doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.015

轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置优化设计与试验

高朋飞[1] 张新伟[1,2] 姜春霞[1] 易克传[1,2] 张晓龙[1] 马战伟[1]
（1. 安徽科技学院智能制造学院，凤阳 233100；2. 玉米育种安徽省工程技术研究中心，凤阳 233100）

摘要：针对我国鲜食玉米机械脱粒过程中存在籽粒破损率高的问题，在已有脱粒装置结构的基础上，设计一种“柔性陀螺辊型+轴向滚筒变径脱粒”组合式的柔性变径脱粒装置，以实现高效脱粒。在鲜食玉米果穗力学特性研究基础上，采用包切的设计理念，建立果穗力学模型并进行理论分析，同时针对鲜食玉米脱粒装置的核心脱粒部件进行有限元仿真分析，确定影响脱粒性能的主要因素。根据理论分析和仿真结果设计脱粒样机，开展脱粒性能试验。利用Design-Expert软件设计三因素五水平二次回归正交旋转组合试验，以滚筒转速、陀螺辊转速和转轴轴距作为试验因素，以籽粒破损率、果穗未脱净率作为试验指标。结果表明：对籽粒破损率影响最大的因素为转轴轴距，对果穗未脱净率影响最大的因素为滚筒转速；根据回归方程模型，最优组合为：滚筒转速106.630 r/min、陀螺辊转速230.001 r/min、转轴轴距54.00 mm。在此最优组合下根据实际工况开展验证试验，经3次平行试验得到实际籽粒破损率为（4.956±0.152）%、果穗未脱净率为（4.158±0.085）%，与预测值籽粒破损率5.033%、果穗未脱净率4.303%相差在5%范围内，与参数优化结果基本一致，满足鲜食玉米脱粒要求。该研究可为鲜食玉米脱粒装备优化设计和选择提供技术支持。

关键词：鲜食玉米；脱粒装置；滚筒式；变径；正交试验
中图分类号：S225.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0145-12

Optimized Design and Test of Axial Roller Fresh Corn Threshing Device

GAO Pengfei[1] ZHANG Xinwei[1,2] JIANG Chunxia[1] YI Kechuan[1,2] ZHANG Xiaolong[1] MA Zhanwei[1]
(1. *College of Intelligent Manufacturing, Anhui Science and Technology University, Fengyang* 233100, *China*
2. *Anhui Provincial Engineering Technology Research Center for Corn Breeding, Fengyang* 233100, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of high kernel breakage rate in the mechanical threshing process of fresh corn in China, on the basis of the existing threshing device structure, a “flexible gyroscopic roller + axial drum reducer threshing” combination of flexible reducer threshing device was designed to achieve high efficiency threshing. On the basis of the mechanical characteristics of fresh corn cob, the design concept of package cutting was adopted to establish a mechanical model of cob and carry out theoretical analysis, and finite element simulation analysis was carried out for the core threshing parts of the fresh corn thresher to determine the main factors affecting the threshing performance. According to the theoretical analysis and simulation results, the threshing prototype was designed, the threshing performance test was carried out. Design-Expert software was used to design a three-factor, five-level quadratic regression orthogonal rotary combination test, with drum speed, gyro roller speed and rotor axis distance as the test factors, and grain breakage rate and cob failure rate as the test indexes. The results showed that the biggest influence factor on the grain breakage rate was the axis distance of the rotary axis, and the biggest influence factor on the maize ear uncleaned rate was the drum rotational speed; according to the regression equation model, the optimal conditions were predicted as follows: drum rotational speed was 106.630 r/min, gyro roller rotational speed was 230.001 r/min, and rotary axis distance was 54.00 mm. The verification test was carried out according to the actual working conditions under the optimal conditions. After three parallel tests, the actual kernel breakage rate was (4.956±0.152)%, and the cob not stripped rate was (4.158±0.085)%, which was within 5% of the predicted kernel breakage rate of 5.033% and cob not stripped rate of 4.303%, which was basically in line with the optimization of the parameters and met the requirements

收稿日期：2024-06-07 修回日期：2024-08-08
基金项目：安徽省重点研究与开发计划项目(202104a06020001)和国家级大学生创新创业训练计划项目(202410879046)
作者简介：高朋飞(1997—)，男，硕士生，主要从事农产品收获与加工研究，E-mail：2597370894@qq.com
通信作者：张新伟(1983—)，男，副教授，主要从事农产品收获与加工研究，E-mail：zhangxw@ahstu.edu.cn

of fresh corn threshing. The research result can provide technical support for the optimal design and selection of fresh corn threshing equipment.

Key words: fresh corn; threshing device; roller type; variable diameter; orthogonal test

0 引言

玉米(*Zea mays* L.)是禾本科的一年生草本植物,具有植株高大、茎秆壮硕的特点[1-2]。在世界谷类作物中,玉米是一种粮经饲兼用的农作物,也是我国第一大粮食作物,其播种面积仅次于小麦和水稻,平均单产则居首位。根据用途可分为青贮玉米、籽粒用玉米、鲜食玉米三大类型,其中鲜食玉米是指乳熟和蜡熟期收获的玉米,根据种类可分为甜玉米、糯玉米以及甜糯玉米。因口感好、易饱腹及营养丰富等特点,成为消费者日常主食和代餐的选择之一[3-7]。

鲜食玉米在进行深加工时需进行前期脱粒处理,但是由于其含水率较高,籽粒较为稚嫩且籽粒与棒芯的连接力强,利用冲击、揉搓、挤压等传统的机械脱粒方式对鲜食玉米进行脱粒时会造成严重的籽粒损伤[8-11]。甜玉米起源于美洲大陆,之后在欧美、亚洲等国家逐渐发展,国外在鲜食玉米脱粒技术方面研究较早。现阶段,国际市场上所售卖的鲜食玉米脱粒装备主要是美国、新西兰与日本的产品。美国在鲜食玉米加工业中大多采用工业级人工喂入式的玉米脱粒机从玉米棒上切下玉米粒[12]。SZYMANEK等[13]在鲜食玉米脱粒方面利用液体低温冷冻剂将果穗快速冷冻到不超过脱落层的深度,从而产生所需的完整颗粒。然后,根据传统机械脱粒方式采用不同类型的脱粒单元:经典打浆式(ZC)、条带式(ZL)和圆盘式(ZT)分别对冷冻的玉米进行脱粒处理,从而将完整的玉米粒从玉米棒中分离。国内针对鲜食玉米果穗的脱粒技术研究较晚,起步于20世纪90年代,陈桂祥[14]研制的GT6A22型甜玉米脱粒机,经过不断地优化和改善,开始慢慢流入市场。张旦闻等[15]研制的LD-I型甜玉米脱粒机,具备了对玉米的输送、夹持、切削和籽粒与芯棒的分离功能。何晓鹏[16]研制出人工喂入式鲜食甜玉米籽粒切脱机,该设备采用刀片高速转动、玉米果穗直线运动的旋划切削技术。周福君等[17]设计了一种切削式鲜食玉米柔性脱粒装置,采用夹持输送辊与切削刀组合式的脱粒元件对果穗实现脱粒。

本研究以鲜食玉米果穗为研究对象,对其进行相关物理形态参数测试、力学特性研究以及建立果穗力学模型进行理论分析[18-22]。通过获得的果穗表征参数以及在力学特性研究中对果穗开展的挤压试验,设计一组轮廓为椭圆形、橡胶材质的陀螺辊输送装置,实现对果穗的柔性输送。为优化脱粒部件对果穗进行脱粒的自适应性,结合果穗自身的生长特性,采用脱粒刀片紧贴果穗棒芯并对其进行旋转包切的设计理念,实现对果穗的变径脱粒。其次,进行三维结构设计与参数选择并对鲜食玉米脱粒装置的核心脱粒部件进行有限元仿真分析。最后,搭建脱粒试验台,开展脱粒性能试验。通过多因素正交试验确定影响籽粒破损率和果穗未脱净率的因素,并进行参数优化试验。以期为鲜食玉米脱粒装置设计与制造提供新的脱粒理论基础,推动鲜食玉米加工技术的进一步发展与应用。

1 果穗表征参数测定与脱粒刀具选型

在前期工作基础上,以玉米果穗为研究对象对其进行形态参数的测试,研究玉米果穗的物理特性,包括玉米果穗、玉米芯及玉米籽粒的表征参数。同时,对核心脱粒刀具进行了选型试验,以期为所设计脱粒装置的核心部件参数提供理论依据。

1.1 试验设备

钢尺(量程30 cm,精度0.1 mm)用于测量果穗、棒芯长度,以及籽粒相关尺寸。游标卡尺(宝工PD-153型,量程150 mm,精度0.02 mm)用于测量果穗、棒芯直径。记号笔用于标记果穗尺寸和分段记号。普通切割刀具用于对果穗进行分段处理。

1.2 试验材料

试验选用的鲜食玉米品种为安徽科技学院自主选育的凤糯168甜糯玉米果穗,试验数量为30穗。试验步骤如下:①从试验田随机挑选籽粒饱满、完好无损的玉米果穗30穗。②通过对玉米穗形态及生长情况的观测,将玉米穗分为3个节段,段长比例按30%、50%、20%,分别命名为首段、中段和末段,并用标记笔标出。③统计试验所选取的30个鲜食玉米果穗的行数,并对各段玉米果穗的段行粒数进行记录。利用钢尺和游标卡尺测量玉米果穗长度(即段长)以及玉米果穗大小两端的直径。④手工脱掉果穗两端的玉米籽粒,测量棒芯大端和小端直径,即大端芯直径和小端芯直径。⑤各参数测量完毕后,将果穗单独装袋,并标号。

于2023年5月18—30日在安徽科技学院西区笃行楼实验室进行鲜食玉米果穗物理形态参数(果穗长、果穗大小端直径、棒芯大小端直径)的相关试验统计。测定结果如表1所示。

由表1可知,凤糯168甜糯玉米果穗中段和末段长度之和约占果穗总长度的73.3%;段行粒数之和约占果穗总行粒数的83.05%,试验统计结果表明该品种整个果穗的大部分籽粒生长在中段和末段,即对果穗中段和末端进行力学特性研究更具有代表性。

1.3 脱粒刀具的选型试验

鲜食玉米脱粒刀的齿形选择及材质选择对脱粒效

表 1　凤糯 168 玉米果穗各分段形态参数

Tab. 1　Morphological parameters of each section of Fengnuo 168 corn ears

段长比例/%	统计量	果穗段长/cm	小端穗直径/mm	大端穗直径/mm	小端芯直径/mm	大端芯直径/mm	段行籽粒数/个
30	最小值	42.62	31.28	38.09	18.35	20.35	3.0
	最大值	51.09	42.70	51.73	26.43	27.92	7.0
	平均值	46.86	36.99	44.91	22.39	24.14	5.0
50	最小值	72.55	38.63	40.63	21.09	23.63	10.0
	最大值	83.01	59.35	58.24	30.78	32.54	18.0
	平均值	77.78	48.99	49.44	25.94	28.09	14.0
20	最小值	44.02	40.43	35.64	19.23	20.81	8.0
	最大值	57.74	49.29	46.26	31.51	32.66	13.0
	平均值	50.88	44.86	40.95	25.37	26.74	10.5

果具有很大的影响，主要体现在：①齿形种类：鲜食玉米脱粒刀常用的齿形一般分为梯形、锯齿形、平直形。②齿形间距：齿形之间的间距直接影响到脱粒的顺畅程度。如果齿距过小，可能导致玉米粒的卡顿；如果间距过大，可能造成脱粒不彻底，从而降低收成率。③齿形角度：齿的倾斜角度也会影响刀具的切割效率。适当的倾斜角度可以增强切割的力量，提高脱粒效果，而过大或过小的角度可能导致效率降低。④齿数：齿数过少或者过多，会对刀具分离棒芯与籽粒的切入力大小产生一定的影响。⑤刀具材料：刀具材料的硬度和抗磨损性决定了刀具的使用寿命与稳定性，硬度适中的材料可以在保持耐用的同时保证切割性能。

在选择时，需综合考虑上述因素，以确保获得最佳的脱粒效率和玉米粒损失较少。其中，脱粒刀的齿形种类对脱粒效果影响最大。为了对比 3 种齿形的脱粒效果，自制了 3 种齿形的环形脱粒刀具，其材质均选用 304 钢，且锯齿形和梯形的齿数均为 40 齿。由于果穗的大端直径和小端直径存在较大差异，且籽粒生长不均匀，对试验结果可能会产生较大的影响，故取直径差异较小且籽粒生长均匀的鲜食玉米果穗中段为试验研究对象，进行了传统的手握式脱粒试验。试验步骤如下：①选取在同一期随机采摘的同种玉米果穗，以减小果穗本身的因素对试验结果产生的影响。②对果穗的大端籽粒和小端籽粒进行手动剥离。对剥离籽粒的果穗进行表征参数的测定，包括中段直径以及中段段长并计算平均值。同时，选取合格的果穗共计 15 穗作为试验研究材料。③每进行一种刀具试验，准备好中段玉米 5 穗，记好编号，重复进行 5 次试验，在每次试验中从脱离的籽粒里随机抓取一把籽粒并挑选出破损的籽粒数量。④整理试验数据，根据籽粒破损率的计算公式（籽粒破损率为破损籽粒数占总籽粒数百分比）得到试验指标并计算出平均值。

脱粒刀具选型试验如图 1 所示，试验结果如表 2 所示。



图 1　脱粒刀具选型试验

Fig. 1　Grtrip tool selection test

表 2　脱粒刀具选型试验结果

Tab. 2　Selection test results of threshing tools

齿形	玉米编号	中段直径/mm	中段直径平均值/mm	中段长度/mm	中段长度平均值/mm	随机抓取籽粒数/个	破损籽粒数/个	籽粒破损率/%	籽粒破损率平均值/%
锯齿形	1	45.3	44.78	77.3	77.20	63	13	20.6	23.1
	2	44.2		76.8		72	18	25.0	
	3	44.5		77.5		78	22	28.2	
	4	44.8		76.5		55	11	20.0	
	5	45.1		77.0		69	15	21.7	
平直形	6	44.5	44.86	77.2	77.16	68	8	11.8	13.74
	7	44.7		77.1		82	12	14.6	
	8	45.1		77.4		74	10	13.5	
	9	44.8		77.2		58	7	12.1	
	10	45.2		76.9		54	9	16.7	
梯形	11	44.6	44.70	76.8	76.80	70	7	10.0	10.36
	12	44.5		76.3		79	6	7.6	
	13	44.7		77.0		68	8	11.8	
	14	44.6		77.2		59	5	8.5	
	15	45.1		76.7		65	9	13.9	

手握式脱粒试验结果表明:锯齿形刀具能够有效切割和撕裂玉米粒,与玉米的结构相结合,提高脱粒效率。但是更容易在脱粒过程中扎破玉米粒,造成较为严重的籽粒破损率,其破损率为23.1%。平直形刀具脱粒温和,脱粒表面平整,减少了玉米粒破损,其籽粒破损率为13.74%。但由于脱粒过程中的切入能力较差,需要较大的握力和推力,对刀片损伤较大。梯形齿刀具在脱粒过程中能够有效切割玉米粒,籽粒破损较少,其籽粒破损率约为10.36%,且具备了平直形刀具脱粒表面平整的特点。综合考虑下确定选用梯形齿环形脱粒刀具作为力学特性试验中轴向剪切试验的刀具。同时,在轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置三维结构设计中的环形变径脱粒刀具也采用本次试验选用的梯形齿刀具,为了提高刀片的切入能力,将齿数设计为80。

2 果穗力学模型建立与分析

收获期鲜食玉米植株结构如图2所示,主要包括根部、茎秆、茎叶及果穗,针对鲜食玉米植株不同部位物理特性不同的特征,将本研究所涉及的果穗部位制成试样并对其进行物理力学分析是设计鲜食玉米果穗脱粒装置的重要依据。

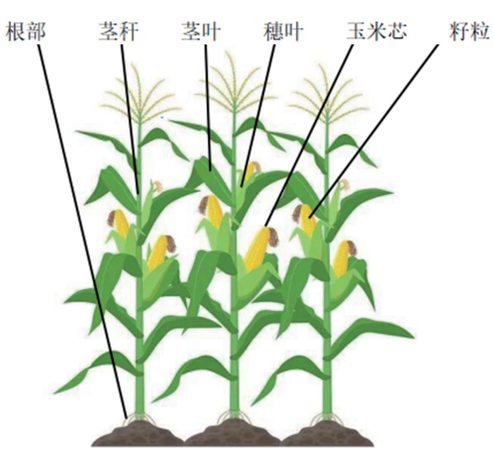


图2 鲜食玉米植株结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of fresh maize plants

2.1 玉米果穗外部变化与分析

由于果穗首末段的大小端存在直径的差异,挤压试验中圆盘压具与籽粒的接触面积会带来较大的试验误差,而中段果穗近似圆柱状且籽粒生长较为集中,故进行挤压试验时利用切割刀具取果穗中段进行挤压试验,并进行籽粒的受力分析[19,23]。给玉米果穗施加竖直方向的压力F,压力的一部分分解为籽粒的侧向挤压力F_2,上下两处的侧向挤压力同时向果穗侧面的籽粒传递,指向玉米芯的力F_1继续向棒芯处传递。随着压力不断增加,果穗的籽粒开始出现变形。此时棒芯传递的力环向作用于芯髓四周,该环向分布的力可正交分解为竖直方向的压力F_3和水平方向的张力F_4,如图3所示。

玉米果穗侧面单个籽粒的受力分析如图4所示,图

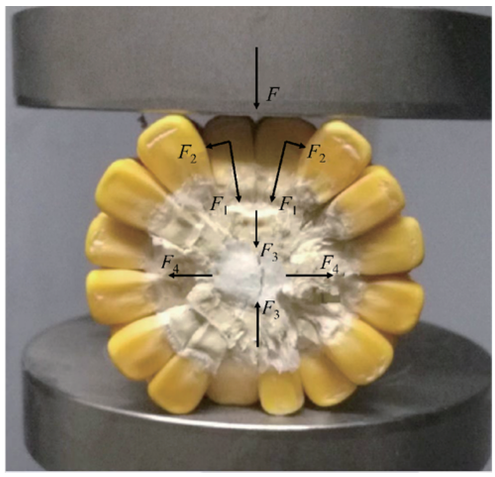


图3 挤压受力分析

Fig. 3 Extrusion force analysis

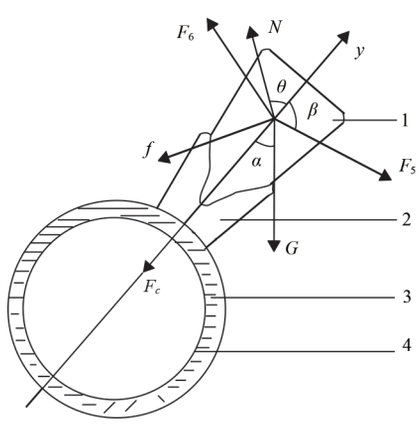


图4 玉米果穗受压时法向受力分析

Fig. 4 Analysis of normal force of corn ears under compression

1. 籽粒 2. 颖壳 3. 木质环形体 4. 芯髓

中:G为籽粒重力,kN;F_c为籽粒与棒芯连接力,kN;N为角度为θ时颖壳对籽粒的支撑力;F_5为来自侧相邻籽粒的压力,kN;F_6为来自下侧相邻籽粒的压力,kN。θ为支撑力N与y轴的夹角;β为挤压力F_5与y轴的夹角;α为重力G与y轴的夹角;f为角度为θ时颖壳对籽粒的摩擦力,kN。

籽粒受到外力后的径向平衡方程为

$$(F_5+F_6)\cos\beta+\int_{\theta_1}^{\theta_2}N\theta\cos\theta\mathrm{d}\theta-\int_{\theta_1}^{\theta_2}f|\sin\theta|\mathrm{d}\theta-F_c-G\cos\alpha=0 \tag{1}$$

式中 θ_1——θ最小值

θ_2——θ最大值

果穗受外力作用时,籽粒与玉米芯连接力F_c的方向为指向y轴负方向,颖壳对籽粒的摩擦力f变为向内,玉米果穗侧上方籽粒受力均满足平衡方程(1),而侧下方籽粒的受力与侧上方籽粒不同,由于籽粒位置的变化导致籽粒重力在y轴上分力方向变为指向y轴正方向,因此侧下方籽粒受力满足径向平衡方程

$$(F_5+F_6)\cos\beta+\int_{\theta_1}^{\theta_2}N\theta\cos\theta\mathrm{d}\theta-\int_{\theta_1}^{\theta_2}f\theta|\sin\theta|\mathrm{d}\theta-F_c+G\cos\alpha=0 \tag{2}$$

由上述平衡方程可知，在压力施加的初始阶段，果穗侧面籽粒能够保持径向受力的平衡，籽粒不会爆浆，但随着压力的增大，籽粒间的相互挤压力增大，随后平衡方程会被破坏，籽粒出现破损爆浆现象。因此，机械脱粒时确保陀螺辊输送装置对含水率为64.96%左右的鲜食玉米果穗施加的载荷低于挤压试验测得的试验力431.6 N时，不仅可以防止果穗籽粒破损爆浆而且有利于脱粒。

2.2　果穗脱粒边界条件

当玉米果穗与环形脱粒刀片两者间相互接触时，脱粒刀相对果穗处于一种包切旋转状态，故沿棒芯周向分布的籽粒脱离芯轴时受到来自脱粒刀的周向剪切力。玉米果穗的籽粒按周向分布生长，每周由多个籽粒组成，分析其周向剪切力较为复杂。因此，为细化玉米脱粒的边界条件，需分析单个籽粒脱离的情况。图5为单籽粒沿芯轴三轴的连接力简图。

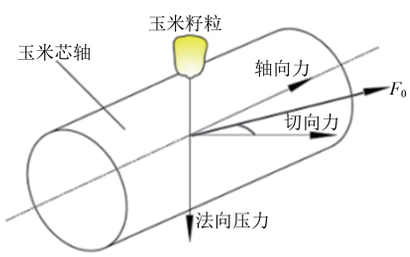


图5　单籽粒沿芯轴三轴的连接力简图

Fig. 5　Connecting diagram of single grain along three axes of mandrel

单个籽粒脱离棒芯需满足旋转脱粒刀施加给籽粒合力的分力分别大于籽粒沿芯轴的轴向、切向的连接力。定义一个合力F_0，当其分力大于轴向力F_a和切向力F_τ时，籽粒从芯轴脱离，即为脱粒边界条件。玉米果穗脱粒边界条件为

$$\begin{cases} F_0\sin\alpha > F_a \\ F_0\cos\alpha > F_\tau \end{cases} \tag{3}$$

3　结构设计与仿真

3.1　脱粒装置主要结构

图6为一种轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置结构示意图，该装置中的玉米穗通过陀螺辊，并被前后两对橡胶材质的转辊夹持，前、后两个果穗夹持辊相向旋转，将玉米穗推入到旋转的脱粒滚筒的刀口中。通过对果穗物理形态表征参数测定，确定了接近滚筒两端转轴间距为150 mm左右，使得脱粒完成的棒芯能够被出芯夹持辊所夹持；前后陀螺辊的转轴轴距可调，增强了对果穗夹持的适应力，轴距可调范围为40~60 mm。果穗经过脱粒，首段进入出芯夹持辊中，相向旋转的出芯夹持辊利用中心处齿轮盘的切入能力，切入棒芯，并将棒芯从箱体中排出；切下的籽粒则经过反梯形漏斗落入接料盒中，即完成整个切脱过程。

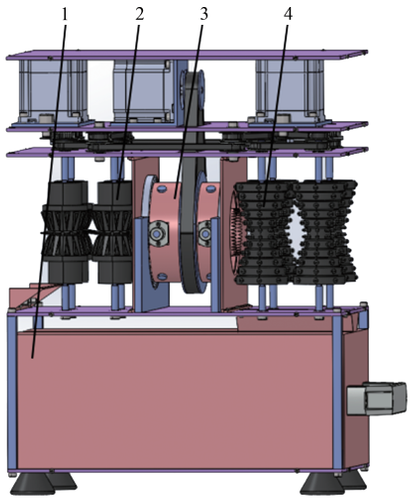


图6　脱粒装置结构示意图

Fig. 6　Schematic of structure of threshing device

1. 接料盒　2. 出芯夹持辊　3. 脱粒滚筒　4. 陀螺辊

图7为核心脱粒部件脱粒滚筒。脱粒刀由截面为‘凸’形的两块刀片组成，刀头及刀身皆为环形状。结合对果穗本身的物理形态表征参数测试及脱粒刀具的选型试验，考虑到果穗存在秃尖的现象，故将刀口直径设计为约22.4 mm，刀齿为梯形齿，齿数为80，刀口厚度按照自制梯形齿刀具的厚度约为0.25 mm，考虑到果穗的大端穗直径以及刀身与导向杆的连接点可能对棒芯有接触而造成堵塞现象，故将刀身直径设计为约45 mm，刀身与滚筒外壁通过扩缩组件（弹簧、导向杆）进行连接，为了在脱粒过程中减少刀片力矩对连接点造成的损伤，滚筒外壁直径不易过大，故将滚筒外壁直径设计为约88.9 mm。接有变频器的电机通过V带与带轮连接，带动滚筒旋转。随着玉米果穗的小端被送入刀口，在脱粒过程中，根据鲜食玉米的大小端直径变化，滚筒内壁的扩缩组件由弹簧和光滑的螺杆组成，可通过伸缩来调节两块脱粒刀片之间的间距，对果穗进行包切，实现对果穗的变径脱粒。连接在刀身上的导向杆则用来限制刀片位移，使得刀片沿着扩缩组件的方向进行移动。同时，间接起到延长扩缩组件寿命的作用。

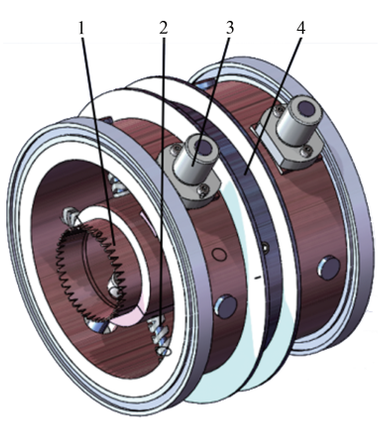


图7　脱粒滚筒结构图

Fig. 7　Structure diagram of threshing drum

1. 脱粒刀　2. 扩缩组件　3. 导向杆　4. 带轮

3.2 工作原理

轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置由三相异步电动机提供动力源输出，通过传动机构，带动滚筒两侧的夹持输送辊使以及脱粒滚筒进行旋转。人工放置果穗，靠近果穗入口的入料陀螺辊相向转动，依靠前后陀螺辊的椭圆形轮廓设计对果穗形成自动定位。同时，依靠陀螺辊对果穗挤压而产生的摩擦力和推力的合力将鲜食玉米卷入箱体的内腔并传送到脱粒刀口处，进行脱粒。在脱粒过程中，脱粒滚筒根据鲜食玉米棒芯小端到大端直径的变化，滚筒内壁的扩缩组件可通过伸缩来调节两块脱粒刀片之间的间距对果穗进行包切，以实现对果穗的变径脱粒，导向杆则是用来限制刀片位移。果穗的果柄和棒芯连接处受到来自旋转环形刀片的周向剪切力，当周向剪切力大于籽粒果柄和棒芯的连接力且小于果穗受到来自陀螺辊的合力，籽粒和棒芯会实现分离，棒芯则继续向排芯夹持辊移动。靠近出口处的排芯夹持输送辊将脱粒后的玉米芯运送出箱体，脱离的玉米粒则会经过下方的反梯形漏斗落到玉米粒接料盒内，实现了两者的分离。结合鲜食玉米果穗外形结构特点和脱粒作业所需的动力，确定鲜食玉米脱粒装置主要技术参数如表3所示。

表3 鲜食玉米脱粒装置主要技术参数

Tab. 3 Main technical parameters of fresh corn thresher

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	550×470×1 650
整机质量/kg	95
滚筒电机额定功率/kW	0.04
陀螺辊电机额定功率/kW	0.04
滚筒转速/(r·min^{-1})	80~140
陀螺辊转速/(r·min^{-1})	200~320
转轴轴距/mm	40~60

3.3 仿真分析

利用ANSYS仿真分析软件对鲜食玉米脱粒装置的核心脱粒部件进行静力学和模态分析，分析其强度、刚度和振动等，确定其可靠性和寿命[24-26]。

3.3.1 脱粒刀具静力学分析

静力学分析是对切削刀具的最大应力与最大形变位置的分析，可以确定结构与材质的合理性。

轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置在进行脱粒作业时，脱粒刀具作为脱粒作业中与鲜食玉米果穗直接接触的作业元件，其材质应该满足耐磨、不易形变的特点，选取65 Mn材质的钢材作为原料，此种钢材的部分物理特性如表4所示。

表4 脱粒刀材料物理特性

Tab. 4 Physical properties of threshing knife material

参数	材料	密度/(kg·mm^{-3})	弹性模型/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	许用应力/MPa
数值/形式	65Mn	7.28×10^{-6}	210	0.28	230	286.73

导入建立好的模型，进行编辑，如图8所示。进入操作界面后，点击选用Static Structural模块，并以Metric作为整个分析过程的基本单位，进行切削刀具静力学分析。



图8 脱粒刀模型

Fig. 8 Thread-knife model

对脱粒刀选用默认的四面体网格划分，单元数为4 147，节点数为9 070，划分完的网格如图9所示。

对于整个脱粒刀具，由于用螺栓铰接在滚筒内壁上，在进行脱粒作业时，可以假设对刀片铰接处施加一个无摩擦的约束，而刀头的刃尖部位，受到一个进行脱粒的鲜食玉米果穗的作用力，这个情况比较复杂。参考文献[19]，当鲜食玉米籽粒含水率为64.96%时，在切削

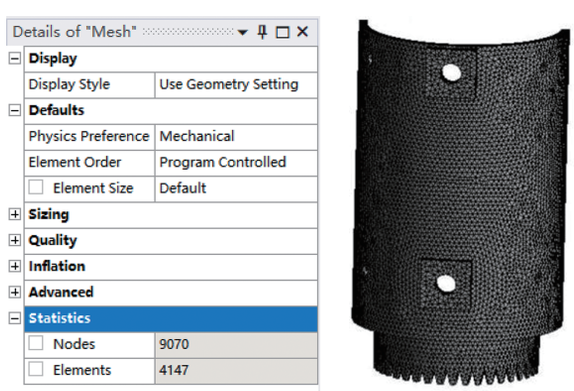


图9 脱粒刀网格划分

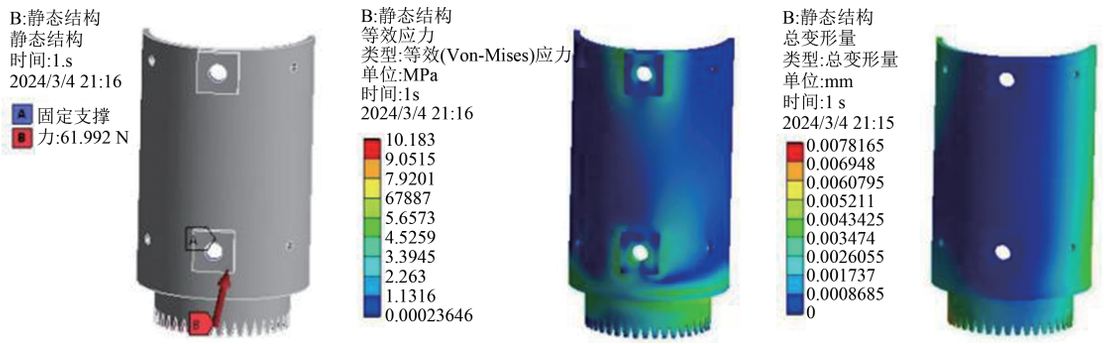
Fig. 9 Grid division of threshing knife

脱粒的过程中，进行脱粒处理的鲜食玉米果穗与切削刀具作用力是一对相互作用力，所以切削刀刃需要的轴向剪切力取60.8 N，径向剪切力取12.1 N，其合力取值约为61.99 N，如图10所示。

3.3.2 脱粒刀具模态分析

模态分析通过利用有限元分析计算，对脱粒刀具的固有频率进行分析，可以了解脱粒刀具在不同模态下的振动特性，为结构系统的振动特性分析优化设计提供依据，从而优化设计尺寸，减小结构质量。

在脱粒刀具上添加载荷后，通过应用ANSYS



(a) 约束与载荷　　(b) 应力　　(c) 位移

图 10　脱粒刀具静力学分析

Fig. 10　Static analysis of threshing tool

workbench 程序对刀具进行了模态分析，得到了相应的结果，6 阶固有频率见表 5，6 阶振型结果见图 11。

表 5　脱粒刀具 6 阶固有频率

Tab. 5　Order six natural frequencies of threshing tools　Hz

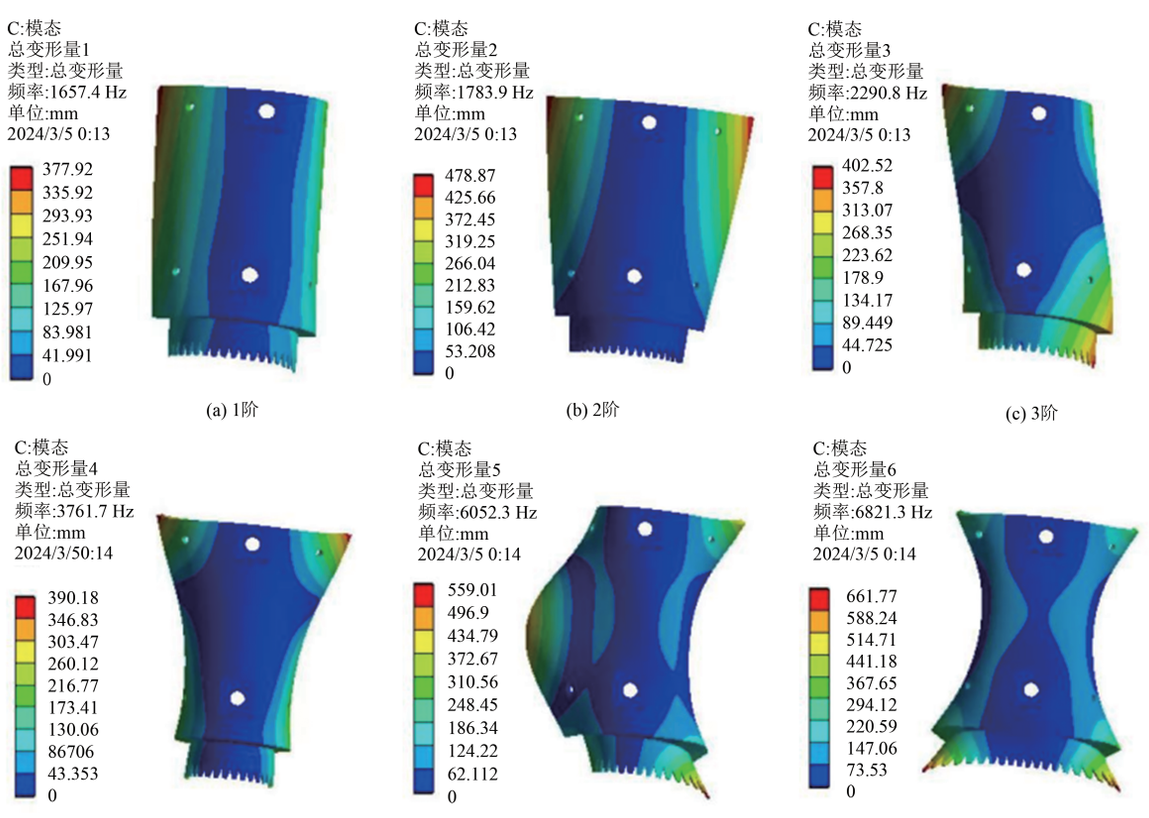
阶次	固有频率
1	1 657.4
2	1 783.9
3	2 290.8
4	3 761.7
5	6 052.3
6	6 821.3

通过对核心脱粒刀具的静力学及模态分析，结果表明，刀具受到的最大应力来自于刀头，应力为 10.2 MPa。最大形变位置为刃尖处，形变量为 0.01 mm；最小固有频率为 1 657.4 Hz，远大于外动力源的机振频率，作业过程中不会出现共振现象。

4　脱粒性能试验

4.1　试验材料与设备

试验选用的玉米品种为花超甜玉米果穗，于 2024 年 5 月下旬采收，果穗呈长锥形，平均穗径 40.5 mm 左右，穗长 220 mm 左右，含秃尖。选取穗大饱满、籽粒表面无损伤、无虫害的样品，籽粒为黄白相间，利用干燥法测定样品玉米籽粒含水率，经测定含水率为 63% 左右[27-30]。试验现场如图 12 所示。



(a) 1阶　　(b) 2阶　　(c) 3阶

(d) 4阶　　(e) 5阶　　(f) 6阶

图 11　脱粒刀具的 6 阶模态振型结果

Fig. 12　Six order mode vibration results of threshing tool



图12 花超甜果穗脱粒试验现场

Fig. 12 Test site of super sweet flower ear threshing

4.2 试验方法

轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置试验台旨在考察脱粒性能，目前，针对鲜食玉米果穗脱粒尚无国家标准，本文参照低含水率玉米果穗收获的国家标准GB/T 21961—2008《玉米收获机械 试验方法》[31]和GB/T 21962—2020《玉米收获机械 技术条件》[32]，选择籽粒破损率Y_1和果穗未脱净率Y_2作为试验评价指标，计算公式为

$$Y_1 = \frac{W_s}{W_i} \times 100\% \tag{4}$$

$$Y_2 = \frac{W_w}{W_z} \times 100\% \tag{5}$$

式中 W_s——破碎籽粒质量，kg

W_i——籽粒总质量，kg

W_w——未脱净籽粒质量，kg

W_z——脱出玉米籽粒总质量，kg

4.3 试验设计

4.3.1 单因素试验

根据前期已开展的单因素试验，确定滚筒转速为86.5~128.5 r/min、陀螺转速为213~297 r/min、转轴轴距为46~56 mm[33]。

4.3.2 正交试验

依据Central composite design试验设计原则，选取对籽粒破损率、果穗未脱净率影响较大的3个因素：滚筒转速、陀螺转速、转轴轴距，采用三因素五水平正交旋转组合进行试验[34-37]。采用响应面软件Design-Expert 10.0.3进行试验，得到最佳籽粒破损率、果穗未脱净率条件，脱粒试验因素编码见表6。

4.4 试验结果分析

4.4.1 响应面设计及结果

通过Design-Expert 10.0.3数据处理软件，将各因素数据输入Central composite design数据分析软件中，正交试验设计与结果见表7，A、B、C为因素编码值。

表6 脱粒试验因素编码

Tab. 6 Code of threshing assay factors

编码	因素		
	滚筒转速x_1/(r·min^{-1})	陀螺辊转速x_2/(r·min^{-1})	转轴轴距x_3/mm
−1.682	86.5	213.0	46.0
−1	95.0	232.0	47.5
0	107.5	255.0	51.0
1	120.0	278.0	54.5
1.682	128.5	297.0	56.0

表7 正交试验设计与结果

Tab .7 Orthogonal test design and results

试验号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	A	B	C		
1	−1	−1	−1	6.08	4.63
2	1	−1	−1	6.02	4.68
3	−1	1	−1	5.49	4.26
4	1	1	−1	5.46	4.21
5	−1	−1	1	4.89	4.55
6	1	−1	1	5.63	4.05
7	−1	1	1	4.83	5.31
8	1	1	1	5.46	4.65
9	−1.682	0	0	5.75	4.92
10	1.682	0	0	6.11	4.38
11	0	−1.682	0	5.69	4.51
12	0	1.682	0	5.15	4.67
13	0	0	−1.682	5.76	4.43
14	0	0	1.682	5.04	4.79
15	0	0	0	5.11	4.38
16	0	0	0	5.16	4.38
17	0	0	0	5.12	4.43
18	0	0	0	4.95	4.49
19	0	0	0	5.13	4.38
20	0	0	0	4.92	4.39
21	0	0	0	5.09	4.49
22	0	0	0	5.14	4.52
23	0	0	0	4.89	4.38

4.4.2 回归分析

运用Design-Expert 10.0.3数据分析软件对试验数据进行多元回归拟合，回归模型系数及显著性检验结果见表8、9，得到二次多项回归模型为

$$Y_1 = 5.06+0.14A-0.17B-0.25C-0.01AB+0.18AC+0.11BC+0.28A^2+0.1B^2+0.094C^2 \tag{6}$$

$$Y_2 = 4.43-0.15A+0.058B+0.1C-0.033AB-0.15AC+0.27BC+0.061A^2+0.04B^2+0.047C^2 \tag{7}$$

从表8可以看出，该回归模型$P<0.000\ 1$（极显著），其失拟项$P=0.292\ 0>0.05$（不显著），说明模型拟合程度良好，可以对回归方程相应回归值进行预测，模型决定系数$R^2=0.952\ 4$，调节后$R^2=0.919\ 4$（大于0.800 0），表明

表 8　籽粒破损率回归分析

Tab. 8　Regression analysis of grain breakage rate

来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.43	9	0.38	28.88	< 0.000 1**
A	0.26	1	0.26	19.71	0.000 7**
B	0.38	1	0.38	29.03	0.000 1**
C	0.87	1	0.87	66.02	< 0.000 1**
AB	0.000 8	1	0.000 8	0.061	0.809 4
AC	0.27	1	0.27	20.17	0.000 6**
BC	0.11	1	0.11	8.01	0.014 2*
A^2	1.26	1	1.26	95.17	< 0.000 1**
B^2	0.16	1	0.16	12.26	0.003 9**
C^2	0.14	1	0.14	10.6	0.006 3**
残差	0.17	13	0.013		
失拟项	0.083	5	0.017	1.49	0.292 0
纯误差	0.089	8	0.011		
总和	3.61	22			

注：**为极显著（P<0.01），*为显著（P<0.05）。下同。

表 9　果穗未脱净率回归分析

Tab. 9　Regression analysis of maize ear uncleaned rate

来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.4	9	0.16	38.28	< 0.000 1**
A	0.31	1	0.31	77.11	< 0.000 1**
B	0.046	1	0.046	11.22	0.005 2**
C	0.14	1	0.14	34.60	< 0.000 1**
AB	0.008 45	1	0.008 45	2.08	0.172 9
AC	0.17	1	0.17	41.41	< 0.000 1**
BC	0.6	1	0.6	148.95	< 0.000 1**
A^2	0.06	1	0.06	14.65	0.002 1**
B^2	0.025	1	0.025	6.26	0.026 5*
C^2	0.035	1	0.035	8.66	0.011 4*
残差	0.053	13	4.06×10^{-3}		
失拟项	0.026	5	5.20×10^{-3}	1.55	0.276 1
纯误差	0.027	8	3.35×10^{-3}		
总和	1.45	22			

91.94%的数据可用该模型解释，说明方程可靠性较高。

从表 8 可以看出，一次项滚筒转速、转轴轴距、陀螺辊转速对籽粒破损率具有极显著影响（P<0.01），各因素的主效应关系为 C>B>A。其二次项交互作用 AC 对籽粒破损率具有极显著影响（P<0.01），BC 对籽粒破损率具有显著影响（P<0.05），AB 对籽粒破损率影响不显著（P>0.05）。

从表 9 可以看出，该回归模型 P<0.000 1（极显著），其失拟项 P=0.271 6>0.05（不显著），说明模型拟合程度良好，可以对回归方程相应回归值进行预测，模型决定系数 R^2=0.963 6，调节后的 R^2=0.938 5，表明 93.85% 的数据可用该模型解释，说明方程可靠性较高。

从表 9 可以看出，一次项滚筒转速、转轴轴距、陀螺辊转速对果穗未脱净率具有极显著影响（P<0.01），各因素主效应关系为 A>C>B。其二次项交互作用 AC、BC 对果穗未脱净率具有极显著影响（P<0.01），AB 对果穗未脱净率的影响不显著（P>0.05）。

4.4.3　响应曲面分析

如图 13a 所示，籽粒破损率随滚筒转速增加呈先降低后增加趋势，籽粒破损率随陀螺转速增加呈降低趋势，仅考虑二者交互作用的情况下，当滚筒转速为 100~110 r/min、陀螺辊转速为 270~280 r/min 时，籽粒破损率较小。如图 13b 所示，当转轴轴距较小时，籽粒破损率随滚筒转速的增加呈先降低后增加趋势，当转轴轴距较大时，籽粒破损率的变化坡度随滚筒转速的增加呈先平缓后增加趋势，当滚筒转速较小时，籽粒破损率随转轴轴距增加呈降低趋势，当滚筒转速较大时，籽粒破损率随转轴轴距的增加呈先降低后平缓趋势，由此说明滚筒转速和转轴轴距二者之间存在显著的交互作用，仅考虑二者交互作用的情况下，当滚筒转速为 95~110 r/min、转轴轴距为 51~54 mm 时，籽粒破损率较小。如图 13c 所示，随着转轴轴距增加籽粒破损率呈降低趋势，当转轴轴距较小时，随着陀螺辊转速增加呈降低趋势，当转轴轴距较大时，随着陀螺辊转速增加呈先降低后平缓趋势，由此说明陀螺辊转速和转轴轴距之间存在显著的交互作用，仅考虑二者交互作用的情况下，当陀螺辊转速为 260~280 r/min、转轴轴距为 52~54 mm 时，籽粒破损率较小。

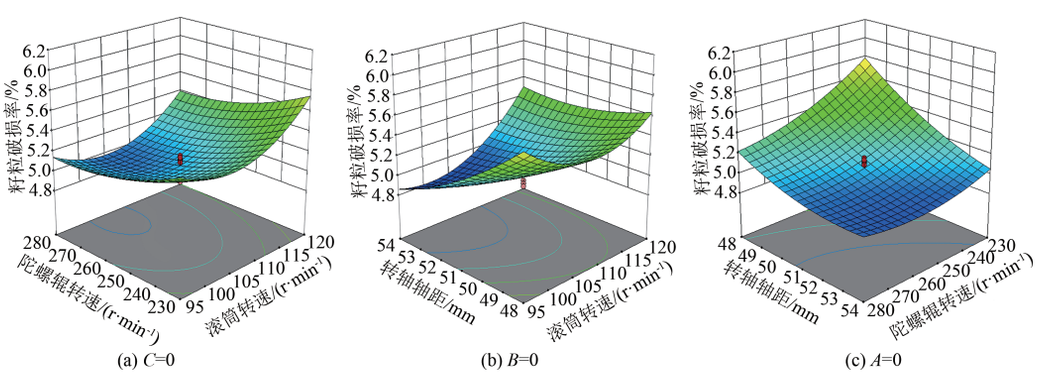


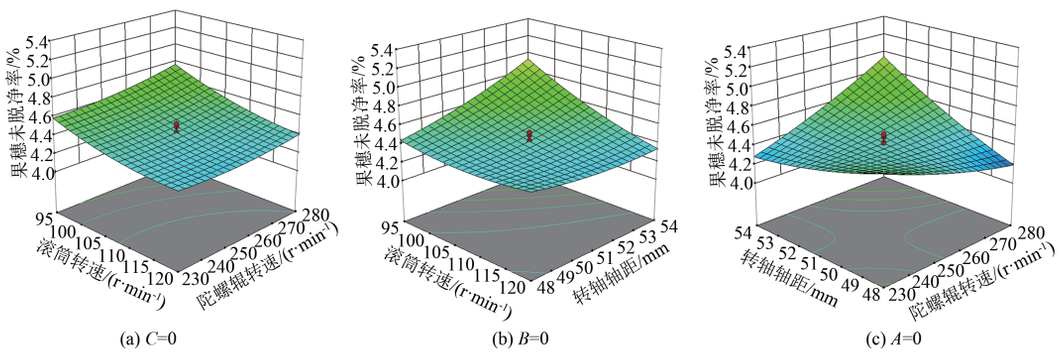
图 13　因素交互作用对籽粒破损率影响的响应曲面

Fig. 13　Factor interaction effects on grain breakage rate response surfaces

图 13 通过三因素交互作用对籽粒破损率变化趋势的分析，确定了转轴轴距对籽粒破损率影响更为显著。主要是由于转轴轴距直接影响了陀螺辊对果穗产生的挤压力，如果轴距过大会出现陀螺辊夹持不住果穗的现

象，如果过小会对果穗造成严重的挤压损伤。面对不同品种果穗的大小差异，需时常对转轴轴距进行调节，但调节过程中较为不方便。因此，后期对于陀螺夹持辊装置需要进行进一步优化，增强其对果穗夹持的自适应性。

各因素交互作用对果穗未脱净率影响的响应曲面见图14。如图14a所示，随着滚筒转速的增加，果穗未脱净率呈降低趋势，果穗未脱净率的变化坡度随陀螺辊转速的增加呈先降低后缓慢增加趋势，仅考虑二者交互作用的情况下，当滚筒转速为110~120 r/min、陀螺辊转速为230~260 r/min时，果穗未脱净率较小。如图14b所示，当转轴轴距较小时，果穗未脱净率的变化坡度随滚筒转速的增加呈先降低后缓慢增加趋势，当转轴轴距较大时，果穗未脱净率的变化坡度随滚筒转速的增加呈降低趋势，当滚筒转速较低时，果穗未脱净率的变化坡度随转轴轴距的增加呈增加趋势，当滚筒转速较高时，果穗未脱净率的变化坡度随转轴轴距的增加呈先降低后平缓后降低趋势。当滚筒转速为110~120 r/min、转轴轴距为52~54 mm时，果穗未脱净率较小。如图14c所示，当陀螺辊转速较小时，果穗未脱净率随着转轴轴距的增加呈降低趋势，当陀螺辊转速较大时，果穗未脱净率随着转轴轴距的增加呈增加趋势，当转轴轴距较小时，果穗未脱净率随着陀螺转速的增加呈降低趋势，当转轴轴距较大时，果穗未脱净率随着陀螺转速的增加呈增加趋势，由此说明陀螺辊转速和转轴轴距之间存在显著的交互作用，仅考虑二者交互作用的情况下，当陀螺辊转速为230~250 r/min、转轴轴距为52~54 mm时，果穗未脱净率较小。



(a) C=0 (b) B=0 (c) A=0

图14 因素交互作用对果穗未脱净率影响的响应曲面

Fig. 14 Factor interaction effects on maize ear uncleaned rate response surface

图14通过三因素交互作用对果穗未脱净率变化趋势的分析，确定了滚筒转速对果穗未脱净率影响更为显著。可能原因是脱粒滚筒所连接的脱粒刀与籽粒和棒芯直接接触，直接影响了果穗的未脱净率。此外，由于果穗自身大小端直径差异的影响，脱粒刀在脱粒过程中处于一种边旋转、边变径的脱粒状态。当滚筒转速较高时，虽然果穗未脱净率降低，但是容易造成装置抖动，对脱粒效果产生一定的影响，后期需要对该装置结构布局进一步优化，以减轻这种抖动现象。

4.5 参数优化与试验验证

4.5.1 参数优化

根据鲜食玉米果穗脱粒试验结果，以获得最小籽粒破损率、最小果穗未脱净率为优化目标，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，目标函数和约束方程为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ 86.5\ \text{r/min} \leqslant x_1 \leqslant 128.5\ \text{r/min} \\ 213.0\ \text{r/min} \leqslant x_2 \leqslant 297.0\ \text{r/min} \\ 46.0\ \text{mm} \leqslant x_3 \leqslant 56.0\ \text{mm} \end{cases} \tag{8}$$

通过比对优化结果，得到预测的最优条件为：滚筒转速为106.630 r/min，陀螺辊转速230.001 r/min、转轴轴距为54.00 mm。

4.5.2 试验验证

为了方便实际操作，根据试验实际条件，将约束条件修正为滚筒转速106 r/min、陀螺辊转速230 r/min、转轴轴距54 mm，在此最优条件下经3次平行试验并求取平均值，获得实际籽粒破损率为(4.956±0.152)%、果穗未脱净率为(4.158±0.085)%，与预测值籽粒破损率5.033%、果穗未脱净率4.303%相差在5%范围内，证实了预测值和试验值之间的良好相关性，说明用响应面法优化得到的最佳加工工艺合理。

5 结论

(1)结合对鲜食玉米果穗的相关物理形态参数测试及力学特性研究，为轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置的关键运输、脱粒部件的尺寸设计提供理论依据。同时，根据果穗进自身的生长特性采用了包切的设计理念，设计了一种轴向滚筒式变径脱粒装置，实现高效脱粒。

(2)通过对核心脱粒刀具的静力学及模态分析，结果表明，刀具受到的最大应力来自于刀头，应力为10.2 MPa。最大形变位置为刃尖处，形变量为0.01 mm；最小固有频率为1 657.4 Hz，远大于外动力源的机振频率，作业过程中不会出现共振现象。

(3)利用Design-Expert软件设计了三因素五水平

正交旋转组合试验，确定了对籽粒破损率影响最大的因素为转轴轴距，对果穗未脱净率影响最大的因素为滚筒转速；根据回归方程模型，预测最优组合为：滚筒转速106.630 r/min、陀螺辊转速230.001 r/min、转轴轴距为54.00 mm。在此最优组合下根据实际工况开展验证试验，经3次平行试验得到实际籽粒破损率为(4.956±0.152)%、果穗未脱净率为(4.158±0.085)%，与预测值籽粒破损率5.033%、果穗未脱净率4.303%相差在5%范围内，与参数优化基本一致，满足鲜食玉米脱粒要求。

参　考　文　献

[1] 杨晨曦，周文期，周香艳，等. 控制玉米株高基因PHR1的基因克隆 [J]. 作物学报，2024，50 (1)：55－66.
YANG Chenxi，ZHOU Wenqi，ZHOU Xiangyan，et al. Mapping and cloning of plant height gene PHR1 in maize [J]. Acta Agronomica Sinica，2024，50 (1)：55－66.(in Chinese)

[2] MORE G P，THAKRE M S，KHODKE U S . Quality assessment of microwave blanched sweet corn kernels [J]. International Journal of Agricultural Engineering，2018，11 (1)：164－167.

[3] SZYMANEK M . Evaluation of quantitative and qualitative losses of the cutting process for sweet corn kernels [J]. Applied Engineering in Agriculture，2008，24 (5)：559－563.

[4] LI Ziqi，HONG Tiannuo，ZHAO Zhenyu，et al. Fatty acid profiles and nutritional evaluation of fresh sweet-waxy corn from three regions of China [J]. Foods，2022，11 (17)：2636.

[5] 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.

[6] GENG Ningning，LI Ying，ZHANG Yan，et al. Effects of modified dietary fiber from fresh corn bracts on obesity and intestinal microbiota in high-fat-diet mice[J]. Molecules，2023，28 (13)：4949.

[7] 王飞，阿力木·买买提吐尔逊，张俊三，等. 玉米籽粒收获机组合筛面预筛分式清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55 (5)：135－147，166.
WANG Fei，ALIMU Maimaitituersun，ZHANG Junsan，et al. Design and experiment of pre-screening cleaning device for combined screen surface of corn grain harvester[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55 (5)：135－147，166.(in Chinese)

[8] CHEN Jianjian，ZHANG Hui，BIAN Yunlong，et al. Construction of remote sensing model of fresh corn biomass based on neural network [J]. Computational Intelligence and Neuroscience，2022，2022：2844563.

[9] 王天元. 切削式鲜食玉米脱粒机构的设计与试验[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2020.
WANG Tianyuan. Design and experiment of cutting fresh corn threshing mechanism[D].Harbin：Northeast Agricultural University，2020.(in Chinese)

[10] 张莉，林诚育，侯国珍，等. 高含水率玉米仿生脱粒元件设计与试验[J].农机化研究，2021，43(2)：126－131.
ZHANG Li，LIN Chengyu，HOU Guozhen，et al. Design and experiment of bionic threshing part for high moisture content corn [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2021，43 (2)：126－131.(in Chinese)

[11] 方会敏，牛萌萌，史嵩，等. 机械收获方式及籽粒含水率对玉米收获质量的影响[J]. 农业工程学报，2019，35(18)：11－18.
FANG Huimin，NIU Mengmeng，SHI Song，et al. Effect of harvesting methods and grain moisture content on maize harvesting quality[J]. Transactions of the CSAE，2019，35 (18)：11－18.(in Chinese)

[12] WILLIAMS M M . Few crop traits accurately predict variables important to productivity of processing sweet corn [J]. Field Crops Research，2014，157：20－26.

[13] SZYMANEK M，TANAS M，PIASECKI J，et al. Evaluation of the threshing units type in view of the quality of sweet corn kernels[J]. Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture，2015，15(1)：71－74.

[14] 陈桂祥. GT6A22甜玉米脱粒机[J].轻工机械，1987(4)：37－38，68.
CHEN Guixiang. GT6A22 sweet corn thresher [J]. Light Industry Machinery，1987(4)：37－38，68.(in Chinese)

[15] 张旦闻，王大力. LD-I型甜玉米脱粒机的研制 [J].洛阳大学学报，2000，15 (2)：31－33.
ZHANG Danweng，WANG Dali. The manufacture of model LD-I sweet corn thresher [J]. Journal of Luoyang University，2000，15(2)：31－33.(in Chinese)

[16] 何晓鹏. 人工喂入式鲜食甜玉米籽粒切脱机的研制[J].农业工程学报，2006，22(4)：99－102.
HE Xiaopeng. Research and manufacture of electric manually fed sweet corn cutter[J]. Transactions of the CSAE，2006，22(4)：99－102.(in Chinese)

[17] 周福君，和嘉雨，王天元，等. 切削式鲜食玉米柔性脱粒装置设计与试验[J].农机化研究，2022，44(8)：151－158.
ZHOU Fujun，HE Jiayu，WANG Tianyuan，et al. Design and test of flexible threshing device for cutting fresh corn[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2022，44 (8)：151－158.(in Chinese)

[18] 赵旭志，吴瑶瑶. 鲜食玉米收获机关键部件设计[J].农业工程，2023，13(3)：97－101.
ZHAO Xuzhi，WU Yaoyao. Design on key components of fresh corn harvester[J]. Agricultural Engineering，2023，13 (3)：97－101.(in Chinese)

[19] 高朋飞,张新伟,易克传,等.鲜食玉米果穗的物理力学特性[J].安徽科技学院学报,2024,38(2):95-102.
GAO Pengfei, ZHANG Xinwei, YI Kechuan, et al. Physical and mechanical properties of fresh corn fruit ears [J]. Journal of Anhui Science and Technology University , 2024, 38(2): 95-102.(in Chinese)
[20] 官晓东.鲜食玉米果穗收获低损除杂装置的设计及机理研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2024.
GUAN Xiaodong. Design and mechanism of low loss debris removal device for fresh corn ears harvesting [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2024.(in Chinese)
[21] 马俊.玉米果穗物理力学性质分析及脱粒过程仿真研究[D].长春:吉林大学,2015.
MA Jun. The physical and mechanical property analysis of corn ears and simulation research of corn threshing progress[D]. Changchun: Jilin University, 2015.(in Chinese)
[22] 余吉洋.玉米果穗物理力学性质的测试研究[D].长春:吉林大学,2014.
YU Jiyang.Measurement and analysis of the physical and mechanical properties of corn ears[D]. Changchun: Jilin University, 2014.(in Chinese)
[23] 李心平,熊师,耿令新,等.含水率对玉米果穗抗压特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(2):25-31.
LI Xinping, XIONG Shi, GENG Lingxin, et al. Influence of water content on anti-pressing properties of corn ear [J]. Transactions of the CSAE, 2018,34 (2): 25-31.(in Chinese)
[24] RAJAPPAN R, VIVEKANANDHAN M. Static and modal analysis of chassis by using Fea[J]. The International Journal of Engineering and Science, 2013, 2(2): 63-73.
[25] 蔡龙鹏,张克平,孙步功,等.基于ANSYS Workbench的苜蓿压扁辊静力学及模态分析[J].农机化研究,2021,43(5):28-34.
CAI Longpeng, ZHANG Keping, SUN Bugong, et al. Statics and mode analysis of alfalfa flattening roller based on ANSYS Workbench [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 28-34.(in Chinese)
[26] 牛浩,王震涛,唐玉荣,等.基于ANSYS的残膜回收机提土筛膜组件机架静力学及模态分析[J].中国农机化学报,2019,40(12):190-195.
NIU Hao, WANG Zhentao, TANG Yurong, et al. Statics and mode analysis of the frame of soil-lifting screen membrane component for residual-film recycling machine based on ANSYS [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 190-195.(in Chinese)
[27] YAO L,ZHANG Y,QIAO Y , et al. A comparative evaluation of nutritional characteristics, physical properties, and volatile profiles of sweet corn subjected to different drying methods [J]. Cereal Chemistry, 2021, 99 (2): 405-420.
[28] 安晓飞,代均益,罗长海,等.基于介电特性的联合收获机小麦含水率检测装置研究[J].农业机械学报,2022,53(增刊1):185-190.
AN Xiaofei, DAI Junyi, LUO Changhai, et al. Development of grain moisture detection device on combine harvester based on dielectric property[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53 (Supp. 1): 185-190.(in Chinese)
[29] 廉孟茹,张淑娟,任锐,等.基于高光谱技术的鲜食水果玉米含水率无损检测[J].食品与机械,2021,37(9):127-132.
LIAN Mengru, ZHANG Shujuan, REN Rui, et al. Nondestructive detection of moisture content in fresh fruit corn based on hyperspectral technology [J].Food & Machinery, 2021,37 (9): 127-132.(in Chinese)
[30] 潘阳,曹川.不同干燥方式对鲜食甜玉米粒品质的影响 [J].安徽师范大学学报(自然科学版), 2023, 46 (6): 550-554.
PAN Yang, CAO Chuan. Effect of different drying methods on the quality of fresh sweet corn kernels [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science Edition), 2023,46(6): 550-554.(in Chinese)
[31] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 21961-2008玉米收获机械 试验方法[S].北京:中国标准出版社,2008.
[32] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 21962-2008玉米收获机械 技术条件[S].北京:中国标准出版社,2008.
[33] 高朋飞,张新伟,易克传,等.鲜食玉米脱粒机的设计与试验 [J].黑龙江工业学院学报(综合版), 2024, 24 (6): 137-145.
GAO Pengfei, ZHANG Xinwei, Yi Kechuan, et al. Design and test of the fresh corn thresher [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology (Comprehensive Edition), 2024,24 (6): 137-145.(in Chinese)
[34] 陈建林,梁学强,刘旭,等.鲜食玉米机械化脱粒效果影响因素[J].农业工程,2014,4(1):10-13,16.
CHEN Jianlin, LIANG Xueqiang, LIU Xu, et al. Influence factors of mechanical threshing effect about fresh corn [J]. Agricultural Engineering, 2014,4 (1):10-13,16.(in Chinese)
[35] 葛宜元,梁秋艳,王桂莲.试验设计方法Design-Expert软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.
[36] WU H . Application of orthogonal experimental design for the automatic software testing [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2560 (347-350): 812-818.
[37] BROOK J R ,ARNOLD C G . Applied regression analysis and experimental design[M]. CRC Press: 2018.