

青贮玉米切叶蚁上颚仿生粉碎刀片设计与试验

张黎骅, 罗惠中, 周 杨, 邱清宇, 袁森林, 蔡金雄

(四川农业大学机电学院, 雅安 625000)

摘 要: 针对青贮玉米收获机粉碎刀片锋利度差、滑切性能弱等问题, 该研究以切叶蚁上颚为设计原型, 采用逆向工程技术提取并拟合其上颚滑切曲线, 并依据该曲线设计一种仿生刃口曲线。应用 EDEM 构建秸秆离散元模型进行仿真切割试验, 对比仿生刀片、斜刃刀片、直刃刀片在横切角 90° 、切削角 0° 参数条件下对秸秆的切割力变化过程, 并利用高速摄像机记录台架对比试验中秸秆切割变形过程, 结果表明秸秆切割变形过程可分为 3 个阶段: 挤压阶段、切割阶段及贯穿阶段。仿真试验中仿生刀片对秸秆的最大切割力相较斜刃刀片、直刃刀片分别降低 4.05%、6.09%, 台架对比试验中仿生刀片对秸秆的最大切割力相较斜刃刀片、直刃刀片分别降低 10.53%、12.82%, 仿生刀片在提高秸秆切面平整度和降低秸秆最大切割力方面均具有明显优势。以刀型、横切角、切削角为试验因素, 以秸秆的最大切割力为试验指标开展秸秆切割台架正交试验。试验结果表明: 刀型、横切角对秸秆的最大切割力有极显著影响 ($P<0.01$), 切削角对秸秆的最大切割力有显著影响 ($P<0.05$)。使用较优参数组合进行验证试验的结果表明, 横切角 90° 、切削角 20° 、仿生刀片对秸秆的最大切割力为 623.3 N。研究结果可为青贮玉米收获机粉碎刀片设计提供理论参考。

关键词: 仿真; 秸秆; 仿生; 切叶蚁; 青贮玉米; 粉碎刀片

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.12.006

中图分类号: S225.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-12-0048-09

张黎骅, 罗惠中, 周杨, 等. 青贮玉米切叶蚁上颚仿生粉碎刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 48-56.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.12.006 <http://www.tcsae.org>

Zhang Lihua, Luo Huizhong, Zhou Yang, et al. Design and test of bionic crushing blade based on the mandible of the leaf-cutter ant for harvesting silage maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(12): 48-56. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.12.006 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

青贮玉米是良好的粗饲料原材^[1], 被多个国家作为牲畜常备饲料。粉碎刀片是影响青贮玉米秸秆粉碎质量的关键因素。目前国内外学者主要通过参数匹配和加装籽粒破碎装置提高青贮收获机作业质量^[2-3], 鲜见关于粉碎刀片的相关研究。

仿生学作为一门交叉学科在农业机械研究领域应用逐渐深入, 对农机装备作业性能提升起到重要作用^[4]。研究人员通过分析蟋蟀、蝗虫等食草昆虫上颚几何形状, 提取其上颚切齿曲线设计仿生灭茬刀具, 并利用试验证明仿生灭茬刀具在减阻降耗方面具有显著优势^[5-6]。Jia 等^[7]分析蚱蜢门牙锯齿形状, 设计并制造一种仿生锯片显著降低玉米秸秆切割力和能耗; Du 等^[8]设计了 3 种用于茶树茎叶切割的仿蟋蟀切齿刀片, 通过力学切割试验确定了最佳仿生刀形; 田昆鹏等^[9]通过提取天牛上颚切齿曲线设计了一种齿状仿生刀片, 试验表明这种仿生刀片对大麻茎秆的最大切割力和切割功耗均有显著降低作用。王金武等^[10]分析了螳螂前肢几何形状并提取前肢外廓曲线设计了一种胡萝卜切顶锯盘齿廓曲线, 胡萝卜切割平整度均值可达 94.10%。Tong 等^[11]分析发现竹象幼虫上颚曲线接

近标准圆弧, 根据分析结果设计了一种仿生蔬菜切碎刀片, 试验表明仿生粉碎装置在切割蔬菜时具有显著降耗增效作用。综上所述, 分析食草昆虫上颚或其他动物觅食器官几何特征设计仿生切割器已经成为农业机械工作部件性能提升的有效途径。

滑切是一种重要的切割方式^[12-13]。蟋蟀、蝗虫及天牛等昆虫主要依靠上颚剪切作用切割植物茎叶, 上颚对植物茎叶施加横向剪切力, 以剪切昆虫为原型设计的仿生刀片的滑切作用较弱^[14-16]。切叶蚁是一种依靠上颚滑切植物叶片的昆虫, 本文以切叶蚁工蚁上颚为研究对象, 分析其切叶原理并运用逆向工程技术设计一种青贮玉米秸秆仿生粉碎刀片, 利用仿真试验与台架对比试验分析不同刀片对秸秆的切割过程, 并通过分析最大切割力与秸秆切面平整度比较刀片切割性能, 最后通过正交试验探究影响试验刀片最大切割力的关键因素。

1 仿生粉碎刀片设计

1.1 切叶蚁切叶原理分析

顶切叶蚁 (*Acromyrmex*) 属昆虫纲、膜翅目、蚁科, 通过切割并采集新鲜植物叶片、花瓣或其他组织培养共生真菌^[17]。本文以切叶蚁工蚁成虫 (简称“切叶蚁”) 为研究对象, 其上颚几何特征分析路线如图 1 所示。切叶蚁具有良好切叶能力, 依靠上颚滑切作用与振动作用^[18-19]能高效切割植物茎叶。

收稿日期: 2022-04-06 修订日期: 2022-06-14

基金项目: 国家玉米产业体系专项资金资助项目 (CARS-02)

作者简介: 张黎骅, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为玉米全程机械化装备。Email: zhanglihua69@126.com

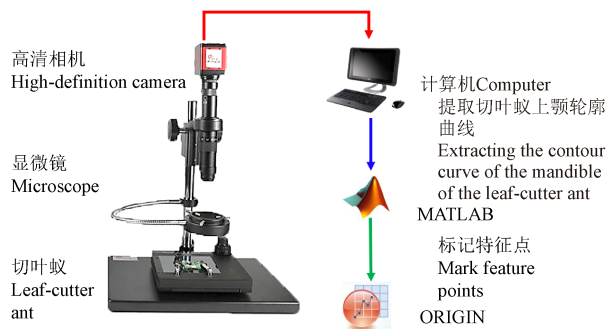


图 1 切叶蚁上颚分析路线

Fig.1 Analysis route of the mandible of the leaf-cutter ant

切叶蚁样本取自实验室培养的切叶蚁族群，对 20 只切叶蚁样本进行分析。利用电子显微镜（XK-H2000ST 型，放大倍数为 14~600）将切叶蚁上颚放大 50 倍后观察上颚表面几何特征，如图 2a 所示。切叶蚁通常以左上颚滑切叶片，忽略切叶蚁个体差异，左上颚细节如图 2b 所示。切叶蚁上颚以一定曲度向内弯曲，刃口呈弧形齿状结构。观察发现切叶蚁上颚中部（连续 2~3 齿）切齿磨损最为严重，其次是顶部切齿，切齿总数为 9~10 齿。

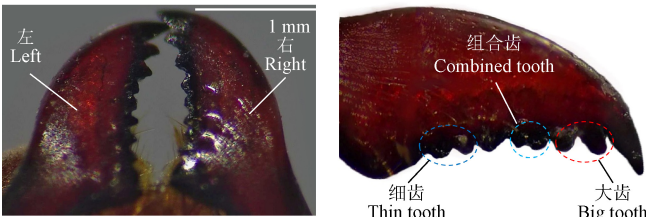


Fig.2 Structure of the mandible of the leaf-cutter ant

切叶蚁以右上颚为支撑，左上颚由下往上滑切叶片，同时身体带动上颚绕 x 轴往复摆动以提高切割效率，叶片从上颚根部滑切至顶部，最终被切割为圆弧形。切叶蚁上颚切叶运动空间位置变换如图 3 所示。

1.2 拟合上颚边缘轮廓曲线

由于切叶蚁上颚绕 y 轴转动时，上颚与被切物体接触位置在 xz 平面内未发生变化，因此将上颚投影到 xz 平面内，并运用逆向工程技术提取上颚边缘轮廓曲线。通过 MATLAB 高斯滤波命令对图 2b 所示切叶蚁上颚图像进行降噪处理，并使用 Sobel 边缘检测算法提取得到完整清晰的切叶蚁上颚边缘轮廓曲线，利用 AutoCAD 软件标记切叶蚁上颚切齿趋势线和切齿滑切线，如图 4a 所示。由图 4a 可以看出切叶蚁上颚切齿滑切方向均是由上颚根部指向顶部，并且切齿趋势线曲率逐渐增大，被切物体沿

上颚切齿滑切线进行滑切。

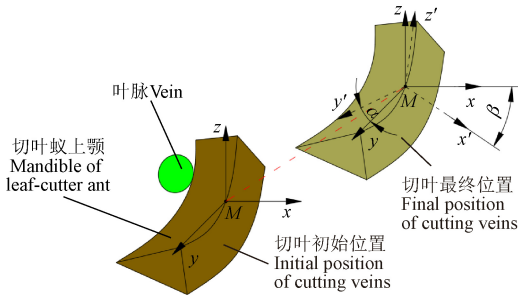


图 3 切叶蚁上颚切叶运动空间位置变化

Fig.3 Spatial position changes of leaf-cutting movement in the mandible of leaf-cutter ant

利用 OriginPro 软件 Digitizer 工具箱为图 4a 上颚轮廓曲线添加 x 轴和 y 轴。根据前期研究，川单甜 3 号秸秆最大直径为 23 mm，为使粉碎刀片切割单根秸秆时，秸秆与刀片接触位置位于上颚中部组合齿处，将 x 轴坐标限定最大值为 60 mm、 y 轴坐标限定最大值为 10 mm。被切物体沿滑切线切割时，上颚切齿顶部趋势线与滑切线交点为滑切顶点，是被切物体与切叶蚁上颚各接触位置的关键点。因此将上颚切齿滑切顶点确定为滑切特征点，并选取 10 个主要特征点如图 4b 所示。

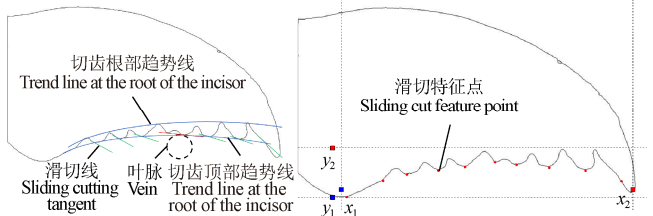


图 4 切叶蚁上颚边缘轮廓曲线及特征点

Fig.4 The contour curve and feature points of the mandible edge of the leaf-cutter ant

所选取的上颚边缘轮廓主要特征点坐标如表 1 所示。通过拟合上颚特征点得到切叶蚁上颚滑切曲线，从而获得仿生刀片切割秸秆时的滑切轨迹，提高切割效率。

表 1 切叶蚁上颚边缘轮廓主要特征点坐标

坐标 Coordinates/mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	1.161 6	8.631 8	13.523 8	19.980 3	25.456 3	31.659 4	36.077 6	42.765 5	50.235 7	57.650 8
y	0.058 1	3.343 0	4.606 5	5.430 4	6.155 5	7.122 3	6.584 0	6.001 7	5.375 5	3.255 1

利用二次函数拟合主要特征点轨迹曲线，得到上颚滑切曲线拟合方程为

$$y = -0.006 1x^2 + 0.410 7x - 0.111 1 \quad (1)$$

刃口拟合曲线如图 5 所示，曲线拟合 R^2 为 0.982 1，拟合曲线接近切叶蚁上颚曲线。

根据滑切角定义^[20]可知，滑切角为秸秆滑切速度与刀片

法线间夹角。切叶蚁仿生刀片与秸秆滑切关系如图 6 所示。

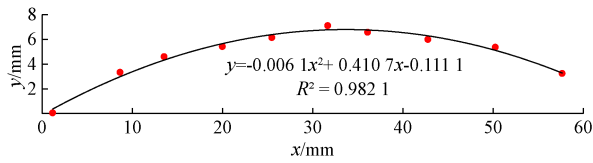
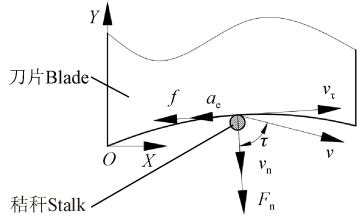


图 5 仿生刀片刃口拟合曲线
Fig.5 Edge fitting curve of bionic blade



注: v 为秸秆滑切速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_t 为秸秆在刃口曲线上的切向速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_n 为秸秆在刃口曲线上的法向速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; a_c 为秸秆加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; F_n 为秸秆所受正压力, N ; f 为切杆在刀刃上滑动产生的摩擦力, N ; τ 为仿生刀片滑切角, $(^\circ)$; XOY 为仿生刀片坐标系。
Note: v is the sliding cutting speed of stalk, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_t is the tangential speed of stalk on the cutting edge curve, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_n is the normal speed of stalk on the cutting edge curve, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; a_c is Stalk acceleration, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; F_n is the positive pressure on the stalk, N ; f is the frictional force generated by the cutting rod sliding on the blade, N ; τ is the bionic blade sliding angle, $(^\circ)$; XOY is the coordinate system of bionic blade.

图 6 仿生刀片滑切作用示意图

Fig.6 Schematic diagram of the sliding action of the bionic blade

表 2 仿生刀片刃口曲线坐标
Table 2 The edge curve coordinates of the bionic blade

坐标 Coordinates/mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54
y	-0.111 1	2.133 5	3.938 9	5.305 1	6.232 1	6.719 9	6.768 5	6.377 9	5.548 1	4.279 1

为充分对比不同刀形对秸秆最大切割力的影响,加工 3 种宽度为 54 mm、厚度为 2 mm 的试验刀片,试验刀片实物如图 7 所示。通过调研得知市场销量较好的 5 款地滚刀式青贮收获机的粉碎刀片安装倾角范围为 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。从刀片安装空间和切割性能方面综合考虑,斜刃刀片倾斜角度取较小值 10° 。

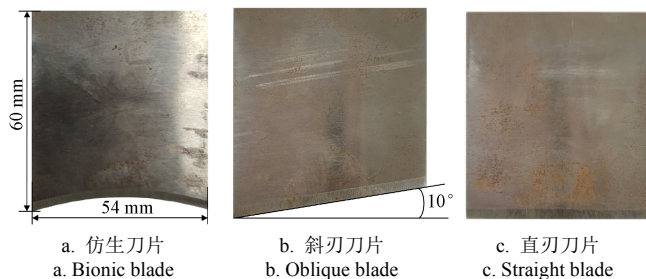


图 7 试验刀片实物图
Fig.7 Physical figure of test blade

图 7 所示 3 种刀片均为 SKD11 材料,刀片刃口进行淬火、回火热处理以保证刀片锋利度和强度。

2 EDEM 仿真试验与分析

EDEM 秸秆离散元分析模型在旋耕机仿真试验、参数标定试验、青贮玉米破碎试验等研究中均具有较高可靠性^[22-23]。粘结模型 (Hertz-Mindlin with bonding 模型) 主要适用于模拟分析固体材料变形、破碎及断裂等问题^[24],

根据图 6 几何关系有:

$$\begin{cases} f = \xi F_n \\ \cos \tau = \frac{F_n}{v} \\ a_c = \frac{f}{m} \end{cases} \quad (2)$$

式中 ξ 为秸秆与仿生刀片间摩擦系数; m 为秸秆质量, kg 。

仿生刀片滑切角与秸秆接触刀片刃口的初速度矢量方向有关。根据秸秆输送装置出料口结构设计参数可知秸秆接触刀片角度为 30° , 即仿生刀片滑切角 τ 初始值为 30° 且大于秸秆动态外摩擦角 25.66° ^[21]。同时随着秸秆在刀刃上滑切, 滑切角将逐渐增大, 有利于提高秸秆粉碎效率, 满足秸秆粉碎要求。

1.3 粉碎刀片参数设计

通过分析玉米秸秆生理特性参数, 可知秸秆在不同切割角度时切割阻力差异较大。结合青贮玉米粉碎刀片作业工况, 并使仿生刀片切割秸秆时与秸秆接触位置位于刃口曲线中段, 因此粉碎刀片宽度设计为 54 mm。为确保仿生刀片刃口曲线能完整拟合切叶蚁上颚滑切曲线, 等间距选取 10 个 x 坐标值并带入刃口曲线方程得到 10 个坐标点, 具体值见表 2。

该模型由小颗粒粘结而成, 颗粒间具有粘结力, 形成稳定的固体结构, 材料属性与接触参数是影响颗粒粘结力大小的关键因素。

2.1 EDEM 仿真模型

分析川单甜 3 号玉米秸秆截面特征发现, 秸秆由髓芯和表皮 2 部分组成, 且 2 部分材料属性具有较大差异, 秸秆表皮在密度与强度方面均大于秸秆髓芯。测量 30 株川单甜 3 号玉米植株生理参数, 得到秸秆平均直径为 20 mm、表皮平均厚度为 1 mm、髓芯平均直径为 18 mm。

利用 SolidWorks 绘图软件建立秸秆表皮模型和秸秆髓芯模型, 将秸秆髓芯和表皮装配体导入 EDEM 软件。采用 Hertz-Mindlin with bonding 模型, 并通过小直径球形颗粒填充秸秆模型有效减小颗粒孔隙率、提高分析模型可靠性。秸秆髓芯填充颗粒半径为 0.6 mm, 表皮填充颗粒半径为 0.3 mm。

根据前期秸秆剪切试验, 并参考文献 [25-27], 确定离散元分析模型材料参数及接触参数如表 3 所示, 颗粒粘结参数如表 4 所示。

利用 EDEM 软件生成总长为 50 mm、直径为 20 mm 的秸秆离散元分析模型, 如图 8 所示。秸秆表皮填充颗粒数为 11 519 个, 秸秆髓芯填充颗粒数为 8 127 个, 粘结键生成总数为 102 658 个, 粘结键失效数为 1 138 个。秸秆表皮颗粒之间、表皮颗粒与髓芯颗粒之间、髓芯颗粒之间均生成了粘结键, 粘结键有效率为 98.9%, 因此秸秆离散元分析模型较为符合玉米秸秆实际力学模型。

表 3 EDEM 仿真模型材料参数
Table 3 EDEM simulation model material parameters

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
秸秆髓芯 Stalk core	泊松比	0.4
	密度/(kg·m ⁻³)	0.53×10 ³
	剪切模量/Pa	1×10 ⁸
秸秆表皮 Stalk epidermis	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	1.17×10 ³
	剪切模量/Pa	4.8×10 ⁸
刀片 Blade	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	7.85×10 ³
	剪切模量/Pa	7.8×10 ¹⁰
髓芯-髓芯 Core-Core	碰撞恢复系数	0.165
	静摩擦系数	0.652
	动摩擦系数	0.075
髓芯-表皮 Core-Epidermis	碰撞恢复系数	0.702
	静摩擦系数	0.604
	动摩擦系数	0.070
表皮-表皮 Epidermis-Epidermis	碰撞恢复系数	0.485
	静摩擦系数	0.203
	动摩擦系数	0.098
髓芯-刀片 Core-Blade	碰撞恢复系数	0.382
	静摩擦系数	0.434
	动摩擦系数	0.053
表皮-SKD11 Epidermis-SKD11	碰撞恢复系数	0.603
	静摩擦系数	0.324
	动摩擦系数	0.108

表 4 EDEM 仿真模型颗粒粘结参数
Table 4 EDEM simulation model particle bonding parameters

粘结参数 Bonding parameters	髓芯颗粒- 髓芯颗粒 Core granules- core granules	髓芯颗粒-表 皮颗粒 Core granules- epidermal granules	表皮颗粒-表皮颗粒 Epidermal granules- epidermal granules
法向刚度 Normal stiffness/(N·m ⁻¹)	2.36×10 ⁷	8.15×10 ⁷	9.51×10 ⁸
切向刚度 Shear stiffness/(N·m ⁻¹)	1.15×10 ⁷	7.22×10 ⁷	7.62×10 ⁸
临界法向应力 Critical normal stress/Pa	5.56×10 ⁴	1.04×10 ⁵	1.54×10 ⁴
临界切向应力 Critical shear stress/Pa	3.78×10 ⁴	7.17×10 ⁴	8.27×10 ⁴
粘结半径 Bond disk radius/mm	0.65	0.8	0.35

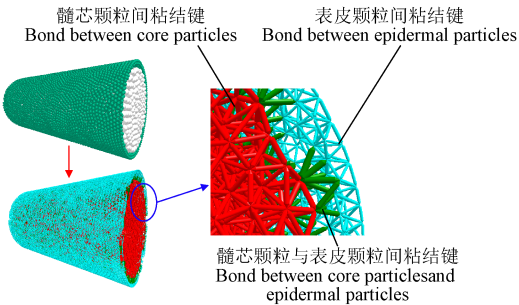


图 8 玉米秸秆离散元分析模型
Fig.8 Discrete element model of corn stalk

2.2 仿真参数设置

利用 SolidWorks 绘图软件建立秸秆切割夹具及 3 种刀片三维模型后导入 EDEM 软件。将试验刀片及夹具材料设置为 SKD11 材料。为直观对比 3 种刀片在相同参数设置下切割性能优劣，以粘结键断裂数量及秸秆最大切割力为切割性能评价指标。

为使刀片能够将秸秆完全切断，设置刀片与秸秆距离为 1 mm，刀片下落速度为 0.011 m/s，运动时间为 2 s，刀片横切角为 90°、切削角为 0°。3 种刀片仿真试验模型如图 9 所示。

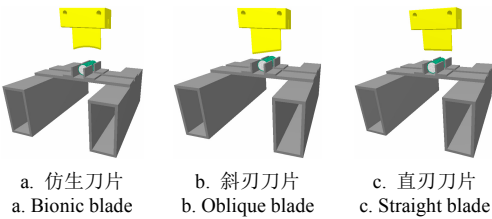


图 9 3 种刀片仿真试验模型
Fig.9 Simulation test model of 3 kinds of blades

仿真试验重复 3 次以减小试验误差，仿真运行步长为 3.125×10⁻⁷ s，网格大小为 1.2 mm，其他仿真参数为默认设置。

2.3 仿真结果与分析

通过 EDEM 软件后处理功能输出试验刀片产生的切割力，得到 3 种刀片的切割力变化曲线如图 10a 所示。与仿真试验设置相同试验参数进行台架对比试验，并利用高速摄像机记录秸秆切割过程，利用 MaxTest 软件输出得到 3 种试验刀片切割力变化曲线如图 10b 所示。3 种刀片产生的最大切割力及造成的粘结键断裂数量见表 5。

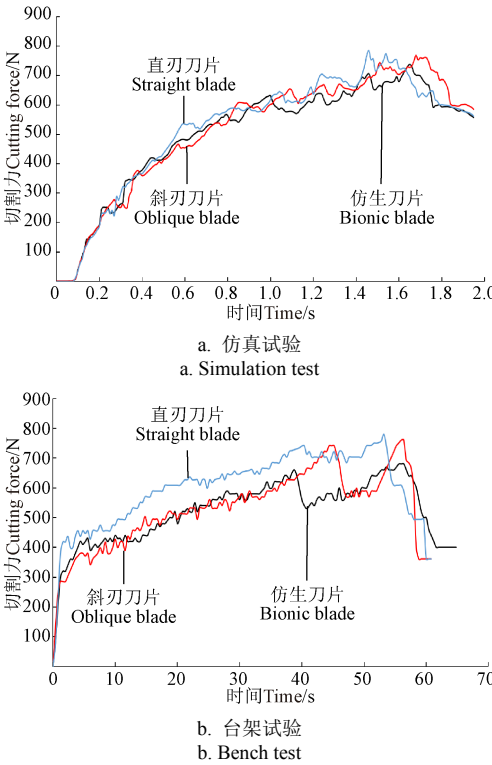


图 10 不同类型刀片切割力-时间曲线图
Fig.10 Cutting force-time curves of different types of blades

根据仿真试验结果可知，仿生刀片对秸秆的最大切割力相较斜刃刀片、直刃刀片分别降低 4.05%、6.09%，造成的粘结键断裂数量相较斜刃刀片、直刃刀片分别降低 9.75%、5.49%。根据台架对比试验结果可知仿生刀片对秸秆的最大切割力相较斜刃刀片、直刃刀片分别降低 10.53%、12.82%。仿真试验与台架对比试验中仿生刀片、斜刃刀片、直刃刀片

对秸秆的最大切割力误差分别为 7.78%、1.11%、0.66%。

表 5 仿真试验与台架试验结果对比

刀型 Blade type	仿生刀片 Bionic blade	斜刃刀片 Oblique blade	直刃刀片 Straight blade
仿真试验最大切割力 Maximum cutting force for simulation test /N	737.4	768.5	785.2
台架对比试验最大切割力 Maximum cutting force for bench comparison test/N	680.0	760.0	780.0
粘结键断裂数量 Number of broken bonds	25 201	27 923	26 666

由图 10 可知 3 种刀片的秸秆切割过程均分为 3 个阶段：挤压阶段、切割阶段及贯穿阶段。挤压阶段表现为刀片持续压缩秸秆表皮，切割力急剧增大，该阶段直至刀片下压作用超过秸秆表皮强度造成表皮破裂，切割力出现第一个峰值，之后切割力出现小幅下降；切割阶段表现为刀片持续切割秸秆过程，该阶段切割力保持增长，在切断秸秆瞬间出现最大值，之后切割力会急剧下降；贯穿阶段表现为秸秆切割力急剧下降至趋于稳定状态，此时刀片与秸秆间仅有摩擦作用。

秸秆在不同切割阶段，其组织结构破坏趋势均是由外向内扩散。刀片将表皮颗粒间粘结键破坏后才会引起表皮与髓芯颗粒间粘结键、髓芯颗粒间粘结键断裂。3 种试验刀片造成的秸秆颗粒间粘结键断裂情况及秸秆受力变形情况如表 6 所示。

由表 6 可知，当表皮颗粒间粘结键发生断裂，试验刀片刚接触到髓芯颗粒与表皮颗粒间粘结键时，3 种刀片对秸秆表皮的压缩角 θ 大小依次为：直刃刀片>斜刃刀片>仿生刀片；此时 3 种刀片产生的挤压面积大小依次为：直刃刀片>斜刃刀片>仿生刀片。仿生刀片以一个较小压力角接触到秸秆表面，对秸秆产生的挤压面积较小，随着刀片向下移动，刀片滑切角持续增大，秸秆切割效率逐渐提升。斜刃刀片与直刃刀片在整个切割过程中滑切角为固定值，不利于提高秸秆切割效率，同时会增大切割功耗。

由于 3 种刀片的切割力大小与作用方式不同，导致刀片产生的秸秆切面具有明显区别，3 种刀片所切秸秆切面如表 7 所示。通过秸秆切面可知，仿生刀片产生的秸秆切面光滑，仅造成秸秆轻微破裂；斜刃刀片产生的秸秆切面较为光滑，但是造成了秸秆局部破裂；直刃刀片产生的秸秆切面毛刺较多，并导致秸秆被严重挤压破裂。

表 6 不同类型刀片秸秆切割过程对比

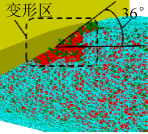
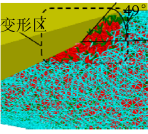
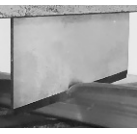
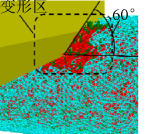
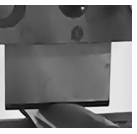
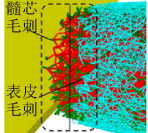
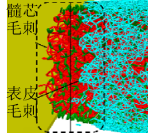
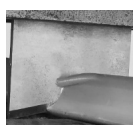
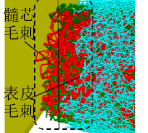
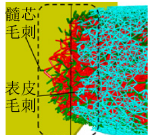
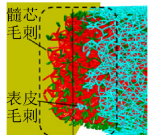
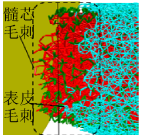
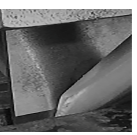
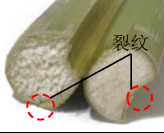
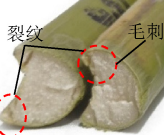
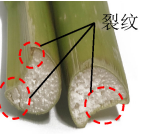
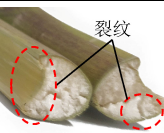
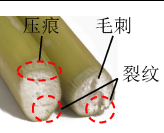
切割过程 Cutting process	仿生刀片 Bionic blade		斜刃刀片 Oblique blade		直刃刀片 Straight blade	
	仿真试验 Simulation test	台架试验 Bench test	仿真试验 Simulation test	台架试验 Bench test	仿真试验 Simulation test	台架试验 Bench test
挤压阶段 Extrusion stage						
切割阶段 Cutting stage						
贯穿阶段 Through stage						

表 7 不同类型刀片形成的秸秆切面

刀型 Blade type	秸秆切面 Stalk section	
	结穗节秸秆 Stalk of ear node	结穗节下端秸秆 Stalk below the ear node
仿生刀片 Bionic blade		
斜刃刀片 Oblique blade		
直刃刀片 Straight blade		

3 台架试验

3.1 试验设备与试验材料

为进一步验证试验刀片切割性能并探究影响切割性能的关键因素，2021 年 8 月在四川农业大学力学实验室进行秸秆切割台架试验（如图 11）。玉米秸秆切割试验台架由试验刀片、刀片夹具、秸秆夹具及万能试验机等组成，如图 12 所示。试验材料为雅安市广泛种植的川单甜 3 号玉米秸秆，试验所取秸秆材料为结穗节及其下端 3 节秸秆，秸秆直径大小基本一致，平均直径 20 mm，平均含水率 78.9%，平均单节长度 130 mm。试验在秸秆样本采集完成后 12 h 内进行。

3.2 试验设计与方法

3.2.1 试验设计

秸秆横切角为秸秆纤维轴线与刀片平面之间的夹

角，通过改变秸秆夹板位置调节秸秆横切角大小。本文利用横切角探究切叶蚁上颚以不同偏转角度切割物体时切割效率的变化规律。根据前期试验研究确定横切角试验范围为 $80^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 。



1.玉米秸秆 2.试验刀片 3.WEW-600D 型万能试验机 4.刀片夹具 5.秸秆夹具
1.Corn stalk 2.Test blade 3.WEW-600D universal testing machine 4.Blade clamp 5.Stalk clamp

图 11 试验台架
Fig.11 Test bench

秸秆切削角为秸秆纤维法线与刀片平面之间的夹角^[28]，通过改变秸秆夹具垫板角度调节秸秆切削角。切削角主要影响刀片有效切割力大小，并直接影响刀片与秸秆作用时间长短。通过前期试验研究确定切削角试验范围为 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。

3.2.2 试验方法

试验时利用刀片夹具将试验刀片固定在万能试验机加载头上，万能试验机带动试验刀片向下运动，刀片运动速度设置为 30 mm/min 。

以刀片对秸秆的最大切割力作为秸秆切割试验指标。通过 MaxTest 软件输出秸秆切割力变化曲线，并记录每组秸秆切割试验最大切割力。

3.3 正交试验

3.3.1 试验因素与水平

根据前期预试验结果，确定影响秸秆最大切割力的试验因素与水平，如表 8 所示。每组试验前将万能试验机压力清 0，每组试验重复 3 次，记录秸秆切割力最大值，结果取平均值。

表 8 试验因素与水平 Table 8 Test factors and levels			
水平 Level	刀型 Blade type	横切角 Cross-cutting angle/($^{\circ}$)	切削角 Stalk cutting angle/($^{\circ}$)
1	直刀刀片	80	0
2	斜刀刀片	90	20
3	仿生刀片	100	40

3.3.2 结果与分析

选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行三因素三水平正交试验，试验方案与结果如表 9 所示。

秸秆最大切割力越小，表明试验刀片切割性能越好。根据极差分析结果，影响秸秆最大切割力的因素主次顺序为 $A>B>C$ ，较优组合为 $A_3B_2C_2$ 。

利用方差分析排除试验误差的影响，同时判断试验因素的显著性水平，利用 SPSS26.0 软件对试验结果进行方差分析如表 10 所示。

表 9 正交试验方案与结果 Table 9 Orthogonal test design and results					
序号 No.	A	B	C	D(空列)	最大切割力 Maximum cutting force/N
1	1	1	1	1	836.7
2	1	2	2	2	740.0
3	1	3	3	3	793.3
4	2	1	2	3	770.0
5	2	2	3	1	733.3
6	2	3	1	2	750.0
7	3	1	3	2	740.0
8	3	2	1	3	653.3
9	3	3	2	1	640.0
k_1	790.0	782.2	746.7	736.7	
k_2	751.1	708.9	716.7	743.3	
k_3	677.8	727.8	755.5	738.9	
R	112.2	73.4	38.9	6.7	
主次顺序 Order				$A>B>C$	
较优组合 Optimal combination				$A_3B_2C_2$	

注：A、B、C 分别为刀型、横切角、切削角的水平值。
Note: A, B, C is the level value of the blade type, cross-cutting angle, stalk cutting angle.

表 10 正交试验方差分析表 Table 10 Analysis of variance of orthogonal test						
来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Meansquare	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significant
A	19 487.309	2	9 743.654	281.464	.004	**
B	8 706.496	2	4 353.248	125.752	.008	**
C	2 489.236	2	1 244.618	35.953	.027	*
误差 Error	69.236	2	34.618			
总计 Sum	4 954 121.560	9				

注：*， $0.01<P<0.05$ 时显著水平；**， $P<0.01$ 时显著水平。
Note: *, significant level at $0.01<P<0.05$; ** significant level at $P<0.01$.

由表 10 可知，试验因素对秸秆最大切割力影响显著性顺序为 A、B、C，分析结果与极差分析相同。方差分析结果表明刀型、横切角对秸秆最大切割力有极显著影响，切削角对秸秆最大切割力有显著影响。由此可知刀片刃口曲线形状对提升秸秆切割效率具有显著效果，具体反映为刀片滑切角度增大可使刀片在不同切割阶段秸秆切割效率提高；同时改变秸秆与刀片接触角度也能提高切割效率，减小切割阻力和能耗。

3.4 验证试验

根据极差分析结果得到较优参数组合 $A_3B_2C_2$ ，即刀型为仿生刀片、横切角为 90° 、切削角为 20° 参数组合下进行秸秆切割验证试验。试验材料与正交试验相同，试验重复 3 次，试验结果如表 11 所示。

表 11 验证试验结果 Table 11 Results of verification test				
序号 No.	1	2	3	平均 Average
最大切割力 Maximum cutting force/N	630.0	620.0	620.0	623.3

根据验证试验结果可知，在较优参数组合 $A_3B_2C_2$ 条

件下, 平均秸秆最大切割力为 623.3 N, 相较正交试验最小秸秆最大切割力 640.0 N 降低 2.6%。

4 结 论

本文分析了切叶蚁工蚁成虫的切叶原理, 设计了一种基于切叶蚁上颚滑切曲线的仿生青贮玉米粉碎刀片, 主要结论如下:

1) 秸秆切割仿真试验结果表明相较斜刃刀片和直刃刀片, 仿生刀片对秸秆的最大切割力分别降低 4.05%、6.09%; 台架对比试验结果表明相较斜刃刀片和直刃刀片, 仿生刀片对秸秆的最大切割力分别降低 10.53%、12.82%, 仿生刀片在提高秸秆切面平整度和降低最大切割力方面具有明显优势。

2) 通过台架试验可知, 3 个试验因素影响秸秆最大切割力的主次顺序为刀型>横切角>切削角; 较优参数组合为仿生刀片、横切角 90°、切削角 20°, 在此条件下粉碎刀片对秸秆的最大切割力为 623.3 N; 仿生刀片减阻降耗作用明显, 满足青贮玉米收获机粉碎作业要求。

[参 考 文 献]

- [1] 周鹏, 曹清杰, 董寿周. 青贮玉米的开发价值及应用[J]. 养殖与饲料, 2020, 19(11): 73-74.
- [2] 牟孝栋, 姜慧新, 孙延成, 等. 青贮玉米收获机碟盘式籽粒破碎装置仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 218-226.
Mou Xiaodong, Jiang Huixin, Sun Yancheng, et al. Simulation optimization and experiment of disc-type grain crushing device of silage corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 218-226. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吕金庆, 杨颖, 尚琴琴, 等. 玉米青贮收获机切碎性能试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(4): 102-108.
Lv Jinqing, Yang Ying, Shang Qinqin, et al. Study on chopping performance of silage maize harvester[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(4): 102-108. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杜哲. 茶茎秆仿生割刀设计及切割性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
Du Zhe. Research on Biomimetic Design of Cutting Blade for Tea Stem and Its Cutting Performance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蒋锐, 陈阳, 于成信, 等. 仿蟋蟀齿切叶减阻灭茬刀片设计与试验[J]. 工程设计学报, 2018, 25(4): 409-419.
Jiang Rui, Chen Yang, Yu Chengxin, et al. Design and experiment of cricket's incisor lobe inspired stubble cutting blade with drag reduction[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2018, 25(04): 409-419. (in Chinese with English abstract)
- [6] 贾洪雷, 郭明卓, 郭春江, 等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 103-114.
Jia Honglei, Guo Mingzhuo, Guo Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103-114. (in Chinese with English abstract)
- [7] Jia H L, Li C Y, Zhang Z H, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. Journal of Bionics Engineering, 2013, 10(4): 497-505.
- [8] Du Z, Hu Y G, Lu Y Z, et al. Design of structural parameters of cutters for tea harvest based on biomimetic methodology[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2021, 2021: 1-8.
- [9] 田昆鹏, 李显旺, 沈成, 等. 天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 56-61.
Tian Kunpeng, Li Xianwang, Shen Cheng, et al. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(5): 56-61. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王金武, 关睿, 高鹏翔, 等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 73-81.
Wang Jinwu, Guan Rui, Gao Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 73-81. (in Chinese with English abstract)
- [11] Tong J, Xu S, Chen D H, et al. Design of a bionic blade for vegetable chopper[J]. Journal of Bionics Engineering, 2017, 14(1): 163-171.
- [12] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 41-51.
Hou Shouyin, Chen Haitao, Zou Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41-51. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张喜瑞, 王自强, 李粤, 等. 滑切防缠式香蕉秸秆还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 26-34.
Zhang Xirui, Wang Ziqiang, Li Yue, et al. Design and experiment of sliding-cutting and anti-twining returning device for banana straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(3): 26-34. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [14] K Kuřavová, L Hajduková, P Kočárek. Age-related mandible abrasion in the groundhopper *Tetrix tenuicornis* (Tetrigidae, Orthoptera)[J]. *Arthropod Structure & Development*, 2014, 43(3): 187-192.
- [15] Judge K A, Bonanno V L. Male weaponry in a fighting cricket[J]. *PLoS One*, 2008, 3(12): e3980.
- [16] 刘德庆, 张天媛, 张晓丽, 等. 华北地区光肩星天牛空间分异性及驱动因素研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 215-223.
- Liu Deqing, Zhang Tianyuan, Zhang Xiaoli, et al. Spatial Stratified Heterogeneity and Driving Force of *Anoplophora glabripennis* in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 215-223. (in Chinese with English abstract)
- [17] Garrett R W, Carlson K A, Goggans M S, et al. Leaf processing behaviour in *Atta leafcutter* ants: 90% of leaf cutting takes place inside the nest, and ants select pieces that require less cutting[J]. *Royal Society Open Science*, 2016, 3(1): 150111.
- [18] Yao G, Feng L, Zhang D Y, et al. Morphology and mechanical properties of vibratory organs in the leaf-cutting ant (*Atta cephalotes*)[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(4): 722-730.
- [19] Schofield R M S, Emmett K D, Niedbala J C, et al. Leaf-cutter ants with worn mandibles cut half as fast, spend twice the energy, and tend to carry instead of cut[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2011, 65(5): 969-982.
- [20] 刘羊, 黄小毛, 马丽娜, 等. 拨禾链式油葵割台静态滑切角恒定切割器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(1): 99-108.
- Liu Yang, Huang Xiaomao, Ma Lina, et al. Design and test of static sliding cut angle constant cutting machine for chain oil sunflower harvester header[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(1): 99-108. (in Chinese with English abstract)
- [21] 田宜水, 姚宗路, 欧阳双平, 等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(9): 124-128.
- Tian Yishui, Yao Zonglu, Ouyang Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 124-128. (in Chinese with English abstract)
- [22] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 113-121.
- Xiong Pingyuan, Yang Zhou, Sun Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(18): 113-121. (in Chinese with English abstract)
- [23] 宋少龙, 汤智辉, 郑炫, 等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 63-70.
- Song Shaolong, Tang Zhihui, Zheng Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(20): 63-70. (in Chinese with English abstract)
- [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 with English abstract)
- [25] 刘海涛, 张炜, 马军民, 等. 青贮玉米饲料籽粒破碎装置仿真分析与试验[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(8): 32-39.
- Liu Haitao, Zhang Wei, Ma Junmin, et al. Simulation analysis and experiment of silage corn feed grain crushing device[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(8): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- [26] 耿端阳, 牟孝栋, 孙延成, 等. 青贮玉米螺旋缺口锯齿型破碎揉丝破碎辊设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021: 1-9.
- Geng Duanyang, Mou Xiaodong, Sun Yancheng, et al. Simulation and test of silage corn screw notched sawtooth type crushing roller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021: 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [27] Zhang T, Zhao M Q, Liu F, et al. A discrete element method model of corn stalk and its mechanical characteristic parameters[J]. *Bioresources*, 2020, 15(4): 9337-9350.
- [28] 王洪明, 王芳, 杨铮, 等. 向日葵茎秆切割阻力影响因素试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(5): 102-107.
- Wang Hongming, Wang Fang, Yang Zheng, et al. Experimental study on the influencing factors of cutting resistance of sunflower stalk[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(5): 102-107. (in Chinese with English abstract)

Design and test of bionic crushing blade based on the mandible of the leaf-cutter ant for harvesting silage maize

Zhang Lihua, Luo Huizhong, Zhou Yang, Qiu Qingyu, Yuan Senlin, Cai Jinxiong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625000, China)

Abstract: A crushing blade has been one of the most important components during harvesting corn for silage in modern agriculture. However, the existing crushing blade cannot fully meet the high requirement of sharpness and slip cutting performance of the silage corn harvester. In this study, a bionic crushing blade was proposed under the mandible of the leaf-cutting ant as a prototype. A kinematic model of the mandible was firstly established to clarify the cutting principle of the leaf-cutting ant. A bionic edge curve was then designed to extract the contour curve of the mandible of the leaf-cutting ant. A reverse engineering was also used to fit the slip-cutting curve. As such, a discrete element model was established in the stalk cutting test using an EDEM software. The evolution of stalk cutting force was then explored under the same parameter setting of bionic, oblique, and straight blade blades. A bench test was carried out to record the stalk cutting deformation using a high-speed camera. The simulation and high-speed camera results show that the stalk cutting deformation was divided into three stages: extrusion, cutting, and through the stage. Specifically, the blade continued to compress the stalk skin in the extrusion stage, until the cutting force increased sharply to the blade's downward pressure exceeding the strength of the stalk skin that caused by the skin rupture, where the cutting force appeared at the first peak after a small decline in the cutting force. The blade was used to cut the stalk with the increase of cutting force, where the maximum cutting force appeared instantly, and then dropped sharply in the cutting stage. The cutting force decreased sharply to a stable state for the stalk cutting in the through the stage, when there was only friction between the blade and the stalk. Correspondingly, the maximum cutting forces of the bionic blade in the simulation were 4.05% and 6.09% lower than those of the angled and straight blade, respectively. By contrast, the maximum cutting forces of the bionic blade in the bench test were 10.53% and 12.82% lower than those of the oblique and the straight blade, respectively. Correspondingly, the relatively relative errors of the maximum cutting force for the three blades in the simulation and bench test were 7.78%, 1.11%, and 0.66%, respectively. More importantly, the better cutting performance of the bionic blade was achieved in the uniform flatness of the stalk cutting surface and the low maximum cutting force of the stalk. An orthogonal test was also carried out in on the stalk cutting bench with the blade type, cross-cutting angle, and cutting angle as the test factors, while the maximum cutting force of stalk as the test index. An optimal combination of parameters was obtained to verify the simulation. Consequently, the blade type and cross-cutting angle posed a highly significant effect on the maximum cutting force of stalk, whereas, there was a significant effect of on the cutting angle. The validation test showed that the maximum stalk cutting force was 623.3 N at the bionic blade, the cross-cutting angle of 90°, and the cutting angle of 20° under the optimal combination of parameters. This finding can also provide a theoretical reference to design the crushing blade in the silage corn harvester.

Keywords: simulation; stalk; bionic; leaf-cutter ant; silage maize; crushing blade