doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.012

类芦茎秆离散元模型建立与参数标定

叶大鹏[1,2]　青家兴[1,2]　林志强[1,2]　吴逸腾[1]　赖鸿康[1]　翁海勇[1,2]
(1. 福建农林大学机电工程学院, 福州 350002; 2. 福建省农业信息感知技术重点实验室, 福州 350002)

摘要: 针对类芦缺少切割粉碎仿真模型,以类芦为研究对象,建立茎秆的离散元模型并完成具体参数测定与标定。首先,搭建测试平台,测定了类芦茎秆与钢的碰撞恢复系数、静摩擦因数与滚动摩擦因数等接触参数,建立了类芦茎秆模型并开展仿真堆积角试验,根据 Box - Behnken 试验方案以及物理堆积角(23.47°),标定了茎秆间接触参数。其次,开展物理剪切与压缩试验,得到茎秆最大剪切力 F_d = 155.18 N,最大压缩破坏力 F_c = 844.36 N;为进一步建立柔性类芦茎秆模型,选取 Hertz - Mindlin with Bonding 为颗粒间粘结模型,通过 Central Composite 试验方案开展该模型的仿真剪切、压缩试验,以 F_d 与 F_c 为优化目标,完成粘结模型参数标定。得到类芦茎秆离散元模型参数:茎秆间的碰撞恢复系数、静摩擦因数和动摩擦因数分别为 0.35、0.60 和 0.004 9;粘结模型中单位面积法向和切向刚度分别为 6.13×10^{10} N/m^3 和 3.96×10^{10} N/m^3,法向应力和切向应力分别为 3.5×10^7 Pa 和 4.0×10^7 Pa。开展仿真验证试验,物理与仿真试验结果最大偏差为 4.81%,表明所建立的类芦茎秆离散元模型较为合理,研究结果可为类芦剪切粉碎装置的设计提供理论基础。

关键词: 类芦茎秆; 堆积角试验; 剪切试验; 压缩试验; 离散元模型; 参数标定
中图分类号: S225.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0139-11　　**OSID**:

Establishment and Parameter Calibration of Discrete Element Model for *Neyraudia reynaudiana* Stalk

YE Dapeng[1,2]　QING Jiaxing[1,2]　LIN Zhiqiang[1,2]　WU Yiteng[1]　LAI Hongkang[1]　WENG Haiyong[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*
2. *Fujian Key Laboratory of Agricultural Information Sensing Technology, Fuzhou* 350002, *China*)

Abstract: Aiming to address the lack of simulation models for cutting and crushing *Neyraudia reynaudiana* stalk, a discrete element model for *Neyraudia reynaudiana* stalk was established and the determination and calibration of specific parameters were completed. Firstly, a test platform was set up to determine contact parameters such as collision recovery coefficient, static friction, and rolling friction coefficient between the *Neyraudia reynaudiana* stalk and the steel plate. A *Neyraudia reynaudiana* stalk model was established, and a simulation stacking angle test was conducted. The contact parameters between stalks were calibrated by using the Box - Behnken test scheme and physical stacking angle (23.47°). Secondly, physical shear and compression tests were conducted to obtain the maximum shear force of the stem: F_d = 155.18 N, and the maximum compressive failure force: F_c = 844.36 N. To further establish the flexible *Neyraudia reynaudiana* stalk model, the Hertz - Mindlin with Bonding was selected as the inter-particle bonding model parameter. Simulation shear and compression tests of the model were carried out by using the Central Composite test program, and the bonding model parameter was calibrated with F_d and F_c as optimization targets. The parameters of the discrete element model for *Neyraudia reynaudiana* stalk were obtained as follows: collision recovery coefficients, static rubbing coefficients, and dynamic friction coefficients of the stalks were 0.35, 0.60, and 0.004 9; the normal and tangential stiffnesses in the bonding model of the flexible *Neyraudia reynaudiana* stalk model were 6.13×10^{10} N/m^3 and 3.96×10^{10} N/m^3, respectively, and the normal and tangential stresses were

收稿日期: 2024-11-17　修回日期: 2024-12-28
基金项目: 福建省林业科学技术攻关项目(2023FKJ01)、福建省重大专项(2021NZ0101)和福建省自然科学基金项目(KJB23066XA)
作者简介: 叶大鹏(1971—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: ydp@fafu.edu.cn
通信作者: 翁海勇(1989—),男,副教授,博士,主要从事农业传感技术及装备研究,E-mail: hyweng@fafu.edu.cn

3.5 × 10^7 Pa and 4.0 × 10^7 Pa, respectively. The simulation validation test showed a maximum deviation of 4.81% between the physical and simulation test results, indicating that the discrete *Neyraudia reynaudiana* stalk model was more reasonable. Overall, the research result can provide a theoretical basis for the design of subsequent shear crushing devices for *Neyraudia reynaudiana* stalk.

Key words: *Neyraudia reynaudiana* stalk; stacking angle test; shearing test; compression test; discrete element model; parameters calibration

0 引言

类芦(*Neyraudia reynaudiana*)为类芦属菌草,分布、种植广泛,含有丰富的营养物质:具有木屑 3.49 倍的粗蛋白含量以及 6.85 倍的粗纤维等含量[1]。其可作为畜牧养殖中的饲料、培育食用菌的菌料以及纸张;因其根系发达、抗逆性强,多用于防风固沙,改善土地状况[2-4]。

类芦通过切割、粉碎、压缩转变为待用的物料,其中类芦茎秆为主要研究对象。在剪切粉碎类似茎秆研究中,广泛运用了离散元法,该方法可模拟机具与物料的相互作用状态、模拟剪切破碎过程,进而实现剪切粉碎刀具的优化[5-6],建立作物茎秆的离散元模型为研究剪切粉碎装备的核心工作,诸多学者已开展多种作物、物料的离散元仿真模型研究。大部分研究中采用物理、仿真试验相结合的方法实现试验与接触对象间接触参数的标定[7-10]。在获取对应的接触参数后,为进一步建立物料的柔性离散元模型,学者通过物料的物理力学试验值,标定模型内部颗粒粘结参数[11-15]。上述研究仅通过试验对象的一种物理试验力学值作为目标值,标定了所建模型的粘结参数,标定的参数存在一定误差。

本文以采收期的类芦为研究对象,开展类芦茎秆的物理与仿真堆积角试验,完成茎秆与钢的接触参数标定;由于类芦茎秆在切割粉碎过程,茎秆将被剪切与压缩,故以类芦茎秆的物理最大剪切力、最大压缩破坏力作为目标值,完成类芦茎秆仿真模型的粘结参数标定,为后续类芦等菌草的剪切粉碎装置研发提供设计基础。

1 类芦茎秆参数测定

1.1 材料与仪器

试验材料选用福建农林大学旗山校区菌草研究中心内成熟、无病害、无损伤、处于收获期内的类芦茎秆,如图 1 所示。试验仪器选用:AX-G 拉力试验机(日本岛津公司,仪器精度:0.05 N)、电子游标卡尺(精度:0.01 mm)、Phantom VEO 型高速摄像机(美国 Vision Resesarch 公司)、角度仪、钢板、角度可调的斜台(可调角度为 0°~45°)等。



图 1 类芦实物图

Fig. 1 Physical image of *Neyraudia reynaudiana*

1.2 类芦茎秆本征参数测定

类芦茎秆本征参数包括:密度、泊松比、弹性模量。

1.2.1 类芦茎秆密度测定

采用排水法测定类芦茎秆密度,测试 15 次并求平均值,得到类芦茎秆密度:$\rho = 821.187\ \mathrm{kg/m^3}$。

1.2.2 类芦茎秆泊松比测定

类芦茎秆泊松比的测定方法为:制备长度为 20 mm 的类芦茎秆,将该茎秆轴向放置于 AX-G 拉力试验机的下压盘上,开展单轴压缩试验,设定拉力试验机的上压盘压缩距离为 5 mm,测量类芦茎秆压缩前后的径向尺寸,重复试验 10 次。计算并取平均值,得到类芦茎秆的泊松比为:$\mu = 0.24$。

1.2.3 类芦茎秆弹性模量测定

类芦茎秆弹性模量的测定方法为:制备长度为 20 mm 的类芦茎秆,轴向放置于 AX-G 拉力试验机的下压盘上,拉力试验机的上压盘压缩类芦茎秆使其完全压溃,分析得到类芦茎秆在弹性阶段内的最大载荷 F 及茎秆对应的压缩变形量 Δl,重复试验 10 次,通过公式

$$E = \frac{Fl}{S\Delta l} \tag{1}$$

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

式中 E——类芦茎秆弹性模量,Pa

G——类芦茎秆剪切模量,Pa

F——类芦茎秆在弹性阶段内的最大载荷,N

l——类芦茎秆压缩前长度,m

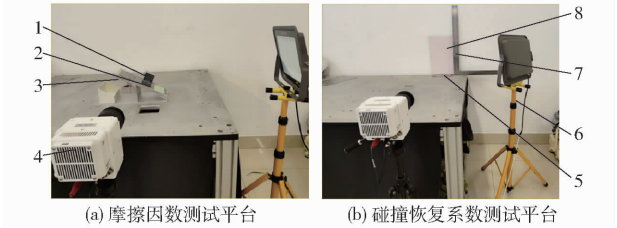
S——类芦茎秆压缩横截面积，m^2

Δl——类芦茎秆轴向变形量，m

计算并求平均值，得弹性模量为 $E = 45.36$ MPa；剪切模量为 $G = 18.38$ MPa。

1.3　类芦茎秆与钢的接触参数测定

类芦茎秆与钢的接触参数包括碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数。参考文献[16－18]的试验方法，采用斜台、高速摄像机、钢板、补光灯等设备搭建测试平台（见图 2），通过测试平台测定类芦茎秆与钢的接触参数。



(a) 摩擦因数测试平台　　(b) 碰撞恢复系数测试平台

图 2　类芦茎秆与钢接触参数测试平台

Fig. 2　Test platform for determining contact parameters between *Neyraudia reynaudiana* stalk and steel plate

1. 角度仪　2. 摩擦钢板　3. 斜台　4. 高速摄像机　5. 碰撞钢板　6. 补光灯　7. 钢尺　8. 1 mm 方格纸

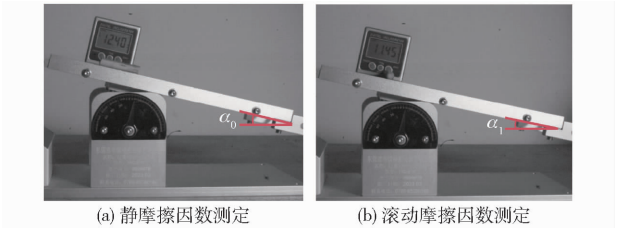
1.3.1　摩擦因数测定

测定类芦茎秆与钢的静摩擦因数，如图 3a 所示，将类芦茎秆放置在固定于斜台上的钢板上（类芦茎秆轴线平行于斜台长边），角度仪放置于钢板上，缓慢增加斜台倾斜角度并利用高速摄像机拍摄类芦茎秆刚开始滑动的图像[15]，读取角度仪的示数，得到斜台倾斜角 α_0，重复试验 15 次。利用公式

$$f_0 = \tan\alpha_0 \tag{3}$$

式中　f_0——类芦茎秆与钢的静摩擦因数

计算并取平均值，得到类芦茎秆与钢的静摩擦因数为 $f_0 = 0.46$。



(a) 静摩擦因数测定　　(b) 滚动摩擦因数测定

图 3　类芦茎秆与钢摩擦因数测定

Fig. 3　Test of friction coefficient between *Neyraudia reynaudiana* stalk and steel plate

测定类芦茎秆与钢的滚动摩擦因数，如图 3b 所示，将类芦茎秆放置在固定于斜台上的钢板上（类芦茎秆轴线垂直于斜台长边），按照测定静摩擦因数的操作步骤，测定类芦茎秆发生滚动的斜台倾斜角 α_1，重复试验 15 次。利用公式

$$f_1 = r\tan\alpha_1 \tag{4}$$

式中　f_1——类芦茎秆与钢的滚动摩擦因数

r——试验类芦茎秆半径，m

计算并取平均值，得到茎秆与钢的滚动摩擦因数 $f_1 = 0.000\,96$。

1.3.2　碰撞恢复系数测定

碰撞恢复系数与物体本身性质有关，其体现物体发生碰撞后的恢复能力，其值为两物体接触碰撞时，碰撞点的法向相对分离速度与接近速度的比值[16]。本文运用高速摄像机、钢尺与 1 mm 方格纸搭建测试平台，如图 2b 所示，测定类芦茎秆与钢的碰撞恢复系数。

测定类芦茎秆与钢板的碰撞恢复系数，见图 4，将类芦茎秆固定于 $d_0 = 35$ mm 的高度，使其自由下落并碰撞钢板[17]，采用高速摄像机拍摄，记录类芦茎秆碰撞钢板后的反弹高度 d_1，重复试验 15 次。利用公式

$$e = \sqrt{\frac{d_1}{d_0}} \tag{5}$$

计算并取平均值，得到类芦茎秆与钢板的碰撞恢复系数 $e = 0.52$。

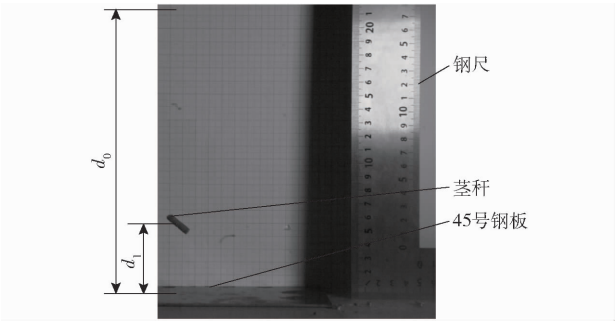


图 4　类芦茎秆与钢板间碰撞恢复系数测定

Fig. 4　Test of collision recovery coefficient between *Neyraudia reynaudiana* stalk and steel plate

1.4　类芦茎秆间接触参数测定

类芦茎秆间接触参数包括：碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数，参考文献[5,19]中测定上述参数的试验方法，类芦茎秆间接触参数在测试平台中（图 2）难以准确测定，故仅测定各参数的范围值。

测定类芦茎秆间接触参数时，采用与前文测定类芦茎秆与钢接触参数试验类似的平台与方法。试验开展时，将前文测试的钢板替换成均匀排列的类芦茎秆排，试验过程如图 5 所示，完成数据处理，得到类芦茎秆间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数的范围为：0.23 ~ 0.48、0.32 ~ 0.68、0.001 4 ~ 0.004 2。

2　类芦茎秆间接触参数标定

堆积角（休止角）体现了物料流动以及摩擦等

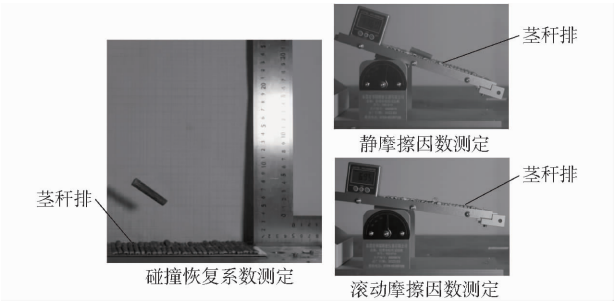


图 5 类芦茎秆间接触参数测定

Fig. 5 Test of contact parameters between *Neyraudia reynaudiana* stalk

性质,堆积角试验多用于离散元模型的接触参数标定[18]。本文将开展类芦物理、仿真堆积角试验,完成类芦茎秆间接触参数标定。

2.1 物理堆积角试验

制备了 300 根长度为 40 mm 的类芦茎秆,测量得到平均直径为 8.89 mm。将制备的类芦茎秆放置于直径为 120 mm 的钢制圆筒内,随后圆筒以 0.5 mm/s 的速度匀速缓慢上升,类芦茎秆缓慢堆积并形成茎秆堆,待堆积稳定后,采集物理堆积角图像,重复试验 10 次。通过 Photoshop 软件对采集图像的背景进行去除,进一步采用 Matlab 软件对图像开展二值化等操作并搜索、提取轮廓边线像素点,最后采用 Excel 软件对轮廓边线像素点的数据进行线性拟合并得到拟合方程

$$\theta = \frac{\arctan|K| \times 180}{\pi} \tag{6}$$

式中 θ——物理堆积角

K——轮廓边线像素点拟合方程斜率

计算得物理堆积角的平均值:$\theta_0 = 23.47°$。

物理堆积角图像处理过程见图 6。

2.2 仿真堆积角试验

类芦茎秆为杆状物料模型,建立类芦茎秆仿真模型时,应进行一定的简化:不考虑该类芦茎秆的尺寸细微改变,且茎秆内部材料具有各向同性[19]。在 EDEM 软件中,建立直径为 8.89 mm、长度为 40 mm 的类芦茎秆仿真模型;建立与物理堆积角试验相同的圆筒模型并在该模型顶部建立虚拟颗粒工厂,自由生成类芦茎秆模型 300 个并填充于圆筒中,待类芦茎秆模型稳定,类芦茎秆模型间的接触模型选用 Hertz - Mindlin(no slip)。仿真时,圆筒以 0.5 mm/s 的速度向上运动,类芦茎秆模型从圆筒底部散落出并自由地堆积形成茎秆堆,待堆积稳定后,采集仿真堆积角图像,进行类似于物理堆积角图像处理的操作,得到仿真堆积角 θ_1,建立的类芦茎秆仿真模型与试验过程如图 7 所示。

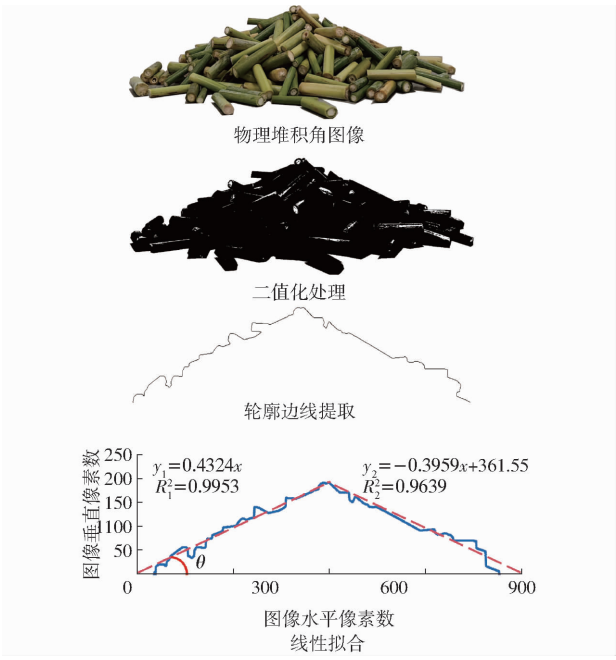


图 6 物理堆积角图像处理

Fig. 6 Physical stacking angle image processing

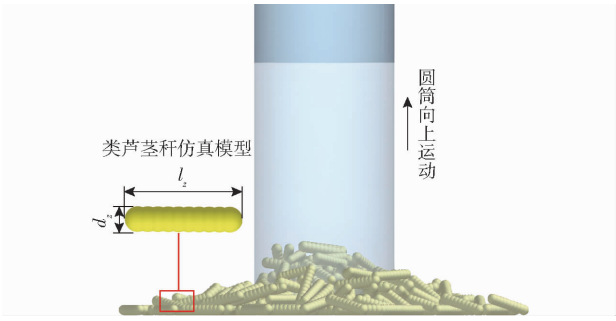


图 7 类芦茎秆堆积角仿真试验

Fig. 7 Experiment on simulating stacking angle of *Neyraudia reynaudiana* stalk

2.3 接触参数响应面试验

由前文测定的类芦茎秆间接触参数的范围值,确定类芦茎秆间的碰撞恢复系数 X_1、静摩擦因数 X_2、滚动摩擦因数 X_3 的取值范围分别为:0.2 ~ 0.5、0.3 ~ 0.7、0.001 ~ 0.005。以类芦茎秆间 3 个接触参数为因素值,仿真堆积角 θ_1 为响应值,选用 Box - Behnken 试验方案,开展仿真堆积角试验,其因素编码见表 1,试验方案与结果见表 2。

表 1 Box - Behnken 试验因素编码

Tab. 1 Box - Behnken test factors coding

编码	X_1	X_2	X_3
-1	0.20	0.3	0.001
0	0.35	0.5	0.003
1	0.50	0.7	0.005

运用 Design-Expert 13 软件对试验结果(表 2)进行分析,得到仿真堆积角的回归模型,模型决定系数 $R^2 = 0.9213$,表明该模型的预测值与实际值拟合

表 2　Box－Behnken 试验方案与结果

Tab. 2　Box－Behnken experimental program and results

序号	X_1	X_2	X_3	仿真堆积角 θ_1/(°)
1	0.50	0.5	0.001	27.85
2	0.35	0.5	0.003	14.12
3	0.35	0.3	0.001	10.86
4	0.35	0.5	0.003	16.71
5	0.50	0.3	0.003	16.30
6	0.50	0.5	0.005	25.96
7	0.35	0.5	0.003	15.50
8	0.20	0.7	0.003	19.73
9	0.35	0.7	0.005	25.47
10	0.50	0.7	0.003	22.83
11	0.35	0.7	0.001	22.68
12	0.35	0.5	0.003	18.84
13	0.20	0.5	0.005	23.39
14	0.35	0.3	0.005	17.27
15	0.35	0.5	0.003	18.15
16	0.20	0.3	0.003	12.87
17	0.20	0.5	0.001	15.55

良好，对应的回归方程为

$$\theta_1 = 16.66 - 2.68x_1 + 4.18x_2 + 1.89x_3 - 0.0825x_1x_2 + 2.43x_1x_3 + 0.905x_2x_3 - 2.69x_1^2 - 1.42x_2^2 - 3.83x_3^2 \quad (7)$$

式中　x_1、x_2、x_3——因素编码值

由模型方差分析（表 3）可知，该回归模型显著且失拟项不显著，表明该模型能准确反映各因素与仿真堆积角之间关系；X_1、X_2、X_3^2 对仿真堆积角的影响为极显著；X_3、X_1^2 对模型的影响显著；其余项影响为不显著。

表 3　仿真堆积角回归模型方差分析

Tab. 3　Analysis of variance of simulated stacking angle regression model

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	354.37	9	39.37	9.10	0.004 1 **
X_1	57.25	1	57.25	13.23	0.008 3 **
X_2	139.53	1	139.53	32.25	0.000 8 **
X_3	28.69	1	28.69	6.63	0.036 7 *
X_1X_2	0.027 2	1	0.027 2	0.006 3	0.939 0
X_1X_3	23.67	1	23.67	5.47	0.051 9
X_2X_3	3.28	1	3.28	0.757 3	0.413 0
X_1^2	30.54	1	30.54	7.06	0.032 6 *
X_2^2	8.54	1	8.54	1.98	0.202 7
X_3^2	61.78	1	61.78	14.28	0.006 9 **
残差	30.28	7	4.33		
失拟项	15.51	3	5.17	1.40	0.365 2
纯误差	14.77	4	3.69		
总和	384.65	16			

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

本文以平均物理堆积角 $\theta_0 = 23.47°$ 作为目标值并运用回归方程，完成各因素的优化求解，得到类芦茎秆间的碰撞恢复系数 X_1、静摩擦因数 X_2、动摩擦因数 X_3 分别为 0.35、0.60、0.004 9。为验证所求解的类芦茎秆间接触参数的正确性，以上述因素值开展 5 次仿真堆积角试验，得到仿真堆积角分别为 23.35°、23.87°、22.24°、22.04°、23.61°，平均值为 23.02°，仿真与物理堆积角的相对偏差仅为 1.91%，验证了标定的类芦茎秆间接触参数的正确性。

3　类芦茎秆粘结模型参数标定

3.1　类芦茎秆物理试验

本文运用质构仪开展类芦茎秆的物理剪切、压缩试验，确定类芦茎秆的物理最大剪切力、最大压缩破坏力。试验材料为：选取直径接近 9.00 mm 的类芦茎秆并制备长度 75 mm 的短茎；试验仪器：单柱 Universal TA 质构仪（量程为：0 ~ 100 kg，测试精度为：0.000 1 N）、双柱质构仪（量程为：0 ~ 2 940 N，测试精度为：0.000 1 N）。

开展类芦茎秆物理剪切试验，将类芦茎秆放置于下方间距为 20 mm 的两支撑底座上方，待类芦茎秆稳定后，剪切刀具以 1 mm/s 的速度对类芦茎秆进行剪切。当刀具接触类芦茎秆时，单柱质构仪传感器开始记录剪切数据并得到物理最大剪切力，试验平台如图 8 所示，重复试验 15 次并取平均值，得到类芦茎秆物理最大剪切力 $F_d = 155.18$ N。



图 8　类芦茎秆物理剪切平台

Fig. 8　Physical shear test of *Neyraudia reynaudiana* stalk

1. 剪切刀具　2. 支撑底座　3. 单柱质构仪　4. 试验类芦茎秆

开展类芦茎秆物理压缩试验，将类芦茎秆放置于双柱质构仪的支撑压盘与上压盘间，上压盘以 1 mm/s 的速度对类芦茎秆进行压缩，当上压盘接触类芦茎秆时，双柱质构仪传感器开始记录类芦茎秆的抗压力，得到类芦茎秆的物理最大压缩破坏力，试验平台如图 9 所示，试验重复 15 次并取平均值，得到类芦茎秆物理最大压缩破坏力 $F_c = 844.36$ N。

3.2　类芦茎秆粘结模型选择

标定类芦茎秆间的接触参数时，类芦茎秆模型选用 Hertz－Mindlin（no slip）接触模型，该接触模型

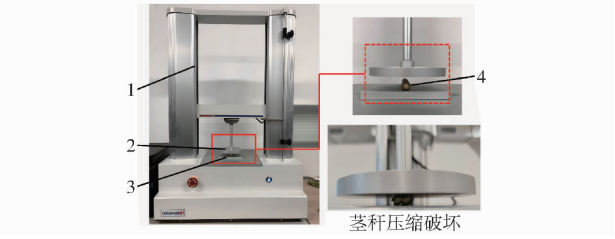


图 9 类芦茎秆物理压缩平台

Fig. 9 Physical compression test of *Neyraudia reynaudiana* stalk

1. 双柱质构仪 2. 上压盘 3. 支撑压盘 4. 试验类芦茎秆

只考虑茎秆间的弹性形变,忽略了茎秆内部颗粒间的粘结力[20]。本文将建立柔性类芦茎秆模型并开展仿真剪切、压缩试验,模拟类芦茎秆内部纤维的粘结特性。柔性类芦茎秆模型采用前文测定与标定的接触参数,选用 Hertz - Mindlin with Bonding 粘结模型,该模型可将小颗粒粘结成具有机械强度的物料块,并在外力的作用下呈现破碎等效果[21]。模型中,两颗粒的结合可用粘结键表示,如图 10 所示。图中:R_b为粘结键半径,m;L_b为粘结键宽度,m;F_a为两颗粒之间的粘结力,N;n_i与 n_t 表示法向与切向。

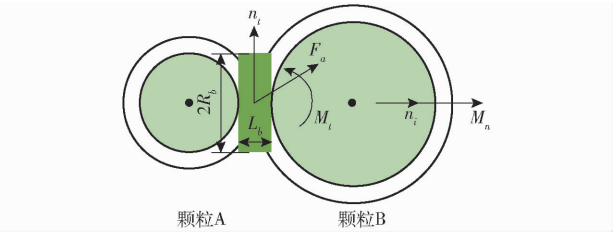


图 10 Hertz - Mindlin with Bonding 粘结模型

Fig. 10 Hertz - Mindlin with Bonding bonded particle model

该模型使相邻两颗粒在接触处平行粘结,类似于在颗粒周围添加了一组弹簧,故相邻的两颗粒相互粘结便形成了粘结键。当柔性类芦茎秆模型受到破坏力大于颗粒间的粘结键承受的最大力,粘结键将会断裂[22],计算式为

$$F_n = -v_n K_n S t_i \tag{8}$$

$$F_t = -v_t K_t S t_i \tag{9}$$

$$M_n = -\omega_n K_n J t_i \tag{10}$$

$$M_t = -\omega_t K_t J t_i \tag{11}$$

其中 $S = \pi R_b^2$ $J = 0.5\pi R_b^4$

式中 F_n、F_t——法向、切向粘结力,N

v_n、v_t——法向、切向速度,m/s

K_n、K_t——法向、切向刚度,N/m

S——粘结面积,m^2

t_i——时间步长,s

M_n——法向扭矩,N·m

M_t——切向扭矩,N·m

ω_n——法向角速度,rad/s

ω_t——切向角速度,rad/s

J——惯性矩,m^4

在粘结模型中,当粘结键受到的法向或切向应力超过其最大临界值 σ_{max}、τ_{max}时,粘结键将发生断裂,约束条件为

$$\sigma_{max} < -\frac{F_n}{S} + \frac{2M_t}{J}R_b \tag{12}$$

$$\tau_{max} < -\frac{F_t}{S} + \frac{2M_n}{J}R_b \tag{13}$$

柔性类芦茎秆模型被剪切、压缩破坏过程中,内部颗粒间的粘结键断裂,故可通过物理与仿真试验实现粘结模型的单位面积法向刚度与单位面积切向刚度以及法向应力与切向应力等参数的标定。

3.3 类芦茎秆离散元模型建立

由图 11a 可知,类芦茎秆由芯部、木质部与韧皮部组成,其中芯部质地较软类似于海绵状,类芦茎秆的力学特性由木质部与韧皮部决定。建立柔性类芦茎秆仿真模型时,将类芦茎秆简化为木质部与韧皮部,韧皮部结构较薄,为简化模型,提出假设:类芦茎秆的木质部与韧皮部的材料均匀且具有各向同性[23]。

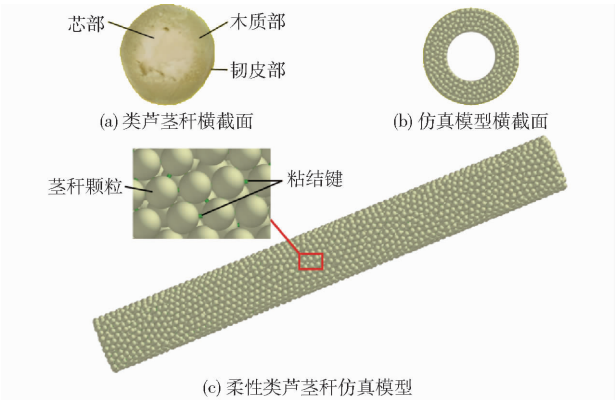


图 11 类芦茎秆物理与仿真模型

Fig. 11 Physical and simulation models of *Neyraudia reynaudiana* stalk

本文建立的柔性类芦茎秆模型为圆环柱状,具体参数:外环直径为 9.0 mm、内环直径为 4.5 mm、高度为 75 mm。在柔性类芦茎秆模型的顶部添加颗粒工厂并动态填充直径为 0.5 mm 的球形颗粒,最终填充的颗粒数量为 34 158 颗,待圆环柱内部填充完毕且颗粒保持静止后,在颗粒间添加粘结键,完成柔性类芦茎秆模型建立,所建模型如图 11b、11c 所示。在 Solidworks 2019 软件中,建立剪切平台支撑底座、剪切刀具以及压缩平台支撑压盘、上压盘等三维模型并转为 STEP 格式,导入 EDEM 软件中。

开展仿真剪切试验时,在支撑底座顶部 5 mm 位置处建立边长为 0.5 mm 正方形虚拟颗粒工厂,柔性类芦茎秆模型从颗粒工厂内生成并掉落在支撑

底座上，待模型稳定后，剪切刀具以 1 mm/s 的速度向下运动并将仿真茎秆剪切破坏，测定剪切刀具的受力，得到仿真最大剪切力 F_{ds}，剪切仿真平台与柔性类芦茎秆模型的剪切过程见图 12a。

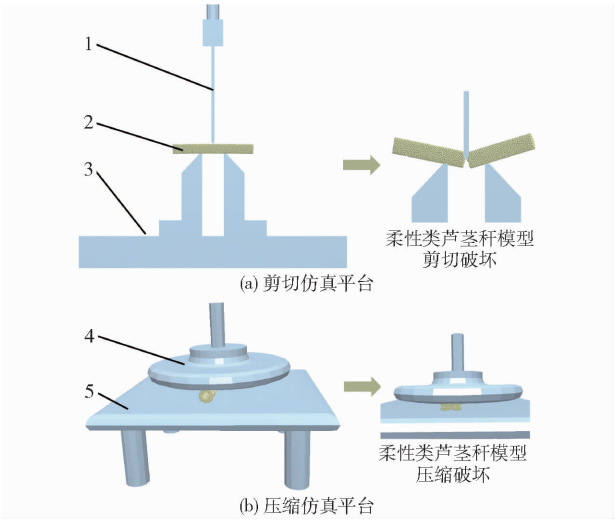


图 12　类芦茎秆剪切和压缩仿真平台

Fig. 12　Simulation platform for cutting and compressing of *Neyraudia reynaudiana* stalk

1. 剪切刀具　2. 柔性类芦茎秆模型　3. 支撑底座　4. 上压盘　5. 支撑压盘

开展仿真压缩试验，固定支撑压盘，在支撑压盘上方建立类似于剪切仿真中的虚拟颗粒工厂，生成柔性类芦茎秆模型，待模型稳定后，上压盘以 1 mm/s 的速度向下运动并将仿真茎秆压缩破坏，完成上压盘的受力分析，得到仿真最大压缩破坏力 F_{cs}，压缩平台与柔性类芦茎秆模型压缩破坏过程如图 12b。

3.4　类芦茎秆粘结模型参数标定方法

3.4.1　粘结参数因素与水平设定

单位面积法向与切向刚度、法向与切向应力等参数影响柔性类芦茎秆模型粘结键的稳定性，由文献[23－25]得到各参数取值范围并确定上下范围值以及中心点值，如表 4 所示，其中 X_4 为单位面积法向刚度，X_5 为单位面积切向刚度，X_6 为法向应力，X_7 为切向应力。

表 4　Central－Composite 试验因素编码

Tab. 4　Central－Composite test factor codes

编码	X_4/(N·m^{-3})	X_5/(N·m^{-3})	X_6/Pa	X_7/Pa
－2	3.5×10^{10}	1×10^{10}	1.5×10^{7}	2×10^{7}
－1	4.5×10^{10}	2×10^{10}	2.5×10^{7}	3×10^{7}
0	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}
1	6.5×10^{10}	4×10^{10}	4.5×10^{7}	5×10^{7}
2	7.5×10^{10}	5×10^{10}	5.5×10^{7}	6×10^{7}

3.4.2　响应面试验结果

在 EDEM 软件中搭建的剪切、压缩仿真平台上，开展仿真剪切、压缩试验。以上述 4 种粘结参数作为试验因素，以仿真最大剪切力、最大压缩破坏力为响应值，选用 Central－Composite 试验方案，开展仿真试验并得到试验结果(见表 5)。

表 5　Central－Composite 试验方案与结果

Tab. 5　Central－Composite experimental program and results

序号	因素				仿真最大剪切力 F_{ds}/N	仿真最大压缩破坏力 F_{cs}/N
	X_4/(N·m^{-3})	X_5/(N·m^{-3})	X_6/Pa	X_7/Pa		
1	4.5×10^{10}	2×10^{10}	2.5×10^{7}	3×10^{7}	102.12	876.25
2	6.5×10^{10}	2×10^{10}	2.5×10^{7}	3×10^{7}	136.85	1 075.55
3	4.5×10^{10}	4×10^{10}	2.5×10^{7}	3×10^{7}	120.02	677.29
4	6.5×10^{10}	4×10^{10}	2.5×10^{7}	3×10^{7}	164.32	802.61
5	4.5×10^{10}	2×10^{10}	4.5×10^{7}	3×10^{7}	103.80	678.60
6	6.5×10^{10}	2×10^{10}	4.5×10^{7}	3×10^{7}	138.31	878.82
7	4.5×10^{10}	4×10^{10}	4.5×10^{7}	3×10^{7}	122.61	718.90
8	6.5×10^{10}	4×10^{10}	4.5×10^{7}	3×10^{7}	168.13	801.41
9	4.5×10^{10}	2×10^{10}	2.5×10^{7}	5×10^{7}	103.16	678.60
10	6.5×10^{10}	2×10^{10}	2.5×10^{7}	5×10^{7}	137.59	878.82
11	4.5×10^{10}	4×10^{10}	2.5×10^{7}	5×10^{7}	124.92	801.26
12	6.5×10^{10}	4×10^{10}	2.5×10^{7}	5×10^{7}	166.61	679.38
13	4.5×10^{10}	2×10^{10}	4.5×10^{7}	5×10^{7}	104.69	801.62
14	6.5×10^{10}	2×10^{10}	4.5×10^{7}	5×10^{7}	142.32	969.03
15	4.5×10^{10}	4×10^{10}	4.5×10^{7}	5×10^{7}	119.93	811.25
16	6.5×10^{10}	4×10^{10}	4.5×10^{7}	5×10^{7}	166.44	969.03
17	3.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	101.64	968.79
18	7.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	166.96	792.68
19	5.5×10^{10}	1×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	122.72	801.50
20	5.5×10^{10}	5×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	155.71	810.78
21	5.5×10^{10}	3×10^{10}	1.5×10^{7}	4×10^{7}	127.89	801.21
22	5.5×10^{10}	3×10^{10}	5.5×10^{7}	4×10^{7}	126.03	878.82
23	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	2×10^{7}	128.67	514.56
24	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	6×10^{7}	135.84	638.79
25	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	131.03	969.01
26	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	122.90	809.98
27	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	130.50	851.37
28	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	128.42	640.24
29	5.5×10^{10}	3×10^{10}	3.5×10^{7}	4×10^{7}	133.88	641.55
30	5.5×10^{10}	3×10^{10}	2.5×10^{7}	3×10^{7}	128.18	640.24

3.4.3　各因素对仿真最大剪切力的影响

运用 Design-Expert 13.0 软件分析各因素对仿真最大剪切力的影响，得到各因素与仿真最大剪切力的回归模型，该模型的决定系数为 $R^2=0.9802$，调整决定系数为 $R^2_{adj}=0.9618$，两参数均接近于 1，表明模型内各因素能够反映柔性类芦茎秆模型的剪切过程，该方程能对类芦仿真茎秆最大剪切力进行预测，回归方程为

$$F_{ds}=129.15+18.75x_4+10.42x_5+0.288\,3x_6+0.993\,3x_7+2.30x_4x_5+0.563\,8x_4x_6+0.075x_4x_7-0.51x_5x_6-0.2412x_5x_7-0.527\,5x_6x_7+1.19x_4^2+2.42x_5^2-0.642\,7x_6^2+0.681x_7^2 \quad (14)$$

式中 x_4、x_5、x_6、x_7——因素编码值

由模型的方差分析(表 6)知,整个模型的 P 值小于 0.01 且失拟项的 P 值大于 0.1,表明模型拟合程度较好。单位面积法向刚度 X_4、单位面积切向刚度 X_5、单位面积法向刚度与单位面积切向刚度的交互项 X_4X_5、单位面积切向刚度的平方项 X_5^2对仿真最大剪切力的影响极显著;其余项的影响为不显著。

表 6 仿真最大剪切力回归模型方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of regression model for simulating maximum shear force

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	11 385.78	14	813.27	53.10	<0.000 1 **
X_4	8 436.00	1	8 436.00	550.80	<0.000 1 **
X_5	2 606.67	1	2 606.67	170.19	<0.000 1 **
X_6	2.00	1	2.00	0.130 3	0.723 2
X_7	23.68	1	23.68	1.55	0.232 8
X_4X_5	84.27	1	84.27	5.50	0.033 2 **
X_4X_6	5.09	1	5.09	0.332 0	0.573 0
X_4X_7	0.090 0	1	0.090 0	0.005 9	0.939 9
X_5X_6	4.16	1	4.16	0.271 7	0.609 8
X_5X_7	0.931 2	1	0.931 2	0.060 8	0.808 6
X_6X_7	4.45	1	4.45	0.290 7	0.597 7
X_4^2	38.99	1	38.99	2.55	0.131 4
X_5^2	160.77	1	160.77	10.50	0.005 5 **
X_6^2	11.33	1	11.33	0.739 8	0.403 3
X_7^2	12.72	1	12.72	0.830 6	0.376 5
残差	229.74	15	15.32		
失拟项	161.47	10	16.15	1.18	0.452 4
纯误差	68.27	5	13.65		
总和	11 615.52	14			

注:** 表示影响极显著($P\leqslant 0.01$)。下同。

单位面积法向刚度 X_4与单位面积切向刚度 X_5的交互项对仿真最大剪切力影响响应曲面如图 13 所示,当单位面积法向刚度不变,仿真最大剪切力随单位面积切向刚度增大而增大;当单位面积切向刚度不变,仿真最大剪切力随单位面积法向刚度增大而增大;由于仿真最大剪切力随单位面积切向刚度增大的趋势较单位面积法向刚度更大,故单位面积切向刚度对仿真最大剪切力的影响更加显著,该结果与方差分析(表 6)中 X_4的 F 值大于 X_5相对应。

3.4.4 各因素对仿真最大压缩破坏力的影响

运用 Design-Expert 13.0 软件分析因素对仿真最大压缩破坏力的影响,得到各因素与仿真最大压缩破坏力的回归模型,该模型的决定系数 $R^2=0.994\,6$,调整决定系数 $R_{adj}^2=0.989\,6$,均接近于 1,

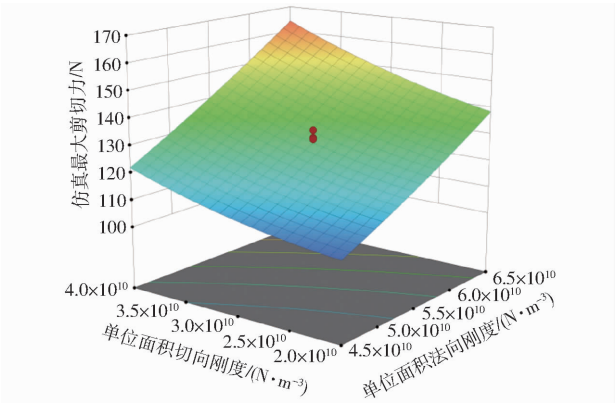


图 13 X_4与 X_5交互作用对仿真最大剪切力影响的响应曲面

Fig. 13 Response surface of interaction between X_4 and X_5 on maximum shear force in simulation

表明整个模型的各因素能够反映仿真茎秆的压缩过程,该模型能对柔性类芦茎秆模型的仿真最大压缩破坏力进行预测,回归方程为

$$F_{cs}=804.5+134.83x_4-32.55x_5-0.028\,3x_6+1.72x_7-13.13x_4x_5+0.216\,3x_4x_6+0.037\,5x_4x_7-0.156\,2x_5x_6-0.022\,0x_5x_7-0.035\,0x_6x_7-3.11x_4^2-5.59x_5^2-1.40x_6^2-1.44x_7^2 \quad (15)$$

由模型的方差分析(表 7)可知,全模型的 P 值小于 0.01 且失拟项不显著,表明模型拟合程度较

表 7 仿真最大压缩破坏力回归模型方差分析

Tab. 7 Analysis of variance of regression model for simulating maximum compressive failure force

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4.656×10^5	14	33 253.69	732.21	<0.000 1 **
X_4	4.363×10^5	1	4.363×10^5	9 606.44	<0.000 1 **
X_5	25 424.15	1	25 424.15	559.81	<0.000 1 **
X_6	0.019 3	1	0.019 3	0.000 4	0.983 8
X_7	70.93	1	70.93	1.56	0.230 5
X_4X_5	2 758.88	1	2 758.88	60.75	<0.000 1 **
X_4X_6	0.748 2	1	0.748 2	0.016 5	0.899 6
X_4X_7	0.022 5	1	0.022 5	0.000 5	0.982 5
X_5X_6	0.390 6	1	0.390 6	0.008 6	0.927 3
X_5X_7	0.008 1	1	0.008 1	0.000 2	0.989 5
X_6X_7	0.019 6	1	0.019 6	0.000 4	0.983 7
X_4^2	265.75	1	265.75	5.85	0.028 7 *
X_5^2	857.92	1	857.92	18.89	0.000 6 **
X_6^2	53.68	1	53.68	1.18	0.294 1
X_7^2	57.19	1	57.19	1.26	0.279 4
残差	681.24	15	45.42		
失拟项	568.30	10	56.83	2.52	0.160 1
纯误差	112.93	5	22.59		
总和	4.662×10^5	14			

注:* 表示影响显著($0.01<P\leqslant 0.05$)。

好；单位面积法向刚度 X_4、单位面积切向刚度 X_5、单位面积法向刚度与单位面积切向刚度的交互项 X_4X_5、单位面积切向刚度的平方项 X_5^2 的 P 值均小于 0.01，对类芦茎秆最大压缩破坏力的影响为极显著，单位面积法向刚度平方项影响显著，其余项的影响为不显著。单位面积法向刚度 X_4 与单位面积切向刚度 X_5 的交互项对仿真最大压缩破坏力的影响响应曲面如图 14 所示，当单位面积法向刚度不变，柔性类芦茎秆模型的最大压缩破坏力随单位面积切向刚度增大而增大；当单位面积切向刚度不变，最大压缩破坏力随单位面积法向刚度增大而减小；由于最大压缩破坏力随单位面积切向刚度变化趋势较单位面积法向刚度更大，故单位面积切向刚度对最大压缩破坏力的影响更加显著，这与表 7 中 X_4 的 F 值大于 X_5 相对应。

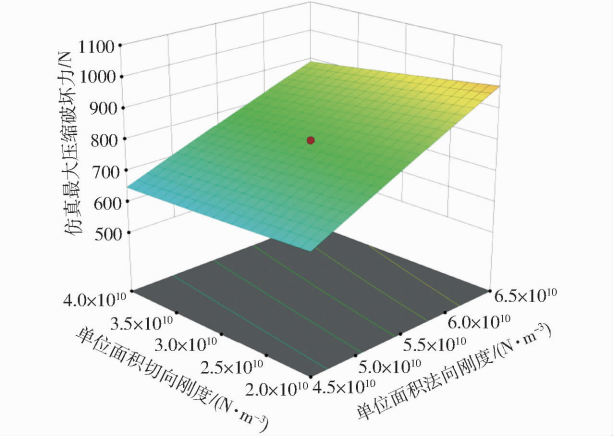


图 14　X_4 与 X_5 交互作用对仿真最大压缩破坏力影响的响应曲面

Fig. 14　Response surface of interaction between X_4 and X_5 on maximum compressive failure force in simulation

3.4.5　粘结模型参数确定

在柔性类芦茎秆模型的仿真试验中，均得到法向应力 X_6、切向应力 X_7 对仿真最大剪切力与最大压缩破坏力的影响为不显著，故取该因素的中心值作为粘结模型参数，即法向应力为 $X_6 = 3.5 \times 10^7$ Pa，切向应力为 $X_7 = 4.0 \times 10^7$ Pa。由物理最大剪切力 $F_d = 155.18$ N 以及 $F_c = 844.36$ N 为优化目标，根据对应的回归模型方程，得到柔性类芦茎秆模型的粘结模型参数：$X_4 = 6.13 \times 10^{10}$ N/m^3、$X_5 = 3.96 \times 10^{10}$ N/m^3。

3.5　类芦茎秆离散元模型参数验证

根据前文测定与标定的茎秆与钢、茎秆间的接触参数以及柔性类芦茎秆模型的粘结模型参数，分别开展 5 次柔性类芦茎秆模型的剪切与压缩仿真试验，得到结论：仿真最大剪切力平均值为 151.64 N，与物理最大剪切力偏差仅为 2.28%；仿真最大压缩破坏力平均值为 884.49 N，与物理最大压缩破坏力偏差仅为 4.75%。为进一步验证参数的正确性，改变剪切平台的下方两支撑底座距离，设定距离为：25、30、35、40 mm，选定直径接近 9 mm 的茎秆并制备成 75 mm 的类芦茎秆，分别开展物理与仿真剪切试验，分别得到茎秆物理与仿真最大剪切力 F_d 与 F_{ds}，两者间最大偏差仅为 4.81%，具体参数见表 8。物理与仿真试验偏差较小，验证了本文建立的柔性类芦茎秆模型离散元参数的正确性。

表 8　物理与仿真试验结果偏差

Tab. 8　Deviation between physical and simulation test results

参数	支撑座距离/mm			
	25	30	35	40
F_d/N	142.15	129.89	115.63	105.52
F_{ds}/N	148.39	136.45	120.56	110.78
偏差/%	4.20	4.81	4.09	4.75

4　结论

（1）通过物理试验，测定了类芦茎秆与钢的碰撞恢复系数、静摩擦因数与滚动摩擦因数以及类芦茎秆间接触参数范围。

（2）开展仿真堆积角试验，建立类芦茎秆模型，运用 Box－Behnken 试验方案开展试验，建立了茎秆间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数与仿真堆积角的二次回归方程，根据实际测定的物理堆积角，完成茎秆间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数的仿真参数标定，分别为 0.35、0.60、0.004 9。

（3）利用质构仪测定了类芦茎秆的物理最大剪切力、最大压缩破坏力，分别为 $F_d = 155.18$ N、$F_c = 844.36$ N；建立了柔性类芦茎秆模型，选定颗粒粘结模型为 Hertz－Mindlin with Bonding，根据 Central－Composite 试验方案开展柔性类芦茎秆模型的仿真剪切与压缩试验，以 F_d 与 F_c 为优化目标，完成粘结模型参数的标定。根据测定及标定的类芦茎秆离散元参数，开展剪切、压缩仿真验证试验，对比物理试验，两者偏差较小，表明建立的类芦茎秆离散元模型具有合理性。

参　考　文　献

[1]　林占熹，林冬梅. 菌草技术[M]. 福州：福建科学技术出版社，2022：28－49.
[2]　林占熹. 菌草学概论[M]. 北京：中国农业出版社，2019：10－23.

[3] 林兴生,林占熹,林冬梅,等. 鲜菌草工厂化周年瓶栽银耳质量和安全性评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2023, 52(1):65 - 70.
LIN Xingsheng, LIN Zhanxi, LIN Dongmei, et al. Quality and safety evaluation of *Tremella fuciformis* by industrial annual culturation with fresh JUNCAO in bottle[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2023, 52(1):65 - 70. (in Chinese)

[4] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9):1 - 20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):1 - 20. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 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)

[7] WANG Shuai, YU Zhihong, AORIGELE, et al. Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198:107012.

[8] 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.

[9] FAN Guiju, WANG Siyu, SHI Wenjie, et al. Simulation parameter calibration and test of typical pear varieties based on discrete element method[J]. Agronomy, 2022, 12(7):1720.

[10] MI Guopeng, LIU Yan, WANG Tao, et al. Measurement of physical properties of sorghum seeds and calibration of discrete element modeling parameters[J]. Agriculture, 2022, 12(5):681.

[11] LEBLICQ T, SMEETS B, RAMON H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123:80 - 88.

[12] 涂鸣,曹涛,万志华,等. 菱角离散元粘结参数标定与剪切试验[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4):270 - 278.
TU Ming, CAO Tao, WAN Zhihua, et al. Calibration and shear experiments of discrete element bonding parameters for water caltrop[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(4):270 - 278. (in Chinese)

[13] 张国忠,陈立明,刘浩蓬,等. 荸荠离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11):41 - 50.
ZHANG Guozhong, CHEN Liming, LIU Haopeng, et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11):41 - 50. (in Chinese)

[14] ZHENG Zhiqi, ZHAO Hongbo, LIU Peng, et al. Maize straw cutting process modelling and parameter calibration based on discrete element method (DEM)[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2021, 63(1):461 - 468.

[15] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7):141 - 149.
DU Xing, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Calibration of Bonding model parameters for coated federators based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7):141 - 149. (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] 刘羊,宗望远,马丽娜,等. 采用高速摄影技术测定油葵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)

[18] 任甲辉,武涛,刘庆庭,等. 蔗段离散元仿真建模方法与参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(3):124 - 132.
REN Jiahui, WU Tao, LIU Qingting, et al. Discrete element simulation modeling method and parameter calibration of sugarcane segment[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(3):124 - 132. (in Chinese)

[19] 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)

[20] 龚凤,胡嫚,鲍安红,等. 基于 Hertz - Mindlin 模型的稻草秸秆参数标定及显著性分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(12):186 - 196.
GONG Feng, HU Man, BAO Anhong, et al. Parameter calibration and significance analysis of rice straw based on Hertz - Mindlin model[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(12):186 - 196. (in Chinese)

[21] 王韦韦,蔡丹艳,谢进杰,等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3):127 - 134.
WANG Weiwei, CAI Danyan, XIE Jinjie, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):127 - 134. (in Chinese)

[22] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等. 三七茎秆离散元参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11):61 – 70, 91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experimental of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):61 – 70, 91. (in Chinese)

[23] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1):76 – 84, 108.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Calibration of simulation parameters of Xinjiang cotton straw based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1):76 – 84, 108. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 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)

(上接第 37 页)

[83] 高自成, 赵凯杰, 李立君, 等. 悬挂振动式油茶果采摘执行机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 9 – 17.
GAO Zicheng, ZHAO Kaijie, LI Lijun, et al. Design and experiment of suspended vibratory actuator for picking *Camellia olerfera* fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 9 – 17. (in Chinese)

[84] 张博文, 李爱潮, 郑志安, 等. 川麦冬往复切割式剪果装置设计与仿真试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 81 – 90.
ZHANG Bowen, LI Aichao, ZHENG Zhian, et al. Design and simulation experiments of reciprocating cutting tuber removal device for *Ophiopogon japonicus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 81 – 90. (in Chinese)

[85] ZHAO H, SU L, ZHANG Y, et al. Analysis and optimized design of rigid-flexible coupling characteristics of crab apple picking machines and crab apple trees[J]. Applied Sciences, 2023, 13: 10502.

[86] 付乾坤, 付君, 陈志, 等. 玉米摘穗割台刚柔耦合减损机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 60 – 68.
FU Qiankun, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Loss reduction mechanism and experiment on snapping of rigid-flexible coupling corn head[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 60 – 68. (in Chinese)

[87] 李海同, 吴崇友, 沐森林, 等. 基于 ANSYS – ADAMS 的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 96 – 105.
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rapeseed mower based on ANSYS – ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 96 – 105. (in Chinese)

[88] YU Z Y, YANG K, HU Z C, et al. Parameter optimization and simulation analysis of floating root cutting mechanism for garlic harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107521.

[89] WANG Q, ZHANG Q, ZHANG Y, et al. Lodged sugarcane/crop dividers interaction: analysis of robotic sugarcane harvester in agriculture via a rigid-flexible coupled simulation method[J]. Actuators, 2022, 11: 23.