

# 分段组合式红薯切条机设计与试验

李禧龙<sup>1</sup> 吴晓媚<sup>1</sup> 张丽娜<sup>1</sup> 何亚凯<sup>1,2</sup> 程子文<sup>1</sup> 吕黄珍<sup>1,3</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业农村部农产品加工装备重点实验室, 北京 100083;  
3. 中国包装和食品机械有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对目前红薯切条机切片质量差、切条过程薯条易断裂等问题, 本文设计了一种切片、切条组合的分段式红薯切条机。对红薯切片和红薯片切条过程进行了力学和运动学分析, 设计了直线往复式切片、圆刀盘式切条、进料及输送装置, 确定了其关键结构参数。以曲柄转速和切条速度为试验因素, 断条率和切面平整度为试验指标, 开展红薯片切条(截面 12 mm × 12 mm 和 24 mm × 24 mm)二次回归正交旋转组合试验, 利用 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析, 通过响应面分析交互因素对试验指标的影响规律, 运用软件优化得出试验因素的最优组合并进行验证试验。试验结果表明: 切薯条 12 mm × 12 mm 时, 对断条率曲柄转速影响大于切条速度, 对切面平整度切条速度影响大于曲柄转速, 当曲柄转速为 16.40 r/min、切条速度为 131.30 m/s 时薯条质量最佳, 此时断条率为 8.34%, 切面平整度为 95.94%; 切薯条 24 mm × 24 mm 时, 对断条率和切面平整度切条速度影响均大于曲柄转速, 当曲柄转速为 44.10 r/min、切条速度为 183.10 m/s 时薯条质量最佳, 此时断条率为 5.63%, 切面平整度 91.19%, 满足红薯切条机技术要求。

**关键词:** 红薯切条机; 分段式; 断条率; 切面平整度

中图分类号: TS225.35; S226.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)06-0368-11 OSID: 

## Design and Experiment of Segmented Combination Sweet Potato Cutting Machine

LI Xilong<sup>1</sup> WU Xiaomei<sup>1</sup> ZHANG Li'na<sup>1</sup> HE Yakai<sup>1,2</sup> CHENG Ziwen<sup>1</sup> LÜ Huangzhen<sup>1,3</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Products Processing Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. China National Packaging and Food Machinery Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming to address the issues of poor slicing quality and frequent breakage in sweet potato strip cutting machines, a segmented sweet potato strip cutter that integrated slicing and strip cutting functionalities was developed. The mechanical and kinematic processes involved in sweet potato slicing and strip cutting were analyzed, leading to the design of a linear reciprocating slicer, a circular blade disk strip cutter, and associated feeding and conveying devices, with key structural parameters identified. Experiments were conducted by using crank speed and strip cutting speed as variables, and breakage rate and section smoothness as metrics. A second-order regression orthogonal rotational composite design was employed for strips with cross-sections of 12 mm × 12 mm and 24 mm × 24 mm. Variance analysis was performed by using Design-Expert software, and response surface analysis was used to determine the effects of interaction factors on the metrics. Optimal experimental conditions were identified and validated. The results indicated that for 12 mm × 12 mm strips, crank speed had a more significant impact on breakage rate, while strip cutting speed more heavily influenced section smoothness. The optimal quality was achieved at a crank speed of 16.40 r/min and a strip cutting speed of 131.30 m/s, resulting in an 8.34% breakage rate and 95.94% section smoothness. For 24 mm × 24 mm strips, strip cutting speed was the predominant factor affecting both breakage rate and section smoothness. The best quality was observed at a crank speed of 44.10 r/min and a strip cutting speed of 183.10 m/s, with a breakage rate of 5.63% and section smoothness of 91.19%, meeting the technical requirements.

**Key words:** sweet potato cutting machine; segmented; breakage rate; section smoothness

收稿日期: 2024-11-13 修回日期: 2024-12-02

基金项目: 国家马铃薯产业技术体系项目(CARS-09-P28)和国有资本金项目(GZ202007)

作者简介: 李禧龙(2000—), 男, 硕士生, 主要从事果蔬加工智能化技术研究, E-mail: 879684795@qq.com

通信作者: 吕黄珍(1979—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农产品加工机械及关键技术研究, E-mail: lvhz@caams.org.cn

## 0 引言

随着红薯脆片、薯干、薯条、薯仔等休闲食品的流行和净菜、中央厨房和预制菜的火热推广,鲜切红薯的需求快速增加<sup>[1]</sup>。但红薯脆性大、切制过程中易断裂,其特殊的物料特性导致目前红薯鲜切加工主要以人工或半人工半机械为主<sup>[2]</sup>。部分应用于红薯加工的设备精度和自动化程度相对较低<sup>[3-4]</sup>,加工损失和浪费严重,无法完全满足市场需求<sup>[5-6]</sup>。研制一种断条率少、切面平整度高的红薯切条机具有重要意义。

针对块根块茎类物料的不同特性,研制了不同切制设备,根据切制原理可分为回旋离心式、直线往复复式、圆盘刀式等<sup>[7]</sup>。回旋离心式切片机适用于不易定位、切制要求不高的球状和颗粒状物料,陈义厚<sup>[8]</sup>针对人参定位困难的问题研制出离心式人参切片装置,美国 Urschel 公司开发了 CCL 格子型马铃薯切片机<sup>[9]</sup>。直线往复复式切片机速度容易控制,夹紧方式简单多样,可满足不同的切制需求,毕伟<sup>[10]</sup>针对莲藕易破碎、粘连性大的问题设计出一种莲藕切片机,可上下移动的压块配合料筒完成莲藕夹紧,曲柄滑块机构带动刀片水平直线往复运动,完成莲藕切片;文献<sup>[11]</sup>设计了一种用于葛根智能切块的切削装置,葛根在动力推杆和左右连杆作用下水平直线往复运动,通过横向刀架和纵向刀架,完成切块工作。圆盘刀式切制机切割速度快、切削尺寸易控、动载荷小、磨损慢,配合多工位或多刀片可实现大批量生产,吕金庆等<sup>[12]</sup>研制出一种纵横刀组协同式马铃薯种切块设备,采用圆盘刀组对马铃薯种薯进行切割,输送辊组将马铃薯送入圆刀盘组切削区,并配合圆盘刀组实现夹紧,圆盘刀组将马铃薯切成相同宽度薯块,带动黏附在刀片上的薯块向上运动,剥离板组将薯块从刀片上剥离。已有研究均是针对特定物料特性选用不同切制方式,针对红薯特性的专用切制设备相关研究缺乏。

针对红薯脆性大、切制过程易断裂等问题,本文以红薯加工品种济薯 26 号为试验样品,设计直线往复复式切片与圆盘刀式切条组合的分段式红薯切条机,并对截面 12 mm × 12 mm 和 24 mm × 24 mm 薯条分别进行试验,获取红薯切条机最优工作参数。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

红薯切条机主要由进料装置、切片装置、输送装置、切条装置 4 部分构成,如图 1 所示。进料装置由上下 4 通道进料斗组成,下进料斗末端焊接有弧形

挡料板;切片装置由曲柄滑块机构组成,其中滑块由厚度调节板、W 形切片刀和挡料杆组成;输送装置由传动皮带和输送皮带组成;切条装置主要由切条刀组、梳条器和过桥板组成,其切条刀辊与输送装置的主动轴由齿轮传动。

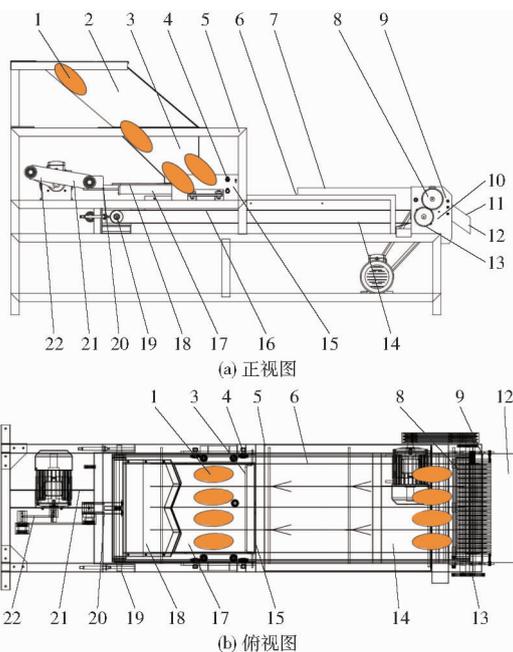


图 1 红薯切条机结构图

Fig. 1 Structure diagrams of sweet potato cutting machine

1. 红薯 2. 上料斗 3. 下料斗 4. 滚动轴承组 5. 机架 6. 导向隔板 7. 上护板 8. 切条刀组 9. 梳条器 10. 过桥板
11. 红薯条 12. 出料斗 13. 皮带主动轴 14. 输送皮带 15. 挡料杆 16. 红薯片 17. 厚度调节板 18. 切片刀 19. 皮带从动轴 20. 切片刀盘骨架 21. 连杆 22. 曲柄

### 1.2 工作原理和主要技术参数

红薯中淀粉和水分含量高,脆性大,考虑降低破碎率和提高薯条切面平整度的要求,采用分段切制的方式,先进行沿长度方向切成厚片(采用往复复式切制方式),再依次将单个厚片沿长度方向切成要求规格的薯条(采用圆盘刀式切制方式)。为了提高生产效率,整机采用四通道同时工作。

工作时,在进料装置中红薯被 4 个通道的分隔进料斗分开,每个通道上宽下窄,迫使红薯沿长度方向顺料斗斜坡面滑向料斗底部的切片槽位,呈现长度方向平行排列;切片电机带动曲柄滑块机构运动,带动切片刀盘直线往复移动,在弧形挡料板配合下将红薯切制成片;输送皮带将红薯片顺序排列,输送导向槽板在皮带上方形形成 4 个隔离通道,使其纵向放置并输送至切条位置,并使红薯片具有一定的切条初始速度;切条装置对来自 4 个隔离通道的红薯片进行定向切条,切制后的红薯条从出料斗顺序排出机体,防止出料时产生碰撞破碎。具体加工工艺流程图如图 2 所示。

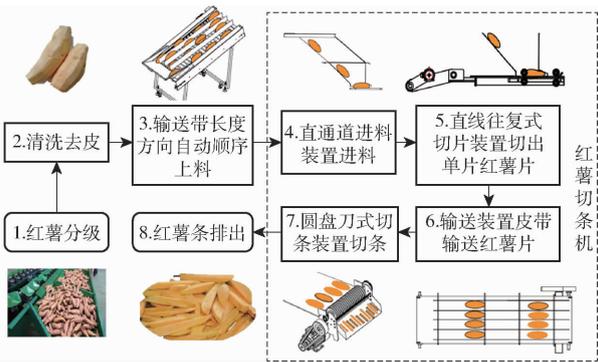


图2 红薯切条工艺流程图

Fig. 2 Sweet potato slicing process flowchart

根据市场和客户实际需求,切条机应满足2种薯条加工规格要求:薯条截面尺寸分别为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 和 $24\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ (后文简称为 $12\text{ mm}$ 和 $24\text{ mm}$ 薯条),长度方向为沿红薯长轴方向,同时满足连续切条工作。红薯切条机主要技术指标如表1所示。

表1 红薯切条机技术指标

Tab. 1 Technical indicators of sweet potato cutting machine

参数	数值
工作效率/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1~2
断条率/%	$\leq 10$
薯条切面平整度/%	$\geq 90$
薯条截面尺寸/( $\text{mm} \times \text{mm}$ )	$24 \times 24, 12 \times 12$
正常工作噪声/dBA	$\leq 80$
平均无故障工作时间/h	$\geq 100$

## 2 关键部件设计

### 2.1 切片装置设计

根茎类果蔬切片装置主要有离心式和直线往复式切制,离心式切制是果蔬物料进行机械切制的常见方法,但因为切片较短、破碎率高、条形不整等问题使其应用受到限制。为了避免物料进料时发生碰撞,降低因刀刃冲击产生的破碎,设计往复式定向切制方式,模拟人工擦片作业方式,确定红薯片切制部件结构形式为直线往复式。

往复式切片装置主要由W形切片刀、切片刀盘骨架、切片厚度调节板、曲柄连杆机构、移动滑道和伺服电机组成,如图3所示。工作原理如图4所示,W形切片刀、切片厚度调节板均安装在切片刀盘骨架上,形成组合的移动体,在伺服电机和曲柄连杆机构作用下产生往复运动,刀盘骨架上的W形切片刀依次在料斗底部的切片槽区域内往复运动,产生切削动作,每向前移动依次将红薯切削1个片料,刀盘返回时被切红薯在重力和弧形挡料板的作用下再次

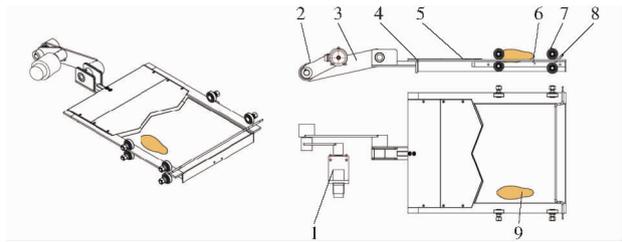


图3 切片机构结构示意图

Fig. 3 Schematic of slicing mechanism structure

1. 电机 2. 曲柄 3. 连杆 4. 切片刀盘骨架 5. W形切片刀  
6. 厚度调节板 7. 移动滑道 8. 推料杆 9. 红薯

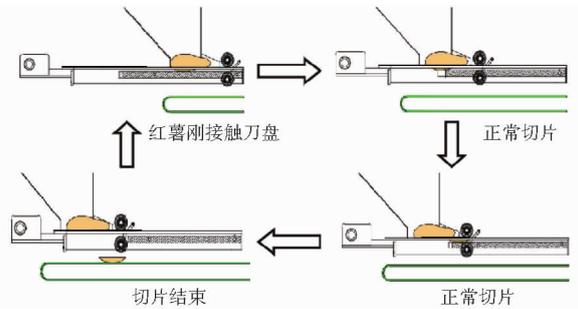


图4 红薯切条机切片过程分析

Fig. 4 Analysis of slicing process of sweet potato slicer

落到切片厚度调节板上,等待下一次刀盘骨架前移时再次切片,如此往复循环。移动滑道主要由固定在总体机架上的上下和左右4个方向的4对滚动轴承调控,形成有效而平稳的滑道,满足刀盘骨架的往复运动要求。

切片刀盘由切片刀盘骨架、W形切片刀、厚度调节板和移动滑道组成,W形切片刀、切片厚度调节板均安装在切片刀盘骨架上,形成组合的移动体,移动滑道安装在机架上,满足刀盘骨架的往复移动要求。

厚度调节板功能是提供红薯剪切过程支持力,配合弧形定位板对被切红薯进行定位,且厚度调节板板面与刀刃上平面间的高度差即为切割片料厚度,改变高度差进而调整切片厚度。厚度调节板宽度应满足四工位红薯最大短轴要求,为 $480\text{ mm}$ ,长度大于红薯最大长轴,同时满足剪切所需速度提升空间,为 $445\text{ mm}$ 。

移动滑道功能是形成有效而平稳的滑道,满足刀盘骨架的往复移动要求。移动滑道由4对固定在总体机架上的上下和左右4个方向的滚动轴承组成,刀盘只在轴承径向移动,轴承只受径向力,选用GB/T 272—1993的6203深沟球轴承。

为提高生产效率,整机采用四通道同时切片,对应切片刀的四工位,采用滑切刀片,刀刃呈W形,刀片长宽满足红薯最大长轴、短径要求,长度方向为 $220\text{ mm}$ ,宽度方向为 $4 \times 130\text{ mm}$ 。

红薯切片受力分析如图5所示,点A为刀片刃

口与红薯接触点,点  $B$  为竖直挡板与红薯接触点,点  $C$  为弧形挡板与红薯接触点,点  $O$  为厚度调节板与红薯接触点,  $F_a$ 、 $F_b$ 、 $F_c$ 、 $F_o$  分别为红薯在点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $O$  受到的力,将力  $F_a$  分解到坐标轴方向上,即  $F_{a_1}$ 、 $F_{a_2}$ 。根据红薯受力平衡可得

$$\begin{cases} F_a + F_b + F_c + G + F_N = 0 \\ M_{F_A} + M_{F_C} = 0 \\ F_{a_1} = F_a \cos w \\ F_{a_2} = F_a \sin w \end{cases} \quad (1)$$

式中  $G$ ——红薯重力,  $N$

$M_{F_A}$ 、 $M_{F_C}$ ——点  $A$ 、 $C$  转矩,  $N \cdot m$

$F_N$ ——机架支持力,  $N$

$w$ —— $F_a$  与  $x$  轴夹角,  $(^\circ)$

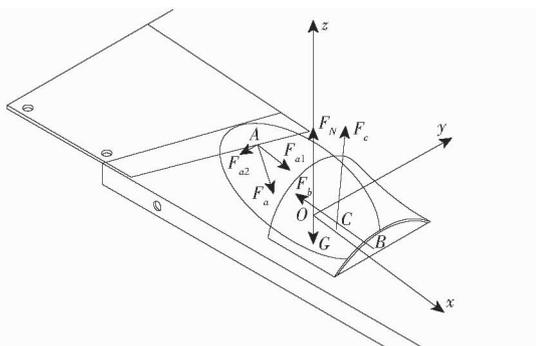


图5 红薯切片受力图

Fig.5 Sweet potato slice stress diagram

以红薯的最大平面计算最大剪切力,则

$$F_{a_1} > F_a \cos w \quad (2)$$

刀具的往复运动通过曲柄滑块机构实现,对曲柄滑块机构进行设计<sup>[13]</sup>。曲柄滑块机构根据滑块移动的导路中心线是否通过曲柄的回转中心,分为对心曲柄滑块机构和偏置曲柄滑块机构。偏置曲柄滑块机构具有急回特性,可提高工作效率,本设备采用四通道同时工作,满足工作效率要求,从机构紧凑考虑,选用对心曲柄滑块机构,机构偏置  $e = 0$ ,结构示意图如图6所示。

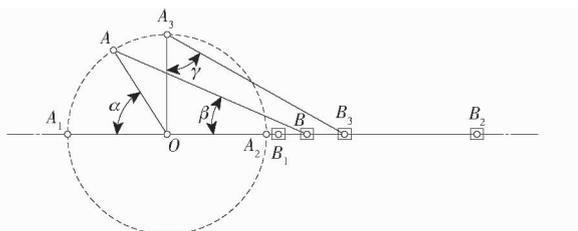


图6 曲柄滑块机构示意图

Fig.6 Schematic of crank slider mechanism

$OA_1B_1$ 时滑块到达最左侧位置,  $OA_2B_2$ 时滑块到达最右侧位置,  $OA_3B_3$ 位置时机构获得最大压力角  $\gamma$ 。由图6可得

$$\begin{cases} b - a = l_0 \\ a + b = l_0 + l \\ \gamma = \arccos \frac{a}{b} \geq 40^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中  $a$ ——曲柄  $OA$  长度

$b$ ——连杆  $AB$  长度

$l_0$ —— $OB_1$  长度

$l$ ——滑块运动行程

选取滑块运动行程  $l = 340$  mm, 曲柄长度  $a = 170$  mm, 计算得出连杆长度  $b = 360$  mm, 最大压力角  $\gamma \approx 61.82^\circ$ , 满足最大压力角和杆长条件要求。

以  $OA_1B_1$  为初始位置,  $OAB$  位置时刀盘即滑块行程  $S$  为

$$S = bc \cos \beta - a \cos \alpha - b + a = a(1 - \cos \alpha) + b(\cos \beta - 1) \quad (4)$$

其中  $\alpha = 90^\circ - \beta$

式中  $\beta$ ——滑切角

$$b \sin \beta = a \sin \alpha \quad (5)$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2} \sin^2 \alpha} \approx$$

$$\sqrt{\left(1 - \frac{a^2}{2b^2} \sin^2 \alpha\right)^2} = 1 - \frac{a^2}{2b^2} \sin^2 \alpha = 1 - \frac{a^2}{4b^2} (1 - \cos(2\alpha)) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)计算得

$$S = a(1 - \cos \alpha) + b \left[ 1 - \frac{a^2}{4b^2} (1 - \cos(2\alpha)) - 1 \right] = a \left[ 1 - \cos \alpha - \frac{a}{4b} (1 - \cos(2\alpha)) \right] \quad (7)$$

对行程求导得刀盘速度  $v'$  为

$$v' = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \omega a \left( \sin(\omega t) - \frac{a}{4b} \sin(2\omega t) \right) \quad (8)$$

式中  $\omega$ ——曲柄转速  $t$ ——时间

对曲柄滑块机构进行受力分析,如图7所示,连杆2受到曲柄1在点  $A$  的力  $F_{A1}$ , 根据二力杆原理,连杆2还受到滑块3的力  $F_{B3}$ , 与  $F_{A1}$  等大反向, 则滑块3受到连杆2的力  $F_{B2}$ 、机架支持力  $F_N$  和红薯的作用力  $F_a$ , 将滑块受力分解到  $xOy$  和  $xOz$  平面, 如图8所示, 则

$$\begin{cases} F_{h_1} = F_a \cos \beta \\ F_{h_2} = F_{B2} \cos \theta = F_{A1} \cos \theta \\ F_h = F_{h_2} - F_{h_1} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\theta$ ——曲柄与  $z$  轴夹角,  $(^\circ)$

计算得

$$F_{A1} = \frac{F_{h_2}}{\cos \theta} = \frac{F_h + F_{h_1}}{\cos \theta} = \frac{F_h + F_{a_1}}{\cos \theta} \quad (10)$$

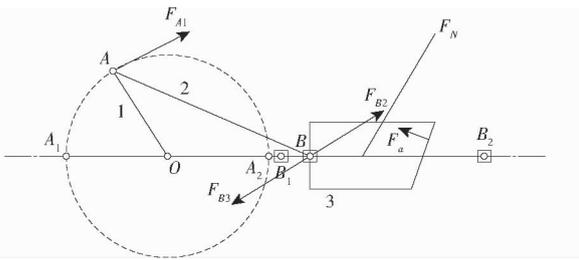


图7 曲柄滑块机构受力分析

Fig. 7 Force analysis of crank slider mechanism

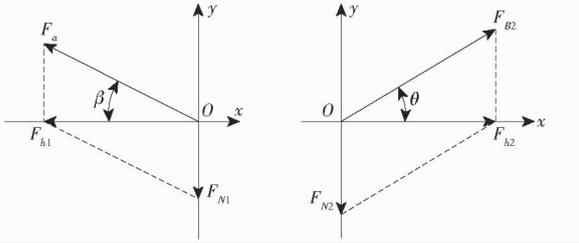


图8 滑块受力分析

Fig. 8 Force analysis of slider

即  $\theta = 90^\circ$  时,  $F_{A1}$  取得最大值

$$F_{A1} = F_{a1} \quad (11)$$

## 2.2 切条装置设计

切条装置主要有直线往复式切制、圆盘刀式切制和回转离心式切制3种。圆盘刀式切制方式切割速度快,动载荷小,磨损慢,配合多工位或多刀片可实现大批量生产,更适合红薯片切条。

切条装置是红薯切条机的核心装置,实现红薯片切条工作。根据红薯剪切特性研究和切制方式比较,设计圆盘刀式切条装置,由切条刀辊、过桥板、梳条器以及动力传递装置组成,如图9所示。

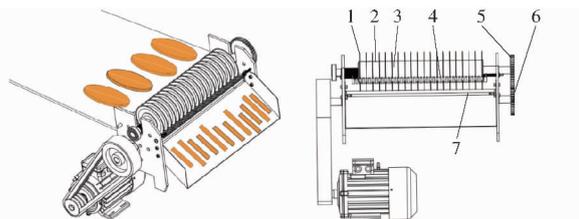


图9 切条装置结构示意图

Fig. 9 Schematic of cutting machine

1. 切条刀
2. 间隔板
3. 切条刀辊
4. 梳条器
5. 从动齿轮
6. 主动齿轮
7. 过桥板

工作原理为片料由输送带带到过桥板面上,切条刀辊上安装的齿形圆盘刀以较高线速度向下旋转,片料在过桥板的支撑下被切制成条,粘连在刀盘上的薯条被梳条器梳离,完成切条动作,如图10所示。

梳条器安装于机架上,圆弧面被铣削成间隔齿状,圆盘刀片可以透过齿状间的间隙深入到下面的过桥板平面,梳条器齿宽稍小于切条刀辊的

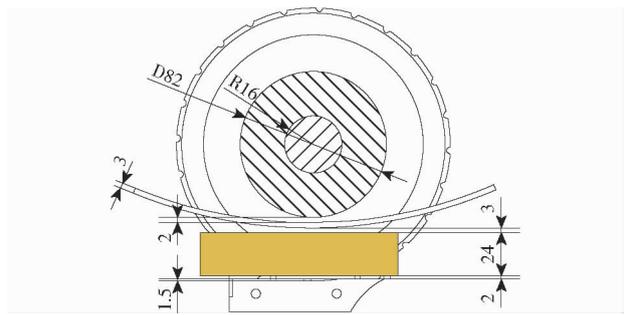


图10 切条过程示意图

Fig. 10 Schematic of cutting process

间隔板宽度,便于梳条器安装于圆盘刀之间,这样夹持在圆盘刀之间的条形物料在旋转过程中被弧形梳条器梳离出来,防止薯条夹持在切条刀片中产生破碎<sup>[14]</sup>。

切条刀辊是切条关键部件,其结构特征直接影响切条效果。切条刀辊主要由芯轴、圆盘刀、间隔板等组成,根据薯条规格不同,12 mm薯条的切条刀辊上安装36个圆盘刀,24 mm薯条的切条刀辊上安装18个圆盘刀。

芯轴功能是通过齿轮传送动力,带动圆盘刀旋转进行切割。芯轴中间段安装圆盘刀和间隔板,长度与切条工作区间宽度一致,为480 mm,直径32 mm,整轴长712 mm。

间隔板安装在圆盘刀之间,形成相同规格的间距,保证切条的宽度尺寸。根据薯条规格尺寸不同,设计有宽11 mm和23 mm,外圆直径82 mm,内圆直径32 mm 2种尺寸环形间隔板。

对切条接触点进行速度分析,从输送装置过来的红薯片速度为  $v_0$ ,刀片给红薯片沿切线方向速度  $v_1$ ,则红薯实际速度  $v$  如图11所示, $v$  和  $v_1$  夹角即为滑切角。

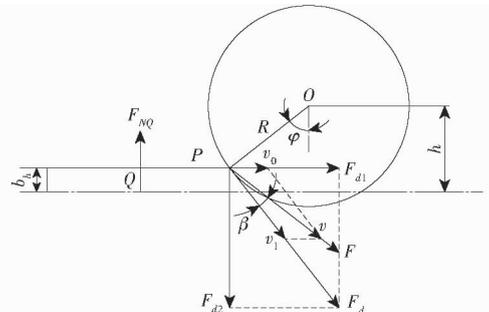


图11 红薯切条速度和受力分析

Fig. 11 Analysis of cutting speed and force on sweet potato strips

红薯片在切入时刻的受力分析如图11所示,点O为刀片圆心,点P为切入点,点Q为红薯片质心,红薯片受刀片沿切线方向的切力  $F_d$ ,皮带支持力  $F_{NQ}$ ,合力为  $F'$ ,沿实际速度方向,将  $F_d$  分解,则

$$\begin{cases} F_d \sin\varphi = F \sin(\varphi + \beta) \\ F_{d2} = F_d \cos\varphi \\ F_{d2} - F_{NQ} = F' \cos(\varphi + \beta) \\ \varphi = \arccos \frac{h - b_h}{R} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $F_{d1}$ ——刀具给红薯片的力在水平方向上分力, N

$F_{d2}$ ——刀具给红薯片的力在竖直方向上分力, N

$\varphi$ —— $OP$  与竖直方向夹角, ( $^\circ$ )

$h$ ——刀片圆心到过桥板高度, mm

$R$ ——刀片半径, mm

$F$ ——刀具给红薯片的力, N

$b_h$ ——红薯片高度, mm

即

$$F_d = F \cos\beta + \frac{F \sin\beta}{\tan\left(\arccos \frac{h - b_h}{R}\right)} \quad (13)$$

### 2.3 进料机构设计

常见进料装置有直通道进料和螺旋通道进料 2 种, 考虑红薯细长型的外形特点和脆性大、易断裂的物料特性, 在螺旋进料斗中易出现折断、堵塞现象, 选用直通道进料方式, 为了保证按照单个红薯进行切片, 需在进料斗中设置通道隔板。

进料装置结构如图 12 所示, 为扩大空间利用率和增加设备切条效率, 进料装置设计成相互隔离的 4 个通道, 为保证块茎物料沿长度方向顺序进入切片槽位置, 按照块茎最大尺寸 180 mm (长轴)  $\times$  100 mm (短轴), 通道设计为上宽下窄的渐缩坡面形式, 上口宽可以方便物料同时进入, 下口收窄可以调整物料移动时的状态, 使块茎物料在重力作用下按照长度方向, 沿着料斗底部斜坡面向前滑移至切片槽处。每个通道的切片槽前段定位挡板, 用于物料导向定位和切片时的受力支撑; 槽底部则是切片刀具的厚度调节板, 由此构成 4 个切片工作区。

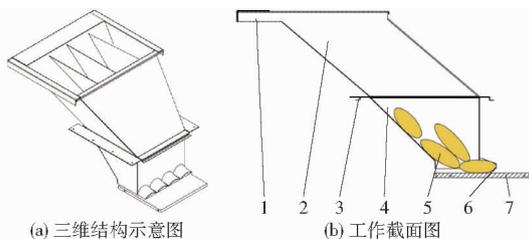


图 12 进料装置三维结构示意图与工作截面图

Fig. 12 Schematics of three-dimensional structure and working cross-section of feeding device

1. 上料斗 2. 上料斗隔板 3. 下料斗 4. 下料斗隔板 5. 红薯
6. 定位挡板 7. 厚度调节板

### 2.4 输送装置设计

输送装置由从动轴、输送带、导向槽板、定位杆、

刮渣板、结渣盒、主动轴组成, 如图 13 所示。由切片装置切制出的红薯片跌落到下面的皮带上, 由皮带输送至切条装置处进行后续切条作业。

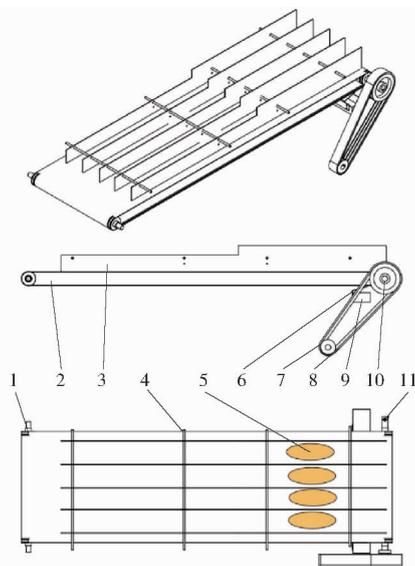


图 13 输送装置结构示意图

Fig. 13 Schematic of conveying device structure

1. 从动轴 2. 输送带 3. 导向槽板 4. 定位杆 5. 红薯片
6. 刮渣板 7. 皮带轮 I 8. V 形皮带 9. 结渣盒 10. 皮带轮 II
11. 主动轴

皮带输送装置进料端为从动轴毂, 出料端为主动轴毂, 轴距 1 850 mm, 由独立电机三角皮带传动提供动力; 在皮带输送过程中设立 5 片导向槽板, 安装于皮带输送装置上, 形成 4 个片料输送通道; 输送皮带采用厚 3 mm 弹性 PVC 橡胶板材料, 皮带宽 580 mm, 周长 3 930 mm。

## 3 试验与结果分析

### 3.1 试验材料

采用济薯 26 号红薯 (质量 350 ~ 700 g) 为试验物料, 在红薯切条设备样机上进行样机性能试验。试验用仪器包括电子秤 (称量范围 0.01 ~ 5 000 g)、游标卡尺 (精度 0.02 mm)、墨汁、毛笔、方格计算纸等。

### 3.2 试验参数及评价指标

#### 3.2.1 试验参数

通过分析与前单因素试验确定各因素取值范围为: 曲柄转速 12.60 ~ 44.10 r/min, 切条速度 117.36 ~ 211.24 m/s, 在红薯片切条过程中薯条会出现断裂、切面不平等, 因此, 将切条断条率  $Y_1$  和切面平整度  $Y_2$  作为试验指标。

#### 3.2.2 评价指标

##### (1) 断条率

定向切制设备正常工作时, 随机选取 5 min, 将

断裂薯条和未断裂薯条分别捡拾计数,以2个断裂薯条为一个完整薯条进行计数,计算断裂薯条占薯条总数百分比<sup>[15-18]</sup>,重复3次,取平均值。计算式为

$$Y_1 = \frac{N_2}{N_1 + N_2} \times 100\% \quad (14)$$

式中  $N_1$ ——完整薯条数量

$N_2$ ——断裂薯条数量

### (2) 切面平整度

切面平整度是加工薯条切面凹凸不平的程度,采用拓印法测量薯条切面平整度<sup>[19]</sup>。五点取样法选取5根完整薯条,拓印前,在低温干燥箱中对薯条进行轻微脱水处理,温度设定为45℃,处理时长为30 min,减少水分对涂墨均匀性的影响;使用无绒毛布轻轻吸干薯条表面的多余水分,在此过程中确保不改变薯条的自然形状;将切面涂墨时,使用精细刷子,以相同速度和压力将墨均匀涂抹在薯条表面,最后拓印在格子纸上,对轮廓面积与阴影面积计数,计算阴影面积与轮廓面积百分比,取平均值。计算式为

$$Y_2 = \frac{1}{5} \sum_{1 \leq j \leq 5} \left( \frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} \frac{S'_{ij}}{S_{ij}} \right) \times 100\% \quad (15)$$

式中  $S_{ij}$ ——第*i*个薯条第*j*个切面轮廓面积

$S'_{ij}$ ——第*i*个薯条第*j*个切面阴影面积

$n$ ——第*j*个薯条切面数

## 3.3 试验方案与结果分析

### 3.3.1 试验方案

以曲柄转速和切条速度为试验因素,断条率  $Y_1$  和切面平整度  $Y_2$  为试验指标,进行二次回归正交旋转组合试验,试验因素编码如表2所示<sup>[20-21]</sup>,分别建立上述试验指标与评价指标间的数学模型并分析试验指标对评价指标的影响规律。

表2 试验因素编码

Tab.2 Encoding of experimental factors

编码	12 mm 薯条		24 mm 薯条	
	曲柄转速 $x_1$ / ( $r \cdot \min^{-1}$ )	切条速度 $x_2$ / ( $m \cdot s^{-1}$ )	曲柄转速 $x_3$ / ( $r \cdot \min^{-1}$ )	切条速度 $x_4$ / ( $m \cdot s^{-1}$ )
-1.414	8.69	112.66	21.29	154.58
-1	12.60	117.36	25.20	164.30
0	22.05	129.09	34.65	187.77
1	31.50	140.82	44.10	211.24
1.414	35.41	145.52	48.01	220.96

### 3.3.2 12 mm 薯条组合试验结果分析

12 mm 薯条的二元二次回归正交旋转组合试验结果如表3所示。利用 Design-Expert 软件对数据进行回归分析,得到断条率和切面平整度的回归方程,

并进行显著性检验。

表3 12 mm 薯条组合试验结果

Tab.3 Results of 12 mm sweet potato fries combination test

试验 序号	因素		断条 率/%	切面平整 度/%
	曲柄转速 $x_1$ / ( $r \cdot \min^{-1}$ )	切条速度 $x_2$ / ( $m \cdot s^{-1}$ )		
1	8.69	129.09	14.00	96.11
2	12.60	140.82	10.65	95.97
3	12.60	117.36	11.065	94.56
4	22.05	112.66	10.01	93.41
5	22.05	145.52	11.59	94.65
6	22.05	129.09	9.91	96.00
7	22.05	129.09	8.65	96.08
8	22.05	129.09	10.02	96.15
9	22.05	129.09	8.95	96.27
10	22.05	129.09	9.66	95.87
11	31.50	117.36	18.58	94.50
12	31.50	140.82	22.41	95.10
13	35.41	129.09	27.77	95.56

各评价指标方差分析如表4所示,回归模型  $P < 0.001$ ,影响为极显著,失拟项  $P > 0.05$ ,失拟不显著,说明模型与实际相符。

表4 12 mm 薯条各评价指标方差分析

Tab.4 Analysis of variance for various evaluation indicators of 12 mm sweet potato fries

评价 指标	方差 来源	平方和	自由 度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
$Y_1$	模型	420.94	5	84.19	347.04	<0.0001**
	$x_1$	187.64	1	187.64	773.48	<0.0001**
	$x_2$	3.97	1	3.97	16.38	0.0049**
	$x_1x_2$	4.49	1	4.49	18.51	0.0036**
	$x_1^2$	224.77	1	224.77	926.52	<0.0001**
	$x_2^2$	2.85	1	2.85	11.76	0.0110*
	残差	1.70	7	0.24		
	失拟	0.24	3	0.08	0.22	0.8797
	误差	1.46	4	0.2176		
	总和	422.64	12			
$Y_2$	模型	9.24	5	1.85	104.17	<0.0001**
	$x_1$	0.3694	1	0.3694	20.83	0.0026**
	$x_2$	1.78	1	1.78	100.33	<0.0001**
	$x_1x_2$	0.1642	1	0.1642	9.26	0.0188*
	$x_1^2$	0.0615	1	0.0615	3.47	0.1049
	$x_2^2$	6.92	1	6.92	389.9	<0.0001**
	残差	0.1241	7	0.0177		
	失拟	0.0305	3	0.0102	0.4348	0.7401
	误差	0.0936	4	0.0234		
	总和	9.36	12			

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

$x_1$ 、 $x_1^2$ 、 $x_2$ 、 $x_1x_2$ 对断条率影响极显著, $x_2^2$ 对断条率影响显著,对断条率影响的主次顺序为 $x_1 > x_2$ 。 $x_2$ 、 $x_2^2$ 、 $x_1$ 对切面平整度影响极显著, $x_1x_2$ 对切面平整度影响显著, $x_1^2$ 对切面平整度影响不显著,对切面平整度影响的主次顺序为 $x_2 > x_1$ 。剔除影响不显著因素,得到回归方程为

$$Y_1 = 126.02 - 3.53x_1 - 1.35x_2 + 0.01x_1x_2 + 0.05x_1^2 + 0.005x_2^2 \quad (16)$$

$$Y_2 = -34.98 + 0.26x_1 + 1.95x_2 - 0.002x_1x_2 - 0.007x_2^2 \quad (17)$$

### 3.3.3 12 mm 薯条组合试验响应曲面分析

根据回归模型获得各因素之间交互作用影响的响应曲面如图 14 所示。

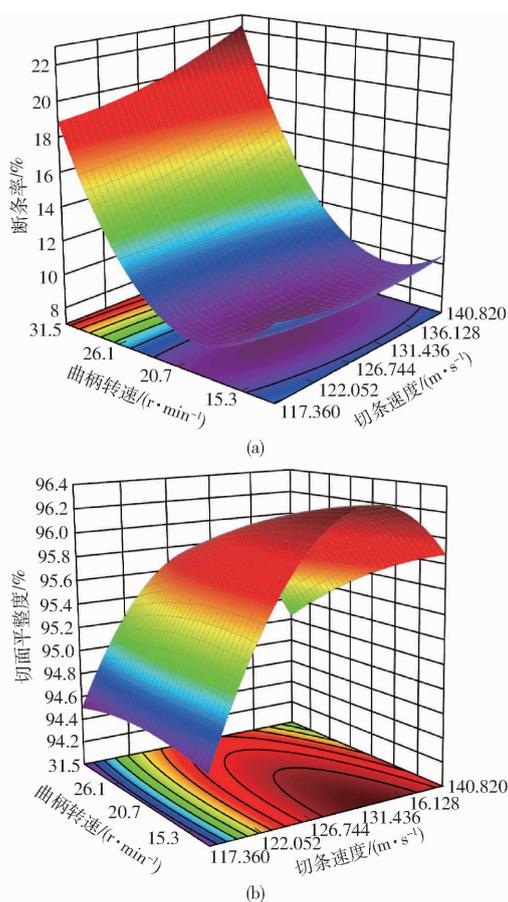


图 14 12 mm 薯条曲柄转速和切条速度对各评价指标的交互影响

Fig. 14 Interactive effects of crank speed and cutting speed on various evaluation indicators during 12 mm sweet potato fries

曲柄转速和切条速度对 12 mm 薯条断条率的交互影响如图 14a 所示。曲柄转速增大,断条率先减小后增大,与单因素分析一致。当曲柄转速为 12.6 ~ 15.3 r/min 时,切条速度增大,断条率先减小后增大,此时曲柄转速较小,红薯片质量好,切条电机低速转动时,转速越高越利于切割运动,断条率下降,转速继续增大使撞击增大,断条率随之增大;当

曲柄转速为 15.3 ~ 20.7 r/min 时,断条率较低;当曲柄转速为 20.7 ~ 31.5 r/min 时,切条速度增大,断条率增大,此时曲柄转速较高,红薯片质量较差,切条速度增大促使红薯条断裂。

曲柄转速和切条速度对 12 mm 薯条切面平整度的交互影响如图 14b 所示。当切条速度为 117.36 ~ 122.05 m/s 时,曲柄转速增大,切面平整度较小且基本不变,此时切条速度低,切条刀对红薯条的切面平整度影响较大;当切条速度为 122.05 ~ 140.82 m/s 时,曲柄转速增大,切面平整度减小,此时切条速度较大,切条刀导致的切面平整度增大,切片刀对切面平整度的影响凸显,整体趋势与单因素分析一致。切条速度增大,切面平整度先增大后减小,与单因素分析一致。

### 3.3.4 24 mm 薯条组合试验结果分析

24 mm 薯条的二元二次回归正交旋转组合试验结果如表 5 所示。

表 5 24 mm 薯条组合试验结果

Tab. 5 Results of 24 mm sweet potato fries combination test

序号	曲柄转速 $x_3 /$ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	切条速度 $x_4 /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	断条率/ %	切面平 整度/%
1	21.29	187.77	5.00	93.28
2	25.20	211.24	7.46	88.84
3	25.20	164.30	8.53	91.88
4	34.65	220.96	6.68	88.84
5	34.65	187.77	6.79	89.44
6	34.65	187.77	6.59	89.05
7	34.65	154.58	10.71	83.27
8	34.65	187.77	6.65	88.97
9	34.65	187.77	11.03	89.02
10	34.65	187.77	6.70	89.28
11	44.10	164.30	7.55	92.23
12	44.10	211.24	8.26	87.25
13	48.01	187.77	4.89	92.43

各评价指标方差分析如表 6 所示,回归模型  $P < 0.001$ ,影响极显著,失拟项  $P > 0.05$ ,失拟不显著,说明模型与实际相符。 $x_3x_4$ 、 $x_3^2$ 、 $x_4^2$ 对断条率影响极显著, $x_3$ 对断条率影响不显著,对断条率影响的主次顺序为 $x_4 > x_3$ 。

$x_4$ 、 $x_3^2$ 、 $x_4^2$ 对切面平整度影响极显著, $x_3$ 、 $x_3x_4$ 对切面平整度影响显著,对切面平整度影响的主次顺序为 $x_4 > x_3$ 。

剔除影响不显著因素,得到回归方程为

$$Y'_1 = 143.84 - 1.51x_4 + 0.02x_3x_4 + 0.01x_3^2 + 0.004x_4^2 \quad (18)$$

$$Y'_2 = 33.00 - 1.18x_3 + 0.91x_4 - 0.002x_3x_4 + 0.02x_3^2 - 0.002x_4^2 \quad (19)$$

表6 24 mm 薯条各评价指标方差分析

Tab.6 Analysis of variance for various evaluation indicators of 24 mm sweet potato fries

评价指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
$Y'_1$	模型	40.75	5.00	8.15	2165.39	<0.000 1**
	$x_3$	0.01	1.00	0.01	3.94	0.087 4
	$x_4$	0.08	1.00	0.08	21.88	0.002 3**
	$x_3x_4$	0.80	1.00	0.80	212.83	<0.000 1**
	$x_3^2$	5.13	1.00	5.13	1363.18	<0.000 1**
	$x_4^2$	30.76	1.00	30.76	8174.18	<0.000 1**
	残差	0.03	7.00	0.00		
$Y'_2$	失拟	0.00	3.00	0.00	0.31	0.820 6
	误差	0.02	4.00	0.01		
	总和	40.78	12.00			
	模型	80.73	5.00	16.15	135.46	<0.000 1**
	$x_3$	0.74	1.00	0.74	6.21	0.041 5*
	$x_4$	32.65	1.00	32.65	273.93	<0.000 1**
	$x_3x_4$	0.93	1.00	0.93	7.83	0.026 6*
$Y'_2$	$x_3^2$	28.08	1.00	28.08	235.56	<0.000 1**
	$x_4^2$	12.63	1.00	12.63	105.92	<0.000 1**
	残差	0.83	7.00	0.12		
	失拟	0.60	3.00	0.20	3.49	0.129 4
	误差	0.23	4.00	0.06		
	总和	81.56	12.00			

### 3.3.5 24 mm 薯条组合试验响应曲面分析

曲柄转速和切条速度对 24 mm 薯条断条率的交互影响如图 15a 所示。当切条速度固定在某一水平时,曲柄转速增大,断条率先增大后减小,随切条速度增大,曲柄转速与断条率关系曲线中断条率峰值位置向更高的曲柄转速偏移;当曲柄转速固定在某一水平时,切条速度增大,断条率先减小后增大,随曲柄转速增大,切条速度与断条率关系曲线中断条率峰值位置向更低的切条速度偏移。在曲柄转速为 25.2 ~ 27.9 r/min、切条速度为 179.95 ~ 195.60 m/s 和曲柄转速为 38.7 ~ 44.1 r/min、切条速度为 172.13 ~ 195.60 m/s 时获得较低断条率。

曲柄转速和切条速度对 24 mm 薯条切面平整度的交互影响如图 15b 所示。当切条速度固定在某一水平时,曲柄转速增大,切面平整度先减小后增大;当曲柄转速固定在某一水平时,切条速度增大,切面平整度持续减小,随曲柄转速增大,切条速度与切面平整度关系曲线中切面平整度峰值位置向更低的切条速度偏移。当曲柄转速为 33.3 ~ 41.4 r/min、切条速度为 201.85 ~ 211.24 m/s 时获得较低切面平整度。

### 3.4 参数优化

根据断条率与切面平整度对薯条质量影响重要

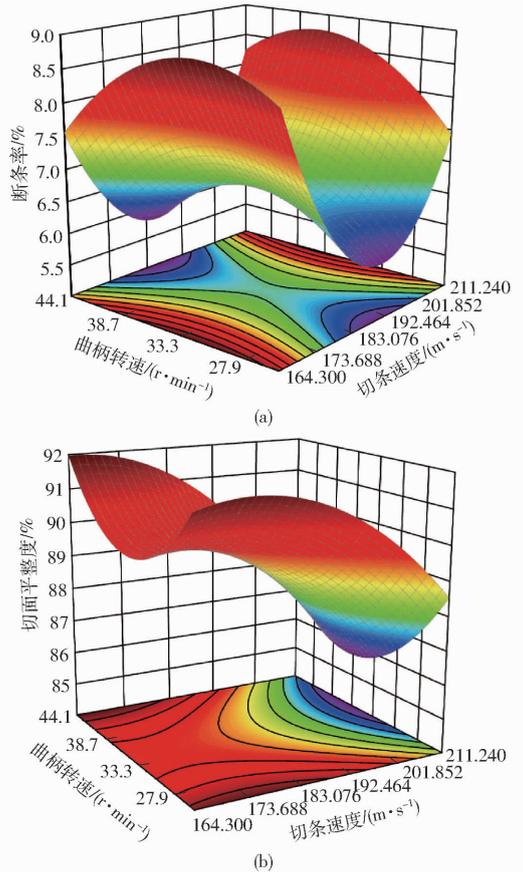


图 15 24 mm 薯条曲柄转速和切条速度对各评价指标的交互影响

Fig. 15 Interactive effects of crank speed and cutting speed on various evaluation indicators during 24 mm sweet potato fries

程度,分别赋予权重:断条率权重 80%,切面平整度 20%,计算综合指标  $Y_3$  [22-24],计算式为

$$Y_3 = Y_1 \times 80\% + (1 - Y_2) \times 20\% \quad (20)$$

依据上述分析结果,以综合指标取得最小值作为优化指标,建立性能指标全因子二次回归方程进行目标优化与最优工作参数确定,目标函数为

$$\begin{cases} \min Y_3(x_1, x_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 12.6 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 31.5 \text{ r/min} \\ 117.36 \text{ m/s} \leq x_2 \leq 140.82 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \min Y_3(x_3, x_4) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 25.2 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 44.1 \text{ r/min} \\ 164.30 \text{ m/s} \leq x_4 \leq 211.24 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

利用 Design-Expert 软件进行优化分析,优化得出 12 mm 薯条曲柄转速为 16.38 r/min、切条速度为 131.34 m/s;24 mm 薯条曲柄转速为 44.10 r/min、切条速度为 183.08 m/s。

### 3.5 验证试验

2024 年 1 月,在中国农业机械化科学研究院集团有限公司红薯切条流水线上进行 3 次重复验证试

验,试验效果如图16所示。为验证最优参数组合的可靠性,验证试验相关参数组合圆整,12 mm薯条在曲柄转速16.40 r/min、切条速度131.30 m/s时,薯条平均断条率为8.34%、切面平整度为95.94%;24 mm薯条在曲柄转速44.10 r/min、切条速度183.10 m/s时,薯条平均断条率为5.63%,切面平整度为91.19%,结果如表7所示。

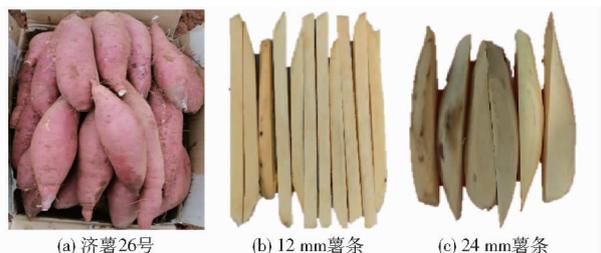


图16 济薯26号红薯在红薯切条机上切条效果

Fig. 16 Cutting effect of Jishu 26 sweet potato on sweet potato cutting machine

表7 验证试验结果

Tab. 7 Validation test results

试验序号	12 mm薯条			24 mm薯条		
	断条率/%	切面平整度/%	综合指标/%	断条率/%	切面平整度/%	综合指标/%
1	8.26	96.23	7.36	5.47	91.33	6.11
2	8.00	95.68	7.26	6.33	90.78	6.91
3	8.75	95.90	7.82	5.11	91.45	5.80
平均值	8.34	95.94	7.48	5.63	91.19	6.27

## 4 结论

(1)针对红薯脆性大易断裂的问题,设计了一种红薯切条机,采用直线往复运动的刀盘进行切片,圆刀盘式切条的分段切制方式,配合四通道进料及输送装置,完成高效率、低断条率和高切面平整度的红薯切条;对关键部件结构进行设计,通过切片过程受力分析,完成切片刀盘和曲柄连杆传动部件设计,通过切条过程受力分析实现切条装置设计。

(2)对红薯切条样机进行性能试验。以曲柄转速和切条速度为试验因素,断条率和切面平整度为评价指标,进行了12 mm和24 mm薯条的单因素试验和组合试验,确定了对12 mm薯条断条率影响曲柄转速大于切条速度,切面平整度影响切条速度大于曲柄转速;对24 mm薯条断条率和切面平整度影响均为切条速度大于曲柄转速。

(3)分析了切制速度对评价指标的交互影响,以最小权重指标优化求解最优试验因素组合并进行试验验证,12 mm薯条在曲柄转速16.40 r/min、切条速度131.30 m/s时达到最优,此时断条率为8.34%,切面平整度为95.94%;24 mm薯条在曲柄转速44.10 r/min、切条速度183.10 m/s时达到最优,此时断条率为5.63%,切面平整度为91.19%,满足红薯切条机技术要求。

## 参 考 文 献

- [1] 胡甜甜,张磊,贾珊,等.红薯的营养特性贮藏及加工制品的研究现状及进展[J].农产品加工,2023(11):84-88,92. HU Tiantian, ZHANG Lei, JIA Shan, et al. Research status and progress of nutritional characteristics, storage and processing products of sweet potato[J]. Farm Products Processing, 2023(11):84-88,92. (in Chinese)
- [2] 彭一,白正国.红薯培育要点及产品机械化加工技术分析[J].现代食品,2023,29(10):33-35. PENG Yi, BAI Zhengguo. Analysis of key points of sweet potato cultivation and product mechanized processing technology[J]. Modern Food, 2023, 29(10):33-35. (in Chinese)
- [3] 王相友,王中义,曲军哲,等.入料速度动态调节式马铃薯切条机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(6):332-342. WANG Xiangyou, WANG Zhongyi, QU Junzhe, et al. Design and experiment of potato slicer with dynamic adjustment of feeding speed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6):332-342. (in Chinese)
- [4] 王相友,刘为龙,张浩,等.整列定位夹切组合式马铃薯种薯切块装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):148-158. WANG Xiangyou, LIU Weilong, ZHANG Hao, et al. Design and experiment of seed potato cutting device of sorting-positioning and clamping-cutting combined[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):148-158. (in Chinese)
- [5] 王秀丽,齐玮,马云倩,等.马铃薯主食认知水平及消费行为研究[J].中国食物与营养,2017,23(12):54-57. WANG Xiuli, QI Wei, MA Yunqian, et al. Consumer knowledge and behavior of potato staple food[J]. Food and Nutrition in China, 2017, 23(12):54-57. (in Chinese)
- [6] 方治国,温海霞,张艳,等.襄阳市马铃薯产业现状及发展建议[J].中南农业科技,2022,43(6):75-77. FANG Zhiguo, WEN Haixia, ZHANG Yan, et al. Current status and development recommendations for the potato industry in Xiangyang City[J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2022, 43(6):75-77. (in Chinese)
- [7] YILDIZ G, PALMA S, FENG H. Ultrasonic cutting as a new method to produce fresh-cut red delicious and golden delicious apples[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(12):3391-3398.
- [8] 陈义厚.离心式人参切片机的设计与研究[J].长江大学学报(自然科学版),2014,11(23):65-67,8. CHENG Yihou. Studies on centrifugal ginseng microtome machine[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition),

2014,11(23):65-67,8. (in Chinese)

- [9] Potato chip slicer machine; model CC slicer[EB/OL]. <https://www.urschel.com/machines/model-cc-slicer>.
- [10] 毕伟. 莲藕物料特性及切片技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.  
BI Wei. Studies on slicing techniques and material characteristic of lotus root[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)
- [11] 湖北省农业科学院中药材研究所. 一种用于葛根智能切块的切片机装置: CN202122203451.3[P]. 2022-04-01.
- [12] 吕金庆, 杨晓涵, 李紫辉, 等. 纵横刀组协同式马铃薯种薯切块装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 89-97.  
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LI Zihui, et al. Design and test of seed potato cutting device with vertical and horizontal knife group[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 89-97. (in Chinese)
- [13] 杨培刚, 刘丽萍, 熊少华, 等. 新型莲藕切片机设计与优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 99-101, 136.  
YANG Peigang, LIU Liping, XIONG Shaohua, et al. Design and optimization of a new type of lotus root slicing machine[J]. Food & Machinery, 2014, 30(2): 99-101, 136. (in Chinese)
- [14] High performance food dicer[EB/OL]. <https://www.urschel.com/machines/Sprint-28482-DicerA>.
- [15] 高雪丽, 杨瑶香, 何胜华, 等. 市售红薯粉条的品质研究[J]. 许昌学院学报, 2023, 42(2): 77-80.  
GAO Xueli, YANG Yaoxiang, HE Shenghua, et al. Study on quality of commercially available sweet potato vermicelli[J]. Journal of Xuchang University, 2023, 42(2): 77-80. (in Chinese)
- [16] 葛丽丽. 山野菜营养面条的研制[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(2): 34-38.  
GE Lili. Development of nutritional noodles with potherb[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(2): 34-38. (in Chinese)
- [17] 杜杰, 钟耀广, 田燕楠, 等. 响应面法优化玉米无矾粉丝加工工艺及品质研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 449-455.  
DU Jie, ZHONG Yaoguang, TIAN Yannan, et al. Study on optimization processing technology and quality of non-alum corn starch vermicelli by response surface methodology[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(3): 449-455. (in Chinese)
- [18] 李刚凤, 谭沙, 马贵成. 印江纯天然红薯粉条加工及品质评价[J]. 粮食与油脂, 2014(8): 25-28.  
LI Gangfeng, TAN Sha, MA Guicheng. Processing and quality evaluation of Yinjiang natural sweet potato starch noodles[J]. Cereals & Oils, 2014(8): 25-28. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 陈舜, 易克传, 张新伟, 等. 高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 30-42.  
CHEN Shun, YI Kechuan, ZHANG Xinwei, et al. Design and test of longitudinal axial flow high and low roller type fresh corn flexible peeling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 30-42. (in Chinese)
- [21] 杨然兵, 田光博, 尚书旗, 等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 107-118.  
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107-118. (in Chinese)
- [22] 刘子良, 王庆祝, 于慧爽, 等. 梳齿带自走式杭白菊收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 43-51, 100.  
LIU Ziliang, WANG Qingzhu, YU Huishuang, et al. Design and experiment of self-propelled harvester with comb and conveyer belt for Hangzhou white chrysanthemum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 43-51, 100. (in Chinese)
- [23] 张瑞, 田连祥, 王东伟, 等. 三垄六行花生有序铺放收获机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(6): 177-182.  
ZHANG Rui, TIAN Lianxiang, WANG Dongwei, et al. Design and experimental off orderly laying peanut harvester with three ridges and six rows[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(6): 177-182. (in Chinese)
- [24] 吴晓媚, 何亚凯, 刘毅君, 等. 块根块茎类果蔬连续削皮机设计与试验[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(6): 67-74.  
WU Xiaomei, HE Yakai, LIU Yijun, et al. Design and experiment of a continuous peeling machine for root and tuber fruits and vegetables[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(6): 67-74. (in Chinese)