

# 基于图像分割的深纹核桃挤压破壳裂纹规律研究

李丽霞 万水龙 陈祥浩 胡伟明 曾庆宇 陈申奥 刘涛溢

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

**摘要:** 对核桃挤压破壳裂纹规律的研究有利于提升核仁完整性,然而传统的破壳方法难以准确反映裂纹真实演化规律。针对上述问题,以云南泡核桃为研究对象,本文提出了一种基于图像分割的裂纹分析方法,研究在挤压载荷下核桃裂纹扩展规律。采用 YOLO v8m-seg 实例分割模型实现裂纹自动识别与量化表征,模型分割平均精度均值为 82.3%,研究了不同等效直径与挤压方向条件下挤压力、变形量、做功等力学特性,并分析了裂纹总数、裂纹分布象限数、裂纹总面积占比等裂纹演化特征的影响规律及核仁完好率。搭建了融合双视角高速成像与力、位移传感技术的试验平台并进行试验,结果表明,等效直径与挤压方向对核桃的力学响应、裂纹特征及核仁完好率均具有显著影响;破壳最大挤压力为 190~280 N,总功为 620~1 000 J;裂纹数量先增加,达到峰值后逐渐贯通合并为 2~3 条,且分布在多个象限,挤压结束后裂纹总面积占比稳定在 10%~20%;等效直径 34~36 mm 的中等尺寸核桃从横径方向挤压综合表现最优,最大挤压力约 231 N,总功约 760 J,挤压结束时裂纹总面积占比 18%,核仁完好率为 73%。研究结果为低损伤破壳机械装备设计与参数优化提供了理论依据,且能在一定程度上预测和提高核仁完好率。

**关键词:** 挤压破壳; 裂纹扩展; 图像分割; YOLO v8; 力学特性; 核仁完好率

中图分类号: TP391; S23      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2026)08-0397-10      OSID: 

## Investigation into Crack Propagation Laws in Compression Shell-breaking of Deeply Veined Walnuts Based on Image Segmentation

LI Lixia WAN Shuilong CHEN Xianghao HU Weiming ZENG Qingyu CHEN Shen'ao LIU Taoyi  
(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** It was designed to clarify the mechanical behaviour and crack propagation mechanisms of deep-ridged walnuts under compression shell-breaking, and improve kernel integrity rate by directly observing and quantifying crack evolution. A dual-view synchronous high-speed imaging platform integrating force-displacement acquisition was constructed, and a pixel-level crack segmentation pipeline based on YOLO v8m-seg was developed. In comparison with YOLO v8n-seg and YOLO 11n-seg, the proposed model was found to achieve a precision of 86.3% and an mAP50 of 82.3% for the crack class. An annotated dataset comprising 3 600 pairs of front- and back-view images was established, and an imaging magnification calibration coefficient was introduced to unify crack measurements between the two views; on this basis, total crack number, total crack area ratio, and crack quadrant count were defined as three reproducible crack descriptors to describe the spatiotemporal evolution of cracks. A two-factor full factorial design was adopted, with equivalent diameter (30~42 mm, six levels) and compression direction (transverse, ridge, longitudinal) as independent variables, and compression strokes were set to 6、7、8 mm according to walnut size. Two-way ANOVA results showed that equivalent diameter and compression direction had highly significant effects ( $p\leq0.01$ ) on mechanical response, crack features, and kernel integrity rate. Typical force-displacement curves were observed to be divided into three stages, consisting of an elastic rising stage, a stage in which primary cracks were initiated and were accompanied by a sharp force drop, and a subsequent stage of stable crack growth. For all test groups, the maximum compression force was found to range from 190 N to 280 N and the total work was found to range from 620 J to 1 000 J; transverse compression was associated with lower energy and more stable shell opening

than the other directions. During mid-stage loading, the crack number was observed to reach 4 ~ 7 and then to merge into 2 ~ 3 cracks toward the end of compression, while the final crack area ratio was found to stabilize at 10% ~ 20%. When the crack area ratio reached a peak of 29% and then was reduced to 18% as compression progressed, this range was shown to coincide with the best kernel integrity rate performance. Walnuts with an equivalent diameter of 34 ~ 36 mm compressed along the transverse direction were demonstrated to perform best, combining lower energy consumption, a stable shell-breaking mode, and a maximum kernel integrity rate of 73%. The proposed vision-based segmentation framework and crack descriptors were shown to provide an effective basis for in-situ fracture analysis of biological shells under load and to offer practical guidance for the design and optimization of low-damage, controllable shell-breaking equipment.

**Key words:** compression-induced shell cracking; crack propagation; image segmentation; YOLO v8; mechanical properties; kernel integrity rate

0 引言

核桃 (*Juglans regia* L.) 作为世界“四大干果”之一,兼具食用、保健和经济价值<sup>[1]</sup>。破壳是核桃加工的关键环节,但整体机械化水平仍相对滞后。在破壳与取仁过程中,效率低、核仁完整性差已严重制约了产业的高质量发展<sup>[2]</sup>。当前破壳方式主要包括冲击破壳和机械挤压破壳。冲击破壳虽然速度快,但能量控制不精准、二次损伤风险高、易造成核仁过度粉碎<sup>[3-4]</sup>;相比之下,机械挤压破壳因其可控性强、过程稳定、核仁完整率高,正逐渐成为研究与应用的主流方向。近年来,国内外学者围绕核桃机械挤压破壳进行了大量探索,重点关注挤压头形状与加载角度等机械部件设计及参数优化与核仁完整率之间的关系<sup>[5-8]</sup>。然而,与新疆薄皮核桃相比,云南深纹核桃壳体更厚、质地更为坚硬、机械强度更高,使得许多现有装备与参数难以直接适配,亟需针对其破壳机理开展深入研究<sup>[9]</sup>。

从力学机理看,破壳过程本质上属于核桃壳体在复杂载荷作用下的脆性断裂与裂纹扩展行为。已有研究基于准静态加载、冲击加载和有限元仿真等方法,对核桃壳力学特性进行了分析<sup>[10]</sup>。韩博文<sup>[11]</sup>采用 FDEM 方法构建了基于 Micro-CT 扫描的核桃数值模型,揭示了多点加载下核桃壳的应力非均匀分布特性,发现 4 点加载时应力集中最显著,碎片数量达到峰值。ZHANG 等<sup>[12]</sup>采用有限元-离散元耦合方法 (FDEM) 结合内聚力模型,研究了核桃壳多点加载应力分布规律。杨佳龙等<sup>[4]</sup>基于 FDEM 方法研究了薄皮核桃冲击破碎特性,发现冲击速度为 5 ~ 65 m/s 时,最大碎片尺寸率随冲击角度增加呈线性下降趋势。MAN 等<sup>[13]</sup>基于连续-非连续单元方法,将核桃冲击破碎过程分为接触蓄能、损伤破碎和碎块飞散 3 个阶段,揭示了不同冲击速度的破碎模式差异。这些研究在力学响应与裂纹结构之间建立了关系,为核桃破壳机理分析提供了重

要理论支撑。然而,受制于理想化几何、材料均质与边界简化等假设,数值模型难以在真实加载条件下还原裂纹从萌生到贯通的演进。云南深纹核桃的复杂纹理与厚壳特性加大了建模与参数标定难度,导致对受力变形后的裂纹演化表征仍不够真实与充分。

基于深度学习的图像检测与分割技术因其在特征提取、复杂背景处理及细微缺陷识别方面的优势,已被广泛应用于农产品表面缺陷与裂纹识别任务。LIN 等<sup>[14]</sup>针对穿刺胚胎蛋表面裂纹,结合图像分割与改进分形盒维数算法,构建了 8 × 8 分形矩阵,并利用 Fisher 线性判别函数,实现了对胚胎蛋裂纹的高精度表征与合格性判别。吴雪晴<sup>[15]</sup>针对骏枣裂纹检测,构建了由 YOLO v5s、U-Net 和 ResNet34 组成的综合检测模型,实现了裂纹定位、精细分割和分类,显著提升了红枣裂纹检测自动化与工程化水平。邓志鹏<sup>[16]</sup>则针对澳洲坚果果壳自然裂纹,利用边缘提取方法获得裂纹轮廓,再以 U-Net 神经网络进行裂纹分割,实现了果壳自然裂纹高精度检测。

基于上述研究背景与技术现状,本文以云南深纹核桃 (泡核桃) 为研究对象,搭建双视角同步高速成像与力-位移协同采集平台,引入 YOLO v8m-seg 实例分割模型,实现裂纹的自动识别与量化;在前后视图标定的基础上,构建裂纹总数、裂纹总面积占比、裂纹分布象限数、核仁完好率等指标体系,以等效直径与挤压方向为自变量开展两因素全因子试验,系统揭示挤压破壳过程力学响应、裂纹演化特征以及核仁完好率的规律,为低损伤、可控的机械化破壳提供方法与理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料样本

为获得物理特性一致、具有代表性的试验样本,随机选取 600 个自然晾干的云南泡核桃。使用电子游标卡尺测量每个核桃横径  $T$ 、棱径  $S$ 、纵径  $L$  各 3

次,取平均值,测量方法如图 1 所示。经计算,所有核桃横径均值为 37.60 mm、棱径均值为 31.25 mm、纵径均值为 39.28 mm。

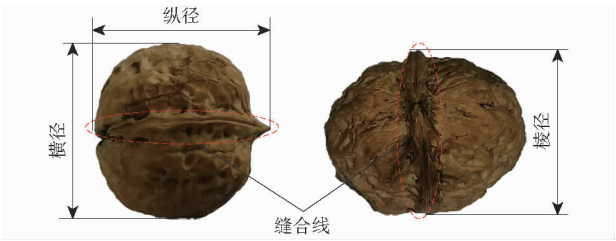


图 1 核桃三轴直径

Fig.1 Three principal diameters of a walnut

核桃球度<sup>[17]</sup>计算式为

$$C = \frac{\sqrt[3]{TSL}}{T}$$
 (1)

经计算,所有核桃球度平均值为 0.91,表明大多数核桃形状从 3 径尺寸来看接近椭圆形。

为实现对样本标准化分级并探究尺寸效应,需计算每个核桃等效直径  $D$ ,计算式为

$$D = \sqrt[3]{TSL}$$
 (2)

经计算,98% 的样本等效直径分布于 30 ~ 42 mm 范围内。据此,以 2 mm 为间隔将其划分为 6 个水平(30 ~ 32 mm、32 ~ 34 mm、34 ~ 36 mm、36 ~ 38 mm、38 ~ 40 mm、40 ~ 42 mm),其分布情况如图 2 所示,基本符合正态分布<sup>[18-19]</sup>。

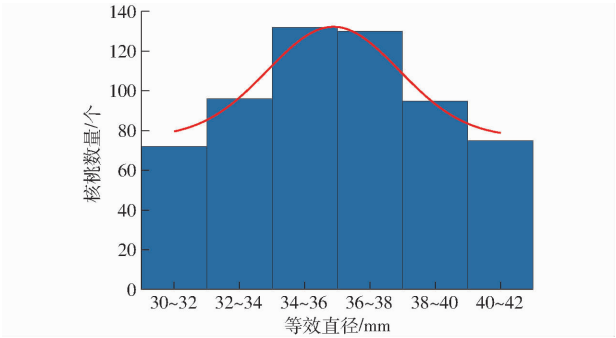


图 2 等效直径分布

Fig.2 Distribution of equivalent diameter

在 600 个核桃样品中随机选取 20 个,在 50℃ 鼓风干燥箱中干燥至恒质量并测定含水率,结果显示样品含水率集中在 7% ~ 10% 区间,差异较小。每个等效直径水平下随机选取 5 个核桃,手动破壳后测壳厚,结果表明,各等效直径水平间的壳厚差异较小,所以含水率以及壳厚不作为主要因素。

1.2 仪器与设备

试验采用实验室自主搭建的单向挤压试验平台作为核心设备,其动力系统配置 SE50 × 50S 气缸。该平台集成力传感器与位移传感器,可实时采集挤压力与位移数据。核桃裂纹的视觉信息通过 2 台 WP – GUT050M 型工业相机(分辨率 600 像素 ×

800 像素,帧率 350 f/s)同步采集。2 台相机与补光灯呈对称布局安装于挤压装置两侧,与支撑平台齐平,距离为 15 cm,以此构成双视角高速成像系统,如图 3 所示。样本特性参数测定辅助设备包括精度 0.02 mm 的数字游标卡尺、精度 0.01 g 的电子秤及鼓风干燥箱等。

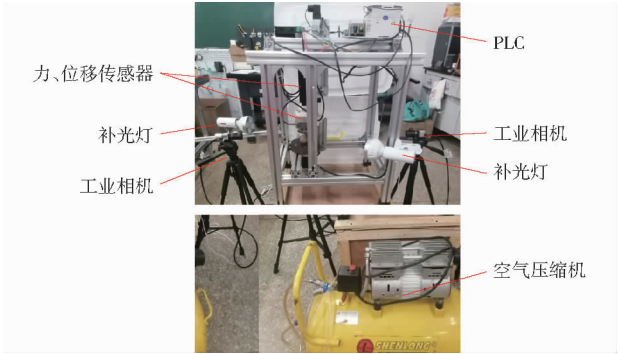


图 3 试验装置

Fig.3 Experimental device

1.3 挤压试验设计

由前期预试验结果可知,当位移为 6 ~ 8 mm 时,核桃壳能充分开裂且核仁损伤较小;位移不足 6 mm 时易出现壳体破裂不完全、取仁困难;而超过 8 mm 则会显著增加核仁机械损伤风险。因此,为兼顾破壳率与核仁完好率,试验过程等效直径为 30 ~ 34 mm 区间的小尺寸核桃挤压位移固定为 6 mm,34 ~ 38 mm 区间的中等尺寸核桃挤压位移固定为 7 mm,38 ~ 42 mm 区间的大尺寸核桃挤压位移固定为 8 mm<sup>[18]</sup>。

试验采用两因素全因子方案,系统考察等效直径(因素 A)与挤压方向(因素 B)<sup>[20]</sup>及其交互作用对破壳过程的影响,试验因素水平如表 1 所示。从横径、棱径、纵径 3 个方向分别挤压 6 个等效直径核桃,共 18 个试验组,每组 20 个核桃。同步获取每个核桃挤压力、位移、正面以及背面视频。为减少环境对图像采集质量的影响,统一在室内正午时分进行试验,因素外的条件保持一致。

表 1 试验因素水平

Tab.1 Levels of experimental factors

| 水平 | 等效直径/mm | 挤压方向 |
|----|---------|------|
| 1  | 30 ~ 32 | 横径   |
| 2  | 32 ~ 34 | 棱径   |
| 3  | 34 ~ 36 | 纵径   |
| 4  | 36 ~ 38 |      |
| 5  | 38 ~ 40 |      |
| 6  | 40 ~ 42 |      |

1.4 裂纹图像分割模型

1.4.1 分割数据集构建与增强

每个试验组随机抽取 10 个样品视频用于分析

裂纹的动态演化规律,其余 10 个样品视频用于制作分割数据集。每个样品的正面、背面视频各手动抽取 10 帧包含关键破裂节点的静态图像,并使用专业标注工具对裂纹与核桃壳进行精细的像素标注,标注示例如图 4 所示。共获得 3 600 幅带有标注的图像,并按比例 7:1:2 随机划分为训练集、验证集与测试集。为提升模型鲁棒性与泛化能力,使用高斯噪声、平移、旋转的方式将训练集与验证集增至原来的 4 倍<sup>[21]</sup>,最终得到分割数据集,训练集、验证集与测试集数量分别为 10 080、1 440、720 幅。

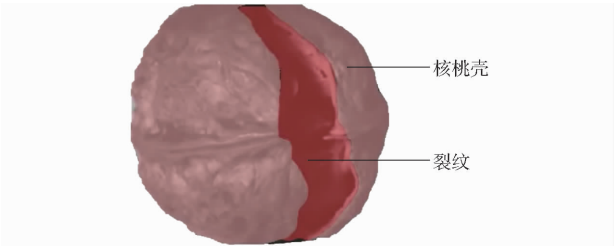


图 4 裂纹分割标注  
Fig. 4 Example of crack segmentation labels

1.4.2 模型选择与评价指标

传统分割(如阈值分割、边缘检测等)在复杂成像环境下对噪声、光照及视角变化较为敏感,难以稳

定识别形态多样、分布不规则且尺度细小的裂纹目标;同时,核桃破碎后表面产生的反光、阴影及碎片遮挡进一步削弱了其精度与稳定性。

相较之下,卷积神经网络可通过端到端训练自动提取多层次特征,对复杂背景与多样裂纹形态具有更强的适应能力<sup>[22]</sup>。其中,YOLO 系列模型在实例分割任务中兼顾精度与效率,对小尺度目标的检测尤为敏感,适合核桃裂纹的识别与分割。所以本文选取 YOLO v8 与 YOLO 11 系列 3 个代表性模型,YOLO v8n-seg、YOLO v8m-seg 和 YOLO 11n-seg 对比性能。其中,YOLO v8m-seg 采用改进的 CSPDarknet 主干网络与 PAN-FPN 双向特征融合结构,以强化多尺度特征表达和细粒度裂纹信息的提取。模型通过检测头与分割头协同输出边界框与掩膜,实现端到端的实例分割流程,其整体架构如图 5 所示<sup>[23]</sup>。

常见的模型评价指标包括精确率 (Precision,  $P$ )、召回率 (Recall,  $R$ ) 和平均精度均值 (mean Average Precision, mAP50)<sup>[24-25]</sup>。由于本研究属于分割任务,重点在裂纹与核桃壳的精准分割,模型训练结果同时输出 box(检测框)与 mask(分割掩膜)2

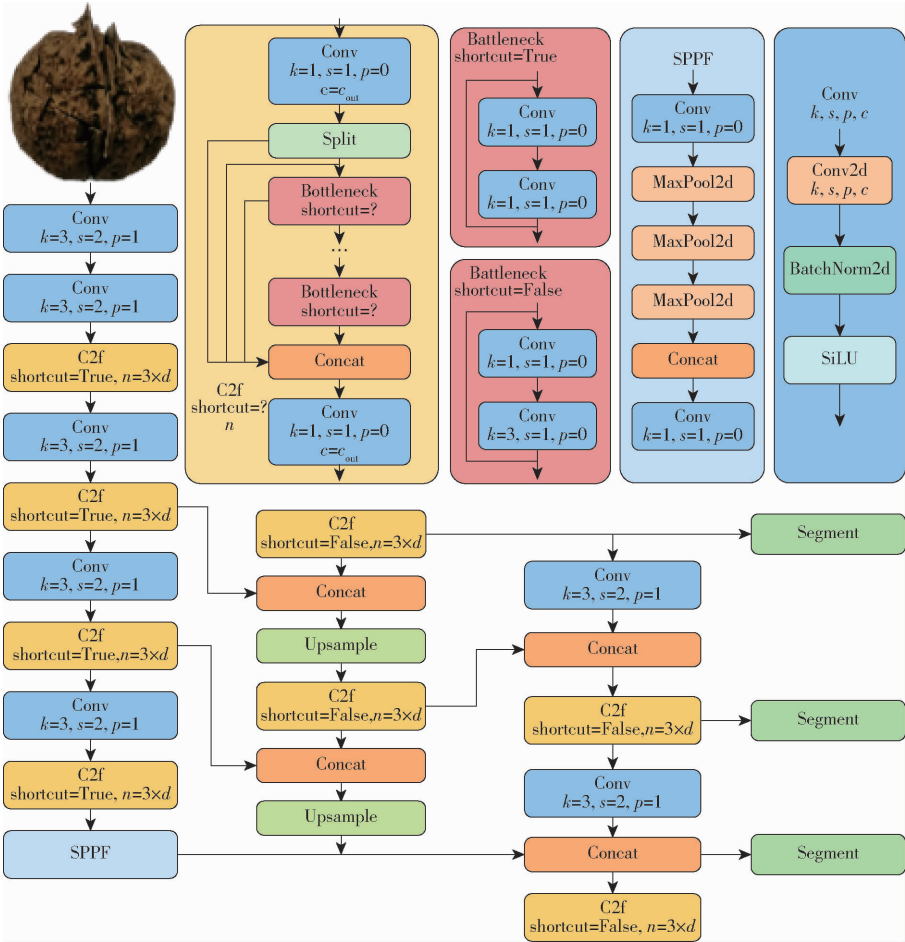


图 5 YOLO v8m-seg 网络结构  
Fig. 5 Architecture of YOLO v8m-seg network

类指标。综合考虑研究目标,最终采用  $P_{\text{mask}}$ 、 $R_{\text{mask}}$ 、 $\text{mAP50}_{\text{mask}}$  作为模型性能评价指标。

1.4.3 模型环境配置

所有模型训练与评估试验均在统一软硬件环境下进行,以确保结果可比性,具体配置如表 2 所示。训练过程中,输入图像尺寸统一调整为 640 像素 × 640 像素,批大小 (batch size) 设为 16,最大迭代次数 (epoch) 为 1 200,并设置早停机制 (patience 为 100) 以防止过拟合。

表 2 硬件配置和软件环境

Tab.2 Hardware configuration and software environment

| 名称         | 硬件/软件配置                       |
|------------|-------------------------------|
| 操作系统       | Windows 10 64 位               |
| CPU        | 英特尔酷睿 i7-9700F@3.70 GHz       |
| GPU        | NVIDIA GeForce RTX 4070 12 GB |
| 内存/GB      | 16                            |
| Python 版本  | 3.8                           |
| PyTorch 版本 | 2.0.0                         |
| CUDA 版本    | 11.8                          |

1.5 裂纹表征指标定义

为实现核桃挤压破壳过程裂纹演化特征的精准量化分析,基于模型性能对比结果,选取效果最优的实例分割模型,对每个试验组中用于裂纹演化规律研究的 10 个核桃样本进行处理,每个核桃的正面与背面视频都逐帧分割出裂纹与核桃壳。由于试验过程镜头与视距的影响,双视角成像系统的正面与背面相机存在一定的成像倍率差异,因此以正面图像为基准,通过引入比例系数对背面图像相关参数进行统一校准。比例系数  $\alpha$  由正、背面壳体像素面积计算得到,计算式为

$$\alpha = \frac{A_{\text{shell}}^f}{A_{\text{shell}}^b} \tag{3}$$

其中  $A_{\text{shell}}^f = \sum M_{\text{shell}}^f$  (4)

$$A_{\text{shell}}^b = \sum M_{\text{shell}}^b \tag{5}$$

式中  $A_{\text{shell}}$ ——核桃壳像素面积  
 $M_{\text{shell}}$ ——核桃壳二值掩膜,取 0、1  
 $f$ ——核桃正面  
 $b$ ——核桃背面

为精准定位裂纹在核桃壳表面的空间分布特征,以核桃壳质心  $(c_x, c_y)$  为原点建立笛卡尔坐标系<sup>[26]</sup>,使  $X$  轴、 $Y$  轴分别平行于核桃检测框的宽边和长边。在此坐标系下,将核桃正面图像按逆时针方向划分为 4 个象限,右上区域为第一象限  $Q_1$ ,逆时针依次为  $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ ,背面图像经比例系数校准后映射为第 5 至第 8 象限 ( $Q_5 \sim Q_8$ ),如图 6 所示。

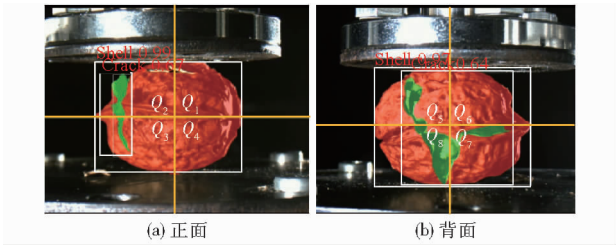


图 6 坐标象限划分

Fig.6 Schematics of coordinate quadrant division

据此可得到裂纹的数量、面积及位置信息,本文提出 3 个表征指标以全面反映裂纹演化规律,分别为裂纹总数  $N_{\text{total}}$ 、裂纹分布象限数  $E$  与裂纹总面积占比  $R_{\text{total}}$ 。其中,裂纹总数为核桃正、背面分割得到的所有独立裂纹实例数量之和,用于衡量裂纹的多寡;裂纹分布象限数表示 8 个象限中出现裂纹象限个数,用于衡量裂纹的空间分布情况;裂纹总面积占比表示正、背面裂纹总面积占核桃整体面积的比例,用于衡量核桃整体破碎程度。计算式分别为

$$N_{\text{total}} = N_{\text{crack}}^f + N_{\text{crack}}^b \tag{6}$$

$$E = \sum_{i=1}^8 I(C_i) \quad (E \in [0, 8]) \tag{7}$$

$$R_{\text{total}} = \frac{\sum M_{\text{crack}}^f + \alpha \sum M_{\text{crack}}^b}{\sum (M_{\text{crack}}^f + M_{\text{shell}}^f) + \alpha \sum (M_{\text{crack}}^b + M_{\text{shell}}^b)} \tag{8}$$

其中

$$C_i = \sum_{(x,y) \in \Omega_i} M_{\text{crack}}^f(x,y) + \alpha \sum_{(x,y) \in \Omega_i} M_{\text{crack}}^b(x,y) \tag{9}$$

$$I(C_i) = \begin{cases} 1 & (C_i > 0) \\ 0 & (C_i = 0) \end{cases} \tag{10}$$

式中  $N_{\text{crack}}$ ——裂纹检测目标数

$M_{\text{crack}}$ ——裂纹二值掩膜,取 0、1

$C_i$ ——第  $i$  象限裂纹像素面积

$I(C_i)$ ——指示函数

1.6 核仁统计方法

核仁质量是衡量核桃破壳质量与设备性能的关键指标。依据 LY/T 1922—2010《核桃》以及 GB/T 20398—2021《核桃坚果质量等级》中的核仁等级规定,单颗核桃核仁结构可分为整仁、一路仁、二路仁和碎仁<sup>[27]</sup>,如图 7 所示。其中碎仁价值较低,所以本研究以二路仁为最小单位,即 1 个整仁等于 2 个一路仁等于 4 个二路仁,引入“核仁完好率” $\beta$  作为评价核桃破壳质量的核心指标,计算式为

$$\beta = \frac{n}{4} \tag{11}$$

式中  $n$ ——单个核桃破壳后获得的“二路仁”块数,取  $n \in (0, 1, 2, 3, 4)$

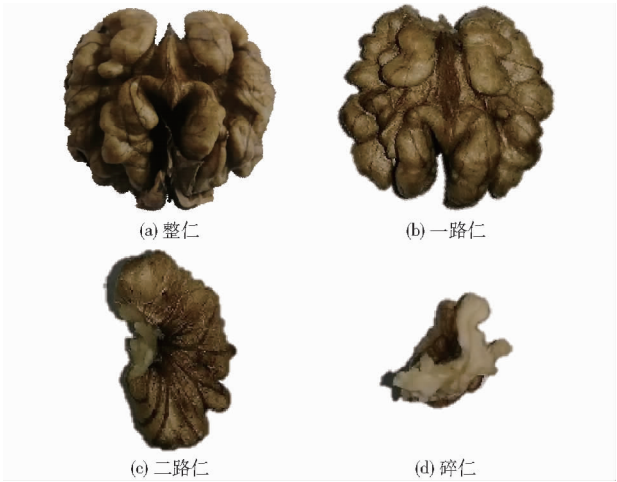


图 7 核仁分类  
Fig. 7 Nucleolus classification

2 结果与分析

2.1 裂纹分割模型性能

选取 YOLO v8n - seg、YOLO v8m - seg、YOLO 11n -seg 3 种实例分割模型,分别在独立测试集上运行,结果如表 3 所示。对于核桃壳 (shell) 类别,3 个模型  $P_{mask}$ 、 $R_{mask}$ 、 $mAP50_{mask}$  均大于 98%,表明壳体分割相对容易,因此对比的关键是裂纹 (crack) 类别。结果显示,YOLO v8m - seg 模型的  $mAP50_{mask}$  达 82.3%、 $P_{mask}$  达 86.3%,为所有模型之最。虽然  $R_{mask}$  为 81.3% 略低于另外 2 个模型,但以更低的误检率换取更稳定的整体精度,更符合精准分割细小裂纹、抑制误检的任务诉求。所以最终选择 YOLO v8m - seg 作为分割的主模型。

表 3 模型训练效果

Tab.3 Model training results

| 模型             | 标签  | $P_{mask}$ | $R_{mask}$ | $mAP50_{mask}$ |
|----------------|-----|------------|------------|----------------|
| YOLO v8n - seg | 裂纹  | 60.3       | 85.4       | 76.3           |
|                | 核桃壳 | 99.3       | 99.8       | 100            |
| YOLO v8m - seg | 裂纹  | 86.3       | 81.3       | 82.3           |
|                | 核桃壳 | 100        | 98.3       | 99.5           |
| YOLO 11n - seg | 裂纹  | 58.8       | 86.4       | 73.1           |
|                | 核桃壳 | 99.2       | 98.8       | 100            |

2.2 挤压过程力学响应

各组核桃在单向挤压下力学响应过程基本一致,如图 8 所示,其典型的力-位移曲线可分为 3 个阶段,与文献[28 - 29]研究结果一致。第 1 阶段,壳体未破裂,结构强度大,核桃主要发生弹性形变,挤压力近似线性上升,位移(即变形量)缓慢增长;第 2 阶段,挤压力达到挤压过程最大峰值,核桃壳强度也到达极限,主裂纹开始萌生并扩展。由于裂纹的产生,壳体抗压能力下降、结构强度迅速衰减,挤

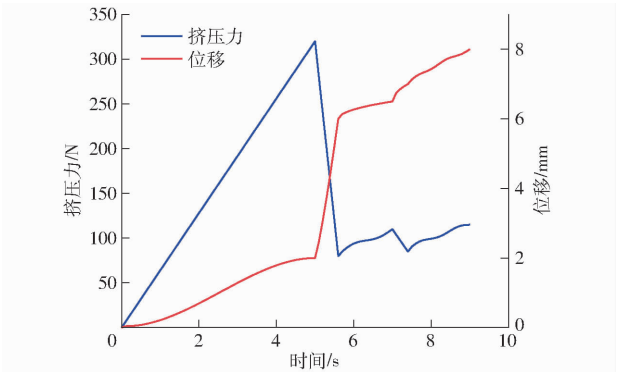


图 8 挤压力和位移变化曲线

Fig. 8 Variations of compression force and displacement

压力由峰值陡降至较低水平,同时位移由约 2 mm 快速跃迁至 6 mm 左右;第 3 阶段,壳体产生主裂纹后仍具有一定残余承载能力,随着挤压头的继续前进,一些次级裂纹逐渐生成,并相互贯通,在这个过程中挤压力缓慢回升到一些较小的峰值后又继续下降,如此循环起伏,直至挤压结束。

对核桃力学特性进行双因素方差分析 (ANOVA),因素 A 为等效直径,因素 B 为挤压方向。A 与 B 对最大挤压力(力-位移曲线加载阶段的全局最大力)、峰值位移(力-位移曲线上达到最大挤压力时的位移)、峰值功(从加载开始至力峰的能量输入)与总功(挤压结束前的累计能量输入)均呈极显著效应( $p \leq 0.01$ ),且二者交互作用同样显著( $p \leq 0.01$ )。结果说明,核桃破壳的力学特性并非由单一因素决定。

等效直径与挤压方向对力学特性的影响效果如图 9 所示。由图 9 可知,破壳所需最大挤压力在 190 ~ 290 N 之间,而总功在 620 ~ 1 000 J 之间。棱径和纵径方向挤压的核桃最大挤压力、峰值位移、峰值功以及总功等都随着等效直径增大而增大,表明核桃的尺寸越大,其结构越稳定、抗断裂能力越强,需要更大的挤压力和峰值功核桃才会开始产生裂纹,要达到取仁目的也得做更多的功。与 MAN 等<sup>[30]</sup>的研究一致。横径方向挤压的核桃其最大挤压力、峰值位移、峰值功、总功等都小于棱径、纵径方向,表明核桃在该方向的结构稳定性较差、抗压能力低、在较小的形变下吸收较少能量即可产生裂纹。并且该方向各力学特征量的值随等效直径变化趋势也有别于棱径和纵径方向,在 30 ~ 34 mm 时随着等效直径增大而逐渐增大,在 36 ~ 42 mm 范围随着等效直径的增大而缓慢减小,在等效直径 34 ~ 36 mm 区间取得最大值,最大挤压力为 231 N、总功为 760 J,表明该区间的抗压能力最强。

2.3 等效直径与挤压方向对裂纹特征量的影响规律

基于 YOLO v8m - seg 模型的分割结果,对挤压

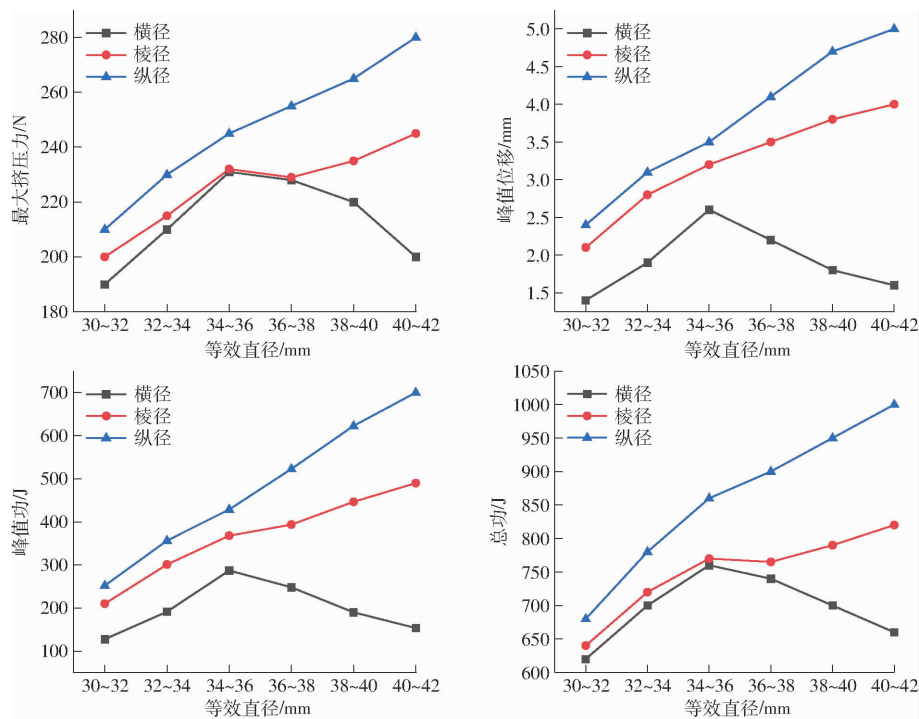


图 9 挤压力特性  
Fig.9 Compression force characteristics

过程裂纹总数、分布象限数及裂纹总面积占比进行了系统分析,如表 4 和图 10 所示。每个核桃的“裂纹分布象限数-最大值”为该核桃挤压过程裂纹数量最多即“裂纹总数-最大值”时对应的裂纹分布象限数。结果显示,等效直径与挤压方向对裂纹的产生与演化具有显著影响,不同特征指标在峰值阶段与挤压结束时的显著性差异明显。

表 4 裂纹特征量双因素方差

| Tab.4 Two-way ANOVA of crack characteristic quantities |    |                      |
|--------------------------------------------------------|----|----------------------|
| 参数                                                     | 因素 | 显著性                  |
| 裂纹总数-最大值                                               | A  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹总数-最大值                                               | B  | $0.01 < p \leq 0.05$ |
| 裂纹总数-最大值                                               | AB | $0.05 < p \leq 0.10$ |
| 裂纹总数-终值                                                | A  | $0.05 < p \leq 0.10$ |
| 裂纹总数-终值                                                | B  | $p > 0.10$           |
| 裂纹总数-终值                                                | AB | $p > 0.10$           |
| 裂纹分布象限数-最大值                                            | A  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹分布象限数-最大值                                            | B  | $0.05 < p \leq 0.10$ |
| 裂纹分布象限数-最大值                                            | AB | $p > 0.10$           |
| 裂纹分布象限数-终值                                             | A  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹分布象限数-终值                                             | B  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹分布象限数-终值                                             | AB | $0.05 < p \leq 0.10$ |
| 裂纹总面积占比-最大值                                            | A  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹总面积占比-最大值                                            | B  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹总面积占比-最大值                                            | AB | $p > 0.10$           |
| 裂纹总面积占比-终值                                             | A  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹总面积占比-终值                                             | B  | $p \leq 0.01$        |
| 裂纹总面积占比-终值                                             | AB | $0.01 < p \leq 0.05$ |

(1) 裂纹总数

在峰值时,等效直径对裂纹总数的影响达到极显著水平( $p \leq 0.01$ ),挤压方向的影响为显著水平( $0.01 < p \leq 0.05$ ),交互项则为边缘显著( $0.05 < p \leq 0.10$ )。表明裂纹数量主要受等效直径因素主导,挤压方向影响次之。由图 10a 可见,随着等效直径增大,裂纹总数的最大值逐渐减小,即核桃尺寸的增大限制了裂纹产生,尺寸越大核桃结构越稳定,该规律与文献[30-31]的研究一致。在挤压过程后期,多数核桃裂纹都会逐渐贯通与合并,导致挤压结束时裂纹数量都稳定在 2~3 条,不同挤压方向与不同等效直径核桃裂纹数量差异较小,如图 10b 所示,与方差分析的结果相符,等效直径仅呈边缘显著,挤压方向与交互项均不显著。

(2) 裂纹分布象限数

在峰值时,裂纹数量最多,分布象限数也接近最大值,此时等效直径对裂纹分布具有极显著影响,而挤压方向仅呈边缘显著,表明核桃裂纹空间分布主要受核桃尺寸的影响。如图 10c 所示,小直径核桃的裂纹更易在多个象限内分布,通常为 5~8 个,随着等效直径增大裂纹分布范围减小;在挤压结束时,等效直径与挤压方向的主效应均达到极显著水平,表明裂纹空间分布同时受到等效直径与挤压方向的综合调控,裂纹分布象限数与峰值时的数量差异不大,如图 10d 所示。与 LI 等<sup>[31]</sup>的研究类似,在整个挤压过程,等效直径大的核桃裂纹总数少、分布集中,挤压结束后易形成大块的碎片。

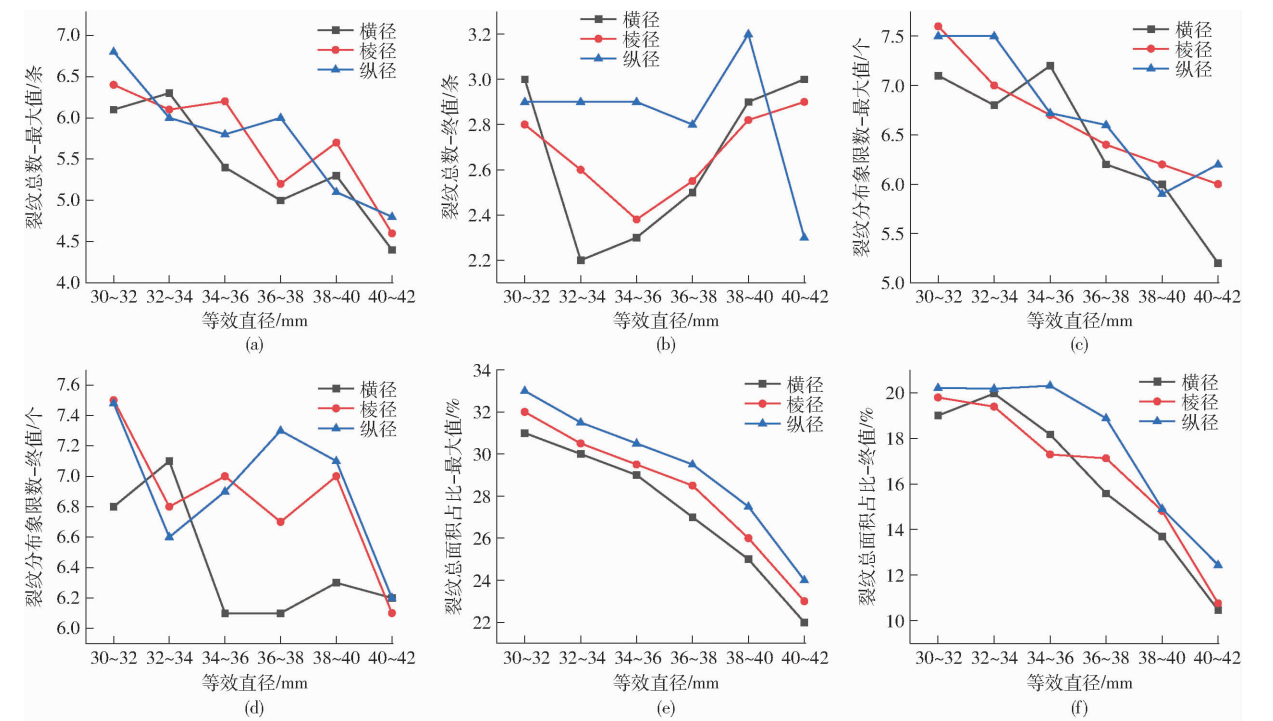


图 10 裂纹特征量趋势  
Fig. 10 Trends of crack characteristic quantities

(3) 裂纹总面积占比

峰值时方差分析结果显示,等效直径与方向的主效应均极显著,但交互项不显著。由图 10e 可知,裂纹总面积占比的峰值在 22% ~ 33% 之间,且随等效直径增大而降低。由文献[31 - 32]研究可知,这是因为与小核桃相比,大尺寸核桃结构更稳定。此时横径方向挤压核桃裂纹总面积占比普遍低于棱径和纵径方向;挤压结束时,等效直径与方向依然极显著,而交互项亦达到显著水平。此时由于核桃壳的形变以及碎片错位,裂纹总面积占比在 10% ~ 20% 之间,较峰值时下降 9 ~ 14 个百分点,不同方向下降幅度随直径变化而异,如图 10f 所示,体现出典型的“尺寸 × 方向”协同效应。其中横径方向挤压的 34 ~ 36 mm 的核桃裂纹总面积占比最大值为 29%,挤压结束时下降到 18%。

2.4 核仁完好率

为明确核仁完好率的影响来源,对等效直径与挤压方向进行双因素方差分析,结果显示,两因素对核仁完好率均呈极显著效应 ( $p \leq 0.01$ ),且交互作用同样极显著 ( $p \leq 0.01$ ),说明核仁完好率并非单一因素决定,而是由等效直径与挤压方向的耦合效应共同调控。

核仁完好率变化曲线如图 11 所示,从横径方向挤压的核桃核仁完好率高于另外 2 个方向,这与 ZHANG 等<sup>[27]</sup>研究的云南深纹核桃破壳效果一致,并且在挤压等效直径 34 ~ 36 mm 核桃时,核仁完好率最高,为 73%。由 BAO 等<sup>[29]</sup>研究结论可知,这是

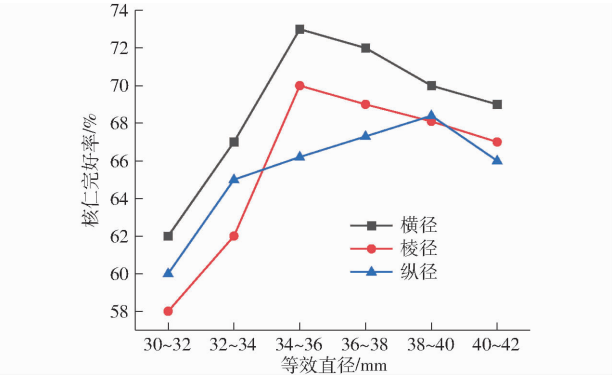


图 11 不同方向核仁完好率变化曲线  
Fig. 11 Variation of nucleolus integrity rate under different directions

由于将破壳过程的单向力加载在核桃壳表面的中间位置(从横径方向挤压),使得壳表面力载荷均匀,从而提高了破壳效果。

棱径方向挤压的核桃裂纹特征量与核仁完好率的变化趋势与横径方向类似,等效直径小于 34 ~ 36 mm 时,随着等效直径增大,其裂纹数量减少、分布集中、面积占比减小,核仁完好率逐渐增高。这是因为等效直径较小时,核桃抗压能力和结构稳定性较低,裂纹更易产生并扩展,核仁易受到损伤,导致了核仁完好率较低;而当等效直径超过 34 ~ 36 mm 时,裂纹特征量变化趋势与小尺寸组相似,但核仁完好率却随着等效直径增大而下降。这是因为此时核桃尺寸较大,随着等效直径的增大,核桃抗压能力和结构稳定性增高,限制了主裂纹的扩展以及次级裂

纹的产生,导致挤压结束时许多核仁还包含在较大的核桃壳碎片里,不进行二次破壳难以全部取出,所以核仁完好率略有降低。

纵径方向挤压的核桃当等效直径小于 34 ~ 36 mm 时,裂纹特征量以及核仁完好率的变化规律与横径和棱径方向类似,而当等效直径大于 34 ~ 36 mm 时,随着等效直径增大,裂纹数量减少,分布变集中、面积占比减小,其核仁完好率变化规律却不同,整体是上升趋势。产生这种情况的主要原因是,尺寸大的核桃从纵径方向挤压时,虽然裂纹少,但在裂纹扩展过程核桃壳的碎片较长,容易发生断裂,导致核仁相对容易剥离。

3 结论

(1)构建了一种基于 YOLO v8m-seg 深度学习模型的双视角同步成像核桃裂纹自动分割与量化分析方法,搭建了集气动加载、力-位移传感与高速成像于一体的试验平台,实现了对挤压力、位移以及裂纹总数、裂纹分布象限和裂纹总面积占比等裂纹关键特征的稳定提取,模型精确率达 86.3%,平均精度均值达 82.3%。系统分析了等效直径与挤压方

向、破壳力学响应、裂纹演化特征以及核仁完好率的关联机制。

(2)挤压过程力-位移变化分为 3 个阶段。所有样本挤压过程最大挤压力为 190 ~ 280 N,做功为 620 ~ 1 000 J;裂纹总数最多为 4 ~ 7 条,后期的挤压过程逐渐贯通合并减少至最终 2 ~ 3 条;裂纹象限分布最高可达 5 ~ 8 个,挤压结束时分布最广;裂纹面积占比最高达 22% ~ 33%,随着挤压的进行核桃壳碎片错位变形最终下降 9 ~ 14 个百分点。

(3)核桃等效直径与挤压方向显著影响力学响应、裂纹演化及核仁完好率。等效直径小的核桃最大挤压力小、峰值位移小、做功少,极易产生破碎;裂纹数量多、空间分布广、面积占比大,容易扩张,核仁完好率低。对比棱径和纵径方向,从横径方向挤压的核桃最大挤压力小、做功少、裂纹面积占比小,而核仁完好率最高。

(4)从横径方向挤压等效直径 34 ~ 36 mm 中等尺寸的核桃效果最好,核仁完好率最高可达 73%。挤压过程中最大挤压力约 231 N、总功约 760 J,而裂纹总面积占比最大达 29%,挤压结束时裂纹总面积占比为 18%。

参 考 文 献

[1] 刘明政,李长河,张彦彬,等. 柔性带差速挤压核桃脱壳性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 99-107.  
LIU Mingzheng, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Performance test of walnut shelling using flexible-belt and differential velocity extrusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 99-107. (in Chinese)

[2] 尹达,吴立国,李艳娜,等. 我国坚果脱壳机械现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(10): 4-9.  
YIN Da, WU Liguang, LI Yanna, et al. Present situation and development trend of nut shelling machinery in China[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(10): 4-9. (in Chinese)

[3] 李龙,曾勇,满晓兰,等. 冲击条件下核桃损伤断裂特性尺寸效应研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10): 108-114.  
LI Long, ZENG Yong, MAN Xiaolan, et al. Study on size effect of damage fracture characteristics of walnut under impact condition[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 108-114. (in Chinese)

[4] 杨佳龙,毛碧琦,张宏,等. 基于 FDEM 的核桃冲击破壳特性研究[J]. 塔里木大学学报, 2025, 37(2): 55-66.  
YANG Jialong, MAO Biqi, ZHANG Hong, et al. Study on walnut impact breaking shell characteristics based on FDEM[J]. Journal of Tarim University, 2025, 37(2): 55-66. (in Chinese)

[5] 李康,李长河,刘明政,等. 多工位定向挤压鲜核桃破壳装置设计与试验[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2023, 41(3): 265-273.  
LI Kang, LI Changhe, LIU Mingzheng, et al. Design and experiment of multi-station directional extrusion shell breaking device for fresh walnut[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2023, 41(3): 265-273. (in Chinese)

[6] 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 Mingcun, LIU Mingzheng, LI Changhe, 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. (in Chinese)

[7] 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): 156-157,160.  
CHENG Guoliang, ZHENG Jiahong, LU Jundang, et al. Research on orthogonal test of six-point squeeze walnut sheller-broken machines[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021(19): 156-157,160. (in Chinese)

[8] 高耀火. 核桃低损破壳关键技术研究及装置设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2025.  
GAO Yaohuo. Key technologies and device design for low-loss walnut shell-cracking[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)

[9] 李瑞宁,蒋强. 核桃破壳机械的研究机理探讨[J]. 现代农业装备, 2025, 46(1): 84-87.

[10] 李龙. 动静载荷下薄皮核桃断裂特性研究初探[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2023.  
LI Long. Study on fracture characteristics of walnut under dynamic and static load[D]. Alar: Tarim University, 2023. (in

Chinese)

[11] 韩博文. 数值化薄皮核桃多点挤压破壳特性研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2025.  
HAN Bowen. Numerical study on multi-point extrusion shell breaking characteristics of thin-skinned walnuts[D]. Alar: Tarim University, 2025. (in Chinese)

[12] ZHANG H, HAN B W, LAN H P, et al. Characterization of walnut shell crushing under multi-point loading based on numerical simulation[J]. Journal of Food Engineering, 2026, 403: 112743.

[13] MAN X L, LI L, TANG Y R, et al. Study on impact crushing behaviour of hollow shell particles considering crack branching fractal characteristics[J]. Powder Technology, 2026, 467: 121496.

[14] LIN W J, ZHAO M Y, CHEN H K, et al. Characterization and identification of cracks on perforated embryo eggs based on fractal theory[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2024, 40(3): 317–326.

[15] 吴雪晴. 基于深度学习的骏枣裂纹检测方法 & 装置研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2025.  
WU Xueqing. Research on deep learning-based methods and devices for crack detection in jujubes[D]. Alar: Tarim University, 2025 (in Chinese)

[16] 邓志鹏. 澳洲坚果自然裂纹检测与定位方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2025.  
DENG Zhipeng. Research on natural crack detection and localization methods in macadamia nuts[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2025. (in Chinese)

[17] 李鑫瀛. 核桃物理特性与力学特性的测定与分析[J]. 食品安全导刊, 2024(36): 71–74.  
LI Xinying. Determination and analysis of physical and mechanical properties of walnuts[J]. China Food Safety Magazine, 2024(36): 71–74. (in Chinese)

[18] 张永成, 盖广鑫, 宗望远, 等. 基于 FDEM 的核桃挤压-剪切载荷下破碎机理与减损方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 291–300.  
ZHANG Yongcheng, GAI Guangxin, ZONG Wangyuan, et al. Crushing mechanism of walnut under extrusion-shear load based on FDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 291–300. (in Chinese)

[19] HAN B W, SU G G, ZENG Y, et al. FDEM investigation on the crack propagation characteristics of walnut shell under multi-contact loadings[J]. Frontiers in Materials, 2023, 10: 1293683.

[20] XU P, WANG L Z, LIU J L, et al. Effects of geometrical characteristics of suture on fracture resistance of walnut shell[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(6): 2732–2741.

[21] HWANG D, KIM J J, MOON S, et al. Image augmentation approaches for building dimension estimation in street view images using object detection and instance segmentation based on deep learning[J]. Applied Sciences-Basel, 2025, 15(5): 2525.

[22] ZHANG X Y, WANG J F, CHENG X C, et al. A review of deep learning-based medical image segmentation[J]. Iet Image Processing, 2025, 19(1): e70163.

[23] ZHANG Q, MIN B, HANG Y L, et al. A full-scale lung image segmentation algorithm based on hybrid skip connection and attention mechanism[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 23233.

[24] URREA C, VELEZ M. Advances in deep learning for semantic segmentation of low-contrast images: a systematic review of methods, challenges, and future directions[J]. Sensors, 2025, 25(7): 2043.

[25] KAUR H, SHARMA R, KAUR J. Comparison of deep transfer learning models for classification of cervical cancer from pap smear images[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 3945.

[26] 孙艳敏, 韩玉, 席晓琦, 等. 复合轨迹锥束 X 射线层析成像系统研制[J/OL]. 光学学报, 2025–09–24: 1–20. <https://link.cnki.net/urlid/31.1252.o4.20250923.1455.076>.

[27] ZHANG T Y, WANG J W, XU D C, et al. The study on shell-breaking characteristics and crack formation patterns of walnuts (*Juglans sigillata* D.) under static loading[J]. Journal of Food Process Engineering, 2025, 48(7): e70182.

[28] 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.

[29] BAO X L, CHEN B Y, DAI P, et al. Construction and verification of spherical thin shell model for revealing walnut shell crack initiation and expansion mechanism[J]. Agriculture-Basel, 2022, 12(9): 1446.

[30] MAN X L, LI L, ZHANG H, et al. Study on the relationship between crack initiation and crack bifurcation in walnut shells based on energy[J]. Agriculture-Basel, 2024, 14(1): 69.

[31] LI L, MAO B, ZENG Y, et al. Experimental study on crack irregularity of hollow shell particle under impact loading[J]. Powder Technology, 2023, 427: 118704.

[32] KOYA O A, FAVORODE M O. Mathematical modelling of palm nut cracking based on Hertz’s theory[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(4): 471–478.