

柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验

刘明政¹ 李长河¹ 张彦彬¹ 杨 敏¹ 侯亚丽¹ 高连兴²

(1. 青岛理工大学机械工程学院, 青岛 266520; 2. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 传统的核桃破壳取仁装置多采用刚性元件, 工作过程中易造成核桃仁过度破碎, 同时剥壳率低、适应性差。为提高核桃破壳取仁效果, 结合核桃机械破壳原理, 设计了柔性带剪切挤压式核桃破壳取仁分离设备。利用弹性力学理论对核桃壳不同部位的刚度进行分析, 得到不同部位失稳时的临界力; 利用薄壳理论对核桃壳受挤压时的内力和形变进行分析, 得出核桃不同部位裂纹产生和破壳时的临界力; 利用断裂力学理论分析和计算了核桃破裂后裂纹扩展的条件。采用单因素试验方法分别探究间距 A 、上下带速度差 B 及挤入夹角 C 对核桃破壳效果的影响, 然后再通过正交试验确定 3 种因素的一组最优解。试验结果表明: 在间距为 23 mm, 上下带速度差为 0.19 m/s, 挤入夹角为 45° 时破壳效果最为理想, 一露仁率、二露仁率、碎仁率、未露仁率分别为 75%、18%、5%、2%, 即破壳率为 98%, 整仁率为 93%。

关键词: 核桃; 柔性带; 剪切挤压破壳; 机理分析; 性能试验

中图分类号: S226.4; S664.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0266-08

Shell Crushing Mechanism Analysis and Performance Test of Flexible-belt Shearing Extrusion for Walnut

Liu Mingzheng¹ Li Changhe¹ Zhang Yanbin¹ Yang Min¹ Hou Yali¹ Gao Lianxing²

(1. College of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China

2. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The rigid components are always used in traditional walnut shell-broken kernel-taken device. During working process, the walnut kernel is easy to be excessively broken. The shell-broken rate and kernel-unbroken rate are also low and the adaptability for different kinds of walnut is poor. In order to improve the walnut shell-broken and kernel-unbroken effect, combining with the current research situation of walnut shell breaking by mechanical approaches, a walnut shearing-extrusion flexible shell crushing, kernel taking and shell-kernel separating device was designed. Stiffness at different positions of walnut shell was analyzed by theory of elastic mechanics, which contributed critical force of unstability of different positions. Critical force of cracking and breakage at different positions of walnut shell was disclosed. Conditions for crack extension after walnut shell breakage were analyzed and calculated by fracture mechanics theory. The results demonstrated that when the mean crack length is 20 mm, the critical external force for crack extension is 19.1 N. The single-factor experiment was carried out to analyze the impact of the top and low section belt spacing (A), top and low section velocity difference (B) and extrusion included angle (C) on walnut crushing force. In this way, the optimal combination of three factors (A , B , C) can be identified through the orthogonal experiment. The experimental results indicated that with A of 23 mm, B of 0.19 m/s and C of 45°, the most satisfactory shell-broken effects were obtained, which generated the first grade kernel rate of 75%, the second grade kernel rate of 18%,

收稿日期: 2015-11-23 修回日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50775151, 51075284)

作者简介: 刘明政(1989—), 男, 助理研究员, 主要从事农业机械装备设计等研究, E-mail: lmzzz654321@163.com

通信作者: 李长河(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械装备设计等研究, E-mail: sy_lichanghe@163.com

the kernel cracking rate of 5% and the kernel-unseen rate of 2% . In other words , under this condition , the shell-broken rate reached 98% and the kernel-unbroken rate reached 93% .

Key words: walnut; flexible-belt; shearing extrusion breakage; mechanism analysis; performance test

引言

核桃壳主要由木质素、纤维素和半纤维素组成,核桃果壳硬而厚,形状不规则,内有多个分隔,壳仁间隙小^[1],核桃深加工过程中,剥壳取仁处理是一道重要而又困难的工序。许多核桃加工产业依然采取手工破壳取仁方式^[2],不仅加工效率低、成本高,而且不能保证食品的卫生,存在危害食用者健康的潜在威胁^[3]。目前,除手工取仁方法之外,核桃破壳取仁有以下几种方法:离心碰撞、化学腐蚀、真空破壳、超声波破壳、机械破壳。前 4 种方法破壳取仁效果不理想且操作复杂、设备成本高。机械破壳法设备简单,成本低,破壳效果可通过改进部件结构提升,因此得到较多的探索研究和应用。

科研人员对杏核^[4]等坚果进行了大量的试验,探究了坚果的力学性能以及影响破壳效果的因素,指出含水率、加载方向等因素对坚果破壳力、变形量、破壳趋势以及整仁率等有一定的影响。吴子岳等^[5]结合有限元分析法通过大量试验对核桃的破壳原理以及力学性能进行了研究,找出了破壳时的最佳施力位置。袁巧霞等^[6]通过辊板式银杏脱壳装置试验得出间距过大或过小都不利于脱壳。李忠新等^[7]受定间隙挤压试验的启发,建立了锥篮式破壳模型,研究了对核桃破壳最有效的施力方向和位置。宋率展^[8]通过揉搓的方式对芡实破壳,将搓板设计成变形后与坚果相一致的形状,即搓板要具有一定的柔性及硬度,有利于提高果仁完整性。董诗韩等^[9]利用多辊挤压式核桃破壳机进行试验研究,得出破壳辊转速要高于辅助破壳辊转速,保持一定的速度差能够提高破壳率和整仁率。

目前,常见的机械破壳装置按破壳方法主要分为 4 类:挤压式、撞击式、剪切式和碾搓式。但多数剥壳机存在的主要问题是:剥壳率低,漏剥或破壳不完全;由于破壳不完全,部分碎核桃仁夹带在碎壳中难以取出;果仁完整性差,核桃仁破碎率过高;对不同尺寸形状的核桃适应性差。

针对上述现有核桃破壳取仁机械设备存在的缺点,本文基于球体核桃模型并综合多种核桃破壳取仁设备的优点,设计可适应不同尺寸核桃的柔性带剪切挤压式破壳取仁设备。

1 柔性带剪切挤压式破壳装置结构与工作原理

核桃破壳取仁分离装置如图 1 所示。主要包括柔性带剪切挤压破壳系统 I、柔性螺旋叶片锤击取仁系统 II、气力与柔性螺旋叶片耦合滚筒双向壳仁分离系统 III,以及传动系统。本文主要探究柔性带剪切挤压核桃破壳系统。

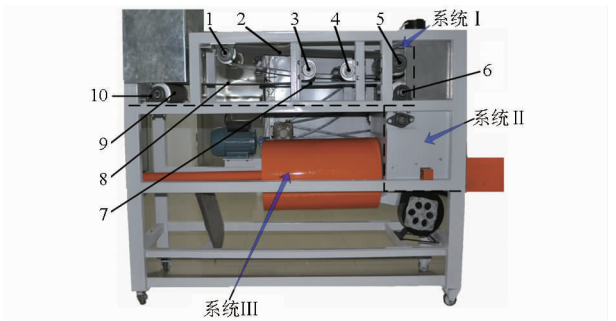


图 1 核桃柔性带剪切挤压式破壳取仁分离装置
Fig. 1 Walnut shearing-extrusion flexible shell crushing, kernel taking and shell-kernel separating device

- 1. 上从动托辊 2. 上工作带 3. 上挤压托辊 4. 下挤压托辊
- 5. 上驱动托辊 6. 下驱动托辊 7. 托板 8. 下工作带 9. 下从动托辊 10. 工作带松紧调节机构

柔性带剪切挤压破壳取仁系统位于整个机器的上部,主要由以下部件构成:上从动托辊、上工作带、上挤压托辊、下挤压托辊、上驱动托辊、下从动托辊、下工作带、托板、下驱动托辊、工作带松紧调节机构。柔性带剪切挤压破壳取仁系统包含上、下两部分。上部分:直径均为 100 mm 的上驱动托辊和上从动托辊,直径均为 30 mm 的上挤压托辊和下挤压托辊。上从动托辊位置可通过改变轴承座位置有效调节破壳区和脱壳取仁区两带间隙和楔形角度,以适用于各种尺寸的核桃。上工作带的尺寸为 1 590 mm × 350 mm,厚度为 4 mm。下部分:下驱动托辊的直径为 100 mm,下从动托辊的直径为 100 mm,下工作带的尺寸为 2 200 mm × 350 mm,厚度为 4 mm。上、下工作带均为 PVC 带,其胶面材质为聚氯乙烯。

工作带松紧调节机构如图 2 所示。轴承座支板上开有螺纹孔,机架上开有通槽,槽长度为 120 mm,轴承座放置在支板上,螺栓穿过螺纹孔和通槽将轴承座、支板固定在机架上。轴承座支板一侧的丝杠穿过机架上的螺纹孔,螺母安装在丝杠上,丝杠长度为 60 mm。在需要调节上下工作带松紧时,通过旋

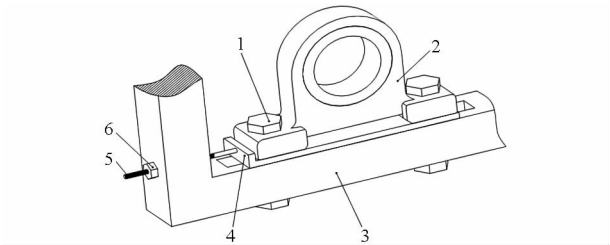


图 2 工作带松紧调节机构原理图

Fig. 2 Schematic of tightness regulator of working belt

1. 螺栓 2. 轴承座 3. 机架 4. 轴承座支板 5. 丝杠 6. 螺母
紧或者放松螺母可以改变支板的位置,进而调节松紧。

柔性带剪切挤压破壳系统的工作原理为:核桃进入上下两带的揉搓区之前,先通过破壳区,如图 3 所示。

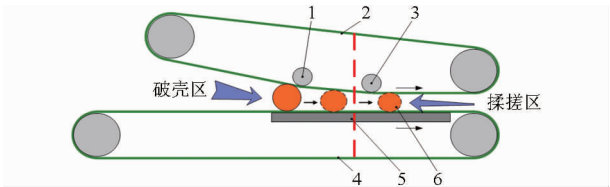


图 3 柔性带剪切挤压破壳系统原理图

Fig. 3 Schematic of flexible-belt shearing-extrusion system for shell crushing

1. 上挤压托辊 2. 上工作带 3. 下挤压托辊 4. 下工作带
5. 托板 6. 核桃

核桃滚动通过破壳区过程中,受到上挤压托辊和托板周期性的挤压和剪切。其中一部分核桃外壳会直接被压碎,露出核桃仁,而一部分核桃外壳只产生裂纹,破碎不完全。外壳破碎不完全的核桃进入上下工作带间隙之后,由于上下两带存在速度差,上工作带的速度大于下工作带的速度,核桃会在两带之间滚动,受到工作带的搓揉,分别对核桃施以挤压力和剪切力。由于间隙呈一定的楔形角度,核桃进入揉搓区越深,受到的挤压力和剪切力越大。当这两组力的合力大于裂纹扩张的临界结合力时,核桃壳上的裂缝开始扩展,直至壳体破碎。与上工作带接触的核桃外壳相对于核桃仁发生向前滑动,与下平带接触的核桃壳相对于核桃仁向后运动,造成外壳上下两部分之间的速度差。核桃继续前行,外壳之间位移增加,当达到一定程度时,核桃外壳破碎为几部分,此时外壳和核桃仁完全错开,整个破壳过程结束。

2 核桃破壳理论分析

2.1 壳体力学性能

承受外界载荷的核桃壳,当载荷增大到某一个值时,壳体会失去原来的形状,发生失稳破壳^[10]。

壳体失稳的临界压力为

$$p_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left(\frac{h}{r} \right)^2 \tag{1}$$

式中 p_{cr} ——临界压力,Pa
 E ——弹性模量,GPa
 μ ——泊松比 h ——核桃壳厚度,mm
 r ——核桃半径,mm

通过式(1)可以看出,对于某一品种的核桃,当其 E 、 μ 、 r 一定时,不同位置的壳厚度不同,壳体失稳的临界压力也不同,壳厚度越大,临界压力越大。经查阅,试验所用的核桃, $E = 0.18 \text{ GPa}$, $\mu = 0.3$; 随机选取 50 个样本,用游标卡尺测量样本的三维尺寸,如图 4 所示。经统计,98% 的核桃纵径 a 在 26.7 ~ 31.2 mm 之间,横径 b 在 25.4 ~ 29.4 mm 之间,侧径 c 在 23.1 ~ 27.2 mm 之间。核桃的平均直径为 25 mm,平均半径 $r = 12.5 \text{ mm}$ 。

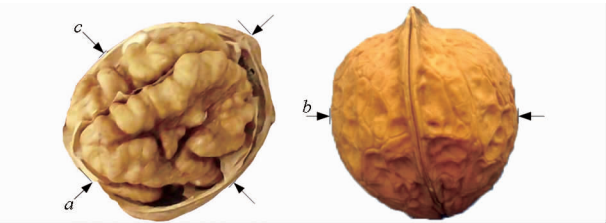


图 4 核桃结构图

Fig. 4 Structure of walnut

将随机选取的 50 个核桃试验样本分别进行破碎,用游标卡尺对每个核桃 4 个部位的壳厚度进行测量^[11],如图 5 所示。

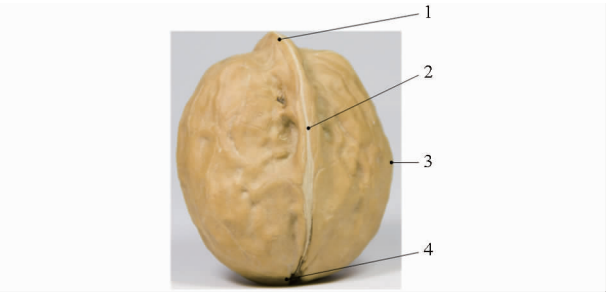


图 5 核桃壳厚度位置图

Fig. 5 Walnut shell thickness at four positions

1. 顶端 2. 缝合线附近 3. 最凸出处 4. 底端

顶端、缝合线处、最凸出处、底端 4 个位置核桃壳的厚度分别为 2.18、1.82、1.05、1.44 mm。

将已知参数分别代入式(1)中进行计算,4 个部位的临界压力分别为 $p_{cr1} = 6.62 \text{ MPa}$ 、 $p_{cr2} = 4.62 \text{ MPa}$ 、 $p_{cr3} = 1.54 \text{ MPa}$ 、 $p_{cr4} = 2.89 \text{ MPa}$ 。核桃受到上下工作带挤压,其接触处可简化为圆面,圆面面积为 $S = 7.1 \text{ mm}^2$,4 个部位的临界挤压力计算式为

$$F_{cr} = p_{cr} S \tag{2}$$

4 个部位的临界挤压力分别为 $F_{cr1} = 46.8 \text{ N}$ 、

$F_{cr2} = 32.8\text{ N}$, $F_{cr3} = 10.9\text{ N}$, $F_{cr4} = 20.5\text{ N}$ 。

2.2 核桃在一对法向集中力作用下的位移分析

吴子岳^[12]利用单轴压力测定仪测定了核桃壳受挤压时的压力和压缩变形量的关系,结果显示挤压方向、挤压速度及核桃品种对压缩刚度无显著影响,因此核桃可以简化为各项同性均匀的薄球壳。根据薄壳理论^[13],球形薄壳受压能力弱,受弯曲能力强。一对法向集中力 P 作用在均匀薄球壳上。球壳上任意一个平行圆截面 a 处的截面 A 上都存在着薄膜力 N_φ 、 N_θ , $N_{\varphi\theta} = N_{\theta\varphi}$, 如图 6 所示。 φ 为任意一条纬线上一点与 z 轴正向之间的球心角, θ 为同一条纬线上任意两点之间的圆心角。壳体中面上任一点的位置可由两个坐标 θ 和 φ 确定,同时 φ 、 θ 也可以表示力的指向。

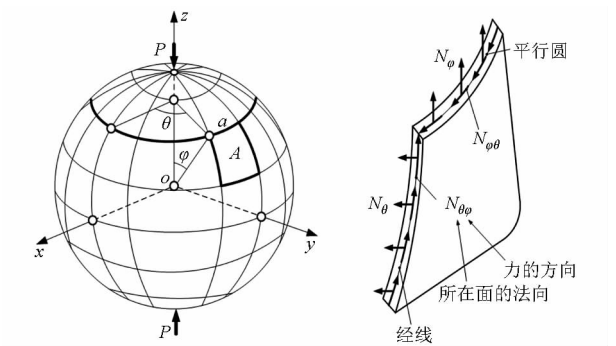


图 6 一对法向集中力作用在球壳及薄壳截面上内力示意图

Fig. 6 A pair of normal concentrated force acting on the spherical and shell internal force of thin shell section

核桃在压力作用下的位移包括了沿法线方向的位移 W 和沿切线方向的位移 U ,法线方向的位移 W 要比切线方向的位移 U 大得多。引起核桃破壳的因素主要是法向位移 W 的作用,因此主要讨论 W 与 P 之间的关系。

核桃壳是脆性材料,几乎没有塑性变形,故近似取泊松比 $\mu = 0$,内力与位移的关系为

$$\begin{cases} \frac{dU_{\parallel}}{d\varphi} + W_{\parallel} = \frac{r}{Eh} N_{\varphi} \\ U_{\parallel} \cot\varphi + W_{\parallel} = \frac{r}{Eh} N_{\theta} \end{cases} \quad (3)$$

在集中力处,即 $\varphi = 0$,式(3)求解可得

$$\begin{cases} U_{\parallel} = 0 \\ W_{\parallel} = -\frac{\sqrt{3}Pr}{8Eh^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $U_{\parallel}$ ——沿切线方向位移,mm
 $W_{\parallel}$ ——沿法线方向位移,mm

由式(4)知,当 r 、 h 和 E 给定时,法向集中力的法向位移 $W_{\parallel}$ 与其力 P 成正比。因此,如果集中力 P 越大,相应的位移也越大,因而壳中产生的内力越

大,壳越容易发生破裂。

吴斌芳等^[14]通过试验测得核桃在滚动挤压过程开始出现裂纹时,外壳平均形变量为 1.063 mm ,裂纹断开时,外壳平均形变量为 1.401 mm 。将 r 、 h 和 E 的值分别代入式(4),可以得到核桃壳不同位置裂纹产生和破碎时的临界力,计算结果如表 1 所示。

表 1 核桃壳不同位置处裂纹产生和破壳时的临界力
Tab.1 Critical force of crack initiation and breakage at different walnut shell positions N

壳厚/mm	位移/mm	
	1.063	1.401
2.18	154.13	203.14
1.82	128.68	169.59
1.44	101.81	134.18
1.05	74.24	97.80

从表 1 中可以看出,核桃外壳越厚,裂纹产生和破壳时所需要的力越大。当作用在不同位置的集中力超过相应的临界值时,核桃外壳就会破碎。

2.3 裂纹扩展条件

丁正耀等^[15]研究了不同的加载方式对核桃裂纹产生位置和扩展范围的影响,结果表明:在均布线载荷作用下,核桃应力分布区域近似为椭圆形。破裂形式是沿加载线破裂,核桃壳产生局部裂纹点多,裂纹点多则裂纹易扩展。

裂纹分为 3 种类型,分别为 I 型、II 型和 III 型^[16],如图 7 所示。I 型是张开型,II 型是滑开型,III 型是撕开型。核桃破壳后,裂纹的扩展形式主要为 I 型和 III 型。

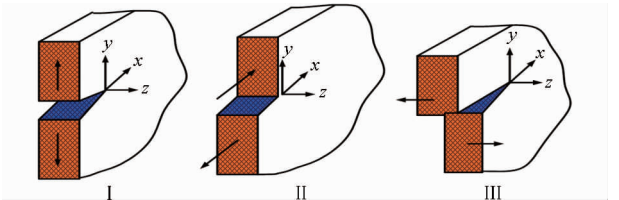


图 7 裂纹类型
Fig. 7 Crack styles

BERRY^[17]提出了裂纹快速扩展并脆性断裂的准则:在外力作用下,裂纹附近产生应力集中现象,裂纹虽有扩张趋势,但当外力没达到一定值时,它并不扩展,仅当外力加到一个临界值时,它才会扩展。裂纹长度与临界应力之间的关系为

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 γ ——单位面积的表面能,kJ/m²
 a ——裂纹长度,mm

经查阅,木料的单位面积表面能为 0.12 kJ/m^2 ,

核桃的弹性模量为 $0.18\text{ GPa}^{[18]}$ 。利用柔性刻度尺对所用试验核桃壳体的裂纹进行测量和统计,其平均长度为 20 mm 。利用以上已知参数,通过式(5)求得裂纹扩展的临界应力为 $\sigma_c = 0.23\text{ MPa}$ 。裂纹扩展所要的外力为

$$F = \frac{\sigma_c}{S_0}$$

(6)

式中 S_0 ——裂纹表面积, mm^2

核桃平均壳厚计算得 $h_v = 1.15\text{ mm}$,经过计算裂纹表面积为 $S_0 = h_v a = 23\text{ mm}^2$ 。裂纹扩展所用的外力通过式(6)求得 $\sigma_c = 19.1\text{ N}$,即核桃外壳破裂后,作用在外壳上的挤压力和剪切力超过 19.1 N ,就可使裂纹进一步扩大。

3 柔性带剪切挤压核桃破壳装置性能试验

3.1 试验装置与材料

试验所选核桃为云南漾濞核桃,如图 8b 所示。坚果呈扁圆球形,缝合线窄,中部略隆起,结合紧密。内褶皱壁及横隔膜退化,呈膜质,容易取仁,可取整仁。在图 8a 所示的试验样机上,针对上挤压托辊处工作带与下工作带间距、上下带速度差及核桃挤入夹角(如图 9 所示)3 种不同工况参数对核桃破壳效果进行性能试验。



图 8 试验装置与材料
Fig. 8 Test device and materials

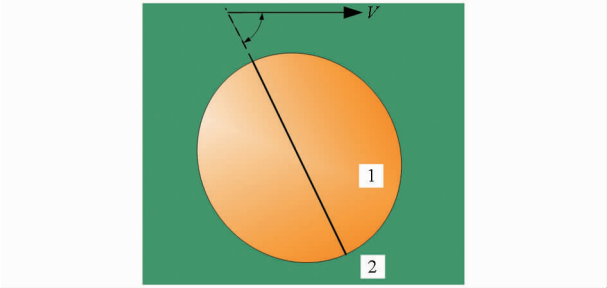


图 9 核桃挤入夹角示意图(俯视图)
Fig. 9 Extrusion included angle (vertical view)
1. 核桃 2. 下工作带

3.2 试验设计

试验选取平均直径为 25 mm 的核桃,不考虑核桃含水率、核桃形状等因素的影响,以上挤压托辊处工作带与下工作带间距 A 、上下带速度差 B 以及核桃挤入夹角 C 作为试验的 3 个因素进行研究。

单因素试验:通过固定其他因素,变动一个试验因素的方法,研究 A 、 B 、 C 3 个因素对核桃脱壳率、整仁率性能指标的影响规律,每个参数下选 50 个核桃进行重复试验。

正交试验:根据单因素试验,对影响脱壳性能指标的规律进行正交试验。试验选用 $L_9(3^4)$ 正交试验表,共进行 9 组试验^[19],每组试验各取核桃 50 个。进行三因素三水平正交试验。其中 A 分别是 23 、 24 、 25 mm (记为 A_1 、 A_2 、 A_3), B 分别是 0.14 、 0.19 、 0.23 m/s (记为 B_1 、 B_2 、 B_3), C 分别是 90° 、 45° 、 0° (记为 C_1 、 C_2 、 C_3)。

3.3 试验指标

为了更细致表达核桃脱壳程度和核桃仁完整水平,将核桃整仁率进行分类表达。核桃脱壳后,把 $1/2$ 个和 $1/4$ 个的核桃仁记作“一露仁”,小于 $1/4$ 个且大于 $1/8$ 个的核桃仁记作“二露仁”,小于 $1/8$ 个的核桃仁记作“碎仁”,没有从壳中脱落出来的核桃仁记作“未露仁”^[9]。试验指标可以定为一露仁率 η_1 、二露仁率 η_2 、碎仁率 η_3 、未露仁率 η_4 。将脱壳率记为 η_5 ,整仁率记为 η_6 。

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_1 = \frac{N_1}{N_0} \times 100\% \\ \eta_2 = \frac{N_2}{N_0} \times 100\% \\ \eta_3 = \frac{N_3}{N_0} \times 100\% \\ \eta_4 = \frac{N_4}{N_0} \times 100\% \\ \eta_5 = 1 - \eta_4 \\ \eta_6 = \eta_1 + \eta_2 \end{array} \right.$$

(7)

式中 N_0 ——核桃仁总个数
 N_1 ——一露仁个数 N_2 ——二露仁个数
 N_3 ——碎仁个数 N_4 ——未露仁个数

3.4 上挤压托辊处工作带与下工作带间距对破壳效果的影响

经过对试验结果的统计分析和比较,得出间距对露仁率、破壳率、整仁率影响情况如图 10、11 所示。

由图 10 不同间距下核桃露仁率可知,间距为 23 mm 时获得了最高的一露仁率和最低的二露仁率,分别为 85% 和 7% 。随着间距增大,一露仁率降低,二露仁率升高。间距为 22 mm 时,一露仁率最低,为 60% ,其二露仁率最高,为 14% ,碎仁率最低,为 25% ,未露仁率最低,为 1% 。当间距大于 22 mm 时,碎仁率随着间距的增加而降低,未露仁率随着间距的增加而增加。

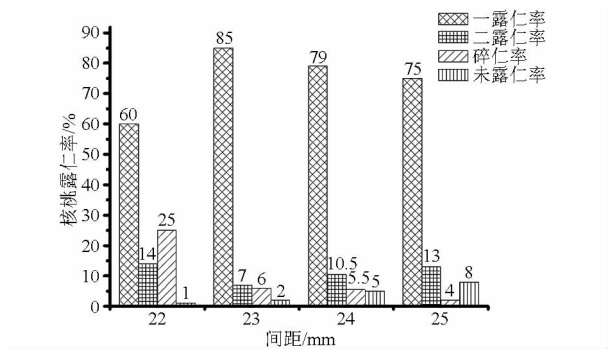


图 10 不同间距下露仁率

Fig. 10 Kernel rate with different top and low section belt spacings

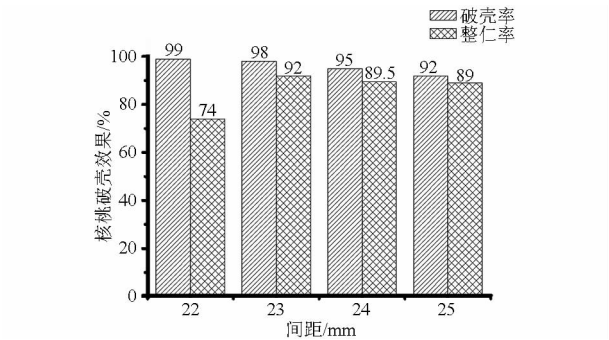


图 11 不同间距下破壳率和整仁率

Fig. 11 Shell-broken rate and kernel-unbroken rate with different top and low section belt spacings

由图 11 中 4 种不同间距下核桃破壳率、整仁率可知,间距为 22 mm 时,核桃破壳率最高,达到 99%,随着间距增加而降低;间距为 23 mm 时,整仁率最高,达到 92%,间距过大或者过小都会导致整仁率下降。

3.5 上下带速度差对破壳效果的影响

经过对试验结果的统计分析和比较,得出上下带速度差对破壳率和整仁率影响情况,如图 12、13 所示。

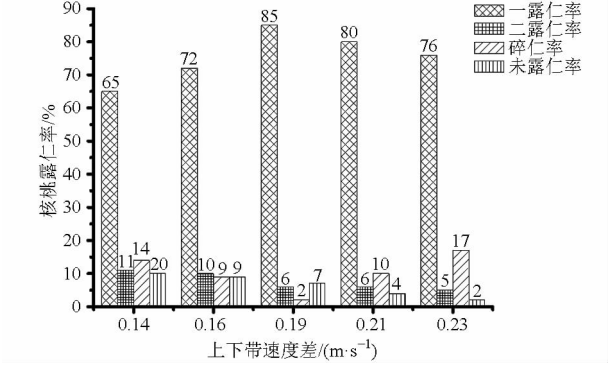


图 12 不同速度差下露仁率

Fig. 12 Kernel rates with different velocities

由图 12 不同上下带速度差下核桃露仁率可知,速度差为 0.19 m/s 时获得了最高的一露仁率和最低的碎仁率,分别为 85% 和 2%。当速度差小于

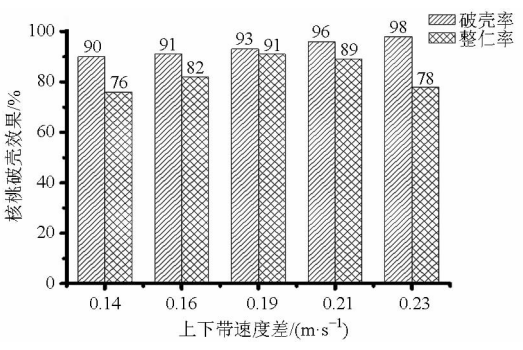


图 13 不同速度差下的破壳率和整仁率

Fig. 13 Shell-broken rate and kernel-unbroken rate with different velocity differences

0.19 m/s 时,一露仁率随着速度差的增大而增大,碎仁率随着速度差的增大而降低;当速度差大于 0.19 m/s 时,一露仁率随着速度差的增大而降低,碎仁率随速度差的增大而增大。速度差为 0.14 m/s 时,获得了最高的二露仁率和未露仁率,分别为 11% 和 10%,并且两项指标均随着速度差的增大而降低。

由图 13 中不同上下带速度差下核桃破壳率、整仁率可知,当速度差大于 0.14 m/s 时,核桃破壳率随着速度差增加而增加,速度差达到 0.23 m/s 时,核桃破壳率最高,达到 98%。速度差为 0.19 m/s 时,整仁率最高,达到 91%,上下带速度差过大或者过小都会导致整仁率下降。

3.6 核桃挤入夹角对破壳效果的影响

经过对试验结果的统计分析和比较,得出核桃挤入夹角对露仁率和破壳率、整仁率影响情况如图 14、15 所示。

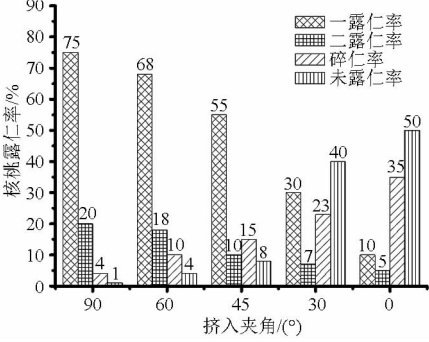


图 14 不同挤入夹角下露仁率

Fig. 14 Kernel rate with different extrusion included angles

由图 14 不同挤入夹角下核桃露仁率可知,夹角为 90°时获得了最高的一露仁率、二露仁率和最低的碎仁率、未露仁率,分别为 75%、20% 和 4%、1%。当挤入夹角小于 90°时,一露仁率和二露仁率随着挤入夹角的减小而降低,碎仁率和未露仁率随着挤入夹角的减小而提高。从图中可以看出,4 项指标随着夹角的减小,变化的幅度较大。

由图 15 不同挤入夹角下核桃破壳率、整仁率可

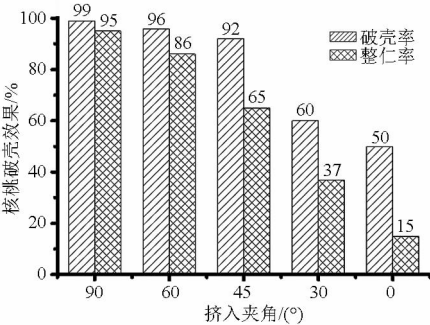


图 15 不同挤入夹角下破壳率和整仁率

Fig. 15 Shell-broken rate and kernel-unbroken rate with different extrusion included angles

知,当夹角为 90°时,核桃破壳率和整仁率均最高,达到 99% 和 95%。当挤入夹角小于 90°时,核桃破壳率和整仁率均随着角度的减小而下降并且下降的幅度较大。

3.7 核桃破壳性能正交试验

破壳性能正交试验方案与结果如表 2 所示。

表 2 破壳性能正交试验方案与结果

Tab.2 Orthogonal experimental scheme of hulling effect and experimental results							
试验号	A	B	C	一露仁率/%	二露仁率/%	碎仁率/%	未露仁率/%
1	1	1	1	70	17	10	3
2	1	2	2	75	18	5	2
3	1	3	3	60	11	16	13
4	2	1	2	65	13	14	6
5	2	2	3	68	15	12	5
6	2	3	1	54	10	16	20
7	3	1	3	30	7	18	45
8	3	2	1	38	8	15	39
9	3	3	2	43	9	17	35

表 3 为 3 种试验因素在不同的水平因素组合下的核桃破壳指标试验结果分析。从表中可以看出,一露仁率的极差 $R_A > R_C > R_B$,各因素从主到次的顺序为:A、C、B;二露仁率的极差 $R_A > R_B > R_C$,各因素从主到次的顺序为:A、B、C;碎仁率的极差 $R_A > R_B > R_C$,各因素从主到次的顺序为:A、B、C;未露仁率的极差 $R_A > R_B > R_C$,各因素从主到次的顺序为:A、B、C。

k_i 的大小反映了不同因素对相应指标的影响大小。对于 4 个指标:一露仁率越大越好;二露仁率越大越好;碎仁率越小越好;未露仁率越小越好。从表 3 中可以看出,对于不同的指标而言,不同因素的影响程度不同。间距对指标的影响程度最大,而速度差与挤入夹角的影响程度都低于间距并且两者的影响程度接近。由表 3 看出,当间距取 23 mm、上下带速度差取 0.19 m/s、挤入夹角为 45°时,即 $A_1B_2C_2$,

表 3 破壳性能正交试验结果分析				
Tab.3 Orthogonal experimental results analysis of hulling effect				
hulling effect				
指标	A	B	C	
一露仁率	k_1	68.3	55.0	54.0
	k_2	62.3	60.3	61.0
	k_3	37.0	52.3	52.7
	极差 R	94	24	25
	因素主次	A、C、B		
二露仁率	k_1	15.3	12.3	11.7
	k_2	12.7	13.7	13.3
	k_3	8	10	11
	极差 R	22	11	7
	因素主次	A、B、C		
碎仁率	k_1	10.3	14.0	13.7
	k_2	14.0	10.7	12.0
	k_3	16.7	16.3	15.3
	极差 R	19	17	10
	因素主次	A、B、C		
未露仁率	k_1	6	18	20.7
	k_2	10.3	15.3	14.3
	k_3	39.7	22.7	23.3
	极差 R	101	22	27
	因素主次	A、B、C		

这 4 项指标达到了最优的水平,破壳效果最好。此时一露仁率、二露仁率、碎仁率、未露仁率分别为 75%、18%、5%、2%,即破壳率为 98%,整仁率为 93%。

4 结论

(1)利用弹性力学理论对核桃壳不同位置的刚度进行分析,得到不同位置失稳时的临界力分别为 46.8 N、32.8 N、10.9 N、20.5 N。利用薄壳理论对核桃壳受挤压时进行内力和形变分析,得出核桃不同位置裂纹产生时的临界力分别为 154.13 N、128.68 N、101.81 N、74.24 N,破壳时的临界力分别为 203.14 N、169.59 N、134.18 N、97.80 N。利用断裂力学理论分析和计算了核桃破裂后裂纹扩展的条件,结果表明当产生的平均裂纹长度为 20 mm 时,裂纹扩展的临界外力为 19.1 N。

(2)单因素试验结果表明,间距为 22 mm 时,破壳率最高,为 99%,随间距增大,破壳率下降;间距为 23 mm 时,露仁率最高,为 92%,间距增大或减小,露仁率下降。上下带速度差为 0.23 m/s 时,破壳率最高,为 98%,随上下带速度差减小而减小;上下带速度差为 0.19 m/s 时,露仁率最高,为 91%,上下带速度差增大或减小,露仁率下降。挤压夹角为 90°时,破壳率最高,为 99%,随着夹角的减小而降低;挤压夹角为 90°时,露仁率最高,为 95%,随着夹

角的减小而降低。最好，一露仁率、二露仁率、碎仁率、未露仁率分别为
(3) 正交试验结果表明,当间距取 23 mm、上下 75%、18%、5%、2%,即破壳率为 98%,整仁率为
带速度差取 0.19 m/s、挤入夹角为 45°时,破壳效果 93%。

参 考 文 献

1 李夕勃,赵书岗,王红霞,等. 核桃坚果硬壳结构与木质素和纤维素相关性研究[J]. 湖北农业科学, 2012,51(22):5076 – 5079.
LI Xibo, ZHAO Shugang, WANG Hongxia, et al. Relationship between walnut shell structures and the content of lignin and cellulose[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012,51(22):5076 – 5079. (in Chinese)

2 洪翎,曹成茂,毕如俊,等. 手剥山核桃破壳机的设计与试验[J]. 包装与食品机械, 2009,27(6):31 – 34.
HONG Ling, CAO Chengmao, BI Rujun, et al. Equipment design and test of shell-breaking machine for hand-stripping pecan[J]. Packaging and Food Machinery, 2009,27(6):31 – 34. (in Chinese)

3 王新昌. 手剥山核桃的加工制作方法: 中国, 1200620[P]. 2005 – 05 – 11.

4 周祖锬,郭其泰. 杏核物理特性的实验研究[J]. 北京农业工程大学学报,1995,15(1):31 – 34.
ZHOU Zue, GUO Qitai. Experimental research on physical property of apricot core[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1995,15(1):31 – 34. (in Chinese)

5 吴子岳. 核桃剥壳的力学分析[J]. 南京农业大学学报,1995,18(3):116 – 123.
WU Ziyue. Mechanical anaiysis of cracking walnut[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,1995,18(3):116 – 123. (in Chinese)

6 袁巧霞,陈红,刘清生. 辊板式银杏脱壳装置的试验研究[J]. 农业机械学报,2004,35(3):181 – 183.
YUAN Qiaoxia, CHEN Hong, LIU Qingsheng. The roller plate experimental study of ginkgo hulling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(3):181 – 183. (in Chinese)

7 李忠新,刘奎杨,杨莉玲,等. 锥篮式核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012,43(增刊):146 – 152.
LI Zhongxin, LIU Kuiyang, YANG Liling, et al. Design and experiment of walnut-cracking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):146 – 152. (in Chinese)

8 宋率展. 特色农产品芡实脱壳工艺及装备研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
SONG Shuaizhan. Technology shelling of characteristic agricultural gorgon and equipment research[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006. (in Chinese)

9 董诗韩,史建新. 多辊挤压式核桃破壳机的设计与试验[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(1): 62 – 65.
DONG Shihan, SHI Jianxin. Design and experiment of machine for shell-breaking of walnut with multi-roller extrusion[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2011,34(1): 62 – 65. (in Chinese)

10 徐芝纶. 弹性力学(上,下)[J]. 北京:高等教育出版社,1990.

11 吴瑶,赵超,张中卫,等. 山核桃属性测量及其剥壳破碎临界值的压缩刚度分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9): 5338 – 5339.
WU Yao, ZHAO Chao, ZHANG Zhongwei, et al. Measurement of walnut properties and compressive stiffness analysis on the critical value of shell-cracking[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(9):5338 – 5339. (in Chinese)

12 吴子岳. 绵核桃剥壳取仁机械的研究[J]. 农业工程学报, 1995,11(4):164 – 169.
WU Ziyue. Research on shell-crushing and kernel-taking of walnut[J]. Transactions of the CSAE, 1995,11(4):164 – 169. (in Chinese)

13 杨耀乾. 薄壳理论[M]. 北京:中国铁路出版社,1981.

14 吴斌芳,周国柱. 绵核桃机械剥壳取仁参数选择及实验分析[J]. 湖北工学院学报, 1997, 12(4): 56 – 59.
WU Binfang, ZHOU Guozhu. Parameter selection and experimental analysis on walnut mechanical shell-crushing and kernel-taking[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 1997, 12(4): 56 – 59. (in Chinese)

15 丁正耀,朱德泉,钱良存,等. 山核桃坚果有限元模型建立及受力分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2010(6): 6 – 9.
DING Zhengyao, ZHU Dequan, QIAN Liangcun, et al. Finite element modeling and mechanical analysis of hickory kernel[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2010(6):6 – 9. (in Chinese)

16 沈成康. 断裂力学[M]. 上海:同济大学出版社,1996.

17 BERRY J P. Some kinetic considerations of the Griffith criterion for fracture—I: equations of motion at constant force[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(3): 194 – 206.

18 MOAVENI S. 有限元分析: ANSYS 理论与应用[M]. 王崧,刘丽娟,董春敏,等,译. 北京:电子工业出版社, 2005.

19 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.