

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.015

# 柔性带差速挤压核桃脱壳性能试验

刘明政<sup>1</sup> 李长河<sup>1</sup> 张彦彬<sup>1</sup> 杨敏<sup>1</sup> 侯亚丽<sup>1</sup> 高连兴<sup>2</sup>

(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:** 设计了核桃破壳取仁分离装置, 但存在破壳不完全、碎壳未脱落的现象。为此利用装置中的柔性带差速挤压脱壳系统对核桃进一步脱壳取仁并对其效果进行分析。采用单因素试验方法分别探究上下带间距  $A$ 、上下带速度差  $B$  及上工作带张紧力  $C$  对核桃脱壳效果的影响, 进而设计正交试验, 分析试验因素对脱壳取仁效果的影响。试验结果表明: 对于一露仁率和二露仁率, 影响顺序为  $C$ 、 $A$ 、 $B$ ; 对于碎仁率和未露仁率, 影响顺序为  $A$ 、 $C$ 、 $B$ 。在上下带间距为 14 mm、上下带速度差为 0.19 m/s、上工作带张紧力为 231 N 的参数下脱壳效果最为理想, 一露仁率、二露仁率、碎仁率、未露仁率分别为 77%、16.7%、4.3%、2%, 即脱壳率为 98%, 整仁率为 93.7%。

**关键词:** 核桃; 脱壳; 柔性带; 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)09-0099-09

## Performance Test of Walnut Shelling Using Flexible-belt and Differential Velocity Extrusion

Liu Mingzheng<sup>1</sup> Li Changhe<sup>1</sup> Zhang Yanbin<sup>1</sup> Yang Min<sup>1</sup> Hou Yali<sup>1</sup> Gao Lianxing<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** A walnut shelling machine with functions of shell crushing, kernel taking and shell-kernel separating was designed, which could increase the shell-broken rate and kernel-unbroken rate. However, the problems of incomplete broken-shell and unhulling crushed-shell were also remained. Thus, the flexible-belt and differential velocity extrusion system was used to make the walnut kernel out and the effect of that operation was analyzed. The results showed that when the mean crack length was 20 mm and the critical external force for crack extension was 19.1 N, the cracks could be further extended. One-factor test was carried out to explore the influences of the top and low section belt spacing ( $A$ ), top and low section speed difference ( $B$ ) and upper belt tension ( $C$ ) on hulling, and the orthogonal experiment was carried out to analyze the influence of the above three factors. According to the experimental results, the influences on the first grade kernel rate and the second grade kernel rate were  $C > A > B$ , and for kernel-breaking rate and kernel-unseen rate,  $A > C > B$ . When the top and low section belt spacing was 14 mm, top and low section speed difference was 0.19 m/s and upper belt tension was 231 N, the hulling effect was optimal (hulling rate was 98% and kernel-unbroken rate was 93.7%).

**Key words:** walnut; shelling; flexible-belt; performance test

### 引言

我国核桃栽培面积大, 产量高, 具有极高的食

用<sup>[1]</sup>和药用价值<sup>[2]</sup>。采用传统的核桃破壳取仁方式, 加工效率低、成本高, 卫生无法保证。机械破壳法设备简单, 成本低, 破壳效果可通过改进结构提

收稿日期: 2016-01-18 修回日期: 2016-02-03

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研究, E-mail: lmzzz654321@163.com

通信作者: 李长河(1966—), 男, 教授, 主要从事农业机械装备设计研究, E-mail: sy\_lichanghe@163.com

升。但是多数核桃机械剥壳存在的主要问题是漏剥或破壳不完全、剥壳率低;部分核桃仁夹带在碎壳中难以取出,核桃仁损失率高、整仁率低;对不同形状尺寸核桃的适应性差<sup>[3]</sup>。核桃破壳不完全,壳体上会存在很多裂纹或者只在某个部位外壳破碎,其壳体整体的强度就会大幅度下降,碎壳之间的结合力较小,因此,再对核桃进行脱壳处理就不能施力过大。

当前核桃机械脱壳主要有5种方式:挤压式、剪切式、磨削式、撞击式及揉搓式。李忠新等<sup>[4]</sup>在剪切挤压的基础上建立了“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。但以上脱壳方式均采用刚性原理对核桃进行挤压、剪切、磨削及揉搓,易导致核桃仁损坏,高露仁率降低。针对目前机械破壳取仁技术的瓶颈,结合研究现状<sup>[5]</sup>,笔者设计了核桃破壳取仁分离装置<sup>[6-7]</sup>,并进行了破壳效果、破壳机理分析与性能试验<sup>[8]</sup>。本文依据剪切挤压原理设计柔性带核桃脱壳取仁装置<sup>[9]</sup>,并进行核桃脱壳理论分析与试验研究。

## 1 试验装置

试验装置如图1所示。柔性带差速挤压破壳取仁系统(图1中虚线a以上部分),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区间隙和楔形角度,以适合各种尺寸的核桃。上工作带的尺寸为1 590 mm × 350 mm,厚度为4 mm。下部分:下驱动托辊和下从动托辊直径为100 mm,下工作带尺寸为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。

柔性带差速挤压核桃破壳取仁系统分为破壳区

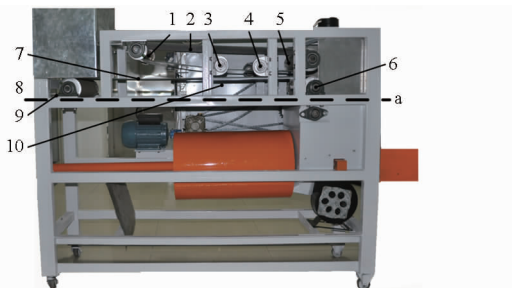


图1 核桃破壳取仁分离装置结构图

Fig. 1 Walnut 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. 下工作带 8. 下从动托辊
9. 工作带松紧调节机构 10. 托板

(图2中虚线左侧)和脱壳区(图2中虚线右侧),如图2所示。在破壳区,部分核桃经过上挤压托辊与托板的间隙受到挤压剪切,能够有效破壳并脱壳,取得较完整的核桃仁,但是部分核桃由于受力不均或者破壳间距不合适等因素,壳体只产生裂纹或者只在部分位置破碎,碎壳不能脱离核桃仁,露仁程度较低,这部分核桃就会进入脱壳区。本文主要对脱壳区进行机理分析及其不同因素对核桃脱壳取仁效果的影响分析。

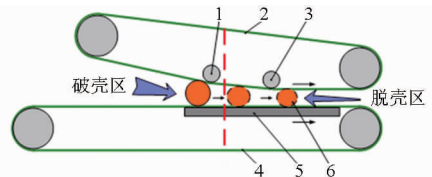


图2 柔性带剪切挤压核桃破壳取仁系统示意图  
Fig. 2 Shell crushing and hulling system using flexible belt shearing-extrusion

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

## 2 核桃脱壳理论分析

### 2.1 脱壳区核桃受力分析及脱壳机理

核桃在脱壳取仁区中的受力分析如图3所示。

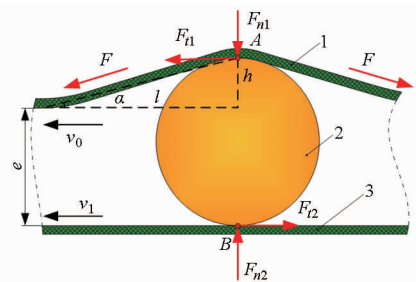


图3 脱壳区核桃受力分析图

Fig. 3 Diagram of walnut deformation under stress in hulling zone

1. 上工作带 2. 核桃 3. 下工作带

从图3中可以看出,产生挠度的上工作带与水平方向呈一定角度 $\alpha$ ,其最高点与未发生形变的上工作带的水平距离为 $l$ ,垂直距离为 $h$ ,因此角度 $\alpha$ 与 $h$ 、 $l$ 以及 $h$ 与直径 $d$ 、 $e$ 之间的关系为

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{h}{l} \\ h = e - d \end{cases} \quad (1)$$

核桃A、B点受到上下工作带的挤压力和剪切力分别为

$$\begin{cases} F_{n1} = F_{n2} = \frac{2F \sin \alpha}{n} \\ F_{t1} = \frac{F \cos \alpha}{n} \\ F_{t2} = \mu F_{n2} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $F_{n1}$ 、 $F_{n2}$ ——上、下工作带对核桃的挤压力, N  
 $F_{t1}$ 、 $F_{t2}$ ——上、下工作带对核桃的剪切力, N  
 $F$ ——上工作带张紧力, N

$\mu$ ——核桃与工作带之间的摩擦因数, 取 0.4  
 $n$ ——沿下工作带宽度方向上核桃个数

在不同的上下带间距下,  $h$ 、 $l$  的测量值和  $\alpha$  的计算值如表 1 所示。

表 1  $h$ 、 $l$  和  $\alpha$  之间的数值关系

Tab. 1 Numerical relationship among  $h$ ,  $l$  and  $\alpha$

参数	间距/mm				
	14	15	16	17	18
$h$ /mm	11	10	9	8	7
$l$ /mm	15	15.2	15.5	15.7	16
$\alpha$ /°	36	33	30	27	23

角度  $\alpha$  在范围  $23^\circ \sim 36^\circ$  内时, 上工作带对核桃的剪切力为  $F_{t1} = (0.92 \sim 0.81) \frac{F}{n}$ , 下工作带对核桃的剪切力为  $F_{t2} = (0.31 \sim 0.47) \frac{F}{n}$ ,  $F_{t1} > F_{t2}$ 。

脱壳区的基本工作构件是一对富有柔性的 PVC 工作带, 且两工作带进行同向不等速的传动。破壳不完全的核桃进入脱壳区后, 受到上下工作带的剪切挤压力。由于上下工作带呈一定的楔形角度, 核桃受到的剪切挤压力不断增大。核桃进入水平间隙后, 如图 4a 所示, 剪切挤压力增大到大于裂纹继续扩大的临界力时, 核桃壳会进一步破碎, 随着核桃滚动, 裂纹会均匀扩展到整个外壳。由于上工作带对核桃的剪切力大于下工作带, 因而在接触上工作带一边的核桃碎壳首先开始脱去, 如图 4b 所

示。随着核桃继续前进, 接触上工作带一侧的核桃碎壳随着上工作带向前移动, 与核桃仁逐渐脱离, 上工作带开始与核桃仁接触, 此时与下工作带接触的核桃碎壳开始相对下工作带向后运动。当核桃旋转过一定的角度后, 核桃壳体基本破碎并脱去, 取得核桃仁, 如图 4c。

### 2.2 裂纹扩展条件

裂纹分为 3 种类型, 分别为 I 型、II 型和 III 型, 如图 5 所示。I 型是张开型, II 型是滑开型, III 型是撕开型<sup>[10]</sup>。核桃破壳后, 裂纹的扩展形式主要为 I 型和 III 型。

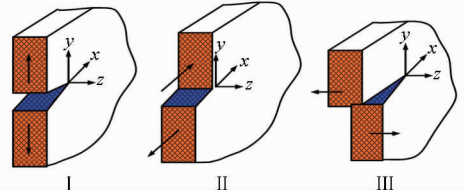


图 5 裂纹类型  
 Fig. 5 Crack styles

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

$$\sigma_c = \left( \frac{2E_1\gamma}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中  $\sigma_c$ ——临界应力, MPa  
 $\gamma$ ——单位面积的表面能, kJ/m<sup>2</sup>  
 $a$ ——裂纹长度, mm  
 $E_1$ ——核桃外壳的弹性模量, MPa

木料的单位面积表面能为 0.12 kJ/m<sup>2</sup>, 核桃的弹性模量为 0.18 GPa。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 (3) 求得裂纹扩展的临界应力为  $\sigma_c = 0.23$  MPa。裂纹扩展需要的外力为

$$F_1 = \frac{\sigma_c}{S_1} \quad (4)$$

式中  $F_1$ ——裂纹扩展需要的外力, N  
 $S_1$ ——裂纹表面积, mm<sup>2</sup>

试验所用核桃平均壳厚  $h_v = 1.15$  mm, 经计算裂纹表面积为  $S_1 = h_v a = 23$  mm<sup>2</sup>。裂纹扩展所需外力可通过式 (4) 求得, 为  $\sigma_c = 19.1$  N, 即核桃外壳破裂后, 作用在外壳上挤压力和剪切力超过 19.1 N, 就可使裂纹进一步扩大。

### 3 脱壳性能试验

#### 3.1 试验材料

试验所选核桃为云南漾濞核桃<sup>[11]</sup>, 随机选取

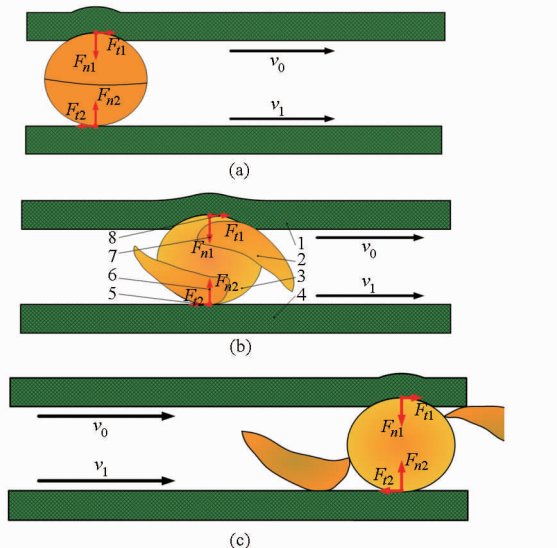


图 4 柔性带核桃脱壳取仁过程示意图

Fig. 4 Process of hulling and kernel taking by flexible belt

1. 上工作带
2. 核桃壳
3. 核桃仁
4. 下工作带
5. 下剪切力
6. 下挤压力
7. 上挤压力
8. 上剪切力

50个样本,用游标卡尺测量样本的三维尺寸。由于核桃近似球体,经过统计,核桃平均直径为25 mm。

核桃在经过破壳区后,部分核桃能够得到有效破壳并脱壳,但仍有部分核桃并没有充分破壳,只是壳体产生裂纹或者部分破碎,碎壳没有脱离核桃仁,露仁率很低。试验装置中的脱壳区就是针对此类核桃,如图6所示。

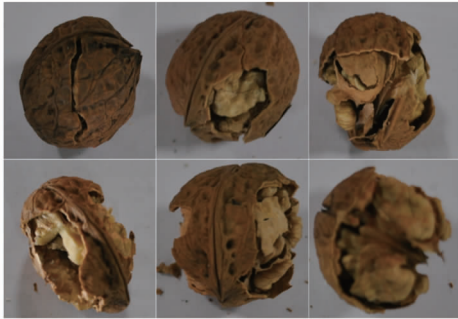


图6 试验核桃样品

Fig.6 Experimental walnut samples

### 3.2 上工作带张紧力测量及结果分析

要使工作带正常有效工作,必须使工作带保持一定的张紧力:张紧力过小,容易出现打滑,不能有效传动;张紧力过大,工作带刚性太大,张紧装置起不到缓冲作用,同时工作带与托辊之间的摩擦力会增加,造成发动机功率损失以及加快工作带的磨损速度<sup>[12]</sup>。因此张紧力需要选择合适的范围。

在工作带的线弹性范围内,上工作带受到拉伸后,其中的应力 $\sigma$ 与应变 $\varepsilon$ 成正比,满足广义胡克定律<sup>[13]</sup>

$$\sigma = E_2 \varepsilon \quad (5)$$

式中  $\sigma$ ——应力,MPa  $\varepsilon$ ——应变, $\mu\varepsilon$

$E_2$ ——工作带弹性模量,MPa

上工作带中的张紧力计算式为

$$F = \sigma S_2 \quad (6)$$

式中  $S_2$ ——上工作带截面面积, $\text{mm}^2$

为探究上工作带张紧力对核桃脱壳效果的影响,需要对上工作带张紧力进行测量。工作带张紧后,其张紧力无法直接测得,试验利用应变片组成“半桥单补”线路测量带的张力,上工作带张紧力测量系统如图7所示。

通过改变工作带张紧装置的位置读取显示器上相应的电阻应变值。工作带松紧调节机构在不同位置的示意图如图8所示。

PVC带弹性模量为 $E_2 = 2.41 \text{ GPa}$ ,上工作带截面尺寸为 $350 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,则面积 $S = 1400 \text{ mm}^2$ ,通过式(6)计算可得到上工作带在不同位置的张紧力,如表2所示。位置A和E的张紧力分别为工作带能有效工作的最小和最大张紧力。

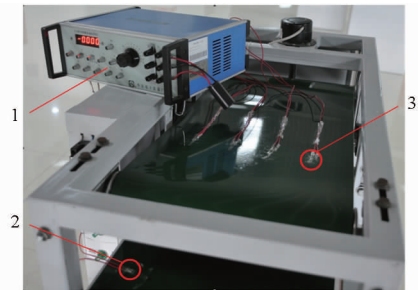


图7 上工作带张紧力测量系统

Fig.7 Measurement system of upper working belt tension

1.静态电阻应变仪 2.温度补偿片 3.电阻应变片

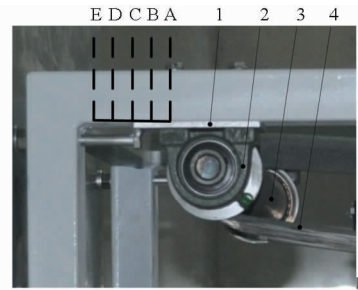


图8 工作带松紧调节范围

Fig.8 Working belt tightness regulator in different

locations

1.工作带松紧调节机构 2.轴承座 3.上从动托辊 4.上工作带

表2 不同应变对应的张紧力

Tab.2 Different strain values corresponding to the tension

参数	位置				
	A	B	C	D	E
应变/ $\mu\varepsilon$	26.5	48.7	68.5	89.2	100.1
应力/MPa	0.064	0.116	0.165	0.214	0.241
张紧力/N	89.6	162.4	231	299.6	337.4

裂纹扩展所需的临界外力 $F_{cr} = 19.1 \text{ N}$ ,沿下工作带宽度方向上核桃个数为 $n = 10$ 个,当挤压力 $F_{n1}$ 、 $F_{n2}$ 和剪切力 $F_{t1}$ 、 $F_{t2}$ 分别为19.1 N时,所需要的上工作带张紧力 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 由式(2)计算,结果如表3所示。

表3 不同间距下裂纹扩展所需张紧力

Tab.3 Crack propagation required tension under different spacings

张紧力	尺寸/mm				
	14	15	16	17	18
$F_1$ 、 $F_2$	162.5	175.3	191.0	210.4	244.4
$F_3$	236.0	227.8	220.5	214.4	207.5
$F_4$	406.3	438.3	477.5	526.0	611.0

通过表3可以看出,上下工作带间距在14~18 mm范围内,挤压力 $F_{n1}$ 、 $F_{n2}$ 和剪切力 $F_{t1}$ 所对应的张紧力 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 均在工作带有效工作的张紧力范围内,而剪切力 $F_{t2}$ 所对应的张紧力 $F_4$ 过大,超过了工作带有效工作的最大张紧力,因此,在装置正常工

作情况下,剪切力  $F_{t2}$  并不能有效扩展裂纹,通过调节上工作带的松紧和上下带的间距,挤压力  $F_{n1}$ 、 $F_{n2}$  和剪切力  $F_{t1}$  均能有效扩展裂纹。

### 3.3 核桃脱壳效果试验方案

#### 3.3.1 试验指标

为了更细致地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”<sup>[14]</sup>。试验指标为一露仁率  $\eta_1$ ,二露仁率  $\eta_2$ ,碎仁率  $\eta_3$ ,未露仁率  $\eta_4$ 。将脱壳率记为  $\eta_5$ ,整仁率记为  $\eta_6$ 。

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_1 = \frac{N_1}{N_0} \times 100\% \\ \eta_2 = \frac{N_2}{N_0} \times 100\% \\ \eta_3 = \frac{N_3}{N_0} \times 100\% \\ \eta_4 = \frac{N_4}{N_0} \times 100\% \\ \eta_5 = 1 - \eta_4 \\ \eta_6 = \eta_1 + \eta_2 \end{array} \right. \quad (7)$$

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

#### 3.3.2 试验设计

要得到高质量的核桃仁,刚采摘的核桃必须要去掉外层绿皮并进行干燥,核桃壳干燥的标准含水率为 8%。核桃破壳取仁分离装置所针对的核桃为干核桃,所选的试验核桃样本的外壳含水率基本为 8%。较小的含水率差异对核桃外壳的力学性能影响不大。

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,选取上下工作带间距  $A$ 、上下带速度差  $B$  以及上工作带张紧力  $C$  为试验的 3 个因素进行研究。

试验分两步进行:

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,每个参数均选 50 颗核桃进行重复试验。

正交试验:根据单因素试验,对脱壳性能指标的影响规律进行正交试验。试验选用  $L_9(3^4)$  正交试

验表,共进行 9 组试验<sup>[15]</sup>,每组试验各取核桃 50 个。将  $A$ 、 $B$ 、 $C$  3 个试验因素,分别取 3 个因素水平进行三因素正交试验。其中  $A$  分别是 14、16、18 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 89.6、231、337.4 N(记为  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ )。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 单因素试验

#### 4.1.1 上下工作带间距对脱壳效果的影响

为了研究上下工作带间距对脱壳效果的影响,在其他因素不变时,分别取上下工作带间距 14、15、16、17、18 mm 5 个因素水平进行单因素试验。

对试验结果进行统计分析和比较,得出间距对露仁率和脱壳率、整仁率的影响,如图 9、10 所示。

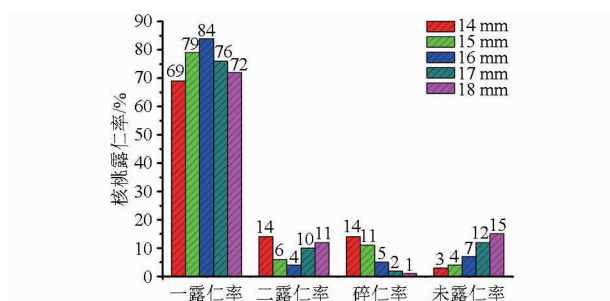


图 9 核桃在不同间距下的露仁率

Fig. 9 Kernel exposing rates under different spacings

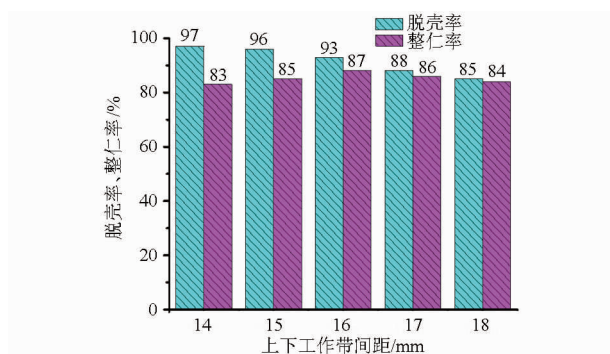


图 10 核桃在不同间距下的脱壳率和整仁率

Fig. 10 Walnut hulling rate and kernel-unbroken rate under different spacings

由图 9 中 5 种不同间距下核桃露仁率可知,间距为 16 mm 时获得了最高的一露仁率和最低的二露仁率,分别为 84% 和 4%。当间距小于 16 mm 时,一露仁率随着间距的增大而升高,二露仁率随着间距的增大而降低;当间距大于 16 mm 时,一露仁率随着间距的增大而降低,二露仁率随着间距的增大而升高。间距为 14 mm 时,一露仁率最低,达到 69%,二露仁率最高,为 14%,碎仁率最高,为 14%,未露仁率最低,为 3%。当间距大于 14 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。

由图 10 中 5 种不同间距下核桃脱壳率、整仁率可知,间距为 14 mm 时,核桃脱壳率最高,达到 97%,随着间距增加而降低。间距为 16 mm 时,整仁率最高,达到 87%,间距过大或者过小都会导致整仁率下降。这是由于当间距为 14 mm 时,已经产生裂纹或破碎的核桃外壳受到的上下工作带挤压力和剪切力远大于其结合力,随着核桃滚动,外壳迅速进一步破碎并脱离,留在碎壳中的核桃仁极少,露出核桃仁就会直接受到工作带的挤压力和剪切力,导致核桃仁大量断裂,同时产生较多的碎仁。间距为 16 mm 时,核桃外壳受到挤压力而产生的形变基本等于壳仁间距,外壳能够充分均匀破碎,同时剪切力使碎壳脱离核桃仁,只有少部分的核桃仁仍嵌在壳中。脱壳后核桃仁受到合适的挤压力,不会造成过多的损害,由于核桃仁形状的不均匀性,在滚动过程中,也会受到一定的破坏而产生碎仁。间距增大,核桃受到上下工作带的挤压剪切作用减弱,核桃壳体上的裂纹扩展不够均匀和充分,整体脱壳率下降,未露仁率升高,碎仁率降低。

#### 4.1.2 上下带速度差对脱壳效果的影响

为了研究上下带速度差对脱壳效果的影响,在其他因素不变时,分别取上下带速度差 0.14、0.16、0.19、0.21、0.23 m/s 5 个因素水平进行单因素试验。

对试验结果进行统计分析和比较,得出上下带速度差对脱壳率和整仁率的影响,如图 11、12 所示。

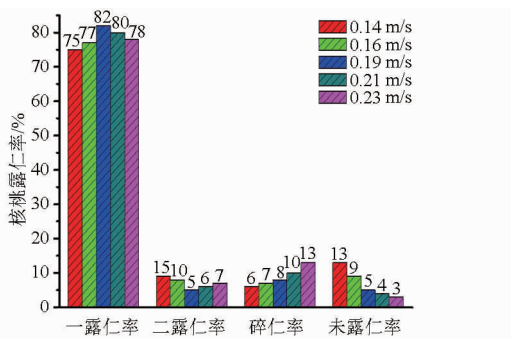


图 11 核桃在不同速度差下的露仁率

Fig. 11 Kernel exposing rates under different speed differences

由图 11 中 5 种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 82% 和 5%。当速度差小于 0.19 m/s 时,一露仁率随着速度差的增大而升高,二露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,二露仁率随着速度差的增大而升高。速度差为

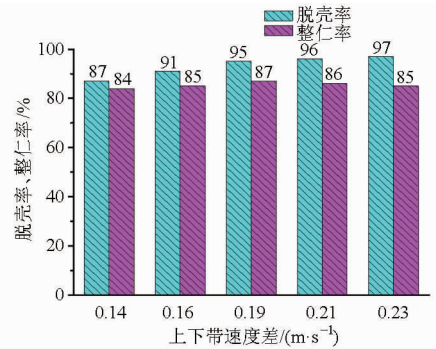


图 12 核桃在不同上下带速度差下的脱壳率和整仁率

Fig. 12 Walnut hulling rate and kernel-unbroken rate under different speed differences

0.14 m/s 时,一露仁率最低,为 75%,二露仁率最高,为 15%,碎仁率最低,为 6%,未露仁率最高,为 13%。当速度差大于 0.14 m/s 时,碎仁率随着速度差的增大而升高,未露仁率随着速度差的增大而降低。

由图 12 的 5 种不同上下带速度差下核桃脱壳率、整仁率可知,当速度差大于 0.14 m/s 时,核桃脱壳率随着速度差增加而增加,速度差达到 0.23 m/s 时,核桃脱壳率最高,达到 97%。速度差为 0.19 m/s 时,整仁率最高,达到 87%,上下带速度差过大或者过小都会导致整仁率下降。

这是由于在揉搓范围内,当上下带速度差较小时,核桃在间隙内滚动速度较小,受力过程较长,脱壳后核桃仁与上下工作带接触时间较长而受到较多的挤压和剪切,造成较多的损害,导致一露仁率较低,二露仁率较高。核桃受到上下工作带揉搓的强度较小,不利于外壳上的裂纹扩展,壳体破裂不完全,碎壳不能有效脱离核桃,较多的核桃仁仍然留在未破碎的壳中,导致未露仁率较高。但是速度差较小,工作带的震动较轻,对核桃仁损害减轻,产生的碎仁少,碎仁率较低。提高上下带速度差,核桃滚动速度提高,核桃与上下工作带接触点处受力过程缩短,脱壳后核桃仁与上下工作带接触时间缩短而受到的挤压剪切减小,损害程度降低,一露仁率提高,二露仁率下降,同时上下工作带揉搓的强度增强,有利于裂纹扩展,壳体破裂范围扩大,破碎充分,未露仁率下降。但是工作带的震动加强,对核桃仁损害增加,碎仁率升高。如果速度差过大,揉搓作用过强,工作带的震动强度较大,对核桃仁损害较大,一露仁率较低,二露仁率较高,碎仁率较高,但是壳体破裂充分,未露仁率较低。

#### 4.1.3 上工作带张紧力对脱壳效果的影响

为了研究上工作带张紧力对脱壳效果的影响,在其他因素不变时,分别取上工作带张紧力 89.6、

162.4、231、299.6、337.4 N 5 个因素水平进行单因素试验。

对试验结果进行统计分析和比较,得出张紧力对露仁率和脱壳率、整仁率的影响,如图 13、14 所示。

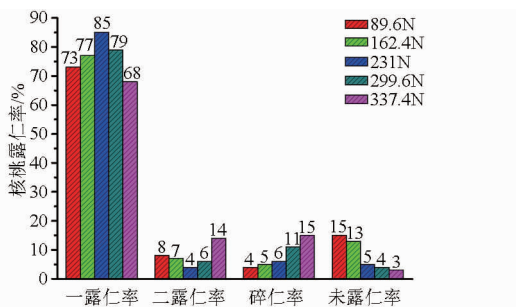


图 13 核桃在不同张紧力下的露仁率

Fig. 13 Kernel exposing rates under different tensions

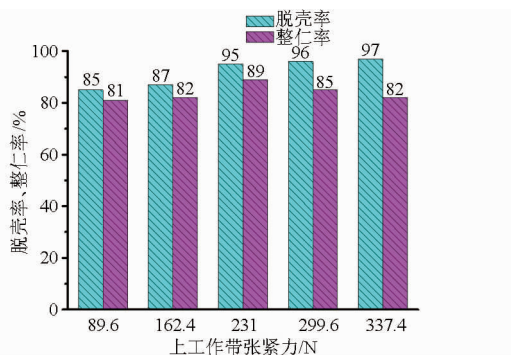


图 14 核桃在不同张紧力下的脱壳率和整仁率

Fig. 14 Walnut hulling rate and kernel-unbroken rate under different tensions

由图 13 的 5 种不同张紧力下核桃露仁率可知,张紧力为 231 N 时获得了最高的一露仁率和最低的二露仁率,分别为 85% 和 4%。当张紧力小于 231 N 时,一露仁率随着张紧力的增大而升高,二露仁率随着张紧力的增大而降低;当张紧力大于 231 N 时,一露仁率随着张紧力的增大而降低,二露仁率随着张紧力的增大而升高。张紧力为 89.6 N 时,碎仁率最低,为 4%,未露仁率最高,为 15%。当张紧力大于 89.6 N 时,碎仁率随着张紧力的增大而提高,未露仁率随着张紧力的增大而降低。

由图 14 的 5 种不同张紧力下核桃脱壳率、整仁率可知,当张紧力大于 89.6 N 时,核桃脱壳率随着张紧力增大而增加,张紧力达到 337.4 N 时,核桃脱壳率最高,达到 97%。张紧力为 231 N 时,整仁率最高,为 89%,上工作带张紧力过大或者过小都会导致整仁率下降。

在脱壳范围内,当张紧力较小时,作用在核桃上的挤压力和剪切力较小,接近或者低于核桃外壳上裂纹扩展的临界力,导致核桃外壳得不到进一步有效破碎,壳体破裂不充分,未露仁率较高,因而核桃

仁受到工作带的损害会较低,碎仁率较低,但是碎壳不能脱离核桃仁,在上下带的揉搓作用下,碎壳会对核桃仁产生挤压作用,从而造成核桃仁受到损害而断裂,一露仁率降低,二露仁率升高。提高上工作带的张紧力,作用在核桃上的挤压力和剪切力会增大,当超过裂纹扩展的临界力时,核桃外壳能进一步破碎,碎壳能及时脱离核桃仁,减少对核桃仁的挤压损害,从而一露仁率升高,二露仁降低。由于壳体破裂充分,未露仁率降低,但核桃仁由于上下工作带的剪切挤压,会受到一定程度损害,产生一定数量的碎仁,碎仁率会升高。如果张紧力过大,作用在核桃上的挤压力和剪切力就会过大,揉搓作用过强,不仅远超过壳体裂纹扩展的临界力,也远超过核桃仁的结合力,对核桃仁损害较大,一露仁率较低,二露仁率相对较高,碎仁率较高,但是壳体破裂充分,未露仁率较低。

为了验证上述理论及核桃脱壳效果,利用相机采集 5 种不同间距下核桃样本脱壳后的核桃仁完整情况以及脱壳情况,如图 15 所示。

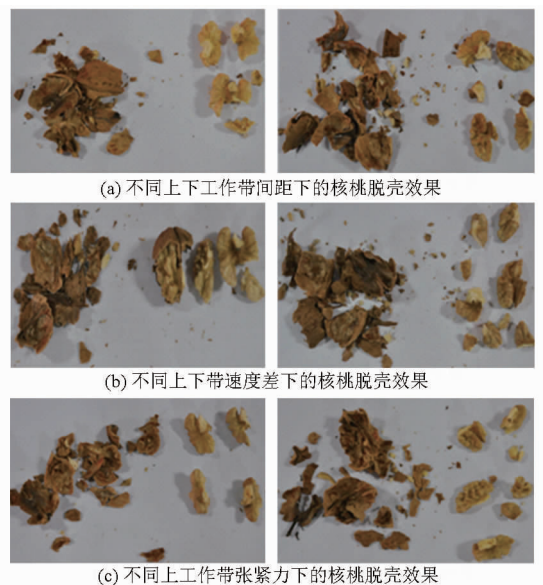


图 15 3 种不同影响因素下的核桃脱壳效果

Fig. 15 Walnut shell-broken effects under different factors

## 4.2 正交试验设计

脱壳效果正交试验方案与试验结果如表 4 所示。

表 5 为 3 种试验因素在不同的水平因素组合下的核桃脱壳指标试验结果分析。从表中可以看出,一露仁率的极差  $R_C > R_A > R_B$ ,各因素从主到次的顺序为: C、A、B;二露仁率的极差  $R_C > R_A > R_B$ ,各因素从主到次的顺序为: C、A、B;碎仁率的极差  $R_A > R_C > R_B$ ,各因素从主到次的顺序为: A、C、B;未露仁率的极差  $R_A > R_C > R_B$ ,各因素从主到次的顺序为: A、C、B。

表4 脱壳性能正交试验方案与试验结果

Tab.4 Orthogonal experimental scheme of hulling effect and experimental results

试验序号	A	B	C	一露仁率/%	二露仁率/%	碎仁率/%	未露仁率/%
1	1	1	1	60	18.4	16.0	5.6
2	1	2	2	77	16.7	4.3	2.0
3	1	3	3	72	15.7	9.5	2.8
4	2	1	2	68	15.0	13.0	4.0
5	2	2	3	75	12.4	9.0	3.6
6	2	3	1	64	16.5	15.0	4.5
7	3	1	3	59	18.0	17.0	6.0
8	3	2	1	57	18.8	18.0	6.2
9	3	3	2	67	16.0	12.0	5.0

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5中可以看出,对于不同的指标而言,不同因素的影响程度是不同的。张紧力对一露仁率和二露仁率的影响程度最大,间距对碎仁率和未露仁率的影响程度最大,而上下带速度差对各个指标的影响程度最低。当上下带间距取14 mm、上下带速度差取0.19 m/s、上工作带张紧力为231 N时,即 $A_1B_2C_2$ ,这4项指标达到了最优的水平,脱壳效果最好。此时一露仁率、二露仁率、碎仁率、未露仁率分别为77%、16.7%、4.3%、2%,即脱壳率为98%,整仁率为93.7%。

## 5 结论

(1)单因素试验结果表明,上下带间距为14 mm时,脱壳率最高,为97%,随间距增大,脱壳率下降;间距为16 mm时,整仁率最高,为87%,间距增大或减小,整仁率下降。上下带速度差为0.23 m/s时,脱壳率最高,为97%,随上下带速度差减小而降低;

表5 脱壳性能正交试验结果分析

Tab.5 Orthogonal experimental results analysis of hulling effect

指标	A	B	C	
一露仁率	$k_1$	69.7	62.3	60.3
	$k_2$	69.0	69.7	70.7
	$k_3$	61.0	67.7	68.7
	极差 R	26	22	31
因素主次		C、A、B		
二露仁率	$k_1$	16.9	16.8	17.9
	$k_2$	14.6	15.9	15.9
	$k_3$	17.3	16.1	15.0
	极差 R	7.9	2.2	8.6
因素主次		C、A、B		
碎仁率	$k_1$	9.9	15.3	16.3
	$k_2$	12.3	10.4	9.8
	$k_3$	17.0	12.1	11.8
	极差 R	21.2	14.7	19.7
因素主次		A、C、B		
未露仁率	$k_1$	3.5	5.2	5.4
	$k_2$	4.0	3.9	3.7
	$k_3$	5.7	4.1	4.1
	极差 R	6.8	3.8	5.3
因素主次		A、C、B		

上下带速度差为0.19 m/s时,整仁率最高,为87%,上下带速度差增大或减小,整仁率下降。上工作带张紧力为337.4 N时,脱壳率最高,为97%,随着张紧力的减小而降低;张紧力为231 N时,整仁率最高,为89%,张紧力增大或减小,整仁率下降。

(2)正交试验结果表明,当上下带间距取14 mm、上下带速度差取0.19 m/s、上工作带张紧力为231 N时,脱壳效果最好,一露仁率、二露仁率、碎仁率、未露仁率分别为77%、16.7%、4.3%、2%,即脱壳率为98%,整仁率为93.7%。

## 参 考 文 献

- 周明亮,王鸿飞,赵丹.山核桃油的提取工艺及其特性研究[J].农业机械学报,2007,38(3):95-98.  
ZHOU Mingliang, WANG Hongfei, ZHAO Dan. Studies on extracting technology and properties of carya kernel oil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(3):95-98. (in Chinese)
- 陈向明,徐涛,查甫本.山核桃外果皮黄酮提取与纯化[J].农业机械学报,2011,42(12):177-181.  
CHEN Xiangming, XU Tao, ZHA Fuben. Extraction and purification of flavone in *C. cathayensis* exocarpi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):177-181. (in Chinese)
- 张林泉,龚丽.剥壳机具的现状与效果改进方法的探讨[J].食品与机械,2006,22(4):72-74.  
ZHANG Linquan, GONG Li. Status quo about shelling machine and discussing about improving methods[J]. Food and Machinery, 2006,22(4):72-74. (in Chinese)
- 李忠新,刘奎杨,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, LI Ling, 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)
- LIU Mingzheng, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Advances and recent patents about cracking walnut and fetching kernel device[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2014,8(1):44-58.
- 刘明政,李长河,张彦彬,等.核桃剥壳取仁装置:中国,201210277037.X[P].2014-10-08.
- 张彦彬,刘洋,刘明政.核桃剥壳取仁机的设计与试验研究[J].农机化研究,2014(4):132-136.



- ZHANG Yanbin, LIU Yang, LIU Mingzheng. Design and experimental study of a walnut decorticating and kernel taking out machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(4):132-136. (in Chinese)
- 8 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 Mingzheng, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Flexible-belt shearing extrusion walnut shell crushing mechanism analysis and performance test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):266-273. (in Chinese)
- 9 刘明政,李长河,张彦彬. 核桃剪切挤压破壳柔性锤击取仁设备:中国,201320779979.8[P]. 2014-05-14.
- 10 王丽宇. 木材裂纹扩展及其断裂行为的研究[D]. 北京:北京林业大学,2002.  
WANG Liyu. Study on wood crack propagation and facture behavior[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2002. (in Chinese)
- 11 刘慧. 核桃品种介绍与评述[J]. 西北园艺:果树,2012(1):34-36.  
LIU Hui. Introduction and review of walnut varieties[J]. Northwest Horticulture, 2012(1):34-36. (in Chinese)
- 12 孙艳,罗宏亮. 发动机皮带张紧力检测仪[J]. 汽车工艺与材料,2003(1):24-26.  
SUN Yan, LUO Hongliang. Engine belt tensiometer[J]. Automobile Technology and Material, 2003(1):24-26. (in Chinese)
- 13 程尧舜. 弹性力学基础[M]. 上海:同济大学出版社,2009.
- 14 何义川,史建新. 核桃壳力学特性分析与试验[J]. 新疆农业大学学报,2009,32(6):70-75.  
HE Yichuan, SHI Jianxin. Analysis and experiment on mechanical characteristic of walnut shell [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(6): 70-75. (in Chinese)
- 15 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

---

(上接第120页)

- 10 杨然兵,柴恒辉,尚书旗. 花生联合收获机弹齿式去土装置设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2014,45(8):66-71,92.  
YANG Ranbing, CHAI Henghui, SHANG Shuqi. Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadrabale baler pickup [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):66-71,92. (in Chinese)
- 11 王东伟,尚书旗,赵大军,等. 4HBL-4型二垄四行半喂入自走式花生联合收获机[J]. 农业机械学报,2013,44(10):86-92.  
WANG Dongwei, SHANG Shuqi, ZHAO Dajun, et al. Type 4HBL-4 two-ridges and four-lines semi-feeding self-propelled peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 86-92. (in Chinese)
- 12 GB/T 5262—2008 农业机械试验条件 测定方法的一般规定[S]. 2008.
- 13 杨然兵. 4HQL-2型花生联合收获机主要装置的设计与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2009.  
YANG Ranbing. 4HQL-2 type peanut combine the design of main device and experiment research [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 14 胡志超,王海鸥,彭宝良,等. 4HLB-2型花生联合收获机起秧装置性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(6):26-31.  
HU Zhichao, WANG Haiou, PENG Baoliang, et al. Performance analysis and experiment on operation process of plant lifting device in 4HLB-2 type peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 26-31. (in Chinese)
- 15 张宏梅,陆明. 正交回归法在机械优化设计中的应用[J]. 解放军理工大学学报,2002,3(4):50-53.  
ZHANG Hongmei, LU Ming. Orthogonal regression method application in mechanical optimal design [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2002, 3(4): 50-53. (in Chinese)
- 16 NY/T 502—2002 花生收获机作业质量[S]. 2002.