

王草收获机滚筒破碎装置设计与试验

尤泳 王红达 郇晓龙 王德成 康琛琛 叶炳南
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 根据王草分蘖能力强、生物量大、含水率高的特点,基于王草机械化收获的农艺要求优化设计了一种4排人字形滚筒破碎装置。通过理论分析及计算确定了破碎装置主要结构及参数,通过单因素试验与二次正交旋转组合试验研究了喂入辊转速、破碎辊转速对茎秆破碎合格率、平均长度的影响,采用 Design-Expert 软件对试验结果进行了响应面分析、回归分析及目标优化,得到试验因素与评价指标间的回归方程,并获得最佳参数组合。结果显示:通过单因素试验确定喂入辊、破碎辊的转速范围分别为 380 ~ 480 r/min、750 ~ 950 r/min;通过二次旋转正交试验及目标优化得到最优参数组合为:喂入辊转速 416.5 r/min、破碎辊转速 950 r/min,此时茎秆破碎合格率为 98.30%、破碎茎秆平均长度为 29.04 mm;台架试验及整机田间收获试验表明,该装置破碎效果均匀,茎秆破碎合格率达 98%,破碎茎秆的平均长度小于 30 mm,满足滚筒式破碎装置设计要求。

关键词: 王草收获机; 滚筒破碎装置; 性能试验

中图分类号: S817.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0134-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Roller Crushing Device of King Grass Harvester

YOU Yong WANG Hongda HUAN Xiaolong WANG Decheng KANG Chenchen YE Bingnan
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: King grass has strong tiller ability, with high stalk fiber content and high moisture content. Based on the crushing device of forage harvester, a roller crushing device suitable for harvesting king grass was designed according to the demand of harvesting. The main structure and parameters were determined through theoretical analysis. The crushing knife of the device adopted a four-row symmetrical arrangement, which could effectively reduce the fatigue damage caused by the alternating introduction. A single factor test and a combined quadratic orthogonal rotation test were designed to explore the influence of rotating speed of feeding roller and the crushing roller on the evaluation indicators: stalk crushing pass rate and average length. Response surface analysis, regression analysis and target optimization were carried out on the results by Design-Expert. Regression equations and optimal combinations of parameters between the test factors and evaluation indicators were obtained. The results of single factor test revealed that the rotating speed ranges of the feeding roller and the crushing roller were 380 ~ 480 r/min and 750 ~ 950 r/min, respectively. Quadratic rotation orthogonal test and target optimization obtained the optimal combination as follows: the feed roller rotating speed was 416.5 r/min, the crushing roller rotating speed was 950 r/min, the qualified rate of stalk crushing was 98.30%, and the average length of broken stalks was 29.04 mm. The bench test verification and the field test revealed that it had a uniform crushing effect, a high pass rate of stalk crushing and the average length met the requirements, which met the design requirements of the roller crushing device.

Key words: king grass harvester; roller crushing device; performance testing

0 引言

王草是优质饲草,具有供草期长、生物量大、可

食用比例高、营养价值高等特点^[1-3],对我国畜牧业的发展有重要意义,研制高效的王草收获机械与装备可促进王草种植资源的开发与利用。

收稿日期: 2021-01-07 修回日期: 2021-02-01
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701705)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-34)
作者简介: 尤泳(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事草业机械工程技术研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

国内外饲草收获机械主要针对青贮玉米、亚麻等作物,其主要工作部件可分为割台系统、喂入系统、破碎系统、抛送系统等,其中破碎装置是保证切碎均匀性的关键部件。国外饲草收获机械破碎装置多采用滚筒式,采用液压驱动可实现对切碎长度的无级调节、对喂入量波动适应性强、切割阻力均匀,搭配具有揉搓功能的粉碎辊,能够破碎均匀、粉碎细致,收获效率可达 15 ~ 100 t/h^[4-7],但其价格昂贵,不适应我国小地形作业需求。国内饲草作物收获机破碎装置主要采用盘刀式、滚筒式,其中滚筒式破碎装置结构紧凑,应用较为广泛^[8-9]。贾春阳^[10]设计的穗茎兼收型玉米收获机秸秆破碎装置采用双排人字形布置,可完成茎秆破碎,但切碎长度离散度较大,均匀性较差;梁荣庆等^[11]设计的青贮玉米收获机采用盘刀式切碎装置,可实现青贮玉米的收获和破碎,但适用于小喂入量收获;张银平等^[12]设计的穗茎兼收型玉米收获机采用滚筒式切碎装置,但未对破碎装置具体设计及切碎质量的影响进行研究。

现有收获机械对王草分蘖能力强、生长不均的特点适应性较差,存在喂入不均、切割不齐等问题。本文根据王草生长特性,在现有收获机破碎装置的基础上,设计 4 排人字形滚筒破碎装置,通过试验确定其最佳工作参数,以期提高王草机械化收获水平。

1 王草生长特性

簇生王草刈割期株高达 2 m,年刈割 4 ~ 7 次,鲜草产量达 300 t/hm²,营养丰富,饲喂价值高;单株分蘖数可达 26,且各株分蘖数存在差异;刈割期王草含水率达 90% 左右,且韧性及抗剪能力强,收获难度较大^[13-14]。据测量,70% ~ 90% 含水率下茎秆抗拉强度平均为 55.89 MPa,抗剪强度为 21.63 MPa。

使用传统高茎秆类饲料作物收获装备对簇生王草进行收获时存在喂入量大,喂入、切割不均等问题,所收获破碎王草段牲畜采食率低。本次试验所用王草取自河北省石家庄市无极县北苏镇,王草种植状态如图 1 所示。

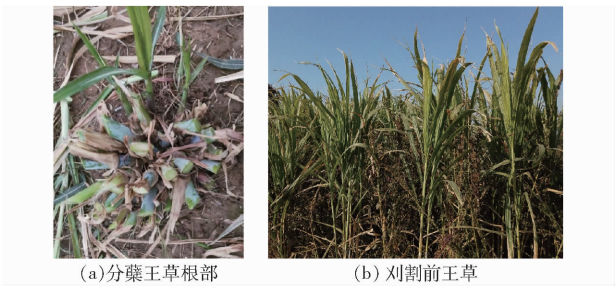


图 1 王草生长状态
Fig. 1 Growth status of king grass

2 王草收获机总体结构与工作过程

2.1 总体结构

王草收获机主要由割台总成、喂入装置、滚筒破碎装置、抛送装置、集料箱、收获机底盘总成组成,王草多种植于丘陵山地,面积较小,采用履带式收获机通用底盘实现小地块灵活收获作业,收获模块功能如图 2 所示。

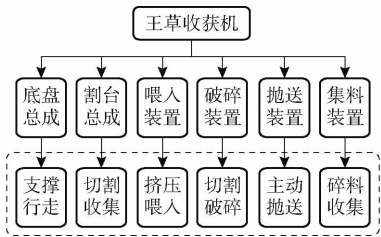


图 2 王草收获机模块功能图

Fig. 2 Functions of king grass harvester modules

将王草收获机分为六大模块,对各模块进行针对性设计可有效提高设计效率,其中底盘总成与常用履带式稻麦联合收获机所用底盘相同;割台部件为针对簇生王草设计的圆盘式割台;喂入装置采用喂入螺旋输送机及链式输送机相结合的形式;破碎装置是针对王草喂入量大且分布不均所设计的滚筒式破碎装置;抛送装置与集料箱采用现有技术装备,其主要工作部件结构如图 3 所示。

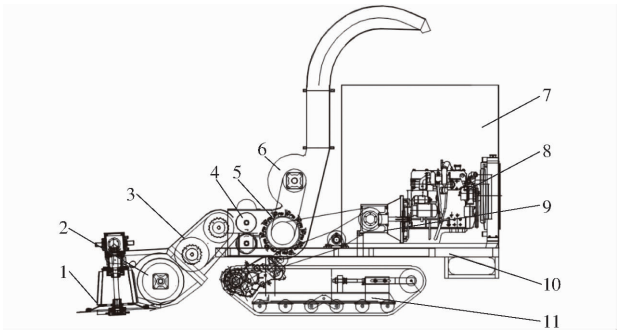


图 3 王草收获机主要工作部件结构图

Fig. 3 Main working parts of king grass harvester

1. 圆盘割刀 2. 驱动变速箱 3. 链耙式输送机 4. 压实喂入装置 5. 滚筒式破碎装置 6. 抛送装置 7. 集料箱 8. 驱动柴油机 9. 变速箱 10. 车体机架 11. 履带式行走底盘

2.2 工作过程

王草收获机收获过程分为以下工作阶段:收割阶段,刈割期簇生王草植株在圆盘式刀盘甩刀作用下完成刈割,并在夹持齿作用下拨至喂入螺旋输送机,完成王草收割;喂入阶段,刈割后王草茎秆在喂入螺旋输送器的作用下输送至链耙式输送机,在齿板作用下王草被夹持喂入形成王草喂入流;破碎阶段,王草喂入流经由链齿式输送机输送至破碎装置,在夹持输送辊的作用下送于定刀与随滚筒式破碎装

置旋转的动刀形成的剪切副,进而完成王草茎秆流的破碎;抛送阶段,破碎后的王草段经过滚筒式破碎装置及抛送叶片离心力作用获得动能,并在抛送叶片转动产生的气流作用下沿抛送筒完成抛送,进入集料箱。

3 滚筒式破碎装置设计

滚筒式破碎装置主要工作部件为喂入辊、定刀、滚筒破碎器、防护罩壳等,其中喂入辊为两辊对置形式,上辊周向布置锯齿板增大对王草喂入流的夹持力,下辊采用光辊防止茎秆缠绕;为适应王草喂入流不均匀波动带来的切碎阻力的波动,在双排布置的基础上,优化采用人字形布置4排刀具,通过滑切作用完成对茎秆的破碎。滚筒式破碎装置整体结构如图4a所示,滚筒式破碎器刀具布置形式如图4b所示。

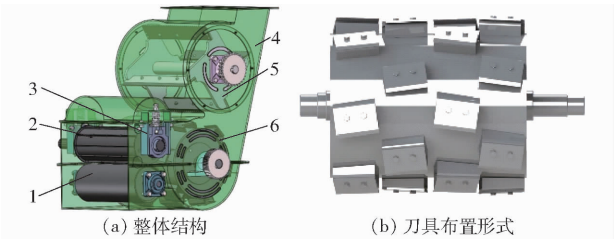


图4 滚筒式破碎装置

Fig. 4 Roller crushing device

1. 喂入光辊 2. 带齿喂入辊 3. 带滑块轴承座 4. 装置罩壳
5. 抛送器 6. 滚筒式破碎器

3.1 喂入夹持机构

簇生王草生物量大,刈割时期、收获机作业速度等均会影响王草喂入量,固定喂入量夹持输送不能适应喂入量的波动,为此设计主要由喂入光辊、带齿喂入辊、带滑块轴承座、弹簧、罩壳等组成的喂入夹持机构,两喂入辊直径相同,如图5所示,其中带齿喂入辊在带滑块轴承座支撑下,沿滑轨上下波动,并通过弹簧恢复力实现喂入辊间隙调整,其中弹簧预紧力通过螺栓调节,从而实现对波动喂入量的适应。

液压马达经减速箱驱动两喂入辊,实现等速反向旋转,并通过调节液压马达转速实现对喂入速度

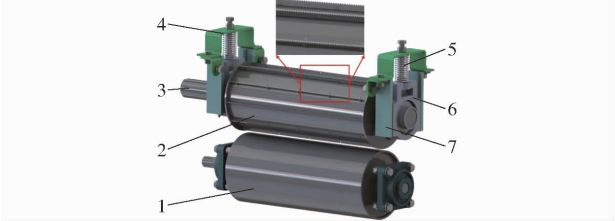


图5 喂入夹持机构调节示意图

Fig. 5 Adjustment function of feeding device mechanism

1. 喂入光辊 2. 带齿喂入辊 3. 万向节驱动花键轴 4. 固定限位装置
5. 弹簧 6. 带滑块轴承座 7. 滑轨

的调节,夹持机构通过两水平对置辊对物料产生的夹持、摩擦作用完成喂入^[15]。为保证喂入顺利、不发生堵塞,上辊采用周向均匀布置夹持锯齿增大摩擦,物料喂入示意图如图6所示。

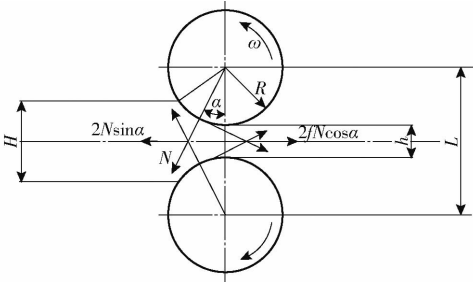


图6 物料喂入过程示意图

Fig. 6 Diagram of feeding process

以物料和喂入辊接触弧中点处对物料进行受力分析,为保证物料顺利喂入,喂入辊转动对物料茎秆的摩擦力应大于其正压力的水平分力,表示为^[16-17]

$$fN\cos\alpha - N\sin\alpha \geq 0$$

(1)

其中

$$f \geq \tan\varphi$$

式中 f ——静摩擦因数,取 0.37^[17]

φ ——喂入辊对物料茎秆的摩擦角,约 20°

N ——喂入辊对茎秆正压力, N

α ——正压力与竖直方向夹角,(°)

由式(1)可得当 $\varphi \geq \alpha$ 时,喂入辊可完成对物料的夹持喂入,由文献[17]可知,喂入辊半径 R 计算式为

$$L = 2R + h = 2R\cos(2\alpha) + H$$

(2)

式中 H ——喂入茎秆流厚度,mm

h ——喂入辊间隙,mm

L ——两辊轴心距,mm

为保证顺利喂入,应满足式(1)条件,即 $\varphi \geq \alpha$,喂入辊半径为

$$R \geq \frac{H - h}{2(1 - \cos(2\varphi))}$$

(3)

令 $\mu = \frac{h}{H}$,为压缩系数,因机型设计喂入量较小,选取 $H = 120$ mm,当压缩系数为 0.6~0.8,其喂入辊半径为 51.3~102.3 mm,其平均值约为 76.8 mm,圆整后取喂入辊半径 $R = 75$ mm,其喂入辊间隙 h 为 72~96 mm。

3.2 破碎装置

滚筒式破碎装置主要工作部件为轴向等距均匀布置的4排刀具,采用平板形动刀片,单排刀具沿周向均匀布置于滚筒座上,且采用人字形布置。相比于双排人字形布置方式,4排均匀布置方式可提高阻力均匀性,降低切割过程中茎秆切割阻力对刀轴的交变作用,降低轴承的磨损及破碎功耗,同时较短

的刀片可增加动定刀间隙均匀性,且可提高滑切角,实现高效破碎切割。如图 7a 所示,切割过程中在动定刀夹角相同的情况下,双排刀具由于存在两动刀间相位差,在相同切割长度下其轴向分力 F_h 及 F'_h 对轴向部件产生扭动载荷,且在转动切割过程中两刀参与切割的有效长度发生变化,使扭动载荷波动,产生交变影响,造成轴承等承载部件疲劳;如图 7b 所示,双排刀具变 4 排刀具,交替布置,使得两刀具同时参与切割, F_{h1} 及 F'_{h1} 相互抵消,可适应喂入不均的王草茎秆流,降低交变载荷对轴承等承载部件疲劳破坏。

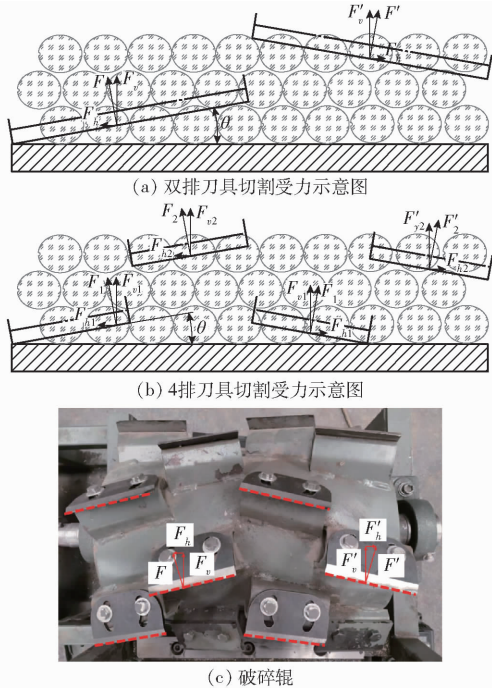


图 7 滚筒破碎装置刀具布置形式

Fig. 7 Arrangement of crushing knives

3.2.1 切割原理与刀具布置

破碎装置刀具为平板形动刀片,采用人字形布置,其刃口与定刀刃口呈一定夹角 θ ,可产生滑切作用,有效降低切割阻力,提高切割效率。以定刀刃口为基准其切割过程如图 8 所示, $P_1P_2Q_2Q_1$ 表示喂入茎秆区, P_1Q_1 表示定刀刃口, mn 表示平行板动刀刃口,当动刀刃口接触喂入区 P_2 时开始压缩切割过程,动刀刃口接触喂入区 Q_1 切割过程结束。

取动刀刃口一点,设其回转半径为 R_d ,滚筒破碎装置的转动角速度为 ω_p ,则该点线速度为 $V = \omega_p R_d$,其方向与定刀刃口 P_1Q_1 垂直,线速度可分解为垂直刃口的砍切速度 V_s 与滑切速度 V_t ,其中 $V_t = V \sin \tau$, τ 为滑切角,则其滑切角越大,滑切速度越大,功耗越低,由图可知刀具夹角 θ 与滑切角 τ 、推挤角 χ 相等。

本设计采用 4 排刀具布置,因整机作业空间限

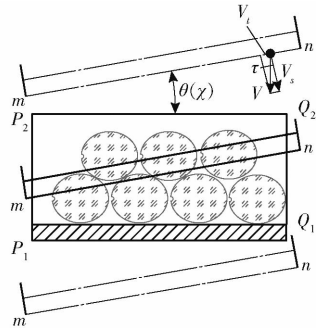


图 8 切割过程示意图

Fig. 8 Diagram of cutting process

制,取破碎滚筒长 440 mm,取刀具长 100 mm,动、定刀间隙取 $\delta = 1 \text{ mm}$ [18-20],动刀刃口长度相比滚筒总长较小,其斜置时刃口直线可近似看作椭圆曲线的一部分,动刀在滚筒式破碎装置的位置参数如图 9 所示。

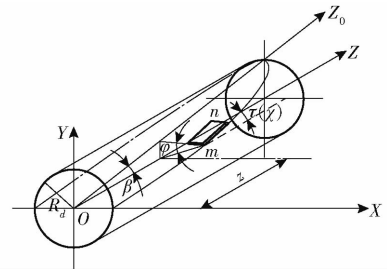


图 9 动刀刃口位置参数

Fig. 9 Position parameter of knife edge

椭圆曲线为动刀底部平面与滚筒圆柱体形成的相贯线,取图中刃口端点 mn ,其坐标可由椭圆曲线方程求得,其中相贯椭圆曲线长轴长度 $a = \frac{R_d}{\sin \beta}$,短轴长度 $b = R_d$,以 XOZ_0 为坐标系,其椭圆曲线方程为 [20]

$$\frac{X^2}{R_d^2} + \frac{Z_0^2}{\left(\frac{R_d}{\sin \beta}\right)^2} = 1 \quad (4)$$

由图 9 可得参数间关系为

$$Z \tan \beta = R_d \sin \gamma \quad (5)$$

式中 Z_0 ——动刀刃口点 m 的 Z 轴坐标

β ——动刀底面平面与 XOZ 平面夹角, ($^\circ$)

R_d ——动刀刃口回转半径,为紧凑设计,取 210 mm

γ ——动刀刃口 m 端安装前倾角, ($^\circ$)

因动刀斜置,其安装前倾角为变量,为保证滚筒破碎装置具有一定抛送能力,参照《农业机械设计手册》取 $\gamma = 40^\circ$,且当滑切角越大时,滑切速度越大,切割力越小,但滑切角增加会对物料形成挤压,影响切割质量,为紧凑设计,取其倾角 $\beta = 4^\circ$,刀具推挤角 χ 及滑切角 τ 取 12° [20-26],设置动定刀间隙 $\delta = 1 \text{ mm}$ 。

3.2.2 理论切割长度

破碎装置工作时,通过动、定刀剪切副将喂入物料切割破碎,其切割长度为单排两相邻刀具切破碎动作间隔时间内的物料进给长度,计算式为

$$l = \frac{60\,000 v_w}{n_p W} \tag{6}$$

其中
$$v_w = \frac{2\pi R n_w}{60\,000} \tag{7}$$

式中 l ——物料切割长度,mm
 v_w ——喂入进给速度,m/s
 n_p ——破碎辊转速,r/min
 W ——单排动刀片布置数量,本设计取 6
 R ——喂入辊半径,mm
 n_w ——喂入辊转速,r/min

参照农业行业标准 NY/T 2088—2011《玉米青贮收获机作业质量》,合格茎秆破碎切割长度由饲喂对象决定,饲喂牛为 30 ~ 50 mm,羊为 20 ~ 30 mm,选取茎秆破碎目标长度为 30 mm,合格茎秆长度 $l \leq 50$ mm,喂入部分采用链耙式输送器,依据文献[20],链耙式输送器输送速度一般为 3 ~ 5 m/s,为保证顺利喂入不堵塞, $v_w \geq v_l$ (v_l 为链耙式输送器输送速度),取最小值 $v_w = 3$ m/s,代入式(6)、(7)可得喂入辊转速 $n_w \geq 382$ r/min,破碎辊转速 n_p 范围为 600 ~ 1 000 r/min。

4 试验

4.1 试验材料

本次试验材料为石家庄市无极县北苏工业园区内的王草,3 个月生长期,选取田间生长状态良好的王草茎秆,离地 50 mm 处切割,茎秆根部平均直径为 30.75 mm,平均株高为 2.07 m,含水率为 90.2%,去除叶片进行试验。

4.2 试验台架

设计并加工与王草收获机滚筒破碎装置原理、尺寸相同的试验台架,该台架由喂入辊、定刀、滚筒式破碎辊、防护罩壳、驱动电机、动态扭矩传感器、机架、防护罩壳等组成,如图 10 所示。试验台架结构简单,喂入对辊转速、滚筒式破碎装置转速、刀具安装角度调节方便,结构可靠。其中采用 JN-DN 型动态扭矩传感器(安徽蚌埠传感器系统工程有限公司,额定转速 6 000 r/min,量程 0 ~ 200 N·m,综合精度 $\pm 0.5\%$)测量滚筒式破碎装置转速、扭矩;采用 VICTOR 6236P 型转速仪(深圳市驿生胜利科技有限公司,准确度 0.5%)测量喂入辊转速;通过电子天平测量破碎物料质量,游标卡尺测量物料破碎长度;工作部件驱动电机通过变频器分

别控制。

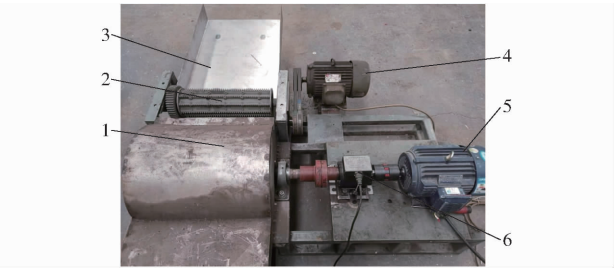


图 10 试验台架

Fig. 10 Test bench

- 1.罩壳及破碎辊 2.挤压喂入辊 3.喂入口 4.喂入驱动电机
5.破碎驱动电机 6.动态扭矩传感器

4.3 试验因素

由第 3 节中设计分析过程可知,茎秆切割破碎平均长度、合格率与喂入辊直径、喂入辊转速、破碎滚筒转速、单排刀具布置数量有关。本文选取喂入辊转速、破碎滚筒转速为试验因素。

试验前,将刈割的王草茎秆按 (2 ± 0.05) kg 每份称取 81 份等待喂入;调整动刀片与定刀距离,安装防护罩壳;试验时,分别启动破碎辊及喂入辊驱动电机,调整变频器使部件工作至试验速度,待作业装置整体稳定后,将物料送入喂入辊;收集切割破碎后的茎秆进行统计测量、称量。

4.4 试验指标

试验以茎秆破碎合格率、破碎茎秆平均长度为评价指标。取破碎后物料质量 $m_w = 500$ g,分选出尺寸大于 50 mm 的物料,并称其质量 m_a ,即为不合格物料质量,称量 3 次取平均值,其破碎合格率 Q 计算式为

$$Q = \frac{m_w - m_a}{m_w} \times 100\% \tag{8}$$

式中 Q ——茎秆破碎合格率, %

破碎茎秆平均长度 $\bar{L}$,通过称取破碎物料 500 g 样品进行测量分级:0 ~ 10 mm、10 ~ 20 mm、20 ~ 30 mm、30 ~ 40 mm、40 ~ 50 mm、50 mm 以上,测量出各等级之间的茎秆平均长度 $\bar{L}_i$ 及相应质量 m_i ,称量测定 3 次,取平均值。依据文献[27]中方法计算破碎茎秆平均长度,其公式为

$$\ln \bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{L}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \tag{9}$$

4.5 单因素试验

4.5.1 喂入辊转速对破碎效果的影响

通过第 3 节分析可知,喂入辊转速应满足 $n_w \geq 382$ r/min,故取其起始转速为 380 r/min,喂入辊转速选取 5 个水平,取破碎滚筒转速 $n_p = 600$ r/min,

刀具安装角 $\theta = 12^\circ$ 。以茎秆破碎合格率及平均长度为指标,试验结果如图 11 所示。

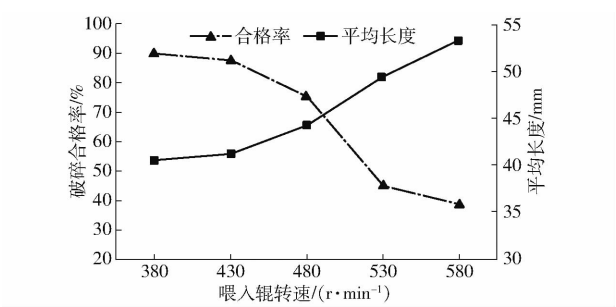


图 11 不同喂入辊转速时的评价指标变化曲线
Fig. 11 Variation curves of evaluation indicators at different feeding rollers rotating speeds

由图 11 可知,当破碎辊转速恒定,喂入辊转速提高时,王草茎秆破碎合格率 Q 于 380 ~ 480 r/min 之间较为稳定;当转速 $n_w > 480$ r/min,物料喂入流速度显著增加,单位时间内剪切副切割次数不变,茎秆切割长度增加, $l > 50$ mm 茎秆数量显著提高,合格率 $Q < 75\%$,茎秆平均长度随之提高。由图 11 可知,当转速 n_w 为 380 ~ 480 r/min,合格率维持在较高水平范围内,且茎秆平均长度 $\bar{L} < 45$ mm,因此选取喂入辊转速 n_w 为 380 ~ 480 r/min。

4.5.2 破碎辊转速对破碎效果的影响

由上文分析设置喂入辊转速为 $n_w = 430$ r/min,破碎辊转速 n_p 范围为 600 ~ 1 000 r/min,取 9 个水平进行试验,其结果如图 12 所示。

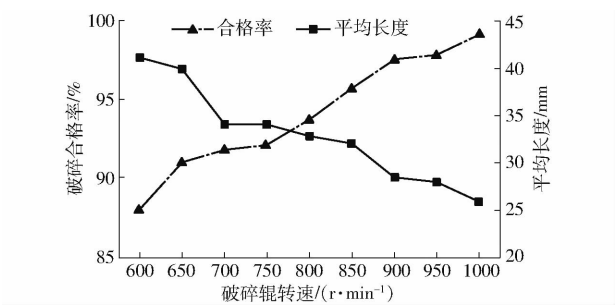


图 12 不同破碎辊转速时的评价指标变化曲线
Fig. 12 Variation curves of evaluation indicators at different crushing rollers rotating speeds

由图 12 可知,当喂入滚筒转速一定,随破碎滚筒转速的提高,合格率随之提高,茎秆平均长度随之降低,因茎秆喂入流速度一定,破碎辊带动动刀单位时间内切割破碎次数增加,茎秆平均长度降低。由图中可知,当破碎滚筒转速升高至 750 r/min 后合格率大于 90%,茎秆平均长度小于 35 mm,合格率较高,破碎较均匀;另因破碎辊转速增加,空气阻力会相应增加,同时维持较高转速所耗功率增加,因此在满足破碎合格率的条件下选取破碎滚筒转速范围 n_p 为 750 ~

950 r/min。

4.6 多因素试验

4.6.1 试验设计

为进一步探究喂入辊转速及破碎辊转速对茎秆破碎合格率、破碎茎秆平均长度的影响,利用 Design-Expert 软件采用 Central Composite 方法进行二次旋转正交试验设计及响应面分析。试验因素编码如表 1 所示。试验方案与结果如表 2 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Experiment factors coding			r/min
编码	因素		
	喂入辊转速 A	破碎辊转速 B	
-1.414	380.00	750.00	
-1	394.64	779.29	
0	430.00	850.00	
1	465.36	920.71	
1.414	480.00	950.00	

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Experimental protocol and results				
试验序号	因素		评价指标	
	喂入辊转速	破碎辊转速	茎秆破碎合	破碎茎秆平均
	A/(r·min ⁻¹)	B/(r·min ⁻¹)	格率 Q/%	长度 $\bar{L}$ /mm
1	394.64	779.29	93.00	34.00
2	465.36	779.29	92.52	36.42
3	394.64	920.71	97.78	29.65
4	465.36	920.71	96.55	30.05
5	380.00	850.00	94.59	31.71
6	480.00	850.00	94.34	33.49
7	430.00	750.00	92.00	36.43
8	430.00	950.00	98.15	29.13
9	430.00	850.00	95.45	32.05
10	430.00	850.00	95.67	31.60
11	430.00	850.00	96.10	32.07
12	430.00	850.00	95.91	32.02
13	430.00	850.00	95.86	32.00

4.6.2 试验结果分析

通过 Design-Expert 软件对结果进行方差分析及回归拟合,其结果如表 3 所示。

表 3 方差分析结果

Tab.3 Result of variance analysis						
方差来源	Q			$\bar{L}$		
	F	P	显著性	F	P	显著性
模型	106.84	<0.000 1	**	362.88	<0.000 1	**
A	6.77	0.035 4	*	105.37	<0.000 1	**
B	486.95	<0.000 1	**	1 638.00	<0.000 1	**
AB	1.79	0.223 1		30.19	0.000 9	**
A ²	33.81	0.000 7	**	16.84	0.004 6	**
B ²	8.68	0.021 5	*	29.10	0.001 0	**
失拟项	1.66	0.310 5		0.711 1	0.594 2	
R ²		0.987 1			0.996 2	

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

通过表 3 可知,对评价指标的分析模型均具有显著性,且失拟项均不显著,表明模型较为稳定,回归方程拟合较好。

对茎秆破碎合格率的影响程度从大到小顺序为: B 、 A^2 、 B^2 、 A ,其中 AB 的交互作用不显著,剔除不显著项,其回归方程为

$$Q = -91.54 + 0.482A + 0.17B - 4.95 \times 10^4 A^2 - 6.3 \times 10^5 B^2 \tag{10}$$

对破碎茎秆平均长度的影响程度从大到小顺序为: B 、 A 、 AB 、 B^2 、 A^2 ,其回归方程为

$$\bar{L} = 78.26 - 0.0062A - 0.078B - 2 \times 10^4 AB + 2.3 \times 10^4 A^2 - 7.5 \times 10^5 B^2 \tag{11}$$

如图 13 所示,当喂入辊转速一定,破碎辊转速增加时,茎秆破碎合格率随之提高,破碎茎秆平均长度随之降低,因茎秆喂入流速度恒定,单位时间内动刀切割次数提高,使得合格率及破碎均匀性提高;同理,当破碎辊转速恒定时,随喂入辊转速提高,茎秆喂入流速度提高,破碎茎秆平均长度随之提高,同时茎秆破碎合格率降低,物料均匀性降低。

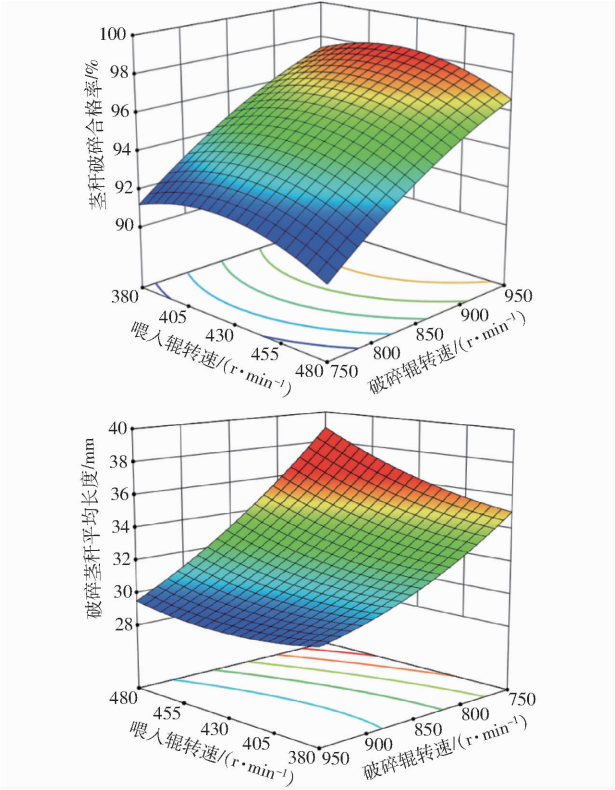


图 13 两因素对评价指标影响的响应曲面
Fig. 13 Response surface of impact of two factors on evaluation indicators

4.6.3 参数优化及验证

为了得到喂入辊转速及破碎辊转速对茎秆破碎合格率及平均长度的最优解,通过 Optimization 模块对模型进行参数优化。通过优化得到的破碎装置最优参数组合为 $A = 416.5 \text{ r/min}$, $B = 950 \text{ r/min}$,此时

$Q = 98.30\%$, $\bar{L} = 29.04 \text{ mm}$ 。对以上数据进行圆整得 $A = 416 \text{ r/min}$, $B = 950 \text{ r/min}$,并在试验台架上进行验证,得到其破碎合格率为 98.00% ,破碎茎秆平均长度为 29.16 mm ,与模拟结果相差分别为 0.3 个百分点和 0.5 个百分点。

4.7 田间收获试验

2020 年 11 月在河北省石家庄市无极县北苏工业园区王草试验田进行收获试验,种植王草平均高度 2.17 m ,根部平均直径为 31.5 mm ,单株分蘖数达 26 根,与台架试验王草茎秆为同一种植批次,收获机收获效率为 $0.42 \text{ hm}^2/\text{h}$,按照 GB/T 10394.3—2009《饲料收获机 第 3 部分:试验方法》进行检验,待收获机运行平稳后开始试验,如图 14 所示。



图 14 田间试验及破碎效果
Fig. 14 Field test and crushing effect

田间试验显示,当破碎装置转速达到要求后,抛送滚筒及抛送筒的撞击等复合作用使茎秆破碎更加完全,合格率达 98% ,平均长度小于 30 mm ,达到饲喂要求。

5 结论

(1)根据高茎秆王草机械化收获需求,优化设计了滚筒式破碎装置,采用 4 排均匀人字形布置,比双排人字形刀具布置受力更加均匀,降低了交变扭矩带来的影响。

(2)通过单因素试验研究了喂入辊转速、破碎辊转速对破碎合格率及破碎茎秆平均长度的影响,结果表明,当破碎辊转速恒定时,随喂入辊转速的增加,茎秆破碎合格率降低、平均长度增大;当喂入辊转速恒定时,随破碎辊转速的增加,茎秆破碎合格率升高、平均长度减小,最终确定喂入辊转速范围为 $380 \sim 480 \text{ r/min}$,破碎辊转速范围为 $750 \sim$

950 r/min。

(3)通过二次旋转正交试验分析了喂入辊转速、破碎辊转速两因素对茎秆破碎合格率、平均长度的影响,并通过响应曲面法分析得出最佳参数组合为喂入辊转速 416.5 r/min、破碎辊转速 950 r/min,

此时茎秆破碎合格率、平均长度分别为 98.30% 和 29.04 mm。

(4)经田间试验验证,所设计高茎秆王草收获机破碎装置作业效果良好,茎秆破碎合格率达 98%,破碎茎秆平均长度小于 30 mm,破碎效果均匀。

参 考 文 献

[1] 何琳,祝其丽,王彦伟,等. 多年生禾草皇竹草的综合利用研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2020,26(3):705-712.
HE Lin, ZHU Qili, WANG Yanwei, et al. Advances in research on the comprehensive utilization of a perennial grass *Pennisetum hybridum*[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2020,26(3):705-712. (in Chinese)

[2] 张继友. 中国王草种质资源经济价值研究[D]. 海口:海南大学,2014.
ZHANG Jiyu. Research on economic value of king grass germplasm resources for China[D]. Haikou: Hainan University,2014. (in Chinese)

[3] 吕仁龙,胡海超,张兴波,等. 不同刈割高度王草中叶绿素和叶绿醇含量在青贮前后的变动[J]. 动物营养学报,2019,31(9):4208-4217.
LÜ Renlong, HU Haichao, ZHANG Xingbo, et al. Changes of chlorophyll and phytol contents in different harvesting height king grass before and after ensiling[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019,31(9):4208-4217. (in Chinese)

[4] HEI L, LEE C, WANG H, et al. Using a high biomass plant *Pennisetum hybridum* to phyto-treat fresh municipal sewage sludge[J]. Bioresource Technology,2016(17):252-256.

[5] FERRARETTO L F, SHAVER R D, LUCK B D. Silage review: recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting[J]. Journal of Dairy Science,2018,101(5):3937-3951.

[6] LISOWSKI A, ŚWIATEK K, KLONOWSKI J, et al. Movement of chopped material in the discharge spout of forage harvester with a flywheel chopping unit: measurements using maize and numerical simulation[J]. Biosystems Engineering,2012,111(4):381-391.

[7] LISOWSKI A, KLONOWSKI J, SYPULA M, et al. Energy of feeding and chopping of biomass processing in the working units of forage harvester and energy balance of methane production from selected energy plants species[J]. Biomass and Bioenergy, 2019,128:105301.

[8] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(9):58-65.
ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(9):58-65. (in Chinese)

[9] 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/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):218-226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.025. (in Chinese)

[10] 贾春阳. 穗茎兼收型玉米收获机秸秆切碎打捆装置的设计与试验[D]. 淄博:山东理工大学,2017.
JIA Chunyang. Design and experiment on stalk chopping and bundling device for corn combine reaping stalk and spike[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017. (in Chinese)

[11] 梁荣庆,张翠英,李青江,等. 4QG-2 型青贮收获机切碎揉搓装置的设计[J]. 农机化研究,2018,40(11):99-104.
LIANG Rongqing, ZHANG Cuiying, LI Qingjiang, et al. Design of chopping and rubbing device of 4QG-2 silage harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(11):99-104. (in Chinese)

[12] 张银平,刁培松,杜瑞成,等. 穗茎兼收型玉米收获机茎秆切碎与输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):208-214.
ZHANG Yiping, DIAO Peisong, DU Ruicheng, et al. Design and test of stalk chopping and conveying device for corn combine reaping both stalk and spike[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):208-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s032&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.032. (in Chinese)

[13] ELIANA C, JORGE R, JUAN P, et al. King grass: a very promising material for the production of second-generation ethanol in tropical countries[J]. Biomass and Bioenergy,2016,95:206-213.

[14] LI M, ZI X J, ZHOU H L, et al. Effects of sucrose, glucose, molasses and cellulase on fermentation quality and in vitro gas production of king grass silage[J]. Animal Feed Science and Technology,2014,197:206-212.

[15] 董瑞. 青贮玉米收获割台切割过程仿真及试验研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
DONG Rui. Simulation and experimental study on cutting process of silage corn harvesting header[D]. Changchun: Jilin University,2020. (in Chinese)

[16] 李松毅. 玉米秸秆揉碎装置设计与性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
LI Songyi. Design and performance test of corn straw crushing device[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,

2019. (in Chinese)

- [17] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):102 – 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190211&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.011. (in Chinese)
- [18] 郑智旗,何进,王庆杰,等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):87 – 96.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):87 – 96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170711&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011. (in Chinese)
- [19] 郝付平,陈志,张宗玲,等. 玉米穗茎联合收获台茎秆切碎输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):67 – 72.
HAO Fuping, CHEN Zhi, ZHANG Zongling, et al. Design and experiment of corn stalk combined harvesting header stalk chopping conveyor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):67 – 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s011&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.011. (in Chinese)
- [20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:1190 – 1193.
- [21] VU V D, NGO Q H, NGUYEN T T, et al. Multi-objective optimization of cutting force and cutting power in chopping agricultural residues[J]. Biosystems Engineering,2020,191:107 – 115.
- [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/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):73 – 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):73 – 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.008. (in Chinese)
- [23] 闫二伟,王振伟,韩柏和,等. 含水率及切割滑切角对秸秆切割功耗影响规律[J]. 农机化研究,2020,42(2):162 – 167.
YAN Erwei, WANG Zhenwei, HAN Bohe, et al. Effect of water content and cutting sliding angle on straw cutting power consumption[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(2):162 – 167. (in Chinese)
- [24] 王立军,张志恒,刘天华,等. 玉米收获机割台砍劈式茎秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(7): 109 – 117.
WANG Lijun, ZHANG Zhiheng, LIU Tianhua, et al. Design and experiment of device for chopping stalk of header of maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):109 – 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200713&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.013. (in Chinese)
- [25] 张宗玲,韩增德,刘立晶,等. 玉米穗茎兼收割台夹持输送装置参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):114 – 121.
ZHANG Zongling, HAN Zengde, LIU Lijing, et al. Parameters optimization for gripping and delivering device of corn harvester for reaping both corn stalk and spike[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3): 114 – 121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180313&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.013. (in Chinese)
- [26] 任德志,白雪卫,刘德军,等. 玉米秸秆皮瓢分离碾压揭皮辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):93 – 99.
REN Dezhi, BAI Xuewei, LIU Dejun, et al. Design and test on roller-teeth husking roller in rind-pith separation of corn stalks [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):93 – 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.011. (in Chinese)
- [27] 张宗玲,韩增德,李晓栋,等. 玉米穗茎兼收割台切碎装置参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):266 – 274.
ZHANG Zongling, HAN Zengde, LI Xiaodong, et al. Optimization of parameters for stalk chopper of corn harvester for reaping both corn stalk and spike[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):266 – 274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s035&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.035. (in Chinese)