.05	33.33
8	0.3	0.5	0.05	0.7	0.5	0.15	33.29
9	0.7	0.9	0.05	0.7	0.5	0.05	33.48
10	0.7	0.9	0.15	0.3	0.9	0.05	47.32
11	0.3	0.9	0.05	0.7	0.9	0.05	44.63
12	0.7	0.5	0.15	0.3	0.5	0.15	43.06
13	0.7	0.9	0.15	0.7	0.9	0.15	44.99
14	0.3	0.5	0.05	0.3	0.5	0.05	37.67
15	0.7	0.9	0.05	0.3	0.5	0.15	35.50
16	0.3	0.5	0.15	0.3	0.9	0.15	39.20

表 5 参数显著性分析

Tab. 5 Analysis of parameter significance				
参数	效应	均方和	影响率	显著性排序
x_1	-2.18	18.92	4.98	4
x_2	3.57	51.12	13.46	3
x_3	4.38	76.83	20.23	2
x_4	-1.50	9.00	2.37	5
x_5	4.89	95.75	25.22	1
x_6	-0.23	0.22	0.057	6

由表 5 可知,根据影响率进行显著性排序,在饲料油菜茎秆堆积试验中, x_2 、 x_3 和 x_5 对堆积角有显著性影响,其余参数影响极小。因此在后续最陡爬坡试验和基本接触参数响应曲面试验中只考虑这 3 个影响显著的参数,其余非显著性因素取中间水平,即 x_1 取 0.5、 x_4 取 0.5、 x_6 取 0.1。

2.1.2 最陡爬坡试验

由于 x_2 、 x_3 和 x_5 对堆积角的效应均是正值,即堆积角随参数增加而增加,故设计参数值递增,观察并记录各试验中堆积角和相对误差,试验设计与结果如表 6 所示。

在 3 个试验因素数值逐渐增大的过程中,堆积角随之增大,与实际物理试验的堆积角间的相对误差呈先减后增的趋势,3 号试验中相对误差最小,故以 3 号试验中的各参数数值作为后期试验的中心点,2 号试验和 4 号试验分别为低水平和高水平进行后续 BBD 响应面试验设计。

表 6 最陡爬坡试验设计与结果

Tab. 6 Experimental results of the steepest ascent test					
序号	x_2	x_3	x_5	堆积角 $\theta/(^{\circ})$	相对误差 $\delta/\%$
1	0.34	0.01	0.24	21.25	35.80
2	0.40	0.02	0.30	28.81	12.96
3	0.46	0.04	0.36	31.52	4.77
4	0.52	0.06	0.42	38.61	16.65
5	0.58	0.08	0.48	43.18	30.45

2.1.3 响应曲面试验结果与分析

根据前面筛选试验得出的结果,基本接触参数取 x_2 、 x_3 和 x_5 ,利用 Design-Expert 10.0.4 进行三因素三水平响应曲面试验设计,中心水平设置 5 组重复,总共进行 17 组饲料油菜茎秆堆积角仿真试验。试验设计与仿真结果如表 7 所示。

表 7 接触参数响应曲面试验设计与结果

Tab. 7 Response surface test design and results of basic contact parameters					
序号	x_2	x_3	x_5	堆积角 $\theta/(^{\circ})$	相对误差 $\delta_{\theta}/\%$
1	0.52	0.04	0.30	35.24	6.47
2	0.40	0.04	0.30	33.62	1.57
3	0.46	0.04	0.36	33.69	1.78
4	0.46	0.04	0.36	33.79	2.08
5	0.40	0.02	0.36	29.97	9.46
6	0.46	0.04	0.36	33.33	0.70
7	0.52	0.04	0.42	35.56	7.43
8	0.46	0.06	0.42	35.41	6.98
9	0.40	0.06	0.36	34.03	2.81
10	0.46	0.02	0.42	31.51	4.80
11	0.46	0.02	0.30	31.00	6.34
12	0.46	0.06	0.30	33.97	2.63
13	0.40	0.04	0.42	34.58	4.47
14	0.52	0.06	0.36	36.06	8.94
15	0.52	0.02	0.36	30.41	8.13
16	0.46	0.04	0.36	33.27	0.51
17	0.46	0.04	0.36	33.30	0.60

应用 Design-Expert 10.0.4 软件对响应曲面试验结果进行拟合分析,不同数学模型拟合效果对比表明,使用二次全模型方程拟合效果较好,模型决定系数 R^2 为 0.974 7,模型显著 ($P=0.001\ 0$) 且失拟项不显著,方差分析结果如表 8 所示,方程为

$$\theta = 74.63 - 104.12x_2 + 145.1x_3 - 143.48x_5 + 331.25x_2x_3 - 44.44x_2x_5 + 193.75x_3x_5 + 127.64x_2^2 - 3\ 295x_3^2 + 226.25x_5^2 \quad (1)$$

由表 8 可知,二次全模型 P 小于 0.01,且失拟项 P 大于 0.05,证明模型可靠,其中 x_2 、 x_3 和 x_5 以及 x_3 和 x_5 的平方项对堆积角的影响都显著,但各个因素之间的交互项的 P 值都比 0.05 大得多,为了保证响应曲面的生成和堆积角 θ 的准确性,保留所有因

素建立二次多项式回归方程。

表 8 堆积角响应曲面二次全模型方差分析
Tab.8 Analysis of variance of angle of repose for response surface quadratic model

方差来源	自由度	均方	F	P
模型	9	5. 59	29. 95	<0. 000 1
x_2	1	3. 21	17. 23	0. 004 3
x_3	1	34. 36	184. 24	<0. 000 1
x_5	1	1. 30	6. 99	0. 033 2
x_2x_3	1	0. 63	3. 39	0. 108 2
x_2x_5	1	0. 10	0. 55	0. 482 8
x_3x_5	1	0. 22	1. 16	0. 317 3
x_2^2	1	0. 89	4. 77	0. 065 3
x_3^2	1	7. 31	39. 22	0. 000 4
x_5^2	1	2. 79	14. 98	0. 006 1
残差	7	0. 19		
失拟项	3	0. 36	5. 95	0. 058 9
纯误差	4	0. 06		
总和	16			

通过响应曲面分析所生成堆积角模型,在已知 x_2 、 x_3 和 x_5 的情况下可以确定饲料油菜茎秆颗粒堆积角,但在已知堆积角的情况下, x_2 、 x_3 和 x_5 的具体数值是堆积角的等值面曲线,因此通过 Design-Expert 10. 0. 4 软件以实际试验堆积角与仿真试验堆积角之间相对误差 δ_θ 为响应值开展分析。结果表明二次全模型方程拟合较好,决定系数 R^2 为 0. 913 7,方程为

$$\delta_\theta = 229. 51 - 753. 37x_2 - 1\ 843. 23x_3 - 143. 81x_5 + 1\ 554. 63x_2x_3 - 134. 27x_2x_5 + 1\ 227. 34x_3x_5 + 823. 49x_2^2 - 8\ 002. 27x_3^2 + 236. 66x_5^2 \quad (2)$$

方差分析表明二次多项式回归模型 P 为 0. 000 4,且失拟项 P 大于 0. 05,模型可靠,其中除了 x_2 和 x_5 的交互项 P 远大于 0. 05 之外,其余因素都具有较好的显著性。

通过 Design-Expert 10. 0. 4 软件约束求解工具对式(2)求误差最小极值点,得 x_2 、 x_3 和 x_5 分别为 0. 43、0. 05 和 0. 29。将求解出的参数代入式(1),可得出堆积角拟合值 $\theta = 34. 28^\circ$,此时计算值与物理实现测定值 θ_0 的相对误差为 3. 57%,表明建立的饲料油菜茎秆颗粒堆积角计算回归模型较好。

为验证求解的参数的可行性与准确性,利用计算所得的参数建立堆积角仿真模型开展仿真试验,5 次重复试验测得饲料油菜茎秆平均堆积角为 $\theta_s = 32. 35^\circ$,与 θ_0 之间的相对误差 $\delta_\theta = 2. 27\%$,模拟结果与实际试验结果接近,表明确定的饲料油菜颗粒基本接触参数可行。

2.2 粘结参数标定

利用确定的基本接触模型参数值和 CCD 响应

面试验设计确定的法向接触刚度 x_7 、切向接触刚度 x_8 、临界法向应力 x_9 、临界切向应力 x_{10} 等 4 个粘结参数值,开展饲料油菜茎秆弯曲破坏仿真试验,中心水平设置 3 组重复,总共进行 27 组仿真试验。试验设计与仿真结果如表 9 所示。

表 9 粘结参数响应曲面试验设计与结果
Tab.9 Response surface test design and results of bonding parameters

序号	$x_7/(N \cdot m^{-1})$	$x_8/(N \cdot m^{-1})$	x_9/MPa	x_{10}/MPa	破坏力 f/N
1	$2. 06 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	20. 6	7. 59	27. 87
2	$5. 94 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	20. 6	7. 59	55. 33
3	$2. 06 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	59. 4	2. 41	27. 78
4	$5. 94 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	20. 6	2. 41	77. 91
5	$2. 06 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	59. 4	7. 59	27. 88
6	$5. 94 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	59. 4	2. 41	77. 65
7	$4. 00 \times 10^9$	$1. 00 \times 10^8$	40. 0	5. 00	27. 75
8	$5. 94 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	59. 4	7. 59	54. 04
9	$1. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	40. 0	5. 00	14. 36
10	$4. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	70. 0	5. 00	53. 14
11	$2. 06 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	20. 6	7. 59	27. 82
12	$5. 94 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	59. 4	2. 41	52. 67
13	$2. 06 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	20. 6	2. 41	27. 35
14	$2. 06 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	59. 4	7. 59	27. 80
15	$2. 06 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	20. 6	2. 41	27. 84
16	$4. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	40. 0	5. 00	51. 21
17	$4. 00 \times 10^9$	$9. 00 \times 10^8$	40. 0	5. 00	47. 23
18	$4. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	40. 0	5. 00	55. 03
19	$4. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	40. 0	1. 00	53. 30
20	$5. 94 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	59. 4	7. 59	77. 56
21	$5. 94 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	20. 6	2. 41	53. 48
22	$4. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	40. 0	5. 00	53. 23
23	$4. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	40. 0	9. 00	53. 05
24	$5. 94 \times 10^9$	$7. 59 \times 10^8$	20. 6	7. 59	77. 49
25	$2. 06 \times 10^9$	$2. 41 \times 10^8$	59. 4	2. 41	27. 67
26	$7. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	40. 0	5. 00	72. 02
27	$4. 00 \times 10^9$	$5. 00 \times 10^8$	10. 0	5. 00	53. 19

对响应曲面试验结果进行拟合分析,结果表明使用二次全模型方程拟合时,决定系数 R^2 为 0. 995 4。方差分析(表 10)可知,二次全模型 P 小于 0. 01,且失拟项 P 大于 0. 05;其中法向接触刚度 x_7 、切向接触刚度 x_8 及其二者平方项、交互项,临界法向应力 x_9 和临界切向应力 x_{10} 的平方项对弯曲破坏力有显著影响。

方程影响因子较多,在保证模型显著、失拟项不显著的情况下,剔除不显著项,对二阶回归模型进行优化调整,得到新的回归方程为

$$f = 4. 16 - 9. 79 \times 10^{-9}x_7 + 5. 36 \times 10^{-8}x_8 - 0. 301x_9 - 2. 03x_{10} + 1. 17 \times 10^{-17}x_7x_8 - 7. 4 \times 10^{-19}x_7^2 - 7. 7 \times 10^{-17}x_8^2 + 0. 003\ 7x_9^2 + 0. 21x_{10}^2 \quad (3)$$

表 10 弯曲破坏力响应曲面二次全模型方差分析

Tab. 10 Analysis of variance of bending broken force for response surface quadratic model

方差来源	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	14	657. 33	185. 06	<0. 000 1
<i>x</i> ₇	1	7442. 42	2 095. 25	<0. 000 1
<i>x</i> ₈	1	763. 22	214. 87	<0. 000 1
<i>x</i> ₉	1	0. 22	0. 061	0. 809 5
<i>x</i> ₁₀	1	0. 45	0. 13	0. 728 4
<i>x</i> ₇ <i>x</i> ₈	1	556. 49	156. 67	<0. 000 1
<i>x</i> ₇ <i>x</i> ₉	1	0. 40	0. 11	0. 742 0
<i>x</i> ₇ <i>x</i> ₁₀	1	0. 25	0. 069	0. 797 3
<i>x</i> ₈ <i>x</i> ₉	1	0. 15	0. 043	0. 839 5
<i>x</i> ₈ <i>x</i> ₁₀	1	1. 10	0. 31	0. 587 7
<i>x</i> ₉ <i>x</i> ₁₀	1	0. 011	3. 104 × 10 ⁻³	0. 956 5
<i>x</i> ₇ ²	1	88. 42	24. 89	0. 000 3
<i>x</i> ₈ ²	1	305. 07	85. 89	<0. 000 1
<i>x</i> ₉ ²	1	22. 17	6. 24	0. 028 0
<i>x</i> ₁₀ ²	1	22. 30	6. 28	0. 027 6
残差	12	3. 55		
失拟项	10	3. 53	0. 97	0. 609 3
纯误差	2	3. 65		
总和	26			

以破坏力与实测破坏力之间的误差 Δ*f* 为响应值进行响应曲面分析,采用二次全模型方程进行拟合,方差分析结果如表 11。

表 11 弯曲破坏力误差响应面二次全模型方差分析

Tab. 11 Analysis of variance of error of bending broken for response surface quadratic model

方差来源	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	14	191. 81	4. 08	0. 009 7
<i>x</i> ₇	1	255. 86	5. 45	0. 037 8
<i>x</i> ₈	1	198. 62	4. 23	0. 062 2
<i>x</i> ₉	1	0. 33	7. 018 × 10 ⁻³	0. 934 6
<i>x</i> ₁₀	1	0. 12	2. 602 × 10 ⁻³	0. 960 2
<i>x</i> ₇ <i>x</i> ₈	1	573. 84	12. 22	0. 004 4
<i>x</i> ₇ <i>x</i> ₉	1	0. 26	5. 537 × 10 ⁻³	0. 941 9
<i>x</i> ₇ <i>x</i> ₁₀	1	0. 74	0. 016	0. 902 2
<i>x</i> ₈ <i>x</i> ₉	1	0. 32	6. 796 × 10 ⁻³	0. 935 7
<i>x</i> ₈ <i>x</i> ₁₀	1	0. 66	0. 014	0. 907 3
<i>x</i> ₉ <i>x</i> ₁₀	1	9. 000 × 10 ⁻⁴	1. 916 × 10 ⁻⁵	0. 996 6
<i>x</i> ₇ ²	1	1 431. 48	30. 48	0. 000 1
<i>x</i> ₈ ²	1	217. 51	4. 63	0. 052 5
<i>x</i> ₉ ²	1	2. 34	0. 050	0. 827 3
<i>x</i> ₁₀ ²	1	2. 38	0. 051	0. 825 7
残差	12	46. 97		
失拟项	10	55. 58	14. 21	0. 067 5
纯误差	2	3. 91		
总和	26			

各因素对破坏力相对误差 Δ*f* 的影响显著性与

对破坏力的影响显著性有较大差异,因素中临界法向应力 *x*₉、临界切向应力 *x*₁₀ 以及与这两项相关的交互项和平方项都不显著,因此临界法向应力 *x*₉ 和临界切向应力 *x*₁₀ 都取中心水平值,分别为 40 MPa 和 5 MPa。

剔除不显著项,优化调整后建立破坏力误差 Δ*f* 与各显著性因素之间的二次多项式回归方程为

$$\Delta f=92.09-3.155\times10^{-8}x_7-1.009\times10^{-7}x_8+1.19\times10^{-17}x_7x_8+2.97\times10^{-18}x_7^2+6.5\times10^{-17}x_8^2$$

(4)

对方程求最小值,得 *x*₇ = 4. 60 × 10⁹ N/m, *x*₈ = 3. 55 × 10⁸ N/m。将参数代入式 (4) 中得 Δ*f* = 1. 61 N,相对误差为 3. 22%;将参数代入式(3)中得 *f* = 50. 95 N,相对误差为 1. 98%;表明建立的饲料油菜茎秆颗粒破坏力计算回归方程可信。以计算所得的参数进行仿真试验,5 次重复平均破坏力为 50. 64 N,与实际试验破坏力之间的相对误差为 1. 38%,模拟结果与实际试验结果无明显差异,标定参数有效。

3 茎秆破碎仿真试验验证

为了验证标定接触参数和粘结参数的可行性与准确性,确定建立的茎秆破碎离散元模型对于抽薹期饲料油菜茎秆具有普遍适用性,以抽薹期饲料油菜茎秆平均直径 15 mm 为中心,分别建立直径为 13、14、16、17 mm 的饲料油菜茎秆,模型参数按确定的参数(表 12)进行设置,其他设置条件不变,建立离散元模型,与实际试验对比验证。

表 12 饲料油菜茎秆离散元仿真参数

Tab. 12 Parameters of fodder rape crop for discrete element simulation

参数	数值
饲料油菜泊松比	0. 41
钢板泊松比	0. 30
饲料油菜剪切模量/Pa	5. 89 × 10 ⁶
钢板剪切模量/Pa	7. 94 × 10 ¹⁰
饲料油菜密度/(kg·m ⁻³)	1 049
钢板密度/(kg·m ⁻³)	7 850
饲料油菜茎秆间碰撞恢复系数	0. 5
饲料油菜茎秆间静摩擦因数	0. 43
饲料油菜茎秆间滚动摩擦因数	0. 05
饲料油菜茎秆-钢碰撞恢复系数	0. 5
饲料油菜茎秆-钢静摩擦因数	0. 29
饲料油菜茎秆-钢滚动摩擦因数	0. 1
颗粒法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	4. 60 × 10 ⁹
切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	3. 55 × 10 ⁸
临界法向应力/MPa	40
临界切向应力/MPa	5

试验效果如图 6 所示,抽薹期不同直径饲料油菜茎秆破碎状态无明显差异,仿真试验与物理试验破坏情况一致,表明建立的模型可行。虚拟仿真与物理试验测定的饲料油菜茎秆破坏力如表 13 所示。

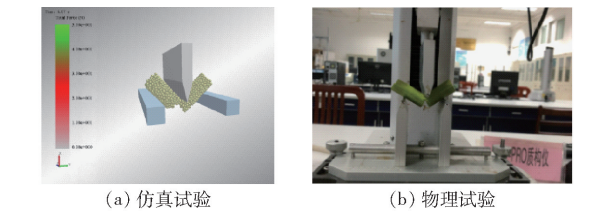


图 6 茎秆破坏仿真试验与实际试验对比
Fig. 6 Stalk broken simulation experiment and physical experiment

表 13 破坏力结果对比
Tab. 13 Comparison results of broken force

参数	饲料油菜茎秆直径/mm				
	13	14	15	16	17
破坏力仿真值/N	392. 60	45. 12	50. 64	54. 36	61. 28
破坏力试验值/N	383. 10	46. 58	49. 94	56. 54	63. 86
相对误差/%	2. 42	3. 24	1. 38	4. 01	4. 21

不同直径饲料油菜茎秆破坏力,仿真试验和实际试验结果相对误差不大于 4. 21%,且破坏力与茎秆直径具有良好的线性关系,表明参数标定方法正确,建立的破碎模型准确。

4 结论

- (1) 试验测得薹期饲料油菜茎秆平均直径为 15. 18 mm,油菜茎秆密度为 1 049 kg/m³,茎秆弹性模量、剪切模量和泊松比平均值分别为 16. 61 MPa、5. 89 MPa 和 0. 41;通过物理试验测得油菜茎秆颗粒的堆积角平均值为 33. 10°,茎秆弯曲最大破坏力平均值为 49. 94 N。
- (2) 饲料油菜茎秆间碰撞恢复系数、饲料油菜茎秆-钢碰撞恢复系数及饲料油菜茎秆-钢滚动摩擦因数对堆积角影响较小,其取值确定为 0. 5、0. 5 和 0. 1;饲料油菜茎秆间静摩擦因数、饲料油菜茎秆间

滚动摩擦因数及其平方项、饲料油菜茎秆-钢静摩擦因数及其平方项对堆积角的影响均显著。以实际试验堆积角与仿真试验堆积角之间相对误差为响应值进行分析,建立相对误差的二次回归模型,以相对误差最小为目标,优化求解得出饲料油菜茎秆间静摩擦因数为 0. 43,饲料油菜茎秆间滚动摩擦因数为 0. 05、饲料油菜茎秆-钢静摩擦因数为 0. 29,利用基本接触参数建立模型,进行堆积角仿真试验,仿真结果与实测值相对误差为 2. 27%。

(3) 通过颗粒替代建立饲料油菜茎秆破碎模型,根据 CCD 原理,建立了粘结参数与破坏力之间的二次回归模型,由方差分析可知,法向接触刚度、切向接触刚度及其二者平方项、交互项,临界法向应力和临界切向应力的平方项对破坏力有显著影响。以破坏力仿真值与实测值之间的误差为响应值进行分析,建立二次回归模型,优化求解得到法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力和临界切向应力分别为 4. 60 × 10⁹ N/m、3. 55 × 10⁸ N/m、40 MPa 和 5 MPa。利用粘结参数进行仿真试验,与实际破坏力之间的相对误差为 1. 38%。

(4) 以标定的参数建立不同直径饲料油菜茎秆弯曲破坏仿真模型,仿真试验与实际试验破坏情况一致,两者相对误差不大于 4. 21%,且破坏力与茎秆直径具有良好的线性关系,说明标定的参数准确、可靠,建立的破碎模型正确、可行。

本研究以物理试验为参考,通过堆积角试验和对茎秆缓慢施加载荷的弯曲破坏试验,确定了饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元模型参数,为建立茎秆类作物切碎过程离散元仿真模型提供了一种方法。受油菜茎秆生物体物料的复杂性影响,茎秆弯曲破坏试验的取样仅以抽薹期茎秆中间段、直径约为 15 mm 的物料为代表,标定参数具有一定的适用范围。后续将针对不同生长期和不同部位茎秆进行系统性研究,并结合饲料油菜收获仿真分析,对模型参数进行修正,对饲料油菜收获切碎、输送关键装置进行优化改进。

参 考 文 献

[1] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):613-617.
WANG Hanzhong. New-demand oriented oilseed rape industry development strategy[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 613-617. (in Chinese)

[2] 易四风,杨华,余陵峰,等. 新鲜饲料油菜对肉牛育肥效果的研究[J]. 中国饲料,2017(20):39-43.
YI Sifeng, YANG Hua, YU Lingfeng, et al. Study on fresh *Brassica napus* L. on fattening effects in beef cattle[J]. China Feed, 2017(20):39-43. (in Chinese)

[3] 李晓锋,杨前平,索效军,等. 饲用油菜对哺乳母羊体重及生化指标的影响[J]. 西南农业学报,2018,31(9):211-214.
LI Xiaofeng, YANG Qianping, SUO Xiaojun, et al. Effects of forage rape on body weight and biochemical indexes of lactating she-goat [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(9): 211-214. (in Chinese)

[4] 文健,刘桂琼,姜勋平,等. 饲用油菜生物量与营养成分测定及其发酵全混合日粮饲喂湖羊效果[J]. 华中农业大学学

- 报,2018,37(2):71-75.
- WEN Jian, LIU Guiqiong, JIANG Xunping, et al. Biomass nutrition of forage rape and effect of its fermented total mixed ration on growth, carcass and meat quality in Hu sheep[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2): 71-75. (in Chinese)
- [5] 张哲,殷艳,刘芳,等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):618-623.
- ZHANG Zhe, YIN Yan, LIU Fang, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 618-623. (in Chinese)
- [6] 汪波,宋丽君,王宗凯,等. 我国饲料油菜种植及应用技术研究进展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):695-701.
- WANG Bo, SONG Lijun, WANG Zongkai, et al. Production and feeding technology of fodder rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 695-701. (in Chinese)
- [7] 蒋亚军,廖宜涛,廖庆喜. 冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(2): 102-111.
- JIANG Yajun, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Design and experiment on cylinder-type chopping device of harvester for fodder rapeseed in winter and spring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 102-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190211&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.011. (in Chinese)
- [8] 赵宏波,何进,李洪文,等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):65-75.
- ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65-75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180508&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008. (in Chinese)
- [9] BARR J B, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M, et al. Development and field evaluation of a high-speed no-till seeding system[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104337.
- [10] 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/OL]. 农业机械学报,2014, 45(2):109-114.
- LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019. (in Chinese)
- [11] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101: 24-33.
- [12] LEBLICQ T, SMEETS B, RAMON H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 80-88.
- [13] BYUM J H, NAM J S, CHOE J S, et al. Analysis of the separating performance of a card cleaner for pepper harvester using EDEM software[J]. Journal of Faculty of Agriculture, Kyushu University, 2018, 63(2):347-354.
- [14] 童俊华,石虎峰,武传宇,等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019, 50(8):107-116.
- TONG Junhua, SHI Hufeng, WU Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190812&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.012. (in Chinese)
- [15] 张江涛,易廷军,张梅,等. 橡胶粘结颗粒材料粘弹性性能的试验研究与离散元模拟[J]. 固体力学学报,2017,38(5): 416-425.
- ZHANG Jiangtao, YI Tingjun, ZHANG Mei, et al. Experimental study and discrete element simulation on the viscoelastic properties of rubber-bonded particle material[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(5): 416-425. (in Chinese)
- [16] 李俊伟,佟金,胡斌,等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2019, 35(6):130-140.
- LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130-140. (in Chinese)
- [17] 丁启朔,任骏,BELAL Eisa Adam,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3): 38-48.
- DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005. (in Chinese)
- [18] 罗帅,袁巧霞,GOUDA Shaban,等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(4):343-350.
- LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343-350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180440&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.040. (in Chinese)

- [19] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2): 49–56.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49–56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190206&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)
- [20] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):140–147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):140–147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
- [21] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):78–85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171209&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)
- [22] 杨雪海,张巍,赵娜,等. 油菜华油杂 62 不同生长期氨基酸组成及营养价值评价[J]. 中国油料作物学报,2017,39(2): 197–203.
YANG Xuehai, ZHANG Wei, ZHAO Na, et al. Forage amino acid composition and nutrition of *Brassica napus* L. cv Huayouza 62 in different growth stages[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2017, 39(2): 197–203. (in Chinese)
- [23] 毕影东,刘明,周广生,等. 黑龙江省饲料油菜品种筛选与种植技术研究[J]. 中国油料作物学报,2019,41(6):835–841.
BI Yingdong, LIU Ming, ZHOU Guangsheng, et al. Selection and cultivation of forage rapeseed in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(6): 835–841. (in Chinese)
- [24] 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. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12):247–253. (in Chinese)
- [25] 石林榕,吴建民,孙伟,等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报,2014,30(8): 40–48.
SHI Linrong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 40–48. (in Chinese)
- [26] 李萍萍,吴硕,张西良,等. 番茄秸秆与发酵菌种立式螺旋混合设备参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):114–120.
LI Pingping, WU Shuo, ZHANG Xiliang, et al. Parameter optimization of vertical screw mixing for tomato straw and fermentation strains[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 114–120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161115&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.015. (in Chinese)
- [27] HORABIK J, MOLEND A M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206–225.
- [28] 郭茜,张西良,徐云峰,等. 基于 EDEM 的番茄秸秆切割性能仿真及试验研究[J]. 排灌机械工程学,2018, 36(10): 1017–1022.
GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. EDEM-based simulation and experiment on tomato cane straw cutting performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(10): 1017–1022. (in Chinese)
- [29] 张涛,刘飞,赵满全,等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2018,23(4):120–127.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Determination of corn stalk contact parameters and calibration of discrete element method simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120–127. (in Chinese)