

胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证

史瑞杰 戴 飞 赵武云 张锋伟 石林榕 郭军海

(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对胡麻联合收获过程中茎秆位姿变化与运动特性等关键环节离散元研究缺乏柔性模型和接触参数的问题, 本文以胡麻根部茎秆、中部茎秆、颈部茎秆为研究对象, 以其本征参数为研究基础, 计算得胡麻茎秆各部建模参数, 采用离散元法 bonding 模型构建胡麻茎秆柔性模型, 并以胡麻茎秆各部本征参数、接触参数试验值为水平值, 通过 Plackett – Burman 试验和 Central – Composite 试验确定胡麻茎秆之间、茎秆与收获装备之间的接触参数, 通过胡麻茎秆剪切试验与堆积角试验验证模型可靠性。结果表明: 胡麻植株离散元柔性模型参数中法向刚度 K_n 为 $1.13 \times 10^9 \text{ N/m}^3$, 切向刚度 K_t 为 $5.6 \times 10^8 \text{ N/m}^3$, 法向临界应力 σ 为 6.67 MPa, 切向临界应力 γ 为 8.5 MPa, 粘结半径 R_j 为 0.25 mm; 胡麻茎秆-收获装备间恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数最优值分别为 0.33、0.28、0.14, 胡麻茎秆-胡麻茎秆间恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数最优值分别为 0.3、0.508、0.033; 剪切试验中胡麻茎秆根部、中部、颈部剪切最大载荷与仿真结果相对误差分别为 1.67%、3.09%、5.44%, 堆积角试验中胡麻茎秆平均堆积角与仿真结果相对误差为 0.31%, 误差较小。胡麻茎秆柔性模型与接触参数和实际情况较为相符, 可表征胡麻茎秆物理特性, 为胡麻茎秆离散元仿真提供参考。

关键词: 胡麻茎秆; 离散元法; 柔性模型; 接触参数; 试验验证

中图分类号: S225.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0146-10

OSID:



Establishment of Discrete Element Flexible Model and Verification of Contact Parameters of Flax Stem

SHI Ruijie DAI Fei ZHAO Wuyun ZHANG Fengwei SHI Linrong GUO Junhai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Flax stems contain a large amount of cellulose and have strong toughness. The discrete element rigid model is challenging to express the physical and kinematic characteristics of flax accurately stems in the process of joint harvesting, resulting in the lack of flexible model and contact parameters in the dynamic process of communal harvesting and difficult to micro study. In order to solve this problem, the root, middle, and neck stems of flax were taken as the research objects. The modeling parameters of flax stems were calculated based on the intrinsic parameters. The bonding modeling method of the discrete element method was used to construct the flexible model of flax stems, and the intrinsic parameters and contact parameters of flax stems were set as high and low levels. Plackett – Burman and Central – Composite tests were used to determine the contact parameters between flax stems and harvesting equipment. The flax stem shear test and stacking angle test were used to verify the model's reliability. The results showed that the normal stiffness $K_n = 1.13 \times 10^9 \text{ N/m}^3$, and tangential stiffness $K_t = 5.6 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ in the flax flexible model parameters. Normal critical stress $\sigma = 6.67 \text{ MPa}$, tangential acute stress $\gamma = 8.5 \text{ MPa}$, bond radius $R_j = 0.25 \text{ mm}$. The optimal values of recovery coefficient, static friction coefficient, and dynamic friction coefficient between flax culm – steel parts were 0.33, 0.28 and 0.14, respectively. The optimal values of recovery coefficient, static friction coefficient, and dynamic friction

收稿日期: 2022-05-17 修回日期: 2022-07-28

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-14-1-28)、甘肃省重点研发计划项目(20YF3WA019)、甘肃省科技计划重大专项(21ZD4NA022-05)、甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2021-08)和甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-362)

作者简介: 史瑞杰(1993—), 男, 博士生, 主要从事北方旱区特色作物机械化收获技术与装备研究, E-mail: aete_fcb@163.com

通信作者: 赵武云(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事北方旱区作物生产装备工程研究, E-mail: zhaowy@gsau.edu.cn

coefficient between flax stems – flax stems were 0.3, 0.508, and 0.033, respectively. In the shear test, the relative errors between the maximum shear load and the simulation results were 1.67%, 3.09% and 5.44%, respectively. In the stacking angle test, the relative error between the average stacking angle of the stem and the simulation results was 0.31%. The flexible modulus of flax stem was consistent with the contact parameters and the actual situation. The physical properties of flax stem can be characterized. The research result can provide some reference for discrete element simulation of flax stem.

Key words: flax stem; discrete element method; flexible model; contact parameters; test verification

0 引言

胡麻(*Linum usitatissimum* L.)即油用亚麻,是我国西北和华北黄土高原旱作农业区重要的油料作物,胡麻茎秆含有大量纤维,是提取纤维素的主要原料,胡麻籽可以榨油^[1-3]。戴飞等^[4-5]研制的自走式胡麻联合收割机、丘陵山地胡麻联合收割机填补了国内胡麻联合收获机具的空白;文献[6-9]研制的胡麻割晒机、全喂入式胡麻脱粒机、脱粒物料清选机完善了胡麻分段收获的机械化作业过程,使得胡麻机械化收获程度进一步提高。

随着离散元法在农业工程学科的广泛应用,物料间互作过程的研究取得了一系列研究成果,其中物料离散元模型及接触参数对仿真模型可靠性有重要影响^[10-12]。近年来,JIA等^[13]采用离散元法分析稻秸之间、稻秸与农机部件之间的相互作用关系,结果表明各标定参数下的仿真结果与实测值不具有显著差异;田辛亮等^[14]对黑土区玉米秸秆-土壤混料进行离散元模型建立与参数标定,通过仿真试验对最优参数组合进行对比验证,结果表明标定参数真实可靠;石林榕等^[12,15]对玉米籽粒、胡麻籽粒进行离散元仿真参数标定与排种试验验证,结果表明标定结果与试验验证结果误差较小;郝建军等^[16]利用三维扫描逆向建模技术与 EDEM 软件建立油葵籽粒离散元模型,通过物理试验与虚拟仿真试验对仿真参数进行标定,结果表明油葵籽粒模型和标定所得的离散元仿真参数具有可靠性;侯占峰等^[17]通过物理试验和仿真试验相结合的方法进行冰草种子物理性状参数测定与离散元仿真参数标定,结果表明标定所得最优参数可用于冰草种子丸化包衣过程的离散元仿真试验;韩树杰等^[18]以不同参数组合下的堆积角为响应值确定新疆果园散体厩肥离散元仿真参数,得到显著性参数最优值并进行物理试验验证,结果表明标定参数可靠。精准农业的深入实施和快速发展对作物机械化收获提出了更高的要求,离散元法为现代农业装备数字化设计提供了新手段^[19-20]。同时离散元仿真参数标定多针对谷物籽粒,针对谷物茎秆的研究较少,而对胡麻茎秆的离散元模型建立与接触参数标定鲜见报道。

针对胡麻茎秆含有大量纤维素,茎秆韧性强,联合收获动态仿真过程缺乏参数等现象,本文以胡麻茎秆为研究对象,拟通过胡麻茎秆生物力学特性试验确定其离散元法 bonding 模型建模参数,并以胡麻茎秆各部本征参数与接触参数试验值为高低水平,通过 Plackett – Burman 试验和 Central Composite 试验确定胡麻茎秆之间、茎秆与收获装备之间的接触参数,通过胡麻茎秆剪切试验与堆积角试验验证模型可靠性。

1 胡麻茎秆本征参数测定及离散元柔性模型建立

1.1 本征参数测定

1.1.1 几何尺寸及分布规律

以旱地密植陇亚 14 号胡麻茎秆为试验材料,将胡麻茎秆分为根部、中部、颈部,分别随机截取任意长度的茎秆作为试验材料,使用精度 0.01 mm 数显游标卡尺分别测其样品直径和长度。茎秆样品与直径分布如图 1 所示。其中胡麻根部茎秆平均直径为 2.13 mm,长度为 16.98 mm;中部茎秆平均直径 1.96 mm,长度 17.7 mm;颈部茎秆平均直径 1.53 mm,长度 18.12 mm。

1.1.2 密度与泊松比

使用卤素含水率测量仪进行胡麻茎秆样品含水率测定,根部含水率为 3.87%,中部含水率 3.72%,颈部含水率 3.69%。使用精度 0.001 g 的电子天平对胡麻茎秆样品多次称量后取平均值,同时采用比重瓶测试法测量胡麻茎秆样品体积,重复多次取平均值,通过计算得根部密度为 410.9 kg/m³、中部密度为 485.1 kg/m³、颈部密度为 465.6 kg/m³,平均密度为 453.87 kg/m³。

随机选取胡麻茎秆样品中小样 10 根,在甘肃农业大学机电工程学院力学实验室使用 Stable Micro Systems 质构仪进行胡麻茎秆生物力学特性试验。试验时沿胡麻茎秆样品横向方向施加压力至茎秆不再变形为止,加载速度为 20 mm/min。胡麻茎秆横向变形量由试验机获得,纵向变形量由数显游标卡尺测得,胡麻茎秆泊松比计算公式为

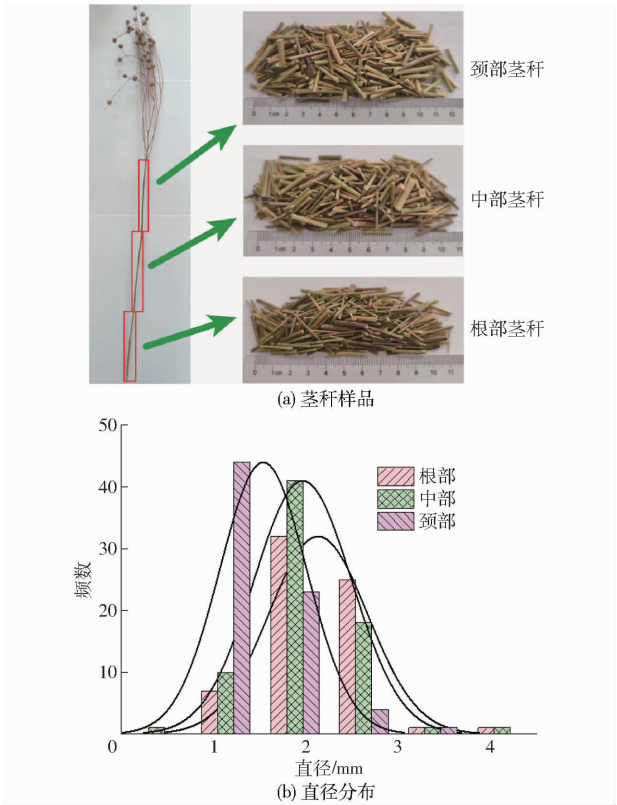


图 1 胡麻茎秆样品与直径分布

Fig. 1 Sample and diameter distribution of flax stem

$$\varepsilon = \frac{|e'|}{|e|} = \frac{W_1 - W_2}{L_1 - L_2} \tag{1}$$

式中 ε ——胡麻茎秆泊松比
 e' ——胡麻茎秆纵向变形量,mm
 e ——胡麻茎秆横向变形量,mm
 W_1 ——加载前胡麻茎秆纵向长度,mm
 W_2 ——加载后胡麻茎秆纵向长度,mm
 L_1 ——加载前胡麻茎秆横向长度,mm
 L_2 ——加载后胡麻茎秆横向长度,mm

经过 10 次试验后由式(1)计算得胡麻茎秆泊松比平均值根部为 0.082,中部为 0.085,颈部为 0.089,平均值为 0.085。

使用 CMT2502 型电子万能材料试验机对胡麻茎秆样品进行多次拉伸试验,该机最大载荷为 500 N,精度为 ± 0.001 N,速度为 1 ~ 500 mm/min,由计算机控制,试验结果取平均值。结果表明:拉伸弹性模量根部为 2 848.23 MPa,中部为 6 416.67 MPa,颈部为 4 674.69 MPa^[21]。胡麻茎秆剪切模量计算公式为

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

式中 G ——胡麻茎秆剪切模量,Pa
 E ——胡麻茎秆弹性模量,Pa

由式(2)计算得胡麻茎秆根部剪切模量为 1 316.19 MPa,中部为 2 956.99 MPa,颈部为 2 146.32 MPa,平均值为 2 139.83 MPa。

1.2 离散元柔性模型建立

采用离散元软件 EDEM 中 Hertz - Mindlin with bonding 模型建立胡麻茎秆柔性模型,在该模型中表征胡麻茎秆的相邻两颗粒在接触点处发生平行粘结,形成粘结键。粘结键的作用效果相当于胡麻茎秆内部作用力,胡麻茎秆受外力作用时通过粘结键破裂情况反映其相关力学特性。为保证能够获得接近于真实状态的胡麻茎秆柔性模型,本文采用双峰分布颗粒群建模方法。该方式颗粒半径服从正态分布,通过大颗粒占据空间位置,小颗粒提高填充密度,降低模型孔隙率,粘结力更加牢固,使颗粒群力学特性与实际情况更接近,且可以减小计算机仿真负荷^[22-24]。采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型时颗粒间粘结键主要参数有法向刚度 K_n 、切向刚度 K_s 、法向临界应力 σ 、切向临界应力 γ 和粘结半径 R_j ^[25-26],计算公式为

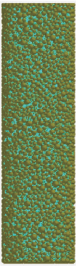
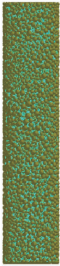
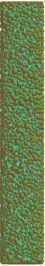
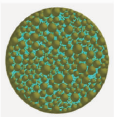
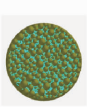
$$\begin{cases} K_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \varepsilon_a^2}{E_a} + \frac{1 - \varepsilon_b^2}{E_b} \right)^{-1} \left(\frac{r_a + r_b}{r_a r_b} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ K_s = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) K_n \\ \sigma = \frac{F}{\pi R^2} \\ \gamma = c + \sigma \tan \varphi \end{cases} \tag{3}$$

式中 $\varepsilon_a, \varepsilon_b$ ——颗粒泊松比
 E_a, E_b ——颗粒弹性模量,MPa
 r_a, r_b ——颗粒半径,mm
 F ——临界压力,N
 R ——压缩面半径,mm
 c ——茎秆内聚力,MPa
 φ ——内摩擦角,(°)

根据 1.1.2 节及课题组前期胡麻茎秆力学压缩、剪切试验结果^[21],取 $c = 4$ MPa, $\varphi = 34^\circ$,将试验数据代入式(3),得出胡麻根部茎秆颗粒之间 $K_n = 1.2 \times 10^9$ N/m³, $K_s = 6 \times 10^8$ N/m³, $\sigma = 13.4$ MPa, $\gamma = 13.04$ MPa, $R_j = 0.25$ mm;胡麻中部茎秆颗粒之间 $K_n = 1.3 \times 10^9$ N/m³, $K_s = 6.5 \times 10^8$ N/m³, $\sigma = 5.6$ MPa, $\gamma = 7.78$ MPa, $R_j = 0.25$ mm;胡麻颈部茎秆颗粒之间 $K_n = 9 \times 10^8$ N/m³, $K_s = 4.5 \times 10^8$ N/m³, $\sigma = 1$ MPa, $\gamma = 4.67$ MPa, $R_j = 0.25$ mm。将胡麻茎秆各部位参数取平均值,得出整株胡麻茎秆柔性模型参数,即 $K_n = 1.13 \times 10^9$ N/m³, $K_s = 5.6 \times 10^8$ N/m³, $\sigma = 6.67$ MPa, $\gamma = 8.5$ MPa, $R_j = 0.25$ mm;由此建立整株胡麻茎秆离散元柔性模型,其中根部离散元模型共产生粘结键 203 095 个,中部 178 330 个,颈部 107 258 个,整株 270 060 个,粘结效果较好。如表 1 所示。

表 1 胡麻茎秆离散元 bonding 模型

Tab.1 Discrete element bonding model of flax stem

部位	根部	中部	颈部	整株
正视图				
俯视图				

2 离散元接触参数测定

胡麻联合收获仿真计算需要测定胡麻茎秆-接触部件、胡麻茎秆-胡麻茎秆间的动摩擦因数、静摩擦因数、恢复系数等,其中胡麻茎秆-接触部件采用自制动静摩擦因数测量仪进行试验得出,胡麻茎秆-胡麻茎秆间的动静摩擦因数采用圆筒提升法试验得出。

2.1 动摩擦因数与静摩擦因数

胡麻茎秆-接触部件动静摩擦因数测量时采用自制动静摩擦因数测量仪(图 2),该仪器包括机架、支撑杆、支撑板、传感器、数显量角器、电动机、旋转轴等。工作时由电动机驱动支撑杆将支撑板升起,绕旋转轴做圆周运动,当支撑板达到一定角度时物料开始下滑,当物料滑至传感器中间位置时,传感器向电动机发出信号,电动机停止工作,支撑板停止旋转,数显量角器显示当前角度。测量动摩擦因数时物料开始发生滚动趋势时支撑板停止旋转,开始读数;测量静摩擦因数时物料滑至传感器时支撑板自

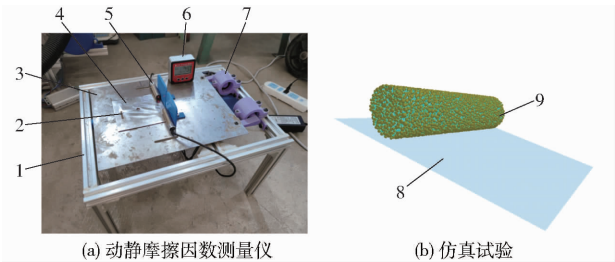


图 2 胡麻根部茎秆动静摩擦因数试验

Fig.2 Dynamical and static friction coefficient test of flax root stem

1. 机架 2. 胡麻茎秆样品 3、8. 支撑板 4. 钢板 5. 传感器
6. 数显量角器 7. 旋转轴 9. 根部茎秆

动停止旋转,开始读数。

利用斜面倾角等于斜面上物体的静摩擦角这一原理可得到研究对象的静摩擦因数^[27],计算公式为

$$\mu = \tan\theta \tag{4}$$

式中 μ ——胡麻茎秆-钢制部件间静摩擦因数
 θ ——支撑板停止工作时与水平面夹角,(°)
多次测量后根据式(4)计算动静摩擦因数后取平均值,可得到胡麻茎秆-钢制部件动静摩擦因数如表 2 所示。

表 2 胡麻茎秆-钢制部件动静摩擦因数
Tab.2 Dynamical and static friction coefficient of flax culm - steel parts

参数	根部	中部	颈部
动摩擦因数	0. 12	0. 15	0. 15
静摩擦因数	0. 27	0. 24	0. 26

2.2 恢复系数

恢复系数采用自由落体试验确定^[15],试验时胡麻茎秆由 350 mm 高处自由下落至钢板表面,使用摄像机记录胡麻茎秆弹起高度(图 3),恢复系数 f 计算公式为

$$f = \frac{|v'_2 - v'_1|}{|v_2 - v_1|} = \frac{|v'_2|}{|v_2|} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \tag{5}$$

式中 v_1 ——胡麻茎秆碰撞前速度,m/s
 v_2 ——钢板碰撞前速度,m/s,碰撞前钢板静止不动, $v_2 = 0$
 v'_1 ——胡麻茎秆碰撞后速度,m/s
 v'_2 ——钢板碰撞后速度,m/s,碰撞后钢板静止不动, $v'_2 = 0$
 h ——碰撞前胡麻茎秆高度,mm
 h' ——碰撞后胡麻茎秆弹起高度,mm

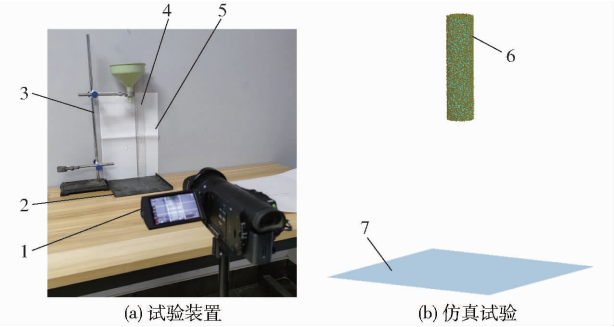


图 3 胡麻根部茎秆恢复系数试验

Fig.3 Test of recovery coefficient of flax root stem

1. 摄像机 2、7. 钢板 3. 支架 4. 白纸 5. 直尺 6. 根部茎秆

多次试验后取平均值得到胡麻茎秆不同部位与钢制接触部件间恢复系数根部为 0.334,中部为 0.335,颈部为 0.302。

2.3 堆积角试验

堆积角试验可直观表达散体物料颗粒间的摩擦作用、流动特性等,目前学者针对不同物料采用的方法有注入法、倾斜法、圆筒提升法等^[16-18]。依据胡麻茎秆流动特性,选择圆筒提升法进行胡麻茎秆堆积角试验,该试验在甘肃农业大学机电工程学院力学实验室进行,试验装置由 CMT2502 型电子万能材料试验机、主机、显示器、文具夹、圆筒和托盘组成,如图 4 所示。试验时设定试验机向上提升速度为 20 mm/min,圆筒内径为 30 mm,圆筒和试验机传感器间由文具夹刚性连接,圆筒和托盘均为不锈钢材质,圆筒由试验机提升后胡麻茎秆落入托盘中央,形成堆积角。每组试验重复进行 10 次后由摄像机拍摄可得胡麻茎秆各部位堆积角图像。

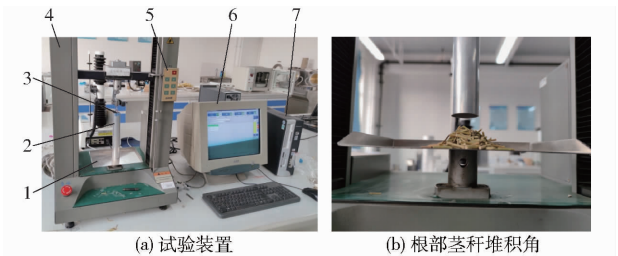


图 4 堆积角试验装置与根部堆积角

Fig.4 Stacking angle test device and flax roots stacking angle

1. 托盘 2. 圆筒 3. 文具夹 4. 试验机 5. 操作按钮 6. 显示器 7. 主机

堆积角测量试验结束后将试验图像优化出堆积角区域,并使用 Python 计算机编程语言进行灰度、二值化、边界轮廓提取等工作,可得到胡麻茎秆样品堆积角试验轮廓图(图 5),再使用 Origin 数据处理软件进行轮廓线坐标数据拟合,得到各部位堆积角数值为根部 36.02°,中部 38.78°,颈部 40.93°。

3 离散元接触参数优化

胡麻茎秆作为整体建立离散元模型时只需 1 组参数,为保证胡麻茎秆整株建模真实性,本文由前期胡麻茎秆各部位接触参数研究拓展至整株接触参数研究,以胡麻茎秆各部位接触参数的区间值作为各试验的水平值进行试验与仿真研究。

3.1 Plackett – Burman 爬坡试验

基于 Plackett – Burman 的最陡爬坡试验通过比较试验因素两个高低水平的差异与整体的差异筛选出各因子的显著性^[28]。鉴于胡麻茎秆 Hertz – Mindlin with bonding 模型颗粒数量较多,仿真过程计算机负荷较大,本文通过颗粒堆积方法建立胡麻茎秆离散元模型,采用 Plackett – Burman 试验方法,以胡麻茎秆堆积角 α 为响应值,以胡麻茎秆各部位

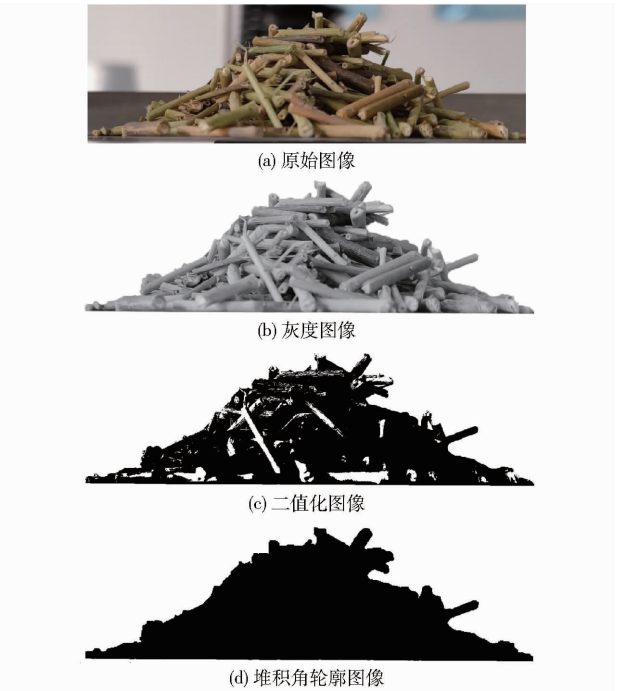


图 5 胡麻茎秆根部堆积角试验图像处理过程

Fig.5 Processing process of flax root stem accumulation angle experiment pictures

与自身间、接触元件间的离散元接触参数为试验因素,以各因素的试验值和文献^[2-3,15,29]试验值作为水平值,试验因素编码见表 3。Plackett – Burman 试验时设置 3 个中心点,共进行 15 组试验,其中第 6、12、13 组为零水平组,试验方案和结果见表 4,表中 $X_1 \sim X_{11}$ 为编码值。试验结果方差分析见表 5。

表 3 Plackett – Burman 试验因素编码

Tab.3 Plackett – Burman test factors and coding

参数	编码	
	- 1	1
胡麻茎秆泊松比 x_1	0.07	0.09
胡麻茎秆密度 $x_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	400	470
胡麻茎秆剪切模量 x_3 / MPa	1 315	3 000
胡麻茎秆-胡麻茎秆恢复系数 x_4	0.25	0.35
胡麻茎秆-胡麻茎秆静摩擦因数 x_5	0.45	0.55
胡麻茎秆-胡麻茎秆滚动摩擦因数 x_6	0.025	0.035
胡麻茎秆-钢板恢复系数 x_7	0.30	0.35
胡麻茎秆-钢板静摩擦因数 x_8	0.2	0.3
胡麻茎秆-钢板滚动摩擦因数 x_9	0.08	0.15
虚拟参数 $x_{10}、x_{11}$		

根据表 4 的 Plackett – Burman 试验结果,对堆积角进行回归模型显著性分析,结果如表 5 所示,得到 α 回归模型为

$$\alpha = 38.56 - 0.087X_1 + 0.075X_2 + 0.083X_3 + 0.56X_4 + 1.57X_5 + 1.00X_6 - 0.19X_7 + 0.67X_8 + 0.67X_9,$$

(6)

表 4 Plackett – Burman 试验方案与结果

Tab.4 Design and results of Plackett – Burman test scheme

编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	Plackett – Burman 试验堆积角 $\alpha/(^{\circ})$
1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	38.44
2	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	38.59
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	38.08
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	40.71
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	33.99
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38.26
7	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	39.52
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	35.16
9	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	42.03
10	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	40.28
11	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	39.10
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38.67
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38.29
14	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	37.29
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	40.03

表 5 Plackett – Burman 试验结果显著性分析

Tab.5 Analysis of significance of parameters in Plackett – Burman test

参数	标准化效应	平方和	贡献率/%	F	P
模型		57.28		79.81	0.002 **
X_1	-0.17	0.09	0.16	1.38	0.324 6
X_2	0.15	0.068	0.12	1.03	0.384 0
X_3	0.17	0.083	0.15	1.28	0.340 6
X_4	1.12	3.79	6.60	58.02	0.004 7 **
X_5	3.13	29.45	51.33	451.45	0.000 2 **
X_6	2.00	11.96	20.84	183.32	0.000 9 **
X_7	-0.37	0.41	0.72	6.30	0.087
X_8	1.35	5.44	9.48	83.39	0.002 8 **
X_9	1.34	5.36	9.34	82.16	0.002 8 **

注: ** 表示差异极显著 ($P\leq0.01$)。

由表 5 可知,该模型 $P < 0.01$ 、 $R^2 = 0.99$,表明主要效应模型显著,说明模型所拟合的回归方程与实际情况相符合,能够表示因素 $X_1 \sim X_9$ 对响应值堆积角的影响程度,可知 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_8 、 X_9 极显著,其他项不显著。根据模型回归方程式(6)一次项系数得到各因素对堆积角的影响主次顺序为 X_5 、 X_6 、 X_8 、 X_9 、 X_4 、 X_3 、 X_2 、 X_1 、 X_7 ,结合显著性分析贡献率, X_5 、 X_6 对响应值影响较大,其中 X_5 的贡献率为 51.33%, X_6 的贡献率为 20.84%, X_8 、 X_9 的贡献率较为接近,但和其他因素贡献率同样均小于 10%。选取对堆积角影响程度和贡献率较大的因素 X_5 、 X_6 进行最陡爬坡试验和 Central Composite 试验,因素 X_5 、 X_6 依据标准化效应值将水平值依次增加,堆积角以根部、颈

部、中部试验平均值 38.57°为目标值,因素 X_8 、 X_9 值采用 Plackett – Burman 试验优化解 0.28、0.14,其余因素水平值均采用该试验零水平值。根据最陡爬坡试验堆积角 δ 结果与真实试验堆积角 β 结果的相对误差 η 作为最终 Central Composite 试验最优解的水平值。 η 计算公式为

$$\eta = \frac{|\delta - \beta|}{\beta} \times 100\%$$

(7)

由表 6 可知,当 X_5 、 X_6 逐渐增大时,胡麻茎秆堆积角逐渐增大,相对误差先减小、后增大,在第 4 组试验时相对误差最小,为精确得出胡麻茎秆间接触参数,以第 4 组最陡爬坡试验参数为中心值,以第 3、5 组试验数据为水平值进行 Central Composite 试验,以堆积角为响应值,寻求最优解。

表 6 最陡爬坡试验方案与结果

Tab.6 Test scheme and results of the steepest climb

试验序号	X_5	X_6	最陡爬坡试验堆积角 $\delta/(^{\circ})$	相对误差 $\eta/\%$
1	0.45	0.025	35.35	8.35
2	0.47	0.027	36.09	6.43
3	0.49	0.029	37.53	2.69
4	0.51	0.031	38.48	0.23
5	0.53	0.033	41.67	8.04
6	0.55	0.035	42.98	11.43

3.2 Central – Composite 试验

根据最陡爬坡试验结果进行胡麻茎秆接触参数 Central – Composite 试验,得出 Central – Composite 试验堆积角 ζ 和相对误差 η ,探究 Central – Composite 试验堆积角 ζ 对胡麻茎秆-胡麻茎秆静摩擦因数 X_5 、胡麻茎秆-胡麻茎秆滚动摩擦因数 X_6 间的响应面影响效果。本次仿真试验中,其他接触参数按照最陡爬坡试验参数设置,设计方案及结果如表 7、8 所示。

表 7 Central – Composite 试验因素编码

Tab.7 Central – Composite test factors and coding

编码	因素	
	静摩擦因数	滚动摩擦因数
-1.414	0.482	0.028
-1	0.490	0.029
0	0.510	0.031
1	0.530	0.033
1.414	0.538	0.034

试验结束后对表 8 试验结果进行二元回归分析,建立堆积角 ζ 与胡麻茎秆-胡麻茎秆静摩擦因数 X_5 、胡麻茎秆-胡麻茎秆滚动摩擦因数 X_6 间的二元

表 8 Central – Composite 试验方案与结果

Tab.8 Test design scheme and results of Central – Composite

试验序号	X_5	X_6	堆积角 $\zeta/(^{\circ})$	相对误差 $\eta/\%$
1	0	0	38.48	0.23
2	1.414	0	40.02	3.76
3	1	1	39.86	3.34
4	0	0	38.63	0.16
5	0	1.414	38.56	0.003
6	1	-1	39.53	2.49
7	-1	1	37.89	0.36
8	0	0	38.49	0.21
9	-1.414	0	37.52	2.72
10	1	-1	37.25	3.42
11	0	0	38.61	0.10
12	0	-1.414	38.02	1.43
13	0	0	38.52	0.13

回归模型

$$\zeta = 38.55 + 0.97X_5 + 0.22X_6 - 0.078X_5X_6 + 0.14X_5^2 - 0.1X_6^2 \tag{8}$$

3.3 响应面寻优试验

对 Central – Composite 试验结果堆积角 ζ 进行显著性分析,结果如表 9 所示。

表 9 响应面寻优试验显著性分析

Tab.9 Significance analysis of response surface optimization test

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	8.21	5	1.64	105.01	<0.000 1 **
X_5	7.58	1	7.58	484.53	<0.000 1 **
X_6	0.38	1	0.38	24.03	0.001 7 **
X_5X_6	0.024	1	0.024	1.54	0.255 1
X_5^2	0.13	1	0.13	8.43	0.022 9 *
X_6^2	0.073	1	0.073	4.66	0.067 7
残差	0.11	7	0.016		
失拟	0.09	3	0.03	6.22	0.054 9
误差	0.019	4	0.005		
总和	8.32	12			

注: ** 表示差异极显著 ($P \leq 0.01$); * 表示差异显著 ($0.01 < P \leq 0.05$)。

由表 9 可知,堆积角二次回归模型 $P < 0.000 1$, 决定系数 $R^2 = 0.986 8$,失拟项 $P > 0.05$,变异系数为 0.32%,回归模型极显著,失拟不显著,表明该回归方程拟合较好,模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映 ζ 与 X_5 、 X_6 间的关系。其中一次项 X_5 、 X_6 极显著,二次项 X_5^2 显著,显著性由大到小依次为 X_5 、 X_6 、 X_5^2 ,其他项不显著。试验因子 X_5 、 X_6 与堆积角 ζ 之间存在二次非线性关系,交互作用对堆积角影响不显著,堆积角响应曲面如图 6 所示。

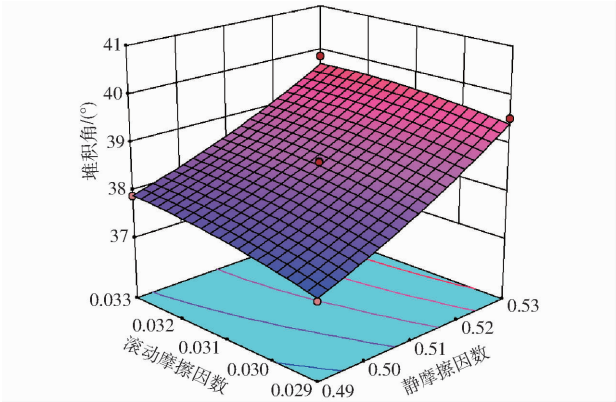


图 6 胡麻茎秆堆积角响应面

Fig.6 Response surface of stem stacking angle of flax

根据 Central – Composite 结果及二次回归方程,以试验所得堆积角相对误差 η 最小为目标,对试验因子 X_5 、 X_6 进行最优解分析,设定目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min \eta(X_5, X_6) \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1.414 \leq X_5 \leq 1.414 \\ -1.414 \leq X_6 \leq 1.414 \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

最终得到胡麻茎秆-胡麻茎秆静摩擦因数为 0.508、胡麻茎秆-胡麻茎秆滚动摩擦因数为 0.033,以此为最佳参数进行胡麻茎秆接触参数验证试验。

4 试验验证

验证试验包括剪切试验和堆积角试验,其中剪切试验对胡麻茎秆离散元 bonding 模型进行验证,堆积角试验对胡麻茎秆接触参数进行验证。

4.1 剪切试验

胡麻茎秆生物力学特性剪切试验采用 2.3 节仪器设备,使用试验机上端夹具水平夹持刀片垂直切割剪切试验台样品。试验机上端夹具运行速度为 20 mm/min,多次试验后得到胡麻茎秆不同部位剪切最大载荷。同时,在 EDEM 软件中将胡麻茎秆 bonding 模型水平放置在支撑平面上,在 bonding 模型上方建立竖直几何平面模拟刀片切割胡麻茎秆样品,设置竖直向下方向运动速度为 20 mm/min,试验过程如图 7 所示。

4.2 堆积角试验

将 1.1 节胡麻茎秆样品混合均匀进行混杂状态下胡麻茎秆堆积角试验,试验过程采取 3.1 节方法,试验结束后采用图像处理办法获取胡麻茎秆堆积角数值,多次试验后取平均值。在 EDEM 软件中采用 3.1 节方法将茎秆模型简化后进行仿真试验,多次测量后同样采用图像处理方法获取堆积角仿真值,并与试验值对比分析,试验过程如图 8 所示。

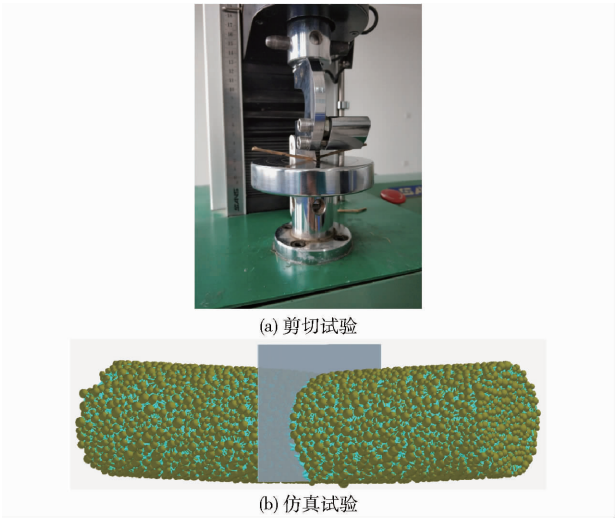


图 7 胡麻根部茎秆剪切试验
Fig.7 Test of flax root stem shear

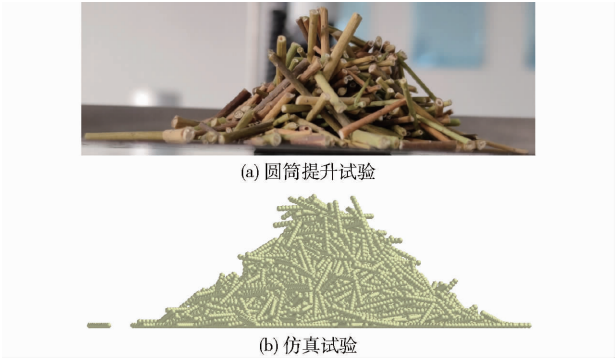


图 8 胡麻茎秆堆积角试验
Fig.8 Test of stalk stacking angle of flax stem

4.3 试验结果分析

剪切验证试验结束后,在万能材料试验机中导出茎秆剪切最大载荷,在 EDEM 软件后处理中导出剪切平面所受压力;堆积角验证试验结束后将得到的图像采用图像处理办法获取胡麻茎秆堆积角。多次试验后取平均值,试验结果如表 10 所示。试验结果表明,胡麻茎秆离散元 bonding 模型与实际物理模型较为接近,误差较小,其中万能材料试验机得到根部、中部、颈部剪切最大载荷分别为 45.97、29.42、19.64 N,离散元仿真得到根部、中部、颈部剪切最大载荷分别为 46.74、30.33、20.71 N,相对误差分别为 1.67%、3.09%、5.44%,最大剪切载荷差值、相对误差由根部向颈部递增,说明胡麻茎秆物理特性由根部向颈部变化明显,茎秆差异性显著。堆积角试验得出胡麻茎秆平均堆积角为 38.58°,仿真

试验得出胡麻茎秆堆积角为 38.7°,差值为 0.12°,相对误差为 0.31%,差值较小。可见胡麻茎秆离散元柔性模型与接触参数和实际情况较为相符,可表征胡麻茎秆物理特性,并为离散元仿真提供柔性模型及其接触参数。

表 10 胡麻茎秆离散元模型与接触参数验证试验结果
Tab.10 Discrete element model and contact parameter verification test results of flax stem

项目	堆积角/ (°)	剪切最大载荷/N		
		根部	中部	颈部
试验值	38.58	45.97	29.42	19.64
仿真值	38.70	46.74	30.33	20.71
差值	0.12	0.77	0.91	1.07
相对误差/%	0.31	1.67	3.09	5.44

5 结论

(1)以胡麻根部茎秆、中部茎秆、颈部茎秆为研究对象,以其本征参数为研究基础,计算得胡麻茎秆各部建模参数,采用离散元法 bonding 模型建模方法构建胡麻茎秆柔性模型,并以胡麻茎秆各部分本征参数与接触参数试验值为高低水平,通过 Plackett – Burman 试验和 Central – Composite 试验确定胡麻茎秆之间、茎秆与收获装备之间的接触参数,通过胡麻茎秆剪切试验与堆积角试验验证模型可靠性。

(2)结果表明,胡麻植株离散元柔性模型参数中法向刚度 K_n 为 $1.13 \times 10^9 \text{ N/m}^3$,切向刚度 K_t 为 $5.6 \times 10^8 \text{ N/m}^3$,法向临界应力 σ 为 6.67 MPa,切向临界应力 γ 为 8.5 MPa,粘结半径 R_j 为 0.25 mm;胡麻茎秆-钢制部件间恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数最优值分别为 0.33、0.28、0.14,胡麻茎秆-胡麻茎秆间恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数最优值分别为 0.3、0.508、0.033。

(3)剪切与堆积角验证试验结果表明,剪切试验中根部、中部、颈部剪切最大载荷分别为 45.97、29.42、19.64 N,离散元仿真中根部、中部、颈部剪切最大载荷分别为 46.74、30.33、20.71 N,相对误差分别为 1.67%、3.09%、5.44%;堆积角试验中胡麻茎秆平均堆积角为 38.58°,仿真试验中胡麻茎秆堆积角为 38.7°,差值为 0.12°,相对误差为 0.31%,差值较小,可为胡麻茎秆离散元仿真提供参考。

参 考 文 献

[1] 肖伟. 胡麻制造纤维素溶解浆的工艺研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
XIAO Wei. The process research of manufacturing cellulose dissolving pulp in flax materials[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. (in Chinese)

[2] 戴飞, 赵武云, 宋学锋, 等. 胡麻脱粒物料分离清选作业机参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7):100 – 108.

- DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Parameters optimization and experiment on separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):100 – 108. (in Chinese)
- [3] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 丘陵山地胡麻联合收割机作业参数优化与试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版):1 – 13. SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Optimization and experiment of operation parameters of hilly area flax combine harvester[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition): 1 – 13. DOI. 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb20210377. (in Chinese)
- [4] 戴飞, 赵武云, 史瑞杰, 等. 自走式胡麻联合收割机设计与试验[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3):678 – 686. DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Ruijie, et al. Design and experiment on self-propelled flax combine harvester[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(3):678 – 686. (in Chinese)
- [5] 史瑞杰, 戴飞, 刘小龙, 等. 履带式丘陵山地胡麻联合收割机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5):59 – 67. SHI Ruijie, DAI Fei, LIU Xiaolong, et al. Design and experiments of crawler-type hilly and mountaineous flax combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5):59 – 67. (in Chinese)
- [6] 戴飞, 赵武云, 刘国春, 等. 胡麻脱粒物料清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8):140 – 147. DAI Fei, ZHAO Wuyun, LIU Guochun, et al. Design and experiment of separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):140 – 147. (in Chinese)
- [7] 刘元祥, 戴飞, 赵武云, 等. 手扶式胡麻割晒机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12):26 – 29. LIU Yuanxiang, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of handheld flax windrower[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12):26 – 29. (in Chinese)
- [8] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 全喂入式胡麻脱粒机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(8):120 – 132. SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of full-feed flax thresher[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(8):120 – 132. (in Chinese)
- [9] 周刚, 石林榕, 赵武云, 等. 旱地胡麻起垄覆膜播种联合作业机工作参数优化与性能试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(6):147 – 156. ZHOU Gang, SHI Linrong, ZHAO Wuyun, et al. Optimization of the working parameters and performance experiment of flax ridging and covering film combined seeder in dry-land[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(6):147 – 156. (in Chinese)
- [10] DAI F, SONG X F, ZHAO W Y, et al. Motion simulation and test on threshed grains in tapered threshing and transmission device for plot wheat breeding based on CFD – DEM[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(1):66 – 73.
- [11] DAI F, SONG X F, GUO W J, et al. Simulation and test on separating cleaning process of flax threshing material based on gas-solid coupling theory[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2020, 13(1):73 – 81.
- [12] SHI L R, YANG X P, ZHAO W Y, et al. Investigation of interaction effect between static and rolling friction of corn kernels on repose formation by DEM[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(5):238 – 246.
- [13] 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.
- [14] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10):100 – 108, 242. TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw – soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10):100 – 108, 242. (in Chinese)
- [15] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20):25 – 33. SHI Linrong, MA Zhoutai, ZHAO Wuyun, et al. Calibration of simulation parameters of flax seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20):25 – 33. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24):46 – 54. HOU Zhanfeng, DAI Nianzu, CHEN Zhi, et al. Measurement and calibration of physical property parameters for agropyron seeds in a discrete element simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12):46 – 54. (in Chinese)
- [18] 韩树杰, 戚江涛, 坎杂, 等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4):101 – 108. HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):101 – 108. (in Chinese)
- [19] 吴昆, 宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6):1 – 20. WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):1 – 20. (in Chinese)

- [20] 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)
- [21] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 胡麻茎秆生物力学特性试验[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(11):45–50. SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Biomechanical properties test of flax stem[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(11):45–50. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 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. Study on the operation process of the corn straw kneading machine based on discrete element method[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 宋占华, 李浩, 闫银发, 等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6):21–33. SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):21–33. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 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 DEM simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4):120–127. (in Chinese)
- [28] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 基于 Plackett–Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12):221–231. ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett–Burman design and response surface methodology[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12):221–231. (in Chinese)
- [29] 戴飞. 胡麻脱粒物料分离清选机理与关键技术研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020. DAI Fei. Study on the separation-cleaning mechanism and key technology of flax threeseing matherial[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)