doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.039

山核桃破壳机加载锤头设计与试验

曹成茂[1]　蒋　兰[1]　吴崇友[2]　李　正[1]　汪天宇[1]　丁　冉[1]
(1.安徽农业大学工学院，合肥 230036；2.农业部南京农业机械化研究所，南京 210014)

摘要：针对现有的山核桃破壳机多采用点、线等单一的加载接触形式进行破壳，使得工作过程中山核桃受力大小分布不均，从而导致低破壳率、高果仁损伤率的现象，设计了多种不同加载接触形式的锤头类型，以山核桃破壳后破壳率、果仁损伤率、露仁率、裂纹分布为评价指标，通过试验探究了不同加载接触形式下的破壳效果。通过有限元分析探究了不同窝眼个数的锤头对破壳过程中裂纹分布和扩展的影响，并以锤头结构参数和加载方向为试验因素进行了正交试验，确定了最佳锤头结构参数组合。试验结果表明，凹槽式锤头结构能够降低加载方向因素对破壳效果影响的显著性；凹槽中附加的窝眼能够使破壳后的果壳产生大量局部裂纹点，并沿窝眼棱线扩展产生裂纹，具有裂纹引导作用；窝眼个数增加，山核桃破壳后的裂纹数增加且裂纹分布均匀、范围广，有效提高了山核桃的破壳质量；当凹槽直径为 28 mm，窝眼个数为 7 时，破壳效果最理想，破壳率、一露仁率、二露仁率、果仁损伤率的均值分别为 98.88%、37.05%、57.24%、5.71%。

关键词：山核桃；破壳；加载锤头；窝眼凹槽式；裂纹引导
中图分类号：S226.4；S664.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2017)10-0307-09

Design and Test on Hammerhead of Pecan Shell-breaking Machine

CAO Chengmao[1]　JIANG Lan[1]　WU Chongyou[2]　LI Zheng[1]　WANG Tianyu[1]　DING Ran[1]
(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: At present, it is universally acknowledged that the mechanical shell-breaking method is regarded as the main research strategies in the process of pecan shell-breaking equipment design. The design and improvement of shell-breaking method and principle had been studied extensively. However, in each kind of shell-breaking method, the research on the loading contact form between the broken shell mechanism and the pecan was neglected. Whether in the study of pecan shell-breaking principle and method or the design of mechanical equipment, the load which was provided with a single contact form was bore for pecan, such as point load or line load. In the course of processing, the size of the shell-breaking force was prone to cause the partial breakage of the shell or the serious damage of the nut, which led to the phenomenon of low shell-breaking rate and high nut damage rate. Therefore, the groove shape hammerhead with sockets was developed. The hammerhead structures of different loading contact form were designed. And the shell-breaking effect on different loading contact form was researched by test. When the pecan was broken, the shell-breaking rate, nut damage rate and exposure nut rate of pecan were deemed as evaluation index. The crack distributions which were formed of three hammerheads in different loading directions were compared and analyzed. The finite element analysis software Abaqus was used to research the distribution and propagation of crack in the process of the shell-breaking, which considered the structure of the hammerhead with four different numbers of sockets as the variable. The orthogonal test which considered the structure parameters of the hammerhead and the loading direction as experimental factors was designed and used to determine the optimum combination. The results showed that the structure of the hammerhead in the groove shape can reduce the influence of the loading direction factor on the shell-breaking effect. Containing a plurality of sockets can make the pecan shell generate a large number of local crack points which extended along the tangent line of the socket to produce and

收稿日期：2017-06-22　修回日期：2017-07-31
基金项目：国家自然科学基金项目(51475002)
作者简介：曹成茂(1964—)，男，教授，博士生导师，主要从事智能检测与控制技术、农业机械化工程研究，E-mail：caochengmao@sina.com

extend crack. This structure can act as a crack guide. With the increase of number of sockets, the crack distribution of the pecan shell was uniform and the range was wide. This structure can improve the quality of shell-breaking. When the groove diameter was 28 mm, the number of sockets was 7, the most satisfactory shell-breaking effects were obtained, which generated the shell-breaking rate of 98.88%, the first grade nut rate of 37.05%, the second grade nut rate of 57.24%, and the nut damage rate of 5.71%.

Key words: pecan; shell-breaking; loading hammerhead; groove shape with sockets; crack guide

引言

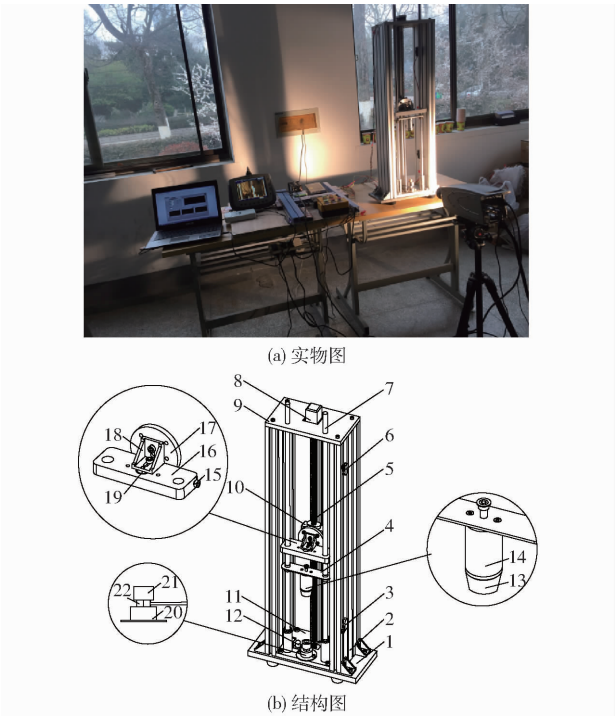
山核桃属胡桃科山核桃属[1-3]。由于其极高的营养价值和独特的口感风味,得到了消费者的认可,随着需求量的增大,山核桃破壳取仁作为深加工的首要工序变得十分重要[4-5]。但由于其果壳硬而厚,形状不规则,内有多个分隔,壳仁间隙小,使得破壳过程十分困难[6]。

国内外学者已经对坚果破壳机理做了大量的研究[7-10]。学者更多的是对破壳方式、破壳原理进行设计与改进,而忽视了对每种破壳方式中破壳机构与坚果的加载接触形式进行研究。目前,无论是对坚果破壳机理、方式或破壳机具的研究与设计,坚果受载的接触形式多为单一的点、线加载,当受力超过果壳的破壳极限时,外壳破碎。然而,单一的受载接触形式都存在果壳受力不均匀、波及范围小、裂纹扩展效果差的问题,局部相对集中的破壳载荷极易引起内部果仁的严重受损,从而引起低破壳率、高果仁损伤率。在施加集中载荷破壳的研究中,不同加载方向对破壳效果有显著的影响[11],而在实际加工过程中,对山核桃破壳机导向装置的设计成为研究难点。

针对现有山核桃破壳机械研究中存在的问题,本文根据击打原理设计落锤式坚果破壳力学特性参数测试试验台,利用该试验台以锤头类型与加载方向为试验因素进行破壳试验,以破壳后山核桃的破壳率、果仁损伤率、露仁率、裂纹分布为评价指标,对不同锤头结构作用下的接触形式进行分析,找出最适合破壳的接触形式。通过有限元分析探究不同锤头窝眼个数对破壳过程中裂纹的分布和扩展的影响,以锤头结构参数和加载方向为试验因素设计正交试验,确定最佳锤头结构参数组合,为山核桃破壳机具的设计与开发提供系统的理论依据和应用基础。

1 试验台结构与原理

坚果破壳力学特性参数的测定对坚果破壳取仁装置的研制具有理论指导意义[12]。设计的试验台具有较高的自动化水平,以自主搭建的落锤试验台为载体,以 LabVIEW 为软件平台来实现检测与控制过程,所搭建的高速摄像机平台可记录下试品破壳产生裂纹的全过程,其结构如图 1a 所示。



(a) 实物图

(b) 结构图

图 1 落锤式坚果破壳力学特性参数测试试验台

Fig. 1 Test platform for mechanical characteristic of drop-hammer nut breaking

1. 底座 2. 龙门支架 3. 下限位开关 4. 锤身连接板 5. 滚珠丝杠模块 6. 上限位开关 7. 滑动导杆 8. 步进电动机 9. 上盖板 10. 滑块 11. 下盖板 12. 红外测距传感器 13. 锤头 14. 锤身 15. 限位螺栓 16. 提锤架横梁 17. 提锤架竖板 18. 转向角件 19. 电磁吸盘 20. 传感器底盘工装 21. 果臼槽 22. 冲击力传感器

落锤试验台主要由龙门架、滑动模块、提锤架、冲击锤、冲击座与防二次冲击装置等部分组成。如图 1b 所示,其工作原理为:当冲击锤从某一冲击高度落下时,重力势能转化为动能,可实现一定的冲击速度对试验样品的动态加载[13]。试验时,通过步进电动机带动提锤架将冲击锤提高至设定的冲击高度,利用软件程序控制电磁铁断电失磁将冲击锤释放。为保持冲击锤底面的加载位置不变,用滑动导杆加以导向。锤头与锤身通过螺纹副连接固定,方便更换。

2　试验设计

2.1　材料与设备

选用产于安徽省皖南山区天目山脉的宁国山核桃，采摘时间为 2016 年 9 月初。详细试验设备包括：落锤式坚果破壳力学特性参数测试试验台，电子天平（MP502 型，上海民桥紧密科学仪器有限公司），电热恒温鼓风干燥箱（DHG－9243S－Ⅲ型，上海新苗医疗器械制造有限公司），游标卡尺（武汉信斯特精密仪器有限公司）等。

2.2　试验指标

从山核桃破壳率、果仁损伤率、露仁率 3 方面分析破壳效果和破壳质量。对破壳后的山核桃进行分类，将所有已破壳山核桃的果仁人工进行壳仁剥离并收集称量测算。如图 2 所示，把大于整仁 1/2 的记作“一露仁”，小于整仁 1/2 且大于 1/4 的记作“二露仁”，小于整仁 1/4 的记作“碎仁”。按照实际加工要求，一个整核桃仁有 4 瓣，在生产时以每一瓣为最小加工单位，即一露仁与二露仁均符合加工要求，归类为果仁不损伤，碎仁归类为果仁损伤。试验指标为一露仁率 η_1、二露仁率 η_2、碎仁率 η_3，将破壳率记为 η_4，果仁损伤率即为碎仁率 η_3[14-15]，计算式为

$$\begin{cases} \eta_1 = \dfrac{S_1}{S_0} \times 100\% \\ \eta_2 = \dfrac{S_2}{S_0} \times 100\% \\ \eta_3 = \dfrac{S_3}{S_0} \times 100\% \\ \eta_4 = \left(1 - \dfrac{M_1}{M_0}\right) \times 100\% \end{cases} \tag{1}$$

式中　S_0——果仁总质量，g

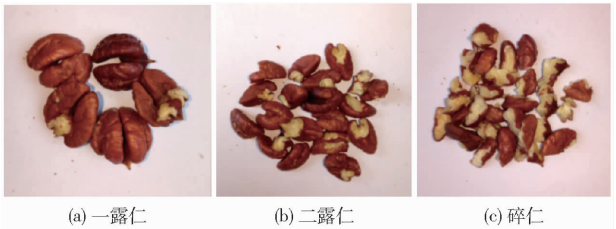
S_1——“一露仁”总质量，g

S_2——“二露仁”总质量，g

S_3——“碎仁”总质量，g

M_1——未破壳山核桃质量，g

M_0——每组试验样本总质量，g



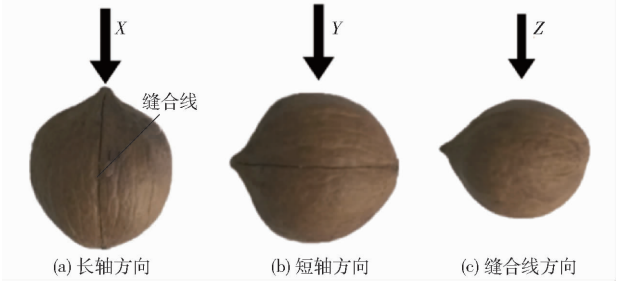
(a) 一露仁　(b) 二露仁　(c) 碎仁

图 2　山核桃仁试验指标

Fig. 2　Grades index of pecan nut

2.3　初始条件设定

试验均采用落锤冲击破壳方式。如图 3 所示，山核桃按照长轴、短轴、缝合线分别记为 X、Y、Z 3 个加载方向[16]。山核桃圆度系数为 0.952，圆度较高，选取山核桃直径为（20 ± 2）mm[17]。



(a) 长轴方向　(b) 短轴方向　(c) 缝合线方向

图 3　破壳加载方向

Fig. 3　Loading direction of shell breaking

前期试验中分析了不同含水率、破壳能量的破壳效果，得出了含水率达到 14.55% ~ 16.35% 时，所需的破壳能量集中在 0.7 ~ 1.1 J，山核桃有较好的综合破壳质量。含水率的测定采用烘干法[18-19]，计算公式为

$$W = (M - m_0)/M \times 100\% \tag{2}$$

式中　W——含水率，%

M——干燥前总质量，g

m_0——山核桃绝干物质量，g

忽略外界阻力等因素的影响，整个破壳过程满足能量守恒定律，能量转换关系为

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2 = \text{const} \tag{3}$$

式中　m——冲击锤质量，kg

H——破壳高度，m

const——破壳能量常数，取 0.9 J

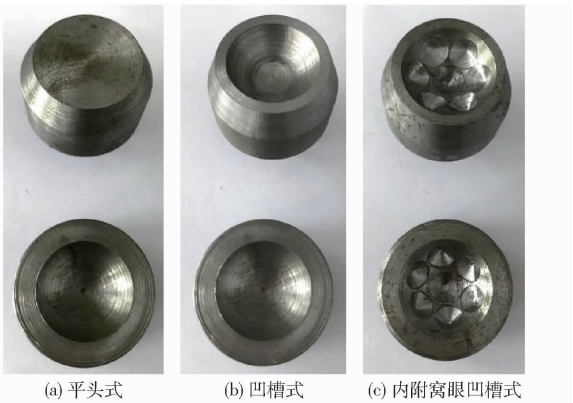
v——破壳临界速度，m/s

冲击锤质量为 0.375 kg，由此得出敲击锤破壳高度 H = 0.24 m。

3　锤头类型与加载方向的破壳试验

3.1　试验方法

击打式破壳方式中，锤头与山核桃的接触形式对山核桃破壳效果有直接影响。设计击打式破壳方式中的锤头结构，对提高山核桃破壳率，降低果仁损伤率，削弱加载方向对破壳效果的影响有着十分重要的作用。将锤头类型和加载方向作为 2 个因素。锤头类型分为平头式、凹槽式、内附窝眼凹槽式 3 个水平，控制锤头质量为（0.375 ± 0.01）kg，果臼槽与锤头一一对应，如图 4 所示，内附窝眼凹槽式锤头的结构形式为在圆弧凹槽面上均匀分布 7 个窝眼并充满整个凹槽，凹槽直径 28 mm、凹槽深度 6 mm，中心和环布窝眼直径分别为 8.4、12 mm。加载方向分为长轴、短轴、缝合线方向 3 个水平。共计 9 组试验，



(a) 平头式 (b) 凹槽式 (c) 内附窝眼凹槽式

图 4 锤头结构图

Fig. 4 Diagrams of hammerhead structure

每组取 50 个山核桃进行重复试验。

3.2 结果与分析

经过对试验结果的统计分析和比较,得出 3 种锤头类型和加载方向对破壳率、果仁损伤率以及露仁率的综合影响情况,如图 5、6 所示。

从图 5 可以看出,平头锤头表现为传统的点加载,山核桃在各方向都具有最高的破壳率,但其果仁损伤率同样很高,在 Z 加载方向上达到 14.58%。破壳过程果仁破碎严重,裂纹在接触部位局部产生;凹槽式锤头和内附窝眼凹槽式锤头均具有较低的果仁损伤率,介于 5% ~7% 之间。但凹槽式锤头破壳率最低,包裹式的破壳接触形式很大程度不能满足

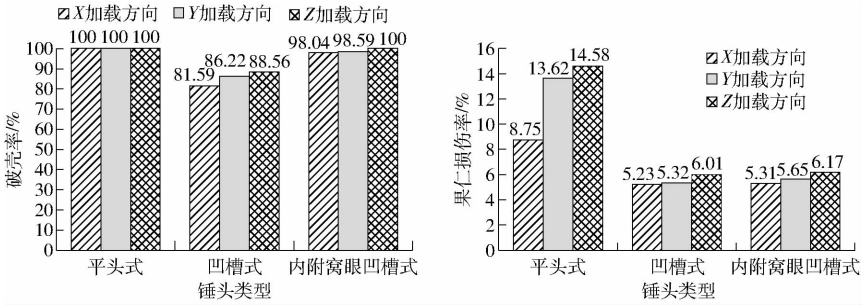


图 5 不同锤头类型和加载方向下的破壳效果

Fig. 5 Effects of shell breaking under different hammerhead types and loading directions

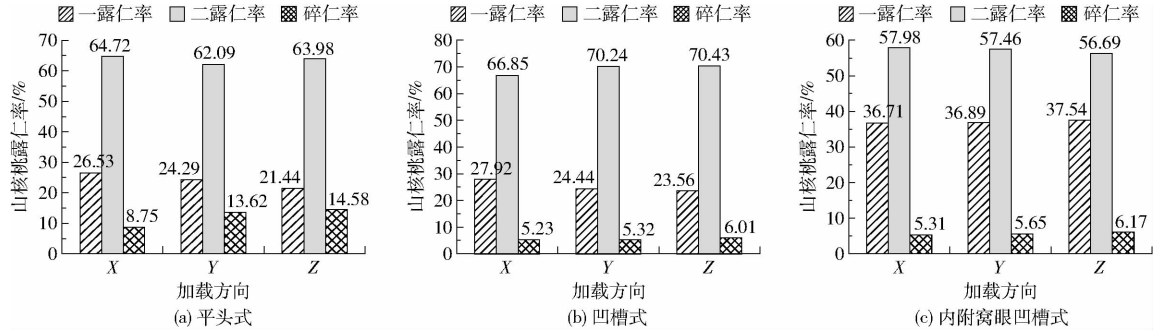


图 6 不同锤头类型和加载方向的露仁率

Fig. 6 Exposure nut rate under different hammerhead types and loading directions

山核桃破壳的临界应力,破壳过程中产生大量未破壳样本,破壳效果不能满足实际生产要求;内附窝眼凹槽式锤头结构兼具较高的破壳率和较低的果仁损伤率。

从图 6 可以看出:平头锤头加载时,集中载荷作用下接触部位的果仁破碎情况严重,故一露仁率较低,分别为 26.53%、24.29%、21.44%,果仁集中在“二露仁”且碎仁率较高,破壳质量差。内附窝眼凹槽式锤头破壳的山核桃果壳裂而果仁不碎,在 3 个加载方向上均有最高的一露仁率,分别为 36.71%、36.89% 和 37.54%,破壳质量最好。

通过试验数据发现,平头锤头在 X 方向加载的果仁损伤率为 8.75%,而 Z 方向加载达到了 14.58%,说明采用平头结构破壳,加载方向因素对其破壳效果具有显著影响。凹槽式与内附窝眼凹槽式结构在 X、Y、Z 3 个方向上所得的破壳率、果仁损伤率结果相近,由此可以预测采用凹槽包裹式破壳类型一定程度上削弱了加载方向因素的影响,且在凹槽式锤头中内附带窝眼对破壳效果起重要作用。

3.3 裂纹分布

破壳后山核桃表面的裂纹分布情况是破壳质量的重要参考指标。如图 7 所示,采用平头锤头加载,接触部位的果壳产生大量裂纹并小幅度下凹,裂纹分布不具有方向性,使得受载后的山核桃呈扁平状,果仁被挤压破碎,在短轴和缝合线方向表现最为明显;凹槽式锤头破壳后的山核桃表面裂纹较少,对后期的壳仁分离难度较大,破壳质量较差;内附窝眼凹槽式锤头结构,3 个方向上破壳的山核桃表面裂纹

基本呈顶部和底部对称分布，波及范围广，分布均匀，具有明显的方向性。果壳裂而果仁不碎，果壳碎片易剥离，破壳质量最好。

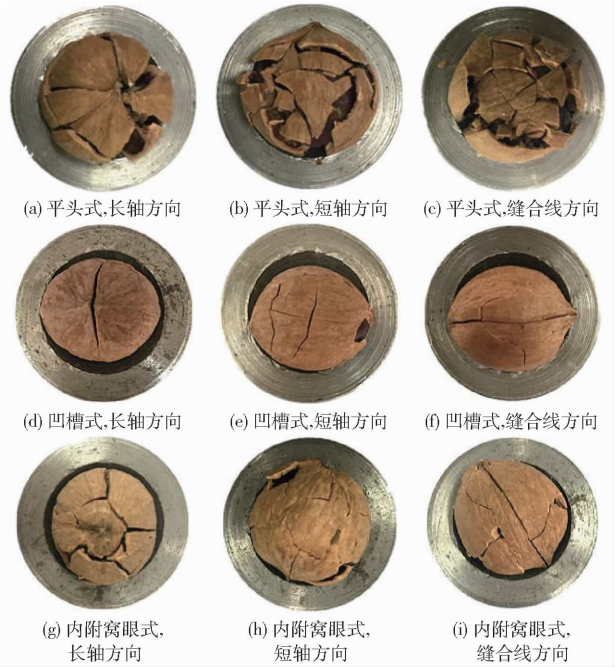


图 7　不同锤头类型和加载方向的裂纹分布

Fig. 7　Crack distributions under different hammer types and loading directions

4　山核桃破壳动力学仿真

4.1　山核桃破壳力学理论分析

4.1.1　失稳破壳临界条件

由弹性力学可知，山核桃壳承受外界载荷时，当载荷增大到某个值，壳体会发生失稳破壳[20]。该临界压力为

$$p=\frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}\left(\frac{\delta}{r}\right)^2 \tag{4}$$

式中　p——临界压力，MPa

E——弹性模量，MPa　　ν——泊松比

δ——山核桃壳厚度，mm

r——山核桃半径，mm

山核桃近似球体，r = 10.75 mm，顶端、底端、缝合线 3 个位置壳厚 δ 为 2.78、2.29、2.03 mm[17]。根据试验测定，山核桃壳的弹性模量 E = 10 MPa，ν = 0.3[10]。将上述参数代入式(4)中，得 3 个部位的临界压力，计算结果如表 1 所示。

表 1　不同位置处的失稳临界压力

Tab. 1　Instability critical pressure at different locations

位置	厚度/mm	失稳临界压力/MPa
顶端	2.78	1.103
底端	2.29	0.749
缝合线	2.03	0.588

4.1.2　裂纹扩展临界条件

山核桃破壳时，受载的外壳表面由裂纹点扩展产生裂纹。裂纹按其受力特点和位移特点，可抽象化为 3 种基本类型：Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型。如图 8 所示，Ⅰ型为张开型，Ⅱ型为滑移型，Ⅲ型为撕裂型。山核桃破壳后，裂纹扩展形式主要表现为张开、撕裂型[21]。

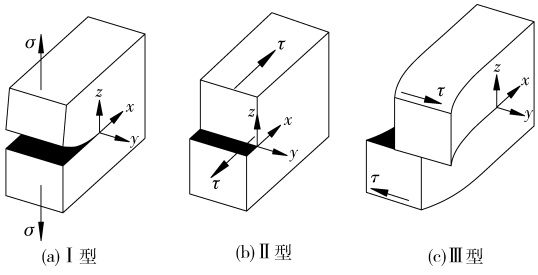


图 8　裂纹类型

Fig. 8　Crack styles

国外学者研究得出[22]：在外力作用下，裂纹附近产生应力集中现象，当应力达到一定程度时，裂纹就会发生扩展。裂纹长度与临界应力之间的关系为

$$\sigma_c=\sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi C}} \tag{5}$$

式中　γ——单位面积的表面能，kJ/m^2

C——裂纹长度，mm

类比木料，单位面积表面能 γ = 0.12 kJ/m^2[23]，山核桃裂纹点产生时取其裂纹长度平均值为 2 mm。将已知参数代入式(5)，求得裂纹扩展的临界应力为 σ_c = 0.648 MPa。即山核桃外壳发生破壳后，外壳附加应力超过 0.648 MPa 才可使裂纹进一步扩展。

4.2　山核桃有限元分析

4.2.1　山核桃有限元模型的建立

基于有限元软件 Abaqus 对山核桃进行有限元分析，将山核桃(壳，仁)、锤头、果臼槽实体三维模型导入到 Abaqus 软件环境中，为方便计算，果壳顶端厚度取 2.8 mm，其余部位取 2.3 mm。山核桃壳和果仁纤维化不明显，因此将二者的材质近似假定为各项同性材料[24-27]。对于含水率为 14.55% ~ 16.35% 的山核桃果壳，果壳表现为脆性材料，因此破坏准则采用脆性断裂破坏强度准则。山核桃壳、果仁密度为 470 kg/mm^3，类比木材，泊松比取 0.3，果壳弹性模量为 10 MPa，果仁弹性模量近似为果壳的 1/10，取 1.1 MPa[10]。

4.2.2　山核桃有限元结果分析

上述破壳试验表明，窝眼个数对果壳表面裂纹的产生有显著的影响，为此选择 4 种窝眼个数，作为山核桃受力有限元分析的主要分析条件。以长轴方

向进行加载,对比 4 种条件下山核桃破壳时的应力分布情况,结合山核桃果壳临界失稳条件与裂纹扩展条件,探究内附窝眼凹槽式锤头结构对破壳后山核桃果壳的裂纹分布和扩展规律。通过 Abaqus 软件对山核桃三维壳体模型的应力分析可以看出:

(1)如图 9a、9b,一窝眼的锤头结构在沿长轴方向加载时,果壳在顶部和底部的应力均呈环形分布,由中心向四周扩散并逐渐减小,没有明确的方向性,可以预测接触部位只能导致果壳的局部裂开,裂纹较少,故不利于壳仁分离。

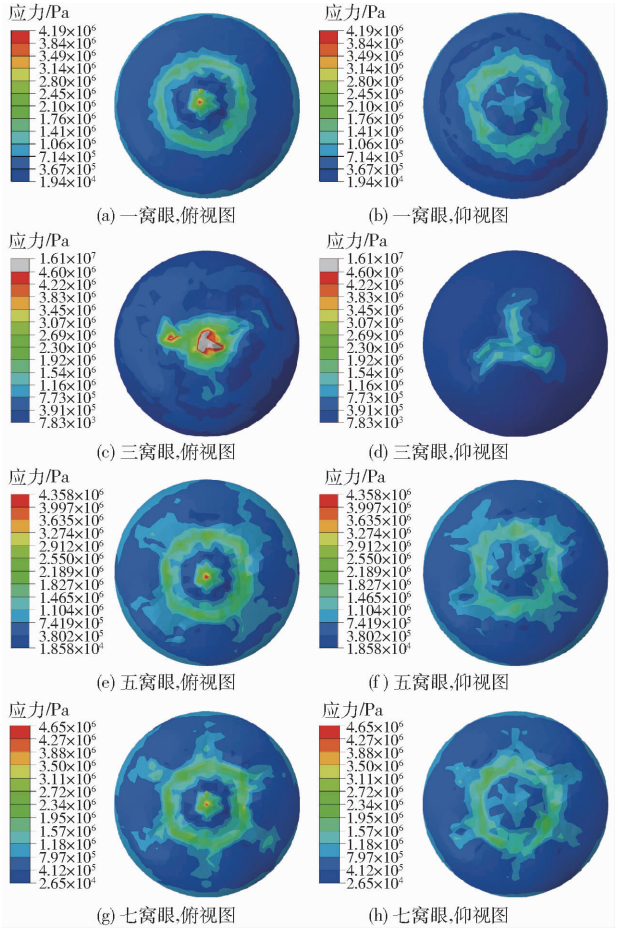


图 9 不同窝眼个数的锤头加载下山核桃的等效应力分布

Fig. 9 Equivalent stress distributions of pecan produced by hammerhead with different number of sockets

(2)如图 9c、9d,三窝眼的锤头结构在顶部和底部的应力分布情况差别较大,山核桃顶部产生局部的应力集中现象,这样会导致山核桃在果尖处发生畸变,压碎果仁,这是由于果尖部分的特殊形状所造成,果壳顶部只有局部破裂,果仁损伤率较大。但果壳底部出现“人”字形应力分布情况,这是由于窝眼边线直接与果壳接触,使果壳沿接触部位受载产生应力。可以预测裂纹会沿接触部位产生并扩展,接触部位对裂纹的扩展具有一定的引导作用。

(3)如图 9e、9f,五窝眼锤头结构进行破壳,果壳所受应力波及整个表面,顶部和底部的应力对称分布且出现明显的方向性。以顶部方向来看,应力环形分布,并有部分应力由环形向四周延展,分布范围较广。环形分布区域应力在 2.19 MPa 左右,满足果壳失稳破壳的临界应力值(1.103 MPa),延展区域应力在 0.74 MPa 左右,大于裂纹扩展的临界应力(0.648 MPa)。可以预测在此加载情况下,山核桃的破壳形式为沿窝眼棱边产生的线加载破裂。山核桃壳体首先在环形应力分布区域产生较多的局部裂纹点,锤头进一步加载,更多棱边与果壳接触,裂纹由裂纹点沿窝眼棱边方向进一步扩展产生较多裂纹,此时山核桃破壳质量显著提高。

(4)如图 9g、9h,七窝眼与五窝眼锤头结构所产生的山核桃果壳应力分布结果相近,应力均为环形分布,主要区别表现在向四周延展的部分应力分布情况,此处也是裂纹产生和扩展的关键。窝眼个数的增加使得窝眼可布满整个凹槽,棱线分布更加密集,棱线之间间距较小,在这种分布情况下的线加载能够有效的实现裂纹引导作用。七窝眼破壳的山核桃,果壳的延展应力分布均匀且更为密集,延展应力平均值能够达到裂纹扩展条件,可以预测在此情况下能够得到更好的破壳质量。

5 锤头结构参数与加载方向的破壳试验

以内附窝眼锤头的结构参数和加载方向为因素进行正交试验,确定最佳结构参数组合,并验证采用凹槽式结构进行破壳可以减少加载方向因素对破壳效果的影响。

5.1 锤头结构参数设计

如图 10 所示,锤头的结构参数由凹槽直径 D_a、凹槽深度 h 以及窝眼个数决定。通过前期的试验成果已知,在冲击加载条件下,山核桃的破壳形变约为 5.8 mm,即山核桃在竖直方向上的形变程度超过 5.8 mm 时,果壳会发生破裂。试验选取山核桃直径为(20 ± 2) mm,故在山核桃最小直径 D_{min} = 18 mm 时,保证大于 5.8 mm 的变形量,为了获得较好的破壳效果,需在果臼槽与锤头间留出足够的距离,即 $2h \leqslant D_{min} - 5.8 = 12.2$ mm,故取 $h = 6$ mm。截面直

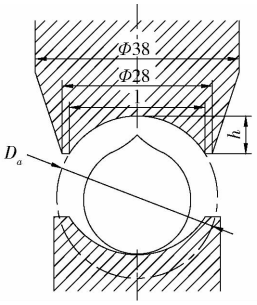


图 10 锤头结构参数

Fig. 10 Parameters of hammerhead structure

径 l 应大于山核桃最大直径 22 mm。由公式 $(D_a/2)^2=(l/2)^2+(D_a/2-h)^2$ 得，$D_a\geqslant 27$ mm。随着凹槽直径增加，凹槽曲率减小，且锤身尺寸也需相应增大，故取 D_a 上限为 30 mm。

窝眼均匀分布于凹槽内表面，为保证窝眼空间环状分布的均匀性以及窝眼棱边之间距离的紧凑性，在凹槽尺寸一定的情况下，当窝眼数量大于 7 时，中心窝眼尺寸与环布窝眼尺寸差距较大，且单个窝眼的直径小于 6 mm，机械加工难度大，故而，在本次试验中，窝眼数的上限取为 7。如图 11 所示，选取试验组的窝眼个数为 1、3、5、7，窝眼数量及尺寸如表 2 所示。



图 11　不同窝眼个数的锤头

Fig. 11　Hammerheads with different number of sockets

表 2　窝眼尺寸参数

Tab. 2　Parameters of sockets dimension

窝眼个数	窝眼尺寸	备注
1	$D=10$ mm	
3	$D_1=D_2=D_3=10.6$ mm	鼎立分布
5	$D_1=8$ mm $D_2=D_3=D_4=D_5=8.2$ mm	环状分布，其中 D_1 为中心窝眼直径
7	$D_1=8.4$ mm $D_2=D_3=D_4=D_5=D_6=D_7=8.0$ mm	环状分布，其中 D_1 为中心窝眼直径
	$D_1=12$ mm	

选取凹槽直径、窝眼个数和加载方向 3 因素设计正交试验，具体试验因素水平见表 3。

表 3　试验因素水平

Tab. 3　Factors and levels of orthogonal test

水平	凹槽直径/mm	窝眼个数	加载方向
1	27	1	长轴 X
2	28	3	短轴 Y
3	29	5	缝合线 Z
4	30	7	

5.2　试验方案与结果

以 A、B、C 分别表示凹槽直径、窝眼个数、加载方向水平值，y_1、y_2、y_3、y_4 分别表示破壳率、一露仁率、二露仁率、果仁损伤率，试验方案与结果如表 4 所示。

表 5 为 3 个试验因素在不同水平组合下的破壳正交试验结果极差分析。由表可得：破壳率、一露仁率、果仁损伤率的极差主次排列均为 R_B、R_A、R_C，各因素从主到次的顺序为：B、A、C，即窝眼个数对指标的影响最大，其次为凹槽直径，加载方向对其影响最小。k_i 的大小反映了不同因素水平对相应指标的影响。其中，破壳率越大越好，一露仁率越大越好，果仁损伤率越小越好。因此，通过分析可得，破壳率指标下的最优锤头结构参数组合为 A_4B_4，一露仁率指标下的最优参数组合为 A_2B_4，果仁损伤率指标下的最优参数组合为 A_2B_4。本试验基于低损伤为目标，综合各性能指标，选取最优参数组合为

表 4　试验方案与试验结果

Tab. 4　Experimental plan and results

序号	凹槽直径 A	窝眼个数 B	加载方向 C	破壳率 y_1/%	一露仁率 y_2/%	二露仁率 y_3/%	果仁损伤率 y_4/%
1	1	1	1	79.98	27.45	67.25	5.30
2	1	4	1	96.44	35.09	59.50	5.41
3	1	2	2	90.05	25.49	66.85	7.66
4	1	3	3	96.09	34.71	59.35	5.94
5	2	2	1	89.11	27.96	65.50	6.54
6	2	3	1	95.55	35.88	58.73	5.39
7	2	1	2	86.02	28.56	66.09	5.35
8	2	4	3	100	37.54	56.27	6.19
9	3	2	1	91.31	26.34	66.65	7.01
10	3	3	1	96.12	34.36	59.22	6.42
11	3	4	2	100.00	34.84	58.83	6.33
12	3	1	3	89.47	27.49	65.47	6.55
13	4	1	1	84.35	27.59	65.84	6.57
14	4	4	1	98.28	34.38	60.16	5.46
15	4	3	2	100	30.63	62.32	7.05
16	4	2	3	98.21	22.93	69.74	7.33

表 5　正交试验结果极差分析

Tab. 5　Range analysis of orthogonal experimental results

指标		凹槽直径 A	窝眼个数 B	加载方向 C
破壳率	k_1	90.64	84.95	91.39
	k_2	92.67	92.17	94.02
	k_3	94.22	96.94	95.94
	k_4	95.21	98.68	
	极差 R	4.57	13.73	4.55
	因素主次		B、A、C	
一露仁率	k_1	30.69	27.77	31.13
	k_2	32.48	25.68	29.88
	k_3	30.76	33.90	30.67
	k_4	28.88	35.46	
	极差 R	3.60	9.78	1.25
	因素主次		B、A、C	
果仁损伤率	k_1	6.08	5.94	6.01
	k_2	5.87	7.14	6.60
	k_3	6.58	6.20	6.50
	k_4	6.60	5.85	
	极差 R	0.74	1.29	0.59
	因素主次		B、A、C	

A_2B_4,即当凹槽直径为 28 mm,窝眼个数为 7 时,达到了最优水平,破壳效果最好。在此结构参数下进行 3 个加载方向的破壳试验,破壳率、一露仁率、二露仁率、果仁损伤率的均值分别为 98.88%、37.05%、57.24%、5.71%。

如表 6 所示,通过单因素方差分析得:在 $\alpha = 0.05$ 水平下,不同加载方向下的破壳率、一露仁率以及果仁损伤率的 P 值均大于显著性水平 0.05,因此可以验证:采用内附窝眼凹槽式类型的锤头进行破壳时,不同加载方向对破壳效果没有显著性影响。

表 6 方差分析

Tab. 6 Variance analysis

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
破壳率	加载方向	58.892	2	29.446	0.747	0.493
	总计	571.301	15			
一露仁率	加载方向	4.182	2	2.091	0.091	0.913
	总计	302.205	15			
果仁损伤率	加载方向	1.174	2	0.587	1.034	0.383
	总计	8.550	15			

注:均值差的显著性水平为 0.05。

6 结论

(1)击打式破壳方式中,破壳机构与山核桃的受载接触形式直接影响山核桃的破壳率、果仁损伤率以及破壳质量。

(2)在 3 个加载方向上,内附窝眼凹槽式结构,兼具较高的破壳率和较低的果仁损伤率,分别介于 98% ~100% 和 5% ~7% 之间。该锤头作用的接触形式具有裂纹引导作用,破壳后的山核桃果壳表面裂纹分布广、密集,壳仁易分离,破壳质量较好。

(3)通过有限元分析发现,窝眼个数对破壳质量起主要影响,窝眼个数越多,破壳的山核桃表面裂纹数越多,且沿窝眼棱边进行扩展,有利于壳仁分离,获得了更好的破壳质量。

(4)正交试验结果表明,采用凹槽式结构进行破壳能够降低加载方向因素对破壳效果的影响,有效解决了山核桃实际加工时的预处理过程;当凹槽直径为 28 mm、窝眼个数为 7 时,破壳效果最好,在 3 个加载方向上的破壳率、一露仁率、二露仁率、果仁损伤率均值分别为 98.88%、37.05%、57.24%、5.71%。

参 考 文 献

1 章亭洲. 山核桃的营养、生物学特性及开发利用现状[J]. 食品与发酵工业,2006,32(4):90 - 93.
ZHANG Tingzhou. Nutrition, biological characteristics and development and utilization of hickory[J]. Food and Fermentation Industries,2006,32(4): 90 - 93. (in Chinese)

2 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)

3 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 exocarp [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(12): 177 - 181. (in Chinese)

4 薛波. 大别山山核桃品种类型及其品质的研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2013.
XUE Bo. Study on biotypes and nuts quality of carya dabieshanensis[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2013. (in Chinese)

5 SHARIFIAN F, DERAFSHI M H. Mechanical behavior of walnut under cracking conditions[J]. Journal of Applied Sciences,2008, 8(5): 886 - 890.

6 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的相关性研究[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 and cellulose[J]. Hubei Agricultural Sciences,2012,51(22):5076 - 5079. (in Chinese)

7 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 analysis of cracking walnut[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,1995,18(3):116 - 123. (in Chinese)

8 吴斌芳,周国柱,张建钢,等. 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):58 - 61.
WU Binfang, ZHOU Guozhu, ZHANG Jiangang, et al. Some parameter choices for mechanical shell-removing and nut-extracting of walnut and the experimental analysis[J]. Journal of Hubei University of Technology,1997,12(4):58 - 61. (in Chinese)

9 孙偲,曹成茂,娄帅帅,等. 山核桃破壳力学性能试验[J]. 安徽农业大学学报,2016,43(2):331 - 336.
SUN Si, CAO Chengmao, LOU Shuaishuai, et al. A test of breaking mechanical properties of pecan shell[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2016,43(2):331 - 336. (in Chinese)

10 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)

11 赵超. 山核桃破壳力学分析[J]. 西南大学学报:自然科学版,2012,34(9):123 - 127.
ZHAO Chao. Mechanical analysis of cracking hickory[J]. Journal of Southwest University:Natural Science Edition,2012,34(9):123 - 127. (in Chinese)

12 薛忠,郭向明,黄正明,等. 澳洲坚果的多因素压缩试验研究[J]. 西南农业学报,2014,27(3):1269 - 1273.
XUE Zhong, GUO Xiangming, HUANG Zhengming, et al. Experimental study on multifactor compression of macadamia nuts[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2014,27(3):1269 - 1273. (in Chinese)

13 邱自学,袁江,姚兴田. 可实现多参数测试的落锤式冲击试验机[J]. 仪表技术与传感器,2006(8):56 - 58.
QIU Zixue, YUAN Jiang, YAO Xingtian. Drop weight impact tester for measuring parameters during impacting[J]. Instrument Technique and Sensor,2006(8):56 - 58. (in Chinese)

14 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/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):266 - 273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160737&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.037.
LIU Mingzheng, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Shell crushing mechanism analysis and performance test of flexible-belt shearing extrusion for walnut[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):266 - 273. (in Chinese)

15 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/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):146 - 152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2012s29&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.029.
LI Zhongxin, LIU Kuiyang, YANG Liling, et al. Design and experiment of walnut-cracking device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):146 - 152. (in Chinese)

16 丁为民,邓丽君,李毅念,等. 不同成熟度芡实的力学性能试验分析[J]. 农业工程学报,2012,28(19):241 - 247.
DING Weimin, DENG Lijun, LI Yinian, et al. Experiment and analysis on mechanical properties of gorgon nuts (euryale ferox) at different maturities [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(19):241 - 247. (in Chinese)

17 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 - 5339,5620.
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 - 5339,5620. (in Chinese)

18 朱德泉,曹成茂,丁正耀,等. 山核桃坚果热风干燥特性及其工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2011,27(7):364 - 369.
ZHU Dequan, CAO Chengmao, DING Zhengyao, et al. Hot-air drying characteristics and technical parameters optimization of kernel hickory (*Carya cathayensis* Sarg.)[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(7):364 - 369. (in Chinese)

19 涂灿,杨薇,尹青剑,等. 澳洲坚果破壳工艺参数优化及压缩特性的有限元分析[J]. 农业工程学报,2015,31(16):272 - 277.
TU Can, YANG Wei, YIN Qingjian, et al. Optimization of technical parameters of breaking macadamia nut shell and finite element analysis of compression characteristics[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(16):272 - 277. (in Chinese)

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

21 郦正能,关志东,张纪奎. 应力断裂力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.

22 BERRYJP. 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.

23 刘明政. 核桃剪切挤压柔性破壳取仁的机理分析与实验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2015.
LIU Mingzheng. Mechanization analysis and experimentation research of walnut shearing-extrusion flexible shell-crushing[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2015. (in Chinese)

24 史建新,赵海军,辛动军. 基于有限元分析的核桃脱壳技术研究[J]. 农业工程学报,2005,21(3):185 - 188.
SHI Jianxin, ZHAO Haijun, XIN Dongjun. Technology for breaking walnut shell based on finite element analysis [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(3):185 - 188. (in Chinese)

25 谢丽娟,宗力. 莲子受力有限元分析[J]. 农业机械学报,2006,37(6):94 - 97.
XIE Lijuan, ZONG Li. Analysis of finite element method for loaded lotus seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(6):94 - 97. (in Chinese)

26 CUI X, LIU G R, LI G Y, et al. Analysis of plates and shells using an edge-based smoothed finite element method[J]. Computational Mechanics,2010,45(2 - 3):141 - 156.

27 张荣荣,李小昱,王为,等. 基于有限元方法的板栗破壳力学特性分析[J]. 农业工程学报,2008,24(9):84 - 88.
ZHANG Rongrong, LI Xiaoyu, WANG Wei, et al. Analysis of mechanical properties of Chinese chestnut cracking based on the FEM[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(9): 84 - 88. (in Chinese)