

三七茎秆离散元参数标定与试验

张兆国^{1,2} 徐红伟^{1,2} 薛浩田^{1,3} 倪畅^{1,2} 王超¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心, 昆明 650500;
3. 电子科技大学宜宾研究院, 宜宾 644000)

摘要: 针对利用离散元法进行三七联合收获、茎秆杀秧等关键作业过程仿真分析时,三七茎秆本征参数、三七茎秆及作业装备间接接触参数缺乏问题,以三七茎秆为对象,利用 EDEM 软件建立三七茎秆离散元 Hertz - Mindlin/Hertz - Mindlin with bonding 模型,通过堆积角试验和虚拟仿真试验对三七茎秆离散元参数进行标定,并建立三七茎秆杀秧装置模型。通过力学特性试验确定三七茎秆本征参数;采用圆筒提升法进行三七茎秆堆积角试验,使用 Origin 软件对堆积角图像进行轮廓拟合得到三七茎秆堆积角为 44.53°;设计 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Central - Composite 试验确定三七茎秆及作业装备间接接触参数,并利用堆积角试验和剪切试验验证模型的可靠性。结果表明:三七茎秆与作业装备间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.319、0.25、0.029;三七茎秆间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数最优值分别为 0.4、0.29、0.032;Hertz - Mindlin with bonding 模型法向刚度 K_n 为 $3.26 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、切向刚度 K_t 为 $2.17 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、法向临界应力 σ 为 2.27 MPa、切向临界应力 γ 为 9.65 MPa、粘结半径 R_d 为 0.1 mm;堆积角验证试验中相对误差为 0.29%;剪切验证试验中相对误差为 1.52%,误差较小。三七茎秆离散元模型与实际情况基本一致,三七茎秆模型和标定离散元仿真参数可靠,可为三七茎秆离散元仿真研究提供参考。

关键词: 三七茎秆; 离散元法; 参数标定

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0061-10 OSID: 

Calibration and Experiment of Discrete Element Parameters of *Panax notoginseng* Stem

ZHANG Zhaoguo^{1,2} XU Hongwei^{1,2} XUE Haotian^{1,3} NI Chang^{1,2} WANG Chao¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. Mechanization Engineering Research Center of Chinese Medicinal Materials in Yunnan Universities, Kunming 650500, China
3. Yibin Research Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Yibin 644000, China)

Abstract: Aiming at the lack of intrinsic parameters problem of *Panax notoginseng* stem, contact parameters between *Panax notoginseng* stem and operating equipment, when using the discrete element method for simulation analysis of key working processes, such as *Panax notoginseng* combined harvesting and stem killing. *Panax notoginseng* stem was taken as the object, the discrete element Hertz - Mindlin/Hertz - Mindlin with bonding of *Panax notoginseng* stem was established by software EDEM. The parameters of discrete element were calibrated by stacking angle experiment and virtual simulation test, and the seedling killing device model of *Panax notoginseng* stem was established. The intrinsic parameters of stem of were determined by mechanical properties tests. The pile angle of *Panax notoginseng* stem was tested by cylinder lifting method, the cylinder lifting method was used to test the stacking angle of *Panax notoginseng* stem, the stacking angle of *Panax notoginseng* stem in the physical experiment was 44.53° by performing contour fitting on the stacking angle image with Origin software. The Plackett - Burman experiment, steepest climb test and the Central - Composite experiment were used to determine the contact parameters of *Panax notoginseng* stem and the operating equipment, and the reliability of the model was verified by the stacking angle test, and the shear test. The results showed that

the optimal values of collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient between *Panax notoginseng* stem and operation equipment were 0.319, 0.25 and 0.029, respectively. The optimal values of collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient were 0.4, 0.29 and 0.032, respectively. The normal stiffness K_n of the Hertz – Mindlin with bonding model was $3.26 \times 10^8 \text{ N/m}^3$, the tangential stiffness K_s was $2.17 \times 10^8 \text{ N/m}^3$, the normal critical stress σ was 2.27 MPa, the tangential critical stress γ was 9.65 MPa, and the bonding radius R_d was 0.1 mm. The relative error in the accumulation angle verification test was 0.29%; the relative error in the shear verification test was 1.52%, and the error was small. The discrete element model of *Panax notoginseng* stem was basically consistent with the actual situation, and the model of *Panax notoginseng* stem and the calibration of discrete element simulation parameters were reliable, which can provide a reference for the research of discrete element simulation of *Panax notoginseng* stem.

Key words: *Panax notoginseng* stem; discrete element method; parameter calibration

0 引言

三七(*Panax notoginseng*)是中国西南地区特有的药食同源道地中药材^[1]。三七属于长茎秆类作物,三七茎秆占整个植株体积的1/2。三七药用往往关注三七根茎的价值,忽略三七茎秆。三七茎秆的研究直接关乎收获的工作效率,然而国内外针对三七收获机械的研究,主要为张兆国团队^[2-6]提出的分段牵引式三七收获机,三七茎秆参数的标定,完善了三七分段部分收获进程,使得三七全程机械化收获程度进一步提高。

近年来许多学者在茎秆、秸秆、根茎研究中利用离散元法进行基础研究工作,取得了可观的研究成果^[7]。如张锋伟等^[8]采用数值模拟方法分析玉米秸秆揉丝破碎过程,通过破碎物理试验和仿真试验校核玉米秸秆粘结模型,证明了离散元法应用于玉米秸秆揉丝破碎过程仿真的可行性;李娟^[9]通过标定试验对玉米秸秆进行分层建模研究,并开展秸秆打捆挤压仿真试验,验证了虚拟打捆模拟的载荷与圆捆半径呈现指数函数关系;廖宜涛等^[10]利用质构仪进行物理试验测定饲料油菜本征参数,通过 Hertz – Mindlin 粘结模型对油菜茎秆颗粒进行参数标定试验,实现了不同直径油菜茎秆参数的精准标定;方会敏等^[11]采用示踪器追踪的方法,对比台架和仿真试验中秸秆三轴位移的变化,寻找最优工作参数以提高秸秆分布均匀度;苑进等^[12]采用颗粒接触力学本构方程计算菠菜根离散元参数并构建柔性模型,通过对菠菜根土复合体铲切过程的仿真,明晰了铲切过程的工作机理,优化了菠菜根切铲各项参数;王奇瑞等^[13]采用柔性作物茎秆振动响应特性动力学仿真模型,通过对茎秆横向弯曲/纵向拉伸的振动对比验证,验证了柔性作物茎秆模型的实用性;郭茜等^[14]采用 EDEM 软件建立切割粉碎机中番茄秸秆切割仿真模型,通过对番茄茎秆切割过程数值模拟

对比试验,表明了滑切角锯齿型刀片在切割过程中的明显优势;刘鹏等^[15]采用 CFD – DEM 耦合分析方法,通过明确玉米秸秆在粉碎室内运动机理,并对不同粉碎刀作业受力变化规律,为秸秆还田机的设计和优化提供支撑;郝建军等^[16]采用离散元法建立了麻山药双峰分布模型,测定了麻山药物理参数和力学特性试验,并对黏结参数进行校核,证明试验参数的准确性。同时参数标定多针对谷物秸秆或者谷物籽粒,针对中药材秸秆的研究较少,而对三七茎秆的离散元模型建立与参数标定鲜见报道。

因此,本文以三七茎秆为研究对象,EDM 仿真软件为平台,通过三七茎秆生物力学特性试验确定三七茎秆本征参数。先采用 Hertz – Mindlin 基本模型,结合三七茎秆堆积角物理试验,通过 Plackett – Burman 试验筛选显著因素,最陡爬坡试验和 Central – Composite 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;与此同时采用 Hertz – Mindlin with bonding 模型结合三七茎秆剪切、压缩试验,确定法向刚度、切向刚度、法向临界应力、切向临界应力、粘结半径等 bonding 模型粘结键参数;最后通过三七茎秆堆积角试验和剪切试验验证模型可靠性,同时设计三七茎秆杀秧装置并进行剪切仿真试验。以期三七机械化收获过程中离散元仿真分析提供基础参数。

1 三七茎秆本征参数与离散元接触参数测定

1.1 本征参数测定

1.1.1 几何尺寸与含水率

以三七道地产地云南省昆明市石林县、红河州弥勒县、昆明市西山区三年生三七茎秆为试验材料。考虑采样样本的特殊性和普遍性,利用五点采样法对三七植株进行采集^[17]。三七茎秆组织结构(如图1所示)分为外表皮层、芯部层、维管束以及绵连层,外形特征为类圆柱体^[18]。将三七茎秆分为根

部、中部、颈部, 分别在各部分随机位置截取长度 5 cm 茎秆作为试验样品, 使用精度 0.01 mm 数显游标卡尺测量三七茎秆直径。得到三年生成熟期三七茎秆根部平均直径为 7.72 mm; 中部平均直径为 6.32 mm; 颈部平均直径为 5.79 mm。平均值为 6.61 mm。

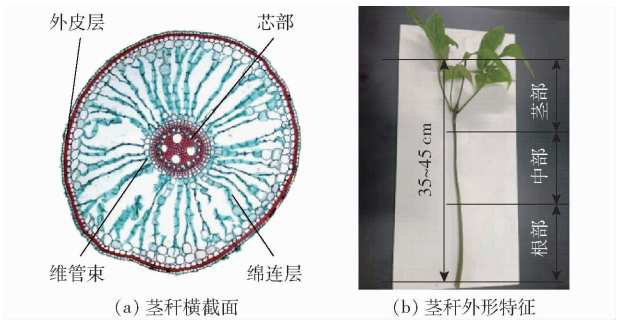


图 1 三七茎秆结构图

Fig. 1 *Panax notoginseng* stem structure

使用烘干法对三七茎秆含水率进行测定^[19-20], 随机取根部、中部、颈部茎秆各 30 个样本, 通过 NV1201ZH 电子秤(精度为 0.01 g)称量样本后进行 24 h 烘干处理, 首先 80℃ 温度下烘干 4 h, 后升温至 100℃ 烘干 20 h, 保证完全去除水分。含水率计算公式为

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M} \times 100\% \quad (1)$$

式中 W ——三七茎秆含水率, %

M_1 ——干燥前三七茎秆加铝盒总质量, g

M_2 ——干燥后三七茎秆加铝盒总质量, g

M ——铝盒质量, g

通过计算得根部含水率 83.77%、中部含水率 82.11%、颈部含水率 81.65%, 平均值为 82.51%。同时采用比重杯排油法测量三七茎秆样本体积, 根部、中部、颈部各采用 30 组取平均值, 通过计算得到根部密度为 0.903 g/cm³、中部密度为 0.939 g/cm³、颈部密度为 0.983 g/cm³, 平均密度为 0.942 g/cm³。

1.1.2 力学特性测定

随机选取三七茎秆根部、中部、颈部样品, 在昆明理工大学现代农业工程学院农产品加工工程实验室采用 FTC 食品质构仪对三七茎秆进行力学特性试验, 主要进行拉伸、压缩、剪切试验。拉伸试验时, 对样本两端缠绕贴纸增加摩擦, 设置 FTC 质构仪拉升力为 50 N, 速度为 0.01 m/s, 直至拉断; 压缩试验分为轴向压缩与径向压缩, 选用 432-034 型标准直径 12.7 mm 的探头, 设置最大压力 50 N、压缩速度为 0.01 m/s, 直至压溃; 剪切试验时选用 423-245 轻型单刀探头, 设置最大剪切力为 100 N, 速度为 0.01 m/s, 直至切断。试验过程如图 2 所示。试验

所得数据由质构仪测得导出, 进行抗拉强度、抗压强度、剪切强度理论分析。计算获取三七茎秆平均抗拉强度根部为 11.25 MPa、中部为 7.71 MPa、颈部为 7.46 MPa, 平均值为 8.81 MPa; 平均抗压强度根部轴向为 2.25 MPa、径向为 40.62 MPa, 中部轴向为 2.52 MPa、径向为 47.88 MPa, 颈部轴向为 2.03 MPa、径向为 32.04 MPa。

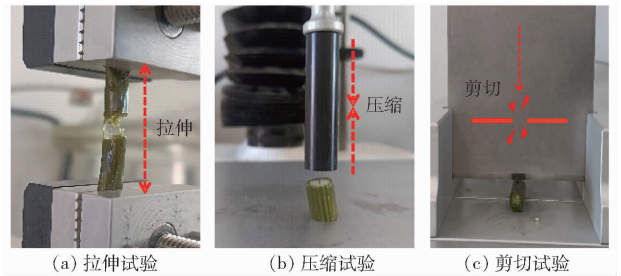


图 2 力学特性试验

Fig. 2 Mechanical property test

通过径向压缩试验得到三七茎秆泊松比。茎秆纵向变形量由质构仪获得, 横向变形量由数显游标卡尺测得。三七茎秆泊松比计算公式为

$$\mu = \frac{|\varepsilon'|}{|\varepsilon|} = \frac{l_1 - l_2}{L_1 - L_2} \quad (2)$$

式中 μ ——三七茎秆泊松比

ε ——三七茎秆横向变形量, mm

ε' ——三七茎秆纵向变形量, mm

L_1 ——加载前三七茎秆横向长度, mm

L_2 ——加载后三七茎秆横向长度, mm

l_1 ——加载前三七茎秆纵向长度, mm

l_2 ——加载后三七茎秆纵向长度, mm

经过拉伸试验三七茎秆拉伸弹性模量根部为 1 814.08 MPa、中部为 1 453.44 MPa、颈部为 845.93 MPa, 平均值 1 371.15 MPa。三七茎秆剪切模量计算公式为

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

式中 G ——三七茎秆剪切模量, MPa

E ——三七茎秆弹性模量, MPa

由式(3) 计算得三七茎秆剪切模量根部为 679.43 MPa、中部为 544.36 MPa、颈部为 316.83 MPa, 平均值为 513.54 MPa。

1.2 离散元接触参数测定

1.2.1 碰撞恢复系数

由于作业装备材料多采用 45 号钢, 故本文三七茎秆与作业装备之间的接触参数即为三七茎秆与 45 号钢的接触参数。三七茎秆与 45 号钢碰撞恢复系数采用自由落体法测定^[21], 利用高速摄影机拍摄自由落体试验过程并记录数据(图 3), 试验时三七

茎秆自由下落高度为 300 mm。经过多次试验平均弹跳最大高度根部为 30.93 mm、中部为 31.11 mm、颈部为 29.81 mm,平均值为 30.62 mm。可得到三七茎秆与 45 号钢碰撞恢复系数根部为 0.321、中部为 0.322、颈部为 0.315,平均值为 0.319。

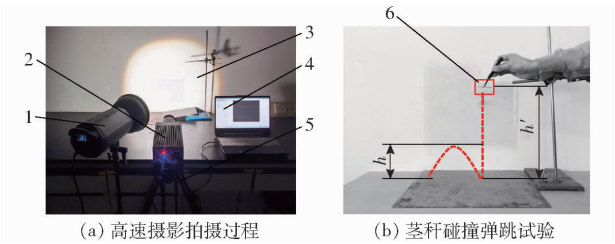


图 3 三七茎秆碰撞弹跳台架试验

Fig. 3 Stem bouncing test of *Panax notoginseng*

1. 光源 2. 高速摄影机 3. 试验台架 4. 上位机 5. 机架
6. 三七茎秆样品

1.2.2 静摩擦因数

三七茎秆-45 号钢静摩擦因数测定采用自制静摩擦因数测量仪(图 4)。工作前将支撑板调至水平,角度传感器调零。工作时转动丝杠手柄使顶起装置将支撑板顶起,使其绕旋转轴做圆周运动,当支撑板到达一定角度时,三七茎秆开始有滚动趋势时停止转动,通过角度传感器读取停止时支撑板与水平面夹角^[22]。静摩擦因数计算公式为

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

式中 f_s ——三七茎秆-45 号钢静摩擦因数

θ ——支撑板与水平面夹角, (°)

经过多次测量后将数据代入式(4)可得三七茎秆-45 号钢的静摩擦因数根部为 0.26、中部为 0.26、颈部为 0.24,平均值为 0.25。

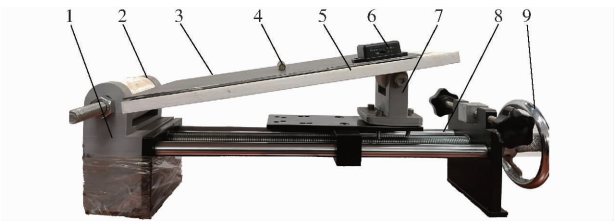


图 4 三七茎秆静摩擦因数试验

Fig. 4 Static friction coefficient test of *Panax notoginseng* stem

1. 底座 2. 旋转轴 3. 钢板 4. 三七茎秆样品 5. 支撑板
6. 角度传感器 7. 顶起装置 8. 丝杠 9. 丝杠手柄

1.2.3 滚动摩擦因数

三七茎秆-45 号钢滚动摩擦因数测定采用斜面滚动法与仿真试验相结合的方法^[23]。即在预设角度的斜面板上释放三七茎秆,茎秆沿斜面向下滚动一段距离,由于三七茎秆受到滚动摩擦,最终滚落至水平面并静止(图 5a),利用高速摄影机记录试验过程并得到滑移距离 S' ,每组试验重复 4 次。得到三

七茎秆各部分水平滑移距离根部为 136.26 mm、中部为 135.83 mm、颈部为 135.61 mm,平均值为 135.90 mm。

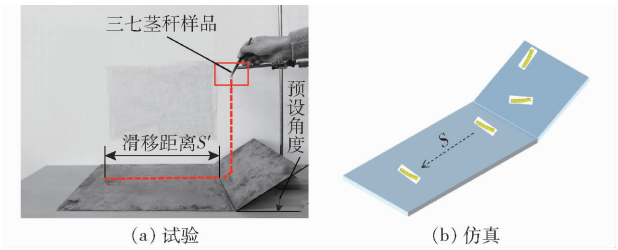


图 5 三七茎秆滚动摩擦因数试验

Fig. 5 Stem dynamic friction factor tests of *Panax notoginseng*

以滚动摩擦因数为因素,水平滑移距离 S 指标做单因素仿真试验(图 5b),在 EDEM 中设置已标定的碰撞恢复系数和静摩擦因数,其他接触参数设为 0,滚动摩擦因数为 0.03 ~ 0.075,水平间隔为 0.005。将试验结果绘制成散点图并拟合曲线(图 6)。拟合方程为

$$S = -79\,103f_k^2 + 6\,547.5f_k + 9.445\,8 \tag{5}$$

式中 f_k ——三七茎秆-45 号钢滚动摩擦因数

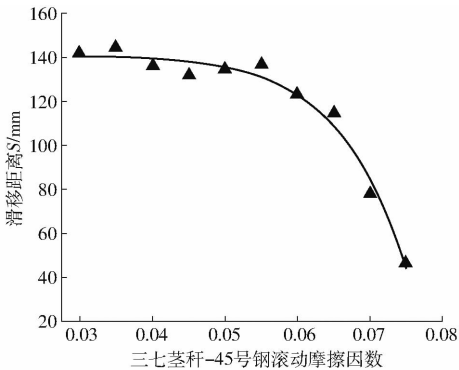


图 6 三七茎秆滚动摩擦因数与水平滑移距离拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of dynamic friction factor and horizontal slip distance of *Panax notoginseng* stem

拟合方程决定系数 $R^2 = 0.928\,4$,将试验测得水平滑移距离代入式(5)得到三七茎秆-45 号钢滚动摩擦因数 f_k 为 0.029。将其代入 EDEM 仿真软件进行验证,得出滑移距离 S 为 140.24 mm,与实际距离 S' 之间的相对误差为 3.09%,小于 5%,误差较小。

1.2.4 堆积角试验

三七茎秆堆积角在昆明理工大学现代农业工程学院农产品加工工程实验室利用电子万能材料试验机通过圆筒提升法测定^[24]。圆筒内径 100 mm,试验时圆筒固定在万能材料试验机上,以速度 50 mm/min 均匀向上提升,圆筒提升后三七茎秆落入试验台中央,形成堆积角(图 7)。由摄影机拍摄堆积角图像,各部分试验重复 10 次。

为减少人工测量误差,堆积角试验结束后将拍

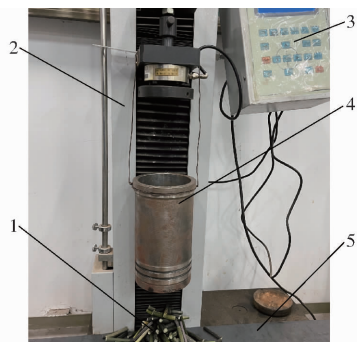


图 7 三七茎秆堆积角试验装置

Fig. 7 *Panax notoginseng* stem stacking angles test device

1. 三七茎秆样品 2. 万能材料试验机 3. 控制器 4. 圆筒 5. 钢板托盘

摄图像优化出堆积角区域,并对堆积角图像进行处理。先对堆积角的原始图像进行灰度处理,后选定合适阈值进行二值化处理,利用 `bwperim` 函数对二值化图像进行轮廓提取^[25](图 8)。使用 Origin 软件中图像数字化工具导入轮廓图,将堆积角轮廓转化为坐标点并进行线性拟合,并将拟合得到的斜率转换为角度,即为三七茎秆堆积角试验值。得到各部位堆积角:根部为 47.42° 、中部为 43.77° 、颈部为 42.40° ,平均角度为 44.53° 。

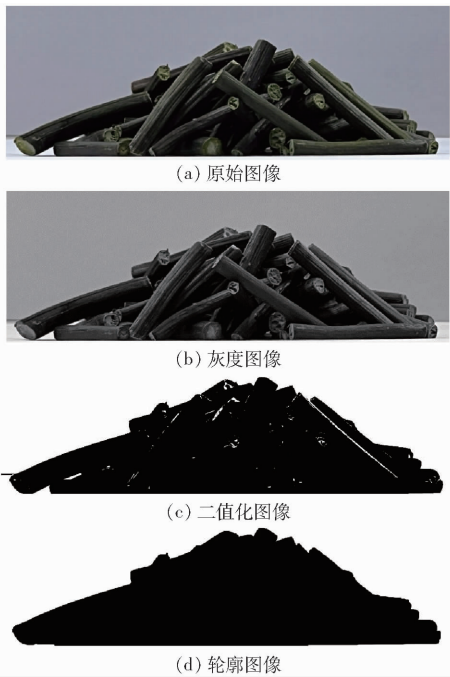


图 8 三七茎秆堆积角试验图像处理过程

Fig. 8 *Panax notoginseng* stem stacking angles test image processing

2 离散元模型建立与离散元接触参数优化

2.1 离散元模型建立

2.1.1 三七茎秆颗粒堆积角仿真模型

在 EDEM 软件中,应用 Hertz - Mindlin 模型进行三七茎秆堆积角仿真试验,该模型在计算三七茎

秆颗粒间的受力时,将其分解为三七茎秆颗粒之间的法向运动与受力、切向运动与受力和颗粒之间的滚动运动。三七茎秆样品近似圆柱体,为匹配实际的圆筒提升法堆积角试验,离散元模型采用球颗粒组合的方式(图 9a)。为简化三七茎秆模型,直径取各部位平均直径 6.61 mm ,长度为 50 mm 。

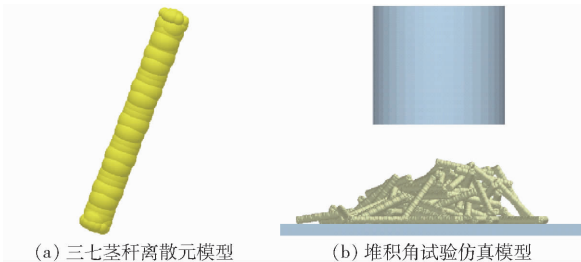


图 9 堆积角仿真试验模型

Fig. 9 Stacking angle simulation test model

2.1.2 三七茎秆剪切仿真模型

三七茎秆的剪切模型采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型,该模型在三七茎秆中相邻颗粒间形成粘结键,在剪切仿真中利用粘结键的断裂来模拟三七茎秆剪切过程。剪切模型采用双峰分布颗粒建模方法^[26],通过大颗粒占据位置,小颗粒填充提高密度,降低模型空隙,使颗粒特性与实际情况一致。设大颗粒的物理半径和颗粒间接触半径分别为 $R_p = 0.4\text{ mm}$ 、 $R_c = 0.5\text{ mm}$;小颗粒的物理半径和颗粒间接触半径分别为 $R'_p = 0.2\text{ mm}$ 、 $R'_c = 0.25\text{ mm}$;粘结键半径 $R_d = 0.1\text{ mm}$ 。Hertz - Mindlin with bonding 模型颗粒间粘结键主要参数计算公式^[27]为

$$\begin{cases} K_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \mu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \mu_b^2}{E_b} \right)^{-1} \left(\frac{r_a + r_b}{r_a r_b} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ K_s = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) K_n \\ \sigma = \frac{F'}{\pi R^2} \\ \gamma = c + \sigma \tan \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中 K_n ——颗粒间法向刚度, N/m^3
 K_s ——颗粒间切向刚度, N/m^3
 σ ——法向临界应力, MPa
 γ ——切向临界应力, MPa
 μ_a, μ_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, $(^\circ)$

结合物理参数标定试验与课题组前期研究^[28],

取 $c = 8 \text{ MPa}$, $\varphi = 36^\circ$, 同时将三七茎秆各部分测定参数取平均值代入式(6), 得到三七茎秆颗粒之间 $K_n = 3.26 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $K_s = 2.17 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $\sigma = 2.27 \text{ MPa}$ 、 $\gamma = 9.65 \text{ MPa}$, 由此建立三七茎秆剪切离散元仿真模型(图 10), 共产生粘结键 295 321 个。

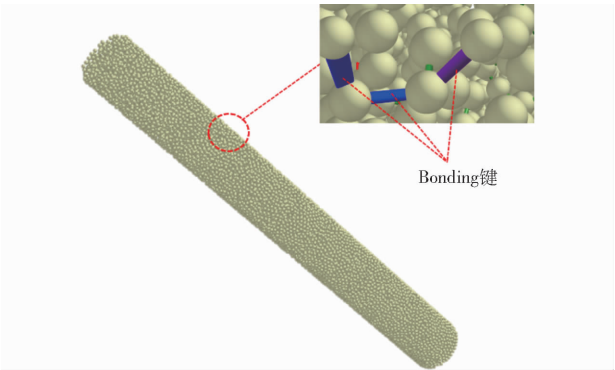


图 10 三七茎秆 Bonding 模型

Fig. 10 Bonding model of *Panax notoginseng* stem

2.2 离散元接触参数优化

利用本文中对三七茎秆各参数的研究结果, 以三七茎秆各参数为因素, 试验得到参数区间值为水平, 堆积角为响应, 采用 Hertz - Mindlin 离散元模型进行仿真试验寻找最优参数组合。

2.2.1 基于 Plackett - Burman 试验的最陡爬坡试验

本文采用 Design-Expert 11 的 Plackett - Burman 模块, 以三七茎秆各部位的物理特性、三七茎秆及作业装备间的离散元接触参数为因素, 分别用 $x_1 \sim x_9$ 表示, 以各因素的试验值为水平值, 以堆积角 α_1 为响应, 试验因素编码见表 1。试验时设置 3 个中心点, 共 15 组试验, 每组试验重复 3 次, 结果取平均值。试验方案与结果见表 2, $X_1 \sim X_{11}$ 为因素编码值, X_{10} 、 X_{11} 为虚拟参数。

表 1 Plackett - Burman 试验因素编码

Tab.1 Plackett - Burman test factors and coding

试验参数	编码		
	-1	0	1
三七茎秆泊松比 x_1	0.30	0.35	0.40
三七茎秆剪切模量 x_2/Pa	1×10^8	5×10^8	1×10^9
三七茎秆密度 $x_3/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.8	1.0	1.2
三七茎秆-三七茎秆碰撞恢复系数 x_4	0.25	0.40	0.55
三七茎秆-三七茎秆静摩擦因数 x_5	0.15	0.25	0.35
三七茎秆-三七茎秆滚动摩擦因数 x_6	0.02	0.03	0.04
三七茎秆-钢板碰撞恢复系数 x_7	0.3	0.4	0.5
三七茎秆-钢板静摩擦因数 x_8	0.20	0.25	0.30
三七茎秆-钢板滚动摩擦因数 x_9	0.025	0.030	0.035

根据表 2, 对堆积角进行方差和显著性分析, 结果如表 3 所示, 得到堆积角 α_1 的回归模型为

表 2 Plackett - Burman 试验方案与结果

Tab.2 Plackett - Burman test protocol and results

序号	因素											堆积角 $\alpha_1/(^\circ)$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	54.75
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	50.39
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	45.22
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	46.48
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	48.54
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	43.37
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	42.82
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	45.27
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	42.64
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	37.79
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	42.11
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	38.42
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46.45
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46.75
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46.31

表 3 Plackett - Burman 试验结果显著性分析

Tab.3 Analysis of significance of parameters

in Plackett - Burman test

参数	平方和	贡献率/%	F	P
模型	237.79		10.04	0.041 4 *
X_1	5.10	1.06	2.21	0.234 1
X_2	23.63	8.13	10.23	0.049 4 *
X_3	1.63	0.26	0.70	0.462 8
X_4	0.22	0.80	0.09	0.775 8
X_5	87.37	32.45	37.83	0.008 6 **
X_6	115.82	43.31	50.15	0.005 8 **
X_7	1.36	0.36	0.59	0.498 7
X_8	2.58	0.10	1.12	0.368 4
X_9	0.08	0.85	0.035	0.864 2

注: * 表示影响显著 ($0.01 < P < 0.05$), ** 表示影响极显著 ($P \leq 0.01$)。下同。

$$\alpha_1 = 45.15 + 0.651\,7X_1 + 1.4X_2 - 0.368\,3X_3 + 0.136\,7X_4 + 2.7X_5 + 3.11X_6 + 0.336\,7X_7 - 0.463\,3X_8 - 0.081\,7X_9$$

(7)

由表 3 可知, 回归模型 $P = 0.041\,4 < 0.05$ 、 $R^2 = 0.973\,6$, 表明该回归模型显著, 说明该模型所拟合的回归方程与实际情况相符合, 能够较好地预测参数变化趋势。 X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_7 、 X_8 、 X_9 对堆积角的影响较小, 贡献率均小于 2%; X_2 对堆积角的影响显著, 对堆积角的贡献率达到 8.13%; X_5 、 X_6 对堆积角的影响极显著, X_5 对堆积角的贡献率达到 32.45%, X_6 对堆积角的贡献率达到 43.31%。通过对比回归方程式的一次项系数得到各因素对堆积角影响主次顺序为 X_6 、 X_5 、 X_2 、 X_1 、 X_8 、 X_3 、 X_7 、 X_4 、 X_9 , 结合 F 值与显著性贡献率, 故选取对堆积角贡献率较大和影响极

显著的因素 X_5 和 X_6 进行最陡爬坡试验和 Central - Composite 试验。在后续试验中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_7 、 X_8 、 X_9 选用物理试验测得数值； X_4 选用表 1 数值的零水平。在回归方程中 X_5 、 X_6 的系数均大于 0，故对堆积角的影响为正效应。以上述选定的参数为因素，以堆积角试验根部、中部、颈部结果的平均值 44.53° 为目标值进行最陡爬坡试验。

根据最陡爬坡试验堆积角 α_2 与物理试验堆积角 α ，得到相对误差 Y 为

$$Y_2 = \frac{|\alpha_2 - \alpha|}{\alpha} \times 100\%$$

(8)

根据表 4 可知，当因素 x_5 、 x_6 逐渐增加时，最陡爬坡试验堆积角 α_2 呈现先减小后增大的趋势，与物理试验堆积角 α 的相对误差 Y 先减小后增大的趋势一致。在第 7 组试验时相对误差最小，为 0.43%，故选取第 7 组试验的参数为零水平，第 6 组、第 8 组的试验参数为高低水平，堆积角为响应值进行 Central - Composite 试验，寻找最优解。三七茎秆间静摩擦因数与滚动摩擦因数取值区间分别是 0.25 ~ 0.29、0.030 ~ 0.034。

表 4 最陡爬坡试验方案与结果

Tab. 4 Test scheme and results of the steepest climb

序号	x_5	x_6	堆积角 $\alpha_2/(^\circ)$	相对误差 $Y_2/\%$
1	0.15	0.020	47.90	7.57
2	0.17	0.022	46.29	3.95
3	0.19	0.024	46.04	3.39
4	0.21	0.026	45.76	2.76
5	0.23	0.028	43.43	2.47
6	0.25	0.030	43.60	2.09
7	0.27	0.032	44.34	0.43
8	0.29	0.034	45.21	1.53
9	0.31	0.036	46.84	5.19
10	0.33	0.038	47.32	6.27
11	0.35	0.040	49.37	10.87

2.2.2 Central - Composite 试验

根据 Plackett - Burman 试验和最陡爬坡试验，得到因素 x_5 、 x_6 及三七茎秆间的静摩擦因数和滚动摩擦因数对三七茎秆堆积角影响最显著。利用 Design-Expert 11 软件中 Central - Composite 模块进行响应面寻优试验，解得 x_5 、 x_6 最优参数组合。本次试验中其他参数按照最陡爬坡试验设置，试验方案因素编码如表 5 所示，试验方案与结果如表 6 所示。

根据表 6，对结果数据进行二次回归分析，建立三七茎秆堆积角 α_3 与三七茎秆静摩擦因数 X_5 、滚动摩擦因数 X_6 的回归模型

表 5 Central - Composite 试验因素编码

Tab. 5 Central - Composite test factors and coding

编码	因素	
	静摩擦因数 x_5	滚动摩擦因数 x_6
-1.414	0.242	0.029 2
-1	0.250	0.030 0
0	0.270	0.032 0
1	0.290	0.034 0
1.414	0.298	0.034 8

表 6 Central - Composite 试验方案与结果

Tab. 6 Test scheme and results of Central - Composite

序号	X_5	X_6	堆积角 $\alpha_3/(^\circ)$	相对误差 $Y/\%$
1	-1	-1	46.65	4.76
2	1	-1	44.82	0.65
3	-1	1	45.90	3.08
4	1	1	44.90	0.83
5	-1.414	0	47.92	7.61
6	1.414	0	44.56	0.07
7	0	-1.414	46.16	3.66
8	0	1.414	42.78	3.96
9	0	0	42.27	5.08
10	0	0	42.89	3.68
11	0	0	41.69	6.38
12	0	0	42.42	4.74
13	0	0	42.71	4.09

$$\alpha_3 = 42.40 - 0.94X_5 - 0.681X_6 +$$

$$0.208X_5X_6 + 1.98X_5^2 + 1.09X_6^2$$

(9)

对 Central - Composite 试验结果利用 Design-Expert 软件进行方差分析，结果如表 7 所示。可知堆积角二次回归模型 P 为 0.000 8、失拟项 P 为 0.101 7、模型决定系数 R^2 为 0.924 5，回归模型极显著、失拟项不显著，决定系数接近 1，表明堆积角二次回归方程拟合较好。变异系数表示该试验数据的可靠性，变异系数越小表明试验数据越可靠，该模型的变异系数为 1.6%，表明本次试验的可靠性较高。精确度表示模型的预测性，该模型精确度为 10.980 2，

表 7 Central - Composite 试验方差分析

Tab. 7 Test analysis of variance of Central - Composite

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	43.11	5	8.62	17.14	0.000 8 **
X_5	7.19	1	7.19	14.28	0.006 9 **
X_6	3.71	1	3.71	7.38	0.029 9 *
X_5X_6	0.172 2	1	0.1722	0.342 4	0.576 8
X_5^2	27.14	1	27.14	53.95	0.000 2 **
X_6^2	8.27	1	8.27	16.44	0.004 8 **
残差	3.52	7	0.503		
失拟项	2.66	3	0.887 8	4.14	0.101 7
误差	0.857 5	4	0.214 4		
总和	46.63	12			

表明该模型对于堆积角具有较好的预测性。回归模型中一次项 X_5 极显著、 X_6 显著,二次项均极显著,交互项 X_5X_6 不显著。因素 X_5 、 X_6 与堆积角之间存在二次非线性关系,且交互作用对堆积角影响不显著。

利用 Design-Expert 软件查看因素 X_5 、 X_6 对堆积角的响应曲面(图 11),该响应曲面为凹型曲面,随着因素 X_5 、 X_6 数值增大堆积角呈现先下降后上升的趋势;因素 X_5 对响应面趋势较陡,所以因素 X_5 比因素 X_6 影响显著。

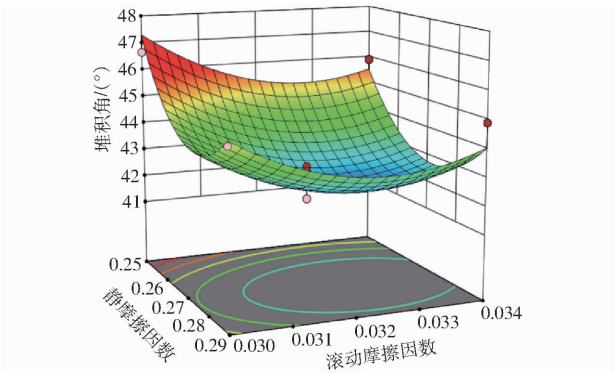


图 11 三七茎秆堆积角响应面
Fig. 11 Response surface of stacking angle of *Panax notoginseng* stem

根据 Central – Composite 试验结果与回归方程,以试验所得的堆积角相对误差 Y 最小为目标,对因素 X_5 、 X_6 进行最优解分析,设置目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min Y(X_5, X_6) \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1.414 \leq X_5 \leq 1.414 \\ -1.414 \leq X_6 \leq 1.414 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

得到三七茎秆间静摩擦因数为 0.29,滚动摩擦因数为 0.032,以此为最优参数组合进行三七茎秆接触参数验证试验,其他参数与 Central – Composite 试验保持一致。

3 试验验证与剪切装置设计

3.1 堆积角试验验证

将三七茎秆按照堆积角物理试验方法得到物理堆积角,在 EDEM 软件中进行三七茎秆堆积角仿真试验,物理参数采用力学特性试验测定的数值,接触参数按照最优组合进行设置。采用图像处理方法得到堆积角仿真数值,多次测量后取平均值。将物理试验数值与仿真试验数值进行对比,试验过程如图 12 所示。得到物理试验堆积角平均值为 44.62°,仿真试验堆积角平均值为 44.49°,相对误差为 0.29%。

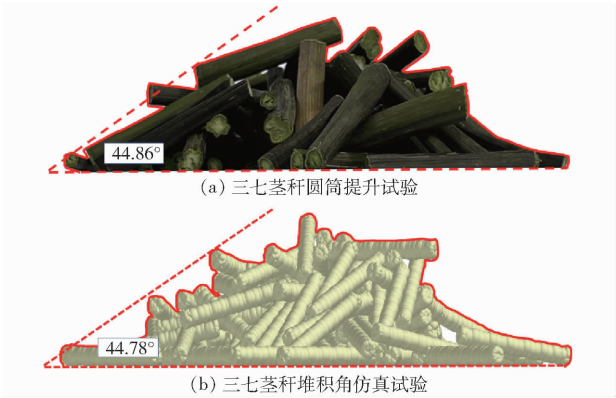


图 12 三七茎秆堆积角试验
Fig. 12 Experiment of stacking angle of *Panax notoginseng* stem

3.2 剪切试验验证

三七茎秆剪切试验设置刀具速度为 0.01 m/s,保持刀具与三七茎秆样品垂直,试验结束后得到剪切最大载荷,多次试验取平均值。在 EDEM 软件中将三七茎秆 bonding 模型水平放置支撑平面上,在 bonding 模型垂直上方建立刀具模型,模拟刀片剪切三七茎秆,试验后在软件后处理模块中导出剪切所受最大压力。将试验后两组数值进行对比分析,试验过程如图 13 所示。得到物理试验三七茎秆所受最大载荷平均值为 4.62 N,仿真试验三七茎秆所受最大载荷平均值为 4.55 N,相对误差为 1.52%。

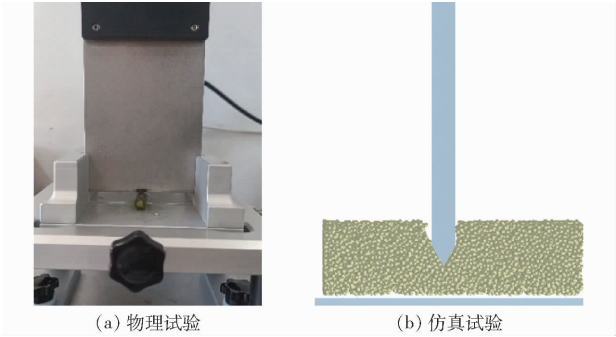


图 13 三七茎秆剪切试验
Fig. 13 Experiment of shear of *Panax notoginseng* stem

综合以上两种试验验证,可知三七茎秆离散元模型与离散元接触参数和实际三七茎秆物理模型一致。

3.3 杀秧装置设计

杀秧装置结合三七农艺要求采用割刀往复式杀秧方式,主要装置包含动力电机、偏心轮盘、偏心拨杆等,作业时,偏心拨杆将电机的旋转运动转化为直线运动;动滑块、定滑块为滑动滑轨方式,槽孔长度即为往复割刀的滑移行程;定动刀片数量分别为 5 片和 4 片,为了使茎秆切割过程中刀具具有滑切作用和导向作用,选用刀尖角为 28°的 LSHT 型粉碎刀。杀秧装置整体结构如图 14 所示。

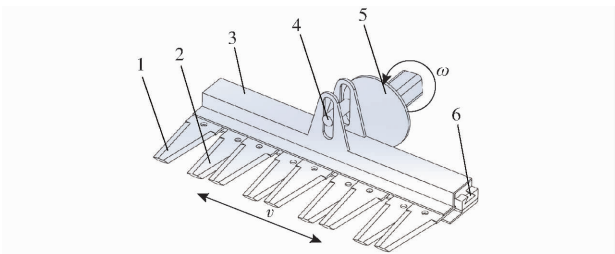


图 14 杀秧装置模型结构图

Fig. 14 Structure of seedling killing device stem

1. 动刀片 2. 定刀片 3. 动滑块 4. 偏心拨杆 5. 偏心轮
6. 定滑块

刀片布置采用错位排列的方式,LSHT 粉碎刀刀口夹角为 30° ,使刀具对茎秆产生挤压、拉伸变形区域,增加茎秆的断裂。刀片交错排列方式如图 15 所示。

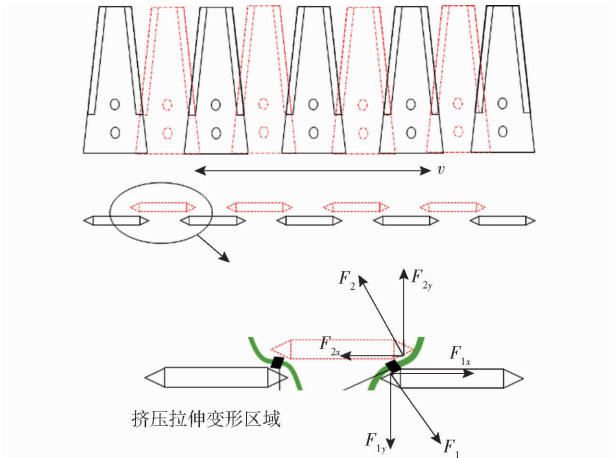


图 15 往复切割刀片交错排列方式

Fig. 15 Staggered arrangement of reciprocating cutting blades

3.4 杀秧装置仿真试验

通过茎秆颗粒间的粘结键数量变化,可以衡量杀秧刀具对三七茎秆的剪切效果,在仿真试验中共生成粘结键 295 321 个,粘结键数量变化曲线如图 16 所示。通过图 16 可知,在 $0 \sim 0.5$ s 时茎秆颗粒基本完成生成,此时刀具与茎秆颗粒的切割接触频繁,在 $0.5 \sim 1$ s 之间,茎秆颗粒与切割刀具首次接触产生破碎,粘结键数量开始急剧下降, $1 \sim 2.5$ s 粘结键数量进一步下降, $2.5 \sim 3.5$ s 之后,由于某些茎秆颗粒被刀具弹出仿真计算域之外,故粘结键数量保持一定范围后不再变化。

本文建立的三七茎秆离散元模型与实际三七茎秆基本吻合,误差较小,并依据该模型进行剪切仿真试验。由试验结果可知,本文设计的三七茎秆杀秧装置,对三七茎秆有良好的剪切效果,能保证三七茎秆的有效切断,为三七茎秆杀秧装备研制提供了研究基础。

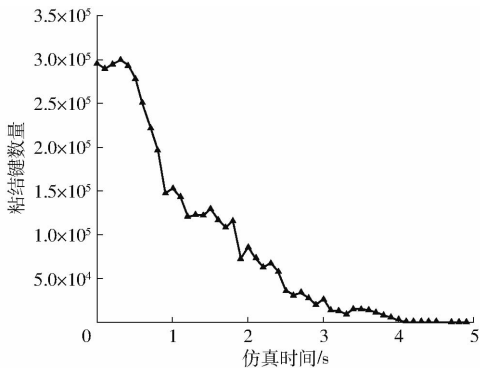


图 16 茎秆颗粒粘结键数量变化曲线

Fig. 16 Change in number of bonding bonds in stem grains

4 结论

(1)以三七茎秆为研究对象,通过试验测定三七茎秆本征参数。三七茎秆密度、含水率分别为 0.942 g/cm^3 、 82.51% ,泊松比为 0.335、弹性模量为 1371.15 MPa 、剪切模量为 513.54 MPa 。以本征参数为基础,计算得三七茎秆建模参数,针对堆积角试验与茎秆剪切试验,采用离散元 Hertz - Mindlin 模型与 Hertz - Mindlin with bonding 模型建模方法构建三七茎秆离散元模型。采用圆筒提升法进行三七茎秆的物理堆积角试验,利用 Origin 软件进行轮廓拟合得到堆积角为 44.53° 。通过 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Central - Composite 试验确定三七茎秆间、三七茎秆与作业装备间的接触参数,并通过堆积角试验和剪切试验验证三七茎秆离散元模型的可靠性。

(2)通过物理试验,获取三七茎秆与作业装备间碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.319、0.25、0.029;通过寻优试验,三七茎秆间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数最优值分别为 0.4、0.29、0.032。三七茎秆离散元 Hertz - Mindlin with bonding 模型法向刚度 $K_n = 3.26 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、切向刚度 $K_s = 2.17 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、法向临界应力 $\sigma = 2.27 \text{ MPa}$ 、切向临界应力 $\gamma = 9.65 \text{ MPa}$ 、粘结半径 $R_d = 0.1 \text{ mm}$ 。

(3)堆积角验证试验中,物理试验堆积角平均值为 44.62° ,仿真试验堆积角平均值为 44.49° ,相对误差为 0.29%;剪切验证试验中,物理试验三七茎秆所受最大载荷平均值为 4.62 N,仿真试验三七茎秆所受最大载荷平均值为 4.55 N,相对误差为 1.52%,可验证三七茎秆离散元模型可靠性。建立三七茎秆杀秧装置模型并进行仿真试验,有良好的剪切效果,为三七茎秆杀秧装备与三七联合收获机的研制提供了研究基础。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [2] 解开婷, 张兆国, 王法安, 等. 土壤与三七根茎黏附数学模型构建与验证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊1): 131–141.
XIE Kaiting, ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, et al. Mathematical model construction and verification of soil and *Panax notoginseng* root adhesion[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(Supp.1): 131–141. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 张兆国, 王法安, 张永成, 等. 自走式三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 234–240.
ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, ZHANG Yongcheng, et al. Design and experiment of self-propelled *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 234–240. (in Chinese)
- [5] 王法安. 三七收获机的设计与试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
WANG Faan. The design and experimental study of *Panax notoginseng* harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [6] 张兆国, 王一驰, 李汉青, 等. 液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 127–135, 158.
ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 127–135, 158. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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 properties of corn straw in milling process[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 58–65. (in Chinese)
- [9] 李娴. 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.
LI Xian. Study on discrete element modeling method of mechanical properties of corn straw[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [10] 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. Discrete element simulation parameter calibration of stem crushing in feed larval harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [11] 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60–67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw displacement in straw-soil-rotary tillage knife system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60–67. (in Chinese)
- [12] 苑进, 李金光, 邹亮亮, 等. 基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 85–98.
YUAN Jin, LI Jinguang, ZOU Liangliang, et al. Optimal design of spinach root-cutting shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 85–98. (in Chinese)
- [13] 王奇瑞, 毛罕平, 李青林. 基于离散元的柔性作物茎秆振动响应仿真[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 131–137.
WANG Qirui, MAO Hanping, LI Qinglin. Simulation of flexible crop stalk vibration response based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 131–137. (in Chinese)
- [14] 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. Simulation and experimental study of tomato straw cutting performance based on EDEM[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(10): 1017–1022. (in Chinese)
- [15] 刘鹏, 何进, 章志强, 等. 基于 CFD-DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 244–253.
LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Analysis and experiment of straw breaking motion characteristics of straw returning machine based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 244–253. (in Chinese)
- [16] 郝建军, 龙思放, 李浩, 等. 机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 34–42.
HAO Jianjun, LONG Sifang, LI Hao, et al. Development of discrete element model and calibration of simulation parameters for mechanically-harvested yam[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 34–42. (in Chinese)
- [17] REN J H, LIU X L, YANG W P, et al. Rhizosphere soil properties, microbial community, and enzyme activities: short-term responses to partial substitution of chemical fertilizer with organic manure[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 1136501.
- [18] 崔秀明, 詹华强, 董婷. 印象三七[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2009: 112–114.

CHEN Jin, NING Xiaobo, LI Yaoming, et al. Fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 87 - 91, 86. (in Chinese)

[18] 陈进,郑世宇,李耀明,等.联合收获机前进速度灰色预测模糊控制系统[J].农业机械学报,2011,42(10):110 - 115.
CHEN Jin, ZHENG Shiyu, LI Yaoming, et al. Grey predictive fuzzy control system of forward speed for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):110 - 115. (in Chinese)

[19] CHEN D, KANG F, ZHU Q Y, et al. Study on combine harvester speed control based on optimum threshing power consumption model[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012,130 - 134:1911 - 1914.

[20] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Navigation system for agricultural machines: nonlinear model predictive path tracking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 82: 32 - 43.

[21] COENA T, SAEYSA W, MISSOTTENB B, et al. Cruise control on a combine harvester using model-based predictive control [J]. Biosystems Engineering, 2008,99:47 - 55.

[22] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等.基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J].农业机械学报,2022,53(11):22 - 30,99.
CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):22 - 30,99. (in Chinese)

[23] SUN Yifan, LIU Renjie, ZHANG Man, et al. Design of feed rate monitoring system and estimation method for yield distribution information on combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,201:107322.

[24] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46 - 61.

[25] 张晓凤,王秀英.灰狼优化算法研究综述[J].计算机科学,2019,46(3):30 - 38.
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Comprehensive review of grey wolf optimization algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(3):30 - 38. (in Chinese)

(上接第 70 页)

[19] 马云海. 农业物料学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.

[20] 郭徽,杨薇,刘英. 云南三七主根干燥特性及其功效指标评价[J]. 农业工程学报, 2014,30(17): 305 - 313.
GOU Hui, YANG Wei, LIU Ying. Drying characteristics and efficacy index evaluation for main root of Yunnan *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(17): 305 - 313. (in Chinese)

[21] 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 flaxed seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20):25 - 33. (in Chinese)

[22] 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)

[23] 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. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71 - 79. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 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)

[26] 张喜瑞,胡旭航,刘俊孝,等.香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 121 - 130.
ZHANG Xirui, HU Xuhang, LIU Junxiao, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 121 - 130. (in Chinese)

[27] 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)

[28] 薛浩田. 三七联合收获机整机设计及关键部件的仿真试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
XUE Haotian. The whole machine design and simulation test of key components of *Panax notoginseng* combined harvester [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)