



马秋成,陈强,卢安舸,等.核桃定向破壳装置设计及试验[J].江西农业大学学报,2022,44(2):473-485.

MA Q C,CHEN Q,LU A G,et al.Design and test of walnut directional shell breaking device[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(2):473-485.

核桃定向破壳装置设计及试验

马秋成,陈强,卢安舸,庄自云,刘健,曹允盛

(湘潭大学 机械工程学院,湖南 湘潭 411105)

摘要:【目的】核桃破壳是核桃加工过程中的重要工序,针对现有核桃破壳方法因随机运动而导致碎仁率高的问题,基于核桃的外形特征和力学特性提出一种采用振动调姿定向破壳方法,并开展试验研究,以提高核桃的破壳质量。【方法】以云南大姚 103 核桃为研究样本,测得了核桃的横径、纵径、棱径,以及沿 3 个方向的破壳力,核桃破壳时沿横径方向施力,不仅所需的破壳力小,而且碎仁率低。基于这一受力特征,设计了一种由皮带和压板组成的楔形定向破壳装置,并对核桃破壳过程中各瞬时进行力学分析,确定了影响破壳性能的主要因素。以破壳率、碎仁率为评价指标,采用单因素试验法,确定了皮带速度、弹簧刚度系数、压板倾角的选取范围;并以皮带速度、弹簧刚度系数、压板倾角为试验因素,开展了三因素三水平正交试验;以提高破壳率、降低碎仁率为目标,运用 Design-expert 软件对试验因素进行参数优化,获得了各因素的最优参数组合。【结果】基于所研制的定向破壳装置开展了定向破壳试验,结果表明:当皮带速度为 93 mm/s,弹簧刚度系数为 42 N/mm,压板倾角为 2.5° 时,破壳率为 97.2%,高路仁率 86.5%,碎仁率为 13.5%。【结论】提出的定向破壳方法可行,设计的破壳装置基本满足行业要求,相关研究成果可为核桃等坚果破壳机械的研发和改进提供参考。

关键词:农业机械;核桃;振动调姿;线性加载;破壳;正交实验

中图分类号:S664.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2022)02-0473-13

Design and Test of Walnut Directional Shell Breaking Device

MA Qiucheng, CHEN Qiang, LU Ange, ZHUANG Ziyun,
LIU Jian, CAO Yunsheng

(School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: [Objective] Walnut shell breaking is an important step in walnut processing, To solve the problem of high kernel crushing rate caused by random motion in the existing walnut shell crushing methods, this study proposes a directional shell crushing method using vibration adjustment posture and the experiment was conducted in order to improve the shell breaking quality of walnut. [Method] Taking Yunnan Dayao 103 walnut as the research sample, the transverse diameter, longitudinal diameter, prismatic diameter and shell crushing force along three directions were measured. The results showed that when the walnut shell was crushed by apply-

收稿日期:2021-10-28 修回日期:2022-01-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52175255)和湖南省自然科学基金项目(2020JJ6036)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52175255)and the National Natural Science Foundation of Hunan Province(2020JJ6036)

作者简介:马秋成,教授,博士生导师,主要从事数字化设计与制造、农产品加工技术研究,orcid.org/0000-0003-0523-7894,mqc@xtu.edu.cn。

ing the force along the transverse diameter direction, the required less shell crushing force was less, the rate of broken kernel was also low. Based on this finding, a wedge-shaped directional shell crushing device composed of belt and pressing plate was designed. The mechanical analysis of each instantaneous in the process of walnut shell crushing was implemented, and the main factors affecting the shell crushing performance were determined. The selection range of belt speed, spring stiffness coefficient and pressing plate inclination angle were determined by using single factor test method with shell crushing rate and kernel crushing rate as evaluation indexes; Selecting belt speed, spring stiffness coefficient and pressing plate inclination angle as test factors, three factor and three level orthogonal tests were conducted; In order to improve the shell crushing rate and reduce the kernel crushing rate, the parameters of the test factors were optimized by using design expert software, and the optimal parameter combination of each factor was obtained. [Result] Based on the directional shell crushing device introduced in this study, the directional shell crushing tests were conducted. The results showed that when the belt speed was 93 mm/s, the spring stiffness coefficient was 42 N/mm, and the pressing plate inclination angle was 2.5° , the shell crushing rate was 97.2%, the high kernel rate was 86.5%, and the kernel crushing rate was 13.5%. [Conclusion] The proposed directional shell breaking method was feasible, and the designed shell breaking device basically met the industry requirements. The relevant research results could provide a reference for the R & D and improvement of walnut and other nut shell breaking machinery.

Keywords: agricultural machinery; walnut; vibration adjustment posture; linear loading; crushed shell; orthogonal experiment

【研究意义】核桃是一种传统的营养食品,含锌、锰、铬等对人体有益的微量元素^[1]。基于核桃的经济价值,核桃在我国云南、新疆等地广泛种植,已成为西部地区乡村振兴重要的经济作物,目前,我国核桃种植面积和产量均位居世界前列^[2]。核桃属于坚果,在食用之前需将其外壳去除,核桃破壳是核桃生产中的重要工序。由于核桃大小不同、形状不规则,且其外壳坚硬,在其破壳取仁过程中,容易造成核桃仁破碎而降低其品质。为保证核桃仁完整,长期以来,核桃破壳采用手工作业。这种生产方式,工作效率低、劳动强度大,随着我国农村剩余劳动力的减少,核桃机械破壳已成为核桃加工业发展的必然方向^[3-5]。【前人研究进展】为实现核桃破壳的机械化和自动化,国内外学者进行了相关研究。目前,核桃破壳方法主要有挤压、撞击、揉搓等^[6-11],这些方法均是利用破壳部件与核桃之间的相互作用使核桃外壳破裂。王维等^[12]研制的锥篮式破壳机,将核桃置于动筒与定筒所形成的锥形空间,利用动筒的旋转对核桃进行挤压破壳;刘海江等^[13]研制的漾濞核桃定向破壳设备,通过主轴带动传动机构做上下往复运动,利用与传动机构联接的压头对核桃施加载荷进行破壳;郑霞等^[14]研制的揉搓式核桃破壳取仁装置,利用挤压轮之间的挤压使核桃破壳,然后再利用两个速度不同的工作带之间形成的剪切力使核桃脱壳。【本研究切入点】上述核桃破壳方法,均为固定通道破壳,只适合一定尺寸的核桃。为满足不同大小核桃的破壳要求,需要在破壳前对核桃按尺寸大小进行筛选分级,然后对不同大小的核桃,用不同参数的破壳设备加工。筛选分级不仅增加了生产工序,而且还会因为筛选分级存在的误差而影响破壳质量。另外,由于核桃形状不规则,现有核桃破壳方法,核桃在破壳工具之间的运动是随机的、容易造成核桃仁破碎。【拟解决的关键问题】为解决核桃在破壳过程需要筛选分级的问题,并防止核桃在破壳过程中作随机运动而引起核桃仁破碎,本文基于核桃的外形特征和力学特性,并参考人工破壳时的施力方向,提出一种核桃定向破壳方法。该方法首先通过直线振动器调整核桃姿态,使核桃在进入破壳工位前其轴线与运动方向垂直,然后采用一种由皮带与压板机构组合而成的破壳装置,保证核桃在破壳过程中所受到的破壳力随核桃的大小不同自动调整。设计了定向破壳试验装置,对该方法的相关工艺参数对破壳率、高路仁率和碎仁率的影响开展了试验研究。所研究的方法及获得的参数,对核桃破壳设备研发具有一定的参考价值。

1 核桃外廓尺寸及破壳力测试

1.1 试验材料

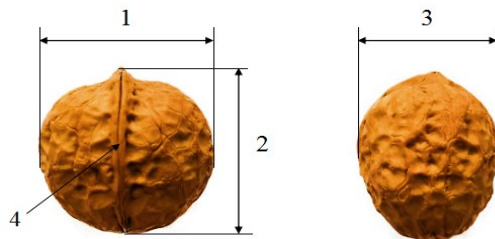
本文选择云南省楚雄州种植的大姚103核桃为试验对象。试验中,随机选取无明显残次且含水率 $\leq 10\%$ 的核桃作为试验样本。

1.2 外廓尺寸测量

核桃外廓尺寸测量工具选用游标卡尺,所测量的外廓尺寸包括横径、纵径、棱径,如图1所示。测量时,每个方向测量3次,取其平均值作为测量结果。对200颗核桃样本的测量结果进行数据分析和统计,其结果如表1所示。

1.3 破壳力与破壳位移

破壳力和破壳位移测试采用电子万能试验机(型号:UTM4204X),如图2所示。试验时,分别沿核桃横径、纵径、棱径3个方向对核桃进行静态加载试验,获得核桃在不同方向上的压缩力学性能参数。测试时,先线性加载,当载荷加大到核桃壳破裂、并出现载荷突变时,记录其最大载荷作为核桃的破壳力,此时的位移为破壳位移,并观察记录外壳破裂后核桃仁的损伤情况,计算不同加载方向的碎仁率。每个方向测量100个样本,所测数据的统计结果如表2所示。

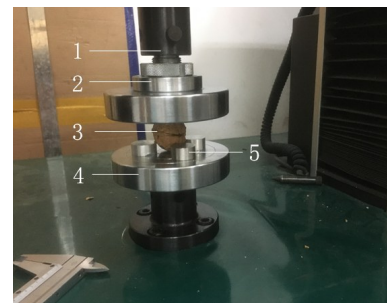


1:横径;2:纵径;3:棱径;4:中缝线。

1: Transverse diameter; 2: Longitudinal diameter;
3: Edge diameter; 4: Middle suture.

图1 核桃几何尺寸测量

Fig.1 Geometric dimension measurement drawing of walnut



1:立柱;2:传感器;3:核桃;4:底座;5:吸块。

1: Column; 2: Sensors; 3: Walnut; 4: Base;
5: Suction block.

图2 电子万能试验机

Fig.2 Electronic universal testing machine

表1 云南大姚103核桃尺寸分布

Tab.1 Size distribution of Yunnan Dayao 103 walnut

分布范围/mm Distribution	横径 Transverse diameter		纵径 Longitudinal diameter		棱径 Edge diameter	
	粒数/个 Number	百分率/% Percentage	粒数/个 Number	百分率/% Percentage	粒数/个 Number	百分率/% Percentage
	[24,30)	14	7	0	0	183
[30,35)	175	87.5	50	25	17	8.5
[35,40)	11	5.5	137	68.5	0	0
[40,45)	0	0	13	6.5	0	0
均值/mm Mean value	31.88		36.34		27.77	
最大值/mm Maximum	38.44		43.13		31.92	
最小值/mm Minimum	28.63		30.62		24.71	

1.4 测试结果分析

由表1可知,核桃横径、纵径的分布范围较宽,棱径的分布范围相对较窄;横径、纵径、棱径的均值分别为31.88,36.34,27.77 mm,其大小依次为纵径、横径、棱径。基于核桃棱径尺寸最小的这一形状特点,可知核桃在棱径方向上的质心位置最低,根据最小势能原理,核桃在受到外界扰动后更易以中缝线朝上的姿态静止在水平面上,因此,核桃在形状上具有定向破壳的基础。

由表2可知,核桃沿横径、纵径、棱径3个方向的破壳力均值分别为:134.01,165.46,142.60 N,其大小依次为纵径、棱径、横径。由此可以看出,沿横径方向施力,破壳力最小,更容易使核桃破壳;另外,在表2中,核桃沿横径、纵径、棱径3个方向静态加载的碎仁率分别为7%、20%、16%,可以看出,核桃沿横径方向加载时的碎仁率最低。基于核桃的内部结构,核桃两半仁的接合面与横径截面平行,沿横径方向施力,更容易保证核桃两半仁的完整。因此,核桃沿横径方向破壳,是核桃破壳的理想方向。

表2 云南大姚103核桃破壳力及破壳位移

Tab.2 Shell crushing force and shell crushing displacement Dayao 103 walnut

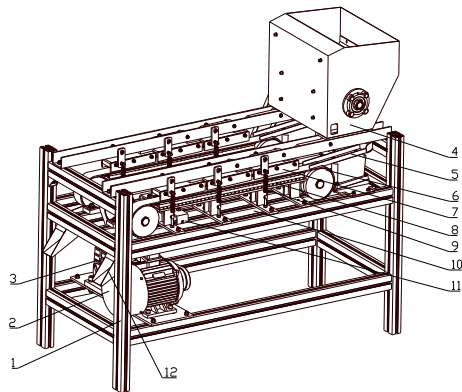
压缩方向 Compression direction	破壳力 Shell breaking force			破壳位移 Shell breaking displacement			碎仁率/% Broken kernel rate
	最大值/N Maximum	最小值/N Minimum	均值/N Mean value	最大值/N Maximum	最小值/N Minimum	均值/N Mean value	
	横径 Transverse diameter	164.23	106.83	134.01	3.90	2.95	
纵径 Longitudinal diameter	217.15	116.40	165.46	3.52	2.61	3.26	20
棱径 Edge diameter	233.89	111.05	142.60	4.08	3.33	3.70	16

2 定向破壳试验装置

2.1 试验装置结构

基于核桃的外形特征和破壳参数测量结果,为实现核桃能沿横径方向施力进行定向破壳,并满足不同大小核桃的破壳要求,本文设计了一种用于核桃定向破壳的试验装置,其整体结构如图3所示。试验装置由机架、送料装置、振动调姿装置、破壳装置和变频器等部分组成。

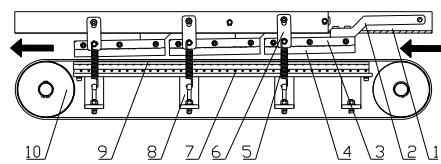
为满足不同大小核桃的破壳要求,破壳装置设计了三组压板,其与输送平带之间的间隙逐次减小,大的核桃前端在入口处破壳,小的核桃在后端狭窄处破壳,根据所测得的核桃棱径分散范围,确定两组压板机构的入口间隙差值为3 mm,保证不同大小的核桃均能进入破壳区域并完成破壳(图4)。



1:机架 2:电机;3:减速机;4:送料装置;5:振动调姿装置;6:带轮;
7:破壳装置;8:滚轮排;9:弹簧;10:皮带;11:张紧轮;12:出料斗。
1:Frame;2:Motor;3:Reducer;4:Feeding device;5:Vibration attitude adjustment device;6:Pulley;7:Shell breaking device;8:Roller row;9:Spring;10:Belt;11:Tensioning pulley;12:Discharge hopper.

图3 定向破壳试验装置整体结构

Fig.3 Overall structure of directional shell crushing test device



1:上支撑板;2:摆臂;3:压板;4:防护板;5:弹簧;6:限位片;7:滚轮排;8:支撑座;9:输送皮带;10:平带轮。
1:Upper support plate;2:Swing arm;3:Pressing plate;4:Protective plate;5:Spring;6:Stop plate;7:Roller row;8:Support seat;9:Conveyor belt;10:Flat pulley.

图4 破壳装置结构

Fig.4 Shell crushing device structure

2.2 破壳工作原理

核桃经由物料输送装置落入振动调姿装置中。基于最小势能原理,核桃在受到外界扰动后呈中缝线朝上的姿态。在直线振动器的激振作用下,核桃姿态得到调整,使核桃的中缝线与核桃的前进方向垂

直,通过皮带输送至破壳区域。核桃进入破壳工作区域后,其棱径与压板接触,如图5a所示,在皮带和压板的作用下,核桃发生翻滚,由于横径大于棱径,核桃在翻滚过程中,压板以铰接处为中心作平面旋转运动,此时弹簧伸长,施加给核桃的外力不断加大,当横径与压板接触时,如图5b所示,核桃所受外力最大,而横径为核桃受力薄弱部位。因此,只要设计好弹簧刚度参数,可使核桃所受外力大于破壳力而实现对核桃的破壳。当核桃继续前进时,在皮带和压板的揉搓作用下完成壳仁分离,如图5c所示。

以下分3个阶段对核桃破壳过程进行力学分析,如图5所示。

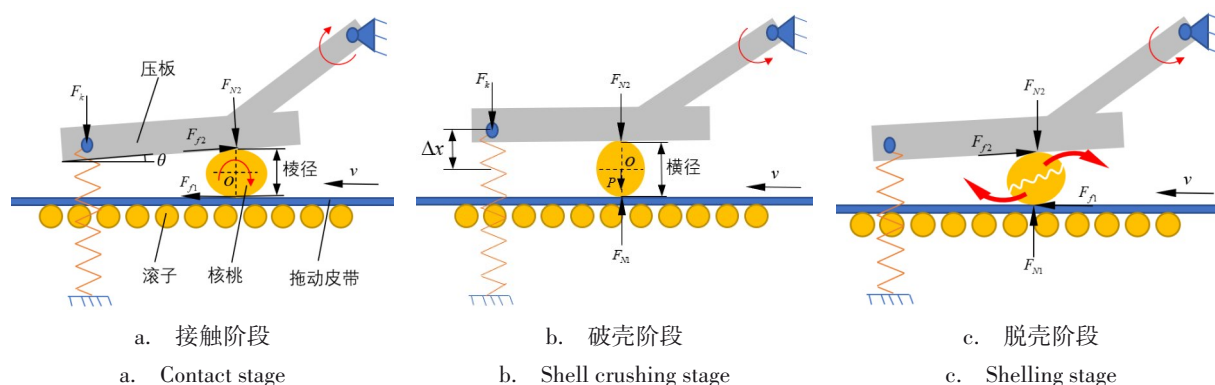


图5 破壳过程受力分析

Fig.5 Stress analysis diagram of shell crushing process

(1)接触阶段。如图5a所示。由于皮带具有弹性且由滚轮排支撑,核桃在楔形区域移动并与压板接触时会产生正压力和摩擦力,对核桃中心O点求矩,如式(1)。分析可知,此时核桃受到一个顺时针力矩,且压板与核桃之间的作用力 F_{N2} 小于核桃的破壳力,核桃在顺时针力矩和皮带摩擦力的作用下向皮带运动方向顺时针滚动。

$$\begin{cases} \sum M_o(F) = b \cdot F_{s_1} + b \cdot F_{s_2} \cos \theta \\ F_{s_1} = \mu_1 \cdot F_{N1} \\ F_{s_2} = \mu_2 \cdot F_{N2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\sum M_o(F)$ 核桃中心合力矩,N/mm; F_{N1} 皮带对核桃的作用力,N; F_{N2} 压板对核桃的作用力,N; F_{s1} 核桃受到皮带的摩擦力,N; F_{s2} 核桃受到压板的摩擦力,N; μ_1 核桃与皮带之间的摩擦因数, μ_2 核桃与压板之间的摩擦因数, b 核桃棱径尺寸的半值,mm; θ 压板倾角,(°)。

(2)破壳阶段。由于核桃的横径尺寸大于棱径尺寸,核桃在滚动过程中,弹簧被拉伸,压板施加给核桃的力不断增大,当所受外力大于核桃壳破力时,则核桃壳破裂,破壳瞬时的受力图如5b所示,对核桃进行受力分析,此时的受力情况如式(2)、(3)所示,分析可知,核桃的受力与破壳装置的压板倾角、弹簧的刚度系数有关。压板倾角 θ 越大,核桃受到的压力越大,越有利于破壳,但过大的倾角会使核桃受到的压力过大,可能会损伤核桃仁。当核桃外壳发生破裂时,若弹簧的伸长量过大,弹簧在恢复过程中会对核桃施加过大的力,对核桃仁造成损伤。因此,压板倾角与弹簧刚度系数均为影响破壳的关键因素。

$$\sum F_x = F_{s_1} + F_{s_2} \cos \theta - F_{N2} \sin \theta \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum F_y = F_{N1} - F_{N2} \cos \theta - F_{s2} \sin \theta - 2F_k - P \\ F_k = k \cdot \Delta x \\ P = mg \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\sum F_x$ 核桃在水平方向合力,N; $\sum F_y$ 核桃在竖直方向合力,N; P 核桃所受的重力,N; k 弹簧刚度系数,N/mm; m 核桃的质量,kg; Δx 弹簧伸长量,mm; F_k 施加给压板的弹簧力,N。

(3)脱壳阶段。核桃外壳破裂后,核桃自身所能承受的外力降低,压板回落,弹簧逐渐恢复原长,压板对核桃的压力逐渐变小,核桃继续在破壳区域内翻滚,如图5c所示。由断裂理论^[20]可知,当裂纹产生

后,交变力更易使裂纹扩展,在核桃滚动过程中,其受力方向不断变化,因此更易使裂纹扩展,有利于核桃壳仁分离。另外,受力方向变化也可避免核桃在一个方向过度受力而损伤核桃仁的情况。

理想的破壳过程为:核桃进入破壳区域,发生翻滚,在翻滚至横径方向时达到最大破壳力,外壳发生破裂,继续在皮带和压板的揉搓作用下完成破壳。

3 破壳装置关键参数确定

3.1 压板机构

压板机构是试验装置的关键机构,核桃在压板与皮带之间组成的楔形区域内完成破壳,压板两侧对称分布拉伸弹簧。压板机构与皮带组成的楔形破壳区域示意图如图 6 所示。

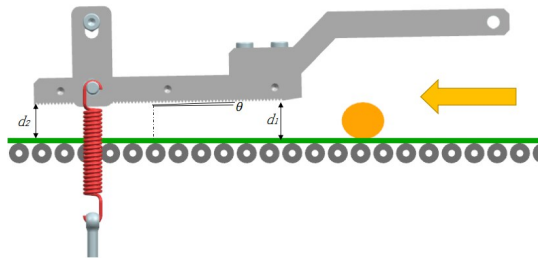


图 6 破壳区域示意图

Fig.6 Schematic diagram of shell crushing area

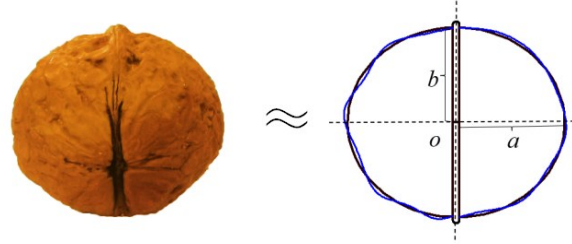


图 7 核桃破壳区域横径截面

Fig.7 Cross section of walnut shell crushing area

由图 6 可知,为保证核桃能顺利进入破壳区域,第一块压板前端与皮带的间隙 d_1 应大于核桃的棱径尺寸最大值 31.92 mm;为保证核桃能与压板接触,且避免在破壳完成后,压板的回落损伤核桃仁,第三块压板的末端与皮带的间隙 d_2 应不大于核桃棱径尺寸的最小值 24.71 mm,初步确定 $d_1 > d_2 > 24$ mm。

为确定压板的长度,将核桃横径截面看作一个类似椭圆,如图 7 所示,根据椭圆周长计算公式^[22],如式(4)、(5),估算出核桃横径截面周长。

$$\begin{cases} L = \pi(a + b) \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right) \frac{\lambda^{2n}}{(2n-1)^2} \right] \\ \lambda = \tau = \frac{a-b}{a+b} \end{cases} \quad (4)$$

$$n = \max \left\{ 1, \left\lceil \frac{\ln \varepsilon + \ln(1 - \tau^2) - \ln \frac{\pi(a+b)}{64}}{2 \ln \tau} \right\rceil \right\} \quad (5)$$

式中 L 核桃横径截面的周长, mm; a 核桃横径尺寸的半值, mm; b 核桃棱径尺寸的半值, mm; ε 误差值。

为保证核桃在翻滚的过程中,压板长度足够,以核桃横径尺寸与棱径尺寸的最大值为参考,计算核桃横径截面的周长最大值 L 。取 a 的值为 19.22 mm, b 的值为 15.96 mm, 误差 ε 为 10^{-5} , 带入式(5), 得出 $n=2$, 即在公式(4)中需取和式前两项即可满足误差要求, 计算得出核桃横径截面周长 $L \approx 110.7$ mm。考虑到核桃在破壳区非纯滚动情况, 并根据试验装置的整体布局, 确定压板长度为 200 mm。

3.2 输送装置

输送装置由电机、减速机、动力输入轴、张紧轮、轴承座等组成,如图 8 所示。动力由电机通过减速机输入,皮带下方设置有张紧轮,防止皮带打滑。皮带下方的滚轮可以在核桃破壳时,为皮带提供支撑力。核桃三径尺寸中,最大值为 43.13 mm,皮带的宽度设置为 50 mm。压板长度为 200 mm,一条皮带上布置三组压板机构,设置动力输入轴到从动轴的距离 H 为 785 mm。

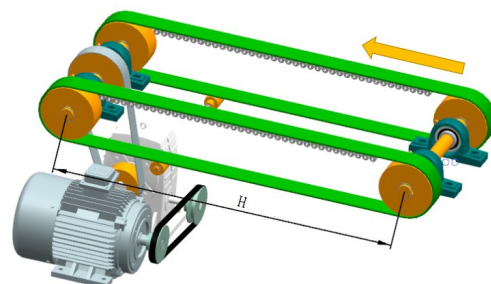


图 8 输送装置

Fig.8 Transportation device

4 定向破壳试验研究

4.1 试验条件

试验材料为完成脱青皮、晾晒工序的云南大姚103核桃。由于含水率较高的核桃在受力后呈弹性变形,不利于破壳^[23-24],故选取含水率 $\leq 10\%$ 的核桃作为试验样本。试验设备为自主研制的定向核桃破壳试验装置,该装置有两组破壳工位,如图9所示。该装置通过变频调速的方法,改变电机转速来获得不同的皮带速度;通过定制方法,获得不同刚度系数的弹簧;通过设置不同的支点位置,来获得不同倾角的压板。

4.2 评价指标

核桃破壳后,按核桃仁完整度的不同可分为:整仁、半仁、1/4仁、1/8仁和残仁。其中价值较高的整仁、半仁和1/4仁,为高路仁;1/8仁和残仁的价值较低,为碎仁^[25]。本文以破壳率与碎仁率作为衡量破壳效果的评价指标。按式(6)计算破壳率;按式(7)计算碎仁率。

$$y_1 = \frac{N + N_1}{N + N_1 + N_2} \times 100\% \quad (6)$$

$$y_2 = \frac{N_1}{N + N_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中 y_1 破壳率,%; y_2 碎仁率,%; N 高路仁质量,g; N_1 碎仁质量,g; N_2 未完成破壳核桃质量(将未完成破壳核桃人工去壳后称量),g。

4.3 单因素试验与结果分析

4.3.1 单因素试验设计 根据前述破壳原理分析,皮带速度、弹簧刚度系数和压板倾角是影响破壳效果的3个关键参数。以破壳率和碎仁率为评价指标,测试皮带速度(因素A)、弹簧刚度系数(因素B)、压板倾角(因素C)对破壳效果的影响。结合前期预试验,皮带速度的选取范围为50~130 mm/s;设计弹簧的刚度系数选取范围为24~56 N/mm;设计压板倾角的选取范围为 $1^\circ \sim 5^\circ$ 。

4.3.2 单因素试验结果与分析 (1)皮带速度。根据图10a(皮带速度对破壳率和碎仁率的影响)可知,随着皮带速度的增加,破壳率会有显著的提升,但皮带速度过大,碎仁率会有较大的增加。因为皮带速度过小时,核桃与压板机构接触之前本身动能较小,核桃在前进过程中会卡在破壳区域,无法破壳。而皮带速度过大时,过大的冲击力致使核桃整体碎裂。因此,皮带速度选取在70~110 mm/s,对破壳有利。

(2)弹簧刚度系数。根据图10b(弹簧刚度系数对破壳率和碎仁率的影响)可知,当弹簧刚度系数较小时,破壳率较低,随着弹簧刚度系数的增加,破壳率会有显著的提升,但弹簧刚度系数过大,碎仁率会有较大的增加。因为弹簧刚度较小时,核桃在破壳区域受到的外力小于其最大破壳力而无法破壳;但如果弹簧刚度太大,弹簧在恢复过程中会直接把核桃压碎,碎仁率显著增加。因此,弹簧刚度系数选取在32~48 N/mm,对破壳有利。

(3)压板倾角。根据图10c(压板倾角对破壳率和碎仁率的影响)可知,随着压板倾角的增加,破壳率逐渐增加,同时碎仁率也增加。因为压板倾角较小时,会出现尺寸较小的核桃通过破壳区域不与压板接触的情况,此时破壳率较低。当压板倾角较大时,核桃在破壳区域受到压板的压力较大,破壳率提升,但是也容易对核桃仁造成损伤。因此,压板倾角选择在 $2^\circ \sim 4^\circ$,对破壳有利。

4.4 正交试验设计及结果分析

4.4.1 正交试验设计 通过单因素试验得到了各因素对评价指标影响的显著范围,拟通过正交实验分析,获得破壳试验装置的最优工作参数及结构参数。3个试验因素的取值如表3所示,利用Design Expert 11软件进行试验设计,试验方案及结果如表4所示。

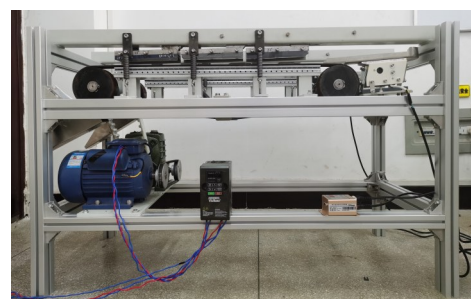
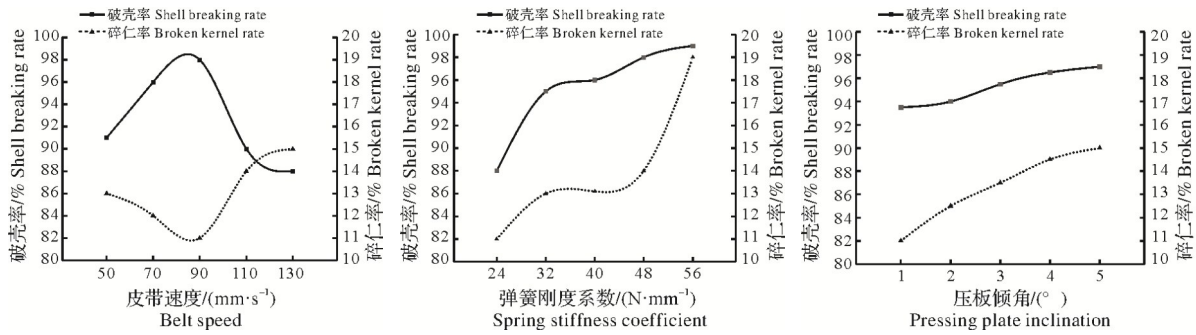


图9 核桃定向破壳试验装置

Fig.9 Walnut directional shell crushing test device



a. 皮带速度对破壳率、碎仁率的影响(弹簧刚度系数为 40 N/mm、压板倾角为 3°) b. 弹簧刚度系数对破壳率、碎仁率的影响(皮带速度为 90 mm/s、压板倾角为 3°) c. 压板倾角对破壳率、碎仁率的影响(皮带速度为 90 mm/s、弹簧刚度系数为 40 N/mm)

a. Effect of belt speed on shell breaking rate and kernel crushing rate (spring stiffness coefficient is 40 N/mm and pressing plate inclination angle is 3°) b. Effect of spring stiffness coefficient on shell breaking rate and kernel crushing rate (belt speed is 90 mm/s and pressing plate inclination is 3°) c. Effect of pressing plate inclination on shell breaking rate and kernel crushing rate (belt speed is 90 mm/s and spring stiffness coefficient is 40 N/mm)

图 10 单因素试验结果

Fig.10 Single factor test result

表 3 试验因素水平表

Tab.3 Test factor level table

水平 Level	皮带速度/(mm·s ⁻¹) Belt speed	弹簧刚度系数/(N·mm ⁻¹) Spring stiffness coefficient	压板倾角/(°) Plate inclination
-1	70	32	2
0	90	40	3
1	110	48	4

4.4.2 正交试验结果与分析 根据表 4 试验结果,分别得到破壳率、碎仁率的二次回归模型如式(8)、(9),并进行方差分析,分析结果如表 6、表 7。

表 4 核桃破壳正交实验结果

Tab.4 Orthogonal experiment results of walnut shell crushing

试验组 Test group	A	B	C	y ₁ /%	y ₂ /%
1	-1	-1	1	89.5	15.7
2	-1	1	1	95.8	16.3
3	-1	0	0	93.9	15.7
4	-1	-1	-1	91.3	13.9
5	-1	1	-1	96.4	17.7
6	0	0	1	93.8	16.8
7	0	-1	0	94.8	13.2
8	0	0	0	96.4	13.4
9	0	0	0	96.2	12.5
10	0	0	0	95.6	13.1
11	0	1	0	97.3	17.8
12	0	0	-1	95.4	13.4
13	1	-1	1	95.2	17.4
14	1	1	1	98.3	21.3
15	1	0	0	95.5	15.5
16	1	-1	-1	93.3	13.3
17	1	1	-1	96.3	17.5

表中 A 为皮带速度, B 为弹簧刚度系数, C 为压板倾角。

A is belt speed, B is spring stiffness coefficient, C is pressing plate inclination.

$$y_1 = 95.77 + 1.17A + 2B - 0.01C - 0.66AB - 0.79AC + 0.16BC - 0.83A^2 + 0.49B^2 - 0.96C^2 \quad (8)$$

$$y_2 = 13.8 + 0.57A + 1.71B + 1.17C + 0.46AB - 0.94AC - 0.43BC + 1.2A^2 + 1.1B^2 + 0.7C^2 \quad (9)$$

式中 A:皮带速度,mm/s;B:弹簧刚度系数,N/mm;C:压板倾角,(°)。

表 5 破壳率二次回归模型方差分析

Tab.5 Variance analysis of quadratic regression model of broken shell rate

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	P 值 P value
模型 Model	69.83	9	7.76	0.001 6*
A	13.69	1	13.69	0.002 3*
B	40	1	40	<0.000 1**
C	0.001	1	0.001	0.969 2
AB	3.51	1	3.51	0.049 6*
AC	4.96	1	4.96	0.025 9*
BC	0.21	1	0.21	0.579 2
A ²	1.96	1	1.96	0.119 7
B ²	0.65	1	0.65	0.340 1
C ²	2.45	1	2.45	0.088 3
残差 Residual	4.37	7	0.62	
失拟项 Lack of Fit	4.03	5	0.81	0.186 5
纯误差 Pure Error	0.35	2	0.17	
总和 Cor Total	74.2	16		

“**”表示极显著(P<0.01),“*”表示显著(P<0.05)。

“**” indicates extremely significant correlation(P<0.01)and significant correlation(P<0.05).

由表 5 可知,破壳二次回归模型 P 值为 0.001 6,小于 0.05,失拟项 P 值为 0.244 6,大于 0.05,说明模型显著,失拟项不显著,该回归模型的拟合程度高,不存在其他影响试验指标的主要因素。其中,B 对破壳率的影响极显著,A、AB、AC 对破壳率的影响显著,影响顺序为 B、A、AC、AB,即皮带速度与弹簧刚度系数对破壳率的交互影响显著,皮带速度与压板倾角对破壳率的交互影响显著,弹簧刚度系数与压板倾角对破壳率的交互影响不显著。

表 6 碎仁率二次回归模型方差分析

Tab.6 Variance analysis of quadratic regression model of broken kernel rate

方差来源 source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	P 值 P value
模型 Model	81.55	9	9.06	0.007 3**
A	3.25	1	3.25	0.145 0
B	29.24	1	29.24	0.001 7**
C	13.69	1	13.69	0.012 *
AB	1.71	1	1.71	0.272 8
AC	7.03	1	7.03	0.046 6*
BC	1.53	1	1.53	0.297 3
A ²	3.83	1	3.83	0.118 3
B ²	3.21	1	3.21	0.146 9
C ²	1.29	1	1.29	0.335 0
残差 Residual	8.46	7	1.21	
失拟项 Lack of Fit	8.04	5	1.61	0.119 6
纯误差 Pure Error	0.42	2	0.21	
总和 Cor Total	90.00	16		

“**”表示极显著(P<0.01)“*”表示显著(P<0.05)。

“**” indicates extremely significant correlation(P<0.01)and significant correlation(P<0.05).

由表 6 可知,碎仁率二次回归模型 P 值为 0.007 3,小于 0.01,失拟项 P 值为 0.119 6,大于 0.05,说明模型极显著,失拟项不显著,该回归模型的拟合程度高,不存在其他影响试验指标的主要因素。其中,B 对碎仁率的影响极显著,C、AC 对碎仁率的影响显著,影响顺序为 B、C、AC,即皮带速度与压板倾角对碎仁率的交互影响显著。

4.4.3 响应曲面分析 通过破壳率和碎仁率方差分析表可知,交互作用存在不显著项,利用 Design Expert 11 软件得出显著交互作用对破壳率和碎仁率的响应曲面,如图 11 所示。

(1) 试验因素对破壳率的影响。由图 11a 可知,当压板倾角为 3° 时,随着弹簧刚度系数和皮带速度的增加,破壳率呈逐渐增加的趋势。皮带速度约为 90 mm/s 时,随着弹簧刚度系数的增加,破壳率最大可达到 98%。

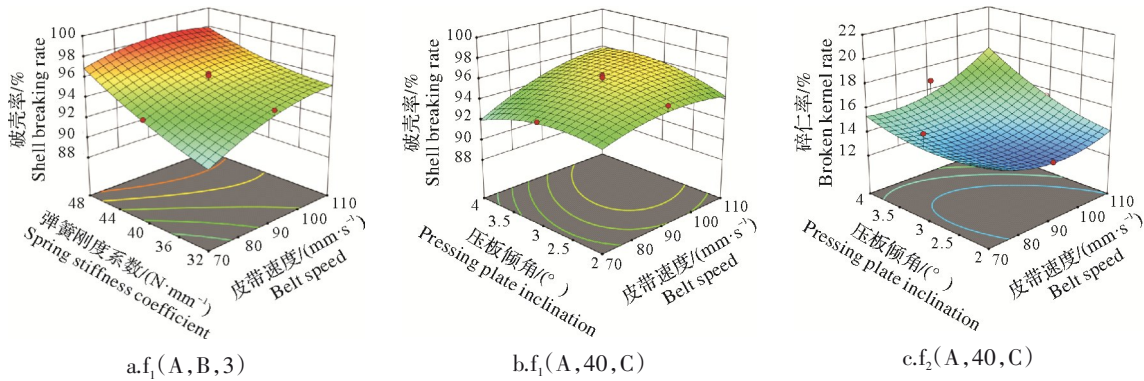


图 11 交互效应 3D 响应曲面
Fig.11 Interaction 3D response surface

由 11b 可知,当弹簧刚度系数不变时,随着压板倾角和皮带速度的增加,破壳率呈逐渐增加的趋势。当压板倾角约为 3° 时,随着皮带速度的增加,破壳率最大可达到 96%。皮带速度小于 80 mm/s 时,压板倾角增加,破壳率呈下降趋势。

(2) 试验因素对碎仁率的影响。由图 11c 可知,当弹簧刚度系数不变时,随着压板倾角和皮带速度的增加,碎仁率增加。皮带速度在 90~100 mm/s,随着弹簧刚度系数的增加,碎仁率增大,最大时超过 17%。

综合以上分析,在满足破壳率要求的前提下,应优选较大的皮带速度、较小的弹簧刚度系数和较小的压板倾角,以降低碎仁率。

4.5 优化参数试验

为获得核桃定向破壳试验装置的最佳性能参数和结构参数,本文以破壳率的最大值及碎仁率的最小值为目标进行优化设计,其目标函数与约束条件为:

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ s.t. \begin{cases} A \in [70, 110] \\ B \in [32, 48] \\ C \in [2, 4] \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

使用 Design Expert 11 软件进行求解,得出最优参数组合:皮带速度为 92.56 mm/s,弹簧刚度系数为 41.32 N/mm,压板倾角为 2.69° ,此时模型预测破壳率为 96.11%,碎仁率为 13.90%。

基于软件分析得出的破壳最优参数,对参数圆整后,以皮带速度 93 mm/s,弹簧刚度系数 42 N/mm,压板倾角 2.5° 为工作参数,采用本文所研制的核桃定向破壳装置,开展定向破壳试验。试验分 3 组进行,每组试验完成后,将核桃壳去除,所获核桃仁如图 12 所示。对核桃仁进行分拣,按整仁、半仁、1/4 仁和碎仁 4 种类型,进行分类汇总并称量,试验结果如表 7 所示,由表可以看出,定向破壳装置的破



图 12 破壳效果
Fig.12 Shell crushing effect

壳率为97.2%,高路仁率为86.5%,碎仁率为13.5%,破壳效果良好,满足相关标准要求^[25]。因此,本文提出的核桃定向破壳方法是可行的,所获工艺参数是有效的。

表7 试验破壳情况统计

Tab.7 Statistics of test shell crushing

组数 Group number	核桃仁总质量/g Total quality of walnut kernel	高路仁 High quality kernel			碎仁质量/g Broken kernel quality	破壳率/% Shell breaking rate	碎仁率/% Broken kernel rate
		整仁质量/g Whole kernel quality	半仁质量/g Semikernel quality	1/4仁质量/g 1/4 kernel quality			
1	1 436.1	66.2	221.2	917.5	189.6	97.1	13.2
2	1 562.6	57.3	236.6	1 015.6	220.3	97.9	14.1
3	1 508.2	54.5	198.9	1 005.9	199.1	96.7	13.2
平均 Mean	1 502.3	59.3	218.9	979.7	203.0	97.2	13.5

5 结 论

(1)本文测试了云南大姚103核桃的外廓尺寸和沿3个方向的破壳力,测试结果表明:核桃破壳时,沿横径方向施力,不仅所需的破壳力小,而且核桃的碎仁率低。

(2)基于核桃的外形特征和力学特性,并参考人工破壳时的施力方向,提出了一种适用于不同大小核桃的定向破壳方法,并设计了由皮带和压板组成的楔形定向破壳装置,可实现对核桃沿横径方向破壳。

(3)对核桃定向破壳过程进行了力学分析,采用单因素试验方法,测得了皮带速度、弹簧刚度系数、压板倾角对核桃破壳效果的影响规律,优选出皮带速度的选取范围为70~110 mm/s,弹簧刚度系数为32~48 N/mm,压板倾角为2°~4°。

(4)基于单因素试验结果,采用Design Expert 11软件开展正交试验,获得了各影响因素的最优参数组合。基于破壳最优参数,采用本文所研发的定向破壳装置,开展定向破壳试验。结果表明:当皮带速度为93 mm/s,弹簧刚度系数为42 N/mm,压板倾角为2.5°时,破壳率为97.2%,高路仁率为86.5%,碎仁率为13.5%,破壳质量满足相关标准要求。

(5)本文提出的核桃定向破壳方法,仍存在有碎仁现象,且核桃破壳后壳仁分离不彻底,这些问题仍需进一步研究。

参考文献 References:

- [1] 张亭,杜倩,李勇.核桃的营养成分及其保健功能的研究进展[J].中国食物与营养,2018,24(7):64-69.
ZHANG T, DU Q, LI Y. Nutritional component and health functions of walnuts [J]. Food and nutrition in China, 2018, 24 (7): 64-69.
- [2] 张永成,马佳乐,唐玉荣,等.我国核桃初加工现状与分析[J].食品工业,2020,41(7):198-202.
ZHANG Y C, MA J L, TANG Y R, et al. Status and analysis of walnut primary processing in China [J]. The food industry, 2020, 41(7): 198-202.
- [3] LIU M Z, LI C H, CAO C M, et al. Walnut fruit processing equipment: academic insights and perspectives [J]. Food engineering reviews, 2021: 1-36.
- [4] 刘甲振,耿爱军,栗晓宇,等.国内外核桃破壳技术与装备研究进展[J].中国果树,2019(1):16-20,26.
LIU J Z, GENG A J, LI X Y, et al. Research progress on technology and equipment of walnut breaking at home and abroad [J]. China fruits, 2019(1): 16-20, 26.
- [5] ZHANG H, SHEN L Y, LAN H P, et al. Mechanical properties and finite element analysis of walnut under different cracking parts [J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2018, 11(6), 81-88.
- [6] 王超.新型多点挤压式核桃破壳机的设计与试验研究[D].西安:陕西科技大学,2021.
WANG C. Design and experimental study of a new multi-point extrusion type walnut shell crusher [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.

- [7] 丁冉,曹成茂,詹超,等.仿生敲击式山核桃破壳机的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(3):257-264.
DING R, CAO C M, ZHAN C, et al. Design and experiment of bionic-impact type pecan shell breaker[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(3): 257-264.
- [8] LIU M, LI C H, ZHANG Y B, et al. Semi-theoretical analyses on mechanical performance of flexible-beltshearing extrusion walnut shell crushing[J]. Applied engineering in agriculture, 2016, 32(4): 459-467.
- [9] 曹成茂,李正,罗坤,等.山核桃二次破壳取仁机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):128-135.
CAO C M, LI Z, LUO K, et al. Design and experiment of secondary shell breaking machine for pecan[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(3): 128-135.
- [10] 宋超,陈超超,刘贤喜,等.分级击打式山核桃破壳机的设计[J].农机化研究,2019,41(9):56-61.
SONG C, CHEN C C, LIU X X, et al. Optimization of pull-up speed control system parameters of cassava harvester based on PSO algorithm[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2019, 41(9): 56-61.
- [11] 刘明政,李长河,曹成茂,等.核桃分级破壳取仁及壳仁分离关键技术与装置研究进展[J].农业工程学报,2020,36(20):294-310.
LIU M Z, LI C H, CAO C M, et al. Research progress of key technology and device for size-grading shell-breaking and shell-kernel separation of walnut[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(20): 294-310.
- [12] 王维,田智辉,王佩,等.6HP-400型锥篮式破壳机设计及试验研究[J].包装与食品机械,2021,39(2):84-88.
WANG W, TIAN Z H, WANG P, et al. Design and experiment of 6HP-400 cone basket walnut shelling[J]. Packaging and food machinery, 2021, 39(2): 84-88.
- [13] 刘海江,王应彪,罗思蓝,等.云南漾濞核桃定向破壳设备的设计与研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(3):487-494.
LIU H J, WANG Y B, LUO S L, et al. Design and research on directional shell cracking equipment for yangbi Yunan walnut[J]. Journal of Shandong agricultural university(natural science edition), 2020, 51(3): 487-494.
- [14] 石河子大学.揉搓式核桃破壳取仁装置[P].中国专利:18103732387,2019-11-01.
Shihezi University. Device for breaking walnut shell and taking kernel by kneeding[P]. Chinese patent: 18103732387, 2019-11-01.
- [15] 王斌,刘德华,张淑娟.核桃物理力学特性参数的试验研究[J].农机化研究,2017,39(8):165-169.
WANG B, LIU D H, ZHANG S J. Experimental research on physical and mechanical properties parameter of walnut[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2017, 39(8): 165-169.
- [16] 曹成茂,蒋兰,吴崇友,等.山核桃破壳机加载锤头设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(10):307-315.
CAO C M, JIANG L, WU C Y, et al. Design and test on hammerhead of pecan shell-breaking machine[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(10): 307-315.
- [17] 刘明政,李长河,张彦彬,等.柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验[J].农业机械学报,2016,47(7):266-273.
LIU M Z, LI C H, ZHANG Y B, et al. Shell crushing mechanism analysis and performance test of flexible-belt shearing extrusion for walnut[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2016, 47(7): 266-273.
- [18] 水小平,白若阳,刘海燕.理论力学教程[M].北京:电子工业出版社,2014:161-165.
SHUI X P, BAI R Y, LIU H Y. Theoretical mechanics course[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 161-165.
- [19] Ledbetter, C A. Shell cracking strength in almond (*Prunus dulcis* [Mill.] D.A. Webb.) and its implication in uses as a value-added product[J]. Bioresource technology, 2008, 99(13): 5567-5573.
- [20] 范天佑.断裂理论基础[M].北京:科学出版社,2003:3-9.
FAN T Y. Fundamentals of fracture theory[M]. Beijing: Science Press, 2003: 3-9.
- [21] 朱广飞,任嘉嘉,王振,等.油茶果脱壳机的设计与工作参数优化[J].农业工程学报,2016,34(7):19-27.
ZHU G F, REN J J, WANG Z, et al. Design of shelling machine for *Camellia oleifera* fruit and operating parameter optimization[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2016, 34(7): 19-27.
- [22] 陈晓彦,刘植.椭圆周长公式的注记[J].大学数学,2019,35(05):95-101.
CHEN X Y, LIU Z. Derivation and application of elliptical perimeter formula[J]. College mathematics, 2019, 35(05): 95-101.

- [23] 沈柳杨,张宏,范修文,等.含水率对温185核桃静压力学性能的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(3):332-337.
SHEN Y L,ZHANG H,FAN X W, et al.Effect of moisture content on mechanical properties of Wen-185walnut under static pressure[J].Journal of Shandong agricultural university(natural science edition),2016,47(3):332-337.
- [24] 王维,刘东琴,王亚妮,等.核桃机械化破壳中影响桃仁表面损伤的因素及其试验研究[J].农业技术与装备,2017(2):12-15.
WANG W,LIU D Q,WANG Y N, et al.Study on damage factors and experiment of kernel in walnut mechanization[J].Agricultural technology & equipment,2017(2):12-15.
- [25] 中华人民共和国机械行业标准.核桃破壳机 第5部分 要求;第6部分 试验方法:JB/T12823—2016[S].北京:中华人民共和国工业和信息化部,2016.
Machinery industry standard of the People's Republic of China.Mechanics of walnut shell breaking-Part 5-requirements; Part 6-test methods:JB/T12823—2016[S].Beijing:Ministry of Industry and Information Technology,2016.
- [26] 程国梁,郑甲红,卢军党,等.六点挤压式核桃破壳机的正交试验研究[J].现代农业科技,2021(19):156-157.
CHENG G L,ZHENG J H,LU J D, et al.Research on orthogonal test of six-point squeeze walnut sheller-broken machines [J].Modern agricultural science and technology,2021(19):156-157.
- [27] 郑甲红,王亚雄,赵奎鹏,等.四点挤压式核桃破壳机正交试验[J].农机化研究,2018,40(1):178-182.
ZHENG J H,WANG Y X,ZHAO K P, et al.Design and test of walnut shell creaking machine with four extrusion force[J].Journal of agricultural mechanization research,2018,40(1):178-182.
- [28] 杨猛,张延化,张冲,等.先揉切后分离风筛组合式花生膜秧分离装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):112-121.
YANG M,ZHANG Y H,ZHANG C, et al.Design and experiment of fan-sieve combined peanut Film-seedling separating device based on shredding and separating[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2020,51(12):112-121.
- [29] 李云雁,胡传荣.实验设计与数据处理[M].2版.北京:化学工业出版社,2015:124-158.
LI Y Y,HU C R.Experiment design and data processing[M].2nd edition.Beijing:Chemical Industry Press,2015:124-158.
- [30] 王富花,董凤凤,张占军.基于 Design-Exper 软件设计优化大蒜多糖提取工艺[J].食品研究与开发,2016,37(9):59-65.
WANG F H,DONG F F,ZHANG Z J.Optimization of extraction conditions of polysaccharide from *Allium sativum* L. Based on design-expert[J].Food research and development,2016,37(9):59-65.
- [31] 杨亚洲,顾炳龙,兰孝峰,等.基于 Design-Expert 的花生脱净率及破损率试验测试及分析[J].中国农机化学报,2017,38(5):32-35.
YANG Y Z,GU B L,LAN X F, et al.Test and analysis of peanut threshing rate and damage rate based on design-expert[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2017,38(5):32-35.