

高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮装置设计与试验

陈 舜<sup>1</sup> 易克传<sup>1,2</sup> 张新伟<sup>1,2</sup> 姜春霞<sup>1</sup> 王晴晴<sup>1</sup> 黄 鑫<sup>1</sup>

(1. 安徽科技学院机械工程学院, 凤阳 233100; 2. 安徽省玉米育种工程技术研究中心, 凤阳 233100)

**摘要:** 针对我国鲜食玉米收获过程中剥皮装备机械工作效率低、剥皮损坏率高等问题,在现有剥皮装置结构的基础上,设计了一种“柔性分段辊型+螺旋调节架”组合式和橡胶频率振动板相匹配的柔性剥皮装置。根据鲜食玉米物理特性,对鲜食玉米剥皮过程进行力学与运动学分析,确定了影响剥皮性能的主要因素,并对该剥皮装置进行了结构设计及参数分析。运用 ANSYS Workbench/LS-DYDA 模块对鲜食玉米果穗剥皮过程进行仿真,根据理论分析和仿真结果设计了剥皮样机,开展了剥皮试验。为获得样机最佳试验物料,以果穗长度、果穗直径、果穗含水率作为试验因素进行单因素试验,确定长度为 260~280 mm、直径为 64~66 mm、含水率为 66.5%~69% 的果穗作为剥皮机正交试验物料的样品。利用 Design-Expert 软件设计三因素三水平正交试验,以剥皮辊转速、剥皮辊倾角和振动板振动频率作为试验因素,以苞叶剥净率、籽粒破损率作为试验指标。结果表明:对苞叶剥净率和籽粒破损率影响由大到小均为剥皮辊转速、剥皮辊倾角、振动板振动频率;最优参数组合为:剥皮辊转速 478.72 r/min、剥皮辊倾角 8.05°、振动板振动频率 259.20 次/min,此时苞叶剥净率为 92.41%,籽粒破损率为 1.47%。在该条件下根据实际工况开展验证试验,得到苞叶剥净率、籽粒破损率分别为 91.75%、1.55%,与参数优化基本一致,满足鲜食玉米剥皮要求。该研究可为鲜食玉米剥皮装备的优化设计和选择提供技术支持。

**关键词:** 鲜食玉米; 柔性剥皮装置; 高低辊组合式; 计算机仿真

**中图分类号:** S233.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0030-13

Design and Test of Longitudinal Axial Flow High and Low Roller Type Fresh Corn Flexible Peeling Device

CHEN Shun<sup>1</sup> YI Kechuan<sup>1,2</sup> ZHANG Xinwei<sup>1,2</sup> JIANG Chunxia<sup>1</sup> WANG Qingqing<sup>1</sup> HUANG Xin<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China

2. Anhui Provincial Maize Breeding Engineering Technology Research Center, Fengyang 233100, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low mechanical efficiency and high peeling damage rate of peeling equipment in the harvesting process of fresh corn in China, based on the analysis of the structural characteristics of the existing peeling device, a flexible peeling device with the combination of “flexible segmented roller type + spiral adjusting frame” and rubber frequency vibration plate matching was designed. According to the physical characteristics of fresh corn, the peeling process of fresh corn was analyzed mechanically and kinematically, the main factors affecting the peeling performance were determined, and the structural design and parameter analysis of the peeling device was carried out. ANSYS Workbench/LS-DYDA module was used to simulate the peeling process of fresh corn ear, and a peeling prototype was fabricated according to the theoretical analysis and simulation results, and the peeling test was carried out. In order to obtain the best test material for the prototype, a single-factor test was conducted with cob length, ear diameter and ear water content as test factors, and ears with length of 260~280 mm, diameter of 64~66 mm, and water content of 66.5%~69% were determined as samples for the orthogonal test material of the peeling machine. Design-Expert software was used to design a three-factor, three-level orthogonal test, with peeling roller speed, peeling roller inclination angle and vibrating plate vibration frequency as test factors, and bract peeling rate and grain breaking rate as test indicators.

收稿日期: 2023-07-21    修回日期: 2023-08-29  
基金项目: 安徽省重点研发计划项目(202104a06020001)  
作者简介: 陈舜(1994—),男,硕士生,主要从事农产品收获与加工机械化研究,E-mail: chenecs202206@163.com  
通信作者: 易克传(1969—),男,教授,主要从事农产品收获与加工研究,E-mail: Yike@ahstu.edu.cn

The results showed that the impact on bract peeling rate and grain breaking rate from large to small were peeling roller speed, peeling roller inclination angle, frequency vibration plate; the optimal combination of parameters: peeling roller speed of 478.72 r/min, peeling roller inclination angle of 8.05°, vibrating plate vibration frequency of 259.20 times/min, at this time, the bract peeling rate was 92.41%, and the grain breaking rate was 1.47%. Under this condition, the verification test was carried out according to the actual working conditions, and the bract peeling rate and grain breaking rate were 91.75% and 1.55%, respectively, which were basically consistent with the parameter optimization and met the requirements of fresh corn peeling. The research result can provide technical support for the optimal design and selection of fresh corn peeling equipment.

**Key words:** fresh corn; flexible peeling device; combined high and low rollers; computer simulation

## 0 引言

近年来,鲜食玉米由于其独特的口感和营养价值,在消费者中的受欢迎度一直在稳步上升<sup>[1-5]</sup>。由于鲜食玉米在经济上具有重要的价值,因此,其种植面积逐年不断增加。国内一些生产厂家虽有相应的鲜食玉米剥皮装备,但存在果穗苞叶剥净率低以及籽粒破损率高等问题。因此,鲜食玉米果穗剥皮是玉米机械化收获过程中的一项重要环节<sup>[6-7]</sup>。

在竹笋剥皮方面,曹成茂等<sup>[8]</sup>设计一种刀削结合滚动摩擦去皮装置,采用刀片切除笋皮与相向旋转滚筒之间存在高度差、材质不同而产生摩擦,通过剥皮机构完成对竹笋的剥皮,有效地提高了对竹笋的剥皮效率;在鲜菱角脱壳方面,万志华等<sup>[9]</sup>设计一种夹持式鲜菱角脱壳机,采用旋转刀切除两侧弯角,利用胶辊碾搓挤压将菱壳剥离,提高了脱壳生产效率,降低了菱仁损伤;在柑橘去皮方面,潘海兵等<sup>[10]</sup>设计一种对辊式去皮机构,采用两套独立动力系统,通过刮板系统带动运动,利用相向旋转的对辊系统进行夹持并撕裂,直至整体果皮被去除。通过对以上研究分析可知,对于剥皮方面采用刀削式或相向旋转摩擦式。对玉米力学及机械特性进行分析比较<sup>[11]</sup>,发现鲜食玉米苞叶和籽粒之间有明显的粘连性,高含水率进一步加剧了这种粘附性。目前,鲜食玉米剥皮装置研究较为有限<sup>[12-15]</sup>,已有的剥皮装置大多采用独立式高低辊摩擦原理进行剥皮,由于鲜食玉米收获时种类和果穗特性存在差异,这些装置难免存在不足,因此需研制适合鲜食玉米果穗剥皮的组合式柔性剥皮装置,以解决现有的问题。

本文根据鲜食玉米的物理特性,设计一种“柔性分段辊型+蜗轮蜗杆”组合式和橡胶频率振动板相匹配的柔性剥皮装置,通过建立果穗-机械动力学模型并进行理论分析,同时进行结构设计与参数选择,通过单因素试验和多因素正交试验确定影响苞叶剥净率和籽粒破损率的因素,最后搭建剥皮试验

台,并进行参数优化试验,以期为鲜食玉米剥皮装备的进一步研发提供理论参考。

## 1 鲜食玉米果穗物理特性及力学参数测定

### 1.1 果穗物理参数

如图 1 所示,鲜食玉米植株和果穗的三轴尺寸示意图,整体鲜食玉米果穗的物理性质是设计鲜食玉米果穗剥皮机的重要依据。选用安徽省凤阳县的鲜食玉米。为了更好地分析鲜食玉米三维尺寸关系,以苞叶底部垂直上边缘为原点建立笛卡尔坐标系,其中  $X$  轴表示长度方向, $Y$  轴表示宽度方向, $Z$  轴表示高度方向。随机抽取鲜食玉米样品 100 个,用游标卡尺分别测量鲜食玉米长度、直径,结果如表 1 所示。

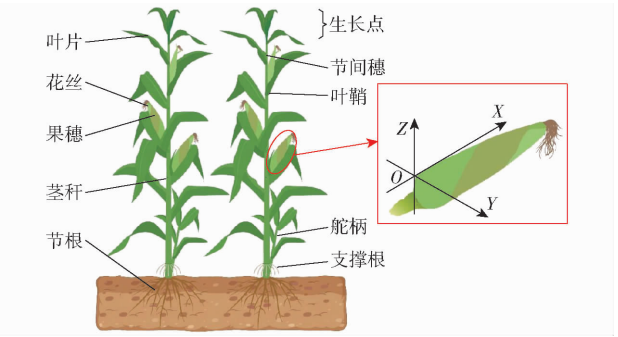


图 1 鲜食玉米植株及果穗的三轴尺寸示意图

Fig. 1 Triaxial dimensional diagram of fresh maize plants and ears

表 1 鲜食玉米果穗尺寸测量结果

Tab. 1 Fresh corn ear size measurement results

| 参数 | mm    |       |       |
|----|-------|-------|-------|
|    | 平均值   | 最大值   | 最小值   |
| 长度 | 266.3 | 294.0 | 227.0 |
| 直径 | 65.3  | 68.2  | 59.6  |

### 1.2 力学参数测定

收获期随机选取 50 个果穗进行力学参数测定。利用 UTM6104 型微机控制电子万能试验机对鲜食玉米果穗进行断裂和抗拉力学性能试验,取叶片上沿着纵向脉方向切取长 100 mm、宽 30 mm 的矩形,

进行纵向拉伸试验;取同样或相似位置沿着垂直于纵向脉方向从剩余的部分切取长 50 mm、宽 30 mm 的矩形,进行横向拉伸试验,如图 2 所示。

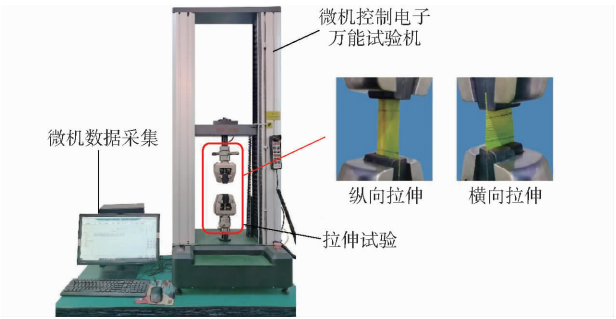


图 2 鲜食玉米果穗力学性能试验

Fig. 2 Mechanical properties test of fresh corn ear

测量的鲜食玉米果穗力学性能参数包括鲜食玉米苞叶断裂力、抗拉强度和断裂能,各个载荷由微机控制电子万能试验机自动采集并传输至计算机,抗拉强度计算公式为<sup>[16-18]</sup>

$$\sigma_t = \frac{F_b}{A} = \frac{F_b}{wt} \tag{1}$$

式中  $\sigma_t$ ——抗拉强度,MPa  
 $F_b$ ——断裂力,N  
 $A$ ——试样截面积,mm<sup>2</sup>  
 $w$ ——试样宽度,mm  
 $t$ ——试样平均厚度,mm

断裂能计算方法为<sup>[19-21]</sup>

$$E_g = \int_0^x F(x) dx \approx \sum_{n=1}^{i-1} \frac{F_{n+1} + F_n}{2} (x_{n+1} - x_n) \tag{2}$$

式中  $E_g$ ——断裂能,J  
 $F(x)$ ——力,N  
 $F_n、F_{n+1}$ ——拉伸载荷,N  
 $x_n、x_{n+1}$ ——试件延伸量,mm

鲜食玉米果穗力学性能测定结果如表 2 所示。

表 2 鲜食玉米果穗力学性能测定结果  
Tab. 2 Measurement results of mechanical properties of fresh corn ear

| 拉伸方向 | 参数       | 平均值                       | 最大值                       | 最小值                       |
|------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 纵向拉伸 | 断裂力/N    | 46. 68                    | 68. 62                    | 26. 82                    |
|      | 抗拉强度/MPa | 8. 52                     | 10. 45                    | 4. 89                     |
|      | 断裂能/J    | 0. 270 56                 | 0. 464 56                 | 0. 158 40                 |
| 横向拉伸 | 断裂力/N    | 13. 88                    | 25. 13                    | 5. 49                     |
|      | 抗拉强度/MPa | 1. 78                     | 2. 54                     | 0. 87                     |
|      | 断裂能/J    | 1. 844 × 10 <sup>-2</sup> | 3. 071 × 10 <sup>-2</sup> | 7. 150 × 10 <sup>-3</sup> |

由表 2 可得,纵向拉伸远大于横向拉伸,其苞叶层断裂力由外到内呈递减趋势。因此,在苞叶剥离时,最外层苞叶被断裂剥离的力较大。

2 整机结构和工作原理

2.1 整机结构

本文设计的高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮机是将果穗通过有一定倾角的剥皮辊组间相向摩擦碾搓脱皮,从而实现鲜食玉米果穗苞叶剥离的过程。该机由底座、机架、螺旋调节架、剥皮装置、振动板、传动机构组成,如图 3 所示。

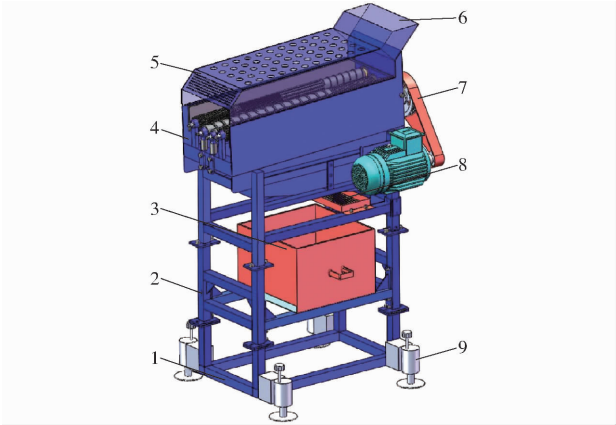


图 3 鲜食玉米剥皮机三维结构图

Fig. 3 Three-dimensional structure of fresh corn peeling machine

1. 底座 2. 机架 3. 物料集装箱 4. 剥皮装置 5. 机盖 6. 入料口 7. 传动机构 8. 物料筛选盒 9. 螺旋调节架

2.2 工作原理

在操作过程中,果穗以一定的初速度从入料口进入有一定倾斜角的高低辊相向旋转的剥皮辊组间;频率振动板以相同频率进行周期性振动,此时,剥皮辊以一定速度对果穗进行相向摩擦碾搓剥皮。同时,果穗表面受到 2 个不同方向的切向摩擦力作用,除此之外,其自身重力以及剥皮辊的转动也会产生绕自身轴线的力矩,这些力的作用使得果穗沿着剥皮辊下滑,当剥皮辊表面的相向摩擦碾搓力大于苞叶与根部连接的力以及苞叶与籽粒之间的粘附力时,苞叶会被剥离。结合鲜食玉米果穗外形结构特点和剥皮作业所需的动力,确定鲜食玉米剥皮机主要技术参数如表 3 所示。

表 3 鲜食玉米果穗剥皮机主要技术参数  
Tab. 3 Main technical parameters of fresh corn ear peeling machine

| 参数                             | 数值              |
|--------------------------------|-----------------|
| 外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)         | 1 750×555×1 970 |
| 整机质量/kg                        | 115             |
| 剥皮辊电机额定功率/kW                   | 4               |
| 振动板电机额定功率/kW                   | 0. 38           |
| 剥皮辊转速/(r·min <sup>-1</sup> )   | 0~500           |
| 振动板振动频率/(次·min <sup>-1</sup> ) | 0~270           |

### 3 果穗-机械力学模型建立

通过选择果穗和剥皮辊在任何一点上的接触力矩,建立运动力学模型。对剥皮力和果穗的滑动条件进行分析,以评估剥皮辊运动。剥皮过程中对果穗的受力分析如图 4 所示。

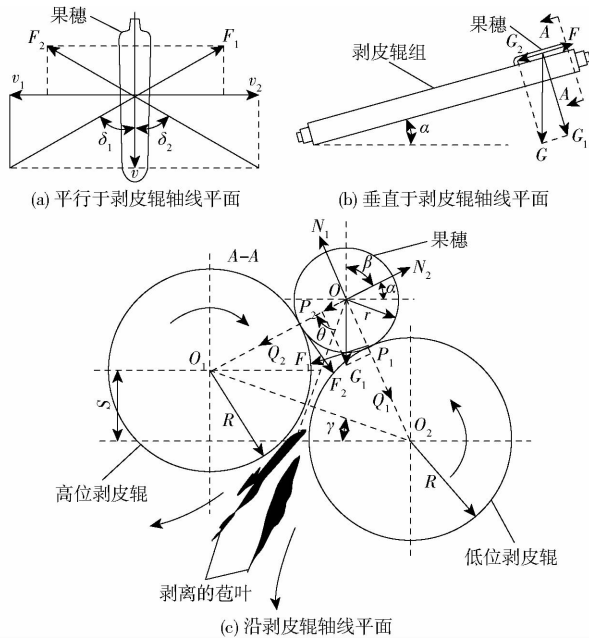


图 4 果穗剥皮过程受力分析

Fig. 4 Analysis of forces on peeling process of fruit ear

#### 3.1 果穗剥皮受力分析

由图 4 可知

$$(F_1 + F_2) \cos \beta = (N_1 + N_2) \sin \beta \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} N_1 = Q_1 \\ N_2 = Q_2 \\ F_1 = \mu_1 N_1 \\ F_2 = \mu_2 N_2 \end{cases}$$

式中  $N_1, N_2$ ——低位辊、高位辊对果穗的支撑力, N  
 $F_1, F_2$ ——低位辊、高位辊作用于果穗的摩擦力, N

$Q_1, Q_2$ ——果穗作用于低位辊、高位辊的力, N

$\beta$ ——剥皮辊抓取角, ( $^\circ$ )

当  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$  ( $\mu$  为一定值) 时, 式(3)可写成

$$\mu (N_1 + N_2) \cos \beta = (N_1 + N_2) \sin \beta \quad (4)$$

可得

$$\tan \beta = \mu$$

由图 4 可得

$$\sin \beta = \frac{R}{R+r} \quad (5)$$

式中  $R$ ——剥皮辊半径, mm

$r$ ——果穗半径, mm

根据式(5)可得

$$R = \frac{r \sin \beta}{1 - \sin \beta} \quad (6)$$

由表 1 可知, 鲜穗平均长度为 266.3 mm, 直径为 65.3 mm。  $\beta$  为剥皮辊升高果穗产生开始下滑的阈值, 通过计算可得剥皮辊抓取角  $\beta$  为  $35.5^\circ \sim 41.1^\circ$ , 经过综合考虑, 取果穗直径平均值作为参数, 设计剥皮辊直径为 73 mm。

#### 3.2 果穗下滑时受力分析

如图 4b 所示, 果穗沿剥皮辊下滑条件为

$$G \tan \alpha \geq F \quad (7)$$

式中  $G$ ——果穗自重, N

$F$ ——剥皮辊对果穗支撑力, N

$\alpha$ ——剥皮辊对果穗支撑力  $F$  方向与剥皮辊倾斜方向夹角, ( $^\circ$ )

剥皮辊对果穗摩擦力计算公式为

$$F = F_1 \cos \delta_1 + F_2 \cos \delta_2 = \frac{1}{f_1} \mu_1 P_1 \cos \delta_1 + \frac{1}{f_2} \mu_2 P_2 \cos \delta_2 \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \delta_1 = \arctan \frac{v_1}{v} \\ \delta_2 = \arctan \frac{v_2}{v} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $P_1, P_2$ ——果穗对低位辊、高位辊的压力, N

$\mu_1, \mu_2$ ——低位辊、高位辊与果穗间的摩擦因数

$v_1, v_2$ ——果穗相对于低位辊、高位辊切向速度, m/s

$v$ ——果穗整体速度, m/s

$\delta_1, \delta_2$ ——低位辊、高位辊作用于果穗的摩擦力与辊轴方向的夹角, ( $^\circ$ )

$f_1, f_2$ ——低位辊、高位辊与果穗间的切向摩擦因数

$N_1, N_2, G_1$  之间存在关系

$$\frac{N_1}{\sin(\gamma + \theta)} = \frac{N_2}{\sin(\theta - \gamma)} = \frac{G_1}{\sin(180 - 2\theta)} \quad (10)$$

式中  $\theta$ ——果穗中心和辊连线中心间的连线与果穗和辊中心连线的夹角, ( $^\circ$ )

$\gamma$ ——高低辊中心连线与水平的夹角, ( $^\circ$ )

其中,  $\sin \gamma = \frac{S}{2R}$ ,  $\sin \theta = \frac{R}{R+r}$ , 代入式(10)得到

$$\begin{cases} N_1 = \frac{G \cos \alpha (R+r) (R \sqrt{4R^2 - S^2} + S \sqrt{r^2 + 2Rr})}{4R^2 \sqrt{r^2 + 2Rr}} \\ N_2 = \frac{G \cos \alpha (R+r) (R \sqrt{4R^2 - S^2} - S \sqrt{r^2 + 2Rr})}{4R^2 \sqrt{r^2 + 2Rr}} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $S$ ——高低位辊轴心高度差, mm

由式(11)可知, 果穗对辊子上的支撑力受剥皮辊倾斜角  $\alpha$ 、剥皮辊半径  $R$ 、高低位辊轴心高度差  $S$ 、

果穗半径  $r$  的影响。

结合式(8)、(10),得到

$$F = \frac{G \cos \alpha (R + r)}{4R} \left[ \frac{\sqrt{4R^2 - S^2}}{\sqrt{r^2 + 2Rr}} (\mu_1 \cos \delta_1 + \mu_2 \cos \delta_2) + \frac{S}{R} (\mu_1 \cos \delta_1 - \mu_2 \cos \delta_2) \right] \quad (12)$$

将式(12)代入式(8),可得果穗沿辊下滑的条件,整理得

$$\tan \alpha > \frac{R + r}{4R} \left[ \frac{\sqrt{4R^2 - S^2}}{\sqrt{r^2 + 2Rr}} (\mu_1 \cos \delta_1 + \mu_2 \cos \delta_2) + \frac{S}{R} (\mu_1 \cos \delta_1 - \mu_2 \cos \delta_2) \right] \quad (13)$$

由式(13)可知果穗沿剥皮辊正常滑动的条件与摩擦因数  $\mu$ 、剥皮辊倾斜角  $\alpha$ 、果穗半径  $r$ 、剥皮辊半径  $R$ 、高低位辊轴线高度差  $S$  以及果穗的绝对速度方向角  $\delta$  有关。

在鲜食玉米果穗剥皮时,苞叶主要依靠苞叶与剥皮辊间的切向摩擦力,为此需满足

$$\begin{cases} \sigma > \sigma_1 \\ \sigma > \sigma_2 \\ F_N > P_{nmax} \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\sigma$ ——苞叶与辊间的摩擦因数

$\sigma_1$ ——苞叶间的摩擦因数

$\sigma_2$ ——苞叶与籽粒间的摩擦因数

$F_N$ ——剥皮辊对苞叶的切向摩擦力,N

$P_{nmax}$ ——苞叶与果穗根部的最大连接力,N

由式(13)及图4可知,果穗的剥皮效果受到许多因素影响。提高苞叶剥净率和降低籽粒破损率是剥皮设备设计关键<sup>[22-24]</sup>。根据式(14)可知,切向摩擦力需大于苞叶、苞叶与籽粒之间的摩擦力,使剥皮辊能碾搓苞叶并撕裂剔除。

4 关键部件设计

4.1 “柔性分段辊型+螺旋调节架”组合式剥皮部件

在鲜食玉米果穗剥皮过程中,剥皮辊直接与果穗接触,是剥皮机构核心部件。剥皮辊主要由一对柔性高低辊组成,剥皮辊材质为弹性体橡胶。果穗在剥皮辊上进行剥皮时每个阶段发生的变化不同,需要在不同的阶段使用不同的剥皮表面结构模型,以达到提高苞叶剥净率、降低籽粒破损率的目的。

4.1.1 柔性分段辊型

在剥皮前期,苞叶呈掀起并剥皮的状态;在中后期时,继续抓取未剥皮或余留的苞叶,还需考虑降低籽粒损坏率。果穗剥皮过程分为3个过程和4个阶段,3个过程为:苞叶掀起并碾搓剥皮、高速撕拽剥离并除杂、导流输送;4个阶段由长度相等的橡胶

套组成,每段长为375 mm,凸起表面花纹为5 mm。在剥皮辊Ⅰ段,随着剥皮辊转速及时间的增加,加上横向螺旋凸起花纹的摩擦力,能够较快地攫取苞叶并划开;在剥皮辊Ⅱ段,对攫取的苞叶进行快速高效的剥离,此阶段苞叶的受力主要集中在苞叶上半部分,可以加大对粘附性较强的鲜食玉米果穗进行剔除;在剥皮辊Ⅲ段,进行剩余苞叶的除杂过程,此阶段苞叶已大部分进行剔除,剩余小部分的杂叶进行进一步的排除;在剥皮辊Ⅳ段,此阶段果穗苞叶基本完成剥离,剩余极少部分的余留,本阶段剥皮辊以纵向螺旋凸起花纹为主,起到除杂、导流疏送的作用。为满足鲜食玉米剥皮效果和降低籽粒损伤,剥皮辊长度必须比普通田间玉米剥皮辊长,根据以往经验及文献[12,25]对甜糯玉米剥皮机的设计,最终剥皮辊长度设定为1 500 mm,高低位辊轴线高度差选择为28 mm,高低辊轴线水平间距70 mm。高低位辊结构示意图如图5所示。

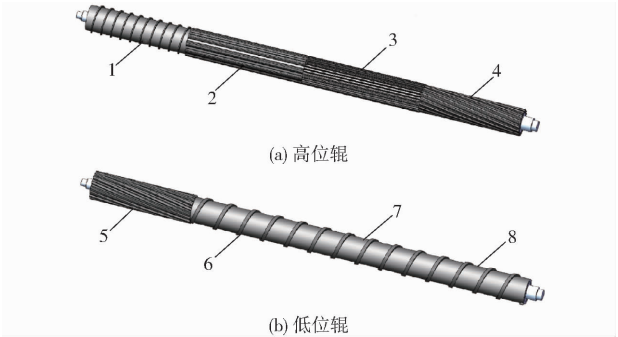


图5 高低位辊结构示意图

Fig.5 Schematics of structure of high and low peeling rollers

- 1.高位辊Ⅰ段 2.高位辊Ⅱ段 3.高位辊Ⅲ段 4.高位辊Ⅳ段  
5.低位辊Ⅰ段 6.低位辊Ⅱ段 7.低位辊Ⅲ段 8.低位辊Ⅳ段

4.1.2 螺旋调节架

剥皮装备的安装倾角影响果穗在剥皮装备上的通过能力,进而影响装备的工作效率、剥净率、籽粒破损率和功耗等<sup>[26]</sup>。在鲜食玉米果穗剥皮时,使剥皮辊有一定的倾斜角,能够提高果穗剥皮效率,提升剥皮性能。目前剥皮装备虽有采用液压缸调整升降<sup>[22]</sup>,或通过电机进行调节角度,但剥皮设备整体成本较高。为了降低成本,设计图6所示的螺旋调节架,其中前后各有1对,采用圆柱蜗杆传动,调节升降。其中蜗杆头数为1,上升或下降一定距离时能够产生自锁能力。如果在进行调节升降时,前面2个蜗轮蜗杆调节架上升或下降,而后面2个蜗轮蜗杆调节架固定不动,会导致机架发生干涉作用,影响剥皮辊剥皮效果。因此,前面2个蜗轮蜗杆进行调节上升或下降时,后面2个蜗轮蜗杆相应的进行上升或下降一定的距离,避免前后支架发生干涉。



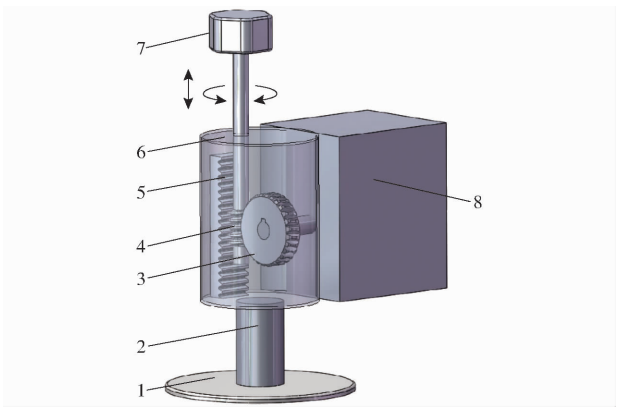


图 6 螺旋调节架三维图

Fig. 6 Spiral adjustment frame 3D drawing

1. 底盘 I 2. 支撑柱 3. 蜗轮 4. 蜗杆 5. 导轨条 6. 外壳  
7. 旋转扶手 8. 固定块

根据文献[27]可知,带有压送器的大田普通玉米果穗剥皮装置,其剥皮辊倾斜角为 10°~15°为宜<sup>[28]</sup>。根据鲜食玉米果穗自身的特殊性,鲜食玉米果穗剥皮辊倾斜角设定为 5°~9°,根据几何关系可以得到螺旋调节架上升行程最大为 255 mm,满足鲜食玉米果穗剥皮。

4.2 弹性体橡胶频率振动板

鲜食玉米果穗剥皮的过程中,随着剥皮辊转速的不断增加,剥皮装备发生震动的现象,导致果穗在剥皮过程中出现跳动,从而影响果穗剥皮效果。为了使鲜食玉米果穗剥皮更均匀平稳运动,需要添加辅助装置加以改进剥皮效果。

图 7 为频率振动板结构示意图,其由一系列螺旋弹簧和弹性体橡胶板组成。频率振动板能够进行周期性振动,进行循环往复运动,将果穗弹回剥皮辊组间,使其能够保持运动均匀平稳,提高果穗剥皮效率,同时频率振动板中的橡胶板能够减少对籽粒的冲击,降低籽粒破损。

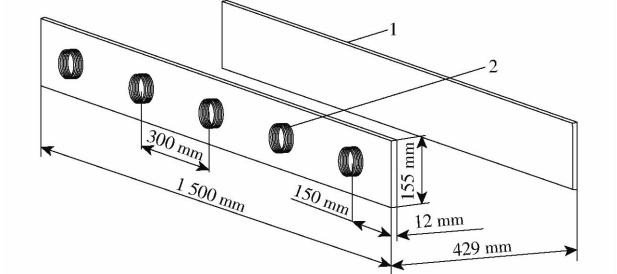


图 7 频率振动板结构示意图

Fig. 7 Frequency vibration plate structure schematic

1. 弹性体橡胶板 2. 螺旋弹簧

5 剥皮系统仿真

5.1 鲜食玉米剥皮机构有限元模型建立

为分析鲜食玉米果穗剥皮运动参数的变化规

律,采用 ANSYS Workbench/LS-DYNA 显示动力学分析软件<sup>[23,29-30]</sup>,对剥皮机构进行运动仿真。

根据表 1 鲜食玉米果穗实际几何结构尺寸和材料特性参数,对鲜食玉米果穗和剥皮机构进行有限元模型简化,各零件本构模型及材料参数如表 4 所示,关键结构参数和装配关系参数如表 5 所示。考虑到单元接触分析的复杂性,在剥皮辊表面添加 SHELL 单元,并采用适合处理复杂模型的四面体网格对各构件进行网格划分,将接触类型定义为自动表面接触,并将载荷曲线应用于果穗重力和剥皮辊旋转,对频率振动板加载周期性往复运动。

表 4 材料本构模型与具体参数

Tab. 4 Constitutive model of materials and its specific parameters

| 项目   | 材料模型                       | 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 弹性模<br>量/MPa | 泊松比      |
|------|----------------------------|------------------------------------------|--------------|----------|
| 剥皮辊  | Mooney - Rivlin 橡胶<br>弹性模型 | 1 500                                    | 801          | 0. 499   |
| 玉米表面 | 粘弹性模型                      | 1 300                                    | 82. 7        | 0. 359   |
| 玉米芯  | 粘弹性模型                      | 600                                      | 500          | 0. 053 9 |
| 振动板  | Mooney - Rivlin 橡胶<br>弹性模型 | 940                                      | 1 869        | 0. 499   |

表 5 结构参数与装配关系参数

Tab. 5 Parameters of structure and assembly relationship

| 参数         | 数值    |
|------------|-------|
| 剥皮辊直径      | 73    |
| 剥皮辊长度      | 1 500 |
| 高低位辊轴线水平间距 | 70    |
| 高低位辊轴线高度差  | 28    |

5.2 仿真试验

以剥皮辊转速、剥皮辊倾斜角和振动频率为试验因素。根据实际工况,在果穗进入剥皮辊前有一定初速度,为了方便计算,以初速度 10 m/s 进入剥皮辊组间。根据文献[12]可知,本文剥皮辊转速为 400~500 r/min;剥皮辊倾斜角为 5°~9°;在剥皮辊匀速转动情况下,满足剥皮作业,设定振动板振动频率为 260 次/min。设计 3 种试验工况,如表 6 所示。

表 6 3 种仿真试验工况

Tab. 6 Three simulation test conditions

| 工况 | 剥皮辊转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 剥皮辊倾角/(°) |
|----|------------------------------------------|-----------|
| 1  | 400                                      | 5         |
| 2  | 450                                      | 7         |
| 3  | 500                                      | 9         |

### 5.3 仿真结果

将 ANSYS Workbench/LS-DYNA 仿真的模型,以 d3plot 文件导入软件 LS-PREPOST 中,得到了

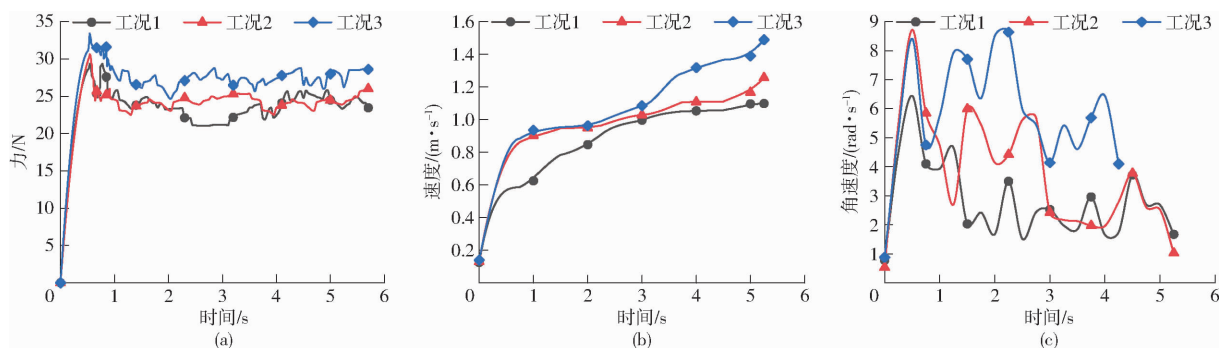


图8 果穗运动参数-时间曲线

Fig. 8 Parameter-time curves of ear movement

如图8a所示,果穗进入剥皮辊所受力随着剥皮辊的转速及时间的增加呈增长趋势,其中3种工况下果穗所受最大作用力为29.34、30.61、33.42 N。从图8a可以看出,随着时间的增加,果穗所受的作用力达到最大值后,出现平稳的趋势,在各种工况中,果穗所受冲击力最大为剥皮辊Ⅰ段,此时果穗波动性较大,同时对果穗作用力也大,有利于果穗苞叶划开并攫取的状态;进入第Ⅱ、Ⅲ段时,受力出现上下稳定起伏的状态,这有利于在果穗剥皮过程中剔除苞叶,同时不易损伤籽粒;在第Ⅳ段时,所受力逐渐趋于稳和状态,此时有利于果穗在剥皮的同时降低所受的力,能够对剩余苞叶进行除杂并起到导流顺穗的作用。

如图8b所示,果穗随着剥皮辊速度及时间的增加呈先增长后趋向平稳的状态,3种工况下果穗平均运动速度依次为0.94、0.96、1.06 m/s。从图8b可以看出,随着时间的增加,果穗随着剥皮辊转速及倾斜角增大,果穗沿轴方向的运动速度也随之变大,经过一定时间后,趋向平稳的状态,有利于果穗前期加快剥皮,后期减少阻力的增加,提高果穗剥皮效率。

如图8c所示,随着剥皮辊速度和剥皮角度的增加,果穗围绕其轴线旋转平均角速度呈初始增长。随后,呈周期性波动。3种工况条件下平均角速度分别为2.79、3.76、5.89 rad/s。剥皮辊Ⅰ段和Ⅱ段表现出果穗绕其自身轴线的最高角速度。当剥皮辊过渡到Ⅲ和Ⅳ段时,平均角速度逐渐下降。这表明剥皮辊在初始阶段主要侧重于去除苞叶,而在中期和后期阶段减少旋转扭矩。可以确保去除任何剩余的苞叶杂质,同时尽量减少对籽粒的损伤。

为了更好地显示出果穗受力的状态,以工况1(400 r/min)进行果穗在剥皮辊上的受力有效应变

果穗在剥皮辊上运动时的受力曲线、果穗沿剥皮辊轴方向运动的速度曲线、果穗绕轴线旋转角速度曲线,如图8所示。

云图分析,如图9所示。从图9可以看出,果穗在剥皮辊上受力的情况,在剥皮辊Ⅰ段,随着剥皮辊转速及时间的增加,加上横向螺旋凸起花纹的摩擦力,能够较快地攫取苞叶并划开,此时苞叶受力情况最大,如图9a所示;在剥皮辊Ⅱ段,进行苞叶的剔除,此阶段苞叶的受力主要集中在苞叶的上半部分,这有利于进行苞叶剥离,可以加大对苞叶附着性较强的鲜食玉米果穗进行快速高效的剥皮,如图9b所示;在剥皮辊Ⅲ段,进行剩余苞叶的除杂过程,此阶段苞叶已大部分进行剔除完毕,果穗只有局部的受力,如图9c所示;在剥皮辊Ⅳ段,此阶段玉米果穗苞叶基本完成,剩余极少部分的余留杂叶,同时本阶段剥皮辊以纵向螺旋凸起花纹为主,起到导流疏通果穗的作用,本阶段果穗受力大部分比较均匀,并且受力涵盖果穗上、中阶段,对果穗籽粒伤害较小,同时还能除去余留苞叶,如图9d所示。通过以上叙述,鲜食玉米果穗在整个剥皮运动过程中,受力情况能够满足鲜食玉米果穗剥皮的要求,符合设计要求。

## 6 剥皮性能试验

### 6.1 试验材料及设备

试验材料产自安徽省凤阳县凤糯168,于2022年9月下旬采收。选取穗大饱满、表皮无损伤、无虫害的样品,鲜食玉米果穗含水率为 $(67.59\% \pm 5\%)$ ,试验材料样品如图10所示,样机设备如图11所示。

### 6.2 试验方法

高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮分离装置试验台旨在进行对剥皮性能的考察,参照GB/T 21961—2008《玉米收获机械 试验方法》和GB/T 21962—2020《玉米收获机械 技术条件》的依据,选择苞叶剥净率 $Y_1$ 和籽粒破损率 $Y_2$ 作为试验评价指标,计算公式为

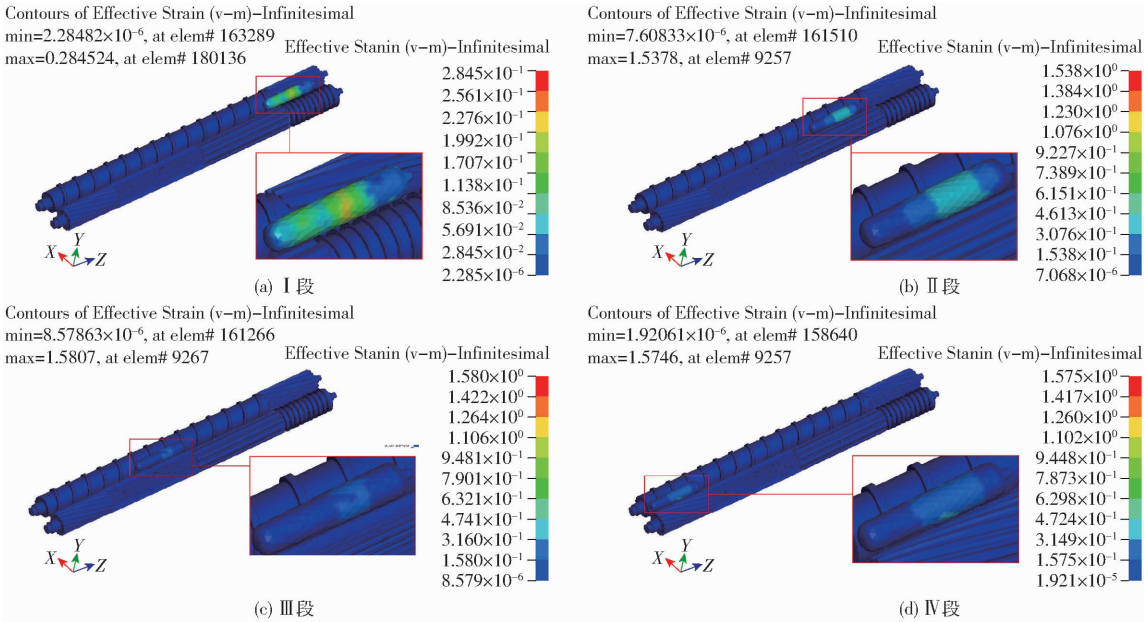


图 9 果穗在剥皮辊上受力有效应变云图

Fig. 9 Effective strain maps of ear force on peeling roller



图 10 试验材料样品

Fig. 10 Test material samples

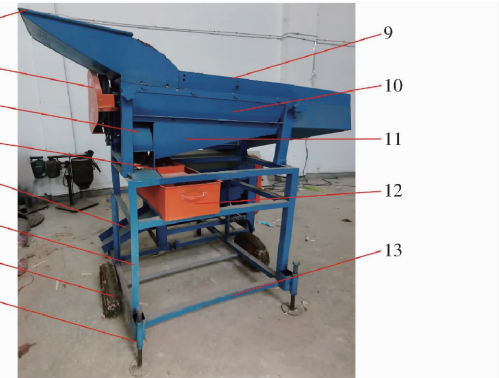


图 11 试验样机

Fig. 11 Test prototype

1. 螺旋调节架 2. 行驶轮 3. 机架 4. 排杂装置 5. 物料筛选盒 6. 物料鼓风机 7. 传动机构 8. 入口口 9. 机盖 10. 剥皮装置 11. 物料收集装置 12. 物料集装箱 13. 底座

$$Y_1 = \frac{G - G_j}{G} \times 100\% \quad (15)$$

$$Y_2 = \frac{m_s}{m_i} \times 100\% \quad (16)$$

式中  $G$ ——测定样品果穗总数,个  
 $G_j$ ——未剥净苞叶果穗数,个

$m_s$ ——破碎籽粒质量,g  
 $m_i$ ——样品籽粒总质量,g

6.3 单因素试验

6.3.1 试验设计

根据鲜食玉米的特点,选取果穗长度、直径和含水率作为试验因素;通过前期预试验,确定剥皮装备参数为:剥皮辊转速 450 r/min、剥皮辊倾角 7°、振动板频率 260 次/min。

6.3.2 试验结果与分析

根据鲜食玉米物理参数测定,设定各因素和水平如表 7 所示,单因素试验结果如图 12 所示。

表 7 单因素试验因素水平

| Tab. 7 Factors and levels of single factor experiment |           |         |             |
|-------------------------------------------------------|-----------|---------|-------------|
| 水平                                                    | 因素        |         |             |
|                                                       | 长度/mm     | 直径/mm   | 含水率/%       |
| 1                                                     | 220 ~ 240 | 60 ~ 62 | 61.5 ~ 64.0 |
| 2                                                     | 240 ~ 260 | 62 ~ 64 | 64.0 ~ 66.5 |
| 3                                                     | 260 ~ 280 | 64 ~ 66 | 66.5 ~ 69.0 |
| 4                                                     | 280 ~ 300 | 66 ~ 68 | 69.0 ~ 71.5 |
| 5                                                     | 300 ~ 320 | 68 ~ 70 | 71.5 ~ 74.0 |

由图 12 可得,随着果穗长度、直径和含水率增加,苞叶剥净率呈缓慢上升后迅速下降,而籽粒破损率先急剧下降后缓慢上升。对于上述情况,造成苞叶剥净率过低的原因是果穗直径过大,剥皮辊组间间隙无法快速去除剥离的苞叶,造成苞叶积聚,当含水率增加时,进一步加剧了苞叶与籽粒之间的粘连性,导致果穗残留苞叶;造成籽粒破损率过大的原因是在剥皮辊长度一定时,果穗长度较小,且含水率较低,进行剥离苞叶时果穗停留在剥皮辊组间时间长,



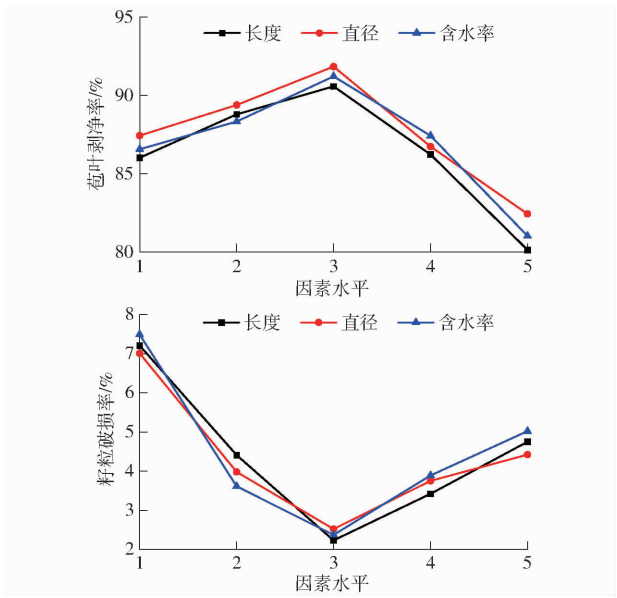


图 12 单因素试验结果

Fig. 12 Results of single factor experiment

加大了对籽粒的损伤。其中,当果穗长度为 260 ~ 280 mm 时,苞叶剥净率最大,为 90.57%,籽粒破损率最小,为 2.23%;当果穗直径为 64 ~ 66 mm 时,苞叶剥净率最大,为 91.83%,籽粒破损率最小,为 2.41%;当果穗含水率为 66.5% ~ 69% 时,苞叶剥净率最大,为 91.21%,籽粒破损率最小,为 2.32%。因此,确定长度 260 ~ 280 mm、直径 64 ~ 66 mm、含水率 66.5% ~ 69% 的果穗作为剥皮装备正交试验的物料样品。

6.4 正交试验

6.4.1 试验设计

选取剥皮辊转速、剥皮辊倾角、振动板振动频率作为试验因素,采用三因素三水平二次回归正交组合进行试验,由装备理论及文献[13,22]确定得到剥皮辊转速为 400 ~ 500 r/min、剥皮辊倾角为 5° ~ 9°、振动板振动频率为 250 ~ 270 次/min。试验因素编码如表 8 所示。

表 8 剥皮试验因素编码

Tab. 8 Factors and levels of peeling test

| 编码 | 因素                                   |                  |                                      |
|----|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
|    | 剥皮辊转速                                | 剥皮辊倾角            | 振动板振动频率                              |
|    | $x_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | $x_2/(\text{°})$ | $x_3/(\text{次}\cdot\text{min}^{-1})$ |
| -1 | 400                                  | 5                | 250                                  |
| 0  | 450                                  | 7                | 260                                  |
| 1  | 500                                  | 9                | 270                                  |

6.4.2 试验结果与分析

基于 Design-Expert 12 中的 Box - Behnken 中心组合法对数据进行分析,共进行 17 组试验。如表 9 所示,表中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为编码值。

表 9 正交试验设计与结果

Tab. 9 Experimental design and results

| 试验编号 | 因素    |       |       | $Y_1/\%$ | $Y_2/\%$ |
|------|-------|-------|-------|----------|----------|
|      | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ |          |          |
| 1    | -1    | 0     | 1     | 87.59    | 1.87     |
| 2    | 0     | 0     | 0     | 93.54    | 1.46     |
| 3    | 0     | 0     | 0     | 91.56    | 1.38     |
| 4    | 1     | 0     | 1     | 89.06    | 2.03     |
| 5    | 0     | 1     | 1     | 86.59    | 1.69     |
| 6    | 0     | 0     | 0     | 94.02    | 1.42     |
| 7    | 0     | -1    | -1    | 92.34    | 1.92     |
| 8    | -1    | -1    | 0     | 86.98    | 1.57     |
| 9    | 0     | 0     | 0     | 93.28    | 1.21     |
| 10   | 1     | 0     | 0     | 90.01    | 1.76     |
| 11   | 0     | 0     | 0     | 93.89    | 1.33     |
| 12   | 0     | 1     | 0     | 88.79    | 1.53     |
| 13   | -1    | 1     | 0     | 87.98    | 1.67     |
| 14   | 1     | -1    | 0     | 91.21    | 2.13     |
| 15   | 0     | -1    | 1     | 90.06    | 1.97     |
| 16   | -1    | 0     | -1    | 86.78    | 1.63     |
| 17   | 1     | 0     | -1    | 92.59    | 1.98     |

6.4.3 回归分析

(1) 苞叶剥净率方差分析

如表 10 所示,可得出回归方程为

$$Y_1 = 93.26 + 1.69X_1 - 2.33X_1^2 - 1.89X_2^2 - 1.93X_3^2 \quad (17)$$

其决定系数  $R^2$  为 0.908,拟合程度较高。对回归模型进行方差分析,模型  $P < 0.01$ ,表明回归方程显著,能够描述各因素与响应值之间的关系;失拟项  $P = 0.2387 > 0.05$ ,表明在所选试验组合参数范围内,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,说明  $Y_1$  回归模型与实际剥皮情况拟合程度较高。各因素、因素交互项、各平方项对  $Y_1$  影响的主次顺序是  $X_1$ 、 $X_1^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_2X_3$ ,其中剥皮辊转速  $X_1$ 、剥皮辊转速二次项  $X_1^2$  对  $Y_1$  均有非常显著性影响 ( $P < 0.01$ );剥皮辊倾角二次项  $X_2^2$ 、振动板振动频率二次项  $X_3^2$  对  $Y_1$  均有显著性影响 ( $0.01 \leq P \leq 0.05$ );其他因素和交互作用项均  $P > 0.05$ ,对结果无显著影响。

(2) 籽粒破损率的方差分析

如表 11 所示,可得出回归方程为

$$Y_2 = 1.36 + 0.145X_1 - 0.1175X_2 - 0.1175X_1X_2 + 0.2612X_1^2 + 0.1613X_2^2 + 0.2562X_3^2 \quad (18)$$

其决定系数  $R^2$  为 0.9489,拟合程度较高。对回归模型进行方差分析,模型  $P < 0.01$ ,表明回归方程显著,能够描述各因素与响应值之间的关系;失拟项  $P = 0.5431 > 0.05$ ,表明在所选试验组合参数范围

表 10  $Y_1$  方差分析  
Tab. 10  $Y_1$  analysis of variance

| 差异源       | 平方和      | 自由度 | 均方       | $F$      | $P$      |
|-----------|----------|-----|----------|----------|----------|
| 模型        | 101. 43  | 9   | 11. 27   | 7. 68    | 0. 006 8 |
| $X_1$     | 22. 92   | 1   | 22. 82   | 15. 61   | 0. 005 5 |
| $X_2$     | 6. 52    | 1   | 6. 52    | 4. 44    | 0. 073 1 |
| $X_3$     | 6. 48    | 1   | 6. 48    | 4. 41    | 0. 073 7 |
| $X_1 X_2$ | 1. 21    | 1   | 1. 21    | 0. 824 4 | 0. 394 1 |
| $X_1 X_3$ | 4. 71    | 1   | 4. 71    | 3. 21    | 0. 116 4 |
| $X_2 X_3$ | 0. 001 6 | 1   | 0. 001 6 | 0. 001 1 | 0. 974 6 |
| $X_1^2$   | 22. 79   | 1   | 22. 79   | 15. 53   | 0. 005 6 |
| $X_2^2$   | 14. 98   | 1   | 14. 98   | 10. 21   | 0. 015 2 |
| $X_3^2$   | 15. 63   | 1   | 15. 63   | 10. 65   | 0. 013 8 |
| 残差        | 10. 27   | 7   | 1. 47    |          |          |
| 失拟项       | 6. 33    | 3   | 2. 11    | 2. 14    | 0. 238 7 |
| 纯误差       | 3. 94    | 4   | 0. 985 8 |          |          |
| 总和        | 111. 71  | 16  |          |          |          |

表 11  $Y_2$  方差分析  
Tab. 11  $Y_2$  analysis of variance

| 差异源       | 平方和      | 自由度 | 均方       | $F$      | $P$      |
|-----------|----------|-----|----------|----------|----------|
| 模型        | 1. 13    | 9   | 0. 125 0 | 14. 43   | 0. 001 0 |
| $X_1$     | 0. 168 2 | 1   | 0. 168 2 | 19. 41   | 0. 003 1 |
| $X_2$     | 0. 110 4 | 1   | 0. 110 4 | 12. 75   | 0. 009 1 |
| $X_3$     | 0. 031 2 | 1   | 0. 031 2 | 3. 61    | 0. 099 3 |
| $X_1 X_2$ | 0. 055 2 | 1   | 0. 055 2 | 6. 37    | 0. 039 5 |
| $X_1 X_3$ | 0. 009 0 | 1   | 0. 009 0 | 1. 04    | 0. 341 4 |
| $X_2 X_3$ | 0. 003 0 | 1   | 0. 003 0 | 0. 349 1 | 0. 573 2 |
| $X_1^2$   | 0. 287 4 | 1   | 0. 287 4 | 33. 17   | 0. 000 7 |
| $X_2^2$   | 0. 109 5 | 1   | 0. 109 5 | 12. 64   | 0. 009 3 |
| $X_3^2$   | 0. 276 5 | 1   | 0. 276 5 | 31. 91   | 0. 000 8 |
| 残差        | 0. 060 6 | 7   | 0. 008 7 |          |          |
| 失拟项       | 0. 023 2 | 3   | 0. 007 7 | 0. 828 9 | 0. 543 1 |
| 纯误差       | 0. 037 4 | 4   | 0. 009 3 |          |          |
| 总和        | 1. 19    | 16  |          |          |          |

内,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,说明 $Y_2$  回归模型与实际剥皮情况拟合程度较高。各因素、因素交互项、各平方项对 $Y_2$  影响的主次顺序是 $X_1^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_1 X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1 X_3$ 、 $X_2 X_3$ ,其中剥皮辊

转速 $X_1$ 、剥皮辊倾角 $X_2$ 、剥皮辊转速二次项 $X_1^2$ 、剥皮辊倾角二次项 $X_2^2$ 、振动板振动频率二次项 $X_3^2$ 对 $Y_2$  均有非常显著性影响( $P < 0. 01$ );剥皮辊转速和剥皮辊倾角的交互项 $X_1 X_2$ 对 $Y_2$  有显著性影响( $0. 01 \leq P \leq 0. 05$ );其他因素和交互作用项均 $P > 0. 05$ ,对结果无显著影响。

6.4.4 响应曲面分析

各因素交互作用对苞叶剥净率的影响如图 13 所示。剥皮辊转速与剥皮辊倾角的交互作用对苞叶剥净率的影响如图 13a 所示,当振动板振动频率为 260 次/min 时,剥皮辊转速一定,苞叶剥净率随剥皮辊倾角的增加先缓慢上升后迅速下降的趋势;当剥皮辊倾角一定时,随着剥皮辊转速的增加苞叶剥净率先迅速上升后缓慢下降。剥皮辊转速与振动板振动频率的交互作用对苞叶剥净率的影响如图 13b 所示,当剥皮辊倾角为 7°时,剥皮辊转速一定,苞叶剥净率随振动板振动频率的增加呈缓缓上升后迅速下降的趋势;当振动板振动频率一定时,随着剥皮辊转速的增加苞叶剥净率先缓缓上升后迅速下降。剥皮辊倾角与振动板振动频率的交互作用对苞叶剥净率的影响如图 13c 所示,当剥皮辊转速为 450 r/min 时,剥皮辊倾角一定,苞叶剥净率随着振动板振动频率的增加呈先上升后下降的趋势;当振动板振动频率一定时,随着剥皮辊倾角的增加苞叶剥净率先上升后下降。综上所述,在剥皮辊转速为 460 ~ 500 r/min、剥皮辊倾角为 5.5° ~ 8°、振动板振动频率为 250 ~ 260 次/min 时,可实现鲜食玉米果穗高效剥皮,并获得最佳苞叶剥净率。

各因素交互作用对籽粒破损率的影响结果如图 14 所示,剥皮辊倾角与剥皮辊转速的交互作用对籽粒破损率的影响如图 14a 所示,当振动板振动频率为 260 次/min 时,剥皮辊倾角一定,籽粒破损率随剥皮辊转速的增加先缓缓上升后迅速上升;当剥皮辊转速一定时,随着剥皮辊倾角的增加

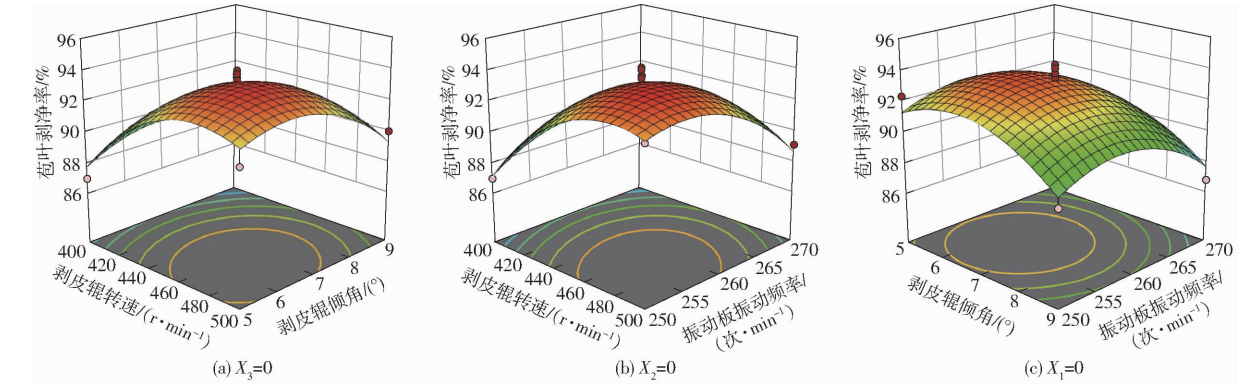


图 13 因素交互作用对苞叶剥净率的影响

Fig. 13 Effects of factor interactions on bract peeling rate

籽粒破损率先缓慢下降后迅速上升趋势。振动板振动频率与剥皮辊转速的交互作用对籽粒破损率的影响如图 14b 所示,当剥皮辊倾角为 7°时,振动板振动频率一定,籽粒破损率随着剥皮辊转速的增加呈先缓缓下降后迅速上升趋势;当剥皮辊转速一定时,随着振动板振动频率的增加籽粒破损率先降低后上升。振动板振动频率与剥皮辊倾角的交互作用对籽粒破损率的影响如图 14c 所示,

当剥皮辊转速为 450 r/min 时,振动板振动频率一定,籽粒破损率随剥皮辊倾斜角的增加呈先下降后上升趋势;当剥皮辊倾角一定时,随着振动板振动频率的增加籽粒破损率先降低后上升。综上所述,在剥皮辊转速为 410 ~ 460 r/min、剥皮辊倾角为 7.5° ~ 8.5°、振动板振动频率为 255 ~ 265 次/min 时,可实现鲜食玉米果穗高效剥皮,使籽粒破损率最小。

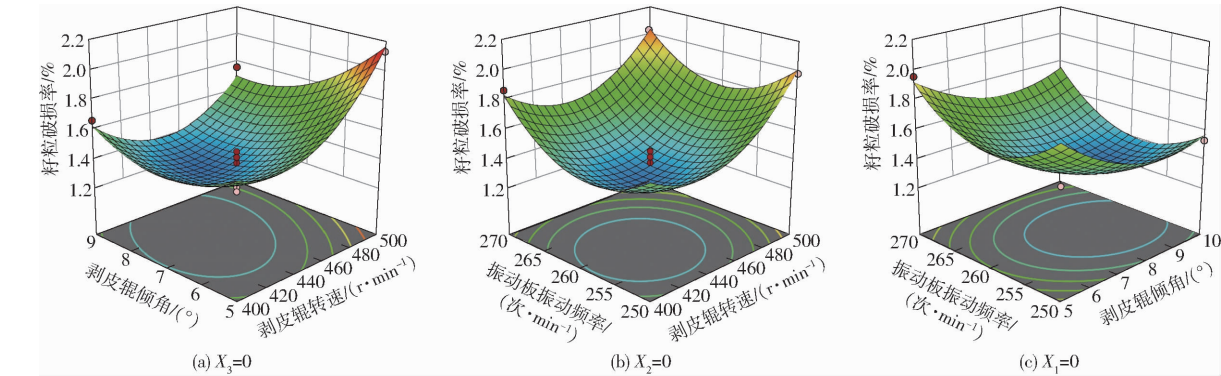


图 14 因素交互作用对籽粒破损率的影响

Fig. 14 Effects of factor interactions on grain breaking rate

6.5 验证试验

根据鲜食玉米果穗剥皮试验结果,以获得最大苞叶剥净率、最小籽粒破损率为优化目标,结合试验因素的约束条件,对已得出的回归方程进行优化分析,设定优化及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

利用 Optimization 模块对鲜食玉米果穗剥皮装备工作参数进行优化,得到最优工作参数组合为:剥皮辊转速 478.72 r/min、剥皮辊倾角 8.05°、振动板频率 259.20 次/min,该条件下的苞叶剥净率为 92.41%,籽粒破损率为 1.47%。

为了方便实际操作,各参数均取整数,得到最优参数组合为:剥皮辊转速 480 r/min、剥皮辊倾角 8°、振动板振动频率 260 次/min。通过对优化后的参数进行重复试验验证(图 15),每组试验样品选取 20 个果穗,连续喂入直至全部完成果穗剥皮工作,保证其它因素不变的情况下,重复 3 次取平均值,鲜食玉米果穗样品试验结果如表 12 所示,得到平均苞叶剥净率为 91.75%,比优化值低 0.66 个百分点;平均籽粒破损率为 1.55%,比优化值高 0.08 个百分点,参数优化结果与试验验证结果基本一致。



图 15 鲜食玉米果穗剥皮验证试验

Fig. 15 Validation test of fresh corn ear peeling

表 12 试验验证结果

Tab. 12 Experimental results of verification %

| 试验号 | 苞叶剥净率 | 籽粒破损率 |
|-----|-------|-------|
| 1   | 92.32 | 1.58  |
| 2   | 90.97 | 1.56  |
| 3   | 91.96 | 1.51  |
| 平均值 | 91.75 | 1.55  |

7 结论

(1) 基于鲜食玉米果穗的物理特性参数,设计了一种高低辊组合式剥皮装置,采用“柔性分段辊型+螺旋调节架”结构,配合橡胶频率振动板,可实现分段柔性剥皮,适用于长度为 220 ~ 320 mm、直径为 60 ~ 70 mm、含水率为 61.5% ~ 74% 的鲜食玉米果穗。通过理论分析果穗-机械动力学模型,确定剥皮机构参数以及影响其工作性能的主要因素。运用 ANSYS Workbench/LS-DYNA 模块对剥皮机构进行了运动仿真,分析了剥皮过程的工作参数及对果

穗剥皮的影响。

(2)为得到剥皮机的最佳工作参数,通过样机进行了果穗长度、果穗直径、果穗含水率对剥皮性能影响的单因素试验。通过单因素试验确定剥皮机正交试验的最佳物料样品长度为 260 ~ 280 mm、直径为 64 ~ 66 mm、含水率为 66.5% ~ 69%。

(3)利用 Design-Expert 12 软件对试验数据进行

了优化分析,得到了各试验因素的最佳参数组合:剥皮辊转速 478.72 r/min、剥皮辊倾角 8.05°、振动板频率 259.20 次/min,该条件下苞叶剥净率为 92.41%,籽粒破损率为 1.47%。验证试验中鲜食玉米果穗苞叶剥净率为 91.75%,籽粒破损率为 1.55%,参数优化结果与验证试验结果基本一致,表明优化后参数满足设计要求。

参 考 文 献

[1] AGACKESEN M N, OKTEM A G, OKTEM A. Effect of harvest at different maturation stages on fresh ear yield and ear characteristics of sweet corn (*Zea mays L. saccharata*) genotypes[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2022,20: 3335 – 3351.

[2] 卢柏山,董会,徐丽,等. 甜玉米籽粒不同采收期含水量与物性品质的相关性[J]. 华北农学报, 2019,34(增刊): 69 – 77. LU Baishan, DONG Hui, XU Li, et al. Relationship between water content and physical properties and quality of sweet corn at different harvesting periods[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019,34(Supp.): 69 – 77. (in Chinese)

[3] ISLAM M S, LIU J, JIANG L, et al. Folate content in fresh corn: effects of harvest time, storage and cooking methods[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021,103: 104123.

[4] 吕桂华,陈坚剑,徐秀红,等. 鲜食糯玉米苞叶相关性状的遗传相关分析[J]. 浙江农业学报, 2015,27(7): 1122 – 1126. Lǚ Guihua, CHEN Jianjian, XU Xiuhong, et al. Genetic analysis and assessment of corn-husk traits of fresh-eating waxy corn [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015,27(7): 1122 – 1126. (in Chinese)

[5] 赵玉强,何晓鹏,刘清,等. 甜玉米剥皮机结构改进及性能试验[J]. 食品与机械, 2014,30(2): 102 – 105. ZHAO Yuqiang, HE Xiaopeng, LIU Qing, et al. Design and development of a sweet corn husker[J]. Food & Machinery, 2014,30(2): 102 – 105. (in Chinese)

[6] GENG A, HU X, LIU J, et al. Development and testing of automatic row alignment system for corn[J]. Applied Sciences, 2022,12(12): 6221.

[7] 朱忠祥,岳小微,杜岳峰,等. 玉米果穗剥皮的运动仿真与高速摄像试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(6): 42 – 48. ZHU Zhongxiang, YUE Xiaowei, DU Yuefeng, et al. Dynamic simulation and high-speed photography experiment on corn-ear husking[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(6): 42 – 48. (in Chinese)

[8] 曹成茂,刘权,葛俊,等. 刀削结合滚动摩擦进料竹笋剥皮机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9): 142 – 150. CAO Chengmao, LIU Quan, GE Jun, et al. Design and experiment of bamboo shoots peeling machine with rolling friction feeding based on knife-cutting method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9): 142 – 150. (in Chinese)

[9] 万志华,张国忠,徐红梅,等. 夹持式鲜菱角脱壳机设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(20): 9 – 19. WAN Zhihua, ZHANG Guozhong, XU Hongmei, et al. Design and experiment of the clamping sheller for fresh water caltrop [J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(20): 9 – 19. (in Chinese)

[10] 潘海兵,王振亚,陈红,等. 宽皮柑橘对辊式剥皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(12): 239 – 245. PAN Haibing, WANG Zhenya, CHEN Hong, et al. Design and experiment on dual rollers peeling machine for *Satsuma mandarin*[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(12): 239 – 245. (in Chinese)

[11] LI Z, FU J, LUO X. Tensile properties and fracture mechanisms of corn bract for corn peeling device design[J]. Agriculture, 2021, 11(8): 796.

[12] 赵玉强,何晓鹏,师建芳,等. 鲜食玉米剥皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011,27(2): 114 – 118. ZHAO Yuqiang, HE Xiaopeng, SHI Jianfang, et al. Design and experiment of sweet and waxy corn husker[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(2): 114 – 118. (in Chinese)

[13] 易克传,曾其良,陈守江. 小型摩擦式鲜食玉米剥皮机的设计[J]. 包装与食品机械, 2011,29(6): 24 – 26. YI Kechuan, ZENG Qiliang, CHEN Shoujiang. Design on fresh corn husker by rubbing method[J]. Packaging and Food Machinery, 2011,29(6): 24 – 26. (in Chinese)

[14] 田伟,常宏杰,牛虎利,等. 鲜食玉米剥皮机: CN219182121U[P]. 2023 – 06 – 16.

[15] 朱旭阳. 甜糯玉米剥皮生产线关键技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. ZHU Xuyang. Research on the key technologies of peeling production line for sweet and waxy corn[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022. (in Chinese)

[16] LIU J J, YE W, ZHANG Z H, et al. Vein distribution on the deformation behavior and fracture mechanisms of typical plant leaves by quasi in situ tensile test under a digital microscope[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2020, 2020(1): 8792143.

[17] WANG S J, REN L Q, LIU Y, et al. Mechanical characteristics of typical plant leaves[J]. Journal of Bionic Engineering,



- 2010, 7(3): 294.
- [18] YU M, IGATHINATHANE C, HENDRICKSON J, et al. Mechanical shear and tensile properties of selected biomass stems [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(4): 1231.
- [19] JACOBS A A, SCHEPER J A, BENVENUTTI M A, et al. Tensile fracture properties of seven tropical grasses at different phenological stages[J]. Grass and Forage Science, 2011, 66(4): 551.
- [20] SU Y, CUI T, ZHANG D X, et al. Effects of shape feature on compression characteristics and crack rules of maize kernel[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(1): e14307.
- [21] DEMIREL C, KABUTEY A, HERAK D, et al. Numerical estimation of deformation energy of selected bulk oilseeds in compression loading[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 237(1): 012004.
- [22] 刘磊, 刘理汉, 杜岳峰, 等. 基于 TRIZ 理论的种子玉米剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 131–141. LIU Lei, LIU Lihan, DU Yuefeng, et al. Design and experiment of seed corn peeling mechanism based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 131–141. (in Chinese)
- [23] QIN J, YIN Y, LIU Z, et al. Optimisation of maize picking mechanism by simulation analysis and high-speed video experiments[J]. Biosystems Engineering, 2020, 189: 84–98.
- [24] YANG F, DU Y, FU Q, et al. Design and testing of seed maize ear peeling roller based on Hertz theory[J]. Biosystems Engineering, 2021, 202: 165–178.
- [25] 徐丽明, 王应彪, 张东兴, 等. 玉米通用剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 14–20. XU Liming, WANG Yingbiao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of corn universal husker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 14–20. (in Chinese)
- [26] 陈庆文. 玉米联合收获机剥皮装置的优化设计[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2014. CHEN Qingwen. Optimal design of husking device of corn combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)
- [27] 陈宝昌, 林君堂, 李存斌, 等. 新型玉米剥皮机的研究设计[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 88–90. CHEN Baochang, LIN Juntang, LI Cunbin, et al. Research and design of a new corn husker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 88–90. (in Chinese)
- [28] 王先霞, 倪长安, 刘师多, 等. 玉米果穗剥皮装置影响剥皮性能的试验分析[J]. 农机化研究, 2009, 31(2): 117–120. WANG Xianxia, NI Chang'an, LIU Shiduo, et al. Parameters study on maize husker of corn combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(2): 117–120. (in Chinese)
- [29] 夏俊芳, 贺小伟, 余水生, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 34–41, 293. XIA Juwang, HE Xiaowei, YU Shuisheng, et al. Finite element simulation of soil cutting with rotary knife roller based on ANSYS/LS-DYNA software[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 34–41, 293. (in Chinese)
- [30] 万家明, 陈伟祥, 陈重成, 等. 基于 ANSYS Workbench/Ls-Dyna 的锤片-菌草粉碎系统的功耗模型分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2023, 52(1): 127–134. WANG Jiaming, CHEN Weixiang, CHEN Chongcheng, et al. Analysis on power consumption model of hammer-JUNCAO mill system based on ANSYS Workbench/Ls-Dyna[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition) 2023, 52(1): 127–134. (in Chinese)