

# 茶茎秆离散元模型参数标定与试验

杜哲<sup>1</sup> 李邓辉<sup>1</sup> 李心平<sup>1</sup> 金鑫<sup>1,2</sup> 吴永彬<sup>1</sup> 于帆<sup>3</sup>

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003; 2. 龙门实验室成套装备科创中心, 洛阳 471003;  
3. 河南科技大学图书馆, 洛阳 471003)

**摘要:** 针对名优茶采收过程中机械部件与茶茎秆相互作用机理不明确、茶茎秆模型不精确等问题,以茶茎秆为研究对象,提出了一种基于粘结增强法的茶茎秆3层离散元仿真模型。以最大剪切力为评价指标,通过 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验,完成茶茎秆仿真粘结参数标定,利用标定的参数构建拉伸和穿刺模型进行相应仿真试验,与物理试验进行对比。结果表明,粘结参数中木质部-木质部法向接触刚度、木质部-木质部切向接触刚度和粘结半径对茎秆力学性能影响显著,其最优组合为  $3.447 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ 、 $3.536 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$  和  $4.404 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ;拉伸和穿刺验证试验相对误差不大于3%,且茎秆受力变化趋势基本一致,表明标定优化后参数具有可行性和准确性,可为茶茎秆相关系统数值模拟研究提供理论基础。

**关键词:** 茶茎秆; 离散元; 参数标定; 力学特性

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)01-0311-10

OSID:



## Calibration and Experiment of Discrete Element Model Parameters for Tea Stem

DU Zhe<sup>1</sup> LI Denghui<sup>1</sup> LI Xinping<sup>1</sup> JIN Xin<sup>1,2</sup> WU Yongbin<sup>1</sup> YU Fan<sup>3</sup>

(1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China  
2. Science and Technology Innovation Center for Completed Set Equipment, Longmen Laboratory, Luoyang 471003, China  
3. Library, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In response to the ambiguous understanding of the interaction mechanism between mechanical components and tea stem with the imprecision of tea stem model in the harvesting process of famous tea, focusing on tea stem, a novel approach termed binding enhancement was proposed to establish a three-layer discrete element simulation model for tea stem. The maximum shear force was used as the evaluation index with the factors of the normal contact stiffness of the xylem-xylem, the tangential contact stiffness of the xylem-xylem, and the bonding radius. The Plackett - Burman experimental design was used to select the significant influencing factors on the maximum shear force. The calibration range of significant parameters was narrowed down by the steepest climbing test, and the optimal combination of two models was further obtained through Box - Behnken test and variance analysis. Subsequently, the calibrated parameters were utilized to construct comprehensive models for tensile and puncture simulations, which was systematically compared and analyzed against corresponding physical experiments. The results indicated that the xylem - xylem normal contact stiffness, xylem tangential contact stiffness and bond radius had a significantly effect on the mechanical properties of the stem. The optimal combination was determined to be  $3.447 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,  $3.536 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ , and  $4.404 \times 10^{-5} \text{ mm}$ , respectively. The tensile and puncture verification experiments displayed relative errors not exceeding 3%, and the trend in stem force variation demonstrated substantial consistency. These results underscored the feasibility and accuracy of the calibrated and optimized parameters, thereby laying a solid theoretical foundation for numerical simulation studies pertaining to tea stem system.

**Key words:** tea stem; discrete element method; parameter calibration; mechanical properties

收稿日期: 2024-01-17 修回日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(5210521)和河南省科技攻关项目(242102111182)

作者简介: 杜哲(1989—),男,副教授,主要从事农作物收获理论及智能化装备研究,E-mail: duzhe03@126.com

通信作者: 李心平(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品收获与加工机械研究,E-mail: aalxp@126.com

## 0 引言

近年来,在茶叶市场中,名优茶产值占比不断提高,逐渐成为茶产业的支柱<sup>[1-3]</sup>。名优茶对嫩度、外形等有严格要求<sup>[4]</sup>,为了满足采收要求,国内外学者对采茶装置进行了深入研究,包括依照人手采摘原理设计采茶装置<sup>[5-6]</sup>,以降低茶叶损伤;利用螺旋流解决采收中茶叶附壁问题<sup>[7]</sup>,提高茶叶采摘成功率;利用图像处理<sup>[8]</sup>和深度学习<sup>[9]</sup>技术开发茶叶视觉识别系统,增强茶叶采摘精度。目前针对采茶装置相关研究已取得了较多成果,但采收装置与茶叶相互作用机理并不明确。分析物料与机械部件相互作用时,为降低试验成本,使结果可视化,往往采用数值模拟方法<sup>[10]</sup>,但现有研究所构建的刚性茶茎秆模型<sup>[11]</sup>,无法模拟茶茎秆在采收过程中的压缩、拉伸、剪切等力学行为。为了模拟这些力学过程,需要建立可破碎的茶茎秆离散元模型。

目前,国内外学者已对茎秆离散元模型构建进行了深入研究。苑进等<sup>[12]</sup>测定菠菜根参数并构建离散元模型,分析铲切过程,探究工作机理,优化菠菜根切铲参数。其他学者使用类似方法构建了胡麻茎秆<sup>[13]</sup>、饲用油菜茎秆<sup>[14]</sup>、小麦秸秆<sup>[15]</sup>、玉米秸秆柔性茎秆离散元模型<sup>[16]</sup>等。但此类方法在离散元茎秆建模时,往往将作物看作各向同性,简化为一种组织结构,建立的 EDEM 仿真模型为一种同类属性颗粒粘结而成。当茎秆内部有多层结构,具有各向异性时,应用一种同类属性颗粒进行仿真会导致误差变大。谢伟等<sup>[17]</sup>为解决油菜茎秆持段茎秆表皮与内芯力学特性存在显著差异的问题,选用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,采用两种不同材料属性颗粒模拟茎秆表皮和内芯建立收获期油菜茎秆双层粘结离散元仿真模型。邹舒畅等<sup>[18]</sup>分别建立苕麻茎秆麻皮和麻骨离散元模型,对苕麻脱骨过程进行了仿真,得到苕麻茎秆分离装置最优组合。此类方法构建的模型,与采用单层茎秆建模方法建立的离散元模型相比,具有更高精度,能够反映茎秆内部结构力学特性差异。

本文以茶茎秆为研究对象,针对茶茎秆内部力学特性差异,选用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,采用 3 种不同材料属性颗粒进行颗粒填充,建立茎秆 3 层粘结离散元仿真模型。通过对比仿真试验与物理试验,标定内部各层仿真参数,并通过拉伸和穿刺试验验证模型的准确性。

## 1 试验材料与力学特性测定

### 1.1 试验材料

试验所用茶茎秆(品种:中茶 108、龙井 43 和中

黄 1 号)于 2023 年 8 月 17 日采自河南省济源市卢仝茶园。试验选取茶茎秆第 3 节进行研究,取样位置如图 1a 所示。茶茎秆内部结构分为皮层、韧皮部、木质部和髓部 4 部分<sup>[19]</sup>,如图 1b 所示。采集的茶茎秆均无病虫害,无明显机械损伤。将枝叶去除,经多次测量与计算,得到其物理特性参数:茎秆平均长度为 21.06 mm,茎秆平均直径为 1.68 mm,平均含水率为 71.61%。

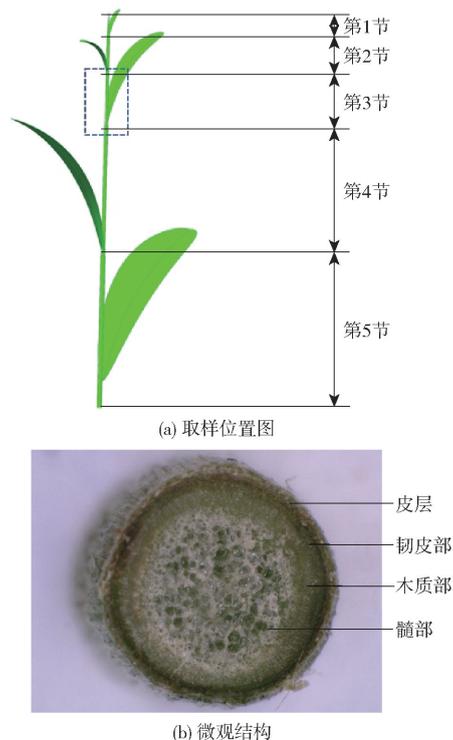


图 1 茶茎秆取样位置及微观结构示意图

Fig. 1 Schematics of sampling location and microstructure of tea stem

### 1.2 力学特性测定

为建立精准的名优茶茎秆离散元模型,为粘结参数标定提供参考值,对茎秆进行力学试验(拉伸、穿刺和剪切)。所有力学试验在 TA - XTC - 16 型质构仪(测试距离精度为 0.001 mm,测试速度为 0.01 ~ 45 mm/s)上进行。试验均以加载速度 1 mm/s 进行,每种力学特性试验测试 3 个品种,每个品种进行 5 次重复试验。试验结果如表 1 所示。

表 1 茶茎秆生物力学特性参数

参数	茶茎秆品种			平均值
	中茶 108	龙井 43	中黄 1 号	
拉伸力	3.91	4.29	3.01	3.74
穿刺力	2.33	1.68	1.74	1.92
剪切力	3.28	3.16	1.97	2.81

## 2 本征参数测量

为构建离散元模型,需要获取试验装置及茎秆

本征参数,包括密度  $\rho$ 、泊松比  $\mu$  和剪切模量  $G$ 。夹具和支架由 Q235 钢制成,其密度为  $7\ 850\ \text{kg/m}^3$ ,泊松比为 0.28,剪切模量为  $8.2 \times 10^{10}\ \text{Pa}$ <sup>[20]</sup>,茶茎秆本征参数需通过试验测量及参考现有研究结果确定。

利用排水法对 3 个品种茎秆样品进行密度测定,每个品种选取 5 个样本。使用电子天平和量筒分别测量茶叶茎秆样品质量  $m$  和体积  $V$  后,得其平均密度为  $1\ 530.8\ \text{kg/m}^3$ 。

泊松比对仿真试验影响不显著<sup>[21]</sup>,故参考相似农业物料茎秆<sup>[22-23]</sup>,将泊松比  $\mu$  设为 0.34。

通过拉伸试验测量植物茎秆弹性模量  $E$ ,并计算其剪切模量  $G$ 。测试过程中,使用夹具固定茶茎秆两端,以速度  $1\ \text{mm/s}$  拉伸,直到样品完全断裂,每个品种进行 5 次重复试验,其中平均弹性模量  $E$  为  $3.08 \times 10^7\ \text{Pa}$ 。剪切模量计算式为

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

$$\text{其中} \quad E = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (2)$$

式中  $A$ ——有效面积,  $\text{mm}^2$

$F$ ——拉伸力,  $\text{N}$

$L$ ——有效长度,  $\text{mm}$

$\Delta L$ ——有效宽度变化量,  $\text{mm}$

将  $E$  和  $\mu$  代入式(1)计算得  $G$  为  $1.16 \times 10^7\ \text{Pa}$ 。

### 3 接触参数测量

#### 3.1 恢复系数

通过  $45^\circ$  板碰撞试验<sup>[24]</sup> 测量恢复系数,如图 2 所示。试验时将茶叶茎秆提升至距离  $45^\circ$  板  $H$  处并调整姿势,使其释放后呈自由落体运动并与  $45^\circ$  板径向碰撞,反弹后落入落料板得到水平位移  $S_1$ 。改变落料板与碰撞点的相对高度为  $H_2$ ,得到样品水平位移为  $S_2$ ,此时样品与倾斜板之间恢复系数  $e$  计算式为

$$e = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2} \cos\left(45^\circ + \arctan \frac{v_y}{v_x}\right)}{v_0 \sin 45^\circ} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gS_1S_2(S_1 - S_2)}{2(H_1S_2 - H_2S_1)}} \\ v_y = \frac{H_1v_x}{S_1} - \frac{gS_1}{2v_x} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $v_0$ ——样品碰撞前垂直速度分量,  $\text{m/s}$

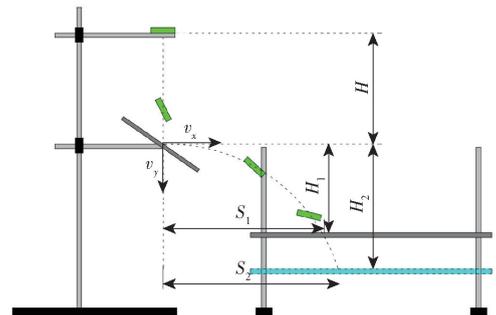
$v_x$ ——碰撞后水平速度分量,  $\text{m/s}$

$v_y$ ——碰撞后垂直速度分量,  $\text{m/s}$

重复试验 20 次记录数据,通过计算求得碰撞恢复系数平均值,试验结果如表 2 所示。



(a) 测量装置



(b) 测量原理

图 2 茶茎秆恢复系数测量装置及原理图

Fig. 2 Measuring device and principle of tea stem recovery coefficient

表 2 茶茎秆接触参数

Tab. 2 Contact parameters of tea stems

接触材料	参数	茶茎秆品种			平均值
		中茶 108	龙井 43	中黄 1 号	
茶茎秆- 茶茎秆	碰撞恢复系数	0.31	0.33	0.35	0.33
	静摩擦因数	0.66	0.64	0.68	0.66
	滚动摩擦因数	0.46	0.42	0.47	0.45
茶茎秆- Q235 钢板	碰撞恢复系数	0.45	0.51	0.56	0.51
	静摩擦因数	0.72	0.76	0.74	0.74
	滚动摩擦因数	0.49	0.43	0.47	0.46

#### 3.2 静摩擦因数和滚动摩擦因数

采用自制的摩擦因数测定仪对摩擦因数进行测量,通过该装置可测得物料摩擦角  $\varphi$ ,静摩擦因数和动摩擦因数计算式为

$$\mu_{sk} = \tan \varphi \quad (5)$$

测量时将茶叶茎秆粘贴在试验装置上,为避免物料含水率变化的影响,测量需在短时间内完成,试验重复 20 次测得茶叶茎秆之间、茶叶茎秆和 Q235 钢材之间的摩擦因数,如表 2 所示。

### 4 茶茎秆离散元模型建立

#### 4.1 接触模型选择及连结力定义

离散元模型由颗粒组成,各颗粒之间作用力通过接触模型确定<sup>[25]</sup>。其中 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型能够在颗粒间形成粘结键,通过粘结键的破裂来模拟植物茎秆生物力学特性,利用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型建立茶茎秆离



表 3 茶茎秆粘结参数

Tab. 3 Tea stem bonding parameters

因素	编码		
	-1	0	1
韧皮部-韧皮部法向刚度 $x_1/$ ( $N \cdot m^{-3}$ )	$3 \times 10^8$	$5.5 \times 10^8$	$8 \times 10^8$
韧皮部-木质部法向刚度 $x_2/$ ( $N \cdot m^{-3}$ )	$3 \times 10^8$	$5.5 \times 10^8$	$8 \times 10^8$
木质部-木质部法向刚度 $x_3/$ ( $N \cdot m^{-3}$ )	$3 \times 10^{11}$	$4.5 \times 10^{11}$	$6 \times 10^{11}$
韧皮部-韧皮部切向刚度 $x_4/$ ( $N \cdot m^{-3}$ )	$3 \times 10^8$	$5.5 \times 10^8$	$8 \times 10^8$
韧皮部-木质部切向刚度 $x_5/$ ( $N \cdot m^{-3}$ )	$3 \times 10^8$	$5.5 \times 10^8$	$8 \times 10^8$
木质部-木质部切向刚度 $x_6/$ ( $N \cdot m^{-3}$ )	$3 \times 10^{11}$	$4.5 \times 10^{11}$	$6 \times 10^{11}$
韧皮部-韧皮部临界法向应 力 $x_7/MPa$	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$9 \times 10^8$
韧皮部-木质部临界法向应 力 $x_8/MPa$	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$9 \times 10^8$
木质部-木质部临界法向应 力 $x_9/MPa$	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$9 \times 10^8$
韧皮部-韧皮部临界切向应 力 $x_{10}/MPa$	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$9 \times 10^8$
韧皮部-木质部临界切向应 力 $x_{11}/MPa$	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$9 \times 10^8$
木质部-木质部临界切向应 力 $x_{12}/MPa$	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$9 \times 10^8$
粘结增强模型颗粒粘结半径 $x_{13}/mm$	$4.4 \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-5}$	$4.6 \times 10^{-5}$
传统模型颗粒粘结半径 $x'_{13}/$ mm	$1.100 \times 10^{-4}$	$1.125 \times 10^{-4}$	$1.150 \times 10^{-4}$

$X_1 \sim X_{13}$ 为因素编码,方差分析如表 5 所示。结果表明: $X_3$ 、 $X_6$ 和  $X_{13}$ 或  $X_{13}^*$ 对最大剪切力影响显著,其余因素影响较小。

5.4 最陡爬坡试验

根据二水平析因试验结果,选取对最大剪切力影响显著的参数  $X_3$ 、 $X_6$ 和  $X_{13}$ 进行最陡爬坡试验,非显著因素均设置为零水平,方案和结果如表 6 所示。随着各因素水平增加,刀片对茶叶茎秆剪切力逐渐增大,其中试验 1、3 仿真剪切力最大值分别为 2.48、3.21 N(粘结增强模型)和 2.62、3.38 N(传统模型),将试验 1、3 中的因素水平作为后续 Box - Behnken 试验低水平和高水平。

5.5 Box - Behnken 响应曲面试验

为得到粘结参数的最优组合,以最大剪切力为响应,根据二水平析因试验和最陡爬坡试验结果,通过 Design-Expert 软件进行三因素三水平的 Box - Behnken 响应曲面试验。对响应面试验结果进行拟合和分析,分别建立最大剪切力  $F_{max}$ (粘结增强模型)和最大剪切力  $F'_{max}$ (传统模型)与影响因素的二阶回归模型为

$$F_{max} = 2.95 + 0.45X_3 - 0.074X_6 + 0.046X_{13} - 0.06X_3X_6 + 0.015X_3X_{13} + 0.013X_6X_{13} - 0.034X_3^2 + 0.014X_6^2 + 0.00875X_{13}^2 \quad (12)$$

$$F'_{max} = 3.03 + 0.51X_3 - 0.069X_6 + 0.096X_{13}^* - 0.12X_3X_6 + 20.0025X_3X_{13}^* + 0.03X_6X_{13}^* - 0.12X_3^2 + 0.0075X_6^2 + 0.0025X_{13}^{*2} \quad (13)$$

试验结果如表 7 所示。对 Box - Behnken 响应

表 4 二水平析因试验方案与结果

Tab. 4 Two level factorial experimental plan and results

序号	因素														$F_{max}/N$	$F'_{max}/N$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$ 或 $X'_{13}$			
1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	2.72	2.86	
2	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	4.13	5.57	
3	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	2.40	2.19	
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	2.16	2.31	
5	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	4.72	5.22	
6	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	4.66	5.39	
7	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	2.64	2.76	
8	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	2.25	2.37	
9	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	4.39	4.93	
10	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	2.23	2.28	
11	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	2.55	2.52	
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2.49	2.56	
13	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	4.82	6.75	
14	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	2.68	2.84	
15	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	4.8	6.53	
16	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	4.24	4.74	
17	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	4.34	4.75	
18	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	4.41	5.26	
19	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	4.08	5.44	
20	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	2.09	2.04	

表5 二水平析因试验方差分析

Tab. 5 Analysis of variance in two-level factorial experiments

方差来源	$F_{\max}$					方差来源	$F'_{\max}$				
	均方和	自由度	平方和	$F$	$P$		均方和	自由度	平方和	$F$	$P$
模型	21.779	13	1.675	74.857	<0.000 1**	模型	48.314	13	3.717	19.358	0.000 8**
$X_1$	0.003	1	0.003	0.129	0.732	$X_1$	0.028	1	0.028	0.147	0.715
$X_2$	0.039	1	0.039	1.73	0.236	$X_2$	0.063	1	0.064	0.333	0.585
$X_3$	20.767	1	20.767	927.937	<0.000 1**	$X_3$	44.491	1	44.492	231.736	<0.000 1**
$X_4$	0.000 3	1	0.000 3	0.014	0.909	$X_4$	0.180	1	0.179	0.93	0.372
$X_5$	0.011	1	0.011	0.473	0.517	$X_5$	0.515	1	0.515	2.684	0.153
$X_6$	0.323	1	0.323	14.414	0.009**	$X_6$	0.496	1	0.496	2.584	0.008**
$X_7$	0.007	1	0.007	0.323	0.591	$X_7$	0.066	1	0.066	0.344	0.579
$X_8$	0.007	1	0.007	0.323	0.591	$X_8$	0.489	1	0.490	2.551	0.161
$X_9$	0.037	1	0.037	1.652	0.246	$X_9$	0.588	1	0.588	3.064	0.131
$X_{10}$	0.030	1	0.030	1.359	0.288	$X_{10}$	0.086	1	0.086	0.447	0.529
$X_{11}$	0.022	1	0.022	0.973	0.362	$X_{11}$	0.078	1	0.078	0.407	0.547
$X_{12}$	0.015	1	0.015	0.652	0.450	$X_{12}$	0.017	1	0.017	0.091	0.774
$X_{13}$	0.518	1	0.518	23.164	0.003**	$X'_{13}$	1.215	1	1.215	6.330	0.046*
残差	0.130	6	0.022			残差	1.152	6	0.192		

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

表6 最陡爬坡试验方案与结果

Tab. 6 The steepest climbing test plan and results

序号	因素				$F_{\max}/N$	$F'_{\max}/N$
	$x_3/$	$x_6/$	$x_{13}/$	$x'_{13}/$		
	( $N \cdot m^{-3}$ )	( $N \cdot m^{-3}$ )	mm	mm		
1	$3.0 \times 10^{11}$	$3.0 \times 10^{11}$	$4.40 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-4}$	2.48	2.62
2	$3.6 \times 10^{11}$	$3.6 \times 10^{11}$	$4.44 \times 10^{-5}$	$1.11 \times 10^{-4}$	2.95	2.99
3	$4.2 \times 10^{11}$	$4.2 \times 10^{11}$	$4.48 \times 10^{-5}$	$1.12 \times 10^{-4}$	3.21	3.38
4	$4.8 \times 10^{11}$	$4.8 \times 10^{11}$	$4.52 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-4}$	3.45	3.98
5	$5.4 \times 10^{11}$	$5.4 \times 10^{11}$	$4.56 \times 10^{-5}$	$1.14 \times 10^{-4}$	3.72	4.70
6	$6.0 \times 10^{11}$	$6.0 \times 10^{11}$	$4.60 \times 10^{-5}$	$1.15 \times 10^{-4}$	4.59	5.21

表7 响应曲面试验方案与结果

Tab. 7 Response surface test plan and results

序号	因素			$F_{\max}/N$	$F'_{\max}/N$
	$X_3$	$X_6$	$X_{13}$ 或 $X'_{13}$		
1	0	1	1	2.98	3.06
2	0	0	0	2.95	3.03
3	-1	-1	0	2.53	2.25
4	1	-1	0	3.53	3.68
5	0	1	-1	2.87	2.94
6	-1	1	0	2.45	2.39
7	1	0	-1	3.32	3.28
8	1	1	0	3.21	3.35
9	1	0	1	3.45	3.49
10	0	0	0	2.95	3.03
11	0	0	0	2.95	3.03
12	-1	0	-1	2.43	2.44
13	0	-1	1	3.05	3.20
14	0	-1	-1	2.99	2.96
15	-1	0	1	2.50	2.54

曲面试验结果进行方差分析,结果如表8所示,模

型决定系数  $R^2$  为 0.992,拟合性较好;模型显著且失拟项不显著,不存在其他主要因素影响该试验的响应值; $X_3$ 和 $X_6$ 对剪切力影响极显著( $P < 0.01$ ), $X_{13}$ 或 $X'_{13}$ 影响较大( $P < 0.05$ ), $X_6^2$ 和 $X_{13}^2$ 或 $X'_{13}{}^2$ 及交互作用影响均不显著( $P > 0.05$ )。根据回归方程分别得到各因素交互作用对最大剪切力影响的响应面图,如图5所示。

粘结半径固定时,单位面积法向刚度和单位面积切向刚度响应曲面如图5a、5d所示,当单位面积法向刚度不变时,剪切力随着单位面积切向刚度增大逐渐增加;当单位面积切向刚度不变时,剪切力随着单位面积法向刚度增大逐渐增加。单位面积切向刚度固定时,单位面积法向刚度和粘结半径的响应曲面如图5b、5e所示,当单位面积法向刚度不变时,剪切力随粘结半径增大逐渐增加;当粘结半径不变时,剪切力随着单位面积法向刚度增大逐渐增加。单位面积法向刚度固定时,单位面积切向刚度和粘结半径的响应曲面如图5c、5f所示,当单位面积切向刚度不变时,剪切力随粘结半径增大逐渐增加;当粘结半径不变时,剪切力随单位面积切向刚度增大逐渐增加。

## 5.6 最优参数组合与验证

以茶茎秆实际最大剪切力为依据,对拟合出的方程进行数值求解,得到两个模型显著性参数最佳组合为:单位面积法向刚度  $x_3$  为  $3.447 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,单位面积切向刚度  $x_6$  为  $3.536 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,粘结半径  $x_{13}$  为  $4.404 \times 10^{-5} \text{ mm}$ (粘结增强模型);单位面积法向刚度  $x_3$  为  $3.721 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,单位面积切向

表 8 响应曲面方差分析

Tab. 8 Response surface analysis of variance

方差来源	$F_{\max}$				方差来源	$F'_{\max}$			
	均方	自由度	$F$	$P$		均方	自由度	$F$	$P$
模型	0.190	9	147.180	< 0.000 1 **	模型	0.260	9	70.494	< 0.000 1 **
$X_3$	1.620	1	1260.700	< 0.000 1 **	$X_3$	2.080	1	572.435	< 0.000 1 **
$X_6$	0.044	1	33.862	0.002 **	$X_6$	0.038	1	10.402	0.023 *
$X_{13}$	0.017	1	13.317	0.015 *	$X_{13}^*$	0.074	1	20.389	0.006 **
$X_3 X_6$	0.014	1	11.206	0.020 *	$X_3 X_6$	0.055	1	15.193	0.011 *
$X_3 X_{13}$	$9.000 \times 10^{-4}$	1	0.700	0.441	$X_3 X'_{13}$	$2.500 \times 10^{-5}$	1	0.007	0.937
$X_6 X_{13}$	$6.250 \times 10^{-4}$	1	0.486	0.517	$X_6 X'_{13}$	$3.600 \times 10^{-3}$	1	0.990	0.365
$X_3^2$	$4.206 \times 10^{-3}$	1	3.273	0.130	$X_3^2$	0.053	1	14.627	0.012 *
$X_6^2$	$6.981 \times 10^{-4}$	1	0.543	0.494	$X_6^2$	$2.077 \times 10^{-4}$	1	0.057	0.821
$X_{13}^2$	$2.827 \times 10^{-4}$	1	0.220	0.659	$X_{13}^2$	$2.308 \times 10^{-5}$	1	0.006	0.940
残差	$1.285 \times 10^{-3}$	5			残差	$3.635 \times 10^{-3}$	5		
失拟项	$2.142 \times 10^{-3}$	3			失拟项	$6.058 \times 10^{-3}$	3		
纯误差	0	2			纯误差	0	2		
$R^2 = 0.996$ $R^2_{Adj} = 0.990$					$R^2 = 0.992$ $R^2_{Adj} = 0.978$				

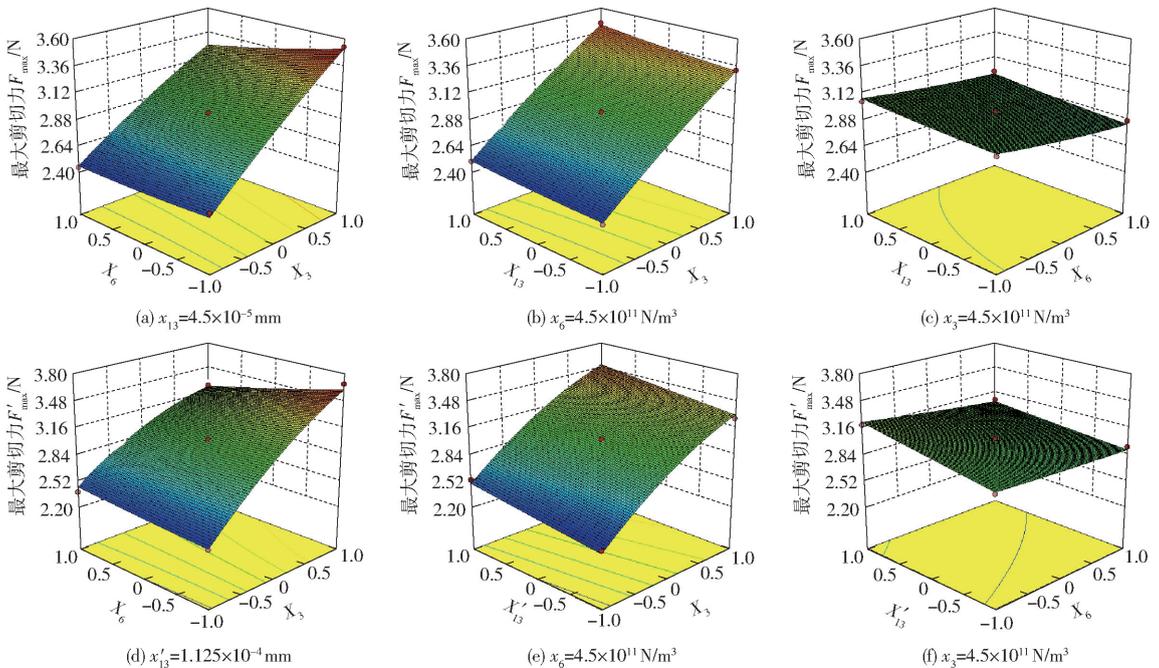


图 5 交互因素对两模型剪切力响应曲面

Fig. 5 Interaction factors on shear force response surface of two models

刚度  $x_6$  为  $4.289 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ , 粘结半径  $x'_{13}$  为  $1.144 \times 10^{-4} \text{ mm}$  (传统模型)。其余各因素均取参数水平的中间值, 利用 EDEM 对最佳参数组合进行仿真验证试验。图 6 对比了茶茎秆模型与真实茶茎秆的剪切过程, 在粘结增强茶茎秆模型和传统茶茎秆模型剪切试验过程中, 均经历表皮切割、木质部切割、完全断裂的过程, 模拟模型与真实茶茎秆的断裂过程基本一致。模型试验所得力-时间曲线如图 7 所示。将模拟试验曲线与物理试验曲线进行对比, 发现两者变化趋势基本一致, 所建立的茶茎秆模拟模型能够反映剪切过程中力随时间的变化规律。粘结增强模型最大剪切力和

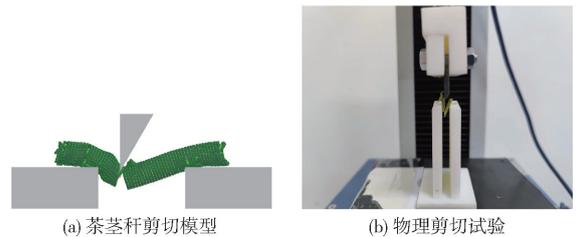


图 6 茶茎秆及茶茎秆剪切试验过程

Fig. 6 Tea stem and tea stem shear test process

传统模型最大剪切力分别为 2.78 N 和 2.77 N, 与实际试验相对误差分别为 1.07% 和 1.44%, 与实际试验基本一致, 表明茶茎秆建模与标定的参数准确可靠。

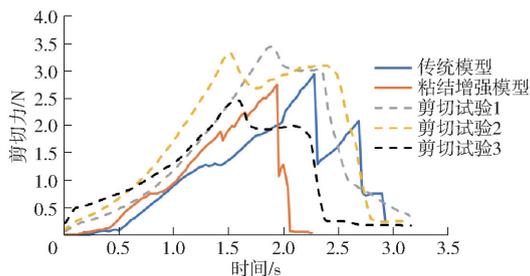


图7 茶茎秆剪切力-时间曲线

Fig. 7 Tea stem shear force - time curves

为了对比茶茎秆粘结增强模型优化效果,分别计算两种模型力-时间曲线与实际试验曲线的相对误差<sup>[28]</sup>,试验结果如表9所示,两曲线相对误差计算式为

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N |S'(t) - S(t)|}{\sum_{i=1}^N |S(t)|} \times 100\% \quad (14)$$

式中  $W$ ——相对误差, %

$S(t)$ ——曲线1与坐标轴面积

$S'(t)$ ——曲线2与坐标轴面积

表9 两种模型与实际试验相对误差

Tab. 9 Relative error between two models and actual experiments %

模型	剪切试验1	剪切试验2	剪切试验3	平均值
粘结增强模型	5.6	7.4	5.3	6.1
传统模型	8.3	6.7	5.8	6.9

对结果进行分析,发现粘结增强模型相对误差相对较小,力的改变趋势与实际试验更相符。表明通过颗粒粘结增强方法能够提高模型精度,所以选定粘结增强茎秆模型为最终茶茎秆模型。

### 5.7 拉伸和穿刺试验

为了进一步验证粘结增强模型的正确性,进行茶茎秆拉伸和穿刺验证试验。图8a和图8b对比了茶茎秆模型与真实茶茎秆的拉伸变形过程。在茶茎秆模型和真茶茎秆的拉伸试验过程中,均经历拉伸、中间位置局部断裂、截面完全断裂的过程。模拟模型与真实茶茎秆断裂过程较为一致。茶茎秆拉伸过程中拉伸力变化如图9a所示。拉伸力变化过程相对一致,这表明茶茎秆模型与真实茶茎秆具有相似的拉伸特性。模型最大拉伸力为3.83 N,与实际试验相对误差为2.41%,该模型能够反映茶茎秆拉伸性能。

图8c和图8d对比茶茎秆模型和真茶茎秆穿刺过程。茶茎秆模型和真茶茎秆穿刺试验,依次进行表皮穿刺、木质部穿刺和茎秆完全刺穿过程。穿刺试验中观察到的茶茎秆变形与模拟结果相似。穿刺

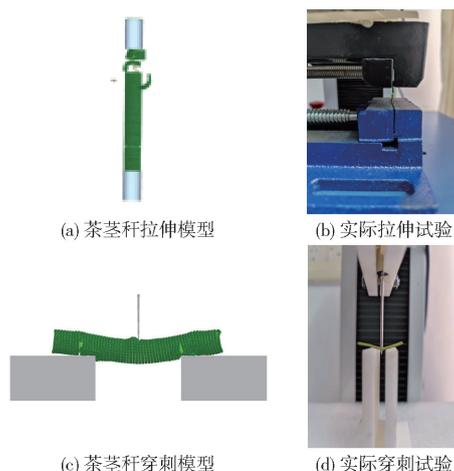
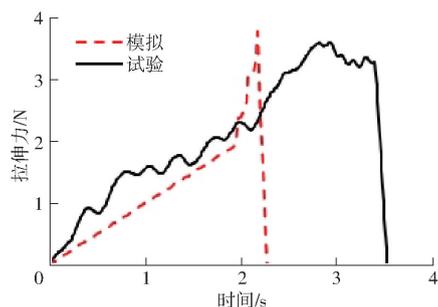
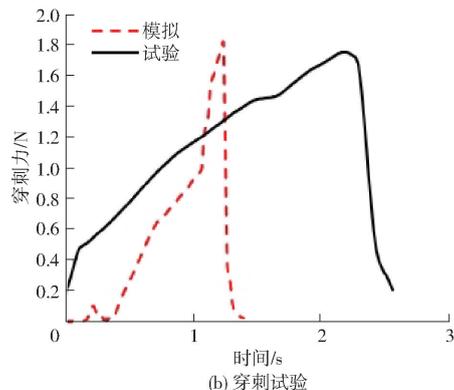


图8 茶茎秆力学仿真试验及相应实际试验

Fig. 8 Mechanical simulation test and corresponding actual test of tea stem



(a) 拉伸试验



(b) 穿刺试验

图9 实际拉伸与穿刺试验与仿真试验力-时间曲线

Fig. 9 Force - time curves between actual tensile and puncture tests and simulation tests

力随时间的变化曲线如图9b所示。茶茎秆模型最大穿刺力为1.81 N,与实际试验相差2.76%,表明所建模型能够模拟茶茎秆穿刺过程。

## 6 结论

(1)以名优茶茎秆为研究对象,测定和计算了茶茎秆本征参数和接触参数。茶茎秆密度 $1530.80 \text{ kg/m}^3$ 、泊松比0.34、弹性模量 $30.08 \text{ MPa}$ 、剪切模量 $12.53 \text{ MPa}$ ;通过物理试验测得茶茎秆的最大剪切力、最大穿刺力和最大拉伸力分别为2.81、1.92、3.74 N,茶茎秆之间的碰撞恢复系数、静

摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.33、0.66、0.45;茶茎秆和 Q235 钢板之间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.51、0.74、0.46。

(2)通过茶茎秆微观组织观察及力学特性研究,选取茶茎秆内部结构中力学行为影响显著的韧皮部、木质部和髓部构建模型。提出了粘结增强法填充颗粒,并借助 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,构建了茶茎秆 3 层粘结模型。

(3)以实际最大剪切力为响应值,采用仿真逼近预测法对茶茎秆 3 层粘结模型参数进行了标定。通过 Plackett - Burman 试验设计筛选出木质部-木质部法向接触刚度、木质部-木质部切向接触刚度、粘结半径 3 个因素对最大剪切力影响显著,由最陡爬坡试验缩小显著性参数标定范围,进一步通过 Box - Behnken 试验和方差分析得出两模型最优组

合为:单位面积法向刚度  $3.447 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,单位面积切向刚度  $3.536 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,粘结半径  $4.404 \times 10^{-5} \text{ m}$ (粘结增强模型),单位面积法向刚度  $3.721 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,单位面积切向刚度  $4.289 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,粘结半径  $1.144 \times 10^{-4} \text{ m}$ (传统模型)。得到两模型模拟值与实测最大剪切力相对误差分别为 1.07% 和 1.44%,与实际试验基本一致,验证了茶茎秆建模与标定参数的可靠性。

(4)利用建立的茶茎秆 3 层粘结模型,进行粘结增强模型与传统模型的对比分析,结果表明粘结增强模型与实际剪切试验结果的绝对误差更小,具有更高精度。利用粘结增强茶模型进行拉伸和穿刺仿真试验,与物理试验相比,最大拉伸力和最大穿刺力相对误差分别为 2.41% 和 2.76%,与实际试验基本相符,进一步验证了茶茎秆模型的有效性和准确性。

### 参 考 文 献

- [1] 肖智,黄贤金,孟浩,等. 2009—2014 年中国茶叶生产空间演变格局及变化特征[J]. 地理研究,2017,36(1):109 - 120. XIAO Zhi, HUANG Xianjin, MENG Hao, et al. Spatial structure and evolution of tea production in China from 2009 to 2014 [J]. Geographical Research, 2017, 36(1): 109 - 120. (in Chinese)
- [2] 李虹. 四川巴中市茶产业现状调查及发展对策分析[D]. 雅安:四川农业大学,2017. LI Hong. An investigation on current situation and development countermeasures of tea industry in Bazhong, Sichuan[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [3] 管曦,谢向英,林畅,等. 中国茶产业的发展思考及其对策研究(续)[J]. 中国茶叶,2019,41(1):39 - 43.
- [4] 郑航,傅童,薛向磊,等. 茶叶机械化采摘技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2023,44(9):28 - 35. ZHENG Hang, FU Tong, XUE Xianglei, et al. Research status and prospect of tea mechanized picking technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 28 - 35. (in Chinese)
- [5] 贾江鸣,叶玉泽,程培林,等. 手持式名优茶嫩梢采摘机械手设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2022,53(5):86 - 92. JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and experimental optimization of hand-held manipulator for picking famous tea shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 86 - 92. (in Chinese)
- [6] 罗坤,吴正敏,曹成茂,等. 茶鲜叶嫩梢捏切组合式采摘器设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(13):1 - 9. LUO Kun, WU Zhengmin, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of the combined pinch and cut picker for tea fresh leaf tips[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13): 1 - 9. (in Chinese)
- [7] 陈建能,李杭,任萍,等. 螺纹管吸附式名优茶采收器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(5):131 - 139. CHEN Jianneng, LI Hang, REN Ping, et al. Design and experiment of threaded tube adsorption type famous tea harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 131 - 139. (in Chinese)
- [8] CHEN C, LU J, ZHOU M, et al. A YOLOv3-based computer vision system for identification of tea buds and the picking point [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107116.
- [9] XU W, ZHAO L, LI J, et al. Detection and classification of tea buds based on deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106547.
- [10] 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)
- [11] 王升. 便携式电动采茶机关键部件设计与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2018. WANG Sheng. Design and experimental study on portable electric tea plucking machine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (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(Sup. 2): 85 - 98. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] SCHRAMM M, TEKESTE M Z. Wheat straw direct shear simulation using discrete element method of fibrous bonded model[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 1–12.
- [16] LIU W, SU Q, FANG M, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn straw cutting based on Hertz–Mindlin with Bonding[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 1156.
- [17] 谢伟, 彭磊, 蒋蕻, 等. 收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112–120. XIE Wei, PENG Lei, JIANG Pin, et al. Discrete element model building and optimization of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112–120. (in Chinese)
- [18] 邹舒畅, 苏工兵, 邵运果, 等. 基于离散元法的苕麻茎秆分离装置仿真优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 60–67. ZOU Shuchang, SU Gongbing, SHAO Yunguo, et al. Simulation optimization and experiment of separation device for ramite stalks based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 60–67. (in Chinese)
- [19] 李远志, 赖红华. 茶树茎的微观结构[J]. 广东茶叶科技, 1985(2): 20–23.
- [20] 杨启志, 赫明胜, 施雷, 等. 分层防寒土与接触式清土机具相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 52–61. YANG Qizhi, HE Mingsheng, SHI Lei, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for interaction between layered cold soil and contact soil clearing tools[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(1): 52–61. (in Chinese)
- [21] WANG Y, ZHANG Y, YANG Y, et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 400–414.
- [22] ZHAO W, CHEN M, XIE J, 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.
- [23] SHI Y, JIANG Y, WANG X, et al. A mechanical model of single wheat straw with failure characteristics based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 1–15.
- [24] 陈涛, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 91–100. CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91–100. (in Chinese)
- [25] LIU K, LIAO P, GONG J, et al. Research and analysis of the key technologies and equipment with fuelutization of cotton stalk[J]. Chin. Agric. Mech., 2018, 39(1): 78–83.
- [26] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 40–46. ZHU Haili, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 40–46. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] 周英杰. 加速度测试积分位移算法及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. ZHOU Yingjie. A study on integral algorithm for acceleration test to get displacement and application[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)