doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.020

# 油菜茎秆离散元双层粘结模型建立与参数标定

王晓敏[1,2]　张家和[1]

(1.华中农业大学工学院,武汉 430070;2.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070)

**摘要**:针对油菜机械化收获过程中茎秆-刀具互作仿真缺乏准确可靠的离散元茎秆模型粘结参数问题,本文以长江中下游地区"华油杂 62"适收期油菜茎秆为研究对象,通过物理试验系统测定其本征参数与接触参数,选用 EDEM 软件中的 Hertz-Mindlin with Bonding V2 接触模型构建油菜茎秆离散元双层粘结模型。以测得的茎秆最大弯曲破坏力和最大剪切力的平均值 43.02 N 和 186.22 N 为双响应值,利用 Design-Expert 软件设计 Plackett-Burman 试验筛选显著因素、最陡爬坡试验缩小标定参数范围和 Box-Behnken 试验优化求解最佳参数组合。结果表明,表皮-表皮单位面积法向刚度 $X_1$、表皮-内瓤单位面积剪切刚度 $X_6$及内瓤-内瓤单位面积法向刚度 $X_9$对模型影响极显著,最佳参数组合中 $X_1$为 $6.80\times10^9$ N/m$^3$、$X_6$为 $5.93\times10^9$ N/m$^3$、$X_9$为 $3.18\times10^9$ N/m$^3$。在此参数组合下建立油菜茎秆离散元双层粘结模型,并进行破坏仿真,得到茎秆最大弯曲破坏力与最大剪切力与实测平均值的相对误差分别为 2.11% 和 2.39%,且与茎秆实际受到弯曲和剪切作用的力学表现基本一致,该研究可为油菜植株离散元建模及油菜机械化收获机具的设计优化提供参考。

**关键词**:油菜茎秆;双层粘结模型;离散元法;双响应值;参数标定

**中图分类号**:S225.31　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0217-11　　**OSID**:

# Discrete Element Double-layer Bonding Model Building and Parameter Calibration of Rapeseed Stalk

WANG Xiaomin[1,2]　ZHANG Jiahe[1]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*

2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agricultural and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

**Abstract**: Accurate simulation of the stalk-tool interaction during mechanized rapeseed harvesting is limited by the lack of accurate and reliable bonding parameters for discrete element stalk models. To address this issue, rapeseed stalks of the cultivar "Huayouza 62" at the optimal harvest stage were used. The intrinsic and contact parameters of the stalks were systematically determined through physical tests. A double-layer bonded model of the rapeseed stalk was developed in EDEM by using the Hertz-Mindlin with Bonding V2 contact model. Using the measured maximum bending failure force 43.02 N and maximum shear force 186.22 N as the dual response values, a Plackett-Burman design was firstly employed to identify significant factors, followed by a steepest ascent experiment to approach the optimal range, finally, a Box-Behnken design was used to optimize the solution. The results showed that the skin-skin normal stiffness per unit area $X_1$, skin-core shear stiffness per unit area $X_6$, and core-core normal stiffness per unit area $X_9$ had significant effects on the model. In the optimal parameter combination, $X_1$ was $6.80\times10^9$ N/m$^3$, $X_6$ was $5.93\times10^9$ N/m$^3$ and $X_9$ was $3.18\times10^9$ N/m$^3$. Based on this combination, a double-layer bonded discrete element model of the rapeseed stalk was established. Simulations demonstrated that the relative errors between the simulated maximum bending failure force and maximum shear force and the measured averages were 2.11% and 2.39%, respectively. The mechanical behavior of the model was consistent with that of actual stalks. The research result can provide a reference for the discrete element modeling of rapeseed plants and the design of harvesting machinery.

**Key words**: rapeseed stalk; double-layer bonding model; discrete element method; double response value; parameter calibration

收稿日期:2025-09-23　修回日期:2025-10-30

**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(CASR-12-27)

**作者简介**:王晓敏(1985—),女,副教授,博士,主要从事农业机械化和智能化研究,E-mail:wangxm2012@mail.hzau.edu.cn

## 0 引言

油菜是我国重要的油料作物之一，占植物油供应量的 50%，也是第二大饲用蛋白源，并具有多重利用价值和开发潜力，其种植区主要分为冬播和春播油菜两大产区，其中冬油菜集中在长江流域，占总产量的 90% 以上[1-3]。目前油菜机械化收获主要有联合收获和分段收获两种方式，茎秆切割是收获过程的首要环节，茎秆与割刀直接互作，其作业质量直接影响后续收获过程[4-5]。往复式切割器是割刀作业的载体，结构简单且割幅大，适用于水稻、小麦和油菜等农作物收获。其工作原理是将驱动机构的曲线运动转变为动刀的往复直线运动，茎秆在护刃器及定刀的支撑下被动刀切断[6]。由于油菜植株高大粗壮、分枝相互缠绕且果荚成熟度不均，往复式切割器的驱动机构使刀片产生振动，伴随割刀的切割冲击，易使茎秆发生弯曲扰动，植株分枝间发生碰撞造成果荚炸裂，割台损失率居高不下[7-8]。

近年来，离散元法凭借其在非均质和非线性材料的动态响应模拟中具有高模型保真度和精准仿真结果的优势，已被应用于多种农作物茎秆的离散元建模与农业机械装备的设计与优化[9-13]。离散元法对于设计和优化收获机具关键部件，提高收获效率具有重要意义，而精确的茎秆模型构建和仿真参数标定是离散元仿真结果可靠的基础。

廖宜涛等[14]基于 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型建立了饲料油菜薹期茎秆离散元仿真模型，利用弯曲试验标定了其粘结参数。陈涛等[15]为优化牧草收获切割刀具工作参数，建立了苜蓿茎秆柔性模型，以最大剪切力为响应值对其粘结参数进行了标定。也有其他学者对水稻[16]、胡麻[17]、类芦[18]、油葵[19]等农作物茎秆进行离散元仿真模型的建立与参数标定。但上述离散元仿真模型均把茎秆当作各向同性材料，简化为一种物质，忽略了其内外部的力学性质差异。为解决上述问题，刘禹辰等[20]通过计算得到了玉米秸秆内外部之间各粘结参数，建立双层粘结双峰分布模型表征力学特性差异。谢伟等[21]采用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型，通过设置两种不同物性参数的颗粒建立了油菜薹夹持段茎秆双层粘结模型，并以最大弯曲力为评价指标标定了各颗粒之间的粘结参数。杜哲等[22]提出了一种基于粘结增强法的茶茎秆三层离散元仿真模型，以最大剪切力为指标，完成茶茎秆仿真粘结参数标定。上述研究表明，对茎秆模型进行分层建立，并标定其内外部间各粘结参数，可以提高离散元模拟仿真的可靠性。

目前，使用离散元法建立适收期油菜茎秆仿真模型并标定其粘结参数的研究较为少见，未见对油菜茎秆建立离散元双层粘结模型，并以两种物理力学试验值为评价指标进行参数标定的报道。鉴于此，本文以适收期油菜茎秆为研究对象，针对其木质化表皮与柔软内瓤力学性质不同的特点，通过物理试验测定其本征参数与接触参数，选用 Hertz - Mindlin with Bonding V2 模型建立油菜茎秆离散元双层粘结模型。以力学试验得到的最大弯曲力和最大剪切力的平均值为双响应值，进行粘结参数标定，并对标定结果的可靠性进行验证，以期为油菜植株离散元建模及油菜收获机具关键部件设计优化提供参考。

## 1 油菜茎秆参数测定与仿真模型建立

### 1.1 试验材料

试验于 2025 年 5 月开展，选用机械直播种植于华中农业大学现代农业科技试验基地的油菜为研究对象，品种为华油杂 62。采用五点取样法，每个取样点面积为 1 $m^2$，使用精度为 0.1 mm 的卷尺测得平均种植密度为 36 ~ 42 株/$m^2$，平均株高为 1 484.64 mm。每个取样点选取 10 株油菜，在距地面 350 mm 处向上截取 100 mm 长的茎秆作为试验材料，取样位置如图 1 所示。采用干燥法，测得茎秆平均含水率为 42.46%。使用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测得茎秆平均直径为 11.28 mm，表皮平均厚度为 1.64 mm。根据不同试验对试样尺寸的要求，将所采集的茎秆分别制备为长度 10、50、100 mm 的试样，用于后续接触参数测量及力学特性试验。

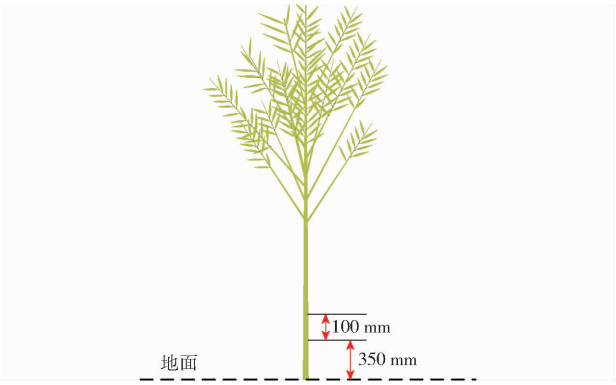



图 1 取样位置

Fig. 1 Sampling location

### 1.2 本征参数测量

油菜茎秆的本征参数包括密度 $\rho$、泊松比 $\nu$ 和剪切模量 $G$。

使用电子天平（精度 0.01 g）和量程为 50 mL 的量筒（精度 1 mL），利用排水法分别测量油菜表皮和

内瓤的质量和体积。每组样品测量 3 次，取平均值，最终测得油菜表皮和内瓤的平均密度分别为 720、387 kg/m$^3$。

由于泊松比对仿真试验影响不显著[23]，参考文献[24]将表皮与内瓤的泊松比均设置为 0.45。

使用深圳市瑞格尔仪器有限公司生产的 RGM－3005 型电子万能材料试验机进行油菜表皮和内瓤的拉伸试验，分别测量其弹性模量并计算剪切模量 $G$。选取长度为 100 mm 的油菜茎秆，将表皮与内瓤分离，并将表皮制备为总宽 10 mm，中心部位长 5 mm、宽 2 mm 的哑铃状试样。为防止试样在拉伸过程中打滑，在夹具与试样接触处缠上一层医用胶带。确保夹具安装稳固、试样固定可靠。设定试验加载速度为 10 mm/min，分别进行 6 次拉伸试验，去除最大值与最小值后，取平均值得到两者弹性模量分别为 $1.12\times10^9$、$8.29\times10^6$ Pa。计算得到茎秆表皮与内瓤的剪切模量 $G$ 分别为 $3.88\times10^8$、$2.86\times10^6$ Pa。

### 1.3　接触参数测量

#### 1.3.1　摩擦因数

在 EDEM 软件中，物料间的摩擦因数包括静摩擦因数和滚动摩擦因数两种。采用 TM2101－T5 型摩擦因数测试仪对相关参数进行测量。该设备基于水平牵引原理：一种样品固定于测试平台，另一种样品与滑块固定，调节牵引装置高度使两样品接触面处于水平状态。由滑块部分施加垂直压力，牵引装置以恒定速度水平拉动滑块，仪器内置的传感器实时记录力的变化，计算得到摩擦因数。油菜茎秆表皮与内瓤在分离后难以制备成较长且完整、规则的圆柱体，无法在接触面实现稳定的滚动，直接测量其摩擦因数存在较大难度和误差。为确保试验的可行性与结果的可靠性，选取茎秆-茎秆和茎秆-钢板的静摩擦因数与滚动摩擦因数作为参考，用于后续离散元仿真模型的参数设置。

设定牵引速度为 50 mm/min，将一组油菜茎秆与滑块固定，分别将钢板和另一组油菜茎秆固定于测试平台进行试验。每组试验重复 20 次取平均值，测得油菜茎秆与钢板间静摩擦因数为 0.399，滚动摩擦因数为 0.094；油菜茎秆间静摩擦因数为 0.567，滚动摩擦因数为 0.160。

#### 1.3.2　碰撞恢复系数

基于高速摄影技术，采用自由下落法[25]测量碰撞恢复系数 $e$。将坐标纸垂直粘贴于墙面，使其零刻度线与桌面上钢板上表面齐平，如图 2 所示。

因茎秆表皮扁平且质量较轻，难以实现稳定下落，以油菜整体代替表皮进行试验。将茎秆制备成

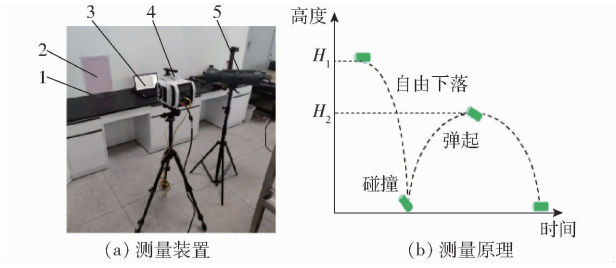



图 2　碰撞恢复系数测量

Fig. 2　Measurement of collision recovery coefficient

1. 钢板　2. 坐标纸　3. 计算机　4. 高速摄影机　5. 补光灯

10 mm 的短段试样，距桌面 400 mm 处（记为 $H_1$）无初速度释放，使其自由下落并与钢板发生碰撞。利用高速摄影机实时记录茎秆下落并弹起的全过程，保存视频并逐帧回放，获得试样弹起后的最高回弹高度 $H_2$。将表皮、内瓤整齐均匀粘贴于桌面，重复上述操作，计算得到茎秆-茎秆、茎秆-内瓤、茎秆-钢板碰撞恢复系数。同样将内瓤制备成 10 mm 短段试样，将内瓤和钢板置于桌面，试验计算得到内瓤-内瓤和内瓤-钢板的碰撞恢复系数。每组试验重复 20 次取平均值。碰撞恢复系数的计算式为

$$e=\frac{|v_2|}{|v_1|}=\frac{\sqrt{2gH_2}}{\sqrt{2gH_1}}=\sqrt{\frac{H_2}{H_1}} \tag{1}$$

式中　$v_2$——样品碰撞后法向速度，m/s

$v_1$——样品碰撞前法向速度，m/s

$g$——重力加速度，m/s$^2$

根据上述测量数据及查阅文献[26]设置油菜茎秆与钢板的本征参数及接触参数如表 1 所示。

### 1.4　力学特性测量

为测量油菜茎秆的力学特性，选取长度为 100 mm 和 50 mm、平均直径为 11.28 mm 的茎秆试样各 8 根，分别用于弯曲试验与剪切试验。所有试验均采用 TMS－PRO 型质构仪（FTC 公司，美国）进行，通过更换上刀具和下夹具实现不同加载方式，加载速率均设置为 50 mm/min。

#### 1.4.1　弯曲试验

采用三点弯曲法进行试验，将质构仪下部两支撑点间距调整为 60 mm，茎秆水平置于支撑点上，并使其中心对准上方下压刀具。在加载过程中，当茎秆发生折断并伴有脆响声时，停止加载，记录此时最大弯曲力并保存载荷-位移曲线，如图 3 所示。试验重复 8 次，去除最大值和最小值后取平均值，得到平均最大弯曲力 $Y_1$ 为 43.02 N。试验初始阶段，载荷随位移近似线性增长，表现出弹性变形的特征。随着加载进行，茎秆逐渐达到其极限承载能力，外侧木质化纤维开始发生断裂，整体力学性能显著下降。由于茎秆整体具有一定的韧性，残余结构仍具有承

**表 1 油菜茎秆与钢板本征参数及接触参数**

**Tab. 1 Intrinsic parameters and contact parameters of rapeseed stalks and steel plate**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 表皮泊松比 | 0.45 |
| 内瓤泊松比 | 0.45 |
| 钢板泊松比 | 0.30 |
| 表皮密度/(kg·m$^{-3}$) | 720 |
| 内瓤密度/(kg·m$^{-3}$) | 387 |
| 钢板密度/(kg·m$^{-3}$) | 7 850 |
| 表皮剪切模量/Pa | $3.88\times10^{8}$ |
| 内瓤剪切模量/Pa | $2.86\times10^{6}$ |
| 钢板剪切模量/Pa | $7.94\times10^{10}$ |
| 表皮-表皮静摩擦因数 | 0.567 |
| 表皮-内瓤静摩擦因数 | 0.567 |
| 表皮-钢板静摩擦因数 | 0.399 |
| 内瓤-内瓤静摩擦因数 | 0.567 |
| 内瓤-钢板静摩擦因数 | 0.399 |
| 表皮-表皮滚动摩擦因数 | 0.160 |
| 表皮-内瓤滚动摩擦因数 | 0.160 |
| 表皮-钢板滚动摩擦因数 | 0.094 |
| 内瓤-内瓤滚动摩擦因数 | 0.160 |
| 内瓤-钢板滚动摩擦因数 | 0.094 |
| 表皮-表皮碰撞恢复系数 | 0.302 |
| 表皮-内瓤碰撞恢复系数 | 0.382 |
| 表皮-钢板碰撞恢复系数 | 0.489 |
| 内瓤-内瓤碰撞恢复系数 | 0.315 |
| 内瓤-钢板碰撞恢复系数 | 0.446 |

载能力,使载荷在下降过程中出现波动并略有回升。最终,茎秆完全折断,载荷迅速下降至零,完成整个弯曲破坏过程。

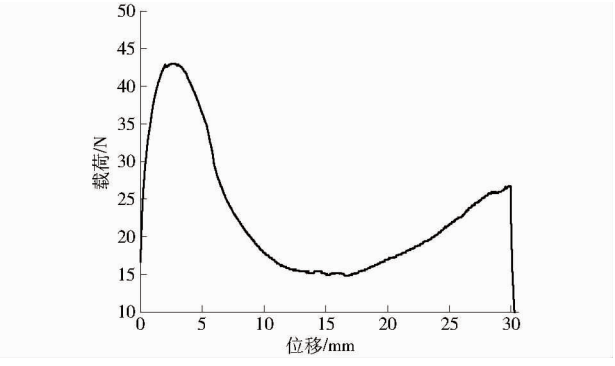



图 3 弯曲载荷-位移曲线

Fig. 3 Bending load - displacement curve

### 1.4.2 剪切试验

将弯曲试验夹具更换为剪切夹具,确保上部剪切刀具对准下部方形夹具的中心孔洞,避免发生撞刀。参照弯曲试验进行测量,记录载荷-位移曲线,如图 4 所示,得到平均最大剪切力 $Y_2$ 为 186.22 N。剪切初始阶段,刀具首先接触茎秆木质化表皮纤维层,茎秆发生轻微弹性形变,载荷缓慢上升。随着刀具进一步切入,茎秆开始产生较明显的塑性变形,剪切载荷显著上升。刀具突破上部表皮纤维后,此时内瓤主要承担剪切行为,载荷出现短暂下降。剪切中期阶段,表皮纤维与内瓤组织共同受力,剪切载荷持续上升。当刀具突破底部表皮纤维时,载荷达到峰值,随后迅速下降,剪切过程结束。

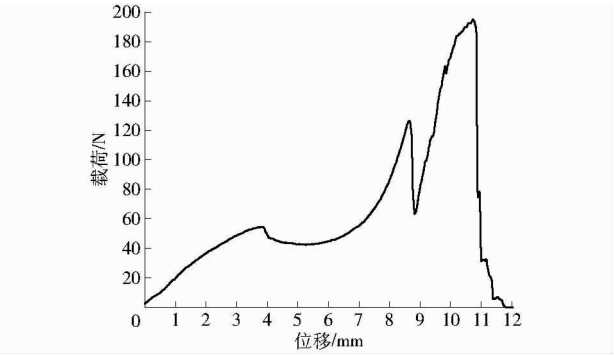



图 4 剪切载荷-位移曲线

Fig. 4 Shear load - displacement curve

## 1.5 油菜茎秆双层粘结模型仿真建立过程

### 1.5.1 接触模型选择

Hertz - Mindlin with Bonding V2 模型是 EDEM 软件中用于模拟颗粒间粘结与断裂行为的一种接触模型[27],可与元颗粒功能联合使用,构建具有结构复杂性和柔性特征的颗粒体,其结构原理如图 5 所示。该模型在保留原有 Bonding 模型基本功能的同时,支持 GPU 并行加速计算,并引入粘结比例这一参数替代粘结半径。粘结比例是键对中最小颗粒的粘结半径与物理半径之比,可以自适应任意粒径组合。当粘结键受到外部作用时,颗粒之间会发生相对运动,力和力矩在每个时间步长内逐步调整,其计算公式为

$$\begin{cases}\delta F_n = -V_n S_n A \delta_t \\ \delta F_t = -V_t S_t A \delta_t \\ \delta M_n = -\omega_n S_t J \delta_t \\ \delta M_t = -\dfrac{1}{2}\omega_t S_n J \delta_t\end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases}A = \pi R_B^2 \\ J = \dfrac{1}{2}\pi R_B^4 \\ R_B = rs\end{cases} \tag{3}$$

式中 $\delta F_n$、$\delta F_t$——法向粘结力增量和切向粘结力增量,N

$\delta M_n$、$\delta M_t$——法向力矩增量和切向力矩增量,N/m

$S_n$、$S_t$——单位面积法向接触刚度和切向接触刚度,N/m$^3$

$V_n$、$V_t$——法向速度和切向速度,m/s

$\omega_n$、$\omega_t$——法向角速度和切向角速度,rad/s

$\delta_t$——时间步长,s

$A$——粘结键横截面面积，mm$^2$

$J$——粘结键横截面惯性矩，mm$^4$

$R_B$——粘结键横截面半径，mm

$r$——最小颗粒半径，mm

$s$——粘结比例

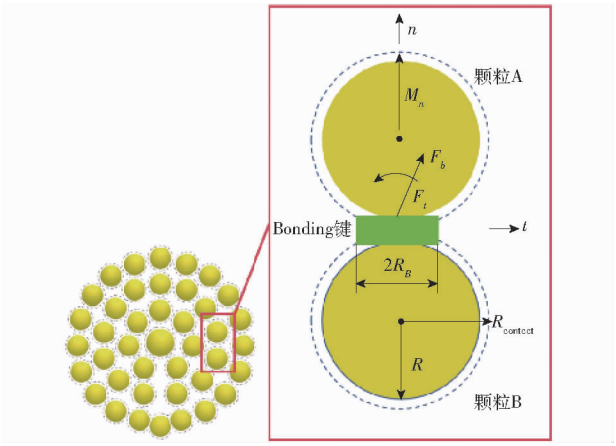



图 5　接触模型示意图

Fig. 5　Schematic of contact model

当最大法向和切向应力 $\sigma_{max}$、$\tau_{max}$ 超过预定义值时，粘接被打破，其表达式为

$$\begin{cases} \sigma_{critical} < \sigma_{max} = \dfrac{-F_n}{A} + \dfrac{2M_t}{J}R_B \\ \tau_{critical} < \tau_{max} = \dfrac{-F_t}{A} + \dfrac{2M_n}{J}R_B \end{cases} \tag{4}$$

### 1.5.2　双层粘结模型构建

为表征油菜茎秆木质化表皮与松软内瓤在力学性能上的差异，采用两种物料参数不同的颗粒，选用 Hertz－Mindlin with Bonding V2 接触模型，构建油菜茎秆离散元双层粘结模型。在模型构建过程中，随着颗粒数量的增加，系统需处理的颗粒间相互作用与粘结键数量同步增大，导致仿真时间延长。同时粘结键的形成是通过颗粒间的接触半径是否发生重合来判断的，只有当相邻颗粒的接触半径发生重合时，系统才会判定其处于接触状态并建立粘结键。通过控制颗粒间距，能够有效降低颗粒总量，缩短仿真时间，还能提高粘结键生成概率，增强模型整体的稳定性与粘结网络的完整性。

使用 EDEM 中的元颗粒功能，基于三轴空间坐标法，以油菜茎秆的实际尺寸为标准构建仿真模型。根据实测油菜茎秆的直径与表皮厚度，首先确定最外层表皮颗粒的排布方式，设置颗粒数为 18 个，半径为 0.82 mm。为体现表皮结构的各向异性，将接触参数相同的表皮颗粒命名区分，并交替排列。通过数值计算方法，确定颗粒之间的最优偏移角度及相对位置，确保内瓤与表皮颗粒之间、内瓤颗粒之间实现相切或距离最小，满足粘结键的生成条件。最终确定中间层内瓤颗粒数量为 14 个，半径为 0.73 mm；最内层内瓤颗粒数量为 6 个，半径为 0.85 mm；中心区域空隙由半径为 0.85 mm 的内瓤颗粒填充。所有颗粒在 $YZ$ 平面上完成圆周排布，输出圆心坐标，按照颗粒各自半径在 $X$ 轴方向上进行无间隙叠加，构建出直径为 11.13 mm、长度分别为 100.74 mm 和 51.10 mm 的两种油菜茎秆离散元模型，供后续三点弯曲与剪切仿真试验使用，模型如图 6 所示。

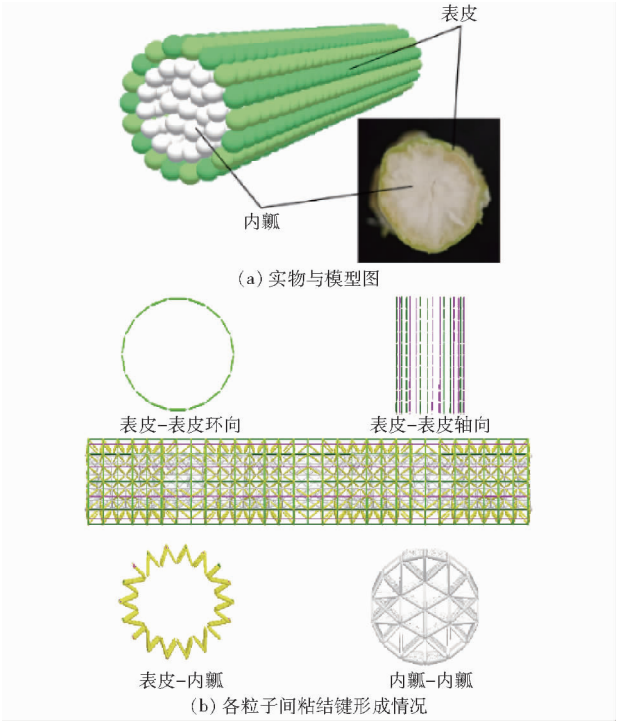



图 6　茎秆离散元仿真模型

Fig. 6　Discrete element simulation model of stem

### 1.5.3　破坏仿真模型建立

参照实际弯曲破坏与剪切试验下方夹具和上方刀具的外形和尺寸，使用 Solidworks 软件建立 CAD 模型，以 .stl 的格式保存之后，导入 EDEM 软件中，按表 1 设置材料的本征及接触参数。在下夹具正上方添加一个颗粒工厂，状态设置为 virtual，保证生成的茎秆中心尽量在原心位置状态。根据三点弯曲和剪切破坏仿真试验的需要，分别生成 100、50 mm 长的单根茎秆模型。实际试验中刀具加载速度为 50 mm/min，导致模拟时间过长。参考文献[28]及多次仿真预试验，将上刀具加载速度设置为 0.005 m/s，固定时间步长设置为 $3.69\times10^{7}$，数据保存间隔为 0.01 s，破坏仿真模型如图 7 所示。

## 2　粘结参数标定试验

### 2.1　粘结参数范围选取

在 Hertz－Mindlin with Bonding V2 模型中，由单位面积法向刚度、法向范围、单位面积剪切刚度、剪

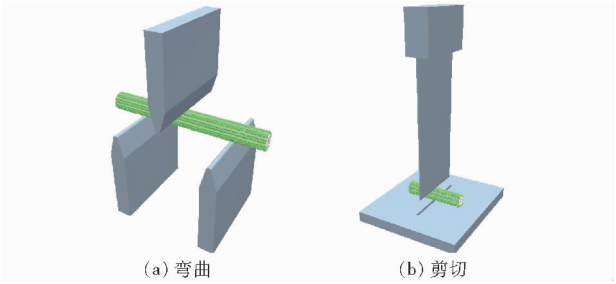



图 7 破坏离散元仿真模型

Fig. 7 Discrete element simulation model of damage

切范围、法向强度、剪切强度和粘结比例 7 个参数影响颗粒间的粘结作用。其中法向范围和剪切范围是指实际粘结键中单位面积法向刚度和剪切刚度允许上下波动的范围,为减少标定试验误差,将二者均设置为 0 N/m$^3$。粘结半径 $R_B$ 一般为颗粒物理半径的 1.1 ~ 1.2 倍[29],本研究将粘结比例设置为 1.1。最终,对剩余 4 个粘结参数进行标定,各颗粒间相互作用,共有 12 个因素,参考文献[30]和多次仿真预试验,确定茎秆粘结参数,其编码如表 2 所示。

表 2 茎秆粘结参数编码

Tab. 2 Bonding parameters encoding for stalks

| 参数 | 编码 | | |
|---|---|---|---|
| | -1 | 0 | 1 |
| 表皮-表皮单位面积法向刚度 $X_1$/(N·m$^{-3}$) | $4\times10^9$ | $7\times10^9$ | $1\times10^{10}$ |
| 表皮-表皮单位面积剪切刚度 $X_2$/(N·m$^{-3}$) | $4\times10^9$ | $7\times10^9$ | $1\times10^{10}$ |
| 表皮-表皮法向强度 $X_3$/Pa | $1\times10^8$ | $5.5\times10^8$ | $1\times10^9$ |
| 表皮-表皮剪切强度 $X_4$/Pa | $1\times10^8$ | $5.5\times10^8$ | $1\times10^9$ |
| 表皮-内瓤单位面积法向刚度 $X_5$/(N·m$^{-3}$) | $1\times10^9$ | $5\times10^9$ | $9\times10^9$ |
| 表皮-内瓤单位面积剪切刚度 $X_6$/(N·m$^{-3}$) | $1\times10^9$ | $5\times10^9$ | $9\times10^9$ |
| 表皮-内瓤法向强度 $X_7$/Pa | $1\times10^8$ | $5.5\times10^8$ | $1\times10^9$ |
| 表皮-内瓤剪切强度 $X_8$/Pa | $1\times10^8$ | $5.5\times10^8$ | $1\times10^9$ |
| 内瓤-内瓤单位面积法向刚度 $X_9$/(N·m$^{-3}$) | $1\times10^9$ | $3\times10^9$ | $5\times10^9$ |
| 内瓤-内瓤单位面积剪切刚度 $X_{10}$/(N·m$^{-3}$) | $1\times10^9$ | $3\times10^9$ | $5\times10^9$ |
| 内瓤-内瓤法向强度 $X_{11}$/Pa | $1\times10^8$ | $5.5\times10^8$ | $1\times10^9$ |
| 内瓤-内瓤剪切强度 $X_{12}$/Pa | $1\times10^8$ | $5.5\times10^8$ | $1\times10^9$ |

## 2.2 粘结参数标定方法

使用 Design-Expert 软件,以最大弯曲破坏力和剪切力为响应值,对 12 个影响因素进行 Plackett - Burman 试验。选取 Plackett - Burman 试验中对最大弯曲破坏力和剪切力综合影响较大的因素,在其参数范围内取 5 个区间,其余因素取平均值进行最陡爬坡试验。以最大弯曲破坏力和剪切力实际与仿真试验值的相对误差为指标,将相对误差最小的一组粘结参数设置为 Box - Behnken 试验的中间水平,相邻两组粘结参数分别设置为低水平和高水平。

## 2.3 粘结参数标定结果

### 2.3.1 Plackett - Burman 试验结果

Plackett - Burman 试验方案和结果如表 3 所示

表 3 Plackett - Burman 试验方案与结果

Tab. 3 Plackett - Burman experimental scheme and results

| 序号 | 因素 | | | | | | | | | | | | $Y_1$/N | $Y_2$/N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ | $x_9$ | $x_{10}$ | $x_{11}$ | $x_{12}$ | | |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 59.23 | 203.38 |
| 2 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 52.40 | 165.83 |
| 3 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 49.81 | 253.68 |
| 4 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 30.05 | 126.83 |
| 5 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 23.76 | 138.11 |
| 6 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 19.27 | 106.30 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 37.20 | 161.40 |
| 8 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 20.91 | 86.14 |
| 9 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 39.71 | 171.76 |
| 10 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 44.41 | 145.55 |
| 11 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 53.51 | 352.11 |
| 12 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 43.53 | 154.27 |
| 13 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 38.93 | 189.67 |
| 14 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 44.84 | 237.99 |
| 15 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 55.25 | 355.12 |
| 16 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 28.54 | 137.12 |
| 17 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 37.55 | 164.12 |
| 18 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 38.68 | 183.30 |
| 19 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 36.75 | 155.83 |
| 20 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 39.61 | 125.08 |

($x_1 \sim x_{12}$为因素编码值)，最大弯曲破坏力 $Y_1$ 和剪切力 $Y_2$ 的范围为 19.27 ~ 59.23 N 和 86.14 ~ 355.12 N。显著性分析结果如表 4 所示。其中，表皮-表皮单位面积法向刚度 $X_1$ 和内瓤-内瓤单位面积法向刚度 $X_9$ 对最大弯曲破坏力的影响极显著，表皮-内瓤单位面积剪切刚度 $X_6$ 对最大剪切力的影响极显著。根据各因素对两个响应值的贡献率之和对各因素进行显著性排序，选取表皮-表皮单位面积法向刚度 $X_1$、表皮-内瓤单位面积剪切刚度 $X_6$ 和内瓤-内瓤单位面积法向刚度 $X_9$ 进行最陡爬坡试验。

**表 4　Plackett－Burman 试验参数显著性分析**

**Tab. 4　Significance analysis of Plackett－Burman test parameters**

| 因素 | 弯曲破坏力 | | | | 剪切力 | | | | 显著性 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P$ | 效应值 | 均方和 | 贡献率/% | $P$ | 效应值 | 均方和 | 贡献率/% | 排序 |
| $x_1$ | < 0.000 1 ** | 15.126 | 1 143.98 | 47.376 1 | 0.000 2 ** | 64.085 | 20 534.4 | 21.117 4 | 1 |
| $x_2$ | 0.048 0 * | 2.084 | 21.715 3 | 0.899 303 | 0.899 9 | −1.155 | 6.670 13 | 0.006 859 48 | 12 |
| $x_3$ | 0.545 1 | −0.554 | 1.534 58 | 0.063 552 2 | 0.006 7 ** | −33.637 | 5 657.24 | 5.817 84 | 7 |
| $x_4$ | 0.775 7 | 0.258 | 0.332 82 | 0.013 783 2 | 0.031 6 * | −23.719 | 2 812.95 | 2.892 81 | 11 |
| $x_5$ | 0.005 0 ** | 3.508 | 61.530 3 | 2.548 18 | 0.044 6 * | 21.627 | 2 338.64 | 2.405 02 | 9 |
| $x_6$ | 0.002 6 ** | 3.98 | 79.202 | 3.280 02 | < 0.000 1 ** | 72.981 | 26 631.1 | 27.387 1 | 3 |
| $x_7$ | 0.984 1 | 0.018 | 0.001 62 | $6.708\,97 \times 10^{-5}$ | 0.003 8 ** | 37.643 | 7 084.98 | 7.286 11 | 5 |
| $x_8$ | 0.784 2 | −0.248 | 0.307 52 | 0.012 735 4 | 0.011 6 * | −30.037 | 4 511.11 | 4.639 17 | 8 |
| $x_9$ | < 0.000 1 ** | 13.328 | 888.178 | 36.782 5 | 0.000 2 ** | 61.413 | 18 857.8 | 19.393 1 | 2 |
| $x_{10}$ | 0.000 2 ** | 6.01 | 180.601 | 7.479 28 | 0.079 9 | 18.123 | 1 642.22 | 1.688 83 | 4 |
| $x_{11}$ | 0.929 4 | 0.08 | 0.032 | 0.001 325 23 | 0.839 5 | 1.861 | 17.316 6 | 0.017 808 2 | 6 |
| $x_{12}$ | 0.849 1 | −0.172 | 0.147 92 | 0.006 125 87 | 0.016 4 * | −27.789 | 3 861.14 | 3.970 75 | 10 |

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

### 2.3.2　最陡爬坡试验结果

根据 Plackett－Burman 试验结果，$X_1$、$X_6$、$X_9$ 对最大弯曲破坏力和剪切力均表现为正效应，将三者均设置为上升路径，确定其步长。其余因素设置为中间水平，取：$X_2 = 7 \times 10^9$ N/m$^3$、$X_5 = 5 \times 10^9$ N/m$^3$、$X_{10} = 3 \times 10^9$ N/m$^3$、$X_3 = X_4 = X_7 = X_8 = X_{11} = X_{12} = 5.5 \times 10^8$ N/m$^3$，试验结果表明，随着 $X_1$、$X_6$、$X_9$ 的逐步升高，最大弯曲破坏力和剪切力仿真与实际试验值的相对误差呈现先减小后增大的变化趋势，试验方案和结果如表 5 所示。第 4 组对应的参数组合相对误差最小，分别为 4.56%、3.15%。因此，确定以第 4 组试验参数为 Box－Behnken 试验的中间水平，相邻的 3 组和 5 组试验参数分别为低水平和高水平。

**表 5　最陡爬坡试验方案与结果**

**Tab. 5　Steepest climb test plan and results**

| 序号 | 因素 | | | $Y_1$ | | $Y_2$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$/(N·m$^{-3}$) | $X_6$/(N·m$^{-3}$) | $X_9$/(N·m$^{-3}$) | 试验值/N | 相对误差/% | 试验值/N | 相对误差/% |
| 1 | $4.0 \times 10^9$ | $1.0 \times 10^9$ | $1.0 \times 10^9$ | 23.69 | 44.93 | 104.79 | 43.73 |
| 2 | $5.2 \times 10^9$ | $2.6 \times 10^9$ | $1.8 \times 10^9$ | 32.26 | 25.01 | 131.10 | 29.60 |
| 3 | $6.4 \times 10^9$ | $4.2 \times 10^9$ | $2.6 \times 10^9$ | 38.43 | 10.67 | 162.81 | 12.57 |
| 4 | $7.6 \times 10^9$ | $5.8 \times 10^9$ | $3.4 \times 10^9$ | 44.98 | 4.56 | 192.08 | 3.15 |
| 5 | $8.8 \times 10^9$ | $7.4 \times 10^9$ | $4.2 \times 10^9$ | 48.86 | 13.58 | 227.90 | 22.38 |
| 6 | $1.0 \times 10^{10}$ | $9.0 \times 10^9$ | $5.0 \times 10^9$ | 55.42 | 28.82 | 262.09 | 40.74 |

### 2.3.3　Box－Behnken 试验结果

以最陡爬坡试验 3、4、5 组的试验参数作为低、中、高水平进行三因素三水平的 Box－Behnken 试验，因素编码如表 6 所示、试验设计与结果如表 7 所示。对试验结果进行方差分析，如表 8 所示。两个响应值对应的回归模型 $P$ 值均小于 0.01，失拟项 $P$ 值分别为 0.409 6、0.698 7，均大于 0.05，两模型均显著且失拟项均不显著。决定系数 $R^2$ 分别为 0.998 2、0.995 6，校正决定系数 $R^2_{adj}$ 分别为 0.995 8、0.990 0，证明拟合方程有意义。最大弯曲破坏力和最大剪切力与 3 个显著因素之间的二阶回归方程为

$$Y_1 = 45.37 + 2.58x_1 + 0.788\,7x_6 + 2.42x_9 + 0.605\,0x_1x_6 - 0.302\,5x_1x_9 + 0.482\,5x_6x_9 + 0.167\,0x_1^2 - 1.70x_6^2 + 0.164\,5x_9^2 \quad (5)$$

$$Y_2 = 207.24 + 15.76x_1 + 3.54x_6 + 19.10x_9 + 2.32x_1x_6 - 4.63x_1x_9 + 8.46x_6x_9 - 9.84x_1^2 - 5.49x_6^2 + 0.996\,0x_9^2 \quad (6)$$

**表 6　Box－Behnken 试验因素编码**

**Tab. 6　Box－Behnken experimental factors coding**

| 因素 | 编码 | | |
|---|---|---|---|
| | −1 | 0 | 1 |
| 表皮-表皮单位面积法向刚度 $X_1$/(N·m$^{-3}$) | $6.4 \times 10^9$ | $7.6 \times 10^9$ | $8.8 \times 10^9$ |
| 表皮-内瓤单位面积剪切刚度 $X_6$/(N·m$^{-3}$) | $4.2 \times 10^9$ | $5.8 \times 10^9$ | $7.4 \times 10^9$ |
| 内瓤-内瓤单位面积法向刚度 $X_9$/(N·m$^{-3}$) | $2.6 \times 10^9$ | $3.4 \times 10^9$ | $4.2 \times 10^9$ |

**表 7 Box－Behnken 试验方案与结果**

**Tab. 7 Box－Behnken experimental scheme and results**

| 序号 | 因素 | | | $Y_1$/N | $Y_2$/N |
|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$/(N·m$^{-3}$) | $X_6$/(N·m$^{-3}$) | $X_9$/(N·m$^{-3}$) | | |
| 1 | $7.6\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 45.07 | 206.88 |
| 2 | $8.8\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | 50.46 | 229.29 |
| 3 | $7.6\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 45.40 | 205.80 |
| 4 | $6.4\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 41.10 | 176.10 |
| 5 | $6.4\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | 45.97 | 206.33 |
| 6 | $7.6\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 45.42 | 205.11 |
| 7 | $7.6\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 45.50 | 207.69 |
| 8 | $8.8\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $2.6\times10^9$ | 46.03 | 199.71 |
| 9 | $6.4\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $2.6\times10^9$ | 40.33 | 158.24 |
| 10 | $7.6\times10^9$ | $7.4\times10^9$ | $2.6\times10^9$ | 41.87 | 179.88 |
| 11 | $8.8\times10^9$ | $7.4\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 47.78 | 212.37 |
| 12 | $7.6\times10^9$ | $7.4\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | 47.48 | 234.35 |
| 13 | $8.8\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 45.10 | 202.28 |
| 14 | $7.6\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | 44.83 | 208.70 |
| 15 | $7.6\times10^9$ | $4.2\times10^9$ | $2.6\times10^9$ | 41.15 | 188.06 |
| 16 | $6.4\times10^9$ | $7.4\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 41.36 | 176.89 |
| 17 | $7.6\times10^9$ | $5.8\times10^9$ | $3.4\times10^9$ | 45.44 | 210.71 |

各因素交互作用对响应值的影响响应曲面如图 8 所示。对于最大弯曲破坏力 $Y_1$：内瓤-内瓤单位面积法向刚度 $X_9$为定值，表皮-表皮单位面积法向刚度 $X_1$一定时，$Y_1$随表皮-内瓤单位面积剪切刚度 $X_6$的增加先增大后减小；$X_6$一定时，$Y_1$随 $X_1$的增加而增大。$X_6$为定值，$X_1$一定时，$Y_1$随 $X_9$的增加而增大；当 $X_9$一定时，$Y_1$随 $X_1$的增加而增大。$X_1$为定值，$X_6$一定时，$Y_1$随 $X_9$的增加而增大；$X_9$一定时，$Y_1$随 $X_6$的增加先增大后减小。对于最大剪切力 $Y_2$：$X_9$为定值，$X_1$一定时，$Y_2$随 $X_6$的增加而增大；$X_6$一定时，$Y_2$随 $X_1$的增加先增大后减小。$X_6$为定值，$X_1$一定时，$Y_2$随 $X_9$的增加而增大；$X_9$一定时，$Y_2$随 $X_1$的增加而增大。$X_1$为定值，$X_6$一定时，$Y_2$随 $X_9$的增加而增大；当 $X_9$较小时，$Y_2$随 $X_6$的增加而减小；当 $X_9$较大时，$Y_2$随 $X_9$的增加而增大。

### 2.4 最优粘结参数组合的确定及试验验证

根据 Box－Behnken 试验结果，以实际最大弯曲破坏力 43.02 N 和最大剪切力 186.22 N 为优化目标值，使用 Design-Expert 13 软件中的 Optimization 板块对 $X_1$、$X_6$和 $X_9$进行最优参数组合求解，约束条件为

$$\begin{cases}\max Y_1(X_1,X_6,X_9)\\ \max Y_2(X_1,X_6,X_9)\\ \text{s.t.}\begin{cases}6.4\times10^9\ \text{N/m}^3\le X_1\le8.8\times10^9\ \text{N/m}^3\\ 4.2\times10^9\ \text{N/m}^3\le X_6\le7.4\times10^9\ \text{N/m}^3\\ 2.6\times10^9\ \text{N/m}^3\le X_9\le4.2\times10^9\ \text{N/m}^3\end{cases}\end{cases}\tag{7}$$

求解结果显示，当 $X_1$为 $6.80\times10^9$ N/m$^3$、$X_6$为 $5.93\times10^9$ N/m$^3$、$X_9$为 $3.18\times10^9$ N/m$^3$时，最大弯曲破坏力和剪切力与实际试验值相等。

**表 8 Box－Behnken 试验方差分析**

**Tab. 8 Variance analysis of Box－Behnken experiment**

| 来源 | 弯曲破坏力 | | | | | 剪切力 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ | $P$ | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ | $P$ |
| 模型 | 119.88 | 9 | 13.32 | 422.09 | <0.000 1 ** | 5 959.04 | 9 | 662.12 | 176.97 | <0.000 1 ** |
| $X_1$ | 53.10 | 1 | 53.10 | 1 682.59 | <0.000 1 ** | 1 987.34 | 1 | 1 987.34 | 531.16 | <0.000 1 ** |
| $X_6$ | 4.98 | 1 | 4.98 | 157.72 | <0.000 1 ** | 100.47 | 1 | 100.47 | 26.85 | 0.001 3 ** |
| $X_9$ | 46.85 | 1 | 46.85 | 1 484.68 | <0.000 1 ** | 2 917.72 | 1 | 2 917.72 | 779.83 | <0.000 1 ** |
| $X_1X_6$ | 1.46 | 1 | 1.46 | 46.40 | 0.000 3 ** | 21.62 | 1 | 21.62 | 5.78 | 0.047 2 * |
| $X_1X_9$ | 0.366 0 | 1 | 0.366 0 | 11.60 | 0.011 4 * | 85.66 | 1 | 85.66 | 22.89 | 0.002 0 ** |
| $X_6X_9$ | 0.931 2 | 1 | 0.931 2 | 29.51 | 0.001 0 ** | 286.12 | 1 | 286.12 | 76.47 | <0.000 1 ** |
| $X_1^2$ | 0.117 4 | 1 | 0.117 4 | 3.72 | 0.095 1 | 407.81 | 1 | 407.81 | 109.00 | <0.000 1 ** |
| $X_6^2$ | 12.14 | 1 | 12.14 | 384.70 | 0.000 1 ** | 126.74 | 1 | 126.74 | 33.88 | 0.000 6 ** |
| $X_9^2$ | 0.113 9 | 1 | 0.113 9 | 3.61 | 0.099 2 | 4.18 | 1 | 4.18 | 1.12 | 0.325 8 |
| 残差 | 0.220 9 | 7 | 0.031 6 | | | 26.19 | 7 | 3.74 | | |
| 失拟项 | 0.105 8 | 3 | 0.035 3 | 1.23 | 0.409 6 | 7.21 | 3 | 2.40 | 0.506 2 | 0.698 7 |
| 纯误差 | 0.115 1 | 4 | 0.028 8 | | | 18.98 | 4 | 4.75 | | |
| 总和 | 120.10 | 16 | | | | 5 985.23 | 16 | | | |

将 $X_1$、$X_6$和 $X_9$设置为最优参数组合，其余因素设置为平均值，进行仿真验证试验，图 9 为仿真与实际破坏对比图。分别进行 5 次试验，得到最大弯曲破坏力分别为 41.63、41.81、42.41、42.71、42.00 N，最大剪切力分别为 179.18、179.24、179.81、187.35、183.25 N。平均值分别为 42.11、181.77 N，平均值相对误差分别为 2.11% 和 2.39%，最优参数组合下的茎秆最大弯曲破坏力和最大剪切力仿真与实际试验值差异较小，说明油菜茎秆离散元双层粘结模型可靠。

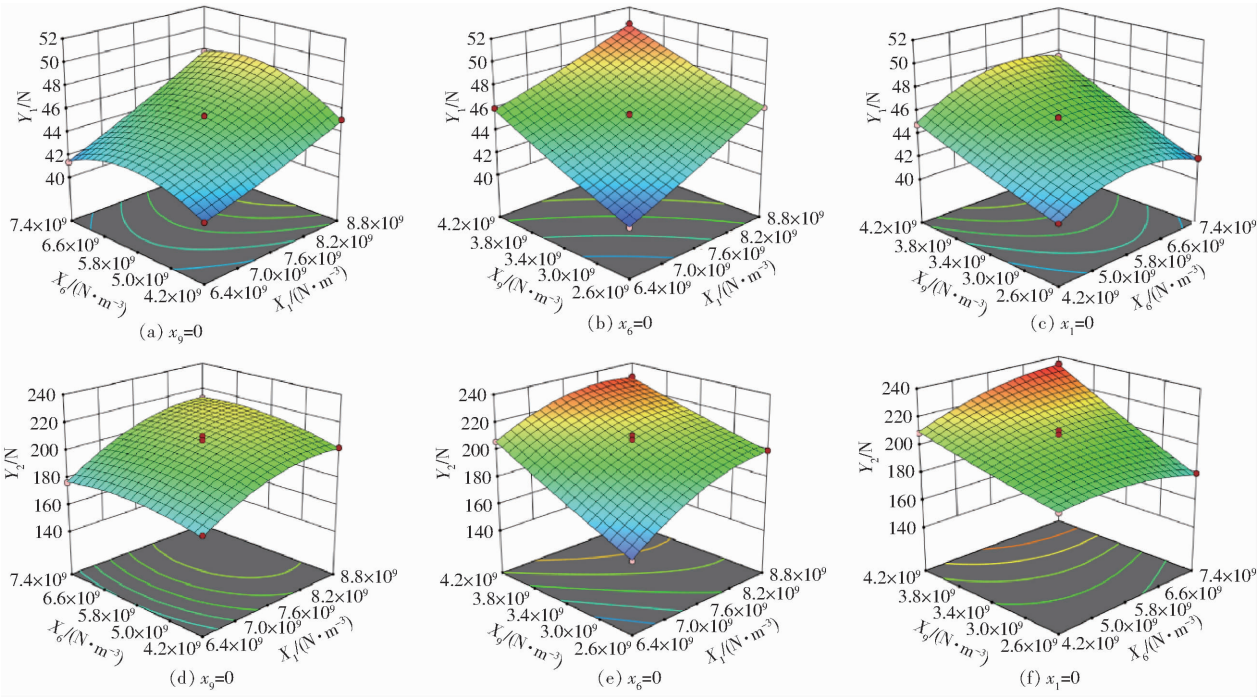



图 8　各因素交互作用响应面图

Fig. 8　Response surface plots of interaction among various factors

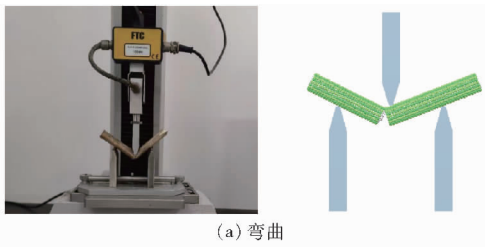



图 9　仿真与实际破坏对比图

Fig. 9　Comparison between simulation and actual

## 3　结论

(1)通过物理试验系统测定油菜茎秆间本征参数与接触参数。设置两种不同物料参数的颗粒,基于三轴空间坐标法,通过数值计算确定各个颗粒之间的相对位置,采用 Hertz－Mindlin with Bonding V2 接触模型,构建油菜茎秆双层离散元粘结模型并建立了茎秆弯曲破坏和剪切破坏仿真模型。

(2)将实测得到的最大弯曲破坏力和最大剪切力均值 43.02 N 和 186.22 N 作为评价指标,设计 Plackett－Burman 试验,筛选出对茎秆最大弯曲破坏力与最大剪切力贡献率前 3 位的因素:表皮-表皮单位面积法向刚度 $X_1$、表皮-内瓤单位面积剪切刚度 $X_6$、内瓤-内瓤单位面积法向刚度 $X_9$。通过最陡爬坡试验进一步缩小最佳参数组合范围,以与实际破坏值相对误差最小为原则确定了 $X_1$、$X_6$、$X_9$ 的参数标定区间分别为 $6.4\times10^9$ ~ $8.8\times10^9$ N/m$^3$、$4.2\times10^9$ ~ $7.4\times10^9$ N/m$^3$、$2.6\times10^9$ ~ $4.2\times10^9$ N/m$^3$。设计了三因素三水平的 Box－Behnken 试验,通过方差分析确定了拟合方程的可靠性,求解出最优参数组合为:$X_1=6.80\times10^9$ N/m$^3$、$X_6=5.93\times10^9$ N/m$^3$、$X_9=3.18\times10^9$ N/m$^3$。

(3)将最优参数组合进行验证,最大弯曲破坏力与最大剪切力的平均值相对误差分别为 2.11% 和 2.39%,且适收期油菜茎秆离散元破坏仿真与实际力学试验效果一致,证明了标定方法的可行性,标定参数的准确性。模型可用于收获作业中茎秆-刀具互作关系模拟分析,为油菜植株离散元建模与收获机具关键部件的优化设计提供参考。

## 参　考　文　献

[1]　张哲, 殷艳, 刘芳,等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 618－623.
ZHANG Zhe, YIN Yan, LIU Fang, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 618－623. (in Chinese)

[2]　刘成, 冯中朝, 肖唐华,等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485－489.

LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(4): 485 – 489. (in Chinese)

[3] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1 – 16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1 – 16. (in Chinese)

[4] 万星宇, 袁佳诚, 廖庆喜, 等. 油菜联合收获机凸块扰流式旋风分离清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 159 – 172.
WAN Xingyu, YUAN Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of cyclone separation cleaning device with raised cylinder disturbing airflow field for rapeseed combine harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 159 – 172. (in Chinese)

[5] 孙凯, 于建群, 赵瑾汶, 等. 面向切割过程仿真的小麦茎秆模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 116 – 127.
SUN Kai, YU Jianqun, ZHAO Jinwen, et al. Parameter calibration and experimental validation of wheat straw model for cutting process simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 116 – 127. (in Chinese)

[6] 冉军辉, 吴崇友. 谷物收获机切割机构研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 25 – 34.
RAN Junhui, WU Chongyou. Research status and prospect of cutting mechanism of grain harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 25 – 34. (in Chinese)

[7] 罗海峰, 金裕国, 童学权, 等. 油菜联合收获机割台气吹式籽粒低损回收喷嘴设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 267 – 278.
LUO Haifeng, JIN Yuguo, TONG Xuequan, et al. Design and testing of air-blown low-loss seed recovery nozzles for oilseed rape combine harvester cutting decks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 267 – 278. (in Chinese)

[8] 万星宇, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 24 – 44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24 – 44. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 赵宏波, 王学振, 郑智旗, 等. 农业装备领域离散元法应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 1 – 19.
ZHAO Hongbo, WANG Xuezhen, ZHENG Zhiqi, et al. Research status and progress of discrete element method applications in agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 1 – 19. (in Chinese)

[11] 张永华, 钟铭深, 唐玉梅, 等. 基于 EDEM – RecurDyn 的三七茎秆切割刀片仿真优化设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(3): 126 – 136.
ZHANG Yonghua, ZHONG Mingshen, TANG Yumei, et al. Simulation optimization design and experiment of *Panax notoginseng* stem cutting blades based on EDEM – RecurDyn[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(3): 126 – 136. (in Chinese)

[12] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 170 – 180.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 170 – 180. (in Chinese)

[13] 万星宇, 廖庆喜, 蒋亚军, 等. 饲用油菜机械化收获切碎过程离散元仿真与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2735 – 2745.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, JIANG Yajun, et al. Discrete element simulation and experiment of mechanized harvesting and chopping process for fodder rape crop harvest[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2735 – 2745. (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] 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)

[16] 夏俊芳，张朋，苑宏文，等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报，2024，55(9)：174－184.
XIA Junfang，ZHANG Peng，YUAN Hongwen，et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(9)：174－184.（in Chinese）

[17] 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）

[18] 叶大鹏，青家兴，林志强，等. 类芦茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报，2025，56(7)：139－149.
YE Dapeng，QING Jiaxing，LIN Zhiqiang，et al. Establishment and parameter calibration of discrete element model for *Neyraudia reynaudiana* stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(7)：139－149.（in Chinese）

[19] 郭辉，韩骏轩，吕增帅，等. 联合收获油葵脱出物离散元模型构建与参数标定[J]. 农业机械学报，2025，56(5)：319－330.
GUO Hui，HAN Junxuan，LÜ Zengshuai，et al. Discrete element model construction and parameter calibration of combined harvest oil sunflower extract[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(5)：319－330.（in Chinese）

[20] 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）

[21] 谢伟，彭磊，蒋蘋，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）

[22] 杜哲，李邓辉，李心平，等. 茶茎秆离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(1)：311－320.
DU Zhe，LI Denghui，LI Xinping，et al. Calibration and experiment of discrete element model parameters for tea stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(1)：311－320.（in Chinese）

[23] WANG Y，ZHANG Y T，YANG Y，et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification[J]. Biosystems Engineering，2020，200：400－414.

[24] 舒彩霞，杨佳，万星宇，等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(9)：34－43.
SHU Caixia，YANG Jia，WAN Xingyu，et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(9)：34－43.（in Chinese）

[25] 王小勇，余志，张德，等. 炒青绿茶离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报，2024，55(8)：418－427.
WANG Xiaoyong，YU Zhi，ZHANG De，et al. Calibration of simulation parameters for roasted green tea based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(8)：418－427.（in Chinese）

[26] 廖宜涛，王在腾，廖庆喜，等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊1)：236－243.
LIAO Yitao，WANG Zaiteng，LIAO Qingxi，et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp. 1)：236－243.（in Chinese）

[27] LIU W，ZHANG G，ZHOU Y，et al. Establishment of discrete element flexible model of the tiller taro plant and clamping and pulling experiment[J]. Frontiers in Plant Science，2022，13：1019017.

[28] 卫佳，傅佳翌，王树才，等. 冷鲜波尔山羊肋骨弯曲破坏离散元参数标定[J]. 农业工程学报，2024，40(21)：285－294.
WEI Jia，FU Jiayi，WANG Shucai，et al. Calibration of discrete element parameters for the bending failure on the chilled Boer goat ribs[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(21)：285－294.（in Chinese）

[29] 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）

[30] 郭辉，郭烈红，李海峰，等. 适收期油菜茎秆离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报，2024，40(24)：20－29.
GUO Hui，GUO Liehong，LI Haifeng，et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters for rapeseed stems during the suitable harvest period[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(24)：20－29.（in Chinese）