doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.022

南方高含水率玉米果穗剥皮装置设计与试验

季　邦[1,2]　潘　龙[1]　王柱坤[1]　谢方平[1]　谢玉松[1]　邬　备[1]
(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 广州 510642)

摘要: 针对我国南方地区大田玉米在收获时其含水率高剥皮困难等问题,在对剥皮过程及其原理分析的基础上,设计了一款在果穗苞叶上划痕后定向摩擦去皮的剥皮装置。根据玉米果穗物理特征参数,对果穗剥皮过程进行力学与运动学分析。并对划痕装置进行设计,该装置能在果穗苞叶表面划痕并使果穗以竖直姿态进入剥皮装置,同时通过 EDEM 软件对划痕装置进行仿真优化试验,确定了其结构和运行参数。采用高速摄像技术对果穗剥皮过程进行研究并验证了剥皮辊在苞叶划痕处能有效抓取苞叶。确定了剥皮辊转速、压送器转速以及压送器与剥皮辊间距是影响剥皮性能的主要因素。采用 Box－Behnken 试验设计原理,以剥皮辊转速、压送器转速和压送器与剥皮辊间距作为试验因素,以苞叶剥净率和籽粒损失率作为试验指标,进行三因素三水平正交试验。结果表明:剥皮辊转速为 353.2 r/min、压送器转速为 81.42 r/min、压送器与剥皮辊间距为 37.16 mm 时,玉米果穗苞叶剥净率为 95.67%,籽粒损失率为 1.45%。在该条件下开展验证试验,得到苞叶剥净率、籽粒损失率分别为 93.33%、1.56%,与优化参数基本一致,满足玉米剥皮要求。

关键词: 高含水率玉米果穗; 剥皮装置; 划痕装置; 摩擦去皮; 高速摄像
中图分类号: S233.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)07-0239-12　　**OSID**:

Design and Test of Corn Cob Peeling Device for High Moisture Content in Southern China

JI Bang[1,2]　PAN Long[1]　WANG Zhukun[1]　XIE Fangping[1]　XIE Yusong[1]　WU Bei[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Addressing the issue of high water content in field corn harvested in the southern region of China, which complicates the peeling process, a peeling device was designed based on an analysis of the peeling process and its underlying principles. The device utilized directional friction to peel the cob after the bracts were scratched. The mechanical and kinematic analysis of the cob peeling process was conducted according to the physical characteristics of the corn cob. Additionally, a scratching device was designed to engage the surface of the cob bracts, facilitating the entry of the cob into the peeling device in a vertical orientation. The structural parameters of the scratching device were optimized through simulation testing by using EDEM software. High-speed camera technology was employed to study the peeling process and verified that the peeling roller effectively captured the bracts at the scratch points. The primary factors influencing peeling performance, identified as the speed of the peeling roller, the speed of the pressure feeder, and the distance between the pressure feeder and the peeling roller, were determined. The Box－Behnken experimental design was employed to conduct a three-factor, three-level orthogonal test, with peeling roller speed, pressure feeder speed, and the distance between the peeling roller and pressure feeder as the test factors, and the rates of bract peeling and grain shedding as the response variables. The results demonstrated that at a peeling roller speed of 353.2 r/min, a pressing wheel speed of 81.42 r/min, and a distance of 37.16 mm between the pressing wheel and the peeling roller, the bract peeling rate of 95.67%, with a grain shedding rate of 1.45%. Verification tests under

收稿日期: 2025－05－29　修回日期: 2025－11－04
基金项目: 湖南省智能农机装备创新研发项目(湘财农指[2023]60 号)、湖南省旱粮产业技术体系项目(HARS－02)、农业装备技术全国重点实验室(华南农业大学)开放基金项目(SKLAET－202406)和湖南省自然科学基金项目(2024JJ6248)
作者简介: 季邦(1990—),男,讲师,博士,主要从事农业机械装备设计研究,E-mail: 369370030@qq.com
通信作者: 邬备(1988—),男,讲师,博士,主要从事农业机械创新设计研究,E-mail: wubei@hunau.edu.cn

these conditions yielded a bract peeling rate of 93.33% and a grain shedding rate of 1.56%, values that were in close agreement with the optimized parameters and met the requirements for efficient corn peeling. These findings can provide a useful reference for improving the peeling process for high-water-content corn in the southern region.

Key words: high-moisture corn cobs; peeling device; scratching device; friction peeling; high-speed camera technology

0 引言

玉米是我国的三大主粮之一,约占粮食总产量的40%,其种植面积广泛,在全国范围内都有种植[1]。但由于我国幅员辽阔,南北方气候差异较大,北方玉米果穗在成熟时,其含水率在25%左右,而在我国南方地区,由于气候原因,玉米果穗成熟时其含水率普遍在30% ~40%之间。如果不能及时进行剥皮晾晒,容易导致果穗发霉变质,严重影响其经济价值[2-4]。因此,实现我国南方高含水率玉米果穗剥皮具有重要的意义。

农产品剥皮去壳对于食品加工、保鲜运输具有重要意义。近年来,不少学者在农产品剥皮去壳方面进行了大量研究。在宽皮柑橘去皮方面:潘海兵等[5]根据宽皮柑橘果实的结构特点,设计了一套宽皮柑橘环切、翻皮、剥皮等工序的剥皮机组,该机组通过将环切、去顶后的柑橘运送至相向旋转的对辊中来实现宽皮柑橘的剥皮。在莲子剥壳方面:徐谐庆等[6]设计了一款单边机结构的全自动莲子剥壳去皮机,首先利用旋转的凹轮与莲子之间的摩擦力对其进行定向,然后利用往复的刀片对莲子短径方向进行环切切壳,切壳后的莲子进入脱壳通道继续向前搓滚,以此来实现壳仁的分离。在竹笋剥皮方面:曹成茂等[7]设计了一款刀削结合滚动摩擦的方式进行竹笋的剥皮,通过将竹笋上部局部笋皮切除后再进入剥皮辊与滚筒之间来实现竹笋的剥皮。通过对相关农产品的去壳剥皮原理进行分析可知,对于果皮与果实接触较紧密,且难以利用单一相向旋转的对辊来实现剥皮的农产品,会首先对其进行预处理,例如将其果皮表面进行环切或削去一定部分的果皮表面,从而使对辊能更好地对其果皮进行抓取,以此来实现剥壳去皮。

目前,我国玉米果穗剥皮主要是利用有一定倾角相向旋转的剥皮辊来实现剥皮[8],且不少学者利用仿真软件对剥皮过程进行分析,以此来对剥皮装置进行优化设计[9-11],此种优化设计对于我国北方玉米果穗具有良好的剥皮效果。但由于我国南方地区玉米果穗成熟时含水率较高,现有的剥皮装置容易造成剥净率较低,难以满足剥净率要求,主要表现在高含水率玉米果穗苞叶叶片的孔隙空间内充满了水分,导致苞叶与苞叶、苞叶与籽粒之间粘结紧密,剥皮辊难以有效地抓取苞叶。通过对高含水率玉米果穗物理特性进行分析,发现高含水率玉米果穗与上述莲子、竹笋、宽皮柑橘等农产品具有以下共性:其外壳或果皮与果实包裹紧密,且高含水率玉米果穗与竹笋都具有多层表皮,且各层表皮之间粘结紧密,难以利用单一对辊进行剥皮。因此,本文通过对相关农产品的剥皮去壳原理进行总结分析,设计一款对高含水率玉米果穗先进行划痕预处理,再进行摩擦去皮的剥皮方式。通过对各层苞叶进行拉伸试验,同时建立果穗-机械动力学模型对苞叶剥离过程进行分析,并对果穗划痕装置进行设计以及仿真参数优化,利用高速摄像技术验证剥皮辊在玉米果穗划痕处能有效抓取到苞叶,最后通过台架试验对剥皮装置的参数进行优化,以期为南方高含水率玉米果穗剥皮提供参考。

1 玉米苞叶物理属性和力学属性

1.1 玉米果穗主要物理参数

玉米果穗通过穗柄与茎秆相连接,其主要由苞叶、穗柄和裸穗组成[12]。玉米果穗的物理参数是设计剥皮装置的关键依据,本文选用的玉米品种为湖南省浏阳市的登海605,随机选取50个长势良好的玉米样本,对果穗样本进行了长度 L、大端直径 D 以及苞叶厚度 d(苞叶沿纵脉方向最长长度1/2处的总厚度)等物理参数进行测量,测量结果为:长度、大端直径和苞叶厚度平均值分别为255.45、60.58、3.25 mm,其物理参数示意图如图1所示。

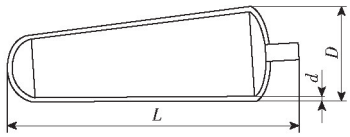


图1 玉米果穗主要物理参数示意图

Fig. 1 Graph of main physical parameters of corn cob

1.2 力学参数

玉米果穗剥皮过程中,苞叶断裂部位主要在苞叶上的某处。因此,选取2~6层苞叶对其进行拉伸试验[13-14]。利用电子万能试验机对苞叶进行拉伸断裂试验,取各层苞叶垂直于纵脉方向的矩形试样(长100 mm,宽30 mm)进行横向拉伸试验,平行于

纵脉方向的矩形试样(长 80 mm，宽 30 mm)进行纵向拉伸试验，如图 2 所示。

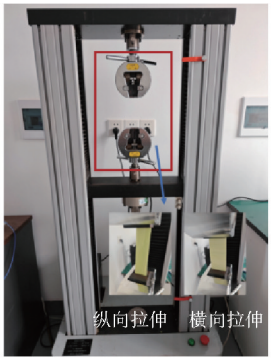


图 2　玉米果穗苞叶拉伸断裂试验

Fig. 2　Tensile fracture test of corn cob bracts

主要对苞叶的纵向及横向断裂力、抗拉强度和断裂能进行测量，抗拉强度和断裂能计算式[15-17]为

$$\sigma_t = \frac{F_a}{Tw} \tag{1}$$

$$E_g = \sum_{n=0}^{i-1} \left[\frac{F_{n+1} + F_n}{2} (D_{n+1} - D_n) \right] \tag{2}$$

式中　σ_t——抗拉强度，MPa

F_a——断裂力，N

w——试样宽度，mm

T——试样平均厚度，mm

E_g——断裂能，J

F_{n+1}、F_n——拉伸载荷，N

D_{n+1}、D_n——试样伸长量，mm

玉米果穗苞叶力学测定结果如表 1 所示，由表 1 可知：玉米果穗苞叶拉伸性能随着苞叶层数的增加而减少，并且其纵向拉伸性能远大于横向拉伸性能。因此，在玉米果穗剥皮时，对苞叶施加横向作用力将有利于苞叶的剥离。

表 1　玉米果穗力学参数测定结果

Tab. 1　Measurement results of mechanical parameters of corn cob

拉伸方向	参数	苞叶层数/(苞叶厚度/mm)				
		2/(0.36)	3/(0.30)	4/(0.25)	5/(0.22)	6/(0.19)
纵向拉伸	断裂力/N	88.5	73.0	62.5	57.5	42.5
	抗拉强度/MPa	9.83	8.11	6.94	6.39	4.72
	断裂能/J	0.255	0.265	0.236	0.219	0.223
横向拉伸	断裂力/N	8.5	7.0	6.5	5.5	4.5
	抗拉强度/MPa	0.94	0.78	0.72	0.61	0.50
	断裂能/J	0.015	0.027	0.019	0.010	0.008

2　整机结构与工作原理

2.1　整机结构

高含水率玉米果穗剥皮装置首先将果穗通过划痕装置，使其在苞叶表面划出 3 条划痕，然后通过一定倾角的剥皮辊摩擦剥皮，从而实现高含水率玉米果穗剥皮。该装置由划痕装置、剥皮装置和机架等组成，如图 3 所示。

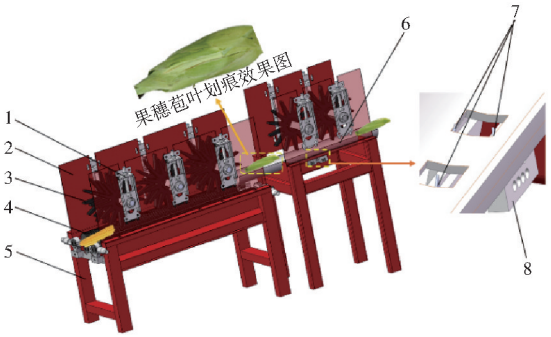


图 3　玉米剥皮装置三维结构图

Fig. 3　Three-dimensional structure diagram of corn cob peeling device

1. 高度可调节轴承座　2. 固定板　3. 压送器　4. 剥皮辊　5. 机架　6. 半圆形导轨　7. 刀片　8. 刀架

2.2　工作原理

剥皮装置工作原理是使果穗通过有一定倾角相向旋转的剥皮辊，剥皮辊不断对苞叶进行摩擦碾搓脱皮[18-20]。工作时，果穗会先通过一个有一定倾角的划痕机构，果穗从半圆形导轨上方通过，其下方安装有刀片，果穗在自身重力以及星轮的作用下沿着导轨向前运动，从刀片上方通过时使其在苞叶上形成划痕。之后果穗再进入剥皮装置，果穗在压送器的作用下使其与剥皮辊充分接触，在划痕处剥皮辊不断地抓取苞叶，当剥皮辊施加在果穗上的摩擦力大于苞叶与果柄的力以及苞叶与籽粒之间的粘结力时，苞叶将被剥离[21-23]。

3　玉米果穗-机械力学模型建立

3.1　果穗苞叶划痕受力分析

苞叶在半圆形导轨中划痕过程受力分析如图 4 所示。

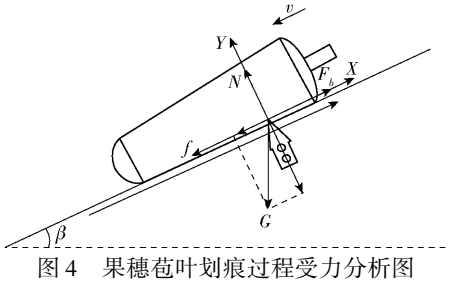


图 4　果穗苞叶划痕过程受力分析图

Fig. 4　Force analysis diagram for cob bracts scratching process

将果穗喂入划痕装置时，以一定加速度 a 沿导轨向下运动，刀片在星轮 F_b 作用下对果穗苞叶进行划痕操作，将果穗苞叶表面划痕，划痕过程受力方程为

$$\begin{cases} mg\sin\beta + f - F_b = ma \\ N = mg\cos\beta \end{cases} \tag{3}$$

其中 $f = \mu N - F_b$

整理得 $$a = g(\sin\beta + \mu\cos\beta) - \frac{2F_b}{m} \tag{4}$$

式中 m——未剥皮果穗质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

f——导轨作用于果穗的摩擦阻力,N

N——导轨对果穗的支撑力,N

μ——导轨与果穗间摩擦因数

β——导轨倾角,(°)

果穗在导轨中为匀变速直线运动,则

$$L_{AB} = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \tag{5}$$

式中 L_{AB}——导轨长度,m

v_0——喂入果穗初速度,m/s

t——果穗剥皮时间,s

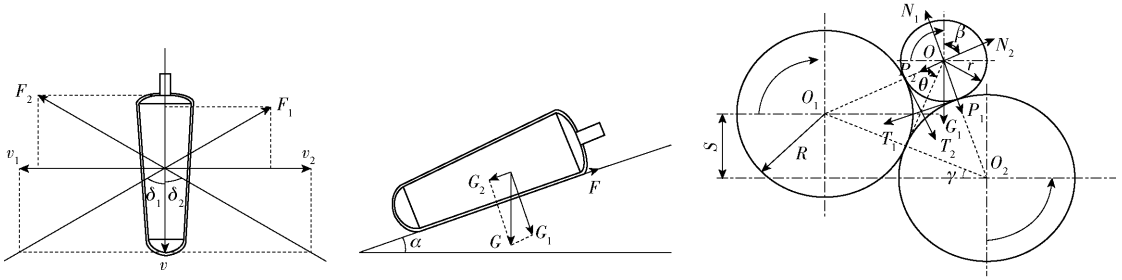
将式(4)代入式(5)整理得到果穗划痕所需的力 F_b 为

$$F_b = \frac{m[gt^2(\sin\beta + \mu\cos\beta) - 2(L_{AB} - v_0 t)]}{2t^2} \tag{6}$$

由式(6)可知,划痕成功与导轨倾角 β 有关,根据上文对果穗物理和力学参数的测定结果,并结合剥皮机倾角尺寸可确定 β 的取值范围为 10°~20°。

3.2 玉米果穗剥皮过程分析

玉米果穗在剥皮辊中主要受到剥皮辊对果穗施加的支持力和摩擦力,在法向摩擦力的作用下玉米果穗不断沿着自身轴线旋转;同时在自身重力以及切向摩擦力的作用下,完成轴向运动。当玉米果穗在槽型剥皮装置运动时,由于高、低剥皮辊轴心之间存在高度差,使得高、低辊对果穗施加不同大小的摩擦力矩,果穗在下滑的同时沿着自身轴线不断旋转,其受力如图 5 所示。



(a) 平行于剥皮辊轴线平面 (b) 垂直于剥皮辊轴线平面 (c) 沿剥皮辊轴线平面

图 5 果穗剥皮过程受力分析

Fig. 5 Force analysis of peeling process of cob

由图 5b 可知,玉米果穗沿剥皮辊下滑的条件为

$$G\sin\alpha \geqslant F \tag{7}$$

式中 G——果穗自身重力,N

F——剥皮辊对果穗的摩擦力,N

α——剥皮辊轴线与水平线夹角,(°)

果穗受到剥皮辊施加的摩擦力计算公式为

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

其中 $$\begin{cases} \delta_1 = \arctan\dfrac{v_1}{v} \\ \delta_2 = \arctan\dfrac{v_2}{v} \end{cases} \tag{9}$$

式中 F_1、F_2——低、高剥皮辊作用于果穗的摩擦力,N

f_1、f_2——低、高剥皮辊与果穗的切向摩擦因数

μ_1、μ_2——低、高剥皮辊与果穗的摩擦因数

δ_1、δ_2——低、高剥皮辊作用于果穗的摩擦力与剥皮辊轴线方向的夹角,(°)

P_1、P_2——果穗对低、高剥皮辊的压力,N

v_1、v_2——果穗相对于低、高剥皮辊的切向速度,m/s

v——果穗相对于剥皮辊的轴线速度,m/s

N_1、N_2、G_1之间存在关系

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

式中 G_1——重力竖直方向上的分力,N

θ——果穗中心与辊连线中心间的连接与果穗和辊中心连线的夹角,(°)

N_1、N_2——低、高剥皮辊对果穗的支撑力,N

γ——高低辊中心连线与水平线夹角,(°)

已知 $\sin\gamma = \dfrac{S}{2R}$,$\sin\theta = \dfrac{R}{R+r}$,代入公式(10)得

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

式中　S——高、低辊高度差，mm

R——剥皮辊半径，mm

r——玉米果穗半径，mm

结合公式(8)、(10)，得到

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

将公式(12)代入公式(8)，可得

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

由公式(13)可知，玉米果穗沿着剥皮辊轴线下滑与玉米果穗半径 r、剥皮辊半径 R、剥皮辊倾角 α、剥皮辊摩擦因数 μ、高低辊轴心高度差 S 以及剥皮辊作用于果穗的摩擦力与剥皮辊轴线方向的夹角 δ 有关。

由图5c分析可知

$$\begin{cases}N_1=P_1\\N_2=P_2\\T_1=f_1P_1\\T_2=f_2P_2\end{cases} \tag{14}$$

式中　T_1、T_2——低、高辊作用在玉米果穗上的切向摩擦力，N

由公式(11)和公式(14)可知，N_1 始终大于 N_2，通过改变高、低剥皮辊的表面型式，使低剥皮辊与果穗的切向摩擦因数大于高剥皮辊的切向摩擦因数，那么低剥皮辊与果穗的切向摩擦力始终大于高剥皮辊的切向摩擦力，此差值越大，玉米果穗将越易绕自身轴线旋转。

4　关键部件设计

4.1　划痕装置

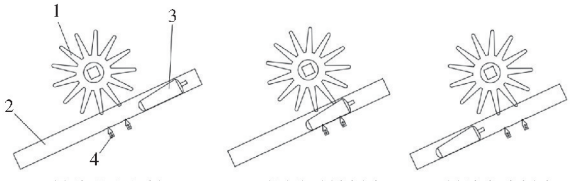
玉米果穗含水率高时，其苞叶的孔隙中充满水分[24]，各层苞叶相互叠加紧紧包裹着裸穗，使得剥皮辊无法有效地抓取到苞叶，从而导致其剥皮困难。在苞叶表面划痕能使包裹紧密的苞叶在划痕处裂开(图6)，使得剥皮辊在与苞叶划痕处接触时，能在划痕处抓取到苞叶，从而实现苞叶的剥除。因此，能否有效地在苞叶上划痕是剥除苞叶的关键。

划痕装置主要由半圆形导轨、刀架、刀片和星轮式压送器等组成，其结构如图7所示。刀片通过刀架焊接在导轨下方，刀架上开有不同尺寸刀片定位孔，可根据不同品种的玉米果穗来调整刀片伸出长度。导轨中部开有两个 20 mm × 20 mm 正方形缺口，根据1.1节中对玉米果穗物理参数的测量结果，以及前期试验结果，在缺口处将刀片伸长量设置为 2 mm，此长度保证在苞叶上划痕一定深度的同时不伤及籽粒。导轨上方安装有星轮式压送器，果穗在压送器的作用下沿着导轨向下滑动。其工作原理是使果穗通过一定倾角的半圆形导轨，在自身重力以及压送器的作用下，沿着导轨向下滑动(图7a)。在果穗接触到刀尖时，压送器施加给果穗向下以及向前的力，使得果穗从刀片上方通过(图7b)，从而完成苞叶的划痕(图7c)。同时，半圆形导轨会使玉米果穗以竖直的姿态进入剥皮装置中，可减少玉米在剥皮装置中的堵塞现象，增加剥皮效果以及工作效率。



图6　玉米果穗苞叶划痕示意图

Fig. 6　Schematic of corn cob bract scratches



(a) 果穗进入入料口　(b) 下层苞叶被划痕　(c) 果穗完成划痕

图7　果穗划痕示意图

Fig. 7　Schematics of corn cob scratching

1. 星轮式压送器　2. 半圆形导轨　3. 果穗　4. 刀片

4.2　剥皮装置

目前，我国玉米果穗剥皮主要采用对辊式剥皮原理，利用相向旋转的剥皮辊对玉米果穗施加摩擦力来使果穗表面苞叶剥离。作业时，由于玉米果穗苞叶表面划有3条划痕，且划痕处的苞叶相较于未划痕处呈现散开的状态，在剥皮辊不断地摩擦、碾搓下，划痕处苞叶会被剥皮辊轻易地抓取到，抓取后的苞叶不断被剥皮辊卷入两辊间隙中，当剥皮辊对苞叶摩擦力大于苞叶与穗柄之间的连接力时，苞叶将被剥离。在玉米果穗剥皮的过程中，剥皮辊与苞叶不断地摩擦剥皮，是剥皮装置的核心部件，其配置方式采用高低辊，此种配置方式适用于苞叶包裹紧密的果穗[25-26]。高位剥皮辊采用鱼鳞辊，低位剥皮辊采用螺旋辊，同时高、低辊对玉米果穗的摩擦因数不

同,产生的摩擦力矩也不同,并且此力矩的差值能使果穗易于绕自身轴线旋转,从而增加果穗苞叶划痕处与剥皮辊的接触次数,导致剥皮容易。在剥皮过程中,由于剥皮辊转速过快,果穗在剥皮辊上容易产生弹跳现象,从而导致玉米果穗脱离有效的剥皮通道,因此需要安装有压送器,其作用是减少果穗弹跳现象的同时避免果穗剥皮后不能及时通过剥皮辊,从而减少籽粒损失,如图 8 所示。

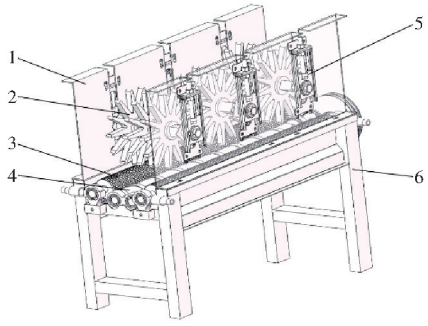


图 8 剥皮装置结构示意图

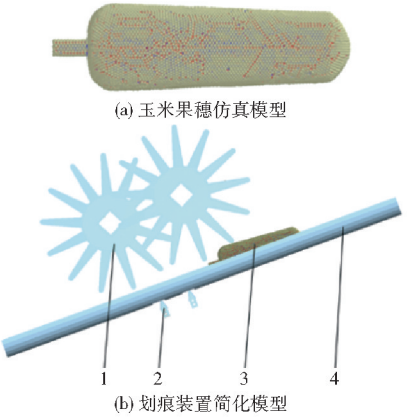
Fig. 8 Structural diagram polling device

1. 固定板 2. 星轮式压送器 3. 鱼鳞辊 4. 螺旋辊 5. 高度可调节轴承座 6. 机架

5 划痕装置仿真优化

5.1 仿真建模与参数设定

本文所使用的玉米果穗品种为登海 605,在湖南省浏阳市收获。通过前文对果穗物理参数测量结果,确定果穗模型的长度为 255 mm,大端直径为 60 mm。利用 EDEM 软件对其划痕装置进行参数优化,使用颗粒填充法对玉米果穗进行建模,基于 Hertz - Minding with bonding 原理建立玉米果穗模型[27-28],如图 9a 所示。划痕装置简化模型仅保留与果穗直接接触的部件:星轮式压送器、导轨、刀片,如图 9b 所示,其中刀片的材质为不锈钢。玉米果穗相关仿真参数如表 2 所示,其籽粒含水率为 35%。



(a) 玉米果穗仿真模型

(b) 划痕装置简化模型

图 9 离散元仿真模型

Fig. 9 Discrete element simulation model

1. 星轮式压送器 2. 刀片 3. 玉米果穗 4. 导轨

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

项目	参数	数值
玉米	泊松比	0.42
	密度/(kg·m^{-3})	1 450
	剪切模量/Pa	1.37×10^{8}
橡胶	泊松比	0.47
	密度/(kg·m^{-3})	1 310
	剪切模量/Pa	2.65×10^{6}
不锈钢	泊松比	0.25
	密度/(kg·m^{-3})	7 850
	剪切模量/Pa	3.5×10^{10}
玉米-橡胶	碰撞恢复系数	0.182
	静摩擦因数	0.35
	滚动摩擦因数	0.198
玉米-不锈钢	碰撞恢复系数	0.615
	静摩擦因数	0.467
	滚动摩擦因数	0.031 7

5.2 仿真试验设计

根据表 1 得出苞叶横向断裂力最大为 8.5 N,同时根据仿真预试验,得出刀片施加给果穗的力都大于 8.5 N。选取玉米果穗划痕长度作为仿真试验的评价指标,划痕长度的确定:首先通过 EDEM 导出果穗的受力时长以及果穗的坐标,然后在 CAD 软件中输入开始受力时刻与结束受力时刻的坐标来确定划痕长度,划痕长度越长其效果越好。根据 Box - Behnken 原理设计试验,以划痕长度 Y_1 作为评价指标,以压送器转速 n_0、刀片中心与第 2 组压送器中心距离 H 以及压送器中心距 A 为试验因素设计试验,如图 10 所示。结合预试验结果,选取压送器转速为 120 ~ 160 r/min,刀片中心与第 2 组压送器中心距离为 19.5 ~ 24.5 mm,压送器中心距为 190 ~ 200 mm,中心水平设置 3 次重复,各因素编码如表 3 所示,试验方案及结果如表 4 所示,表中 X_1、X_2、X_3 为编码值。

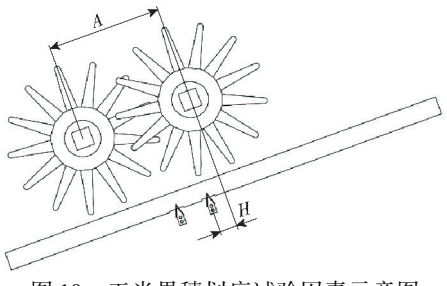


图 10 玉米果穗划痕试验因素示意图

Fig. 10 Factor plot for corn cob scratching test

5.3 试验结果分析

通过 Design-Expert 13 软件对试验结果进行多元回归拟合,得到划痕长度 Y_1 的回归方程为

表 3　仿真试验因素编码

Tab. 3　Simulation test factors and coding

编码	压送器转速/(r·min^{-1})	刀片中心与第 2 组压送器中心距离/mm	压送器中心距/mm
-1	120	19.5	180
0	140	22.0	190
1	160	24.5	200

表 4　仿真试验方案与结果

Tab. 4　Simulation test program and results

序号	因素			Y_1/mm
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	95.54
2	1	-1	0	42.58
3	-1	1	0	88.58
4	1	1	0	71.85
5	-1	0	-1	95.48
6	1	0	-1	67.74
7	-1	0	1	60.67
8	1	0	1	36.22
9	0	-1	-1	77.21
10	0	1	-1	76.04
11	0	-1	1	42.90
12	0	1	1	72.60
13	0	0	0	95.30
14	0	0	0	99.55
15	0	0	0	92.39

$$Y_1 = 95.75 - 15.24X_1 - 6.35X_2 - 13.01X_3 + 9.06X_1X_2 + 7.72X_2X_3 - 11.63X_1^2 - 9.47X_2^2 - 19.08X_3^2 \quad (15)$$

对试验进行显著性分析，得到各参数对玉米果穗苞叶划痕长度的影响程度，如表 5 所示，回归方程的决定系数 R^2 为 0.972 4，仿真对玉米果穗苞叶划痕的模拟接近真实，可通过离散元仿真方法模拟果穗苞叶划痕过程；结果显示失拟项 $P > 0.05$，对果穗苞叶划痕影响不显著；模型 $P < 0.05$，说明回归方程显著，果穗苞叶划痕试验数据可信；根据回归方程得到各因素交互作用对结果影响的响应面如图 11 所示。

表 5　回归模型方差分析

Tab. 5　Regression model ANOVA

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	6 029.71	9	669.97	19.57	0.002 2
X_1	1 856.84	1	1 856.84	54.25	0.000 7
X_2	323.09	1	323.09	9.44	0.027 7
X_3	1 354.08	1	1 354.08	39.56	0.001 5
X_1X_2	328.15	1	328.15	9.59	0.027 0
X_1X_3	2.71	1	2.71	0.079 1	0.789 8
X_2X_3	238.24	1	238.24	6.96	0.046 1
X_1^2	499.8	1	499.8	14.6	0.012 4
X_2^2	331.45	1	331.45	9.68	0.026 5
X_3^2	1 344.82	1	1 344.82	39.29	0.001 5
残差	171.15	5	34.23		
失拟项	145.22	3	48.41	3.73	0.218 4
纯误差	25.93	2	12.97		
总计	6 200.86	14			

注：$0.01 \leqslant P < 0.05$ 表明影响显著，$P < 0.01$ 表明影响极显著。

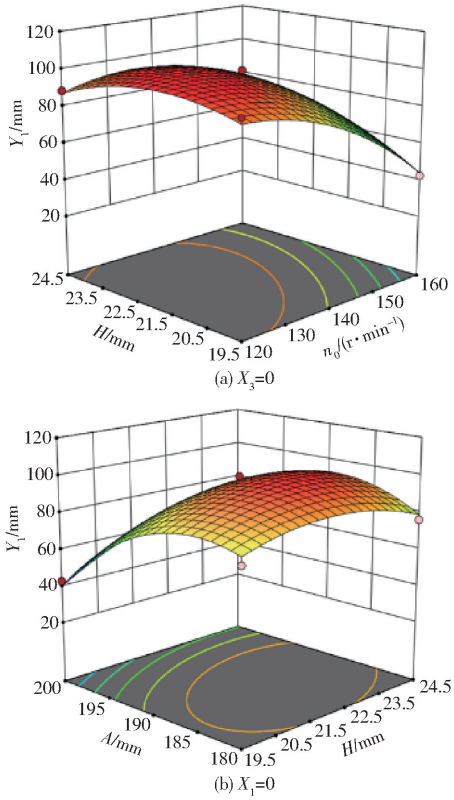


图 11　因素交互作用对划痕长度影响的响应面

Fig. 11　Effect of factor interactions on scratching length

当压送器中心距为定值时，压送器转速和刀片中心与第 2 组压送器中心距离的交互作用对划痕长度的影响如图 11a 所示。由图 11a 可知，当压送器转速一定时，随着刀片中心与第 2 组压送器中心距离增加，划痕长度先升高后降低；当刀片中心与第 2 组压送器中心距离一定时，随着压送器转速的增加，划痕长度先升高后降低。

当压送器转速为定值时，刀片中心与第 2 组压送器中心距离和压送器中心距离的交互作用对划痕长度的影响如图 11b 所示。由图 11b 可知，当压送器中心距离一定时，随着刀片中心与第 2 组压送器中心距离的增加，划痕长度呈现先升高后降低的趋势；当刀片中心与第 2 组压送器中心距离一定时，随着压送器中心距离的增加，划痕长度呈现先升高后降低的趋势。

5.4　参数优化分析

为探究最佳的划痕装置结构参数，实现划痕长度的最大值，利用 Design-Expert 13 软件对回归模型进行优化分析，设置求解目标为最大响应值，得到最

佳参数组合为:压送器转速 125.45 r/min,刀片中心与第 2 组压送器中心距离 20.56 mm,压送器中心间距 186.46 mm,此时 Y_1 预测结果为 101.65 mm。

使用预测参数进行仿真验证,得到划痕长度为 94.14 mm,和预测值之间的相对误差为 7.39%,试验结果与预测值误差较小,表明数学回归模型准确可靠。

5.5 仿真模型台架试验验证

为进一步验证仿真试验结果的可靠性,将优化后的参数进行玉米果穗苞叶划痕试验。将玉米果穗喂入划痕装置后,利用直尺对划痕长度进行测量,结果为 108 mm,与仿真值相对误差为 6.25%,产生误差的主要原因是加工与安装过程以及玉米果穗建模与实际玉米果穗存在着一定的误差,从而导致实测与仿真值存在差异,划痕后效果如图 12 所示。



图 12 玉米果穗苞叶划痕效果图

Fig. 12 Corn cob bract scratches effect picture

6 台架试验

6.1 高速摄像试验

6.1.1 试验装置

为了验证高含水率玉米果穗在剥皮时剥皮辊在划痕处能有效地抓取苞叶,搭建了由高速摄像机和剥皮装置组成的高速摄像剥皮试验平台,如图 13 所示。



图 13 高速摄像剥皮试验平台

Fig. 13 High-speed camera peeling test platform

1. 剥皮装置 2. 补光灯 3. 计算机 4. 高速摄像机

6.1.2 高速摄像试验结果与分析

试验开始前,调整高速摄像机的位置角度,以平行于剥皮辊的方向作为拍摄角度,将拍摄帧率设定为 3 000 f/s,分辨率设置为 1 920 像素 ×1 080 像素。剥皮辊转速为 350 r/min、压送器转速为 80 r/min、压送器与剥皮辊间距为 40 mm[29-30]。

图 14 所示为划痕后果穗苞叶剥除过程的高速摄像捕捉结果。根据高速摄像结果分析,划痕后的玉米果穗苞叶剥离可分为两个阶段:①果穗由于高、低辊的高度差使得作用在果穗上的摩擦力矩不同,使果穗不断绕自身轴线旋转。同时划痕后的苞叶其表面被撅起,在压送器间歇性地对果穗施加压力下,剥皮辊对划痕处的摩擦力间歇性增大,当剥皮辊对苞叶的摩擦力大于各层苞叶之间的粘结力时,苞叶被剥皮辊抓取,如图 14a ~ 14c。②划痕处的苞叶被剥皮辊抓取后,不断的拉扯苞叶,随着卷入两剥皮辊之间的苞叶面积不断增大,苞叶会沿着平行于纵脉的某处断裂,从而完成苞叶的剥离,如图 14d ~ 14f。此时,上层苞叶被剥离后,下层苞叶在剥皮辊及压送器的作用下,不断拉扯划痕处的苞叶,同时果穗不断绕自身轴线旋转,使每层苞叶都被抓取剥离,直至所有苞叶被剥离,如图 14g、14h。因此在玉米果穗剥皮段时,在增加剥皮辊摩擦力的同时可以适当增加高、低辊的摩擦力矩差值,此差值可以使果穗易于绕自身轴线旋转,以此来增加苞叶划痕处与剥皮辊的接触次数,与剥皮辊接触次数越多将越利于苞叶剥除。

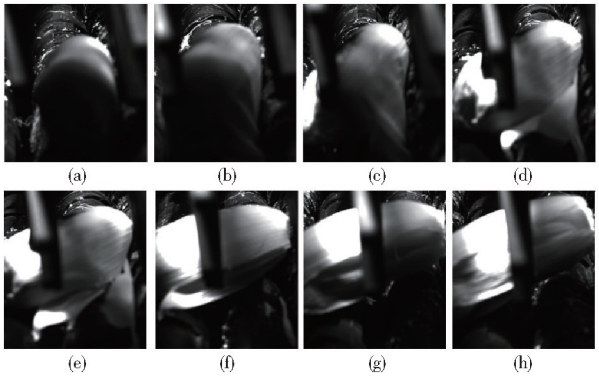


图 14 苞叶剥除过程高速摄像

Fig. 14 High-speed camera capture of bracts peeling process

6.2 剥皮性能试验

6.2.1 试验材料与方法

试验材料为登海 605 玉米果穗,于 2024 年 9 月下旬采收。选取果穗长势良好、苞叶无损伤的样品,其含水率在 35% 左右,试验材料和样机如图 15 所示。

根据 JB/T 11907—2014 规定,选取苞叶剥净率 Y_2 和籽粒损失率 Y_3 作为评价指标,计算公式为

$$Y_2 = \left(1 - \frac{n_b}{n}\right) \times 100\% \tag{16}$$

$$Y_3 = \frac{m_s}{m_t + m_s} \times 100\% \tag{17}$$

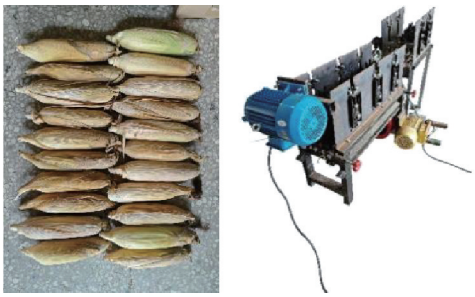


图 15　试验材料和样机

Fig. 15　Test materials and device

式中　n——测定样品果穗总数，个

n_b——未剥净苞叶果穗数，个

m_t——样品籽粒总质量，g

m_s——损失籽粒总质量，g

6.2.2　单因素试验与分析

为探究试验因素对剥皮装置性能的影响，根据前期预试验，选取剥皮辊转速 300 ~ 500 r/min、压送器转速 40 ~ 120 r/min、压送器与剥皮辊间距 30 ~ 50 mm 为试验因素，各因素和水平如表 6 所示，单因素试验结果如图 16 所示。

表 6　单因素试验水平

Tab. 6　Single-factor test levels

水平	因素		
	剥皮辊转速/(r·min^{-1})	压送器转速/(r·min^{-1})	压送器与剥皮辊间距/mm
1	300	40	30
2	350	60	35
3	400	80	40
4	450	100	45
5	500	120	50

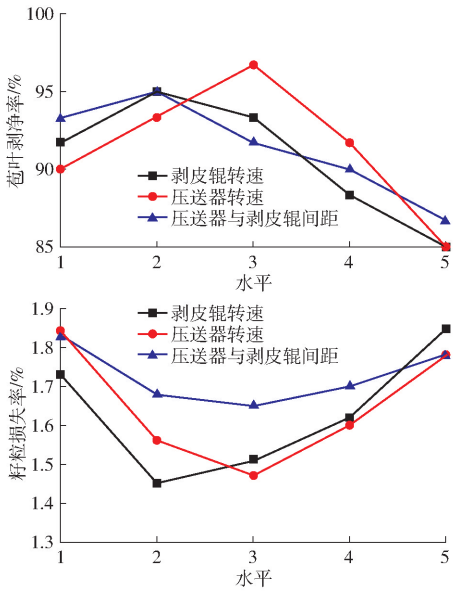


图 16　单因素试验结果

Fig. 16　Single factor test results

由图 16 可得，随着剥皮辊转速、压送器转速和压送器与剥皮辊间距的增加，苞叶剥净率呈先上升后下降的趋势，籽粒损失率先下降后上升。当剥皮辊转速为 300 ~ 400 r/min、压送器转速为 60 ~ 100 r/min、压送器与剥皮辊间距为 35 ~ 45 mm 时，苞叶剥净率最大，籽粒损失率最小。

6.2.3　正交试验

根据前期试验结果选定剥皮辊转速为 300 ~ 400 r/min、压送器转速为 60 ~ 100 r/min、压送器与剥皮辊间距为 35 ~ 45 mm。为得到各个因素最优值，采用三因素三水平二次回归正交组合试验，试验因素编码如表 7 所示。

表 7　剥皮试验因素编码

Tab. 7　Factor coding of peeling test

编码	因素		
	剥皮辊转速/(r·min^{-1})	压送器转速/(r·min^{-1})	压送器与剥皮辊间距/mm
-1	300	60	35
0	350	80	40
1	400	100	45

6.3　试验结果与分析

运用 Design-Expert 13 软件进行试验设计与分析，试验方案和结果如表 8 所示，表中 A、B、C 为编码值。

表 8　正交试验设计与结果

Tab. 8　Experiment scheme and results

试验编号	因素			Y_2/%	Y_3/%
	A	B	C		
1	0	0	0	95.00	1.45
2	1	0	-1	93.33	1.71
3	0	0	0	93.33	1.39
4	-1	1	0	88.33	1.88
5	0	0	0	95.00	1.53
6	0	0	0	95.00	1.48
7	1	0	1	91.67	1.69
8	0	1	-1	93.33	1.65
9	0	-1	1	90.00	1.83
10	0	-1	-1	91.67	1.63
11	-1	0	-1	91.67	1.69
12	0	1	1	88.33	1.79
13	1	1	0	93.33	1.99
14	-1	0	1	86.67	2.05
15	1	-1	0	86.67	1.71
16	-1	-1	0	88.33	1.92
17	0	0	0	96.67	1.49

6.3.1　方差分析

由表 9 可知，苞叶剥净率和籽粒损失率的模型 P 值都小于 0.01，能够描述各因素与响应值之间的

关系,且回归方程失拟项不显著,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;决定系数 R^2 分别为 0.919 5 和 0.955 8,表明回归方程预测值与实际值具有高度一致性。剔除不显著项的苞叶剥净率和籽粒损失率的回归方程分别为

$$Y_2 = 95 + 1.25A + 0.831\,3B - 1.67C + 1.66AB - 2.92A^2 - 2.92B^2 \quad (18)$$

$$Y_3 = 1.47 - 0.055A + 0.027\,5B + 0.085C + 0.08AB - 0.095AC + 0.233\,5A^2 + 0.173\,5B^2 + 0.083\,5C^2 \quad (19)$$

表 9 方差分析

Tab. 9 Analysis of variance

差异来源	Y_2		Y_3	
	F	*P*	*F*	*P*
模型	8.89	0.004 4	16.82	0.000 6
A	6.99	0.033 2	6.39	0.039 4
B	3.09	0.122 1	1.60	0.246 9
C	12.42	0.009 7	15.25	0.005 9
AB	6.2	0.041 6	6.75	0.035 5
AC	1.56	0.251 9	9.53	0.017 7
BC	1.55	0.253 1	0.237 5	0.640 9
A^2	20.03	0.002 9	60.57	0.000 1
B^2	20.06	0.002 9	33.44	0.000 7
C^2	3.67	0.096 9	7.75	0.027 2
失拟项	1.66	0.311 3	1.92	0.268 2

6.3.2 响应曲面分析

根据表 9 对显著项进行响应曲面分析,剥皮辊转速与压送器转速交互作用对苞叶剥净率的影响如图 17 所示,当压送器与剥皮辊间距固定为中心水平 40 mm 时,压送器转速一定时,苞叶剥净率随着剥皮辊转速的增加呈现先升高后降低的趋势;当剥皮辊转速一定时,随着压送器转速的增加,苞叶剥净率先升高后降低。

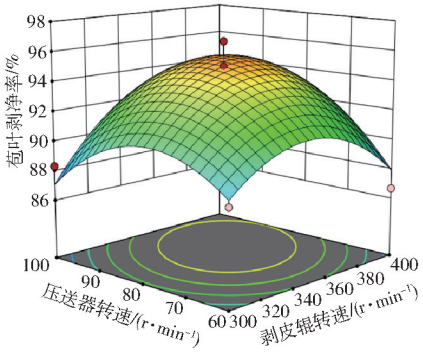


图 17 因素交互作用对苞叶剥净率影响的响应曲面

Fig. 17 Effect of factor interactions on bract peeling rate

根据表 9 对显著项进行响应曲面分析,各因素交互作用对籽粒损失率的影响如图 18 所示。当压送器与剥皮辊间距固定为中心水平 40 mm 时,剥皮辊转速一定时,籽粒损失率随着压送器转速的升高呈现先降低后升高的趋势;当压送器转速一定时,随着剥皮辊转速的升高,籽粒损失率先降低后升高。当压送器转速固定为中心水平 80 r/min 时,压送器与剥皮辊间距一定时,随着剥皮辊转速的增加,籽粒损失率先降低后升高;剥皮辊转速一定时,籽粒损失率随着压送器与剥皮辊间距的增加呈现先降低后升高的趋势。

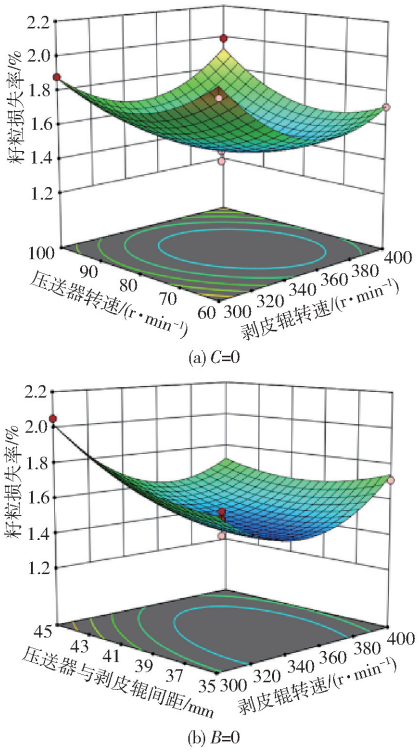


图 18 因素交互作用对籽粒损失率影响的响应曲面

Fig. 18 Effect of factor interactions on grain shedding rate

6.4 参数优化与验证

利用 Design-Expert 13 软件中参数优化模块进行优化,选取最优的参数组合。构建目标函数和约束条件

$$\begin{cases} \max Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

对上述指标进行优化求解,得到最佳参数组合为:剥皮辊转速 353.2 r/min、压送器转速 81.42 r/min、压送器与剥皮辊间距 37.16 mm,此时苞叶剥净率和籽粒损失率分别为 95.67%、1.45%。

通过将优化后的最佳参数进行重复试验,每组喂入 20 个果穗,进行 3 次重复试验,得到苞叶剥净率分别为 95%、90%、95%,平均值为 93.33%;籽粒

损失率分别为 1.55%、1.59%、1.54%，平均值为 1.56%，与参数优化结果基本一致，满足机器设计要求。试验得到剥皮后果穗如图 19 所示。



图 19　高含水率玉米果穗剥皮验证试验结果

Fig. 19　High moisture content corn cob peeling validation test

6.5　对比试验

使用传统玉米摘穗剥皮机对含水率为 35% 左右的玉米果穗进行剥皮试验，其剥净率为 74%。本研究所设计的高含水率玉米果穗剥皮装置其剥净率为 93.33%，苞叶剥净率大幅提升，设计的南方高含水率玉米果穗剥皮装置满足要求。

7　结论

（1）设计了一种在果穗苞叶表面划痕后摩擦去皮的剥皮装置，适用于含水率在 30% ~40% 的玉米果穗。对划痕装置进行设计，利用 EDEM 离散元软件对划痕装置进行仿真参数优化，确定了其结构参数。

（2）搭建了由高速摄像机和剥皮装置组成的剥皮试验台架，对果穗剥皮过程进行研究并验证了剥皮辊在苞叶划痕处能有效地抓取到苞叶。

（3）通过正交试验确定了剥皮装置的最佳工作参数。优化参数后，得到剥皮装置的最佳参数组合为：压送器与剥皮辊间距 37.16 mm、剥皮辊转速 353.2 r/min、压送器转速 81.42 r/min，此时苞叶剥净率为 95.67%、籽粒损失率为 1.45%。验证试验中苞叶剥净率为 93.33%、籽粒损失率为 1.56%，表明装置满足设计要求。

参　考　文　献

[1] 陈志，郝付平，王锋德，等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J]. 农业机械学报，2012，43(12)：44－50.
CHEN Zhi，HAO Fuping，WANG Fengde，et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2012，43(12)：44－50.（in Chinese）

[2] 崔涛，樊晨龙，张东兴，等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J]. 农业机械学报，2019，50(12)：1－13.
CUI Tao，FAN Chenlong，ZHANG Dongxing，et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(12)：1－13.（in Chinese）

[3] 樊晨龙，崔涛，张东兴，等. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(4)：113－123.
FAN Chenlong，CUI Tao，ZHANG Dongxing，et al. Design and test of low-damage combined corn threshing and separating device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(4)：113－123.（in Chinese）

[4] BARNWAL P，KADAM D，SINGH K. Influence of moisture content on physical properties of maize[J]. International Agrophysics，2012，26(3)：331－334.

[5] 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）

[6] 徐谐庆，饶洪辉，李涛，等. 全自动莲子剥壳去皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报，2014，30(13)：28－34.
XU Xieqing，RAO Honghui，LI Tao，et al. Design and experiment on automatic husking and peeling machine for lotus seeds[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(13)：28－34.（in Chinese）

[7] 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）

[8] 杜岳峰，贺诗，毛恩荣，等. 基于知识工程的玉米果穗剥皮装置设计[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊)：249－260.
DU Yuefeng，HE Shi，MAO Enrong，et al. Design of corn ear peeling device based on knowledge-based engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.)：249－260.（in Chinese）

[9] 陈俊志，史瑞杰，戴飞，等. 制种玉米与剥皮机构互作过程仿真与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：91－100.
CHEN Junzhi，SHI Ruijie，DAI Fei，et al. Simulation and experimentation on interaction process between seed corn and corn husking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(4)：91－100.（in Chinese）

[10] 王善博，阿力木·买买提吐尔逊，黄强斌，等. 基于 EDEM－RecurDyn 耦合的玉米剥皮装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报，2023，44(10)：115－120，143.
WANG Shanbo，ALYM·Memettrsun，HUANG Qiangbin，et al. Simulatio nanalysis and experiment of a maize peeling device based on EDEM－RecurDyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(10)：115－120，143.（in Chinese）

[11] 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)
[12] 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.
[13] 陈舜, 张新伟, 易克传, 等. 鲜食玉米苞叶的拉伸断裂特性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 1085 – 1092.
CHEN Shun, ZHANG Xinwei, YI Kechuan, et al. Study on tensile properties and fracture characteristics of fresh corn bracts [J]. Journal of Yunan Agricultural University (Natural Science), 2023, 38(6): 1085 – 1092. (in Chinese)
[14] 解福祥, 宋健, 霍洪鹏, 等. 玉米苞叶力学性能与剥离试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 129 – 133.
XIE Fuxiang, SONG Jian, HUO Hongpeng, et al. Mechanical properties and stripping test of maize bracteal[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 129 – 133. (in Chinese)
[15] LIU J, YE W, ZHANG Z, 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 – 12.
[16] YU M, CANNAYEN I, HENDRICKSON J, et al. Mechanical shear and tensile properties of selected biomass stems[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(4): 1231 – 1242.
[17] WANG S, REN L, LIU Y, et al. Mechanical characteristics of typical plant leaves[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(3): 294 – 300.
[18] 赵一鸣, 戴飞, 史瑞杰, 等. 自走式制种玉米联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 121 – 134.
ZHAO Yiming, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Design and experiment of self-propelled seed corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 121 – 134. (in Chinese)
[19] 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)
[20] FU J, YUAN H, ZHAO R, et al. Peeling damage recognition method for corn ear harvest using RGB image[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3371.
[21] 张亮, 赵德荣, 王兴鹏, 等. 低破碎多通道玉米剥皮机关键技术研究与设计[J]. 中国种业, 2023(3): 65 – 68.
ZHANG Liang, ZHAO Derong, WANG Xingpeng, et al. Research and design of key technology of low crushing multi channel corn husker[J]. China Seed Industry, 2023(3): 65 – 68. (in Chinese)
[22] 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)
[23] LI Z, FU J, LUO X, et al. Determination of friction characteristics of corn ears at varying factors in mechanical peeling[J]. Journal of Food Process Engineering, 2024, 47(11): e14764.
[24] MANDANG T, SINAMBELA R, PANDIANURAGA N R. Physical and mechanical characteristics of oil palm leaf and fruits bunch stalks for bio-mulching[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 196(1): 012015.
[25] 李振晔. 玉米果穗收获机低损高净剥皮关键技术与智能识别研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
LI Zhenye. Research on key technologies and intelligent recognition for low-damaged-high-stripping peeling of corn ear harvester[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
[26] 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)
[27] 张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 旋刀式荸荠芽根同步切除装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 10 – 19.
ZHANG Guozhong, CHEN Liming, LIU Haopeng, et al. Design and experiment of the rotary blade type synchronous cutting device for water chestnut buds and roots[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13): 10 – 19. (in Chinese)
[28] LI X Y, DU Y F, LIU L, et al. Research on the constitutive model of low-damage corn threshing based on DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106722.
[29] 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)
[30] 刘磊, 杜岳峰, 栗晓宇, 等. 基于离散元法的种子玉米剥皮过程籽粒损失分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 28 – 38.
LIU Lei, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Analysis and experiment on kernel loss of seed corn during peeling based on DEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2):28 – 38. (in Chinese)