

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.012

香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验

张喜瑞 胡旭航 刘俊孝 杨幼铭 李 粤
(海南大学机电工程学院, 海口 570228)

摘要: 为提高离散元法对指导香蕉秸秆粉碎还田装备设计与优化的准确性与可靠性,本文利用 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型建立香蕉秸秆离散元粘结模型并进行参数标定。运用高速摄影技术开展碰撞恢复试验、静摩擦及滚动摩擦台架试验,确定了香蕉秸秆碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数等基本离散元模型接触参数。开展香蕉秸秆物理与仿真剪切试验,获得破坏香蕉秸秆外皮的力学特征曲线,确定物理最大剪切力为 122.41 N;通过中心组合设计(Central composite design, CCD)响应面法确定香蕉秸秆粘结模型的法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力与临界切向应力的最佳参数组合为 5.89×10^7 N/m、 2.49×10^6 N/m、 1.39×10^5 Pa、 1.34×10^5 Pa。以参数标定结果进行仿真验证,结果表明,仿真剪切力结果与物理剪切力相对误差仅为 2.34%,验证了该粘结参数标定方法的可行性,可为香蕉秸秆粉碎还田机设计与研究提供理论参考。

关键词: 香蕉秸秆; 离散元法; 粘结参数标定

中图分类号: S224.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0121-10 OSID: 

Calibration and Verification of Bonding Parameters of Banana Straw Simulation Model Based on Discrete Element Method

ZHANG Xirui HU Xuhan LIU Junxiao YANG Youming LI Yue
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and reliability of using the discrete element method to guide the design and optimization of banana straw crushing and returning equipment, Hertz - Mindlin with bonding contact model was used to establish the discrete element bonding model of banana straw and carry out parameter calibration. The impact recovery test, static friction test, and rolling friction test were carried out by high-speed photography technology, and the basic discrete element model contact parameters such as impact recovery coefficient, static friction factor, and rolling friction factor of banana straw were determined. Physical and simulated shear tests of banana straw were carried out to obtain the mechanical characteristic curve of destroying banana straw outer skin, and the maximum physical shear force was determined to be 122.41 N. The optimal parameter combinations of normal contact stiffness, tangential contact stiffness, critical normal stress, and critical tangential stress of the banana straw bonding model were determined by central composite design (CCD) response surface method. The simulation results showed that the relative error between the simulated shear force results and the physical shear force was only 2.34%, which verified the reliability and accuracy of the bond parameter calibration method, and provided a theoretical reference for the design and research of the banana straw crushing and return machine.

Key words: banana straw; discrete element method; bond parameter calibration

收稿日期: 2023-02-02 修回日期: 2023-03-15
基金项目: 海南省重点研发计划项目(SQ2022XDNY0150)、国家自然科学基金项目(52075137、51965015)和海南省院士创新平台项目(HD-YSZX-202005、HD-YSZX-202101)
作者简介: 张喜瑞(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备与农业机器人研究,E-mail: zhangxr@hainanu.edu.cn
通信作者: 刘俊孝(1992—),男,讲师,博士,主要从事热带作物秸秆还田装备研究,E-mail: 995229@hainanu.edu.cn

0 引言

香蕉是全球鲜销量最大的水果,是热带、亚热带地区最重要的水果作物之一。据联合国粮食及农业组织统计,2020 年我国香蕉产量高达 1.187×10^7 t, 占世界香蕉产量的 9.01%^[1-4],但同时也产生了大量的香蕉秸秆,仅我国香蕉秸秆年产量达 2×10^7 t。废弃的香蕉秸秆若不及时、恰当处理,不仅会污染环境,影响香蕉园更新,还会给复耕香蕉园带来病害^[5-6]。而机械化粉碎还田可将秸秆变废为宝、增加土壤有机质,是处理香蕉秸秆废弃物的重要途径。

由于香蕉秸秆具有茎秆粗大、纤维多、含水率高等特点^[7-8],其结构和力学特性相较于其他农作物秸秆有极大差异,粉碎过程中易出现秸秆粉碎不均、纤维缠绕等问题,严重制约了香蕉秸秆机械化粉碎还田技术的应用与推广。另一方面,在研发香蕉秸秆粉碎还田机具过程中,仅通过试验难以从微观角度分析秸秆与机具的互作机制,阻碍了香蕉秸秆粉碎还田技术理论的发展。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的应用,可通过建立不同柔性秸秆和作物秸秆的仿真模型模拟秸秆粉碎过程,是探究香蕉秸秆在粉碎室内运动规律的有效途径。廖宜涛等^[9]使用 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。盛越等^[10]利用离散元法,选取 Hertz - Mindlin with bonding 颗粒接触模型建立了整根玉米根系颗粒粘结模型。刘禹辰等^[11]针对玉米秸秆外皮与内瓤力学特性存在显著差异问题,建立离散元玉米秸秆双层粘结双峰分布模型,标定玉米秸秆外皮和内瓤力学参数。张兆国等^[12]用离散元法建立了三七根茎的粘结模型,模拟三七根茎内部结构与损伤情况。上述研究表明,使用 DEM 方法模拟作物秸秆和根茎等具有可行性。但目前针对香蕉秸秆离散元模型的研究较为少见。

本文基于离散元仿真技术建立香蕉秸秆离散元仿真粘结模型,为研究香蕉秸秆粉碎过程中纤维断裂特性提供依据,有效降低田间试验成本,提高研发效率。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以产自海南省乐东黎族自治县生长成熟且无病虫害的巴西蕉秸秆为试验材料,如图 1 所示。由于香蕉秸秆之间存在差异,本研究取不同直径的香蕉秸秆样本 5 根并进行预处理,获得 20 根长 100 mm、平均直径 70 mm 的短秸秆。



图 1 香蕉秸秆

Fig. 1 Banana straw

1.2 香蕉秸秆本征参数测定

本征参数包括密度、泊松比和弹性模量等。其中密度 ρ 由排水法测得,为 137 kg/m^3 。

泊松比 μ 是反映香蕉秸秆横向变形的弹性指数^[13-14]。试验时,选取香蕉秸秆制作边长为 10 mm 的立方体标准试样,计算式为

$$\mu = \left| \frac{\delta_1}{\delta_2} \right| = \frac{W_1 - W_2}{L_1 - L_2} \quad (1)$$

式中 δ_1 ——香蕉秸秆横向变形量,mm

δ_2 ——香蕉秸秆轴向变形量,mm

W_1 ——香蕉秸秆压缩前横向尺寸,mm

W_2 ——香蕉秸秆压缩后横向尺寸,mm

L_1 ——香蕉秸秆压缩前轴向尺寸,mm

L_2 ——香蕉秸秆压缩后轴向尺寸,mm

弹性模量 E 和剪切模量 K 通过压缩试验获得,其计算式分别为

$$E = \frac{FL}{S\Delta L} \quad (2)$$

$$K = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3)$$

式中 F ——香蕉秸秆弹性变形阶段最大承受力,N

L ——样本初始长度,mm

S ——样本横截面积, mm^2

ΔL ——样本压缩前、后长度差,mm

通过 TA.XT Plus 型质构仪(SMS 公司,英国)单轴压缩试验测量香蕉秸秆泊松比和弹性模量,如图 2 所示,加载速度为 0.004 m/s ,试验重复 20 次,得到香蕉秸秆样本泊松比、弹性模量、剪切模量分别为 0.41 、 $1.35 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、 $4.8 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

1.3 基本接触参数测定

1.3.1 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数表征物料碰撞后的恢复能力,只与材料本身有关,其数值为碰撞前后两物体在接触点处的法向相对分离速度与法向相对接近速度之比,本研究涉及香蕉秸秆之间的接触以及香蕉秸秆

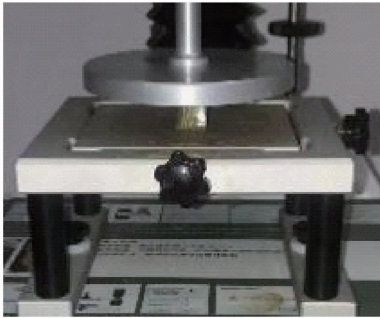


图 2 香蕉秸秆压缩试验

Fig. 2 Banana straw compression test

和钢之间的接触,借助高速摄影机和刻度尺对该参数进行测量^[15-16]。

测量香蕉秸秆和 45 号钢之间的碰撞恢复系数时,如图 3 所示,将香蕉秸秆提升至固定高度 H_0 并调整姿势,使其释放时呈自由落体运动并与钢板碰撞,记录第 1 次反弹时反弹高度 H_1 ,香蕉秸秆与钢板之间的恢复系数 e_1 计算式为

$$e_1 = \sqrt{\frac{H_1}{H_0}} \tag{4}$$

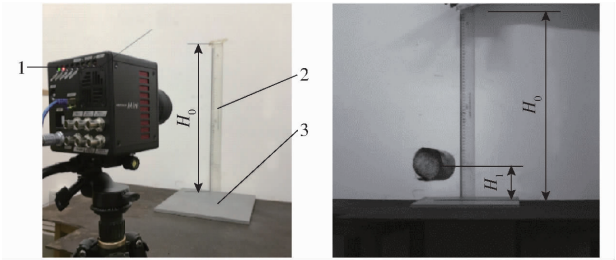


图 3 香蕉秸秆与 45 号钢间的碰撞恢复系数测量

Fig. 3 Test of collision recovery coefficient between banana straw and steel plate

1. 高速摄影机 2. 刻度尺 3. 45 号钢

重复试验 20 次,并取平均值为试验结果,测得香蕉秸秆与钢之间的碰撞恢复系数 e_1 为 0.437。

测量香蕉秸秆之间的碰撞恢复系数时,将图 3 中的钢板换成香蕉秸秆,将香蕉秸秆于相同高度释放,下落高度记为 H_2 ,碰撞后反弹高度记为 H_3 ,如图 4 所示,香蕉秸秆间的碰撞恢复系数 e_2 计算式为

$$e_2 = \sqrt{\frac{H_3}{H_2}} \tag{5}$$

重复以上试验 20 次,并取平均值为试验结果,测得香蕉秸秆之间的碰撞恢复系数 e_2 为 0.315。

1.3.2 静摩擦因数

测定香蕉秸秆与钢之间的静摩擦因数 μ_1 时,将 45 号钢测试平板水平放置于水平铁架台上,将制好的香蕉秸秆试样沿轴向放置于平板中央,缓慢转动测试平板,通过高速摄影机拍摄下香蕉秸秆出现滑动时刻的图像^[17-18],如图 5a 所示,测量得到此时平

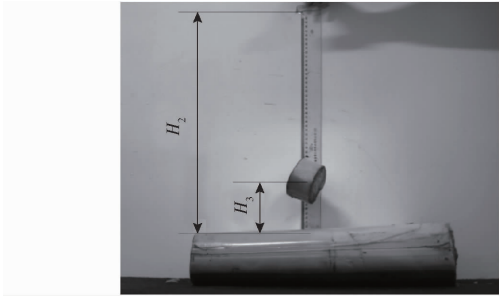


图 4 香蕉秸秆之间的碰撞恢复系数测量

Fig. 4 Test of collision recovery coefficient between banana straws

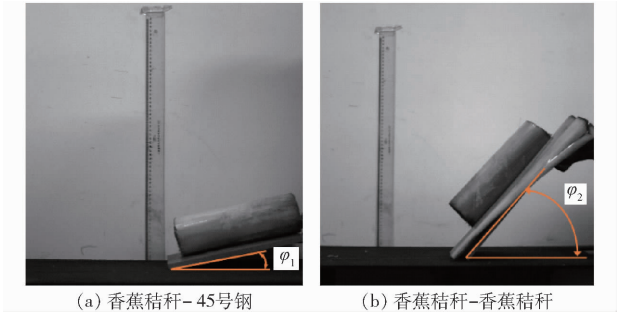


图 5 静摩擦因数测量

Fig. 5 Test of static friction coefficient

板倾斜角 φ_1 ,试验重复 20 次并取平均值。香蕉秸秆与钢之间的静摩擦因数计算式为

$$\mu_1 = \tan \varphi_1 \tag{6}$$

同理,测定香蕉秸秆之间的静摩擦因数 μ_2 时,只需在测试平板上铺一层香蕉秸秆外皮即可,记录香蕉秸秆出现滑动时刻的倾斜角 φ_2 ,如图 5b 所示,重复试验 20 次并取平均值。香蕉秸秆之间的静摩擦因数计算式为

$$\mu_2 = \tan \varphi_2 \tag{7}$$

试验得到香蕉秸秆与 45 号钢之间、香蕉秸秆之间的静摩擦因数分别为 0.194、1.150。

1.3.3 滚动摩擦因数

香蕉秸秆滚动摩擦因数测定的测试台与静摩擦因数测定相同^[19]。香蕉秸秆在滚动过程中,滚动摩擦力偶矩 M 与支撑面正压力 F_n 成正比,随着斜面倾角增大,香蕉秸秆开始滚动。香蕉秸秆发生滚动时的受力分析如图 6 所示,滚动摩擦因数计算式为

$$f = \frac{M}{F_n} = r \tan \theta \tag{8}$$

其中

$$F_n = G \cos \theta \tag{9}$$

$$M = G r \sin \theta \tag{10}$$

式中 f ——滚动摩擦因数

G ——香蕉秸秆重力,N

θ ——香蕉秸秆在测试平板上开始滚动时的角度,(°)

r ——香蕉秸秆横截面半径,m

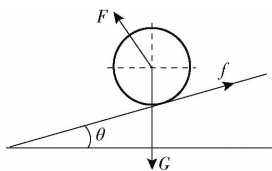


图 6 香蕉秸秆滚动受力图

Fig. 6 Banana straw rolling force diagram

将香蕉秸秆置于 45 号钢测试平板和铺了香蕉秸秆外皮的测试平板上分别进行测试,如图 7 所示,各重复 20 次,测得香蕉秸秆在测试平板上发生滚动时刻的平板倾斜角 θ_1 、 θ_2 分别为 9° 、 12° ,计算得香蕉秸秆与钢之间滚动摩擦因数 f_1 、香蕉秸秆之间的滚动摩擦因数 f_2 分别为 0.006、0.009。

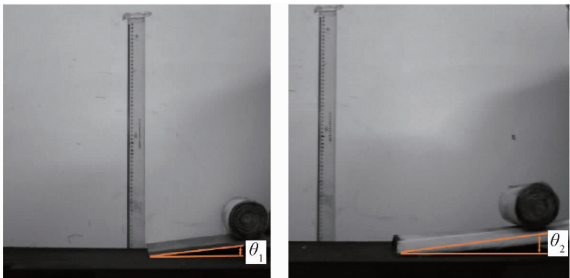


图 7 滚动摩擦因数测量

Fig. 7 Test of rolling friction coefficient

1.4 香蕉秸秆剪切力学特性测定

利用 TA.XT Plus 型质构仪 (SMS 公司,英国) 以有支撑剪切的方式慢速对香蕉秸秆施加载荷的方式进行剪切试验,记录加载过程的力值变化。将香蕉秸秆置于质构仪试验平台上,以速度 0.004 m/s 向下加载剪切刀具,如图 8 所示。

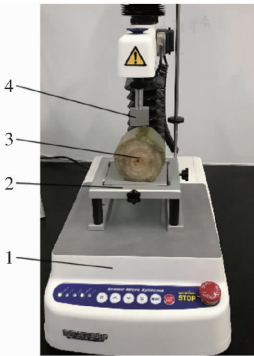


图 8 香蕉秸秆剪切试验

Fig. 8 Banana straw shear test

1. 质构仪 2. 剪切试验台 3. 香蕉秸秆 4. 剪切刀具

香蕉秸秆由结构、性质相同的叶鞘层层包裹而成,如图 9 所示。经测量,组成香蕉秸秆的叶鞘厚度最大可达 8 mm。因此选择刀具的切割深度为 8 mm,可以确保至少贯穿一层叶鞘。对每根短秸秆在不同位置剪切 5 次,取破坏秸秆外皮过程中的最大剪切力的平均值为最终结果,并记录剪切过程中刀具的

受力情况如图 10 所示,整个剪切过程中的最大剪切力为 122.41 N。



图 9 香蕉秸秆内部结构图

Fig. 9 Internal structure diagram of banana straw

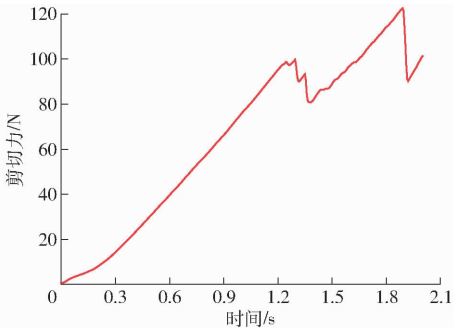


图 10 剪切力-时间曲线

Fig. 10 Shear force and time curve

由图 10 可以看出,在对香蕉秸秆进行剪切试验的过程中,随着刀具的向下运动,剪切力越来越大,到达峰值以后呈急速减少趋势,后剪切力又有回升。该过程对应为剪切力压断了外层叶鞘纤维进入到内层,剪切力又有回升则是又触及到了第 2 层叶鞘,由于组成香蕉秸秆的层层叶鞘,具有相似的结构和特性,为减少仿真模型验证的仿真时间,只需保证剪切试验刀具至少贯穿一层叶鞘,即可进行后续的仿真建模,获得可靠的香蕉秸秆离散元模型。在以往香蕉秸秆粉碎机进行田间试验的过程中发现秸秆纤维较难粉碎,常以长条状成堆覆盖田间,严重影响了香蕉秸秆粉碎效果和抛撒均匀性^[20-27]。因此,以香蕉秸秆剪切试验过程中获得的最大剪切力为试验结果建立香蕉秸秆离散元模型。

2 香蕉秸秆仿真粘结模型建立及参数标定

2.1 离散元接触模型选择

由于香蕉秸秆剪切模型建立的关键在于模拟秸秆纤维之间的粘结作用,而 EDEM 仿真软件中的 Hertz - Mindlin with bonding 模型是在 Hertz - Mindlin 模型的基础上,加入了颗粒间粘结作用,可以形成具有一定机械强度的粘连颗粒体模型。在模型中,通过粘结键来描述两个粒子的结合,如图 11 所示。

图中 F_b 为颗粒 A 作用于颗粒 B 的合力; M_n 和

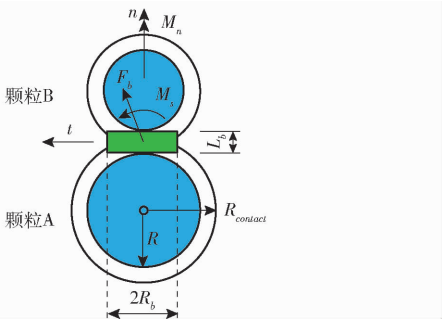


图 11 粘结接触模型
Fig. 11 Bonded particle model

M_n 分别为法向扭矩和切向扭矩； n 和 t 分别是它们的法向分量和切向分量； L_b 为颗粒 A 和颗粒 B 的重叠量； R_b 为粘结盘半径； R 为粒子半径； $R_{contact}$ 为粒子之间的接触半径。

该模型使相邻两颗粒在接触点处发生平行粘结，平行键作用效果相当于一组分布在球形颗粒周围上的一组弹簧^[28]，在模型建立过程中颗粒互相粘结形成粘结键。该接触模型适用于模拟剪切破碎等问题。通过接触点处的力和扭矩来描述机械性能。

因此离散元接触模型选择 Hertz - Mindlin with bonding 模型，以该颗粒体模拟生成秸秆，当颗粒间受到的应力达到设置的极限应力时，粘结键将会断裂，模拟刀具作用在香蕉秸秆外皮使之破碎的过程，粘结键模拟了香蕉秸秆纤维的韧性。为了获得可靠的香蕉秸秆离散元仿真模型，需对粘结模型的 4 个关键参数——法向与切向刚度、法向与切向应力进行标定。

组成粘结键的每组弹簧在 4 个方向上（法向力和切向力、法向力矩和切向力矩）都经历载荷增量，表示为^[28-30]

$$\delta F_b^n = -v_n S_n A \delta t \tag{11}$$

$$\delta F_b^t = -v_t S_t A \delta t \tag{12}$$

$$\delta M_b^n = -\omega_n S_n J \delta t \tag{13}$$

$$\delta M_b^t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta t \tag{14}$$

式中 δt ——时间步长，s
 v_n ——颗粒法向速度，m/s
 v_t ——颗粒切向速度，m/s
 ω_n ——颗粒法向角速度，rad/s
 ω_t ——颗粒切向角速度，rad/s
 J ——惯性矩，m⁴
 A ——接触区域面积，m²
 δM_b^n ——法向力矩，N·m
 δM_b^t ——切向力矩，N·m
 S_n ——单位面积法向刚度，N/m³

S_t ——单位面积切向刚度，N/m³
 δF_b^n ——法向粘结力，N
 δF_b^t ——切向粘结力，N

δM_b^n 和 δM_b^t 表示粘结键在法向和切向方向上的力矩，分别体现粘结键的弯曲变形和扭转。 δF_b^n 和 δF_b^t 分别表示粘结键的法向拉伸和切向拉伸。当外力超过以上 4 个力中任何一个时，都将导致粘结键断裂。粘结键断裂行为可表示为

$$\sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_b^t}{J} R_b \tag{15}$$

$$\tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{2M_b^n}{J} R_b \tag{16}$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——法向临界应力，Pa
 $\tau_{\max}$ ——切向临界应力，Pa

2.2 香蕉秸秆剪切仿真模型建立

由于香蕉秸秆由层层叶鞘组成，且在叶鞘含有韧性很强的秸秆纤维，整体物理结构较复杂，因此在建模过程中将模型进行了简化，将各向异性的香蕉秸秆等效为各向同性结构^[29, 31-33]。根据香蕉秸秆本征参数和接触参数测定结果，可以得出香蕉秸秆离散元仿真模型基本参数如表 1 所示。粘结参数参考藤茎类物料仿真参数^[9]，如表 2 所示。

表 1 香蕉秸秆仿真模型参数	
Tab.1 Banana straw simulation model parameters	
参数	数值
香蕉秸秆泊松比	0.41
香蕉秸秆密度/(kg·m ⁻³)	137
香蕉秸秆剪切模量/Pa	4.8 × 10 ⁸
铜泊松比	0.3
铜密度/(kg·m ⁻³)	7 850
铜剪切模量/Pa	7.94 × 10 ¹⁰
香蕉秸秆-铜碰撞恢复系数 e_1	0.437
香蕉秸秆-铜静摩擦因数 μ_1	0.194
香蕉秸秆-铜滚动摩擦因数 f_1	0.006
香蕉秸秆间碰撞恢复系数 e_2	0.315
香蕉秸秆间静摩擦因数 μ_2	1.150
香蕉秸秆间滚动摩擦因数 f_2	0.009

表 2 香蕉秸秆剪切仿真模型粘结参数	
Tab.2 Banana straw shear simulation model bonding parameters	
参数	数值
法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	1.5 × 10 ⁷ ~ 7.5 × 10 ⁷
切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	5.0 × 10 ⁵ ~ 6.5 × 10 ⁶
临界法向应力/Pa	2.0 × 10 ⁴ ~ 1.8 × 10 ⁵
临界切向应力/Pa	2.0 × 10 ⁴ ~ 1.8 × 10 ⁵

在 EDEM 里生成一个长 100 mm、直径 70 mm 的圆柱形容器，颗粒生成方式选择动态生成，共生成了

60 762 个颗粒。添加粘结键后如图 12a 所示,隐藏颗粒后显示的粘结键模型如图 12b 所示。

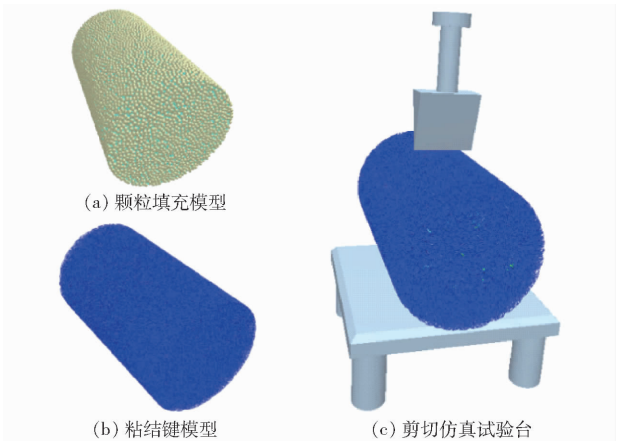


图 12 香蕉秸秆剪切试验仿真模型

Fig. 12 Banana straw shear test simulation model

秸秆建模结束后,通过三维软件 SolidWorks 建立剪切试验台和剪切刀具,导入 EDEM,剪切试验仿真模型搭建如图 12c 所示。仿真试验中刀具进入的深度与实际剪切试验深度一致,为 8 mm。

2.3 粘结参数标定试验设计

2.3.1 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。为了保证参数标定过程中参数可靠性,避免参数取值超过范围造成不良影响,根据中心组合设计原理,结合表 2 中参数上下限值数值设计响应曲面试验;以确定的基本接触参数和设定的粘结参数建立模型,开展香蕉秸秆剪切仿真试验,试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Experiment factors codes

编码	因素			
	$x_1/(N \cdot m^{-1})$	$x_2/(N \cdot m^{-1})$	x_3/Pa	x_4/Pa
-2	1.5×10^7	5.0×10^5	2.0×10^4	2.0×10^4
-1	3.0×10^7	2.0×10^6	6.0×10^4	6.0×10^4
0	4.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5
1	6.0×10^7	5.0×10^6	1.4×10^5	1.4×10^5
2	7.5×10^7	6.5×10^6	1.8×10^5	1.8×10^5

2.3.2 粘结参数标定

剪切试验仿真模型搭建完成以后,进行剪切仿真试验。设定刀具运动速度为 0.004 m/s,方向垂直向下,设置仿真计算固定时间步长为 3.5×10^{-6} s。通过牛顿第三定律可知,粘结键和颗粒所受应力矢量和等于剪切刀具所受的力。因此可以将刀具所受的力等效于剪切过程秸秆模型受力,可用于秸秆外

皮剪切过程仿真。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_1 、切向接触刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 、临界切向应力 x_4 等 4 个粘结参数,开展香蕉秸秆剪切仿真试验,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 4 所示。

表 4 粘结参数响应面试验设计与结果

Tab.4 Experimental design and results of response surface for bonding parameters

序号	因素				剪切力
	$x_1/(N \cdot m^{-1})$	$x_2/(N \cdot m^{-1})$	x_3/Pa	x_4/Pa	F_s/N
1	4.5×10^7	3.5×10^6	1.8×10^5	1.0×10^5	126.10
2	7.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	119.99
3	3.0×10^7	2.0×10^6	6.0×10^4	6.0×10^4	94.90
4	3.0×10^7	5.0×10^6	1.4×10^5	1.4×10^5	112.32
5	4.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	117.33
6	6.0×10^7	5.0×10^6	1.4×10^5	1.4×10^5	134.64
7	6.0×10^7	2.0×10^6	6.0×10^4	1.4×10^5	115.80
8	4.5×10^7	3.5×10^6	2.0×10^4	1.0×10^5	95.91
9	4.5×10^7	5.0×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	108.96
10	3.0×10^7	2.0×10^6	1.4×10^5	1.4×10^5	103.09
11	6.0×10^7	2.0×10^6	1.4×10^5	6.0×10^4	119.93
12	3.0×10^7	2.0×10^6	6.0×10^4	1.4×10^5	90.26
13	1.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	85.32
14	3.0×10^7	5.0×10^6	1.4×10^5	6.0×10^4	112.68
15	4.5×10^7	6.5×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	131.37
16	4.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	116.18
17	4.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	1.8×10^5	115.90
18	3.0×10^7	5.0×10^6	6.0×10^4	1.4×10^5	97.94
19	4.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	1.0×10^5	115.89
20	6.0×10^7	5.0×10^6	6.0×10^4	1.4×10^5	114.70
21	4.5×10^7	3.5×10^6	1.0×10^5	2.0×10^4	115.75
22	6.0×10^7	5.0×10^6	1.4×10^5	6.0×10^4	133.45
23	6.0×10^7	2.0×10^6	6.0×10^4	6.0×10^4	114.95
24	6.0×10^7	2.0×10^6	1.4×10^5	1.4×10^5	118.81
25	3.0×10^7	5.0×10^6	6.0×10^4	6.0×10^4	99.40
26	6.0×10^7	5.0×10^6	6.0×10^4	6.0×10^4	117.90
27	3.0×10^7	2.0×10^6	1.4×10^5	6.0×10^4	105.06

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 0.979 0。方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,二次全模拟 P 小于 0.01,表明试验因素的改变对模型有极显著影响,且失拟项 P 大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能准确反映香蕉秸秆模型进行剪切试验时剪切力与法向接触刚度 x_1 、切向接触刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 、临界切向应力 x_4 之间的关系,可以得到可靠的参数标定结果。其中法向接触刚度 x_1 及其平方项、切向接触刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 对剪切力 F_s 有极显著影响;

表5 剪切力响应曲面二次全模型方差分析

Tab.5 Quadratic full model variance analysis of shear force response surface

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4 014. 28	14	286. 73	40. 02	<0. 000 1 **
x_1	2 088. 10	1	2 088. 10	291. 43	<0. 000 1 **
x_2	459. 77	1	459. 77	64. 17	<0. 000 1 **
x_3	994. 66	1	994. 66	138. 82	<0. 000 1 **
x_4	4. 51	1	4. 51	0. 628 9	0. 443 1
x_1x_2	0. 293 0	1	0. 293 0	0. 040 9	0. 843 1
x_1x_3	3. 21	1	3. 21	0. 447 5	0. 516 2
x_1x_4	2. 36	1	2. 36	0. 329 9	0. 576 3
x_2x_3	64. 61	1	64. 61	9. 02	0. 011 0 *
x_2x_4	0. 582 0	1	0. 582 0	0. 081 2	0. 780 5
x_3x_4	2. 39	1	2. 39	0. 333 1	0. 574 5
x_1^2	274. 29	1	274. 29	38. 28	<0. 000 1 **
x_2^2	13. 32	1	13. 32	1. 86	0. 197 7
x_3^2	47. 97	1	47. 97	6. 69	0. 023 8 *
x_4^2	1. 85	1	1. 85	0. 258 2	0. 620 6
残差	85. 98	12	7. 17		
失拟项	84. 82	10	8. 48	14. 57	0. 065 9
纯误差	1. 16	2	0. 582 1		
总和	4 100. 26	26			

注：**表示极显著($P < 0.01$), *表示显著($0.01 \leq P < 0.05$)。下同。

临界法向应力 x_3 的平方项、切向接触刚度 x_2 和临界法向应力 x_3 的交互项对剪切力有显著影响;其余各项均不显著。

根据回归方程分别得到各因素交互作用对剪切力和相对误差 e 影响的响应曲面,如图 13 所示。由图 13 可知,当临界法向应力固定时,法向接触刚度

和切向接触刚度的响应曲面如图 13a、13d 所示,当法向接触刚度不变时,剪切力随着切向接触刚度增大逐渐增加,相对误差先减小后增加;当切向接触刚度不变时,剪切力随着切向接触刚度增大逐渐增加,相对误差呈先减小后增加的趋势,且变化趋势明显。

切向接触刚度固定时,法向接触刚度和临界法向应力的响应曲面如图 13b、13e 所示,当法向接触刚度不变时,剪切力随临界法向应力增大逐渐增加,相对误差先减小后增加;当临界法向应力不变时,剪切力随着法向接触刚度增大逐渐增加,相对误差先减小后增加。

法向接触刚度固定时,切向接触刚度和临界法向应力的响应曲面如图 13c、13f 所示,当切向接触刚度不变时,剪切力随临界法向应力增大逐渐增加,相对误差先减小后增加;当临界法向应力不变时,剪切力随切向接触刚度增大逐渐增加,相对误差先减小后增加。

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,结果表明使用二次全模型方程拟合时,决定系数 R^2 为 0.976 9,方差分析如表 6 所示,可获得剪切力的二次回归模型为

$$F_s = 35.80 + 2.06 \times 10^{-6} x_1 - 2.89 \times 10^{-6} x_2 + 2.31 \times 10^{-4} x_3 + 2.6 \times 10^{-5} x_4 + 3.35 \times 10^{-11} x_2 x_3 - 1.59 \times 10^{-14} x_1^2 + 3.51 \times 10^{-13} x_2^2 - 9.37 \times 10^{-10} x_3^2 - 1.84 \times 10^{-10} x_4^2 \quad (17)$$

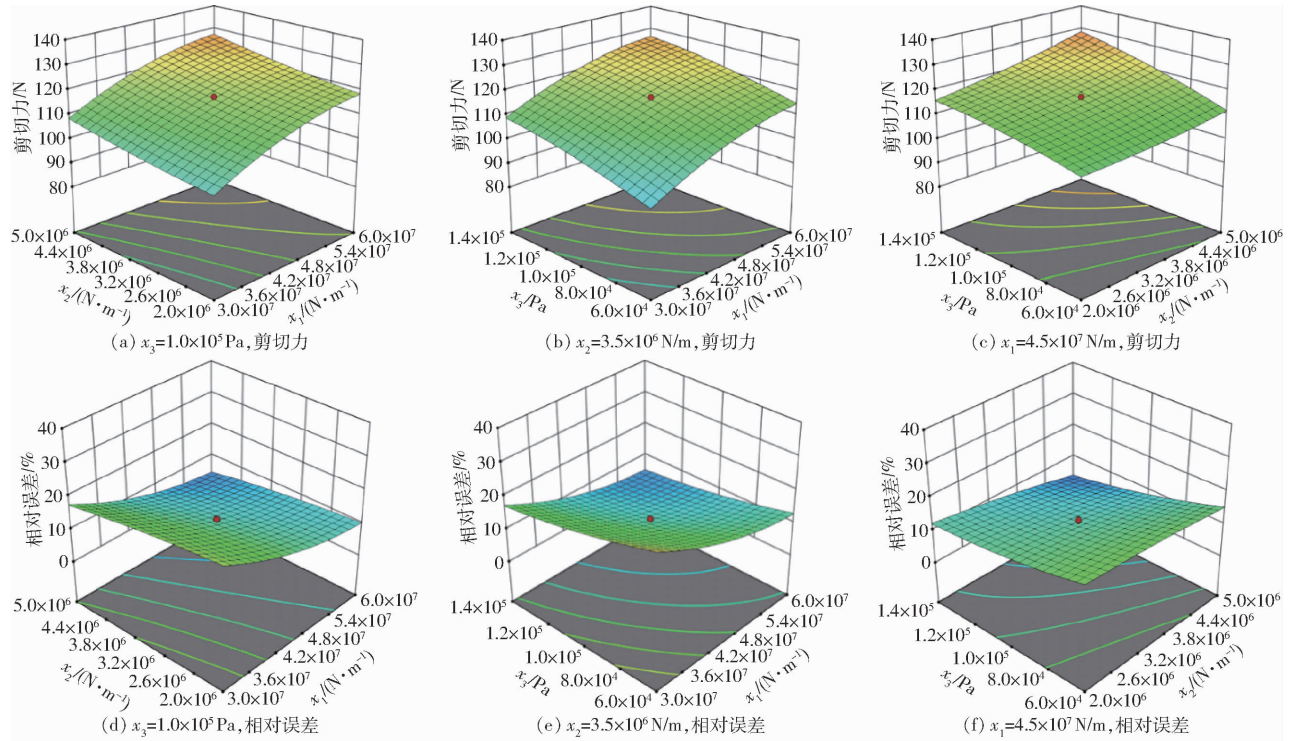


图 13 交互因素对剪切力和相对误差的响应曲面

Fig. 13 Response surface diagrams of interaction factors to shearing force and relative error

由 Design-Expert 软件寻找 F_s 的目标值也就是实际外皮剪切试验中的最大剪切力 122.41 N,通过软件计算获得最优解,即粘结模型参数标定结果: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 5.89×10^7 、 2.49×10^6 N/m 和 1.39×10^5 、 1.34×10^5 Pa。

表 6 优化后剪切力响应曲面二次全模型方差分析
Tab. 6 Modified quadratic full model variance analysis of shear force response surface

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	4 005.45	9	445.05	79.80	<0.000 1 **
x_1	2 088.10	1	2 088.10	374.40	<0.000 1 **
x_2	459.77	1	459.77	82.44	<0.000 1 **
x_3	994.66	1	994.66	178.34	<0.000 1 **
x_4	4.51	1	4.51	0.808 0	0.381 3
$x_2 x_3$	64.61	1	64.61	11.58	0.003 4 **
x_1^2	274.29	1	274.29	49.18	<0.000 1 **
x_2^2	13.32	1	13.32	2.39	0.140 6
x_3^2	47.97	1	47.97	8.60	0.009 3 **
x_4^2	1.85	1	1.85	0.331 7	0.572 2
残差	94.81	17	5.58		
失拟项	93.65	15	6.24	10.73	0.088 5
纯误差	1.16	2	0.582 1		
总和	4 100.26	26			

3 香蕉秸秆粘结模型剪切验证

为了验证香蕉秸秆离散元粘结模型粘结参数标定的可靠性与准确性,以粘结模型参数标定结果进行 EDEM 仿真验证,仿真试验中刀具进入深度为 8 mm(图 14),与实际剪切试验的深度一致。通过 EDEM 后处理模块导出剪切力随时间变化曲线,与实际剪切试验曲线进行对比,如图 15 所示。

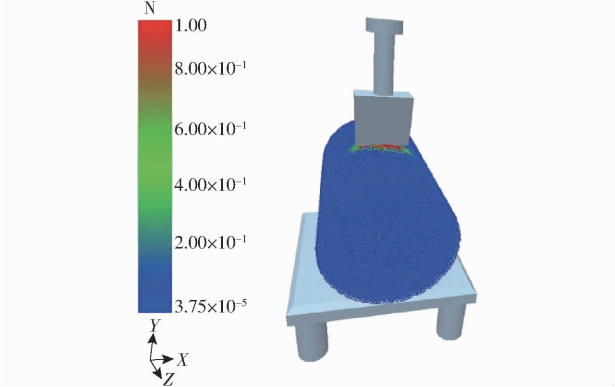


图 14 香蕉秸秆剪切仿真试验
Fig. 14 Simulation test of banana straw shearing

由图 15 可知,仿真与实际试验的剪切力都随时间呈整体增长趋势。在 0 ~ 1 s 之间剪切力随时间近似直线增长,1 ~ 2 s 之间仿真与实际试验的剪切

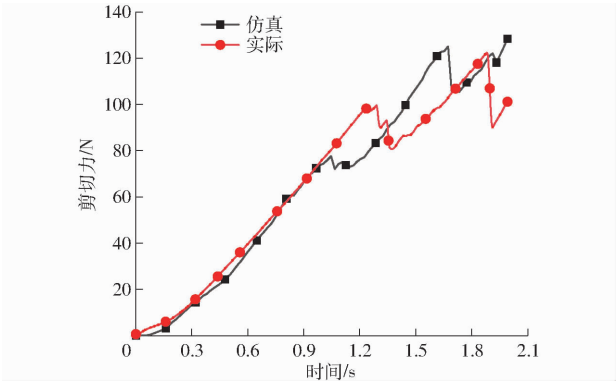


图 15 剪切试验对比曲线
Fig. 15 Shear test contrast curves

力随时间均有波动。其主要原因在于香蕉秸秆是由螺旋状的叶鞘层层紧密包裹组成的结构(图 9),外层为质地坚硬的韧皮,内含有韧性很强的秸秆纤维,在实际剪切过程中,当外层表皮和内层纤维发生破坏时剪切力会有骤减现象,分别对应曲线中的两次下降;随着刀具的深入,由于刀具和香蕉秸秆间接触面积增大,摩擦力增大,导致破坏行为发生后,剪切力随着时间继续增大,呈整体上升趋势。仿真试验中,由于香蕉秸秆离散元模型颗粒间存在粘结键作用,刀具向下运动破坏粘结键,当粘结键发生断裂时,剪切力减小;随着刀具深入,摩擦力增大,剪切力又有回升,整体呈上升趋势。

仿真和实际试验中剪切力的减小现象存在一定时间差,主要原因是为减少仿真计算量、提高仿真效率,将香蕉秸秆简化为采用各向同性颗粒填充的仿真模型,导致粘结键发生断裂时刻与实际香蕉秸秆纤维断裂时刻存在小范围不同步。结果表明,仿真试验与实际试验剪切力随时间变化情况整体趋势十分相近,且剪切过程中最大剪切力相对误差仅为 2.34%,证明该香蕉秸秆离散元粘结键模型具有可靠性。

4 结论

(1)通过碰撞恢复试验、静摩擦及滚动摩擦台架试验和质构仪剪切试验获取香蕉秸秆本征参数,并获取刀具加载过程中的剪切力变化曲线,得到剪切过程中最大剪切力为 122.41 N,与仿真试验进行对比,从而标定了香蕉秸秆离散元粘结模型关键参数。

(2)根据 CCD 响应曲面法,建立粘结键 4 个关键参数与剪切力之间的二次回归模型,求解得到最优解,即粘结模型参数标定结果: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 5.89×10^7 N/m、 2.49×10^6 N/m、 1.39×10^5 Pa、 1.34×10^5 Pa。

(3)离散元仿真试验与实际试验对比验证结果表明,仿真与实际试验的时间-剪切力曲线变化趋势基本一致,仿真与实际试验过程中的最大剪切力相对误差为 2.34%,表明采用 EDEM 粘结键方式建立的香蕉秸秆离散元模型具有可靠性和准确性。

参 考 文 献

[1] 王永芬,杨宝明,何平,等. 十个不同生态型香蕉品种在云南主产区的田间评价及综合排名[J]. 热带农业科学, 2022, 42(2): 1-8.
WANG Yongfen, YANG Baoming, HE Ping, et al. Field evaluation and comprehensive ranking of 10 different ecotype banana varieties in the main producing areas of Yunnan[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2022, 42(2): 1-8. (in Chinese)

[2] 胡从九. 浅析世界香蕉市场变化及趋势[J]. 中国热带农业, 2020(6): 39-41.
HU Congjiu. Analysis on the change and trend of banana market in the world[J]. China Tropical Agriculture, 2020(6): 39-41. (in Chinese)

[3] 朱正波,杨洲,孙健峰,等. 香蕉落梳机气动夹持部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 33-39.
ZHU Zhengbo, YANG Zhou, SUN Jianfeng, et al. Parameter optimization and experiment of pneumatic holding part for banana crown cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 33-39. (in Chinese)

[4] GUO Jie, KARKEE M, YANG Zhou, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of banana bunch stalk for postharvest machine development[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106308.

[5] 苏继龙,刘远力,吴金东. 香蕉采摘机械的研究现状与发展趋势[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 131-137.
SU Jilong, LIU Yuanli, WU Jindong. Research status and development trend of banana picking machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(7): 131-137. (in Chinese)

[6] 李佳琪. 世界香蕉贸易格局变化对中国香蕉市场的影响研究[D]. 海口:海南大学, 2015.
LI Jiaqi. The study on world banana trade pattern and its influence on Chinese banana market[D]. Haikou: Hainan University, 2015. (in Chinese)

[7] 徐小俊,刘恩平. 我国香蕉市场与产业调查分析报告[J]. 农产品市场, 2021(12): 44-46.
XU Xiaojun, LIU Enping. Banana market and industry survey and analysis report of China[J]. Agricultural Products Market, 2021(12): 44-46. (in Chinese)

[8] 王全永,欧燕芳. 我国香蕉产业标准化现状和对策[J]. 中国标准化, 2021(3): 147-152.
WANG Quanyong, OU Yanfang. Present situation and countermeasures of banana industry standardization in China[J]. Standardization in China, 2021(3): 147-152. (in Chinese)

[9] 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. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73-82. (in Chinese)

[10] 盛越,田海清,王迪,等. 玉米根系离散元模型建立及仿真参数标定研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(2): 164-170.
SHENG Yue, TIAN Haiqing, WANG Di, et al. Study on establishment of discrete element model of maize root system calibration of simulation parameters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 164-170. (in Chinese)

[11] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(1): 45-54.
LIU Yuchen, ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(1): 45-54. (in Chinese)

[12] 张兆国,薛浩田,王一驰,等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 100-111.
ZHANG Zhaoguo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100-111. (in Chinese)

[13] 张荣芳,周纪磊,刘虎,等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 69-77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 69-77. (in Chinese)

[14] 史瑞杰,戴飞,赵武云,等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 146-155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 146-155. (in Chinese)

[15] 刘羊,宗望远,马丽娜,等. 采用高速摄影技术测定油菜籽粒三维碰撞恢复系数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 44-53.
LIU Yang, ZONG Wangyuan, MA Li'na, et al. Determination of three-dimensional collision restitution coefficient of oil

- sunflower grain by high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 44–53. (in Chinese)
- [16] 王立军, 刘天华, 冯鑫, 等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 313–322.
WANG Lijun, LIU Tianhua, FENG Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 313–322. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] ZHONG Jiaqin, TAO Limin, LI Shangping, et al. Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 203: 107428.
- [19] 曹宸嘉, 高爱民, 王红松, 等. 藜麦秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(10): 47–51.
CAO Chenjia, GAO Aimin, WANG Hongsong, et al. Determination of quinoa straw contact parameters and calibration of discrete element method simulation[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(10): 47–51. (in Chinese)
- [20] 贺宁波, 李粤, 郭超凡, 等. 香蕉秸秆粉碎还田机刀片优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 85–91.
HE Ningbo, LI Yue, GUO Chaofan, et al. Optimization design and test of blade of banana straw returning machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12): 85–91. (in Chinese)
- [21] 魏思林. 基于耦合仿生机理立式香蕉秸秆粉碎还田机的优化设计[D]. 海口: 海南大学, 2019.
WEI Silin, Optimum design of banana straw crushing and returning combined machine with vertical type based on coupling bionics mechanism[D]. Haikou: Hainan University, 2019. (in Chinese)
- [22] 李粤, 郭超凡, 姚德宇, 等. 定刃刀防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 11–19.
LI Yue, GUO Chaofan, YAO Deyu, et al. Design and experiment of banana straw crushing and returning machine with anti-wrapping device supported by flailing blade[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 11–19. (in Chinese)
- [23] 李志强, 李粤, 贺宁波, 等. 纵向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 180–184.
LI Zhiqiang, LI Yue, HE Ningbo, et al. Design and experiment of the banana stalk crushing and returning machine with lengthways double rollers type[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 180–184. (in Chinese)
- [24] 魏思林, 李粤, 张喜瑞, 等. 砍切喂入双辊式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 80–84.
WEI Silin, LI Yue, ZHANG Xirui, et al. Design and experiment of double-roller returning machine with the type of cutting and feeding for banana straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 80–84. (in Chinese)
- [25] 郭超凡, 李粤, 姚德宇, 等. 仿生香蕉秸秆粉碎装置关键部件作业参数优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 93–100.
GUO Chaofan, LI Yue, YAO Deyu, et al. Optimization and experiment of operating parameters of key components of bionic banana straw crushing devices[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2022, 43(1): 93–100. (in Chinese)
- [26] 王彬, 于云峰, 张喜瑞. 异向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 6–12.
WANG Bin, YU Yunfeng, ZHANG Xirui. Design and test of counter-twin roll banana straw crushing and returning machine[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 6–12. (in Chinese)
- [27] 张喜瑞, 王自强, 李粤, 等. 滑切防缠式香蕉秸秆还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 26–34.
ZHANG Xirui, WANG Ziqiang, LI Yue, et al. Design and experiment of sliding-cutting and anti-twining returning device for banana straw[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 26–34. (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 on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 58–65. (in Chinese)
- [29] JIMÉNEZ-HERRERA N, BARRIOS K P, TAVARES L M. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(3): 692–706.
- [30] ZHAO Weisong, CHEN Mingjiang, XIE Jianhua, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107502.
- [31] 赖庆辉, 袁海阔, 胡子武, 等. 滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 121–129.
LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and experiment on seedling separation device of *Panax notoginseng* seedlings based on roller zigzag mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121–129. (in Chinese)
- [32] YU Yajun, FU Hong, YU Jianqun. DEM-based simulation of the corn threshing process[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26(5): 1400–1409.
- [33] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 27–35.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 27–35. (in Chinese)