

榛子高效破壳机的研制

Development of high efficiency hazelnut shell breaking machine

何婷¹ 刘珂² 张睿¹ 任广跃¹ 刘钊含¹

HE Ting¹ LIU Ke² ZHANG Rui¹ REN Guangyue¹ LIU Zhaoan¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

(1. College of Food and Biological Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

摘要:目的:解决榛子机械脱壳效率低和碎仁率高等问题。方法:设计通过压簧实现自动调节间隙的立锥式破壳机,破壳机关键结构由立锥式内辊筒、板条筛式外辊筒、压簧装置3个核心部件组成,分析榛子在破壳机脱壳腔内的受力状况。结果:立锥式榛子破壳机的主要参数为匀料锥锥度 30° ,内辊筒母线倾角 75° ,半锥角 15° ,表面凹槽为螺旋纹,凹槽深度3 mm;外辊筒母线倾斜角 73° ,半锥角 17° ;压簧设计自由行程230 mm,中径160 mm,线径24 mm,有效圈数6,总圈数8,内辊筒有效转速范围为229.2~881.5 r/min。结论:该设计通过喂入量自动调节立锥式破壳机压缩量,调整破壳间隙,可适应不同榛子的果形尺寸,使榛子脱壳效率和整仁率得以提高。

关键词:榛子;破壳机;立锥式;压缩弹簧

Abstract: **Objective:** In order to solve the phenomenon of low mechanical shelling efficiency and high kernel breakage rate of hazelnut, a vertical cone shell breaking machine was designed with automatic adjustment of clearance through compression spring. **Methods:** The key structure of the shell breaker was composed of three core components: the vertical cone inner roller, the slatted screen outer roller and the pressure spring device, and the stress of the hazelnuts in the shelling cavity of the shell breaker was analyzed. **Results:** The main parameters of the vertical cone hazelnut shell breaker were determined: the taper of the uniform cone was 30° , the inclination angle of the inner roller bus was 75° , the half cone angle was 15° , the surface groove was spiral, the groove depth was 3 mm, the inclination angle of the outer roller bus was 73° , the half cone angle was 17° , the free

stroke of the compression spring design was 230 mm, the middle warp was 160 mm, the wire diameter was 24 mm, the effective number of turns was 6, the total number of turns was 8, and the effective speed range of the inner roller was 229.2~881.5 r/min.

Conclusion: This design can automatically adjust the compression amount of the vertical cone shell breaker and adjust the shell breaking gap through the feeding amount, which can adapt to the fruit shape size of different hazelnuts, so that the hazelnut shelling efficiency and kernel preparation rate can be improved.

Keywords: hazelnut; shell breaking machine; vertical cone; compression spring

榛子(*Corylus heterophylla* Fisch.)是一种树坚果,为桦木科榛属植物^[1-2],名列世界四大坚果之一。榛子仁中蛋白含量为7%~13%,油脂含量高达56.36%,其不饱和脂肪酸不仅能降低血液中胆固醇,还可提高脑细胞活性。由于榛子的营养和经济价值高,近年来已成为东北退耕还林后的经济树种^[3]。不论采取何种方式,破壳取仁是榛子精加工的首道重要工序。榛子果壳坚硬且含有木制纤维,形状大小不一,壳仁之间的间隙较小,破壳取仁难度较大,且工作效率低,因此有必要研究榛子机械化破壳取仁的问题。

目前,有关坚果的机械化取仁方式主要集中在破壳机理的研究和破壳机构的研制,而破壳机理的研究主要是从坚果的力学特性和物理特性等方面进行讨论^[4],如力的加载方式^[5]、果壳厚度、含水率、坚果体积形态^[6]等。Sharifian等^[7-8]研究发现,适当的含水率与力的加载能极大提高坚果的破壳效率;闫茹等^[9-10]采用有限元法对破壳过程进行模拟,分析了坚果在受到外力作用下破壳机构和物料参数的微观变化过程。坚果破壳机构的研究大部分集中在如何提高破壳机构的破壳效率,降低果仁的碎仁率^[11-14],主要是根据坚果的形态和物料特性,分析

基金项目:河南省重大科技专项(编号:221100110800)

作者简介:何婷,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任广跃(1971—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: guangyueyao@163.com

收稿日期:2023-12-28 **改回日期:**2024-04-28

破壳机的原理与加载方式,进而选择适当的脱壳机构。

综上,有关破壳机的研制更关注于坚果壳体的破碎,其关键是在提高破壳效率,降低碎仁率的同时,能够适应不同大小的果形。基于此,若能根据立锥式脱壳机的工作原理^[15-17],设计一种立锥压簧榛子破壳机构,通过可适度调节的弹簧压缩量来提高破壳效率,采用板条筛结构设计来筛选碎壳,缓解破碎的硬壳对果仁造成损伤。研究拟设计一种可压缩弹簧锥式破壳机,通过压簧自动调节的协同作用,在提高榛子有效破壳率的同时降低果仁破碎率,以期为其他坚果破壳机构的设计与开发提供依据。

1 榛子破壳机组成及工作原理

1.1 榛子破壳机的组成

立锥式榛子破壳机主要由内旋转辊筒、外辊筒以及压簧等组成,该机构是基于立锥式破壳机的特征^[18],在此基础上设计与外辊筒连接的可压缩弹簧,通过控制物料的喂入量调节弹簧的压缩行程,进而调控破壳空腔的间隙产生不同的挤搓力,实现不同大小和不规则形状榛子的高效高质破壳。立锥式榛子破壳机的结构如图 1 所示,其性能设计参数见表 1。

1.2 工作原理

榛子通过进料斗进入破壳机,在匀料锥的导流作用下,有序滑落至破壳间隙,在自身重力作用下随旋转装置边旋转边向下运动,在间隙中作挤压螺旋运动直至破壳。立锥式榛子破壳机内辊筒在传动轴的驱动下进行旋转,

表 1 破壳机主要技术参数性能指标

Table 1 Main technical parameters and performance indicators of shell breaker

参数	单位	性能指标
破壳方式		挤压、摩擦式
电机动力	kW	0.75
生产率	kg/h	100
破壳率	%	100
整仁率	%	≥95
尺寸(长×宽×高)	mm ³	500×500×1 200

匀料锥固定在内辊筒上端口处,外辊筒表面设计有板条筛且固定在机架上,榛子在旋转内辊筒的带动下产生离心力,并与内外辊筒产生摩擦力、剪切力、挤压力^[19]进而破壳。破壳过程中,碎壳在自身重力、压簧的压缩与恢复,以及随螺旋凹槽旋转的离心力共同作用下,穿过外辊筒板条筛间隙落到接料板上,而榛子果仁则运动至下端出口完成脱壳过程。因破壳间隙从上往下逐渐变窄,在榛子脱壳前期,内外辊筒对榛子的摩擦、剪切作用占主要优势,脱壳后期,榛子个体夹在内外辊筒之间,其挤压作用占主要优势,且内辊筒上的螺旋凹槽和外辊筒角度的配合使榛子在受到挤搓作用的同时沿螺旋向下运动,解决了榛子在脱壳间隙堆积堵塞问题,减小了榛子果仁受损伤的机率。此外,通过调节与内辊筒直联的传动轴减速器达到调节内辊筒转速的目的,以获取最佳的脱壳效果。

该装置特点:结构简单,采用电机传动,操作简便灵活;内辊筒上均匀分布有螺旋凹槽,起导流及破壳作用;且外辊筒下端设有与其连接的压缩弹簧,通过控制喂入量可以调节脱壳间隙。

2 破壳关键部件设计

2.1 破壳辊筒螺旋凹槽设计

为提高榛子在相互运动时因表面较光滑,造成滑移不易破壳的问题,设计一个抓取凹槽以提高效率。内旋转辊筒表面设计螺旋凹槽,由于落入间隙中的榛子受到内外辊筒挤压不易向下继续移动,而凹槽对榛子进入间隙有促进作用,因此螺旋凹槽设计是影响榛子破碎率、整仁率的关键因素之一。

内辊筒的螺旋凹槽设计为圆柱条弯曲开槽呈螺旋结构,榛子外壳厚度为 1.5~3.0 mm,故辊筒表面开槽深度设为 3 mm。加工过程中将提升榛子壳破裂后,被凹槽抓取使外壳破碎,同时将未在破壳间隙处破壳的榛子带向间隙窄处,直至完成破壳,最终果仁由下方出口口流出,内辊筒螺旋凹槽结构如图 2 所示。

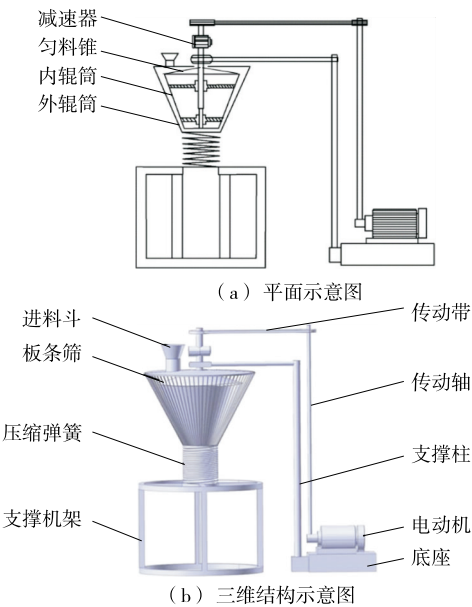


图 1 立锥式榛子破壳机结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the structure of vertical cone hazelnut shell breaker

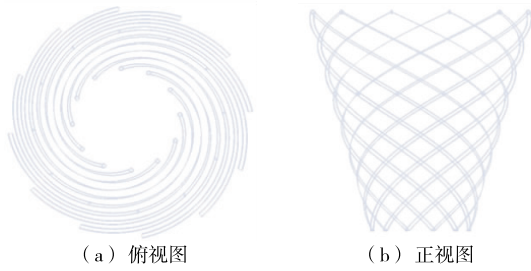


图 2 内辊筒螺旋凹槽结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of the structure of the spiral groove of the inner roller

2.2 匀料锥设计

榛子被吸入喂料机构中,在匀料锥的分流下,均匀落入破壳间隙。内辊筒顶部的匀料锥由一个圆锥体和凸起棱筋组成,固定在内辊筒上端口并随内辊筒转动;在匀料锥表面均匀分布,共设计有 4 条棱筋。匀料锥(图 3)位于辊筒顶部,除起到封闭作用外,通过喂料口进入的榛子均匀分布到圆形脱壳间隙之中,使榛子脱壳均匀,提高脱壳间隙利用率。

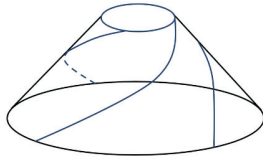


图 3 匀料堆结构示意图

Figure 3 Schematic diagram of the structure of the uniform pile

为解决榛子顺利进入破壳间隙,提高破壳间隙利用率问题,设计一种匀料锥装置以提高破壳效果。榛子与匀料锥的壁面接触,发生斜碰撞,运行轨迹和速度均发生变化。在实际碰撞过程中,榛子的运动速度远小于破壳的挤压旋转速度,因此可以忽略对榛子自身质量的影响。假设榛子与匀料锥壁面发生碰撞的接触点为 O ,忽略榛子质心高度,建立二维直角坐标系 xOy ,定义碰撞接触点 O 的公切线方向为 x 轴,公法线方向为 y 轴,具体碰撞过程运动示意图如图 4 所示。

依据动量守恒定律,可得:

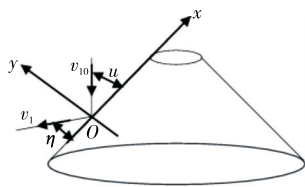


图 4 碰撞过程运动示意图

Figure 4 Schematic diagram of the motion of the collision process

$$\begin{cases} mv_{10} = mv_1 + m_2 v_2 \\ e = \frac{v_{2y} - v_{1y}}{v_{10y}} \\ e \tan \mu = \tan \eta \end{cases} \quad (1)$$

分别沿 x 、 y 轴投影可得:

$$\begin{cases} mv_{10x} = mv_{1x} + m_2 v_{2x} \\ mv_{10y} = mv_{1y} + m_2 v_{2y} \\ v_{10y} e = v_{2y} - v_{1y} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

v_{10} ——榛子接触前速度, m/s;

v_1 ——榛子接触后速度, m/s;

v_2 ——匀料锥速度, m/s;

v_{10x} ——接触前速度在 x 轴分量, m/s;

v_{10y} ——接触前速度在 y 轴分量, m/s;

μ ——接触前速度与 x 轴夹角, °;

η ——接触后速度与 x 轴夹角, °;

m ——榛子平均质量, g;

m_2 ——匀料锥质量, g;

v_{1x} —— v_1 在 x 轴上分量, m/s;

v_{1y} —— v_1 在 y 轴上分量, m/s;

v_{2x} —— v_2 在 x 轴上分量, m/s;

v_{2y} —— v_2 在 y 轴上分量, m/s;

e ——恢复系数。

若忽略摩擦以及榛子自身质量的影响,理想状态下,榛子发生弹性碰撞,即碰撞瞬间物体发生形变,形状完全恢复,因此榛子完成碰撞接触前后动能无损失,榛子接触前后速度大小未发生变化,仅方向发生了改变,可得:

$$\begin{cases} v_{10} = v_1 \\ v_{10x} = v_{1x} \\ v_{10y} = v_{1y} \end{cases} \quad (3)$$

因此,接触过程为弹性碰撞,则 $e \in (0, 1)$,根据式(1)得 $\mu > \eta$ 。为确保榛子在接触碰撞后进入破壳间隙, μ 需 $< 45^\circ$,试验初步确定 μ 为 30° 。结合破壳机构的情况与榛子特性,初步确定匀料锥关键参数为锥度 30° ,母线长 180 mm。

2.3 破壳机构设计

榛子破壳取仁的机构主要由内旋转锥形辊筒和外固定安装有压簧连接的倒锥形辊筒组成,榛子从喂料斗进入匀料装置,均匀落入破壳间隙,与内外辊筒壁接触,在挤压、摩擦组合作用下使榛子外壳破碎,完成破壳,具体破壳结构如图 5 所示。

2.3.1 内辊筒设计 榛子经匀料锥碰撞后均匀落至破壳间隙,在内外辊筒壁面挤压、摩擦作用下使榛子外壳破裂,完成破壳。为避免挤压破壳过程中出现榛果堵塞等现象,破壳过程中仅允许 1 个坚果进入间隙形成单层破壳层,内旋转辊筒与外辊筒上端间隙 L 需 > 1 个单果

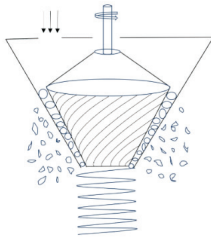


图 5 破壳结构图

Figure 5 Structure diagram of shell breaking

且 <2 个单果的平均直径,即 $20\text{ mm}<L<40\text{ mm}$ 。榛子完成接触碰撞落入破壳间隙后,受到挤压作用,榛子壳被破碎成多个碎壳,而未完成破壳的榛子随内辊筒旋转,由于压簧压缩与恢复榛子受到挤压同时也受到摩擦而破裂,故辊筒设计需考虑榛子受力的影响。

考虑到材料和转动惯量的问题,保证整机的安全稳定性,将内辊筒设计为空心倒锥形(图 6)。内辊筒外表面设计有螺旋凹槽,在螺旋凹槽的作用下推动榛子做向下螺旋运动,致使榛子既受到挤压同时也受到螺旋凹槽的摩擦,确保榛子破壳过程中驻留在破壳区间的时间,减少榛子果仁的受损机率^[20]。

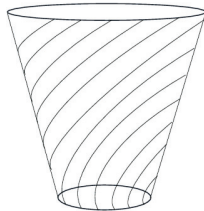


图 6 内辊筒结构

Figure 6 Structure of inner roller

由于榛子落入脱壳区间后在其自身重力作用下向下滑落,在接触到辊筒后受力较为复杂,包括辊筒壁、螺旋凹槽、板条筛及压簧通过外辊筒对榛子所产生的作用力,设计时可忽略影响较低的因素。

榛子与内外辊筒接触,产生挤压,榛子外壳受力发生变化。根据实际情况,① 榛子个体尺寸各异,各轴向与脱壳部件及榛子接触的半径不同,产生不同的力矩,但该力矩对榛子作用非常小,故在受力分析时可忽略轴径方向,所受的力均过质心。② 板条筛在保证脱壳间隙前提下,整体表面并非绝对意义上的圆锥,其内凹角极小,因此将板条筛全部视为沿母线方向的绝对圆锥形。③ 内外辊筒锥角相差不大因而对榛子产生的支撑力方向角度差忽略不计,可将两个角度简化为相同角度。

若榛子与内辊筒螺旋凹槽接触并随之转动,且弹簧被压缩时,榛子位于脱壳中上部内辊筒转动线速度较大,榛子所受摩擦力和惯性力较大,为主要的脱壳作用;因此

随辊筒一同转动的榛子进行旋转产生离心力,以及凹槽和板条筛产生的作用力(图 7、图 8)。

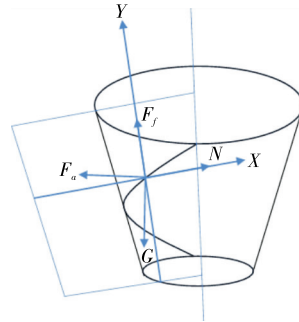


图 7 榛子在 XY 面的受力

Figure 7 Stress on hazelnuts in the XY plane

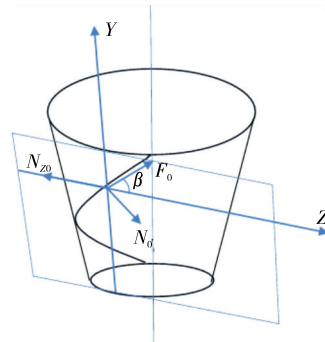


图 8 榛子在 YZ 面的受力

Figure 8 Stress on hazelnuts in the YZ plane

为探究具体参数范围在 XY 平面的受力(图 9),根据受力平衡方程,可得:

$$\begin{cases} \sum F_x = N - G \sin \alpha - F_a \cos \alpha = 0 \\ \sum F_y = F_f + F_a \sin \alpha - F_{y0} - G \cos \alpha = 0 \\ N_0 \cos \beta = 0 \end{cases}$$

$$F_a = m\omega^2 r; \omega = 2\pi n/60, \quad (4)$$

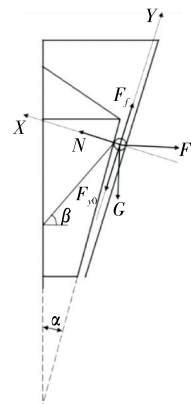


图 9 榛子与内辊筒接触时的受力分析

Figure 9 Hazelnut force analysis when in contact with the inner roller

式中:

α ——内辊筒半锥角,°;

β ——凹槽与水平轴的夹角,°;

G ——榛子重力,N;

N ——内外辊筒对榛子的压力差,N;

F_f ——榛子受内辊筒的摩擦力,N;

F_{y0} ——弹簧压缩时榛子受到外辊筒的摩擦力,N;

N_0 ——螺旋凹槽对破裂外壳的冲击力,N;

F_a ——榛子随内辊筒转运动的惯性力,N;

ω ——内辊筒旋转角速度,rad/s;

r ——榛子所处位置的内辊筒半径,mm;

n ——内辊筒转速,r/min。

综上,影响榛子破壳受力的主要因素包括内辊筒半锥角 α 、摩擦因数 f ^[21]、自身重力 G 、凹槽角度 β 等。摩擦因数 f 、重力 G 为定值,凹槽角度 β 设定情况下,可以调节半锥角 α 满足榛子自由滑落。

根据式(4)可知,榛子所受摩擦力 f 和惯性力 F_a 与转速有关,根据设计的破壳机辊筒尺寸计算出转速范围,故选取辊筒转速为 300 r/min,因此,在破壳机结构确定情况下,根据榛子下滑条件设计辊筒半锥角。

由预仿真试验结果,内辊筒半锥角在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时可较好满足榛子在破壳间隙下滑,考虑到参数设计的较优性,该设计中初选半锥角参数为 15° 。

2.3.2 外辊筒设计 外辊筒主要作用是对榛子施加挤压、摩擦力,与螺旋凹槽配合产生向下螺旋运动,脱壳装置的表面设计仅为竖向的栅条式板条筛^[22]。如图 10 所示,果壳分离后在内辊筒螺旋凹槽、外辊筒板条筛的挤搓作用下通过板条排出破壳区间,有效减少榛子在脱壳区间的停滞时间,从而降低榛子果仁破损率,进而在不影响榛子破壳效果的前提下,可有效降低果仁与破碎果壳的磨损机率。

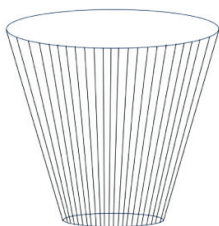


图 10 外辊筒结构示意图

Figure 10 Schematic diagram of the structure of the outer roller

当榛子落入脱壳区间时,位于辊筒脱壳间隙之间,若此时仅与外辊筒接触,未受到内辊筒螺旋凹槽的作用力,仅受到自身重力 G 、外辊筒板条筛的支撑力 N_1 、板条筛的摩擦力 F_{fs} 作用,其受力如图 11 所示。

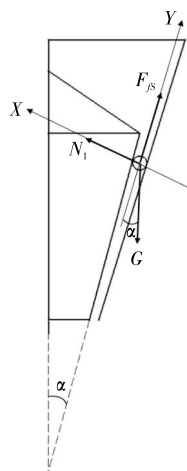


图 11 榛子未与内辊筒接触时的受力分析

Figure 11 Hazelnut force analysis when not in contact with the inner roller

榛子处于静止瞬间的平衡方程为:

$$\begin{cases} N_1 - G \sin \alpha = 0 \\ F_{fs} - G \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{fs} = \mu_1 N_1, \quad (6)$$

$$\mu_1 = \tan \varphi, \quad (7)$$

式中:

α ——内外辊筒倾角,半锥角,°;

μ_1 ——榛子与外辊筒筛板条摩擦系数;

φ ——榛子与筛板条摩擦角,°。

解方程可得 $\cot \alpha = \tan \varphi = \cot(90^\circ - \varphi)$,使榛子与凹板筛条接触后向下滑落,即:

$$F_{fs} - G \cos \alpha < 0. \quad (8)$$

故 $\alpha < 90^\circ - \varphi$,因此设计外辊筒锥角应小于榛子/果仁的摩擦角 φ 的余角。已知 $\varphi = 25^\circ$,故 $\alpha < 65^\circ$,因此结合初选参数 α 为 15° 符合设计要求,由于榛子在破壳间隙形成单层破壳层,故两辊筒间隙角度差为 $1^\circ \sim 3^\circ$,内辊筒半锥角为 15° ,因此外辊筒半锥角为 17° 。

2.4 压缩弹簧设计

破壳机压簧浮动行程由榛子喂料量决定,可以通过榛子喂料量与弹簧压缩行程条件进行分析,寻求压缩与恢复过程最适合的弹簧结构,确定压缩弹簧的各参数值,提高破壳率的同时降低核仁损伤率。设计压缩弹簧,先分析弹簧的应用环境,即计算弹簧参数的初始条件。一般的初始条件包括弹簧最大载荷、最大变形量及结构等要求^[23]。具体设计流程:

(1) 根据弹簧应用环境,确定弹簧初始压力 $F_{\min}$ 为 250 N、最大压力 $F_{\max}$ 为 1 000 N、安装初始长度 H_1 、最大压力下弹簧长度 H_n ,由此计算出弹簧自由长度 H_0 (弹簧未承载外力时自由长度)、最大压缩量 $\lambda_{\max}$ 和弹簧刚度 k_F 。

$$H_0 = \frac{F_{\max} H_1 - F_{\min} H_n}{F_{\max} - F_{\min}}, \quad (9)$$

$$\lambda_{\max} = H_0 - H_n, \quad (10)$$

$$k_F = \frac{F_{\max}}{\lambda_{\max}}. \quad (11)$$

(2) 根据弹簧安装空间,初始设置弹簧中径 D 和弹簧丝直径 d ,验算其旋绕比 C (GB/T 23935—2009) 是否满足设计要求。旋绕比为弹簧中径 D 与弹簧丝直径 d 的比值,取值范围与弹簧中径 D 和弹簧丝直径 d 均有关系,初选弹簧丝直径 d 为 24 mm,弹簧中径 D 为 160 mm。

(3) 选定弹簧丝材料,根据 GB/T 4357—2009、GB/T 1358—2009,并查获其力学性能参数。

(4) 验算弹簧中径 D 与弹簧丝直径 d 取值是否符合要求。弹簧内径和弹簧外径的尺寸允许范围由安装空间决定。故弹簧中径 D 和弹簧丝直径 d 要求满足:

$$D - d = D_1 \geq D_{1\min}, \quad (12)$$

$$D + d = D_2 \leq D_{2\max}, \quad (13)$$

$$K \approx \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C}, \quad (14)$$

$$d \geq 1.6 \sqrt{\frac{F_{\max} KC}{[\tau]}}, \quad (15)$$

式中:

$D_{1\min}$ ——弹簧内径允许的最小值,mm;

$D_{2\max}$ ——弹簧外径允许的最大值,mm;

K ——曲度系数;

$[\tau]$ ——弹簧材料许用切应力,MPa。

(5) 计算有效圈数 n 。

$$n = \frac{G d^4 \lambda_{\max}}{8 F_{\max} D^3}, \quad (16)$$

式中:

G ——弹簧材料切变模量。

(6) 验算弹簧稳定性。

$$b = \frac{H_0}{D}, \quad (17)$$

式中:

b ——弹簧长细比。

(7) 验算弹簧强度。

$$\tau_{\max} = \frac{8KD}{\pi d^3} F_{\max}, \quad (18)$$

$$\tau_{\min} = \frac{8KD}{\pi d^3} F_{\min}, \quad (19)$$

$$S_{ca} = \frac{\tau_0 + 0.75\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \geq S_F, \quad (20)$$

式中:

$\tau_{\max}$ ——最大工作载荷产生的切应力,MPa;

$\tau_{\min}$ ——最小工作载荷产生的切应力,MPa;

S_{ca} ——弹簧疲劳强度安全系数计算值(依据弹簧力

学性能、弹簧设计等数据精确度取不同常数);

τ_0 ——弹簧材料动脉循环剪切疲劳极限(与弹簧材料及受到载荷相关的常数)。

(8) 共振验算。

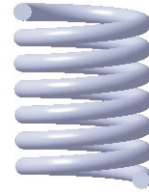
$$f = 3.65 \times 10^5 \frac{d}{nD} > 10f_r, \quad (21)$$

式中:

f ——弹簧自振频率,Hz;

f_r ——强迫机械振动频率,Hz。

通过计算并校核获得圆柱压缩弹簧结构及参数(图12)。



$$H_0 = 230 \text{ mm}, n = 6, N = 8, d = 24, D = 160 \text{ mm}$$

图12 弹簧三维模型

Figure 12 Three-dimensional model of spring

根据实际情况计算,考虑到外辊筒下端直径160 mm,故压缩弹簧结构尺寸参数:自由高度 H_0 为230 mm,弹簧有效圈数 n 为6圈,总圈数 N 为8,线径 d 为24 mm,中径 D 为160 mm。

2.5 传动机构设计及转速计算

电动机作为驱动力,根据破壳机结构及工作条件,确定驱动装置的传动路线,通过电机传输动力传送至带驱动轴,经减速器调节控制同步带,传递至动转轴使内辊筒运动^[24-25],完成榛子破壳过程。其传动方案结构如图13所示。

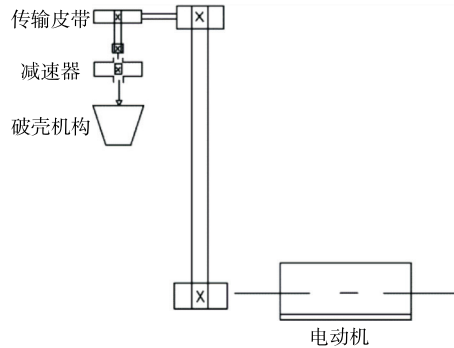


图13 整体传动机构方案

Figure 13 Integral transmission mechanism scheme

(1) 电机选型:电机在稳定载荷下工作功率为

$$P_d = P_w / \eta_n, \quad (22)$$

式中:

P_w ——破壳所需的工作功率,kW;

η_n ——电机至破壳工作总驱动效率。

总工作效率 η_n 是构成系统的各个机构运动副效率之积,即:

$$\eta_n = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3, \quad (23)$$

式中:

η_1 ——滚动轴承传递效率,查表得 0.99;

η_2 ——带传递效率,查表得 0.95;

η_3 ——减速器传递效率,查表得 0.98。

故 $\eta_n = 0.99 \times 0.95 \times 0.98 = 0.921$, 电机总功率 $P_{\text{总}} = 4P/\eta_n = 0.51 \text{ kW}$ 。

破壳机的生产效率与脱壳辊筒和转速有密切关系,转速大小是影响脱壳生产效率的直接原因,转速过小则达不到预期脱壳效果,转速过大则脱壳工作量大,但对果仁的损伤也随之变大。由于榛子壳硬度较高,破壳时受力比较复杂,根据一般脱壳机械辊筒的线速度为 3~6 m/s^[26],理想状态下根据动能定理,计算线速度脱壳辊筒转速范围。

$$mv^2/2 - 0 = F\Delta S, \quad (24)$$

$$v = n\pi D/60, \quad (25)$$

式中:

m ——单个榛子平均质量,g;

v ——内辊筒外缘线速度,m/s;

D ——内辊筒直径,mm;

n ——内辊筒转速,r/min;

F ——辊筒对榛子的打击力,N;

ΔS ——榛子受辊筒冲击的相对位移,m。

由式(25)可知,线速度一定时,内辊筒直径与转速成正比,可通过内辊筒直径来改变转速。所设计内辊筒下圆直径为 130 mm、上圆直径为 250 mm 时,内辊筒有效转速范围为 229.2~881.5 r/min。

3 结论

基于传统立锥式破壳机的旋转挤压破壳原理,设计了可调节挤压间隙、摩擦方式的破壳取仁机构。结果表明,榛子破壳机的工作特点是压簧通过压缩与恢复的方式调节破壳间隙,并利用内外辊筒挤压对榛子进行破壳加工,完成壳仁分离。榛子破壳关键部件参数为内滚筒表面螺旋凹槽均匀分布,深度为 3 mm;匀料锥母线长为 180 mm,锥度为 30°;内辊筒母线倾角为 75°,半锥角为 15°;外辊筒母线倾角为 73°,半锥角为 17°;弹簧线径为 24 mm,中径为 160 mm,自由行程为 230 mm,有效圈数为 6,总圈数为 8;内辊筒有效转速范围为 229.2~881.5 r/min,此条件下榛子破壳机构满足加工要求。该榛子破壳装置结构简单、操作简便,适用性强,破壳效率高 95%。

参考文献

- [1] 赵棣, 胡献文, 魏珩, 等. 榛子全基因组 CHSEP 基因鉴定、多克隆抗体制备及其在胚珠中的表达研究[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8): 123-131.
ZHAO D, HU X W, WEI H, et al. Identification of CHSEP genes in the whole genome of hazelnut, preparation of polyclonal antibody and expression in ovules[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8): 123-131.
- [2] 苏可欣, 赵玉红. 平欧榛子副产物不同溶剂提取物的生物活性评价及超高效液相色谱-质谱分析[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 32-41.
SU K X, ZHAO Y H. Different solvent extracts from by-products of corylus heterophylla fisch. × Corylus avellana L.: Bioactivity evaluation and phenolic composition analysis by ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2024, 45(1): 32-41.
- [3] 刘剑锋, 孙莹, 魏珩, 等. 榛子胚珠不同发育阶段 circRNA 的分析与鉴定[J]. 园艺学报, 2021, 48(6): 1 053-1 066.
LIU J F, SUN Y, WEI H, et al. Analysis and identification of circRNA of hazel ovule at different developmental stages[J]. Acta Horticulturac Sinica, 2021, 48(6): 1 053-1 066.
- [4] 栗文, 张宏, 唐玉荣, 等. 薄皮核桃机械分级与破壳特征提取研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 89-92.
LI W, ZHANG H, TANG Y R, et al. Study on feature extraction of shell breaking and machine grading of thin shell walnut[J]. Food & Machinery, 2017, 33(6): 89-92.
- [5] 王周梅, 王应彪, 张超宇, 等. 定向挤压试验下核桃单粒破壳装置的研究[J/OL]. 中国油脂. (2023-08-14) [2023-12-28]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230282>.
WANG Z M, WANG Y B, ZHANG C Y, et al. Study on single walnut shell breaking device under directional extrusion test[J/OL]. China Oile and Fats. (2023-08-14) [2023-12-28]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230282>.
- [6] 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 Z M, 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.
- [7] SHARIFIAN F, DERAFFSHIM H. Mechanical behavior of walnut under cracking conditions[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(5): 886-890.
- [8] KOCTURK B O, GURHAN R. Determination of mechanical properties of various walnut according to different moisture levels [J]. Journal of Agricultural Science, 2007, 13(1): 69-74.
- [9] 闫茹, 高警, 郑甲红, 等. 基于 Workbench 的核桃破壳力学特性分析[J]. 农机化研究, 2014, 36(10): 38-41.
YAN R, GAO J, ZHENG J H, et al. Analysis of mechanical

- properties of walnut shell based on workbench [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(10): 38-41.
- [10] 王超, 郑甲红, 程国梁, 等. 基于 Workbench 核桃力学特性分析与试验研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(5): 17-22, 36.
- WANG C, ZHENG J H, CHENG G L, et al. Simulation and experimental research of walnut crack based on workbench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 17-22, 36.
- [11] ANCO D J, BALOTA M, DUNNE J C, et al. Sound splitsas influenced by seed size for runner and Virginia market type peanut shelled on a reciprocating sheller[J]. Agronomy, 2021, 11(9): 1 869.
- [12] GUZMAN J D, PETINGCO M C, DOM-OGUEN A D P. Peanut threshing and shelling machines for community-based peanut enterprises in developing countries [C]// ASABE Annual International Meeting. Boston: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019: 1-11.
- [13] UNGUWANRIMI A Y, USMAN M S, ISHIAKA M, et al. Development and performance evaluation of a castor seed (*Ricinus communis*) shelling machine with a winnowing system[J]. FUOYE Journal of Engineering and Technology, 2020, 5(1): 430.
- [14] SAHU G, YADAV M, GAJBHIYE A. Development and performance evaluation of a walnut sheller machine[J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2018, SP1: 466-470.
- [15] 王维, 王亚妮, 王佩, 等. 锥篮式核桃破壳机结构改进设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(3): 124-129.
- WANG W, WANG Y N, WANG P, et al. Structure improvement design and test of cone basket walnut shelling [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(3): 124-129.
- [16] 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.
- [17] 刘明国. 花生脱壳与损伤机理及立锥式脱壳机研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011: 77-80.
- LIU M G. Study on peanut shelling damage mechanism and development of the vertical cone type shelling machine [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011: 77-80.
- [18] 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.
- [19] 石明村, 刘明政, 李长河, 等. 凸轮摇杆双向挤压核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 140-150.
- SHI M C, LIU M Z, LI C H, et al. Design and experiment of cam rocker bidirectional extrusion walnut shell breaking device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 140-150.
- [20] SUN Q, WANG C, WANG Z, et al. Design and experiment of a peanut shelling machine [J]. Agricultural Research, 2017, 6(3): 304-311.
- [21] 任德志, 李佳奇, 裴影, 等. 气吸式榛子捡拾分选机设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(2): 177-186.
- REN D Z, LI J Q, NIE Y, et al. Design and experimental study on air-suction hazelnut picking and cleaning machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(2): 177-186.
- [22] 李心平, 马福丽, 高连兴. 花生脱壳装置的结构技术剖析[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 18-20.
- LI X P, MA F L, GAO L X. Analysis of construction and technique of shelling equipment on peanuts [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 18-20.
- [23] 徐国宝, 余艳祥, 石卓栋, 等. 圆柱螺旋压缩弹簧的自动化设计[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 74-79.
- XU G B, SHE Y X, SHI Z D, et al. Automatic design of cylindrical helical compression spring [J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 74-79.
- [24] 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.
- [25] 程国梁, 郑甲红, 王超. 二次挤压式核桃破壳机[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 64-67.
- CHENG G L, ZHENG J H, WANG C. Secondary extrusion walnut shell breaker[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 64-67.
- [26] 蒋快乐, 陈治华, 李亚南, 等. 澳洲坚果脱皮机脱皮辊的力学特性仿真[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 110-114.
- JIANG K L, CHEN Z H, LI Y N, et al. Simulation analysis on mechanical properties of macadamia nut peeler roll [J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 110-114.
-
- (上接第 10 页)
- [58] YANG Z H, GAO Y, WU W J, et al. The mitigative effect of lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaertn) extract on acute alcoholism through activation of alcohol catabolic enzyme, reduction of oxidative stress, and protection of liver function[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1111283.
- [59] 巩建业, 吴喆瑜, 刘嘉男, 等. 黑曲霉 α -L-鼠李糖苷酶与柚皮苷分子动力学模拟研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(12): 66-72.
- GONG J Y, WU Z Y, LIU J N, et al. Molecular dynamics investigations of *Aspergillus niger* α -L-rhamnosidase with naringin[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(12): 66-72.