

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.036

# 基于河狸下门齿外形结构的青饲料切碎弯刀设计与试验

王海翼<sup>1</sup> 纪中良<sup>2</sup> 赵玄<sup>1</sup> 尤泳<sup>1</sup> 王德成<sup>1</sup> 方宪法<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东五征高北农牧机械有限公司, 日照 262306;

3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对现有平板直刀式切碎刀具作业时滑移严重、切碎均匀性差、作物适应性差等问题, 基于河狸下门齿的功能结构特性, 采用三维激光扫描及计算机辅助处理的逆向工程技术, 提取河狸头骨模型并拟合下门齿特征曲线, 依此设计一种仿生青饲料切碎刀具。在构建河狸下门齿仿生耦元结构表征模型的基础上, 通过理论分析确定下门齿钳住角、楔角、滑切角与生物切割行为的运动和受力关系, 建立刀刃斜切和稳定滑切模型, 得出稳定切割过程河狸下门齿结构特征与降阻减滑的响应机制, 建立侵彻物料切割受力模型, 对刀头受力特性进行理论分析, 得出楔角与刀头受力及强度的影响规律。分段表征河狸下门齿功能结构, 并以此设计切碎刀形。为确定刀形最佳结构参数, 以标准草长率、斜茬率和破节率为试验指标, 采用四因素五水平正交试验研究切碎刀刀形关键参数对青饲料切碎效果的影响, 台架试验结果表明, 当钳住角为 $46^\circ$ 、内滑切角为 $31^\circ$ 、外滑切角为 $67^\circ$ 、楔角为 $28^\circ$ 时, 标准草长率为95.84%、斜茬率为2.84%、破节率为95.46%。在台架试验确定的最佳结构参数条件下, 以标准草长率、斜茬率和破节率为试验指标, 分别对黑麦草、全株青贮玉米和甜高粱开展田间收获验证试验, 试验结果表明: 当作业参数为工作速度6 km/h、喂入量8 kg/s时, 额定负载下, 黑麦草平均标准草长率为91.95%、平均斜茬率为3.31%、平均破节率为96.11%; 全株青贮玉米平均标准草长率为95.62%、平均斜茬率为3.81%、平均破节率为96.32%; 甜高粱平均标准草长率为92.60%、平均斜茬率为4.06%、平均破节率为96.03%, 各项性能指标均符合国家行业标准。

**关键词:** 青饲料; 切碎弯刀; 刀形; 仿生; 结构参数; 组合

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)06-0386-11

OSID:



## Design and Experiment of Forage Harvester Chopper Shape for Bionic Beaver Lower Door Teeth Shape Structure

WANG Haiyi<sup>1</sup> JI Zhongliang<sup>2</sup> ZHAO Xuan<sup>1</sup> YOU Yong<sup>1</sup> WANG Decheng<sup>1</sup> FANG Xianfa<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shandong Wuzheng Takakita Stockbreeding Machinery Co., Ltd., Rizhao 262306, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of serious slippage, poor uniformity and poor crop adaptability of the existing flatbed straight blade chopping tool, based on the functional and structural characteristics of beaver's lower incisors, the skull model of beaver was extracted and the characteristic curves of the lower incisors was fitted by adopting the three-dimensional laser scanning and computer-assisted processing of the inverse engineering technology, and then a kind of biomimetic silage forage chopping blade was designed according to the model. On the basis of constructing the bionic coupling structural characterization model of beaver lower incisor, the movement and force relationship between the clamp angle, wedge angle and slip angle of the lower incisor and the biological cutting behavior were determined through theoretical analysis, and the models of slanting cut and stable slip cut of the blade were established to derive the structural characteristics of the beaver's lower incisor in the process of stabilizing the cutting process, and the mechanism of response to the resistance and slip reduction, and the model of

收稿日期: 2024-03-18 修回日期: 2024-04-13

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFD2001905)、山东省重大科技创新工程项目(2022CXGC020704-01)和财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)**作者简介:** 王海翼(1994—), 男, 博士生, 主要从事青饲料收获装备设计研究, E-mail: 1347935711@qq.cn**通信作者:** 方宪法(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机械装备设计研究, E-mail: fangxf@caams.org.cn

the cutting force of the invasive material was established for the theoretical analysis of the cutting head force characteristics, and the model of the cutter head was used for the theoretical analysis of the cutter head force characteristics, and the model of the cutting force was used for the theoretical analysis of the cutter head. The theoretical analysis of the cutter head force characteristics was carried out, and the influence law of wedge angle and cutter head force and strength was obtained. The functional structure of beaver lower incisors was characterized in segments, and the blade shape was designed accordingly. In order to determine the optimal structural parameters of the blade shape, a four-factor, five-level orthogonal test was conducted to investigate the effects of the key parameters of the blade shape on the chopping effect of silage forage, using the standard grass length rate, slant stubble rate and broken pitch rate as the test indexes. The results of the bench test showed that when the clamp angle was  $46^\circ$ , the inner slip angle was  $31^\circ$ , the outer slip angle was  $67^\circ$  and the wedge angle was  $28^\circ$ , the standard grass length rate was 95.84%, the slant stubble rate was 2.84%, and the broken knot rate was 95.46%. Under the optimal structural parameters determined in the bench test, the field harvesting validation test was carried out on ryegrass, whole silage corn and sweet sorghum respectively with the standard grass length rate, slant stubble rate and broken node rate as the test indexes, and the test results showed that when the operating parameters were 6 km/h and the feeding rate was 8 kg/s, the average standard grass length rate of ryegrass was 91.95%, the average slant stubble rate was 3.31%, and the average breaking rate was 96.11%; whole plant silage corn average standard grass length rate was 95.62%, the average slash stubble rate was 3.81%, the average breaking rate was 96.32%; sweet sorghum average standard grass length rate was 92.60%, the average slash stubble rate was 4.06%, the average breaking rate was 96.03%, the performance indexes were consistent with the national industry standards. The bionic chopping curved blade can cut smoothly and cut sections evenly, which had strong crop adaptability.

**Key words:** silage forage; chopping curved blade; chopper shape; bionic; structural parameters; combination

## 0 引言

我国是世界养殖生产大国之一,但目前优质饲草原料大量依靠进口,青饲料是牛、羊养殖业的重要优质饲草来源<sup>[1-2]</sup>。我国全株玉米青贮质量仅处于欧美发达国家中等水平<sup>[3]</sup>,除青饲料本身品种、种植农艺、收贮条件等因素外,收获机械先进性是决定青贮饲料品质的关键因素,青饲料切段长度和切段均匀性能够提高或者维持泌乳期奶牛的营养价值和牛奶生产<sup>[4-5]</sup>。

国外青饲料切碎已形成基于作物特性的刀具结构、切碎适应性及智能化集成的多元系统性研究。CLAAS、John Deere、Krone 等青饲料收获机均采用“人字形”双排斜置滚刀,动刀为先进的高强特殊合金钢基体双刃,刀具形态多为螺旋叶片式对置弧形折弯刀或半螺旋半锯齿形刀<sup>[6]</sup>。国内切碎刀具研究多为茎穗兼收联合收获机(秸秆青贮)、铡草机甩刀和平板刀,分析优化刃口曲线方程、动刀片倾角等结构,但刀具设计仅停留在结构参数和材料涂层阶段,尚未开展刀具刀形设计理论研究<sup>[7]</sup>。

目前国内外学者主要通过喂入参数优化、刀具作业参数优化、滚筒结构优化等提高青饲料切碎质量<sup>[8-12]</sup>。众多学者对圆盘割刀、秸秆粉碎刀、蔬菜茎叶切碎刀、甩刀等青饲料收割刀具进行了仿生设

计及结构优化<sup>[13-17]</sup>。国际优质青饲料刀具供应商 Busatis GmbH 刀具均为多弧段弯刀,但具体设计理论及构型方法尚不清楚;而国内弧形曲面或J形曲面动刀的滚刀式切碎器应用极少<sup>[18]</sup>,中机美诺科技股份有限公司、山东五征集团有限公司、石家庄美迪机械有限公司等的青饲料收获机基本都采用平板直刀式动刀,刀具设计理论研究较少<sup>[19-20]</sup>,且鲜有基于仿生学的青饲料切碎刀具研究报道。

综上,当前研究人员主要研究动物口器、切齿等器官几何特征或生物行为特征,进而设计仿生单元改善刀具性能,国内外青饲料仿生切碎刀具的研究大多基于仿生原型的单一耦元设计个体单元特征,或多个单元阵列组合构型,整体性多单元仿生的研究较少,同时也未系统揭示应用仿生结构提高刀具性能的机理本质,导致刀具加工制造难度大且仿生效能提升有限<sup>[21-24]</sup>。

切碎刀具结构参数及安装配置参数决定切割运动类型,而滑切必定伴随滑移。河狸上下门齿的高效配合可迅速将树枝等基体切碎并排出口腔,本文以河狸下门齿为仿生原型,设计一种青饲料切碎弯刀刀形。在阐述河狸下门齿各功能结构与稳定滑切的啮合啃咬原理基础上,对河狸下门齿主要结构特征进行模型表征,并构建运动、受力模型,得出仿生刀具关键结构参数。通过台架试验确定刀形最佳结

构参数组合,并由田间试验验证收获切碎效果,以有效提高青饲料收获机对不同作物的适应性,减少切碎滑移,提高收获质量。

## 1 仿生原型构建

### 1.1 仿生原型

河狸(*Castor fiber*)属哺乳纲、啮齿目、河狸科,相比兔等一般植食性动物,河狸牙齿服役工况更加苛刻,春夏喜食嫩枝、树皮、树根等,秋冬季“啃树”筑巢,通过口腔不断啃合啃咬抑制门齿生长,以始终保持齿冠磨利成凿状(服役周期超长),河狸头颅骨模型如图1所示。

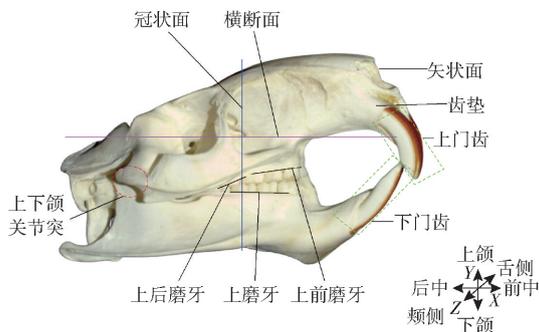
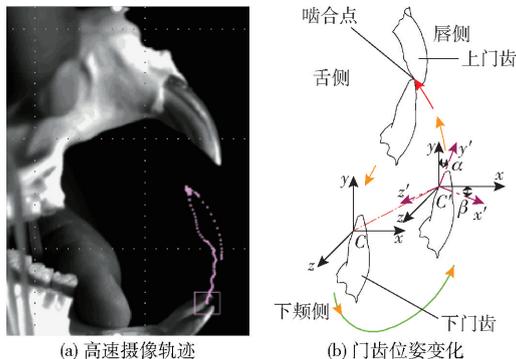


图1 河狸头颅骨模型(上、下牙列矢状面结构)

Fig.1 Beaver skull model (sagittal structure of upper and lower teeth)

在河狸上下颌进行的一系列复杂的生物学活动(捕获、切开、运输、研磨、吞咽)循环中,首先以上颌为支撑,通过上门齿钳住物料,限制物料滑移,下门齿由下而上( $Y$ 方向,同时向舌侧靠近)绕 $Z$ 轴往复啃合啃咬切割运动(图1),在滑切和剪切作用下从大块物料中均匀掰离出小块弧状碎料,然后向舌侧一端排出口腔或通过臼齿研磨吞咽,下门齿整个啃合运动过程均保持滑切状态,下门齿运动轨迹为弧形,河狸下门齿运动位姿变化如图2所示。



(a) 高速摄像轨迹

(b) 门齿位姿变化

图2 河狸下门齿运动位姿变化示意图

Fig.2 Schematics of changes in movement posture of beaver's lower incisors

4颗特定形态结构的门齿按一定规律排列组合形成牙列,在取食过程中协同发挥高效滑切机

能<sup>[25]</sup>,从而对复杂进食工况表现出高度适应性。同样,切碎装置滚刀具有动刀和定刀,以圆周运动执行相应的功能。河狸下门齿运动位姿变化如图2所示。其啃咬的生物功能与切碎滚刀的工程功能相近,均以“切”为主<sup>[26]</sup>,遵循仿生自然生物的原则,选取河狸门齿这一切碎功能发达的天然切碎副为仿生原型模本,开展功能结构仿生研究。

### 1.2 样品制备与处理

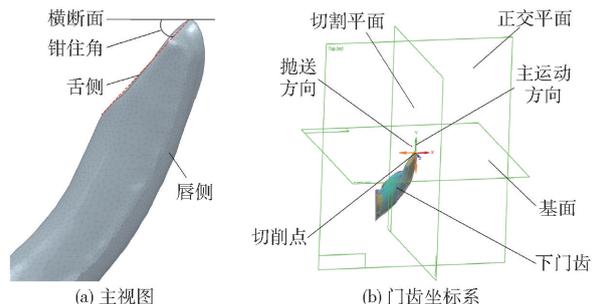
所使用的河狸门齿样品来自于当地动物园,为自然死亡的成年体。通过三维(3D)激光扫描系统(3D Scanner HD,NextEngine公司,美国),获取原始实体点云数据,并用自带软件进行缩减、封装、多边形编辑,用Solid edge软件进行曲面重构和误差分析,完成对象粗糙特征消除、空隙曲率填充、光滑松弛处理、多边形缺陷复查修复,通过上述逆向工程技术建立河狸门齿列的3D数值模型。最后用Matlab进行曲线参数拟合优化,具体分析路线如图3所示。



图3 河狸头颅骨分析路线

Fig.3 Beaver skull analysis route

以后中-前中方向为 $X$ 轴、以下颌-上颌方向为 $Y$ 轴、以颊侧-舌侧方向为 $Z$ 轴建立牙列坐标系(图1),使用Solid edge 2023软件的逆向工程功能处理点云数据,优化特征曲率、特征角度、特征结构比例等几何要素,重构整体CAD模型,确定河狸下门齿仿生耦元结构表征。如图4a所示,基于直线拟合,以舌面与横断面( $X-Z$ 轴所在平面)表征下门齿啮合特征。



(a) 主视图

(b) 门齿坐标系

图4 河狸下门齿仿生耦元结构表征

Fig.4 Structural characterization of bionic coupling element of beaver lower incisor

以直线和圆弧逼近其齿形轮廓,河狸下门齿外

轮廓整体由一定曲度的若干弧线围络而成,横断面与舌侧齿冠面间形成钳住角,且齿冠面表征为“月牙洼”形貌,保证了切削刃的锋利度,内齿面和外齿面呈外凸弧面状,保证了门齿良好的抗冲击性,即下门齿主要外缘呈多段弧状凸峰形或凹坑形,具有良好的抗冲击性和结构强度。

以齿尖最高点为切削点,以横断面为基面,建立齿尖切向、门齿主运动方向、正交方向相互垂直的3个参考坐标面,形成图4b所示的下门齿切割运动坐标系。下门齿内嵌于下颌骨的齿垫内,下门齿外缘面由齿冠面、内齿面、上齿垫、下齿垫、外齿面、齿尖等非光滑形态结构包络而成,组合成不规则凿状,可有效减少与食物基体间的相互作用面积,同时保证切削刃锋利,诱发和引导裂纹扩展,迅速刺入和撕裂食物,随即咬断和切碎食物;并以连续滑切的方式增加破坏,完成碎料从基体上的迅速侵入、劈裂和切断拨离;内外齿边缘脊相互联合,呈新月状,可将碎料限定在咬合面内,快速剪切破碎。

### 1.3 关键边缘轮廓曲线拟合

利用 Matlab 将处理后的河狸下门齿 CAD 模型图像赋值并灰度化处理,加入椒盐噪声闭运算腐蚀结构元素,高帽滤波和低帽滤波,最后用 Canny 算子提取轮廓外缘,分别赋行列值和均值,运用 Solid edge 曲线功能拟合包络完整并圆滑过渡成下门齿轮廓,如图5a所示。

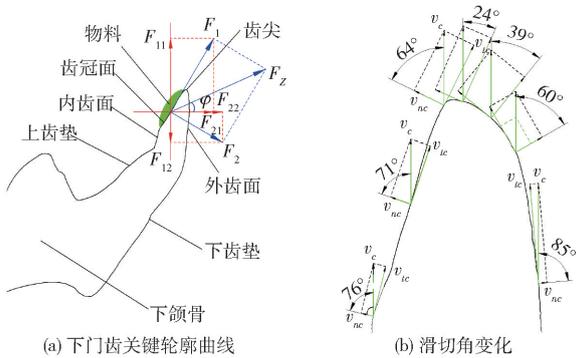


图5 河狸下门齿滑切过程分析

Fig.5 Analysis of sliding cutting process of beaver lower incisor

当河狸切碎物料时,齿冠面齿刃与待切物接触点的绝对速度为  $v_c$  (图5b),取门齿与待切物料的任何接触点,该点绝对速度可以分解为齿面轮廓法线方向速度  $v_{nc}$  和齿面轮廓切线方向速度  $v_{ic}$ ,绝对运动方向与齿冠面齿刃切削线构成了滑切,舌侧内齿面滑切角向齿尖递减,唇侧外齿面滑切角向齿尖递减,从齿尖侵入物料至切碎完成的整个切割过程滑切角逐渐增大,门齿保持动态滑切运动,有助于切碎过程的提质增效。

物料在不同刀体侵入过程中带来不同凸起或凹陷,表明物料受到的力方向有很大差异。假设物料初始位置为平行于  $XZ$  (基面) 平面,当物料受到垂直于  $X$  轴方向的力时,物料被挤压,而当受到平行于  $X$  轴方向的力时,物料具备更好的流动性以便吞咽或排出口腔。物料在齿冠面上某点的总受力  $F_z$  可以分成齿冠面截线切线方向力  $F_1$  和齿冠面截线法线方向力  $F_2$ ,而  $F_1$  和  $F_2$  又能够转化成垂直于  $X$  轴的端面压力 ( $F_y$ ) 和平行于  $X$  轴的力 ( $F_x$ )。此时

$$F_y = F_{11} - F_{12} = F_z \sin \varphi \quad (1)$$

$$F_x = F_{21} + F_{22} = F_z \cos \varphi \quad (2)$$

式中  $F_{11}$ ——切向力  $F_1$  沿  $Y$  轴分力,  $N$   
 $F_{12}$ ——法向力  $F_2$  沿  $Y$  轴分力,  $N$   
 $F_{21}$ ——切向力  $F_1$  沿  $X$  轴分力,  $N$   
 $F_{22}$ ——切向力  $F_1$  沿  $X$  轴分力,  $N$   
 $\varphi$ ——物料受力与基面的夹角, ( $^\circ$ )

$F_y$  占比增加会增加物料受到的压力,相应地增加物料强度,在刀体侵入过程中需尽量规避此现象的发生;而  $F_x$  占比增加会使得物料凸起情况明显,带来更好的物料流动性。通过分析可以看出影响  $F_y$  和  $F_x$  占比的参数为物料受力与水平面的夹角  $\varphi$ , 夹角  $\varphi$  越大,  $F_y$  占比越高,物料粘滞阻碍效果越强,切割滑移越小;相反夹角  $\varphi$  越小,  $F_y$  占比越低,物料粘滞阻碍效果越弱,物料滑移越大。

由正交平面截取下门齿,形成图6b所示的截面轮廓线,在图2b坐标系中拟合关键边缘轮廓曲线函数为

$$\begin{cases} y_1 = 0.0102x^2 - 2.5809x + 108.91 & (R^2 = 0.99) \\ y_2 = -0.0397x^2 + 7.5262x - 402.47 & (R^2 = 0.99) \\ y_3 = 0.0186x^2 - 3.6702x + 130.01 & (R^2 = 0.97) \\ y_4 = -43.219x^3 + 133.99x^2 - 0.06x + 0.07 & (R^2 = 0.92) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $y_1$  为内齿面截线函数,  $y_2$  为齿冠面截线函数,  $y_3$  为外齿面截线函数,  $y_4$  为齿尖截线函数。

齿冠面轮廓线与基面形成的角度为钳住角 (推挤角)  $\xi$ , 起到往主运动方向钳住物料,保证有效切割的作用,内、外齿面轮廓线之间形成的夹角为楔角  $\delta$ 。与传统平板直刀相比,河狸下门齿的切割前角较小,楔角较大。普通平板直刀切割前角较大,因此以较小的楔角增加切削刃的锋利程度,但降低了切削刃强度,使切碎刀具受力状态变差,加剧了刀具磨损和蹦刃<sup>[27]</sup>。

## 2 仿生切碎弯刀参数设计

现有青饲料切碎刀具多为平板直刀,当物料表

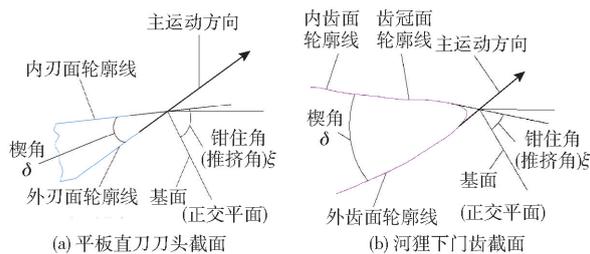


图6 河狸下门齿正交截面表征

Fig. 6 Orthogonal section characterization of beaver lower incisors

层韧性较高时,平板直刀的单一构型夹持力不足,高速旋转的刀片会造成原料滑移,导致原料不易被切碎,青贮饲料质量较差、切段长度不均。基于目前青饲料收获机上广泛采用的平板直刀结构特征,重点优化直刀刀头结构参数,以提高切碎性能和作物适应性。

### 2.1 滑切角

切碎刀具呈一定倾角“人字形”对置分布在滚筒上,作业时,物料在喂入辊的压扁推挤下先被动刀钳住压紧(弹性变形),随着滚筒旋转(以角速度 $\omega$ 绕点 $O_1$ 做半径为 $r$ 的滚切运动)在动刀刃口的压力作用下快速切断破坏(塑性变形),对动刀刃口进行局部放大,微观上将该部分刀刃特征逼近为直线。实际切割过程中,动刀刃口无法完全钳住物料,刀具与物料间发生滑移。

图7中, $AB$ 为动刀刃口线, $v$ 为动刀切割速度。将 $v$ 分为垂直于刃口的法向砍切速度 $v_n$ 和平行于刃口的切向滑切速度 $v_i$ 。 $a$ 为刀刃上的任意一点, $m$ 为物料, $N$ 为动刀切割物料时的正压力, $T$ 、 $S$ 为正压力 $N$ 沿刃口与运动方向的分力, $F$ 为物料对动刀刃的摩擦力,正压力 $N$ 与摩擦力 $F$ 的合力为 $R$ , $\tau$ 为滑切角。 $S$ 沿动刀刃口运动方向推压物料并快速切割, $T$ 导致物料沿刃口线滑移。刀刃从 $AB$ 运动至 $A_1B_1$ 时,刀刃上的点 $a$ 将运动至点 $a_1$ ,与点 $a$ 重合的物料从点 $m$ 移动到点 $m_1$ 。如图8所示, $v$ 与 $v_n$ 的延长线和刀具下底面相交于 $E$ 、 $F'$ ,作过该点与上底面的垂线 $EG$ 、 $F'H'$ ,分别组成三角形 $EGO$ 、 $F'H'O'$ ,为便于直观对比,将 $\triangle H'F'O'$ 平移为 $\triangle FHO$ 。

法向砍切速度 $v_n$ 与切向滑切速度 $v_i$ 的夹角为滑切角,滑切角正切为滑切系数,刀刃滑切时滑动的流畅度为滑移系数。计算式为

$$\varepsilon = \tan\tau = \frac{v_i}{v_n} \quad (4)$$

$$i = \frac{l_{a_1m_1}}{l_{am}} = \frac{\sin(\tau - \varphi)}{\sin(90^\circ - \tau)} = \frac{\sin(\tau - \varphi)}{\cos\tau} \quad (5)$$

式中  $\varepsilon$ ——滑切系数  $i$ ——滑移系数

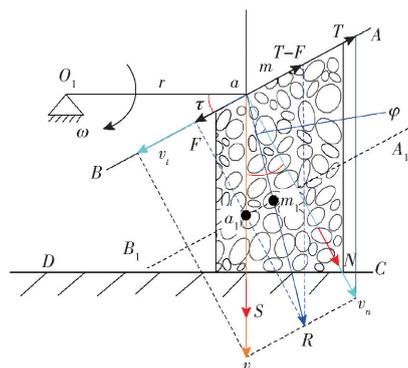


图7 直线型刀刃斜切原理图

Fig. 7 Schematic of linear blade oblique cutting principle

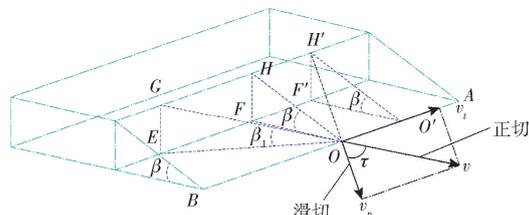


图8 直线型刀刃刃口微元滑切原理图

Fig. 8 Principle of linear blade edge micro element sliding cutting

$l_{a_1m_1}$ ——点 $a_1$ 、 $m_1$ 间距离

$l_{am}$ ——点 $a$ 、 $m$ 间距离

若 $\tau \geq \varphi$ ,则 $i=0$ ,物料无滑移。结合图5a,“人字形”倾斜布置的刀刃几何关系下,始终不存在 $\tau \geq \varphi$ ,且滑切必定伴随滑移<sup>[28]</sup>。滑切系数取决于动刀自身刃口形状、动刀安装位置及切碎过程中物料在切割平面上的运动方式。滑切角越大,滑切作用越大。由几何关系可得

$$\tan\beta_1 = \frac{L_{EG}}{L_{EO}} \quad (6)$$

$$\tan\beta = \frac{L_{HF}}{L_{FO}} = \frac{L_{EG}}{L_{FO}} \quad (7)$$

$$\cos\tau = \frac{L_{FO}}{L_{EO}} \quad (8)$$

$$\tan\beta_1 = \tan\beta \cos\tau \quad (9)$$

式中  $\beta$ ——法向砍切速度 $v_n$ 刃口角, ( $^\circ$ )

$\beta_1$ ——切向滑切速度 $v_i$ 刃口角, ( $^\circ$ )

$L_{EG}$ ——点 $E$ 、 $G$ 间距离, mm

$L_{EO}$ ——点 $E$ 、 $O$ 间距离, mm

$L_{HF}$ ——点 $H$ 、 $F$ 间距离, mm

$L_{FO}$ ——点 $F$ 、 $O$ 间距离, mm

由 $\cos\tau \leq 1$ 可知 $\beta_1 < \beta$ 。滑切时实际参与切碎的刃口角小于刀具的物理刃口角。由刃口上的微型锯齿将植物纤维切断,物料同时受到动刀的压应力和张应力且张应力远小于压应力,青饲料的破碎张应力小于压碎应力,刀具单位刃口长度上的负荷较小,而正切只受到压应力,因此滑切更省力。为保证

刀具在酸性环境下的长期服役效果,结合高略契金常数定理,在满足刃口强度和使用寿命的情况下,滑切角  $\tau$  为  $12^\circ \sim 55^\circ$  可一定程度上节省功耗<sup>[28]</sup>。

### 2.2 钳住角

动刀刃口切割点处刃口线(齿冠面轮廓线切线)与定刀(基面)刃口线间的夹角为钳住角  $\xi$  (图9),与刀片结构安装配置有关。切碎装置滑切作业时,必定发生物料滑移,为减少物料滑移,保证标准草长率及切段质量,结合河狸下门齿结构参数确定钳住角参数。

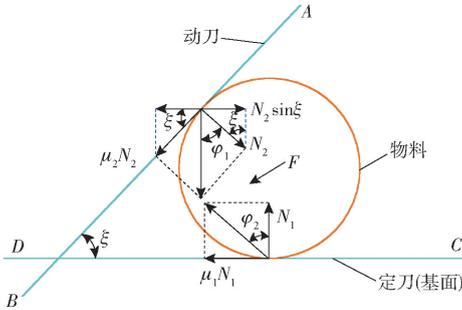


图9 稳定切割原理示意图

Fig.9 Schematic of stable cutting principle

稳定切割减少滑移条件为

$$\mu_1 N_1 \geq N_2 \sin \xi - \mu_2 N_2 \cos \xi \quad (10)$$

式中  $\mu_1$ ——定刀刃与物料间的摩擦因数

$\mu_2$ ——动刀刃与物料间的摩擦因数

$N_1$ ——定刀刃对物料的支持力, N

$N_2$ ——动刀刃对物料的支持力, N

其中,  $N_1 = \mu_2 N_2 \sin \xi + N_2 \cos \xi$ , 推导得  $\tan \xi \leq (\mu_1 + \mu_2) / (1 - \mu_1 \mu_2)$ , 即钳住角不超过定刀刃和动刀刃对物料的摩擦角之和时才能稳定切割。

由图6a可知传统平板直刀钳住角较大,切碎过程中,动刀刃与定刀刃间剪切瞬间会将物料推出刃口区,放大滑移特征。滚刀式切碎器动刀刃口运动轨迹呈余摆线状,又因动刀和定刀均采用直线型刀刃,开始切割物料时动定刀间剪切角最小,随着动刀的旋转,当切碎结束时,剪切角达到最大值。只有当钳住角适当时,两刃口才能将物料钳住,提供良好支撑作用,完成有效的剪切破碎。否则在切碎过程中将会形成推料及挤压物料,造成集中切割,阻力大,刀片磨损不均匀,且所得物料切段断面质量差、斜茬毛刺多。滚切作业时,在“人字形”动刀配置下,随着物料在刀刃上滑切,滑切角动态增大,而钳住角保持恒定,有利于提高切碎效果<sup>[29]</sup>。

### 2.3 楔角

图4b中齿冠面上过内切削点的正交平面内,齿面轮廓线与外齿面轮廓线的夹角为楔角(图6b中 $\delta$ ),主要影响刀体厚度、磨刃效果及刀具整体使用

寿命。以刀头前端微元为对象,建立坐标系  $O-XYZ$ ,刀具侵彻物料时切割受力模型如图10所示。刀具在滚切过程中,随着刀头持续前进,刀具对物料的压应力逐渐超过茎秆表层弹性极限,物料发生塑性变形直至局部结构屈曲,最终物料表层破裂失效,刀具刀头前端侵入物料。无论动刀刃形是直线还是曲线,微观上刀头均为楔形结构,刀头宽度为  $h$ ,楔角  $\delta$ ,以速度  $v$  侵彻物料基体,刀头与物料之间滑动摩擦角为  $\theta$ 。

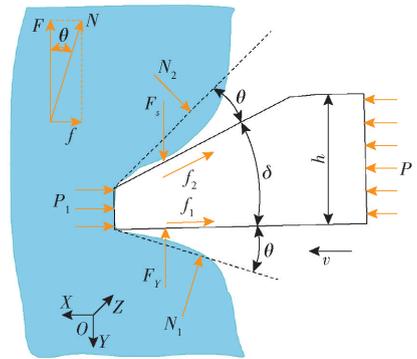


图10 侵彻物料切割受力模型

Fig.10 Cutting force model of penetrating material

根据几何关系、全约束力与正压力间的关系可得

$$N_1 = (F_y^2 + f_1^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{F_y}{\cos \theta} \quad (11)$$

式中  $f_1$ ——滑动摩擦力, N

假设刀具运动始终处于同一平面内(图4b中切割平面),则Z方向受力平衡条件为

$$N_1 = \frac{N_2 \cos(\delta + \theta)}{\cos \theta} \quad (12)$$

X方向受力平衡条件为

$$P = P_1 + \frac{N}{\cos^2 \theta} \sin(\delta + 2\theta) \quad (13)$$

式中  $P$ ——切割所需克服阻力, N

$P_1$ ——刀具刃口正压力, N

由式(13)可知,切割所需克服阻力  $P$  与割刀楔角  $\delta$  成正比。因此楔角大,刀具刃部强度高,但切削阻力大,在满足强度要求的情况下应尽量选较小楔角,也不宜过小,楔角过小易造成刀具蹦刃<sup>[30]</sup>。

### 2.4 刀形参数

#### 2.4.1 河狸下门齿正向轮廓曲线选取

河狸下门齿坚硬且尖锐,啮合时稳定提高压强、降低切削阻力,迅速侵入物料基体表面,并完成刺穿和切断,河狸下门齿外形结构特征有利于高效切割,下门齿几何形态使其具有减阻降耗能力。

以河狸下门齿下齿垫为原点建立直角坐标系  $o-xy$ ,以关键结构特征点  $a \sim g$  (图11a) 表征河狸下门齿关键形态结构,选取的门齿边缘轮廓主要特征

点坐标如表1所示。

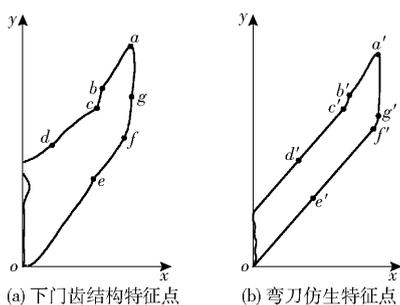


图11 河狸门齿边缘轮廓及特征点

Fig. 11 Edge contour and feature points of beaver incisors

表1 河狸门齿边缘轮廓特征点坐标

Tab. 1 Beaver tooth edge contour feature point

		coordinates							mm
坐标		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	
<i>x</i>		8.34	7.18	4.63	2.09	5.48	7.88	8.34	
<i>y</i>		17.28	13.95	11.61	9.27	6.71	10.11	12.53	

其中 *ab* 段为齿冠面正向轮廓曲线,实现侵彻基体并剪切碎裂物料的功能,点 *a* 为齿尖,是关键切削触点;*bc* 段为内齿面正向轮廓曲线,实现碎料导流以便吞咽或排出口腔的功能;*cd* 段为上齿垫正向轮廓曲线,实现门齿内刃的支承功能;*ef* 段为下齿垫正向轮廓曲线,实现门齿外刃的支承功能,上下齿垫相当于门齿基座,是啮合作用的衔接体;*fg* 段为外齿面正向轮廓曲线,实现正压钳住物料并向舌侧导流的功能;*ga* 段为外齿面正向轮廓曲线,实现动态滑切及自磨刃功能;为了提高青饲料切碎质量、减少功耗,选择河狸下门齿齿垫以上部分的主要功能结构参数作为仿生耦元,确定弯刀刀形参数。

#### 2.4.2 刀形参数设计

不同青饲料物理性质差异较大,为适应不同青饲料切碎要求,减少不同物料切碎工况差异和物料滑移,综合现有平板直刀和滚筒结构特征,在现有平板直刀基体上重构刀头,仿生河狸下门齿功能结构设计青饲料切碎刀具刀形,平板直刀结构及参数如图12所示。对应河狸下门齿结构特征点 *a* ~ *g*,优化组合仿生特征点 *a'* ~ *g'* (图11b),优化拟合门齿边缘轮廓后主要仿生曲线特征点坐标如表2所示。

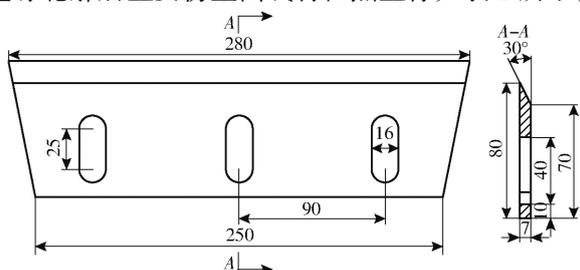


图12 现有平板直刀结构示意图

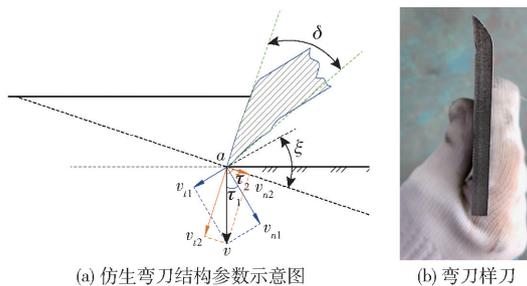
Fig. 12 Structural diagram of active flat blade

表2 仿生弯刀轮廓特征点坐标

Tab. 2 Bionic curved blade contour feature point

		coordinates							mm
坐标		<i>a'</i>	<i>b'</i>	<i>c'</i>	<i>d'</i>	<i>e'</i>	<i>f'</i>	<i>g'</i>	
<i>x</i>		8.48	7.16	6.36	4.02	4.98	9.42	9.69	
<i>y</i>		16.85	13.62	11.52	8.98	5.65	10.78	11.88	

得到刀具基本构型如图11b所示。简化 *cd*、*ef* 段曲线为直线并与平板直刀正向轮廓截线吻合 (*c'd'*、*e'f'* 段),保持点 *d'*、*e'* 至刀具基体末端为直刀正向轮廓截线;为减少高速滚切作业时碎料在导流段 (*b'c'*) 堵塞,缩短 *b'c'* 步长并微调该曲线弧长;*a'b'*、*a'g'* 段保持与 *ab*、*ag* 段楔角一致,为提高刀具耐磨性及使用寿命,适当延长 *a'g'* 步长并微调该曲线弧长;为降低刀具制造难度,同时保证钳住角,缩短 *g'f'* 步长并微调该曲线弧长。依次连接 *a'b'*、*b'c'*、*c'd'* 并圆滑过渡组成内刀面,依次连接 *a'g'*、*g'f'*、*f'e'* 并圆滑过渡组成外刀面,内外刀面围合包络成切碎弯刀刀头,仿生弯刀刀形结构如图13a所示。为适配现有滚筒且保证物料完整切碎,刀具长度为280 cm,宽度80 cm。



(a) 仿生弯刀结构参数示意图

(b) 弯刀样刀

图13 仿生弯刀结构参数示意图

Fig. 13 Bionic curved blade structure parameters schematic

采用多弧段曲线设计切碎刀具刀形,刀头可有效钳住物料,并完成动态滑切,同时通过内外刀面的多组切向角进行诱导,产生更多的滑切裂纹,使物料更容易切断。增大切碎区域面积,减小切削阻力,减少物料茎秆滑移现象。刀具材料为65Mn钢,冷折弯成型,刀具刃口进行高频淬火(等温淬火加热温度为850℃、硬度40HRC,电流频率85 Hz,加热10 min)、回火热处理(回火温度460℃,回火时间60~70 min,出炉后用温水冷却),不加涂层,加工弯刀样刀如图13b所示。结合图5b门齿特征,取滑切角  $\tau$  为35°,内滑切角  $\tau_1$  为25°~35°,外滑切角  $\tau_2$  为65°~75°;取钳住角  $\xi$  为40°~50°;根据河狸下门齿截面特征(图6b),取楔角  $\delta$  为20°~30°。

### 3 刀形参数确定

经理论推导,动刀滚切过程的切碎质量、切削阻力、物料滑移量、刀具寿命等与滑切角  $\tau$ 、内滑切角

$\tau_1$ 、外滑切角  $\tau_2$ 、钳住角  $\xi$ 、楔角  $\delta$  等刀具关键参数有关,为探明刀具刀形各参数对收获切碎效果的影响规律,确定仿生切碎刀具刀形最佳组合参数,搭建台架进行试验研究。

### 3.1 试验条件

2022年8月在山东五征高北农牧机械有限公司试验基地进行切碎弯刀台架试验,选取具代表性的青贮玉米为试验原料,切碎试验台架由抛送装置、驱动电机组、切碎装置、喂入压扁装置、下料仓、喂料装置、籽粒破碎装置、主机架、地轮等组成,依托山东五征集团有限公司制造基地加工若干不同结构参数的仿生弯刀,并安装在现有滚筒上,集成到切碎装置完成试验,如图14b所示。



图14 切碎弯刀台架试验

Fig. 14 Bench tests of chopping curved blade

- 1. 抛送装置 2. 驱动电机组 3. 切碎装置 4. 喂入压扁装置
- 5. 下料仓 6. 喂料装置 7. 籽粒破碎装置 8. 主机架 9. 地轮

试验原料为日照市种植的鲁单510全株青贮玉米,试验所取原料为人工收割,留茬10~15cm,茎秆平均直径22cm,平均含水率60%,平均株高220cm,试验在样本采集完成后2h内进行,试验时采用装载机从下料仓均匀进料(喂入量为30t/h)。其他试验设备包括:合众机械QDHZ-ZL926型轮式装载机、Meilen MTC005型电子秤、卷尺、格兰仕G90F25CN3LN型微波炉。

### 3.2 试验方法

台架试验按照JB/T 7144—2007《青饲料切碎机》、JB/T 9707—2013《铡草机》试验方法,为确定该仿生切碎弯刀最佳结构参数,选用干物质含量较高的全株青贮玉米为试验原料(平板直刀切碎低含水率秸秆滑移更显著),采用正交试验方法,以钳住角40°~48°、内滑切角25°~33°、外滑切角65°~73°、楔角20°~28°为试验因素,设计四因素五水平正交试验,以标准草长率、破节率和斜茬率为试验指标。试验因素水平如表3所示。

各试验指标计算公式为

$$S_c = \frac{G_c}{G_y} \times 100\% \quad (14)$$

$$S_x = \frac{G_x}{G_y} \times 100\% \quad (15)$$

$$S_p = \frac{G_p}{G_i} \times 100\% \quad (16)$$

式中  $S_c$ ——标准草长率, %  
 $G_c$ ——样本中标准草总质量, g  
 $G_y$ ——样本总质量, g  
 $S_x$ ——斜茬率, %  
 $G_x$ ——样本中草节断面平面与草节长边平面夹角大于20°的斜茬草总质量, g  
 $S_p$ ——破节率, %  
 $G_p$ ——样本中草节被压扁或破成两瓣以上的带节草总质量, g  
 $G_i$ ——样本中带节草总质量, g

表3 试验因素水平

Tab. 3 Test factors and levels

水平	因素			
	钳住角/ (°)	内滑切角/ (°)	外滑切角/ (°)	楔角/(°)
1	40	25	65	20
2	42	27	67	22
3	44	29	69	24
4	46	31	71	26
5	48	33	73	28

### 3.3 试验结果分析

除表3中4个因素外,设定其他因素保持不变,各关键装置以青贮收获机田间作业设定参数运行,按照试验要求完成试验数据统计与分析,试验方案和结果如表4( $x_1, x_2, x_3, x_4$ 为因素水平值)所示。

台架试运转完成后,保持以下作业参数进行试验:压扁装置喂入线速度为2.5m/s,切碎装置转速为1210r/min,动刀数量为8。代入

$$l_t = \frac{v_w}{n_q z} \times 60 \times 10^3 \quad (17)$$

式中  $l_t$ ——理论切段长度, mm  
 $v_w$ ——压扁装置喂入线速度, m/s  
 $n_q$ ——切碎装置转速, r/min  
 $z$ ——动刀片数量

计算得理论切段长度为15.5mm,切碎后切段长度在0.7~1.2倍理论切碎长度为标准草,即处于10.8~18.6mm区间。

由表4可知,4个因素对标准草长率的影响主次顺序为  $x_1 > x_3 > x_4 > x_2$ 。为满足饲喂标准,要求尽可能提高标准草长率,则应选择各因素所对应的  $K_c$  中的最大值作为青饲料切碎弯刀结构参数的最优水平,即:钳住角为46°、内滑切角为29°、外滑切角为67°、楔角为28°;4个因素对斜茬率的影响主次顺序为  $x_1 > x_2 > x_3 > x_4$ ,要求尽可能降低斜茬率,则应

表4 正交试验结果

Tab.4 Results of orthogonal test

试验号	因素				标准 草长 率/%	斜茬 率/%	破节 率/%
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$			
1	1	1	1	1	92.38	3.74	91.78
2	1	2	2	2	91.23	2.97	94.37
3	1	3	3	3	92.40	6.38	95.44
4	1	4	4	4	92.03	5.18	93.22
5	1	5	5	5	91.46	3.95	92.66
6	2	1	2	3	89.00	3.83	93.07
7	2	2	3	4	88.27	4.48	93.81
8	2	3	4	5	88.31	4.91	91.11
9	2	4	5	1	86.65	5.67	93.25
10	2	5	1	2	87.21	2.18	96.32
11	3	1	3	5	90.07	2.39	97.40
12	3	2	4	1	89.53	3.33	93.49
13	3	3	5	2	91.67	4.82	95.03
14	3	4	1	3	89.21	3.41	95.13
15	3	5	2	4	91.30	3.98	94.15
16	4	1	4	2	91.62	2.67	92.76
17	4	2	5	3	89.11	1.74	96.88
18	4	3	1	4	90.41	3.12	94.93
19	4	4	2	5	95.84	2.84	95.46
20	4	5	3	1	93.67	2.14	95.49
21	5	1	5	4	88.30	1.60	89.08
22	5	2	1	5	89.11	3.97	92.06
23	5	3	2	1	90.17	2.96	90.88
24	5	4	3	2	85.16	3.57	91.07
25	5	5	4	3	87.67	4.11	88.82
标准草 长率	$K_{c1}$	459.5	451.4	448.3	452.4		
	$K_{c2}$	439.4	447.2	457.5	446.9		
	$K_{c3}$	451.8	452.9	449.6	447.4		
	$K_{c4}$	460.6	448.9	449.2	450.3		
	$K_{c5}$	440.4	451.3	447.2	454.8		
	$R_c$	21.2	5.7	10.3	7.9		
斜茬率	$K_{x1}$	22.2	14.2	16.4	17.8		
	$K_{x2}$	21.1	16.5	16.6	16.2		
	$K_{x3}$	17.9	22.2	19.0	19.5		
	$K_{x4}$	12.5	20.7	20.2	18.4		
	$K_{x5}$	16.2	16.4	17.8	18.1		
	$R_x$	9.7	8.0	3.8	3.3		
破节率	$K_{p1}$	467.5	464.1	470.2	464.9		
	$K_{p2}$	467.6	470.6	467.9	469.6		
	$K_{p3}$	475.2	467.4	473.2	469.3		
	$K_{p4}$	475.5	468.1	459.4	465.2		
	$K_{p5}$	451.9	467.4	466.9	468.7		
	$R_p$	23.6	6.5	13.8	4.7		

选择  $K_x$  中的最小值作为最优水平,即: 钳住角为  $46^\circ$ 、内滑切角为  $25^\circ$ 、外滑切角为  $65^\circ$ 、楔角为  $22^\circ$ ; 同理,破节率应选参数组合为: 钳住角  $46^\circ$ 、内滑切角  $27^\circ$ 、外滑切角  $69^\circ$ 、楔角  $22^\circ$ 。实际作业中,在保

证标准草长率的同时,必须严格满足斜茬率和破节率的标准要求(收获标准草长率大于等于  $85\%$ 、收获斜茬率小于等于  $5\%$ 、破节率大于等于  $60\%$ (优质奶牛场要求大于等于  $95\%$ ))。结合河狸下门齿特征参数,综合选取刀具结构参数: 钳住角为  $46^\circ$ 、内滑切角为  $31^\circ$ 、外滑切角为  $67^\circ$ 、楔角为  $28^\circ$ 。该结构参数组合的切碎刀具台架试验切碎结果为标准草长率  $95.84\%$ 、斜茬率  $2.84\%$ 、破节率  $95.46\%$ 。

## 4 田间试验验证

滑切时必定存在滑移,因此导致一般刀具切碎时切段长度超长、作物适应性低,为验证该仿生切碎弯刀克服物料滑移和作物适应性的能力,保持台架试验时作业参数,将钳住角为  $46^\circ$ 、内滑切角为  $31^\circ$ 、外滑切角为  $67^\circ$ 、楔角为  $28^\circ$  刀具装机进行田间试验。

### 4.1 试验条件

试验分别于2023年5月23日、9月16日、10月17日在山东五征高北农牧机械有限公司试验基地进行,根据“农业部关于印发《全国种植业结构调整规划(2016—2020年)》的通知”选择具代表性的黑麦草(高韧性、茎秆中空易滑移、矮秆青饲料代表)、全株青贮玉米(最具代表性的青饲料,高秆)和成熟饲用甜高粱(富含蛋白和糖,多汁易堵,高秆)田间收获试验,试验后物料直接裹包青贮,试验基地黑麦草、青贮玉米、甜高粱种植模式均为平作种植,黑麦草收后轮作青贮玉米、甜高粱,种植方式为机直播,黑麦草行距  $15\text{ cm}$ 、株距  $5\text{ cm}$ ,青贮玉米行距  $30\text{ cm}$ 、株距  $20\text{ cm}$ ,甜高粱行距  $30\text{ cm}$ 、株距  $15\text{ cm}$ ,均无倒伏现象。作业样机为山东五征高北农牧机械有限公司生产的4QZ-30型自走式青饲料收获机(割幅  $2.2\text{ m}$ 、料斗满载  $2\text{ t}$ ),作业样机为装配该仿生切碎刀具的同台车辆。试验原料分别为冬牧70黑麦草、郑青贮1号全株青贮玉米和大力士饲用甜高粱,黑麦草茎秆平均直径  $6\text{ cm}$ 、平均株高  $155\text{ cm}$ 、平均含水率  $56\%$ ;青贮玉米茎秆平均直径  $18\text{ cm}$ 、平均株高  $180\text{ cm}$ 、平均含水率  $67\%$ ;甜高粱茎秆平均直径  $12\text{ cm}$ 、平均株高  $173\text{ cm}$ 、平均含水率  $68\%$ 。其他试验设备有:Meilen MTC005型电子秤、卷尺、格兰仕 G90F25CN3LN型微波炉。

### 4.2 试验方法

田间试验按照 NY/T 2008—2011《玉米青贮收获机作业质量》、JB/T 7144—2007《青饲料切碎机》试验方法,作业速度设定为  $6\text{ km/h}$ 、喂入量为  $8\text{ kg/s}$ ,以台架试验时的作业参数开始收获至收满料斗为

止。从收获的物料中随机取 5 个 2 kg 样本,计算各样本的标准草长率  $S_c$ 、斜茬率  $S_x$ 和破节率  $S_p$ 。

田间试验和收获效果如图 15 所示,田间试验结果如图 16 所示。

### 4.3 试验结果分析

田间试验结果表明,该仿生切碎弯刀装机后自走式青饲料收获机各系统均运转正常,性能稳定,收获作业效果良好。

机械运转过程中,切碎装置切碎平顺,物料输送流畅,切碎物料切段均匀,作物适应性强。黑麦草田间收获试验平均标准草长率为 91.95%、平均斜茬率为 3.31%、平均破节率为 96.11%;全株青贮玉米田间收获试验平均标准草长率为 95.62%、平均斜茬率为 3.81%、平均破节率为 96.32%,甜高粱田间收获试验平均标准草长率为 92.60%、平均斜茬率为 4.06%、平均破节率为 96.03%,符合国家农业行业标准,均满足牛羊等饲喂要求。



图 15 田间收获试验

Fig. 15 Field harvesting experiments

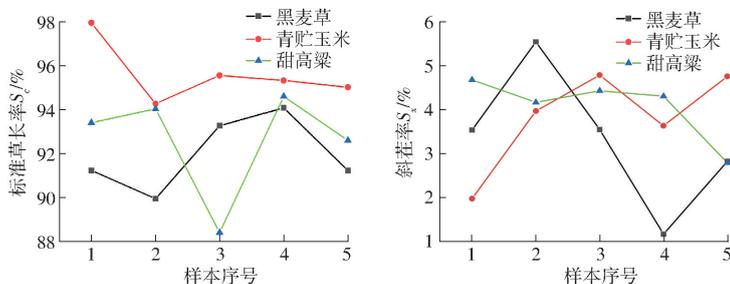


图 16 田间收获试验结果

Fig. 16 Results of field harvest experiments

## 5 结论

(1) 针对现有平板直刀式切碎刀具作业时滑移严重、切碎均匀性差、作物适应性差的问题,仿生河狸下门齿功能结构设计了切碎弯刀刀形,结合下门齿轮廓结构基础,综合分析切削时运动、受力关系,确定了切碎弯刀刀头主要结构参数范围,该结构诱导切碎时产生更多的滑切裂纹,减小了切削阻力和茎秆滑移现象。

(2) 采用四因素五水平正交试验研究钳住角、内滑切角、外滑切角、楔角对切碎标准草长率、斜茬率、破节率的影响。台架试验结果表明,提高标准草长率最佳结构参数为:钳住角  $46^\circ$ 、内滑切角  $29^\circ$ 、外滑切角  $67^\circ$ 、楔角  $28^\circ$ ;降低斜茬率最佳结构参数为:钳住角  $46^\circ$ 、内滑切角  $25^\circ$ 、外滑切角  $65^\circ$ 、楔角  $22^\circ$ ;

提高破节率最佳结构参数为:钳住角  $46^\circ$ 、内滑切角  $27^\circ$ 、外滑切角  $69^\circ$ 、楔角  $22^\circ$ ;综合河狸下门齿功能结构,确定刀头参数钳住角为  $46^\circ$ 、内滑切角为  $31^\circ$ 、外滑切角为  $67^\circ$ 、楔角为  $28^\circ$ ,该结构参数的切碎刀具对应的标准草长率为 95.84%、斜茬率为 2.84%、破节率为 95.46%,优于国家行业标准。

(3) 田间验证试验表明,仿生切碎弯刀装机后收获机田间试验各系统均运转稳定,切碎平顺,物料输送流畅,切段均匀,作物适应性强。黑麦草田间收获平均标准草长率为 91.95%、平均斜茬率为 3.31%、平均破节率为 96.11%;全株青贮玉米田间收获平均标准草长率为 95.62%、平均斜茬率为 3.81%、平均破节率为 96.32%,甜高粱田间收获平均标准草长率为 92.60%、平均斜茬率为 4.06%、平均破节率为 96.03%,各项性能指标均符合国家行业标准。

### 参考文献

[1] 国务院办公厅. 关于促进畜牧业高质量发展的意见 (国办发[2020]31号) [EB/OL]. (2020-09-14) [http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-09/27/content\\_5547612.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-09/27/content_5547612.htm).  
 [2] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1-25.

- WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1-25. (in Chinese)
- [3] 赵云, 谢开云, 万江春, 等. 粮草兼顾型畜牧业饲草料发展现状及展望[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 653-660.
- ZHAO Yun, XIE Kaiyun, WAN Jiangchun, et al. Development and prospects of 'grain-forage supply' in modern animal husbandry[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(3): 653-660. (in Chinese)
- [4] 农业农村部. 关于印发《“十四五”全国畜牧兽医行业发展规划》的通知(农牧发〔2021〕37号)[EB/OL]. (2021-12-14) [http://www.moa.gov.cn/govpublic/xmsyj/202112/t20211220\\_6385081.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/xmsyj/202112/t20211220_6385081.htm).
- [5] SHAANI Y, NIKBACHAT M, YOSEF E, et al. Effect of feeding long or short wheat hay v. wheat silage in the ration of lactating cows on intake, milk production and digestibility[J]. Animal, 2017, 11(12): 2203-2210.
- [6] HE Zhitao, DING Huiling, DU Sanming, et al. Research on cutting characteristics of fiber bundle with high-speed photography [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(3): 94-99.
- [7] 张喜瑞, 杨幼铭, 刘宏新, 等. 双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 36-49.
- ZHANG Xirui, YANG Youming, LIU Hongxin, et al. Optimal design and experiment of double fixed knife slip-cutting and anti-tangle banana straw crushing and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 36-49. (in Chinese)
- [8] CHEN Meizhou, XU Guangfei, WEI Maojian, et al. Optimization design and experiment on feeding and chopping device of silage maize harvester[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(3): 64-75.
- [9] 王金栋, 谢宇鸿, 陈焱, 等. 基于河狸门齿的锤片式粉碎机锤片仿生设计[J]. 工程设计学报, 2023, 30(4): 476-484.
- WANG Jindong, XIE Yuhong, CHEN Yi, et al. Biomimetic design of hammer pieces for hammer mill based on beaver incisors [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(4): 476-484. (in Chinese)
- [10] 刘杰. 可折叠式青贮机割台系统设计[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2023.
- LIU Jie. Design of table cutting system for foldable silage machine [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2023. (in Chinese)
- [11] 蒋亚军, 廖宜涛, 廖庆喜. 冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 102-111.
- JIANG Yajun, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Design and experiment on cylinder-type chopping device of harvester for fodder rapeseed in winter and spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 102-111. (in Chinese)
- [12] 尤泳, 王红达, 郇晓龙, 等. 王草收获机滚筒破碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 134-142.
- YOU Yong, WANG Hongda, HUAN Xiaolong, et al. Design and experiment of roller crushing device of king grass harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 134-142. (in Chinese)
- [13] 薛振鹏. 基于仿生功能模块的青贮装备割台设计[D]. 济南: 济南大学, 2022.
- XUE Zhenpeng. Design of cutting platform for silage equipment based on bionic function module [D]. Jinan: University of Jinan, 2022. (in Chinese)
- [14] ZHAO J L, GUO M Z, LU Y, et al. Design of bionic locust mouthparts stubble cutting device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 20-28.
- [15] 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.
- [16] 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(2): 1-8.
- [17] 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.
- [18] 陆锦. 联合收获机秸秆切碎装置的仿生刀片的设计及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- LU Jin. Design and experimental study of bionic knives for the straw chopping device of combined harvester [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [19] 赵竹. 玉米收获机纵置切碎装置切刀-秸秆互作机理及刀刃仿生研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- ZHAO Zhu. Cutter-straw interaction mechanism of the longitudinal chopping device for the corn harvester and a study of the bionic blade [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [20] 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.
- 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 CSAE, 2022, 38(12): 48-56. (in Chinese)
- [21] 郭超凡, 李粤, 姚德宇, 等. 仿生香蕉秸秆粉碎装置关键部件作业参数优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 93-100.
- GUO Chaofan, LI Yue, YAO Deyu, et al. Optimization and experiment of operating parameters of key components of bionic banana straw crushing devices [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(1): 93-100. (in Chinese)
- [22] DEGHAN-HESAR H, KALANTARI D. Design and evaluation of two new biomimetic blades for reducing the shear energy required for cutting herbal plants [J]. Journal of Iranian Agricultural Machinery, 2019, 9(2): 265-278.

- [13] 武娟娟. 输水渠道桥梁墩柱绕流特性及减阻技术研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.  
WU Juanjuan. Research on flow characteristics and drag reduction technology around bridge piers in water conveyance channels [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022. (in Chinese)
- [14] 鲁胜龙, 朱金, 蒋尚君, 等. 孤立波作用下圆柱桩波浪力计算方法研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(14): 11-19.  
LU Shenglong, ZHU Jin, JIANG Shangjun, et al. Research on wave force calculation method of cylindrical piles under the action of solitary waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(14): 11-19. (in Chinese)
- [15] 刘鸿文. 材料力学 II [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [16] 由佳翰. 4JSM-2000型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.  
YOU Jiahao. Design and test of 4JSM-2000 cotton stalk crushing and residual film recovery combined machine [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [17] 梁荣庆. 多刃齿刀式棉田机收膜杂切碎特性研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.  
LIANG Rongqing. Research on the characteristics of film harvesting and shredding of multi-blade toothed cotton field machines [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)
- [18] 曹肆林, 谢建华, 杨豫新, 等. 侧排式棉秸秆还田及残地膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(5): 1514-1528.  
CAO Silin, XIE Jianhua, YANG Yuxin, et al. Design and test of side-discharge cotton straw returning and residual mulch film recycling combined operation machine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5): 1514-1528. (in Chinese)
- [19] 殷仁强. S型波状挡边带式输送机关键部件设计及改进研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.  
YIN Renqiang. Research on the design and improvement of key components of S-shaped corrugated side belt conveyor [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017. (in Chinese)
- [20] 吴燕. 涡旋水流清洗技术的机理与实验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.  
WU Yan. Mechanism and experimental study of vortex flow cleaning technology [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015. (in Chinese)
- [21] 王启才. 离心式水泵计算机辅助选型与能效计算研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.  
WANG Qicai. Research on computer-aided selection and energy efficiency calculation of centrifugal water pumps [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018. (in Chinese)
- [22] 周恩涛. 液压系统设计元器件选型手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [23] 张佳, 王宏, 尹君驰, 等. 铲筛式残膜回收机分离机构的设计及试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 184-189.  
ZHANG Jia, WANG Hong, YIN Junchi, et al. Design and test of separation mechanism of shovel-type residual film recovery machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 184-189. (in Chinese)

(上接第 396 页)

- [23] LI C Y, JIA H L, ZHANG Z H, et al. Bionic sawblade based on grasshopper incisor for corn stalk cutting [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 461: 491-498.
- [24] TANG H, JIANG Y, WANG J, et al. Bionic design and parameter optimization of rotating and fixed stem- and leaf-cutting devices for carrot combine harvesters [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(2): 1-14.
- [25] XIE F, ZHAO J W, JU F. The point cloud collection of the incisor teeth of beaver and re-construction of its curved surface [J]. Advanced Materials Research, 2012, 426: 387-390.
- [26] CHANG Z, LIU W, TONG J, et al. Design and experiments of biomimetic stubble cutter [J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(2): 335-343.
- [27] 陈涛, 宋立星, 李素燕, 等. 渐变强化刃刀具硬切削过程切屑流动和刀具磨损研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 195-200.  
CHEN Tao, SONG Lixing, LI Suyan, et al. Research into chip flow and tool wear in hard cutting using tool with variable strengthening edge [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 195-200. (in Chinese)
- [28] 王宏立, 王文春, 杨天维, 等. 青饲机平板刀式滚筒切碎器的设计研究 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 16(3): 49-52.  
WANG Hongli, WANG Wenchun, YANG Tianwei, et al. Design on plane table-knife drum cutter of the verdant forage harvester [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2004, 16(3): 49-52. (in Chinese)
- [29] 庞声海, 王乃信. 直刀刃滚刀式切碎器的分析与设计 [J]. 农业机械学报, 1983, 14(2): 46-54.  
PANG Shenghai, WANG Naixin. Analysis and design on the cylinder-type forage cutterhead with straight knife edge [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 14(2): 46-54. (in Chinese)
- [30] 刘志刚. 典型沙生灌木平茬技术与机具研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2013.  
LIU Zhigang. Study on typical sandy shrub stumping technology and equipment [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)