

挤压载荷下核桃力学特性及其仁种皮损伤研究

朱占江¹, 渠述贺^{1,2}, 毛吾兰¹, 杨莉玲¹, 买合木江·巴吐尔¹, 沈晓贺¹

(1. 新疆维吾尔自治区农业科学院 农业装备研究所, 乌鲁木齐 830091;

2. 昌吉学院 能源与控制工程学院, 新疆 昌吉 831100)

摘要:旨在为降低机械破壳时核桃仁的种皮损伤提供参考,以不同加载方向和加载速度对原果核桃和核桃半仁进行单轴挤压试验,探究其不同加载条件下核桃的受力情况及其仁种皮损伤情况。结果表明,加载方向对原果核桃和核桃半仁的挤压载荷峰值和种皮损伤面积的影响更显著,其中:沿核桃原果纵径方向挤压时所需载荷峰值明显大于棱径方向和横径方向的,沿核桃半仁厚度方向挤压时所需载荷峰值明显大于长度方向和宽度方向的;沿原果核桃横径方向挤压时的种皮损伤程度显著小于沿纵径方向和棱径方向的,沿核桃半仁厚度前部挤压时的种皮损伤面积最小。综上,在实际生产过程中,应尽量沿横径方向对原果核桃进行施力破壳,进而降低核桃仁的种皮损伤。

关键词:核桃;核桃仁;挤压;力学特性;种皮损伤

中图分类号:TS222+.1;TS224.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)12-0140-07

Mechanical properties of walnut and damage of its kernel pellicle under compression load

ZHU Zhanjiang¹, QU Shuhe^{1,2}, MAO Wulan¹, YANG Liling¹,
MAIHEMUJIANG · Batuer¹, SHEN Xiaohe¹

(1. Institute of Agricultural Equipment, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;

2. College of Energy and Control Engineering, Changji University, Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract: In order to provide a reference for reducing the damage of walnut kernel pellicle during mechanical shelling, uniaxial compression tests were conducted on whole walnuts (in-shell) and walnut half-kernels under different loading directions and speeds to investigate their force-bearing behaviors and kernel pellicle damage under various loading conditions. The results showed that the loading direction significantly influenced the peak compression load and kernel pellicle damage area for both whole walnuts and walnut half-kernels. Specifically, for whole walnuts, the peak load required when compressed along the longitudinal diameter direction was markedly higher than that along the rib diameter or transverse diameter directions. For walnut half-kernels, the peak load under compression along the thickness direction was significantly greater than that along the length or width directions. Compression along the transverse diameter direction of whole walnuts caused substantially less kernel pellicle damage compared to the longitudinal and rib diameter directions. The smallest kernel pellicle damage area occurred when compressing the front region of the half-kernels along its thickness direction. In conclusion, during actual production, force should be applied to whole walnuts along the transverse diameter direction as much as possible to minimize kernel pellicle damage.

Key words: walnut; walnut kernel; compression; mechanical property; kernel pellicle damage

收稿日期:2024-08-22;修回日期:2025-06-02

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金杰出青年科学基金项目(2022E01E61);新疆维吾尔自治区中央引导地方项目(ZYYD2024CG21);国家自然科学基金(52465034)

作者简介:朱占江(1983),男,研究员,主要从事林果生产加工技术装备的研究与示范推广工作(E-mail)807305760@qq.com。

核桃又称胡桃、羌桃,是胡桃科胡桃属植物的核果,为世界“四大干果”之一、“木本油料之王”^[1]。核桃富含脂肪酸、氨基酸、维生素等,具有较高的营养价值和保健作用^[2],深受消费者欢迎。核桃仁是

核桃产业最重要的产品之一,其品质受加工过程影响,例如核桃破壳过程易导致核桃仁变形、破裂、破碎等。已有研究主要集中在核桃破壳过程中的受力情况及核桃仁的完整性问题。陈强^[3]研究发现,云南 103 核桃受到外界扰动后易以中缝线朝上的姿态静止在水平面上,沿核桃横径方向施力,其破壳力和碎仁率相较于其他方向更低。王斌等^[4]研究发现,沿着垂直于纵径方向挤压核桃所需的破壳力和压缩位移最小,沿着垂直于棱径方向的次之,沿着垂直于横径方向的最大。王超等^[5]开展了两点和四点挤压核桃破壳模拟试验,结果表明,四点挤压时的破壳率、整仁率和高露仁率最高。以上研究主要是通过探寻核桃破壳最佳施力位置或方法,以降低核桃仁破碎率和提高半仁率。

本课题组前期的研究与生产调研发现,核桃破壳过程对核桃仁造成的损伤不仅包括破碎损伤,还包括种皮损伤。核桃仁种皮中含有丰富的缩合单宁多聚体、多酚等抗氧化物质^[6-7],这些物质可以延缓核桃仁的氧化酸败过程,而核桃仁损伤后因表面缺少完整包衣的保护,易导致核桃仁失油、氧化褐变、霉变等。Ortiz 等^[8]研究了核桃仁种皮完整性对褐变、抗氧化性等的影响,结果发现,核桃仁种皮损伤后,种皮中酚类物质的稳定性降低,加速了核桃仁褐变,且褐变并不局限于损伤点附近区域,可延伸到整个核桃仁表面,影响核桃仁的品质。同时,核桃仁种皮损伤后再加工会导致原有的损伤部位因机械摩擦、碰撞等继续扩展,损伤点易出油和沾染异物,严

重影响核桃仁的品质,这也是导致机械破壳技术在生产中难以广泛应用的重要原因。目前,国内外针对核桃破壳过程中种皮损伤的研究仍鲜有报道。

基于此,为延长核桃仁贮存时间和提高核桃仁的品质和商业价值,本文从降低核桃仁种皮损伤的角度出发,研究不同加载条件下原果核桃和核桃仁的力学特性及种皮损伤情况,以期为开发降低核桃仁种皮损伤的破壳装置和破壳方法提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

阿克苏温 185 原果核桃,人工破壳获取核桃半仁,核桃壳、仁、分心木含水率均值分别为 7.84%、3.93%、11.64%。

XY-100MW 型卤素水分测定仪,常州市幸运电子设备有限公司;WDW-100E 型微机控制电子万能试验机(最大试验力 100 kN,位移分辨率 0.2 μm ,力精度 $\pm 0.5\%$),济南华新远大试验设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原果核桃和核桃半仁的外形尺寸测量

随机选取 60 颗原果核桃编号 1~60,对其纵径、棱径、横径(图 1)进行测量,并利用几何平均径方法计算核桃球度^[9]。随机选取 5 kg 原果核桃进行人工破壳,取 50 颗完整的核桃半仁编号 1~50,对核桃半仁的长度、宽度、厚度(图 1)进行测量。所有结果取平均值。所有测试后的试验样本均妥善保存,以便用于后续研究。

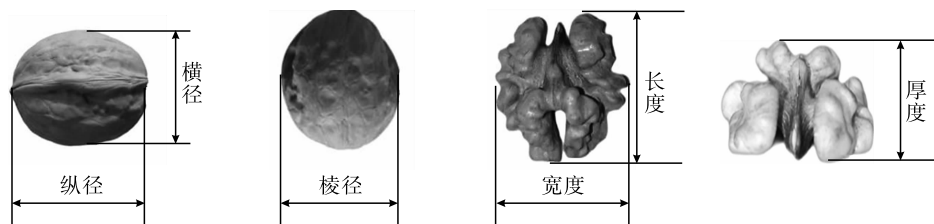


图 1 原果核桃和核桃半仁的尺寸

Fig. 1 Dimensions of whole walnut fruits and walnut half-kernels

1.2.2 挤压试验

原果核桃:将测量几何尺寸后的 60 颗原果核桃分为 3 组,每组 20 颗,利用微机控制电子万能试验机分别沿其纵径、棱径和横径方向进行不同加载速度(10、20、30、40、50 mm/min)的挤压破壳试验,每个加载速度各 4 个样本,编号 1~4。其中,横径、棱径方向位移保持目标均设置为 15 mm,纵径设置为 20 mm。

核桃半仁:将测量几何尺寸后的 50 颗核桃半仁分为 5 组,每组 10 颗(编号 1~10),其中:3 组分别

沿核桃半仁的长度方向、宽度方向和厚度中部(图 2)3 个方位进行挤压试验;另外 2 组沿核桃半仁厚度前、后部两处进行挤压试验,注意事先将半仁置于斜板上,将厚度前部或者厚度后部朝上进行挤压。设置核桃半仁位移保持目标为 5 mm,加载速度为 2 mm/min。

通过微机控制电子万能试验机获取核桃变形量与挤压载荷的关系曲线,以此探究核桃原果和核桃半仁在挤压过程中的受力情况。

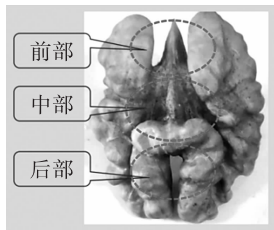


图2 核桃半仁的厚度前部、中部和后部

Fig.2 Front part, middle part and rear part of thickness of walnut half - kernel

1.2.3 种皮损伤面积测定

原果核桃的种皮损伤面积以其核桃仁种皮损伤面积计。由于对原果核桃压缩后其部分核桃仁已经破裂,因此需拼接出2颗半仁,然后测定其种皮损伤面积。一个原果核桃的果仁种皮损伤面积应为2颗半仁损伤面积之和,拼接处截面面积不属于种皮损伤面积,故不做统计。对于核桃半仁,若没有破碎可直接进行测量。

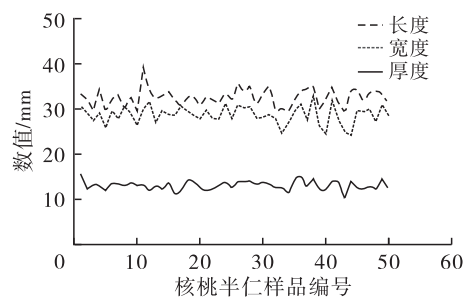
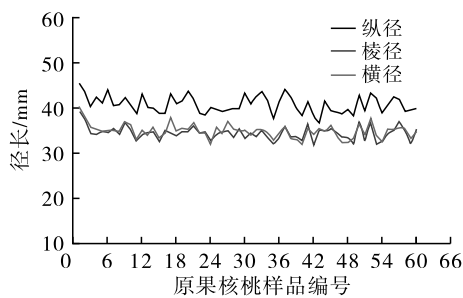


图3 原果核桃和核桃半仁的尺寸

Fig.3 Dimensions of whole walnuts and walnut half - kernels

由图3可知,原果核桃纵径主要在38~44 mm之间,横径、棱径主要在32~37 mm之间,原果核桃纵径、棱径、横径平均值分别为40.81、34.47、34.92 mm,经计算其球度为0.90。核桃壳厚度为0.92 mm。核桃半仁的长度主要在29~36 mm之间,宽度主要在24~32 mm之间,厚度主要在11~15 mm之间,其长度、宽度、厚度平均值分别为32.53、28.66、13.01 mm,其中长度与宽度相近,远大于厚度,核桃半仁总体呈扁平状。

2.2 挤压试验中核桃的挤压受力分析

2.2.1 原果核桃的挤压受力情况

挤压过程中原果核桃的变形量与挤压载荷的关系曲线见图4。

由图4可知,挤压试验前期,核桃原果的变形量与压力呈线性变化,此时是弹性变形阶段。继续增加压力至原果核桃壳破裂瞬间,出现挤压过程中的载荷峰值(144 N)。随后挤压载荷瞬间降低,持续挤压核桃壳、核桃仁、隔膜等,由于壳体内部空隙的存在,挤压载荷呈波动变化,曲线呈现出多个顶点,

取完整的或者拼接好的核桃半仁,用墨汁将核桃损伤部分上色,然后置于白色纸片制成的背景板(50 mm × 50 mm)上,采用摄影设备(索尼RX100)对其进行拍照,拍照过程中尽可能地保证相机镜头平行于白色背景板。将拍摄好的图像导入Image J软件,运用该软件的面积提取功能统计种皮损伤面积的像素个数和背景板面积的像素总个数。核桃仁种皮损伤面积的计算见式(1)。

$$S = \frac{A \times P_w}{P_t} \quad (1)$$

式中: S 为种皮损伤面积,mm²; A 为背景板面积,mm²; P_w 为种皮损伤面积像素点个数; P_t 为背景板像素点总个数。

2 结果与分析

2.1 核桃的外形尺寸

原果核桃和核桃半仁的尺寸见图3。

这里主要分析核桃壳开始破裂的峰值力。

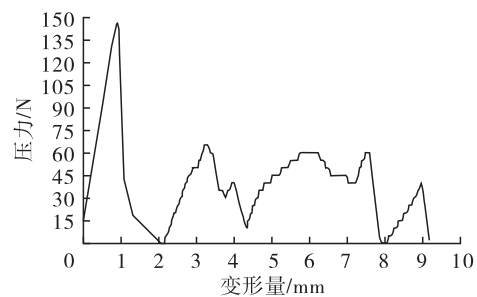


图4 原果核桃变形量与挤压载荷的关系曲线

Fig.4 Relationship curve of whole walnuts deformation and compression load

原果核桃在不同加载方向和加载速度下的挤压载荷峰值(开始破裂的峰值力)见表1。

由表1可知:沿纵径方向挤压时,加载速度为10、20、30、40、50 mm/min时的挤压载荷峰值分别为195.00、165.00、240.00、179.50、140.75 N,平均值为184.05 N;沿棱径方向挤压时,加载速度为10、20、30、40、50 mm/min时的挤压载荷峰值分别为193.50、144.75、126.00、134.50、154.25 N,平均值为150.60

N;沿横径方向挤压时,加载速度为 10、20、30、40、50 mm/min 时的挤压载荷峰值分别为 142.50、168.75、170.25、133.00、151.75 N,平均值为 153.25 N。

表 1 不同加载条件下原果核桃的挤压载荷峰值

Table 1 Peaks compression load of whole walnuts under different loading conditions

加载方向	加载速度/(mm/min)	挤压载荷峰值/N					总样本平均值
		样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	平均值	
纵径方向	10	125	280	225	150	195.00	184.05
	20	165	155	140	200	165.00	
	30	285	310	215	150	240.00	
	40	183	190	150	195	179.50	
	50	170	150	123	120	140.75	
棱径方向	10	210	225	175	164	193.50	150.60
	20	90	155	214	120	144.75	
	30	140	104	155	105	126.00	
	40	175	125	98	140	134.50	
	50	180	165	152	120	154.25	
横径方向	10	150	94	181	145	142.50	153.25
	20	240	146	128	161	168.75	
	30	165	92	219	205	170.25	
	40	170	150	100	112	133.00	
	50	115	197	108	187	151.75	

以不同加载条件下原果核桃的挤压载荷峰值为因变量,运用 SPSS 软件对所测数据进行单变量方差分析^[10],结果见表 2。

表 2 原果核桃挤压载荷峰值的方差分析

Table 2 Analysis of variance for peak compression load of whole walnuts

方差来源	平方和/10 ⁴	自由度	均方/10 ³	F 值	p 值
修正模型	5.11	14	3.65	1.949	0.046
加载方向(A)	1.38	2	6.92	3.693	0.033
加载速度(B)	1.01	4	2.55	1.362	0.262
交互作用(AB)	2.71	8	3.38	1.807	0.101
误差	8.42	45	1.87		

由表 2 可知:加载方向的 p 值小于 0.05,说明加载方向对挤压载荷峰值影响显著;加载速度、加载方向与加载速度间交互作用的 p 值均大于 0.05,说明二者对挤压载荷峰值影响不显著。由此,为进一步明确加载方向内部之间引起的挤压载荷峰值变化的因素,对不同加载方向的挤压载荷峰值进行多重比较,结果见表 3。

从表 3 可以看出,横径方向和棱径方向间的挤压载荷峰值的 p 值大于 0.05,纵径方向和横径方向间、纵径方向和棱径方向间的 p 值均小于 0.05,说明沿横径方向和棱径方向挤压时所需的载荷峰值并

无显著差异,而沿纵径方向挤压时所需载荷峰值明显大于棱径方向和横径方向的。

表 3 不同加载方向上原果核桃挤压载荷峰值的多重比较

Table 3 Multiple comparisons of peak load of whole walnuts in different loading directions

加载方向 (I)	加载方向 (J)	平均值差值(I-J)/N	p 值	95% 置信区间/N	
				下限	上限
纵径方向	棱径方向	33.45	0.026	4.21	62.69
	横径方向	30.80	0.039	1.56	60.04
棱径方向	纵径方向	-33.45	0.026	-62.69	-4.21
	横径方向	-2.65	0.857	-31.89	-26.59
横径方向	纵径方向	-30.80	0.039	-60.04	-1.56
	棱径方向	2.65	0.857	26.59	31.89

试验过程中还发现,沿着不同方向挤压时原果核桃壳裂纹首先出现的区域与延伸方向存在一定差异。沿横径方向挤压时,裂纹首先出现在核桃半仁平面(图 5)的顶端或者底部,并由此向四周扩展,裂纹延伸过程中,核桃壳缝合线处会出现错位现象,直至核桃完全碎裂;而沿纵径和棱径方向挤压时,裂纹首先出现在核桃壳上缝合线的顶点处,沿着缝合线逐渐裂开,直至核桃壳完全破裂。

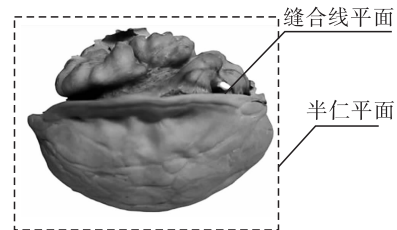


图 5 核桃半仁平面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the surface of walnut half - kernel

2.2.2 核桃半仁的挤压受力情况

核桃半仁的变形量与挤压载荷的关系曲线见图 6。

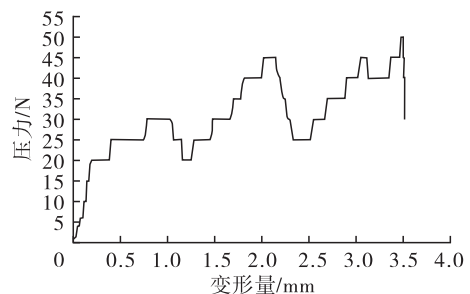


图 6 核桃半仁的变形量与挤压载荷的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between of walnut half - kernels deformation and compression load

由图 6 可知:核桃半仁在很小的挤压载荷下即发生变形,且随着挤压载荷的增大,变形量不断增加,并且核桃仁表面形成破损点,同时破损点下方的

核桃果肉不断破碎,内部应力变小,继续挤压载荷呈现降低趋势;当再次接触到未被破坏的凸点果肉时,所需载荷又会上升,如此循环往复直至位移达到设定的保持目标则停止压缩。

不同加载方向上核桃半仁的挤压载荷峰值见表4。

表4 不同加载方向上核桃半仁的挤压载荷峰值

Table 4 Peak compression load of walnut half – kernels in different loading directions

样本 编号	挤压载荷峰值/N				
	长度方向	宽度方向	厚度中部	厚度前部	厚度后部
1	40	55	80	75	65
2	45	40	50	115	70
3	30	50	120	90	165
4	30	60	90	70	25
5	15	60	140	120	150
6	15	35	110	50	135
7	30	50	60	60	45
8	15	55	120	50	105
9	20	60	180	25	130
10	15	65	45	145	100
平均值	25.5	53.0	99.5	80.0	99.0

由表4可知,沿核桃半仁长度、宽度、厚度中部、厚度前部、厚度后部方向挤压时的挤压载荷峰值平均值分别为25.5、53.0、99.5、80.0、99.0 N。

以不同加载方向上核桃半仁的挤压载荷峰值为因变量,运用SPSS软件对所测数据进行单变量方差分析,结果见表5。

表5 不同加载方向上核桃半仁挤压载荷峰值的方差分析

Table 5 Analysis of variance for the peak compression load of walnut half – kernels in different loading directions

方差来源	平方和/10 ⁴	自由度	均方/10 ⁴	F值	p值
组间	4.07	4	1.02	9.051	<0.001
组内	5.06	45	0.11		
总计	9.13	49			

由表5可知,组间的p值小于0.001,表明不同加载方向间核桃半仁的挤压载荷峰值有极显著差异,说明加载方向对核桃半仁挤压载荷峰值有极显著影响。为了进一步明确不同加载方向对核桃半仁挤压载荷峰值的影响,对不同加载方向上核桃半仁的挤压载荷峰值进行多重比较,结果见表6。

从表6可以看出,长度方向和宽度方向间的p值大于0.05,说明核桃半仁在受长度和宽度2个方向的挤压时所需的挤压载荷峰值无显著差异。厚度前部、中部、后部两两之间p值也均大于0.05,说明核桃半仁沿厚度方向各部位挤压时所受挤压载荷峰值均无显著差异。沿长度方向和宽度方向挤压时的挤压载荷峰值明显小于沿厚度方向的,其中沿长度方向的最小。

表6 不同加载方向上核桃半仁挤压载荷峰值的多重比较
Table 6 Multiple comparisons of peak compression load for walnut half – kernels in different loading directions

加载方向 (I)	加载方向 (J)	平均值差 值(I-J)/N	p值	95%置信区间/N	
				下限	上限
长度方向	宽度方向	-27.50	0.07	-57.70	2.70
	厚度中部	-74.00	<0.001	-104.20	-43.80
	厚度前部	-54.50	<0.001	-84.70	-24.30
	厚度后部	-73.50	<0.001	-103.70	-43.30
宽度方向	长度方向	27.50	0.07	-2.70	57.70
	厚度中部	-46.50	<0.001	-76.70	-16.30
	厚度前部	-27.00	0.08	-57.20	3.20
厚度中部	厚度后部	-46.00	<0.001	-76.20	-15.80
	长度方向	74.00	<0.001	43.80	104.20
	宽度方向	46.50	<0.001	16.30	76.70
厚度前部	厚度前部	19.50	0.20	-10.70	49.70
	厚度后部	0.50	0.97	-29.70	30.70
	长度方向	54.50	<0.001	24.30	84.70
厚度后部	宽度方向	27.00	0.08	-3.20	57.20
	厚度中部	-19.50	0.20	-49.70	10.70
	厚度后部	-19.00	0.21	-49.20	11.20
厚度中部	长度方向	73.50	<0.001	43.30	103.70
	宽度方向	46.00	<0.001	15.80	76.20
	厚度中部	-0.50	0.97	-30.70	29.70
厚度前部	厚度前部	19.00	0.21	-11.20	49.20

2.3 挤压试验中核桃的种皮损伤面积分析

2.3.1 原果核桃的种皮损伤面积

不同加载条件下原果核桃的种皮损伤面积见表7。

表7 不同加载条件下原果核桃的种皮损伤面积

Table 7 Kernel pellicle damage area of whole walnuts under different loading conditions

加载 方向	加载速度/ (mm/min)	种皮损伤面积/mm ²					总样本 平均值
		样本1	样本2	样本3	样本4	平均值	
纵径 方向	10	86.82	56.33	124.63	116.44	96.05	
	20	101.97	213.87	98.09	137.53	137.86	
	30	142.81	131.72	145.67	83.83	126.01	109.86
	40	88.60	106.99	82.65	64.78	85.76	
	50	110.60	95.77	96.56	111.60	103.64	
棱径 方向	10	137.86	105.67	116.14	91.26	112.73	
	20	65.18	116.46	120.11	77.79	94.88	
	30	116.11	88.93	93.68	71.85	92.64	108.27
	40	188.28	50.99	110.57	152.51	125.59	
	50	187.10	91.00	93.22	90.72	115.51	
横径 方向	10	79.63	57.76	36.38	40.42	53.55	
	20	89.99	64.72	31.04	58.00	60.94	
	30	74.35	29.86	75.56	47.41	56.79	58.07
	40	27.35	72.78	54.35	65.22	54.93	
	50	52.41	68.91	65.81	69.37	64.12	

由表 7 可知:沿纵径方向挤压时,挤压速度 10、20、30、40、50 mm/min 时的原果核桃种皮损伤面积分别为 96.05、137.86、126.01、85.76、103.64 mm²,平均值为 109.86 mm²;沿棱径方向挤压时,挤压速度 10、20、30、40、50 mm/min 时的种皮损伤面积分别为 112.73、94.88、92.64、125.59、115.51 mm²,平均值为 108.27 mm²;沿横径方向挤压时,挤压速度 10、20、30、40、50 mm/min 时的种皮损伤面积分别为 53.55、60.94、56.79、54.93、64.12 mm²,平均值为 58.07 mm²,远低于沿纵径方向和棱径方向挤压时的。

以不同加载条件下原果核桃的种皮损伤面积为因变量,运用 SPSS 软件对所测数据进行单变量方差分析,结果见表 8。

表 8 不同加载条件下原果核桃种皮损伤面积的方差分析
Table 8 Analysis of variance for kernel pellicle damage area of whole walnuts under different loading conditions

方差来源	平方和/10 ⁴	自由度	均方/10 ³	F 值	p 值
修正模型	4.56	14	3.25	3.439	<0.001
加载方向(A)	3.47	2	17.30	18.310	<0.001
加载速度(B)	0.86	4	2.20	0.228	0.921
交互作用(AB)	1.00	8	1.26	1.326	0.256
误差	4.26	45	0.95		

由表 8 可知,模型的 p 值小于 0.001,说明该分析模型可靠性较高。加载方向的 p 值小于 0.001,说明加载方向对原果核桃种皮损伤面积影响极显著;而加载速度、加载方向与加载速度交互作用的 p 值均大于 0.05,说明二者对原果核桃的种皮损伤面积的影响均不显著。

为了进一步明确加载方向对原果核桃种皮损伤面积的影响,对不同加载方向上原果核桃的种皮损伤面积进行多重比较,结果见表 9。

表 9 不同加载方向上原果核桃种皮损伤面积的多重比较
Table 9 Multiple comparisons of kernel pellicle damage area of whole walnuts under different loading directions

加载方向 (I)	加载方 向(J)	平均值差值 (I-J)/mm ²	p 值	95% 置信区间/mm ²	
				下限	上限
纵径方向	棱径方向	1.59	0.870	-17.82	21.00
	横径方向	51.80	<0.001	32.39	71.21
棱径方向	纵径方向	-1.59	0.870	-21.00	17.82
	横径方向	50.21	<0.001	30.80	69.62
横径方向	纵径方向	-51.80	<0.001	-71.21	-32.39
	棱径方向	-50.21	<0.001	-69.62	-30.80

由表 9 可以看出,沿横径方向的种皮损伤面积与沿纵径方向和棱径方向的具有极显著差异($p < 0.001$),且前者的种皮损伤程度明显小于后者。原

因在于沿横径方向对原果核桃进行挤压时,裂纹首先出现在半仁面顶端,随后向四周延伸,破裂过程中核桃壳对内部核桃仁起到一定的保护作用,进而种皮损伤较低;此外,由于核桃横径方向与内部核桃半仁宽度方向一致,且半仁面与缝合线面近似垂直(图 5),当沿核桃横径方向施加压力时,核桃壳变形后最先接触的是核桃半仁的边缘,降低了对半仁正面的损伤,从而降低了种皮损伤面积。因此,在实际生产过程中,应尽量从横径方向对原果核桃进行施力破壳,进而降低核桃仁的损伤。

2.3.2 核桃半仁的种皮损伤面积

不同加载方向上核桃半仁的种皮损伤面积见表 10。

表 10 不同加载方向上核桃半仁的种皮损伤面积
Table 10 Pellicle damage area of walnut half-kernels in different loading directions

样本 编号	种皮损伤面积/mm ²				
	长度方向	宽度方向	厚度中部	厚度前部	厚度后部
1	139.07	52.50	171.70	49.72	87.98
2	109.92	93.54	98.28	68.76	60.21
3	69.63	126.10	90.09	63.94	55.05
4	98.18	85.76	199.23	56.64	55.31
5	71.79	61.70	237.95	62.37	130.61
6	62.19	47.06	243.87	47.25	60.77
7	107.65	91.37	148.04	59.25	81.58
8	94.63	78.78	128.12	29.50	62.54
9	77.80	97.05	249.77	37.05	73.33
10	85.97	67.61	136.06	35.98	232.82
平均值	91.68	80.15	170.31	51.04	90.02

由表 10 可知,沿核桃半仁长度、宽度、厚度中部、厚度前部、厚度后部方向挤压的种皮损伤面积平均值分别为 91.68、80.15、170.31、51.04、90.02 mm²。

以不同加载方向上核桃半仁的种皮损伤面积为因变量,运用 SPSS 软件对所测数据进行单变量方差分析,结果见表 11。

表 11 不同加载方向上核桃半仁种皮损伤面积的方差分析
Table 11 Analysis of variance for pellicle damage area of walnut half-kernels in different loading directions

方差来源	平方和/10 ⁴	自由度	均方/10 ³	F 值	p 值
组间	7.85	4	1.96	12.416	<0.001
组内	7.11	45	0.16		
总计	1.50	49			

由表 11 可知,不同加载方向组间的 p 值小于 0.001,说明加载方向对核桃半仁种皮损伤面积有极显著影响。为了进一步明确不同加载方向对核桃半

仁种皮损伤的影响,对不同加载方向上核桃半仁的种皮损伤面积进行多重比较,结果见表12。

表12 不同加载方向上核桃半仁种皮损伤面积的多重比较

Table 12 Multiple comparisons of pellicle damage area of walnut half – kernels in different loading directions

加载方向 (I)	加载方向(J)	平均值差值 (I-J)/mm ²	p 值	95% 置信区间/mm ²	
				下限	上限
长度方向	宽度方向	11.54	0.520	-24.27	47.34
	厚度中部	-78.63	<0.001	-114.43	-42.83
	厚度前部	40.64	0.027	4.83	76.44
	厚度后部	1.66	0.926	-34.14	37.47
宽度方向	长度方向	-11.54	0.520	-47.34	24.27
	厚度中部	-90.16	<0.001	-125.97	-54.36
	厚度前部	29.10	0.109	-6.70	64.90
	厚度后部	-9.87	0.581	-45.68	25.93
厚度中部	长度方向	78.63	<0.001	42.83	114.43
	宽度方向	90.16	<0.001	54.36	125.97
	厚度前部	119.27	<0.001	83.46	155.07
	厚度后部	80.29	<0.001	44.49	116.09
厚度前部	长度方向	-40.64	0.027	-76.44	-4.83
	宽度方向	-29.10	0.109	-64.90	6.70
	厚度中部	-119.27	<0.001	-155.07	-83.46
	厚度后部	-38.97	0.034	-74.78	-3.17
厚度后部	长度方向	-1.66	0.926	-37.47	34.14
	宽度方向	9.87	0.581	-25.93	45.68
	厚度中部	-80.29	<0.001	-116.09	-44.49
	厚度前部	38.97	0.034	3.17	74.78

由表12可知,长度方向和宽度方向间的 p 值大于0.05,说明沿长度和宽度2个方向挤压时核桃半仁的种皮损伤面积无显著差异。沿厚度中部挤压时的种皮损伤面积与沿厚度前部和厚度后部时的均具有极显著差异($p < 0.001$),且前者的种皮损伤面积明显大于后者的;沿厚度前部和厚度后部挤压时的种皮损伤面积有显著差异($p < 0.05$),其中沿厚度前部挤压时的种皮损伤面积最小。沿厚度中部挤压时的种皮损伤面积最大的主要原因在于沿厚度中部挤压时,核桃半仁处于平放状态,其外表面与压缩设备接触面积最大,进而导致其种皮损伤面积较大,而沿厚度前部挤压时由于接触面积较小,导致种皮损伤面积最小。

沿原果核桃横径方向挤压时壳体变形后压力易作用于核桃仁宽度方向,通过比较原果核桃横径方向与核桃半仁宽度方向挤压时的载荷峰值、种皮损伤面积数据可以发现,尽管沿原果核桃横径方向挤压时的峰值力大于核桃半仁宽度方向的,但对仁造成的损伤却小于核桃半仁宽度方向的,说明沿原果

核桃横径方向挤压时由于壳仁间隙以及壳体自身结构的影响,通过核桃壳最终传递给核桃仁宽度方向的力较小,可以降低对仁种皮的损伤。

3 结论

通过对原果核桃和核桃半仁进行挤压试验,探究加载方向和加载速度对核桃挤压受力和种皮损伤的影响。结果显示,加载方向对原果核桃和核桃半仁的挤压载荷峰值和种皮损伤面积影响显著,其中:沿原果核桃纵径方向挤压时的挤压载荷峰值明显大于沿棱径方向和横径方向的,沿核桃半仁长度方向挤压时的挤压载荷峰值明显小于沿厚度前部、中部、后部3个方向的;沿原果核桃横径方向挤压时的种皮损伤面积最小,沿核桃半仁厚度前部挤压时的种皮损伤面积最小。综上,核桃破壳优选沿横径方向施力,从而降低对核桃仁种皮的损伤。

参考文献:

- [1] 李忠新. 中国核桃产业发展研究[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016.
- [2] 张翰生, 昌秦湘, 康建忠, 等. 核桃的营养价值及其开发利用研究进展[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 905 - 919.
- [3] 陈强. 核桃定向挤压破壳方法研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学, 2022.
- [4] 王斌, 刘德华, 张淑娟. 核桃物理力学特性参数的试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 165 - 169.
- [5] 王超, 郑甲红, 程国梁, 等. 基于 Workbench 核桃力学特性分析与试验研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(5): 17 - 22, 36.
- [6] 崔茂凯, 黄海涛, 李庆杨, 等. 核桃仁内种皮中缩合单宁多聚体的分离及其抗氧化活性分析[J]. 中国油脂, 2025, 50(4): 60 - 64.
- [7] 孙鹏程. 阿克苏地区‘温185’核桃种仁种皮褐化原因调查与分析[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [8] ORTIZ C M, VICENTE A R, FIELDS R P, et al. Walnut (*Juglans regia* L.) kernel postharvest deterioration as affected by pellicle integrity, cultivar and oxygen concentration [J/OL]. Postharvest Biol Technol, 2019, 156: 110948 [2024 - 08 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110948>.
- [9] 朱占江, 康敏, 刘奎, 等. 核桃及其机械破壳后主要组分悬浮速度理论计算与试验研究[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(4): 610 - 618.
- [10] 侯俊铭, 李金澎, 何涛, 等. 蓖麻蒴果力学特性试验及仿真研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(5): 574 - 583.