

新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究

张佳喜¹ 张 彭² 张 虎³ 谭春林⁴ 万文瑜² 王毅超¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 黑龙江农业经济职业学院, 牡丹江 154005;

3. 新疆维吾尔自治区农牧业机械产品质量监督管理站, 乌鲁木齐 830052;

4. 新疆昌吉职业技术学院机电工程分院, 昌吉 831110)

摘要: 由于棉花秸秆在机械化收获和粉碎加工过程中缺乏准确的仿真模型参数, 从而造成在机具设计中仿真效果和实际作业存在较大的差异, 在一定程度上限制了棉花秸秆收获以及粉碎装置的设计研究。本文以新疆棉花秸秆作为试验材料, 开展仿真分析研究, 通过物理试验测定棉花秸秆的本征参数后, 利用 EDEM 软件进行试验仿真, 对棉花秸秆进行参数标定。采用堆积角试验和弯曲试验方法, 测量出棉花秸秆堆积角和最大破坏载荷分别为 28.62° 和 143.21 N 。应用 Hertz - Mindlin no slip 模型和 Hertz - Mindlin with bonding 模型进行棉花秸秆的堆积角仿真试验和弯曲仿真试验, 得到棉花秸秆之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数和棉花秸秆-钢之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.5 、 0.41 、 0.06 、 0.5 、 0.37 、 0.08 , 以及棉花秸秆法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力与临界切向应力分别为 $4.15 \times 10^{10}\text{ N/m}$ 、 $5.60 \times 10^{10}\text{ N/m}$ 、 40 MPa 、 50 MPa 。将以上结果进行粉碎试验验证, 棉花秸秆粉碎后依据长度和宽度不同, 分为粉末型物料、破碎型物料、未破碎型物料, 仿真试验质量和实际试验质量之间偏差为 6.84% 、 8.29% 、 7.37% , 证明了参数的可行性, 可用于棉花秸秆参数标定。

关键词: 棉花秸秆; 堆积角试验; 弯曲试验; 离散元; 参数标定

中图分类号: S216.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0076-09

OSID:



Discrete Element Simulation Parameters Calibration for Xinjiang Cotton Straw

ZHANG Jiayi¹ ZHANG Peng² ZHANG Hu³ TAN Chunlin⁴ WAN Wenyu² WANG Yichao¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Heilongjiang Agricultural Economics Vocational College, Mudanjiang 154005, China

3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Agricultural Machinery Product Quality Supervision and Management Station, Urumqi 830052, China

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Changji Vocational and Technical College, Changji 831110, China)

Abstract: Due to the lack of accurate simulation model parameters in the process of mechanized harvesting and crushing of cotton straw, there is a great difference between the simulation effect and the actual operation in the design of machinery and tools, which limits the design and research of cotton straw harvesting and crushing device to a certain extent. Xinjiang cotton straw was used as experimental material to carry out simulation analysis. After the intrinsic parameters of cotton straw were determined by physical tests, the EDEM simulation software was used for test simulation and parameter calibration of cotton straw. The accumulation angle and the maximum destructive power of cotton straw were 28.62° and 143.21 N respectively by the method of accumulation angle test and bending test. The Hertz - Mindlin no slip model and Hertz - Mindlin with bonding model were used to simulate the stacking angle and bending of cotton straw. The collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient between cotton straw and the collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient between cotton straw and steel were respectively 0.5 , 0.41 , 0.06 , 0.5 , 0.37 and 0.08 , and the normal contact stiffness, tangential contact stiffness, critical normal stress and critical tangential stress

收稿日期: 2023-06-05 修回日期: 2023-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52365038、51865058)、新疆维吾尔自治区农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-09)和新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022-2)

作者简介: 张佳喜(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事循环农业技术与装备研究,E-mail: 13899961137@163.com

of cotton straw were respectively obtained, which were 4.15×10^{10} N/m, 5.60×10^{10} N/m, 40 MPa and 50 MPa, respectively. According to the above results, the pulverized cotton straw can be divided into powder type material, crushed type material and unbroken type material according to different lengths and widths. The deviation between the simulation test quality and the actual test quality was 6.84% , 8.29% and 7.37% , which proved the feasibility of the parameters and can be used for the parameter calibration of cotton straw.

Key words: cotton straw; accumulation angle test; bending test; EDEM; parameter calibration

0 引言

新疆作为我国棉花的主要生产地,在 2022 年种植面积已达 3.5×10^6 hm², 占全国的 83.2%^[1]。棉花秸秆是棉花的主要副产物,是许多领域重要的可再生生物质资源。例如:牲畜饲料、造纸、纤维板制品等^[2]。棉花秸秆资源利用有利于棉花产业链延伸及附加值增加。

棉花秸秆粉碎收获等是棉花秸秆处理的关键步骤,研究粉碎收获环节需要掌握棉花秸秆各项参数,但是某些参数难以测量,通过传统物理学计算精度不准确,随着计算机模拟功能日益提高,数值仿真分析是解决此类问题的有效手段。许多学者对玉米种子^[3]、马铃薯^[4]、三七种子^[5]、绿豆种子^[6]、花生种子^[7]等进行接触参数试验。对玉米秸秆^[8]、小麦秸秆^[9]、水稻秸秆^[10]、藁期饲料油菜茎秆^[11]进行粘结参数试验。表明不同的物料其接触参数与粘结参数之间具有很大的差异性,截止目前未发现有学者进行棉花秸秆参数标定仿真研究。本文以新疆棉花秸秆作为试验对象,运用 EDEM 对棉花秸秆接触参数和粘结参数进行仿真试验,以堆积角和弯曲破坏载荷为目标,利用 Design-Expert 软件优化得出最佳仿真参数。

1 模型建立与参数测量

1.1 接触模型选取

根据棉花秸秆表皮之间粘结力较小这一物理特性^[12],选取 Hertz – Mindlin 无滑动接触模型对棉花秸秆进行仿真堆积角试验,该模型能够有效地测量出棉花秸秆之间、棉花秸秆和钢之间的接触参数。选取 Hertz – Mindlin with bonding 模型进行棉花秸秆的弯曲仿真试验,类似于在球体与球体之间注入胶水,将球体和球体固定在一起,通过对仿真模型施加外力,能够使仿真模型开始发生形变,在达到最大破坏力时,该结构之间的粘结键就会发生破坏,该模型能够表达出变形的形状以及力的大小变化^[13]。

1.2 参数测定

1.2.1 棉花秸秆本征参数测量

试验地点为新疆农业大学机电工程学院重点实

验室,选取新疆安宁渠新陆早棉 66 号棉花秸秆作为本次物理试验的材料,取样时间为 2022 年 10 月中旬。该品种具有产量高、病害较少等优点。试验前选取无病害顺直的棉花秸秆,将棉花秸秆进行脱叶脱枝处理之后,再用毛巾擦拭干净。随机选取棉花秸秆 40 根,选择离根部约 400 mm 处中间部位作为试验材料,测量出棉花秸秆平均直径约为 9.98 mm,平均含水率约为 42.4%。参考文献[14]得出棉花秸秆密度为 1 060 ~ 1 280 kg/m³,选取棉花秸秆密度 1 080 kg/m³作为本次试验密度,通过棉花秸秆单轴压缩试验,对比试验前后秸秆高度以及直径的变化得出弹性模量为 1.86 GPa,泊松比 μ 为 0.35,剪切模量 G 与弹性模量 E 、泊松比 μ 之间存在关系式

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \tag{1}$$

计算得剪切模量为 0.69 GPa。棉花秸秆本征参数及钢板本征参数^[15]如表 1 所示。

表 1 棉花秸秆和钢板本征参数
Tab.1 Intrinsic parameters of cotton straw and steel plate

参数	数值
棉花秸秆泊松比 μ_1	0.35
钢板泊松比 μ_2	0.30
棉花秸秆剪切模量 G_1 /GPa	0.69
钢板剪切模量 G_2 /GPa	79.4
棉花秸秆密度 ρ_1 /(kg·m ⁻³)	1 080
钢板密度 ρ_2 /(kg·m ⁻³)	7 850

1.2.2 棉花秸秆堆积角物理试验

堆积角体现物体表面接触、摩擦、流动等因素,其中棉花秸秆之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数,棉花秸秆-钢之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等参数对于堆积角有影响。采用圆筒提升法对棉花秸秆堆积角进行测量^[16]。圆筒选择 Q235 钢质材料,高度为 240 mm,内径为 120 mm。试验之前,选取直径为 10 mm 的棉花秸秆进行裁剪,长度分别为 25、30、35、40 mm,填装数量为 480 个,不同长度的棉花秸秆各占总数的 25%^[17]。试验时,将圆筒匀速上升,速度为 0.05 m/s,等到棉花秸秆堆积完全后,静置 1 min 之后,测量底

板与斜面之间的夹角。试验重复 5 次,进行数据整合。通过 Matlab 软件对堆积角图像进行二值化处理,Photoshop 软件对图像进行边线提取处理,将提取的边线放入 Origin 中进行曲线拟合^[18],得出平均堆积角为 28.62°,图像处理如图 1 所示。

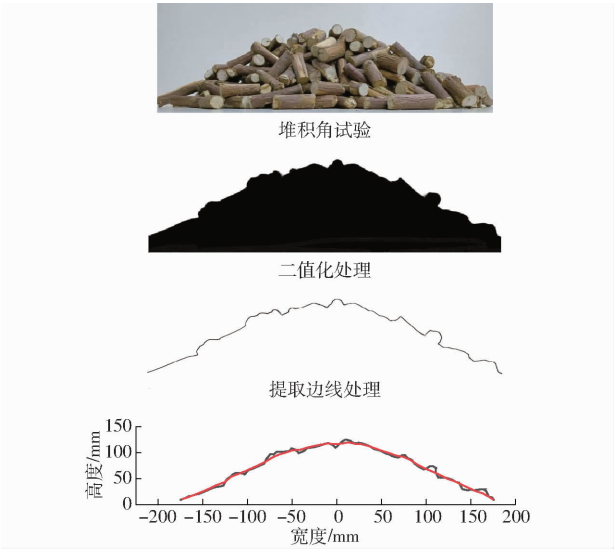


图 1 图像处理
Fig. 1 Picture processing

1.2.3 棉花秸秆弯曲物理试验

弯曲破坏力决定了棉花秸秆粘结力。选取直径约为 10 mm,裁剪长度约为 80 mm,支撑座间距为 60 mm,在万能试验台上进行 10 次试验,压头速度为 0.005 m/s。试验完成之后,数据整合,得出平均弯曲最大破坏载荷为 143.21 N。

1.3 堆积角试验棉花秸秆仿真模型建立

目前,许多研究者采用填球法建立了 EDEM 模型。如陶贺等^[19]、章志强^[20]通过中心堆叠等方法进行颗粒排列建立玉米秸秆模型,而牛智有等^[21]采取多个球体直接拼接法建立饲料模型,以上试验材料与棉花秸秆形状相同,均为圆柱体,但建立模型的方法和表面形状差别很大。本文以棉花秸秆作为试验材料,以仿真时间和拼接球体数量为基础,进行多组仿真来选取最佳仿真模型。拼接的棉花秸秆仿真模型以直径 10 mm、长度为 30 mm 为例,建立球数分别为 5、6、7、8、24 以及多球 6 种模型,如图 2 所示。



图 2 棉花秸秆组合模型
Fig. 2 Cotton straw combination model

其中多球是以 24 球为基础,将整个模型细化成

多个球体。随着球数的增加,表面也更加光滑,24 球和多球模型也更加近似于圆柱形。在堆积角仿真试验中,在 SolidWorks 中建立与物理试验尺寸一致的圆筒。采用动态生产方式,在圆筒上方建立虚拟平面作为颗粒工厂,填充数量为 480 个,待棉花秸秆模型完全静止后,将圆筒以速度 0.05 m/s 匀速上升,棉花秸秆堆积完全后,测量出斜面与底板之间的夹角。EDEM 仿真试验如图 3 所示。通过查阅文献[22-25]得出棉花秸秆接触参数取值如表 2 所示。



图 3 棉花秸秆仿真堆积角试验

Fig. 3 Experiment on simulated stacking angle of cotton straw

表 2 棉花秸秆接触参数

Tab. 2 Value range of cotton straw contact parameters

参数	数值
棉花秸秆之间碰撞恢复系数 X_1	0.3 ~ 0.7
棉花秸秆之间静摩擦因数 X_2	0.3 ~ 0.6
棉花秸秆之间滚动摩擦因数 X_3	0.05 ~ 0.10
棉花秸秆-钢碰撞恢复系数 X_4	0.3 ~ 0.7
棉花秸秆-钢静摩擦因数 X_5	0.3 ~ 0.6
棉花秸秆-钢滚动摩擦因数 X_6	0.05 ~ 0.10

将 6 种球数不同的颗粒进行堆积角仿真试验,接触参数选取表 2 中间值,即棉花秸秆之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数和棉花秸秆-钢之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.5、0.45、0.075、0.5、0.45、0.075,代入到 EDEM 中,其它参数均保持一致。每组试验重复 5 次,取平均值。堆积角和球数以及仿真时间和球数如图 4 所示。

从图 4 可以看出,堆积角随着球数增加而减少,在 8 球之后,曲线逐渐收敛到一个合理的范围,8 球与 24 球及多球之间堆积角相对误差分别为 0.634% 和 0.862%,虽然增大球数整体形状也更近似于圆柱体,但是堆积角仿真试验的精度提高较小。同理随着球数增加,仿真所需时间也增加,这是由于在离散元仿真中,填充的球数越多,球数接触次数也增多,从而导致其仿真时间就越长,CPU 计算时间

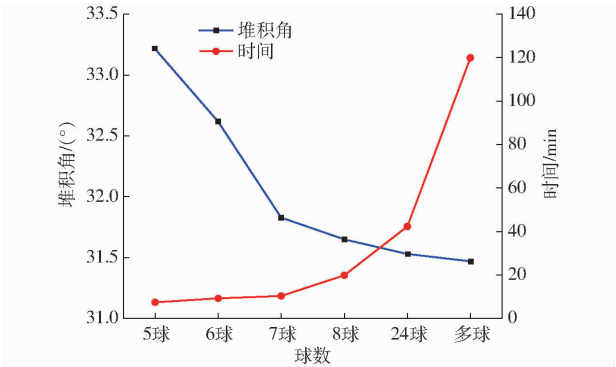


图 4 堆积角、时间与球数关系曲线

Fig. 4 Relationship between stacking angle, time and number of balls

增加^[26]。综上考虑,选取 8 球作为仿真模型。

1.4 弯曲试验棉花秸秆仿真模型建立

在 EDEM 中建立长度为 80 mm、直径为 10 mm 的圆柱作为棉花秸秆模型的容器。将棉花秸秆模型容器建立在圆柱中,首先设置圆柱为实体,棉花秸秆模型容器设置为虚拟。圆柱作为颗粒工厂填充颗粒,采用静态生成方式,填充小颗粒直径为 1.5 mm。待颗粒充满后,将圆柱设置为虚拟,棉花秸秆模型容器设置为实体,多余的颗粒掉落在计算域外,得到棉花秸秆模型。

采用 Hertz – Mindlin with bonding 模型进行颗粒粘结,形成具有一定机械强度的颗粒模型。通过 SolidWorks 软件建立支撑座以及弯曲压头。将格式改为 .stp 导入到 EDEM 中,将 EDEM 建立的棉花秸秆模型放入到支撑座中间,压头下降速度为 0.005 m/s,支撑板间距为 60 mm,棉花秸秆仿真弯曲试验如图 5 所示。通过查阅离散元相关文献^[27]以及大量仿真试验,得出棉花秸秆粘结参数如表 3 所示。

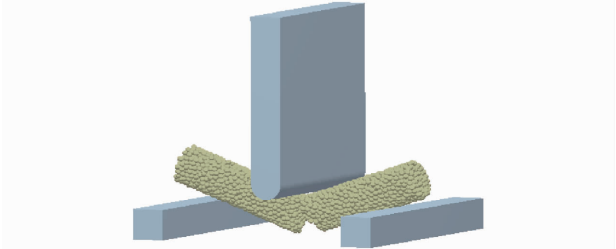


图 5 棉花秸秆仿真弯曲试验

Fig. 5 Simulation bending test of cotton straw

表 3 棉花秸秆粘结参数

参数	数值
法向接触刚度 $X_7/(N \cdot m^{-1})$	$2.5 \times 10^{10} \sim 5.5 \times 10^{10}$
切向接触刚度 $X_8/(N \cdot m^{-1})$	$3.0 \times 10^{10} \sim 7.0 \times 10^{10}$
临界法向应力 X_9/MPa	10 ~ 70
临界切向应力 X_{10}/MPa	10 ~ 90

1.5 参数标定试验设计

(1) Plackett – Burman 试验设计:由于堆积角试验因子较多,且未确定各个因子是否对堆积角试验有显著影响,对接触参数(棉花秸秆之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数和棉花秸秆-钢之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数)筛选显著性因素,中心水平选取表 2 范围的中心值,建立 12 组试验设计。

(2) 最陡爬坡试验设计:对筛选出来的参数,采用最陡爬坡试验来逼近最佳区域,记录每次仿真试验和物理试验之间的误差变化,根据误差之间的数值增减趋势确定最佳取值范围,其余不显著因素选取 Plackett – Burman 试验中心水平值。

(3) Box – Behnken Design (BBD) 试验设计:对 Plackett – Burman 试验和最陡爬坡试验筛选出的显著参数进行 BBD 试验,对最佳取值范围高水平值、中心点、低水平值作为响应面试验的高、中、低三水平,对接触参数进行试验分析,建立二元回归方程,确定最佳仿真参数。

(4) Central Composite Design (CCD) 试验设计:对粘结参数(法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力、临界切向应力)进行参数标定。通过 Design-Expert 8.0.6 中 CCD 原理进行试验分析,建立四因素五水平试验并制定相关参数编码,如表 4 所示,中心水平选取表 3 范围的中心值,建立 27 组试验设计,筛选显著参数,建立二元回归方程,选取最佳粘结参数。

表 4 棉花秸秆粘结参数编码

编码	参数			
	$X_7/(N \cdot m^{-1})$	$X_8/(N \cdot m^{-1})$	X_9/MPa	X_{10}/MPa
-2	2.50×10^{10}	3.00×10^{10}	10.00	10.00
-1	3.20×10^{10}	4.00×10^{10}	25.00	30.00
0	4.00×10^{10}	5.00×10^{10}	40.00	50.00
1	4.80×10^{10}	6.00×10^{10}	55.00	70.00
2	5.50×10^{10}	7.00×10^{10}	70.00	90.00

2 结果与分析

2.1 堆积角接触参数标定

2.1.1 Plackett – Burman 接触参数筛选

通过 Plackett – Burman 试验对基本接触参数(棉花秸秆之间碰撞恢复系数 X_1 、静摩擦因数 X_2 、滚动摩擦因数 X_3 和棉花秸秆-钢碰撞恢复系数 X_4 、静摩擦因数 X_5 、滚动摩擦因数 X_6)进行显著性筛选分析,Plackett – Burman 试验设计及堆积角如表 5 所

示,参数显著性分析如表 6 所示。 $x_1 \sim x_6$ 为因素编码值。

表 5 Plackett – Burman 接触参数试验设计与结果

Tab.5 Experimental design and results of Plackett – Burman contact parameters

序号	因素						堆积角 $\theta/(^{\circ})$
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	
1	-1	1	-1	1	1	-1	32.85
2	1	1	-1	-1	-1	1	29.09
3	1	-1	1	1	1	-1	34.49
4	1	1	-1	1	1	1	32.76
5	-1	1	1	1	-1	-1	32.69
6	-1	1	1	-1	1	1	37.47
7	1	-1	1	1	-1	1	28.81
8	1	1	1	-1	-1	-1	32.64
9	-1	-1	-1	1	-1	1	27.55
10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	28.18
11	1	-1	-1	-1	1	-1	29.13
12	-1	-1	1	-1	1	1	33.69

表 6 参数显著性分析

Tab.6 Parameter significance analysis

参数	效应	均方和	影响率	F	P	显著性排序
x_1	-0.92	2.53	2.51	2.43	0.179	4
x_2	2.61	20.41	20.28	19.63	0.006	3
x_3	3.37	34.10	33.89	32.80	0.002	2
x_4	-0.17	0.092	0.091	0.088	0.778	5
x_5	3.57	38.27	38.03	36.80	0.001	1
x_6	-0.10	0.031	0.031	0.030	0.869	6

由表 6 可知,根据显著性筛选结果, x_2 、 x_3 、 x_5 的 P 值均小于 0.05,说明对棉花秸秆堆积角试验有显著影响,且棉花秸秆-钢之间的静摩擦因数 x_5 影响和显著性排序最大,对堆积角试验显著性最高。而 x_1 、 x_4 、 x_6 的 P 值均大于 0.05,说明对堆积角试验影响不显著。对于影响显著参数进行后续爬坡试验,其余参数选取中间水平值。

2.1.2 最陡爬坡试验

由表 7 可知,随着 X_2 、 X_3 、 X_5 增大,仿真试验堆积角呈现逐步增大趋势,与物理试验相对误差呈现先减小后增大趋势,由于试验 3 的相对误差最小,最接近物理值,选择试验 3 作为中心水平值,试验 2 和试验 4 分别作为低水平和高水平,最陡爬坡试验结果如表 7 所示,BBD 试验因素编码如表 8 所示。

2.1.3 BBD 响应面试验

对 x_2 、 x_3 、 x_5 进行 BBD 响应面试验,建立三因素三水平组合设计试验,试验仿真次数为 17 次,中心水平建立 5 组试验,BBD 响应面试验设计如表 9 所示,BBD 响应面试验方差分析如表 10 所示。

表 7 最陡爬坡试验设计与结果

Tab.7 Steepest climbing test

序号	因素			堆积角 $\theta/$ ($^{\circ}$)	相对误差 $\varphi/\%$
	X_2	X_3	X_5		
1	0.30	0.05	0.30	25.26	11.740
2	0.35	0.06	0.35	26.58	7.128
3	0.40	0.07	0.40	29.37	2.621
4	0.45	0.08	0.45	31.06	8.526
5	0.50	0.09	0.50	33.27	16.247

表 8 BBD 试验因素编码

Tab.8 Coding of experimental factors

编码	因素		
	X_2	X_3	X_5
-1	0.35	0.06	0.35
0	0.40	0.07	0.40
1	0.45	0.08	0.45

表 9 BBD 响应面试验设计和结果

Tab.9 Design and results of BBD response surface experiment

序号	因素			堆积角 $\theta/$ ($^{\circ}$)
	x_2	x_3	x_5	
1	0	0	0	29.12
2	0	-1	1	29.70
3	1	0	1	30.96
4	0	1	-1	29.86
5	0	-1	-1	27.96
6	0	1	1	31.03
7	0	0	0	29.54
8	1	0	-1	29.81
9	-1	1	0	29.57
10	0	0	0	29.05
11	-1	0	1	30.01
12	-1	0	-1	28.04
13	1	-1	0	29.57
14	1	1	0	30.90
15	-1	-1	0	28.23
16	0	0	0	29.18
17	0	0	0	29.16

对上述响应面试验方差数据进行分析,得出决定系数 R^2 为 0.992 7,模型方差接近 1,表示该回归模型极显著,而且失拟项 P 大于 0.05。变异系数为 0.43%,表明该试验可靠性较好,其二元回归方程为

$$\theta = 29.16 + 0.71x_2 + 0.81x_3 + 0.79x_5 + 0.078x_2x_3 - 0.21x_2x_5 - 0.08x_3x_5 + 0.25x_2^2 + 0.24x_3^2 + 0.30x_5^2$$

(2)

通过对式(2)进行优化,以物理试验堆积角为目标,寻找最佳取值参数,得出 X_2 、 X_3 、 X_5 分别为 0.41、0.06、0.37,将参数重新代入到离散元模型中

表 10 BBD 响应面试验方差分析

Tab. 10 BBD response surface analysis of variance

方差来源	自由度	均方	F	P
模型	9	1. 71	105. 96	<0. 000 1
x_2	1	4. 06	251. 04	<0. 000 1
x_3	1	5. 23	323. 44	<0. 000 1
x_5	1	4. 95	305. 70	<0. 000 1
x_2x_3	1	0. 024	1. 49	0. 262 5
x_2x_5	1	0. 17	10. 65	0. 013 8
x_3x_5	1	0. 026	1. 58	0. 248 18
x_2^2	1	0. 25	15. 69	0. 005 5
x_3^2	1	0. 24	14. 74	0. 006 4
x_5^2	1	0. 37	23. 11	0. 001 9
残差	7	0. 016		
失拟项	3	0. 013	0. 73	0. 587 4
纯误差	4	0. 018		
总和	16			

进行堆积角仿真试验,得出堆积角为 29. 12°,与物理试验角度之间相对误差为 1. 74%,表明建立的棉花秸秆堆积角和回归模型较好。

2. 2 弯曲试验参数标定

将上述接触参数代入到离散元模型中,通过 CCD 响应面试验设计对粘结参数(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})进行仿真弯曲试验,试验仿真次数为 27 次,中心水平设计 3 组重复试验,CCD 试验设计如表 11 所示,CCD 试验方差分析如表 12 所示,CCD 显著性参数试验方差分析如表 13 所示。 $x_7 \sim x_{10}$ 为因素编码值。

对上述响应面试验进行数据分析,得出决定系数 R^2 为 0. 996 0,表示该回归模型极显著,而且失拟项 P 大于 0. 05,决定系数接近于 1,表明了回归方程拟合较好,方差分析得出,法向接触刚度 x_7 、切向接触刚度 x_8 及其平方项、交互项的 P 值均小于 0. 05,说明参数对弯曲破坏具有显著影响,变异系数为 1. 61%,表明该试验可靠性较好。其二元回归方程为

$$F = 136. 00 + 22. 68x_7 + 5. 90x_8 + 0. 19x_9 + 0. 061x_{10} + 1. 18x_7x_8 + 0. 17x_7x_9 + 0. 64x_7x_{10} + 0. 61x_8x_9 + 0. 31x_8x_{10} + 0. 47x_9x_{10} - 2. 20x_7^2 - 3. 14x_8^2 + 0. 08x_9^2 + 0. 57x_{10}^2 \quad (3)$$

将表 12 不显著项去除,由于临界法向应力 x_9 、临界切向应力 x_{10} 及二者的交互项和平方项对于弯曲试验不显著,选取中心水平值作为两者的参数值,即临界法向应力选取 40 MPa,临界切向应力选取 50 MPa。显著性二元回归方程为

$$F = 136. 87 + 22. 69x_7 + 5. 90x_8 + 1. 18x_7x_8 - 2. 36x_7^2 - 3. 30x_8^2 \quad (4)$$

表 11 CCD 响应面试验设计与结果

Tab. 11 CCD response surface experimental design and results

序号	因素				破坏力
	x_7	x_8	x_9	x_{10}	F/N
1	1	-1	1	1	149. 24
2	-1	-1	-1	-1	104. 47
3	0	0	0	0	135. 34
4	-2	0	0	0	84. 61
5	0	0	-2	0	136. 45
6	-1	1	1	1	112. 55
7	1	1	1	-1	159. 41
8	0	0	2	0	136. 87
9	-1	-1	1	1	101. 97
10	1	1	-1	1	159. 08
11	0	0	0	0	135. 93
12	2	0	0	0	170. 20
13	1	-1	1	-1	145. 85
14	0	2	0	0	137. 61
15	-1	1	-1	1	112. 18
16	0	-2	0	0	109. 72
17	0	0	0	2	137. 49
18	-1	-1	1	-1	104. 68
19	1	-1	-1	-1	148. 26
20	1	-1	-1	1	148. 65
21	-1	-1	-1	1	103. 69
22	1	1	-1	-1	160. 74
23	0	0	0	0	136. 74
24	0	0	0	-2	139. 51
25	-1	1	-1	-1	111. 13
26	1	1	1	1	165. 15
27	-1	1	1	-1	112. 46

表 12 CCD 响应面方差分析

Tab. 12 CCD response surface analysis of variance

方差来源	自由度	均方	F	P
模型	14	970. 78	214. 18	<0. 000 1
x_7	1	12 350. 17	2 724. 84	<0. 000 1
x_8	1	836. 27	184. 51	<0. 000 1
x_9	1	0. 84	0. 19	0. 674 5
x_{10}	1	0. 090	0. 020	0. 890 3
x_7x_8	1	22. 25	4. 19	0. 046 8
x_7x_9	1	0. 47	0. 10	0. 754 0
x_7x_{10}	1	6. 52	1. 44	0. 253 7
x_8x_9	1	5. 97	1. 32	0. 273 6
x_8x_{10}	1	1. 52	0. 34	0. 573 3
x_9x_{10}	1	3. 53	0. 78	0. 395 2
x_7^2	1	103. 28	22. 79	0. 000 5
x_8^2	1	209. 71	46. 27	<0. 000 1
x_9^2	1	0. 14	0. 030	0. 865 6
x_{10}^2	1	7. 02	1. 55	0. 237 2
残差	12	4. 53		
失拟项	10	5. 34	10. 81	0. 087 6
纯误差	2	0. 49		
总和	26			

表 13 CCD 显著性参数试验方差分析

Tab.13 Analysis of variance of significance parameter test

方差来源	自由度	均方	F	P
模型	5	2 712. 93	706. 64	<0. 000 1
x_7	1	12 350. 17	3 216. 85	<0. 000 1
x_8	1	836. 27	217. 82	<0. 000 1
x_7x_8	1	22. 25	5. 80	0. 025 3
x_7^2	1	143. 02	37. 25	<0. 000 1
x_8^2	1	278. 55	72. 55	<0. 000 1
残差	21	3. 84		
失拟项	19	4. 19	8. 48	0. 110 5
纯误差	2	0. 49		
总和	26			

对方程优化,求解最佳参数取值,以物理试验破坏载荷为目标进行寻优,得到 X_7 为 4.15×10^{10} N/m, X_8 为 5.60×10^{10} N/m,将上述参数代入到离散元模型中进行弯曲仿真试验,通过 EDEM 后处理功能得到载荷随位移变化曲线,与物理试验进行对比,如图 6 所示。

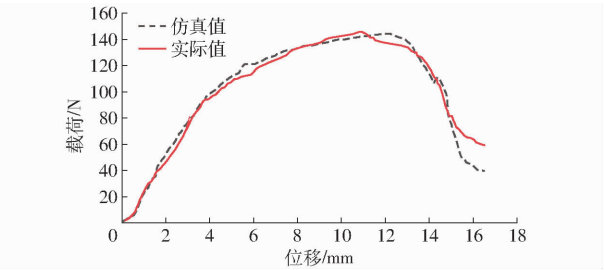


图 6 弯曲试验对比曲线

Fig.6 Bending test comparison curves

由图 6 可知,棉花秸秆在弯曲变形时主要分为 3 个阶段:0~6 mm 时,棉花秸秆受外力作用下发生变形,随着压头不断向下,棉花秸秆所受载荷不断增加,变形量较大,此时,所受载荷和位移呈线性关系。6~12 mm 时,随着压头不断下降,棉花秸秆所受载荷增长缓慢,达到极限载荷时,棉花秸秆下侧面最先发生破裂。12 mm 之后棉花秸秆所受载荷逐渐降低,直到棉花秸秆完全断裂。棉花秸秆仿真试验和物理试验曲线存在少许偏差可能是棉花秸秆自身木质素分布不均匀,而且秸秆整体粗细略有不同,而仿真试验的棉花秸秆较为理想化,颗粒分布较为均匀。通过试验对比,两者载荷和位移整体结果较为相似,而且仿真试验弯曲破坏载荷为 146.62 N,与物理弯曲破坏载荷之间相对误差为 2.32%,表明上述参数可靠性较高,将上述参数初步作为标定结果。

3 棉花秸秆粉碎仿真试验验证

为进一步验证上述各参数的可靠性,采取粉碎验证试验,试验仪器为 360 型秸秆粉碎机,转速为

3 200 r/min,试验地点为新疆农业机械化研究所。试验时,空转 1 min 后,将裁剪好的棉花秸秆从喂料口投入,等到 2 s 后立即断电,从出料口收集破碎后的棉花秸秆进行分类。棉花秸秆粉碎之后得到 3 种不同的粉碎物料,根据实际投入的棉花秸秆尺寸以及参考文献[28-29],规定长度小于 5 mm 且宽度小于 3 mm 为粉末型物料,长度小于 10 mm 且宽度小于 5 mm 为破碎型物料,而其它未破碎,且形状较大为未破碎型物料,如图 7 所示。



Fig.7 Material shape after crushing of cotton straw

在仿真试验开始前,为节省运算时间以及提高仿真效果,去除不必要零件,对粉碎机模型进行简化处理,如图 8 所示。

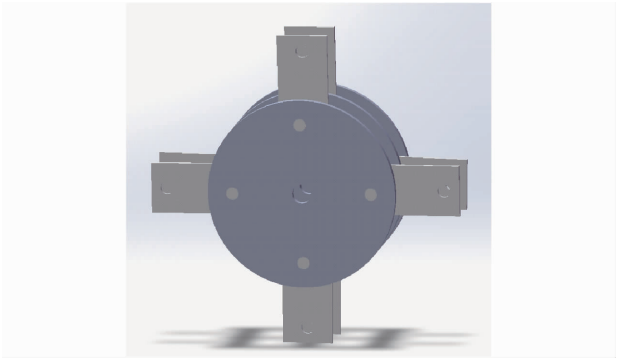


图 8 粉碎机锤片模型

Fig.8 Crusher hammer model

仿真试验开始时,将上述参数代入到 EDEM 中生成粘结键,数量为 19 207,单个颗粒周围粘结键为 4.89。将粉碎机模型导入到 EDEM 中,总时长设置为 2 s,试验重复 5 次。当仿真时间达到 2 s 时,停止仿真,通过后处理功能,对粘结键数量进行分析,在 0~0.3 s 时,棉花秸秆模型与锤片发生碰撞,导致颗粒与颗粒之间粘结键迅速断裂,如图 9 所示。在 0.3~1.2 s 时,破碎型物料和未破碎型物料又受到锤片反复捶打,导致粘结键数量下降减少。在 1.2~2 s 时,3 种物料不再发生断裂,物料保持平稳状态。粘结键数量随时间变化如图 10 所示。

棉花秸秆仿真模型在粉碎之后,同样根据长度和宽度,分为粉末型物料、破碎型物料、未破碎型物料,如图 11 所示。通过后处理功能,5 次棉花秸秆仿真模型总质量为 44.65 g,仿真模拟结果与实际试验结果对比如表 14 所示,计算每一种物料之间质量

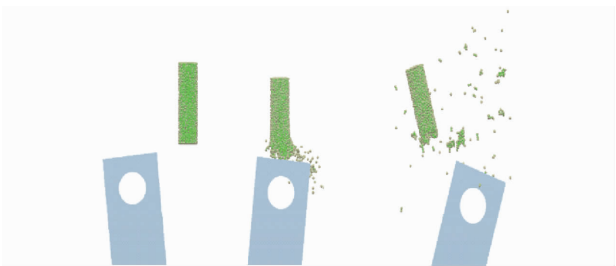


图 9 棉花秸秆仿真模型破碎过程

Fig. 9 Crushing process of cotton straw simulation model

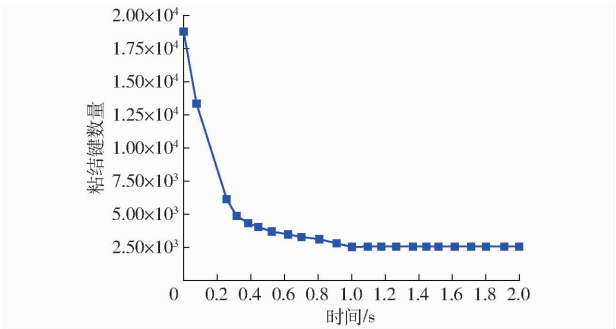


图 10 粘结键数量随时间变化曲线

Fig. 10 Changing curve of number of bonding keys
versus time

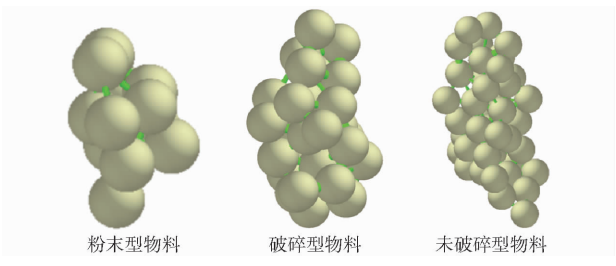


图 11 仿真试验破碎后物料图

Fig. 11 Material diagram after crushing in simulation
experiment

表 14 棉花秸秆破碎后质量仿真值和实际值对比
Tab. 14 Comparison between simulation and
actual values of cotton straw after crushing

物料类型	仿真值/g	试验值/g	偏差/%
粉末型物料	19.34	20.76	6.84
破碎型物料	14.82	16.16	8.29
未破碎型物料	10.49	9.77	7.37

偏差分别为 6.84%、8.29%、7.37%，证明了参数的可行性，对棉花秸秆收获和粉碎等研究提供一定的参考价值。

4 结论

(1)物理试验测得棉花秸秆距离根部 400 mm 约中间部位平均直径约为 9.98 mm,平均含水率约为 42.4%,棉花秸秆密度为 1 080 kg/m³,通过单轴压缩试验测得棉花秸秆弹性模量、泊松比、剪切模量分别为 1.86 GPa、0.35、0.69 GPa。圆筒提升法试验测得棉花秸秆平均堆积角为 28.62°,棉花秸秆最大弯曲破坏载荷为 143.21 N。

(2)选取 Hertz – Mindlin no slip 模型作为棉花秸秆仿真模型,在颗粒模型选择上,以堆积角和时间作为选择目标,选取 8 球作为仿真试验模型。利用 Plackett – Burman 原理,对接触参数进行筛选,得出棉花秸秆之间静摩擦因数、滚动摩擦因数、棉花秸秆–钢之间静摩擦因数对堆积角影响显著,而棉花秸秆之间碰撞恢复系数、棉花秸秆–钢之间碰撞恢复系数及棉花秸秆–钢之间滚动摩擦因数对堆积角影响不显著。采用最陡爬坡原理和 BBD 原理对显著性参数进行分析,得出二元回归方程,以物理堆积角为目标,优化求解得出棉花秸秆之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数和棉花秸秆–钢之间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.5、0.41、0.06、0.5、0.37、0.08。

(3)通过 Hertz – Mindlin with bonding 模型,建立棉花秸秆仿真模型,通过 CCD 原理,对粘结参数进行分析得出法向接触刚度、切向接触刚度,二者平方项、交互项的 *P* 值均小于 0.05,有较好的显著性。而临界法向应力、临界切向应力,以及二者平方项和交互项不显著,通过二元回归方程以物理试验破坏载荷为目标,优化求解得出法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力和临界切向应力分别为 4.15 × 10¹⁰ N/m、5.60 × 10¹⁰ N/m、40 MPa、50 MPa。

(4)针对以上结果进行粉碎试验验证,棉花秸秆粉碎后根据长度和宽度不同,分为粉末型物料、破碎型物料、未破碎型物料,仿真试验质量和实际试验质量之间偏差为 6.84%、8.29%、7.37%,证明了上述参数的可行性,可为棉花秸秆收获和粉碎等方面研究提供参考。

参 考 文 献

[1] 国家统计局关于 2022 年棉花产量的公告[N]. 中国信息报,2022-12-27(001).
[2] 张佳喜,郜周明,蔡佳麟,等. 横轴对辊式棉秆起拔装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(7):43-52.
ZHANG Jiaxi, GAO Zhouming, CAI Jialin, et al. Design and test of cross-axis roller cotton stalk pulling device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 43-52. (in Chinese)
[3] 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 method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese)
[4] 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.

- LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Micro-potato simulation parameter calibration based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125–135. (in Chinese)
- [5] 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 discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123–132. (in Chinese)
- [6] 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. Parameter calibration and seed metering experiment of mung bean seed discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71–79. (in Chinese)
- [7] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫琴, 等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 30–38.
- WU Mengchen, CONG Jinling, YAN Qin, et al. Calibration and experiment of peanut seed particle discrete element simulation parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 30–38. (in Chinese)
- [8] 宋学锋. 基于离散元法的玉米秸秆揉丝机工作过程研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- SONG Xuefeng. Research on the working process of corn stalk kneading machine based on discrete element method[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [9] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 170–180.
- WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Modeling of wheat plant and simulation and experiment of single longitudinal axial flow material movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 170–180. (in Chinese)
- [10] 赵吉坤, 宋武斌, 李晶晶. 基于 EDEM 的水稻秸秆建模及力学性能分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1086–1093.
- ZHAO Jikun, SONG Wubin, LI Jingjing. Modeling and mechanical properties analysis of rice straw based on EDEM[J]. Soil Bulletin, 2020, 51(5): 1086–1093. (in Chinese)
- [11] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73–82.
- LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of stalk breakage in harvest stage of feed oil vegetable[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [12] 杜欣, 曾亚武, 高睿, 等. 用离散元方法研究颗粒外形对摩擦机理的影响[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(2): 252–257.
- DU Xin, ZENG Yawu, GAO Rui, et al. Study on the influence of particle shape on friction mechanism by discrete element method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(2): 252–257. (in Chinese)
- [13] 王伟伟, 蔡丹艳, 谢进杰, 等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 127–134.
- WANG Weiwei, CAI Danyan, XIE Jinjie, et al. Parameter calibration of discrete element model for dense molding of corn stalk powder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 127–134. (in Chinese)
- [14] 靳伟, 张学军, 丁幼春, 等. 基于 EDEM-Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 89–98.
- JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Simulation and experiment of residual film and impurity suspension separation based on EDEM-Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 89–98. (in Chinese)
- [15] 万星宇, 廖庆喜, 蒋亚军, 等. 饲用油菜机械化收获切碎过程离散元仿真与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2735–2745.
- WAN Xingyu, LIAO Qingxi, JIANG Yajun, et al. Discrete element simulation and experiment of mechanized harvesting and chopping process of forage rape[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2022, 52(11): 2735–2745. (in Chinese)
- [16] 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. Parameter analysis and calibration of wheat discrete element based on stacking test[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247–253. (in Chinese)
- [17] 廖宜涛, 王在腾, 廖庆喜, 等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 236–243.
- LIAO Yitao, WANG Zaiteng, LIAO Qingxi, et al. Parameter calibration of discrete element contact model of feed rape stalk at early fruit and pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 236–243. (in Chinese)
- [18] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 36–44.
- HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 36–44. (in Chinese)
- [19] 陶贺, 钟文琪, 金保昇. 采用多元颗粒模型对圆柱形颗粒在移动床中流动的离散单元法直接数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 13–19, 137.
- TAO He, ZHONG Wenqi, JIN Baosheng. Direct numerical simulation of cylindrical particle flow in a moving bed by the discrete unit method using a multivariate particle model[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2012, 32(17): 13–19, 137. (in Chinese)

- WEI Zhongcai, HAN Meng, SU Guoliang, et al. Design and experiment of a bagging and unloading potato combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 92 – 104. (in Chinese)
- [34] 徐立章,李洋,李耀明,等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报,2019,50(10): 1 – 16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1 – 16. (in Chinese)
- [35] 金诚谦,李庆伦,倪有亮,等. 小麦联合收获机双出风口多风道清选作业试验[J]. 农业工程学报,2020,36(10): 26 – 34.
JIN Chengqian, LI Qinglun, NI Youliang, et al. Experimental study on double air outlet multi-ducts cleaning device of wheat combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 26 – 34. (in Chinese)
- [36] 张敏,金诚谦,梁苏宁,等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(24): 8 – 15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8 – 15. (in Chinese)
- [37] 万星宇,袁佳诚,廖庆喜,等. 油菜联合收获机凸块扰流式旋风分离清选装置研究[J]. 农业机械学报,2023,54(1): 159 – 172.
WAN Xingyu, YUAN Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of cyclone separation cleaning device with raised cylinder disturbing airflow field for rapeseed combine harvest [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 159 – 172. (in Chinese)
- [38] 张学军,张云赫,史增录,等. 油葵联合收获机清选装置结构优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8): 103 – 113.
ZHANG Xuejun, ZHANG Yunhe, SHI Zenglu, et al. Optimization and experiment of oil sunflower combined harvester cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 103 – 113. (in Chinese)
- [39] 于涛,刘素梅,雷明准. 基于 CFD – EDEM 大豆风选除尘模拟研究[J]. 包装与食品机械,2023,41(4): 46 – 53.
YU Tao, LIU Sumei, LEI Mingzhun. Simulation of soybean dust remoral based on CFD – EDEM [J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(4): 46 – 53. (in Chinese)
-

(上接第 84 页)

- [20] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
ZHANG Zhiqiang. Design and straw movement characteristics of corn straw crushing and spreading machine [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [21] 牛智有,孔宪锐,沈柏胜,等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(7): 132 – 140.
NIU Zhiyou, KONG Xianrui, SHEN Bosheng, et al. Discrete element simulation parameter calibration for pellet feed breakage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 132 – 140. (in Chinese)
- [22] 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]. 农业机械学报,2016,47(11): 114 – 120.
LI Pingping, WU Shuo, ZHANG Xiliang, et al. Parameter optimization of vertical spiral mixing equipment for tomato straw and fermentation strains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 114 – 120. (in Chinese)
- [23] JIA H L, DENG J Y, DENG Y L, et al. Contact parameter analysis and calibration in discrete element simulation of rice straw [J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(4): 72 – 81.
- [24] 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 physical parameters of corn stalk contact and calibration of discrete element simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120 – 127. (in Chinese)
- [25] 贾洪雷,邓佳玉,邓艳玲,等. 水稻秸秆的离散元仿真接触参数分析与标定[J]. 农业工程技术,2022,42(3): 96.
JIA Honglei, DENG Jiayu, DENG Yanling, et al. Discrete element simulation contact parameter analysis and calibration of rice straw[J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 42(3): 96. (in Chinese)
- [26] CHEN Zeren, YU Jianqun, XUE Duomei, et al. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2018, 32: 167 – 183.
- [27] 张李嫻. 玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
ZHANG Lixian. Discrete element modeling of mechanical properties of corn straw[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [28] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(9): 58 – 65.
ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Simulation and experiment of mechanical characteristics of corn stalk during shredding[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 58 – 65. (in Chinese)
- [29] 黄伟,邓斌,佟荟全,等. 锤片粉碎机对玉米粉碎粒度及粒度分布的影响研究[J]. 饲料研究,2022,45(23): 129 – 133.
HUANG Wei, DENG Bin, TONG Huiquan, et al. Study on the effect of hammer crusher on the grain size and distribution of maize[J]. Feed Research, 2022, 45(23): 129 – 133. (in Chinese)