江西农业大学学报　2026,48(3)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　https://doi.org/10.3724/aauj.2026073

陈俊伟,蒋奇晶,朱振鲁,等.杂交构树茎秆离散元黏结参数标定与切割试验[J].江西农业大学学报,2026,48(3):890-905.
Chen J W,Jiang Q J,Zhu Z L,et al.Hybrid broussonetia papyrifera stem discrete element bonding parameter calibration and cutting test[J].Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2026,48(3):890-905.

杂交构树茎秆离散元黏结参数标定与切割试验

陈俊伟,蒋奇晶,朱振鲁,赵怡轩,彭才望*

(湖南农业大学 机电工程学院,湖南 长沙 410428)

摘要:【目的】旨在构建杂交构树茎秆离散元模型,精确标定其黏结参数,并利用DEM-MBD耦合仿真对切割刀进行优化设计,为离散元法指导切割装置的设计优化提供参考。【方法】采用三轴空间坐标法构建收获期杂交构树茎秆双层离散元仿真模型,使用Design Expert软件依次设计Plackett-Burman试验、最陡爬坡试验和Box-Behnken试验,通过对比茎秆峰值剪切力的仿真与试验结果,验证模型参数的准确性;对切割装置 的工作原理进行系统分析,并针对切割刀的结构参数进行优化设计;采用DEM-MBD耦合的方法构建杂交构树茎秆和往复式切割装置的互作模型,以峰值切割力为评价指标开展二次旋转正交组合试验。【结果】黏结参数最优参数组合为单位面积法向刚度X_1为2.705×10^{10} N/m^3、单位面积切向刚度X_2为2.24×10^9 N/m^3、黏结半径比例X_5为1.206,最优参数组合条件下仿真最大剪切力与实测最大剪切力平均值相对误差为1.97%;刀片结构参数最优组合:滑切角为28.57°、刀刃角为41.11°、刀厚为2.34 mm,在优化结构参数下,得到的最大剪切力与预测值相对误差为0.95%。【结论】该离散元模型参数标定结果可为杂交构树茎秆切割离散元仿真提供参考,切割刀的优化设计结果可用于后续的杂交构树收获设备研发。

关键词:杂交构树;离散元;黏结参数;DEM-MBD;峰值切割力;结构参数;最优参数组合
中图分类号:S224　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2026)03-0890-16
CSTR:32399.14.aauj.2026073

Hybrid broussonetia papyrifera stem discrete element bonding parameter calibration and cutting test

Chen Junwei, Jiang Qijing, Zhu Zhenlu, Zhao Yixuan, Peng Caiwang*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: [**Objective**] The purpose of this study is to construct a discrete element model of hybrid sugarcane stalks, accurately calibrate its bonding parameters, and to optimize the design of cutting knives with the use of DEM-MBD simulation, guiding the design and optimization of cutting devices by this method. [**Method**] The discrete element model of hybrid paper mulberry stems was constructed using a three-axis

收稿日期:2025-10-29　　**修回日期:**2025-11-28　　**接受日期:**2025-12-02
基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30310)
Project supported by Hunan Provincial Natural Science Foundation General Project(2023JJ30310)
作者简介:陈俊伟,硕士生,orcid.org/0009-0008-3458-2500,3559456229@qq.com;*通信作者:彭才望,副教授,博士,主要从事畜禽废弃物资源化处理与利用研究,orcid.org/0000-0002-9466-905X,hnndpcw@163.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

spatial coordinate method. Design Expert software was used to sequentially design Plackett-Burman experiments, steepest ascent experiments, and Box-Behnken experiments. By comparing the simulated and experimental results of the stem peak shear force, the accuracy of the model parameters was verified. A systematic analysis of the working principle of the cutting device was carried out, and the structural parameters of the cutting blade were optimized. A DEM-MBD method was used to construct an interaction model between hybrid tree stems and a reciprocating cutting device, and a secondary rotational orthogonal combination experiment was conducted using the peak cutting force as the evaluation index. [**Result**] The optimal combination of bonding parameters is a normal stiffness per unit area X1 of 2.705×10^{10}, a tangential stiffness per unit area X2 of 2.24×10^{9}, and a bonding radius X5 of 1.206. Under this optimal parameter combination, the relative error between the simulated maximum shear force and the measured average maximum shear force is 1.97%. The optimal combination of tool structure parameters is a rake angle of 28.57°, a cutting edge angle of 41.11°, and a tool thickness of 2.34 mm. Under the optimized structural parameters, the relative error between the maximum shear force obtained and the predicted value is 0.95%. [**Conclusion**] The calibration results of this discrete element model can provide a reference for the discrete element simulation of cutting hybrid poplar stems, and the optimized design results of the cutting blade can be used for the subsequent development of hybrid poplar harvesting equipment.

Keywords: hybrid broussonetia papyrifera; discrete element method; bonding parameter; DEM-MBD; peak cutting force; structural parameters; optimal parameter combination

【研究意义】杂交构树,桑科构树属多年生落叶乔木,是一种新兴的非谷物蛋白饲料来源[1],可有效缓解饲料资源紧缺问题。据调查[2],预计2025年杂交构树保有面积可达666.67 km²,年产量可达600万t。目前杂交构树采收多依赖于人工收割[3],该收割方式工序分散、需要较多的人力投入且效率很低,限制了杂交构树产业的高质量发展。现有杂交构树的采收机械主要为割灌机和青饲料收获机,缺乏专用的杂交构树收获设备[4]。切割刀是切割器剪切作物茎秆的核心工作部件,其性能优劣直接影响作物的收获质量、作业效率以及后续处理效果[5]。在分析物料与机械部件的作用机理时,常采取数值模拟方法,以降低试验成本和缩短研发周期[6]。离散元法(DEM)在构建农业作物模型[7-9]、优化农业机械结构[10-11]、探明作物与机械的相互作用机理[12]等方面具有模型还原度高、仿真结果准确等优点[13]。因此,构建杂交构树的离散元模型,标定其仿真参数并以此优化切割刀的结构参数,对后续杂交构树收获机械设计、分析及优化具有重要意义。【前人研究进展】从力学性质来看,茎秆是一种黏弹性材料,其纤维之间的黏聚力本质上属于分子力,故而使用离散元构建茎秆模型具有一定优势[14]。杜哲等[15]利用离散元法构建了茶茎秆三层黏结增强模型,并利用茶茎秆拉伸和穿刺验证实验验证了茶茎秆模型的有效性和准确性。Zhang等[16]利用离散元法建立了大白菜的根切模型,根据接触相互作用提出了分层颗粒模型,利用EDEM对切削过程进行模拟比较分析,从宏观和微观层面揭示了根切装置切削机理。目前,DEM-MBD耦合仿真技术在农业机械领域的应用越来越广泛,尤其是针对具有复杂运动的部件分析与优化方面[17-19]。

【本研究切入点】现有茎秆类作物离散元模型研究的标定对象均与杂交构树茎秆在物理力学特性上存在一定差别,且针对其切割装置的离散元优化设计研究也鲜有报道。【拟解决的关键问题】本试验拟以杂交构树茎秆为研究对象,构建杂交构树茎秆木质部-韧皮部双层离散元模型,标定茎秆黏结参数。通过对切割装置的工作机理分析,确定杂交构树切割刀片结构参数的取值范围。利用DEM-MBD耦合仿真模拟往复式切割器剪切杂交构树茎秆的工作过程,探究刀片滑切角、刀刃角、刀厚对杂交构树茎秆最大剪切力的影响,确定切割刀片的最优结构参数组合,仿真结果可为切割装置的研发和优化设计提供参考。

1　材料与参数测定

1.1　基本物理参数测定

2025年6月21日,在重庆市荣昌区仁义镇杂交构树种植基地获取茎秆样本。杂交构树品种为“科构

101”，平均每 666.7 m^2种植 1 500 株（即行距为 60~100 cm，株距为 50~80 cm），株高为 0.8~1.0 m，刈割高度为 15~20 cm。采用五点取样法获取茎秆材料，在每个 1 m^2采样区内随机选取 5 株植株，截取高度为 15 mm。将主茎秆自上而下分段，单株杂交构树植株形态结构如图 1 所示。将所得样本去除茎秆上部和下部，保留去除枝叶后的中段茎秆作为试验样本，测得茎秆平均直径为 7.11 mm，其中韧皮部平均厚度为 0.23~0.31 mm，中心髓部径向长度为 1.3~1.9 mm。利用水分测定仪测得茎秆含水率为 68.75%~75.24%，利用排水法算得茎秆密度为 615 kg/m^3。

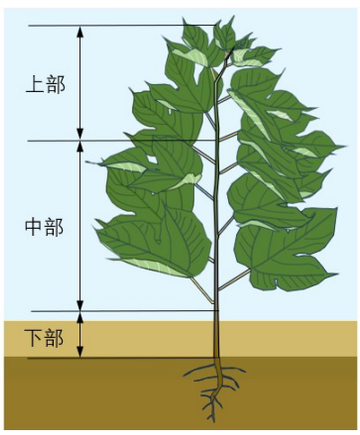


图 1 杂交构树植株形态结构示意

Fig.1 Schematic diagram of the morphological structure of hybrid papaya plants

通过万能试验机单轴压缩试验（图 2）测量杂交构树茎秆的弹性模量 E，并计算其剪切模量 G，具体计算公式如下：

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)} \quad ①$$

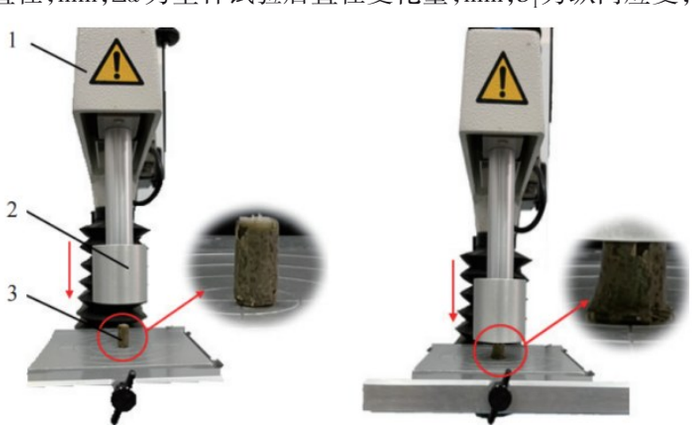
$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}=\frac{FL}{A\cdot\Delta L} \quad ②$$

式①和式②中：E 为茎秆弹性模量，MPa；G 为茎秆剪切模量，MPa；μ 为泊松比；σ 为茎秆所受应力，MPa；F 为试验中承受的临界挤压力，N；S 为茎秆试验前横截面积，mm^2；L 为茎秆试验前长度，mm；ΔL 为茎秆试验后长度变化量，mm。

茎秆的泊松比 μ 是指茎秆在受单向压力时，其横向变形量与轴向变形量之比，其计算公式如下：

$$\mu=\left|\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right|=\frac{\Delta d\cdot L}{d\cdot\Delta L} \quad ③$$

式③中：d 为茎秆试验前直径，mm；Δd 为茎秆试验后直径变化量，mm；ε_1 为纵向应变；ε_2 为横向应变。



1：质构仪；2：压缩探头；3：杂交构树茎秆。

1：Texture analyzer；2：Compression probe；3：Hybrid paper mulberry stem.

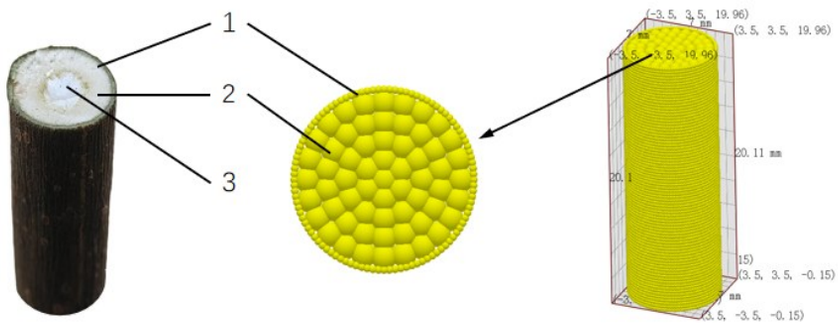
图 2 单轴压缩试验

Fig.2 Uniaxial compression experiment

根据单轴压缩试验前后高度和直径的变化,计算得出构树茎的弹性模量、剪切模量和泊松比分别为28.59 MPa、10.43 MPa和0.37。

1.2　接触参数标定

前期研究[20]对杂交构树离散元接触参数进行了标定,接触参数标定仿真模型如图3所示,仿真参数标定结果如表1所示。杂交构树茎秆内部髓部径向占比很小,其中心未明显分化成髓腔空洞。因此,可将茎秆简化为条状纤维韧皮和内部木质部两部分,参考已有研究处理方法[21-22],建模过程中将茎秆等效为各向同性结构,采用同一属性的2种颗粒通过三维空间坐标法来建立茎秆仿真模型。



1:韧皮;2:木质部;3:髓部。

1:Phloem;2:Xylem;3:Pith.

图3　接触参数标定仿真模型

Fig.3　Simulation model for contact parameter calibration

表1　杂交构树离散元基本物理参数与接触参数

Tab.1　Basic physical and contact parameters of hybrid poplar discrete element

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
杂交构树茎秆 Hybrid paper mulberry stem	弹性模量/MPa	28.59
	剪切模量/MPa	10.43
	泊松比	0.37
钢材 Steel	弹性模量/MPa	2.06×10^4
	剪切模量/MPa	7.94×10^4
	泊松比	0.30
杂交构树茎秆-杂交构树茎秆 Hybrid paper mulberry stem-Hybrid paper mulberry stem	恢复系数	0.21
	静摩擦系数	0.24
	动摩擦系数	0.03
杂交构树茎秆-钢材 Hybrid paper mulberry stem-Steel	恢复系数	0.321
	静摩擦系数	0.589
	动摩擦系数	0.078

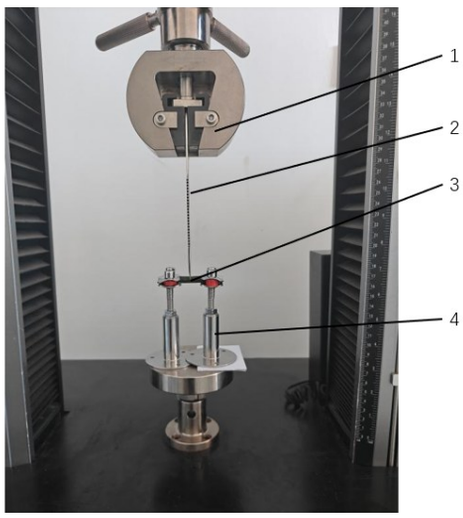
1.3　黏结参数标定

1.3.1　杂交构树茎秆剪切实验

茎秆的剪切破坏力是茎秆仿真模型黏结参数的取值依据。裁剪5份长度为40 mm的杂交构树茎秆试样,利用万能试验机对杂交构树茎秆试样施加弯曲载荷,两端固定支撑点间距为20 mm,压头速度设为0.005 m/s,记录加载过程的剪切最大破坏载荷。试验用剪切刀片为厚度2 mm、长度185 mm、宽度35 mm,刀刃角12°,刃口单边倒角的直刃刀片。试验重复5次,剔除最大值和最小值后,经统计得到平均最大剪切力为65.86 N。

1.3.2　黏结模型选取与建立

杂交构树的收获作业涉及到切断过程,选用Hertz-Mindlin with bonding模型构建杂交构树茎秆黏结模型。与接触参数标定模型不同,黏结参数标定模型采用元颗粒进行构建,在构建模型时,如果颗粒之间有重合,仿真过程时会发生颗粒爆炸,使得仿真结果不准确,为此需要在颗粒之间留有一定的空隙。杂交构树茎秆黏结参数仿真模型如图5所示,茎秆仿真模型长度为40.05 mm,直径为7 mm,木质部颗粒半径和韧皮部颗粒半径分别为0.5 mm、0.15 mm,黏结半径分别为0.55 mm、0.2 mm。



1:力学万能试验机;2:剪切刀片;3杂交构树茎秆;4茎秆夹具。

1:Universal testing machine for mechanics;2:Shear blade;3:Hybrid paper mulberry stem;4:Stem clamp.

图4 杂交构树茎秆剪切试验

Fig.4 Shear test of hybrid paper mulberry stems

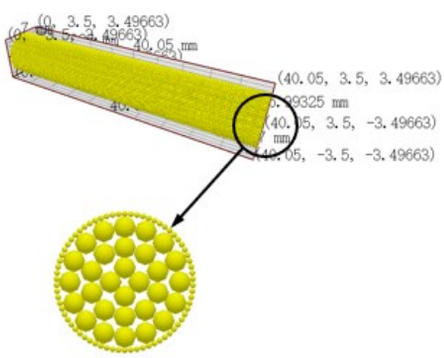


图5 茎秆黏结参数标定仿真模型

Fig.5 Calibration simulation model of stem adhesion parameters

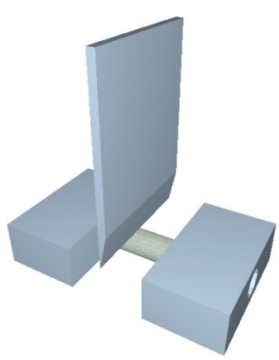


图6 茎秆剪切实验仿真模型

Fig.6 Stem shear test simulation model

通过solidworks建立茎秆夹具和剪切刀片,将文件格式保存为.stp格式导入到EDEM中,在夹具中间生成茎秆黏结参数标定仿真模型,设置刀片下降速度为0.005 m/s,两夹具间距为20 mm,杂交构树茎秆剪切仿真试验如图所示,参考茎秆类作物离散元相关文献[21-23]中的仿真参数,确定杂交构树茎秆黏结参数取值范围如表2所示:

表2 杂交构树茎秆黏结参数取值范围

Tab.2 Range of adhesion parameter values for hybrid constructed tree stems

参数 Parameter	数值 Value
法向接触刚度/(N·m^{-1}) Normal contact stiffness	4×10^{9}~2.5×10^{10}
径向接触刚度/(N·m^{-1}) Radial Contact Stiffness	2×10^{9}~1×10^{10}
临界法向应力/Pa Critical normal stress	6×10^{8}~5×10^{9}
临界切向应力/Pa Critical tangential stress	5×10^{8}~4×10^{9}
黏结半径比例 Bonding radius ratio	1~1.3

1.3.3 黏结参数的标定试验

(1)Plackett-Burman试验。试验以仿真最大剪切力为响应值,通过Plackett-Burman试验对黏结参数进行显著筛选分析,Plackett-Burman试验编码表、试验方案结果与试验结果分析如表3、表4所示:

由表5可知,模型的P值<0.000 1,表明模型是极可靠的,其中X_1、X_2、X_5对最大剪切破坏力有显著影响。以最大剪切力和相对误差作为评价指标,将X_1、X_2、X_5三项影响因素作为试验因素进行最陡爬坡试验,其余不显著因素X_3、X_4均取中间值2.4×10^{9} Pa、1.85×10^{9} Pa。其中,相对误差计算公式为:

表 3　Plackett-Burman 试验影响因素编码表

Tab.3　Coding table of factors in Plackett-Burman experiment

因素 Factors	编码 Code	
	−1	1
法向接触刚度/(N·m^{-1}) Normal contact stiffness	1×10^{10}	4×10^{10}
径向接触刚度/(N·m^{-1}) Radial Contact Stiffness	8×10^{9}	3×10^{10}
临界法向应力/Pa Critical normal stress	8×10^{8}	4×10^{9}
临界切向应力/Pa Critical tangential stress	7×10^{8}	3×10^{9}
黏结半径比例 Bonding radius ratio	1	1.3

表 4　Plackett-Burman 试验设计与结果

Tab.4　Plackett-Burman experimental design and results

序号	因素 Factors					最大剪切力/N
Serial Number	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Maximum shear force
1	−1	1	−1	1	1	30.00
2	1	1	−1	−1	−1	67.90
3	1	−1	1	1	1	132.10
4	1	1	−1	1	1	98.60
5	−1	1	1	1	−1	17.25
6	−1	1	1	−1	1	30.00
7	1	−1	1	1	−1	71.50
8	1	1	1	−1	−1	67.90
9	−1	−1	−1	1	−1	19.17
10	−1	−1	−1	−1	−1	19.71
11	1	−1	−1	−1	1	124.80
12	−1	−1	1	−1	1	28.80

$$\sigma = \left|\frac{F_1 - F_0}{F_1}\right| \times 100\% \qquad ④$$

式④中:F_1为实际平均最大剪切力,N;F_0为仿真最大剪切力,N。

表 5　Plackett-Burman 试验结果方差分析

Tab.5　Analysis of variance for Plackett-Burman test results

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean Square	F	P
模型 Model	18 607.9	5	3 721.58	53.75	<0.000 1**
X_1	15 747.59	1	15 747.59	227.45	<0.000 1**
X_2	1 244.59	1	1 244.59	17.98	0.005 4**
X_3	13.29	1	13.29	0.192 0	0.676 6
X_4	75.25	1	72.57	1.05	0.345 4
X_5	2 726.16	1	2 726.16	39.38	0.000 8**
残差 Residuals	415.41	6	69.24		
总和 Sum	19 023.31	11			

**表示极显著(P<0.01),*表示显著(0.01<P<0.05)。

** indicates extremely significance(P<0.01),*Indicates significance(0.01<P<0.05).

(2)Box-Behnken 试验。由表 6 可知,随着X_1、X_2、X_5增大,仿真最大剪切力也随之增大,其中在三水平处相对误差最小,最接近实际物理试验值,故选取三水平作为中心水平值,二水平和四水平分别作为试验低水平和高水平,Box-Behnken 试验编码如表 7 所示.

表 6 最陡爬坡试验设计与结果

Tab.6 Steepest climb test design and results

序号 Serial number	X_1	X_2	X_5	最大剪切力/N Maximum shear force	相对误差/% Relative error
1	1×10^{10}	8×10^{9}	1	19.17	70.89
2	1.75×10^{10}	1.35×10^{10}	1.075	36.5	44.58
3	2.5×10^{10}	1.9×10^{10}	1.15	55.1	16.49
4	3.25×10^{10}	2.45×10^{10}	1.225	76.5	16.56
5	4×10^{10}	3×10^{10}	1.3	107.4	63.07

表 7 Box-Behnken 试验因素编码

Tab.7 Box-Behnken test factor coding

水平 Level	因素 Factor		
	X_1	X_2	X_5
−1	1.75×10^{10}	1.35×10^{10}	1.075
0	2.5×10^{10}	1.9×10^{10}	1.15
1	3.25×10^{10}	2.45×10^{10}	1.225

黏结参数 Box-Behnken 试验结果与方差分析如表 8 和表 9 所示，试验结果表明，茎秆法向接触刚度 X_1、茎秆径向接触刚度 X_2、黏结半径 X_5 对最大剪切力影响极显著，X_1X_2、X_1X_5、X_1^2、X_5^2 对最大剪切力影响极显著，其余项 X_2X_5、X_2^2 影响不显著。该回归模型（P<0.000 1）极显著，说明该模型是极可靠的；决定系数 R^2=0.996 7，校正决定系数 R_{adj}^2=0.992 5，二者均接近 1，表明该模型拟合方程拟合较好，能够准确的反映真实情况。杂交构树茎秆仿真最大剪切力与各影响因素的回归方程为：

$$F_0 = 55.10 + 17.46X_1 - 1.74X_2 + 7.03X_5 - 2.55X_1X_2 + 2.47X_1X_5 + 0.875X_2X_5 + 2.02X_1^2 + 1.13X_2^2 + 1.25X_5^2 \quad ⑤$$

表 8 黏结参数响应曲面试验设计与结果

Tab.8 Test design and results of bonding parameter response surface

序号 Serial Number	X_1	X_2	X_5	最大剪切力/N Maximum shear force	相对误差/% Relative error
1	3.25×10^{10}	1.35×10^{10}	1.15	80.9	22.84
2	2.5×10^{10}	1.9×10^{10}	1.15	55.1	16.34
3	1.75×10^{10}	2.45×10^{10}	1.15	40.7	12.85
4	3.25×10^{10}	2.45×10^{10}	1.15	71.4	8.41
5	2.5×10^{10}	1.9×10^{10}	1.15	55.1	16.34
6	2.5×10^{10}	1.35×10^{10}	1.225	64.0	2.82
7	1.75×10^{10}	1.9×10^{10}	1.075	35.9	45.49
8	2.5×10^{10}	2.45×10^{10}	1.225	63.2	4.04
9	2.5×10^{10}	1.9×10^{10}	1.15	55.1	16.34
10	2.5×10^{10}	1.9×10^{10}	1.15	55.1	16.34
11	1.75×10^{10}	1.35×10^{10}	1.15	40.0	39.27
12	1.75×10^{10}	1.9×10^{10}	1.225	46.8	28.94
13	2.5×10^{10}	1.9×10^{10}	1.15	55.1	16.34
14	3.25×10^{10}	1.9×10^{10}	1.225	85.8	30.28
15	3.25×10^{10}	1.9×10^{10}	1.075	65.0	1.31
16	2.5×10^{10}	2.45×10^{10}	1.075	49.2	25.30
17	2.5×10^{10}	1.35×10^{10}	1.075	53.5	18.77

1.4 标定参数结果与分析

基于物理试验所得的最大剪切力平均值 65.86 N，应用 Design-expert13.0 软件对该二阶回归方程进行求解，得到仿真模型最优参数组合。其中，最优显著参数及其取值：法向接触刚度为 2.705×10^{10} N/m、切向接触刚度为 2.24×10^{9} N/m、黏结半径比例为 1.206；其余不显著参数取值：临界法向应力、临界切向应

表9　响应曲面试验方差分析

Tab.9　Analysis of variance for response surface experiment

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	2 944.31	9	327.15	235.54	<0.000 1**
X_1	2 439.51	1	2 439.51	1 756.40	<0.000 1**
X_2	24.15	1	24.15	17.39	0.004 2**
X_5	394.81	1	394.81	284.25	<0.000 1**
X_1X_2	26.01	1	26.01	18.73	0.003 4**
X_1X_5	24.50	1	24.50	17.64	0.004 0**
X_2X_5	3.06	1	3.06	2.20	0.181 1
X_1^2	17.27	1	17.27	12.43	0.009 7**
X_2^2	5.33	1	5.33	3.84	0.091 0
X_5^2	6.58	1	6.58	4.74	0.006 0**
残差 Residual	9.72	7	1.39		
失拟项 Lack of fit	9.72	3	3.24		
纯误差 Pure error	<0.000 1	4	0		
总和 Sum	2 954.04	16			

力取中间值分别为2.4×10^9 Pa、1.85×10^9 Pa。以上述参数标定结果进行剪切仿真试验,得到构树茎秆剪切仿真试验最大剪切力为67.16 N,与实测最大剪切力的平均值之间的相对误差为1.97%。仿真试验与物理试验所得剪切力-时间曲线如图7所示,将仿真试验曲线与物理试验曲线进行对比,发现曲线变化趋势基本一致,表明杂交构树茎秆仿真模型能够反映剪切过程力随时间的变化规律,仿真标定参数准确可靠。

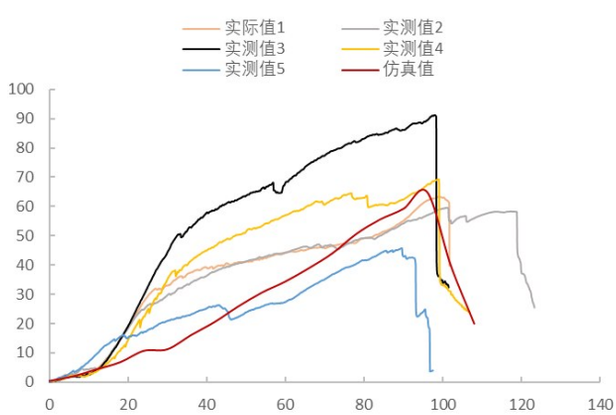


图7　实测力学试验与仿真试验时间-载荷曲线对比

Fig.7　Comparison of time-load curves between measured mechanical tests and simulation tests

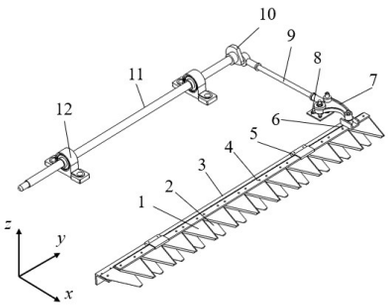
2　往复式切割装置结构及工作原理

2.1　往复式切割装置设计及运动分析

本研究设计和搭建了杂交构树往复式切割装置,如图8所示,主要由曲柄摇杆传动机构和单动刀切割器组成,包括动刀、定刀、底板、动刀杆、压刃器、滑槽、摇臂(换向器)、球头连杆、偏心轮等组成。当动力通过传动轴传递到驱动装置时,通过偏心轮与球头连杆将传动轴的回转运动转化为摇臂的往复摆动,利用摇臂驱使割刀进行往复运动,完成杂交构树茎秆的切割。

往复式切割装置结构及运动示意如图9所示,其传动过程可视为一组对心曲柄滑块机构和一组连杆滑槽机构联合完成[24],如图10a、10b所示,图中A_0、B_0、C_0、D_0、E_1为机构运动初始位置,A_1、B_1、C_1、D_1、E_1为运动后续位置。该机构满足以下函数关系:

$$y_F(\gamma)=r\cdot(\sin\gamma-\sqrt{2\cos\gamma-\cos^2\gamma}) \tag{6}$$



1:动刀;2:定刀;3:底板;4:动刀杆;5:压刃器;6:滑槽;7:摇臂;8:轴承座a;9:球头连杆;10:偏心轮;11:传动轴;12.轴承座b。

1: Moving knife; 2: Fixed knife; 3: Base plate; 4: Moving knife rod; 5: Blade press; 6: Connecting block; 7: Rocker arm; 8: Bearing seat a; 9: Ball head connecting rod; 10: Eccentric wheel; 11: Drive shaft; 12: Bearing seat b.

图8 往复式切割装置

Fig.8 Reciprocating cutting device

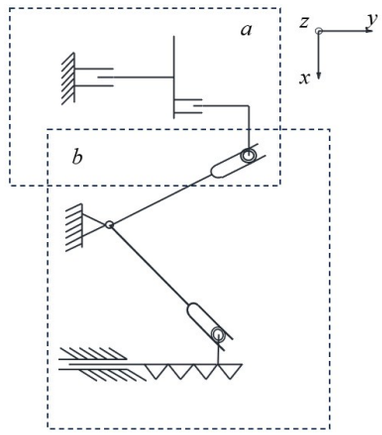


图9 往复式切割装置运动示意

Fig.9 Schematic diagram of the reciprocating cutting device motion

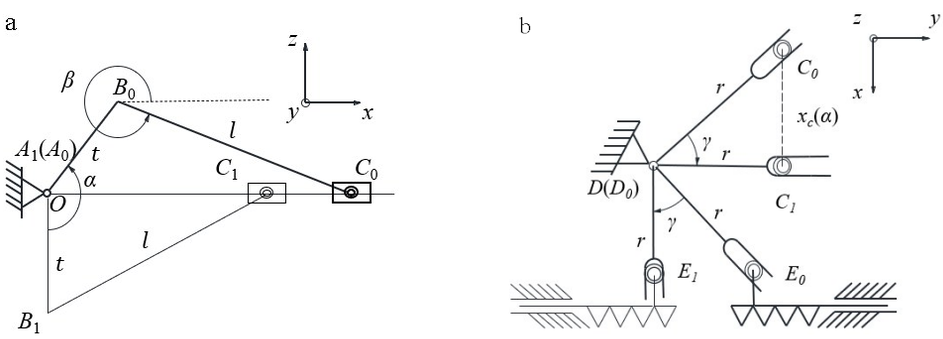


图10 对心曲柄滑块(a)和连杆滑槽(b)机构

Fig.10 Heart crank-slider mechanism(a)andLink Slider mechanism(b)

$$\beta(\alpha)=\frac{\arctan t\cdot\sin\alpha+\sqrt{l^2-t^2\cos^2\alpha}-\sqrt{l^2-t^2}}{r} \quad ⑦$$

式⑥、式⑦中:l为球头连杆长度,t为曲柄长度,r为摇臂长度,γ为摇臂摆动角度,α为主轴转角。

联立式⑥与式⑦得到关于α的动刀切割位移函数为:

$$y_F(\alpha)=y_F[\beta(\alpha)] \quad ⑧$$

2.2 切割刀片结构设计与受力分析

2.2.1 割刀结构

刀片尺寸参数如图11所示,主要参数有上底宽度d_1、下底宽度d_2、滑切角α、厚度h、刀刃角β、刃口高度b,具体结构参数数值如表所示。为减少因素干扰,本试验选用光刃刀片进行切割刀片的优化设计。

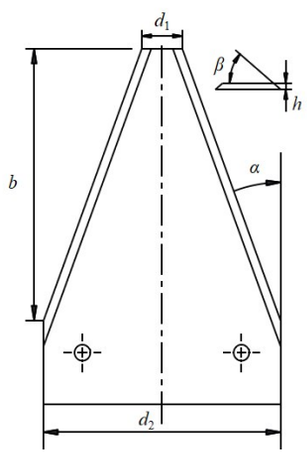


图11 刀片尺寸参数

Fig.11 Tool Size Parameters

2.2.2　割刀受力分析

杂交构树茎秆切割受力分析如图12所示,为确保杂交构树茎秆被切割刀切断,茎秆必须在刀刃处不发生滑移,因此,为保证茎秆被钳住并保持平衡,作用于茎秆的合力F_1、F_2必须大小相等,方向相反。从图12的三角关系可以看出:

$$\gamma_1=\gamma_2=\frac{\angle 180^\circ-\eta}{2}=\frac{\theta_1+\theta_2}{2} \tag{9}$$

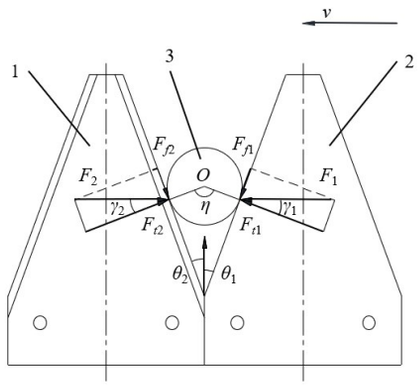
根据静力学理论可知,全约束反力的作用线必定在摩擦角φ之内,所以有:

$$\gamma_1<\varphi_1;\ \gamma_2<\varphi_2 \tag{10}$$

故茎秆被钳住的条件为:

$$\theta_1+\theta_2\leqslant\varphi_1+\varphi_2 \tag{11}$$

滑切是割刀的绝对运动方向与刃口既不垂直也不平行的切割方式,可以通过增大滑切角来减小切割时的正压力,但过大的滑切角会导致茎秆滑脱,导致切割失败。滑切角选取范围为20°~55°[15]。



1:动刀;2:定刀;3:杂交构树茎秆。

1:Moving blade;2:Fixed blade;3:hybrid paper mulberry stem.

图12　茎秆剪切受力分析

Fig.12　Stem shear stress analysis diagram

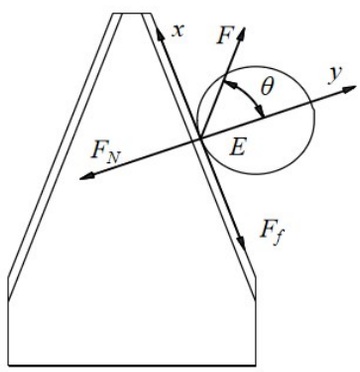


图13　茎秆滑切受力分析

Fig.13　Stem smooth cutting stress analysis diagram

杂交构树茎秆滑切受力分析如图13所示,其中,滑切点E处的茎秆切割动力学方程组为:

$$\begin{cases}\sin\theta-F_f=m(a\sin\theta-a_T)\\ F\cos\theta-F_N=ma\cos\theta\\ F_N\tan\varphi=F_f\end{cases} \tag{12}$$

式⑫中:F为割刀对杂交构树茎秆的作用力,N;F_f为刀片和茎秆之间的摩擦力,N;F_N为杂交构树茎秆对刀片的反作用力,N;θ为杂交构树茎秆与刀片之间的滑切角,(°);a为杂交构树茎秆沿刀片斜面的加速度,m²;a_T为割刀前进方向的加速度,m²;φ为杂交构树茎秆切割摩擦角,(°)。

式⑫化简得:

$$F_N\tan\varphi-\tan\theta=ma_T \tag{13}$$

由此可知,杂交构树正常切割时,F_N>0,a_T>0,即摩擦角φ大于滑切角θ。由前期试验[20]可知,杂交构树茎秆的摩擦因素最大为0.589,计算得到此时摩擦角为30.5°,故杂交构树茎秆滑切角在20°~30.5°最佳。

最终切割刀片结构参数取值如表10所示。

表10　动刀结构参数

Tab.10　Knife structure parameters

参数 Parameter	数值 Value
上底d_1/mm Top base	13
下底d_2/mm bottom base	76
刀刃高度b/mm Blade height	84
滑切角α/(°) Slip Angle	20~30.5
刀刃角β/(°) Blade angle	30~50
刀厚h/mm Thick blade	2~5

3 刀片结构参数优化

3.1 仿真模型建立与环境配置

由于EDEM难以单独分析切割装置作业过程中产生的较为复杂的力学与动力学问题，需借助其他动力学软件。多体系统动力软件RecurDyn与EDEM有较成熟的耦合通道，且EDEM-RecurDyn的耦合仿真分析广泛运用于农业机械领域的运动分析[25]，因此利用EDEM和RecurDyn软件开展耦合仿真来模拟杂交构树切割装置的作业过程。为减少仿真时间，将切割装置模型进行简化，简化后杂交构树切割装置耦合仿真模型如图14所示。

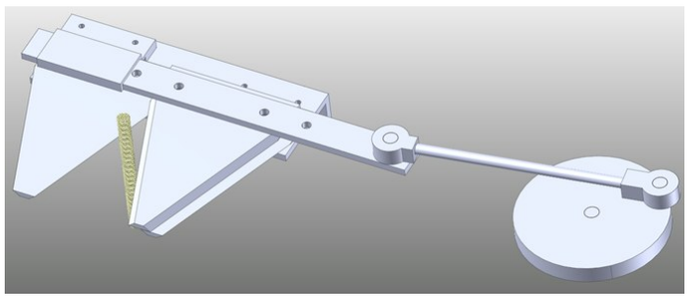


图14 切割装置耦合仿真模型

Fig.14 Coupled simplified simulation model of the cutting device

通过solidworks2024软件对切割装置进行三维建模与装配，之后将杂交构树切割装置转换为.stp格式文件导入RecurDyn中，保持Soildworks与RecurDyn使用统一的长度、质量和时间单位，并且在RecurDyn中对各个零部件添加约束。参考相关文献[26]，设置切割速度为0.9 mm/s，刀速比为1.25，即设置曲柄转速为37 r/s、切割装置前进速度为0.72 mm/s。在RecurDyn的External SPI模块中将耦合仿真模型以.wall文件格式导入EDEM软件的前处理模块，设置EDEM和RecurDyn软件同为整数倍仿真时间步长。进入RecurDyn分析模块，设置Maximum time step为1×10^{-3}，Initial time step为7×10^{-7}；在EDEM相应的仿真时间为0.1s，离散元仿真时间步长为7×10^{-7}。

在进行耦合仿真试验之前，需设置在EDEM设置0时刻的初始工况。在EDEM中通过元颗粒建立杂交构树茎秆双层离散元仿真模型，模型茎秆长度为80 mm，直径为7 mm，为保证茎秆底端约束，将茎秆底部一层木质部颗粒和韧皮部颗粒分别固定速度(fixed velocity)。设置颗粒工厂为圆柱体，生成颗粒数为1，生成坐标方式为cubic，仿真时间为0.02 s。仿真完毕后导出simulation deck文件，设置为simulation time为0 s。

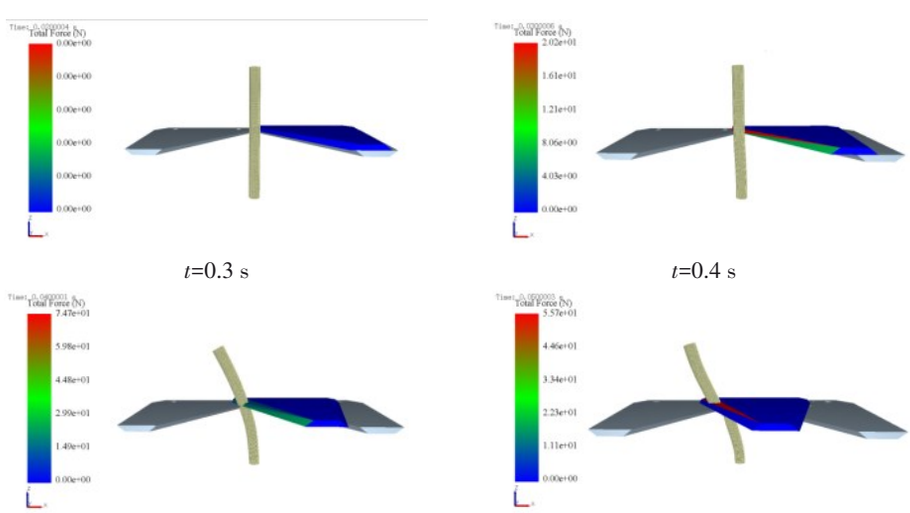


图15 切割过程中不同时刻t的状态

Fig.15 State at different times t during the cutting process

以切割刀片的切割角 20°、刀刃角 40°、刀片厚度 3 mm 的模型为例,切割过程不同时刻状态变化如图 15 所示。t=0.3 s 时,动刀片未接触茎秆,动刀片受力为 0;t=0.5 s 时,动刀片接触茎秆,动刀受力增加;t=0.5 s,两刀片刃口夹紧茎秆开始剪切,动刀片受到剪切力达到最大 62.9 N;t=0.6 s,茎秆被切断,剪切完成。

3.2　切割刀优化试验设计

参考切割装置优化设计相关文献[27],滑切角 θ、刀刃角 β、刀片厚度 h 对往复式切割装置工作性能有影响。为得到最优的切割刀结构参数,以滑切角、刀刃角、刀片厚度为试验因素,以最大剪切力为评价指标开展了三因素三水平的 Box-Behnken 试验。因素编码如表 11 所示,滑切角、刀刃角、刀片厚度取值范围见表 11。

通过 Design-Expert13.0 软件对表 12 的试验结果进行二次多项式回归拟合,得到各影响因素与最大切割力的回归方程为:

$$y = 53 - 5.79X_6 + 5.34X_7 + 5.57X_8 + 3.38X_6X_7 + 0.94X_6X_8 + 13.1X_7X_8 + 17.51X_6^2 + 19.82X_7^2 + 5.08X_8^2 \quad ⑭$$

回归方程方差分析如表 13 所示,杂交构树茎秆剪切力的二次回归模型 P<0.001,表明该试验模型是极显著的;滑切角 θ、刀刃角 β、刀片厚度 h、θh、θ^2、β^2、h^2 的 P 值均小于 0.01,因素极显著,其余项 $\theta\beta$、βh 的 P 值均大于 0.05,因素不显著。

表 11　试验因素水平编码表

Tab.11　Experimental factor level coding table

水平值 Level	因素 Factors		
	滑切角 θ/(°) Slip angle	刀刃角 β/(°) Blade angle	刀片厚度 h/mm Thick blade
1	20	30	2
0	30	40	3
−1	40	50	4

表 12　试验方案与结果

Tab.12　Test plan and results

序号 Serial number	因素 Factors			最大剪切力/N Maximum shear force
	X_6	X_7	X_8	
1	30	40	3	53.00
2	30	50	4	96.60
3	30	50	2	62.60
4	40	50	3	94.40
5	40	30	3	67.31
6	20	40	4	87.00
7	30	30	4	65.20
8	30	40	3	53.00
9	30	40	3	53.00
10	30	30	2	83.60
11	20	40	2	74.70
12	40	40	2	62.30
13	40	40	4	78.66
14	30	40	3	53.00
15	20	50	3	100.60
16	20	30	3	91.00
17	30	40	3	53.00

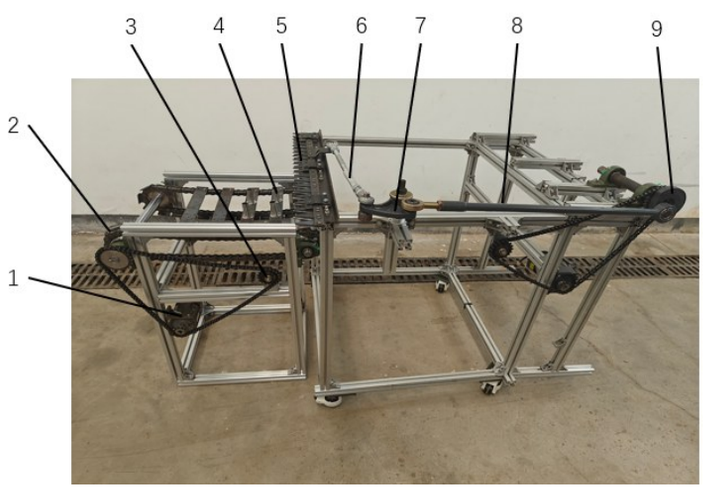
表 13 响应曲面试验方差分析

Tab.13 Analysis of variance for response surface test

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	4 646.32	9	327.15	235.54	<0.000 1
θ	268.42	1	2 439.51	1 756.40	<0.000 1
β	227.91	1	24.15	17.39	0.004 2
h	248.20	1	394.81	284.25	<0.000 1
$\theta\beta$	45.56	1	26.01	18.73	0.003 4
θh	3.53	1	24.50	17.64	0.004 0
βh	686.44	1	3.06	2.20	0.181 1
θ^2	1 290.58	1	17.27	12.43	0.009 7
β^2	1 506.83	1	5.33	3.84	0.091 0
h^2	108.77	1	6.58	4.74	0.006 0
残差 Residual	85.99	7	12.28		
失拟项 Lack of fit	85.99	3	28.66		
纯误差 Pure error	<0.000 1	4	0		
总和 Sum	4 732.31	16			

3.3 切割刀参数优化结果分析验证

2025 年 10 月 10 日，在湖南农业大学汽车实训中心进行了杂交构树茎秆切割试验台的搭建。切割试验台的加工制造包括机架的搭建、往复式切割器、曲柄座、摇臂、球头连杆、摆杆的布置和输送机构的组装等工作，杂交构树茎秆切割装置试验台架如图 16 所示。



1：传动电机；2：弯板链；3：张紧轮；4：夹具；5：割刀；6：球头连杆；7：摇臂；8：摆杆；9：曲柄座。

1：Drive motor；2：Curved plate chain；3：Tension pulley；4：Fixture；5：Cutter；6：Ball joint connecting rod；7：Rocker arm；8：Swing rod；9：Crank seat.

图 16 杂交构树切割装置试验台架

Fig.16 Test bench for hybrid paper mulberry cutting device

运用 Design-Expert13.0 软件对该回归方程式⑭进行求解，以求出最小剪切力为目标，方程约束条件为：

$$\begin{cases} \min y \\ \text{s.t} \begin{cases} 20^{\circ} < \theta < 30.5^{\circ} \\ 30^{\circ} < \beta < 50^{\circ} \\ 2\ \text{mm} < h < 4\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \quad ⑮$$

得到刀片结构参数最优组合为滑切角为 28.57°，刀刃角为 41.11°，刀厚为 2.34 mm，回归方程预测的最大剪切力为 52.62 N。将最优参数组合进行 DEM-MBD 耦合仿真试验验证，得到最大剪切力 52.17 N，与回归方程预测的最大剪切力相对误差值为 0.86%。

4　结　论

以杂交构树茎秆为研究对象,基于前期研究的接触参数,标定了杂交构树茎秆黏结参数。通过物理试验测得杂交构树中部茎秆平均最大剪切力为65.86 N。根据三轴空间坐标法,利用EDEM仿真软件Hertz-Mindlin with Bonding接触模型,构建了茎秆双层黏结模型。黏结参数最优参数组合为单位面积法向刚度X_1为2.705×10^{10}、单位面积切向刚度X_2为2.24×10^{9}、黏结半径X_5为1.206,最优参数组合条件下仿真最大剪切力与实测最大剪切力平均值相对误差为1.97%。

设计并搭建了一款杂交构树切割装置,阐述了该切割装置的工作原理。通过对切割装置的工作过程分析及切割刀片受力分析,确定了切割刀片的结构参数取值范围。

通过DEM-MBD耦合仿真方法,采用响应曲面试验得出切割刀片结构参数最优组合:滑切角为28.57°、刀刃角为41.11°、刀厚为2.34 mm。最优参数下仿真试验结果与回归方程预测的最大剪切力相对误差值为0.86%,切割刀片结构参数优化可以用于后续的杂交构树收获设备研发。

致谢:2025年湖南省研究生科研创新项目(CX20251076)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

[1] 宫斌,檀论,侯坤,等.杂交构树青贮对奶公牛生长性能、营养物质表观消化率和瘤胃发酵参数的影响[J].动物营养学报,2023,35(6):3771-3779.
Gong B,Tan L,Hou K,et al.Effects of hybrid *Broussonetia papyrifera* silage on growth performance,nutrient apparent digestibility and rumen fermentation parameters of fattening dairy bulls[J].Journal of Animal Nutrition,2023,35(6):3771-3779.

[2] 沈世华.中国杂交构树产业发展蓝皮书(2023)[M].北京:研究出版社,2024:54-55.
Shen S H.Blue book on the development of China's hybrid *Broussonetia papyrifera* industry(2023)[M].BeiJing:Research Press,2024:54-55.

[3] 耿端阳,纪晓琦,牟孝栋,等.构树收获割台设计与试验[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(7):2152-2164.
Geng D Y,Ji X Q,Mou X D,et al,Design and experiment of harvesting and cutting table of *Broussonetia papyrifera*[J].Journal of Jilin University (Engineering Edition),2023,53(7):2152-2164.

[4] 陈月锋,宋占华,刘天宏,等.自走式杂交构树收割机设计及试验[J].农业工程,2023,13(7):89-96.
Chen Y F,Song Z H,Liu T H,et al.Design and test of self-propelled hybrid *Broussonetia papyrifera* harvester [J].Agricultural Engineering,2023,13(7):89-96.

[5] 王涛.野菊花茎秆切割器设计及试验研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2023:2-3.
Wang T.Design and experimental study of stem cutter for wild chrysanthemum[D].Xianyang:Northwest A & F University,2023:2-3.

[6] 孙思宇.花椒枝切割性能仿真与试验[D].重庆:西南大学,2023:3-4.
Sun S Y.Simulation and experiments on the cutting performance of prickly ash branches[D].Chongqing:Southwest University,2023:3-4.

[7] 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.
Zhang Z G,Xu H W,Xue H T,et al.Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem [J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):61-70.

[8] 谢伟,彭磊,蒋蘋,等.收获期油菜薹茎秆双层黏结离散元模型建立与优化[J].农业机械学报,2023,54(5):112-120.
Xie W,Peng L,Jiang P,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.

[9] 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 R J,Dai F,Zhao W Y,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.

[10] 金诚谦,刘岗微,倪有亮,等.基于MBD-DEM耦合的联合收获机割台仿形机构设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(2):1-10.

Jin C Q, Liu G W, Ni Y L, et al.Design and experiment of header profiling mechanism for combine harvester based on MBD-DEM coupling[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 1-10.

[11] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 丘陵山地胡麻联合收获机复式清选系统仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 93-102.
Shi R J, Dai F, Zhao W Y, et al.Simulation optimization and experiment on compound cleaning system of hilly area flax combine harvester [J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 93-102.

[12] 张智泓, 赵亮亮, 赖庆辉, 等. 基于DEM-MBD耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 10-20.
Zhang Z H, Zhao L L, Lai Q H, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15): 10-20.

[13] 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 Z W, Ma X, Cao X L, 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.

[14] 吴昆, 宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 1-20.
Wu K, Song Y P.Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1-20.

[15] 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 Z, LI D H, LI X P, 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.

[16] Zhang J, Wang J, Du D D, et al.Optimization and validation of root-cutting device for Chinese cabbage harvester basedon discrete element method[J].Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108314.

[17] 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 Y H, Zhong M S, Tang Y M, 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.

[18] 魏松, 张驰海, 詹振宇, 等. 基于DEM-MBD耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 275-289.
Wei S, Zhang C H, Zhan Z Y, et al.Simulation and optimization test of imitation furrowing process of cotton direct seeding machine based on DEM-MBD coupling[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 275-289.

[19] 于英杰, 李沛航, 赖庆辉, 等. 基于DEM-MBD耦合的咖啡采摘过程仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊2): 157-167.
Yu Y J, Li P H, Lai Q H, et al.Simulation and experiment of coffea picking process based on DEM-MBD coupling[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Sup2): 157-167.

[20] Peng C W, Chen J W, He X, et al.Discrete element modeling and verification of the simulation parameters for chopped hybrid *Broussonetia papyrifera* stems[J].International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(1): 23-32.

[21] 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 H, Guo L H, Li H F, et al.Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters for rapeseed stems during the suitable harvest period[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(24): 20-29.

[22] 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 Y T, Liao Q X, Zhou Y, 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.

[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.
Zhang J X, Zhang P, Zhang H, et al.Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76-84.

[24] 沈成,陈巧敏,李显旺,等.双动刀苎麻茎秆切割试验台设计与试验[J].中国农机化学报,2013,34(5):114-118.
Shen C,Chen Q M,Li X W,et.al.Design and experiment on double-knife ramie stalk cutting test bench[J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2013,34(5):114-118.
[25] 成磊.自走式设施番茄茎秆粉碎集袋机的设计与试验[D].北京:中国农业科学院,2024:48-49.
Cheng L.Design and experiment of self-propelled tomato stalks combined bagging machine in plastic-shed[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2024:48-49.
[26] 宋占华,宋华鲁,闫银发,等.棉花秸秆往复式切割器动刀片优化设计[J].农业工程学报,2016,32(6):42-49.
Song Z H,Song H L,Yan Y F,et al.Optimization design on knife section of reciprocating cutter bars for harvesting cotton stalk [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(6):42-49.
[27] 刘嘉明.油用牡丹茎秆剪切特性及切割机理研究[D].北京:北京林业大学,2021:20-25.
Liu J M.Research on oil tree peony stem cutting properties and mechanism[D].Beijing:Beijing Forestry University,2021:20-25.

(责任编辑:刘俊峰)



第一作者简介:陈俊伟,硕士研究生,研究方向为农业机械化装备创新设计。研究生期间学业成绩优异,科研能力突出,曾获2024年硕士研究生国家奖学金、湖南省首届大学生节能减排大赛三等奖及2024年湖南农业大学优秀研究生荣誉称号。在科研实践方面,曾参与省级研究生创新项目《基于DEM-MBD耦合的杂交构树切割装置设计与优化》(编号:CX20251076),以导师第一作者、本人第二作者身份,获一项国家授权发明专利《一种黑水虻养殖选择性布料与幼虫收集装置和方法》(专利号:ZL202411817939.7),一项实审发明专利《一种黑水虻幼虫烘干分选装置和方法》(申请号:CN202411899435.4),并发表论文《Discrete element modeling and verification of simulation parameters for chopped hybrid broussonetia papyrifera stems》,展现了扎实的科研素养与创新能力。本人热衷于数据处理与实验设计优化,注重以创新思维驱动专业研究突破



通信作者简介:彭才望,副教授,博士后,主要从事智能农业装备、畜禽废弃物资源化处理等领域的研究工作。近3年来,主持省部级科研项目4项,获国家授权发明专利6项,以第一作者在核心期刊发表学术论文10余篇。在人才培养方面,指导学生获批国家级大学生创新训练计划项目1项、省级创新创业训练计划项目2项,并荣获省级学科竞赛一等奖2项、二等奖3项,以及国家级竞赛二等奖2项,展现了卓越的科研实力与教学指导能力。