文章编号:1000-7601(2024)01-0278-09

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2024.01.29

巴旦木分级破壳机设计与试验

刘旋峰,周 欣,张 丽,杨会民,张海春,蒋永新

(新疆农业科学院农业机械化研究所,新疆 乌鲁木齐 830091)

摘 要:为解决巴旦木破壳机械生产效率低、破壳率低和核仁损伤量大等问题,通过研究坚果破壳原理,选用适 宜机械加工的大巴旦木('莎车3号')为研究对象,设计了巴旦木分级破壳机,同时进行巴旦木尺寸、破壳力加载方 向及加载速度、巴旦木含水率的物料特性分析。结果表明:破壳机破壳辊间隙和含水率对巴旦木破壳力和变形量影 响显著。使用试验法优化了巴旦木分级破壳机构工作参数,当两轧辊间距离调整为Ⅰ级14 mm、Ⅱ级13 mm 和Ⅲ级 12 mm,含水率控制在9.8%~10.5%范围内,转速为1 000 r·min⁻¹时,测得平均破壳率为 95.57%,平均破损率为 3.37%,满足实际生产需求。

关键词:巴旦木;分级破壳;力学特性;破壳率;破损率 中图分类号:S226.4 文献标志码:A

Design and test of almond grading shell breaking machine

LIU Xuanfeng, ZHOU Xin, ZHANG Li, YANG Huimin, ZHANG Haichun, JIANG Yongxin (Research Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: To solve the almond shelling machinery possess issues of low productivity, low shelling rate, and kernel damage, this study based on nuts shelling principle and used large almond wood (referred to as 'Shache No. 3') as the object to design the almond grading shelling machine. Almond size, shelling force loading direction and speed, and almond moisture content of the material characteristics were analyzed. The results showed that the shelling machine between the two rollers distance and moisture content on the shelling force and deformation of almond had a significant impact. Using the experimental method to optimize the working parameters of the grading and shell breaking mechanism, when the distance between the two rolls was adjusted to 14 mm for level I, 13 mm for level II and 12 mm for level III, the water content was controlled in the range of $9.8\% \sim 10.5\%$ and the rotational speed was $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the average shell breaking rate was measured as 95.57%, and the average breakage rate was 3.37%, which met the actual production requirements.

Keyword: almond; grading shell breaking; mechanical properties; shell breaking rate; breakage rate

巴旦木(学名为扁桃)是新疆维吾尔自治区的 特色林果产业的重要产品之一,是一种口感极佳、 营养价值很高的干果^[1-2]。喀什地区是新疆巴旦木 的主产区,其中莎车县生产面积最大,超过6万 hm²,是中国的"巴旦木之乡"。喀什地区巴旦木年 产量可达20万t,排名位居全球前三。随着国内对 巴旦木消费需求的不断增长,本土巴旦木产量已无 法满足市场所需,我国每年进口巴旦木达2万t以 上^[3-5],这对我国巴旦木种植和加工产业提出更高的要求。目前坚果类破壳机械应用于巴旦木生产中时,存在生产效率低、破壳率低、核仁损伤量大等问题,巴旦木破壳技术成为制约巴旦木产业发展的主要因素。

早在 20 世纪 80 年代初,美国相关机构便开始 研究坚果脱壳机械,主要原理有分级定向破壳、激 光切割破壳和碰撞破壳等,目前常用的破壳机主要

- 收稿日期:2023-07-29 修回日期:2023-10-01
- 基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2020D01A66)
- 作者简介:刘旋峰(1981-),男,新疆乌鲁木齐人,硕士,副研究员,主要从事农业工程研究。E-mail: 52695694@qq.com

通信作者:蒋永新(1964-),男,江苏丰县人,硕士,研究员,主要从事农业工程研究。E-mail: 10661713@qq.com

采用定间隙挤搓破壳原理^[6-9]。多年来,国内对其 他坚果的破壳作业原理与机具研制等方面的研究 较多,巴旦木核破坏载荷与压缩变形量、物理特性、 破壳最佳截面等方面的试验内容较少,巴旦木破壳 技术尚未取得令人满意的突破性成果^[10-15]。目前 巴旦木的破壳加工主要依赖人工,机械加工仍然采 用简易坚果加工设备^[16-18]。通过研究发现,相较杏 核,巴旦木壳较软且韧性大,故其破裂难度更大。 巴旦木破壳既要求壳破裂,还要保证出仁率和果仁 的完整度(或"整仁率")^[19],因此研究巴旦木的破 壳机理对其破壳设备性能提升具有现实意义。

新疆巴旦木种植品种繁多,仅新疆莎车县二林 场就有多果、大巴旦木、矮丰、克西、双软、双薄、晚 丰、桃巴旦木等多个品种,大巴旦木品种'莎车3 号'较其他品种种植面积大,且该品种果实尺寸相 对均匀、壳厚度适中、果仁饱满,采用机械加工时不 易损伤核仁,利于后续的壳仁分离及分级。故以 '莎车3号'为研究对象,分析其物料特性,研究在 不同方向受到挤压后果壳的受力和形变情况,通过 破壳力学特性试验,合理分析和设计分级式巴旦木 破壳机构,解决当前巴旦木破壳机械存在的生产效 率低、破壳率低、核仁损伤率高的问题,为巴旦木破 壳关键技术及设备的研究创新提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验仪器与设备

试验仪器设备主要包括 6503 微机控制电子万 能试验机(美特斯工业系统有限公司,中国)、SFY 快速水分测定仪(深圳市冠亚技术科技有限公司, 中国)、液体静力天平测定仪、游标卡尺和钢锯等。

1.2 巴旦木分级破壳机构

巴旦木分级破壳机机构主要由振动喂料器、三 级破壳机构、传动系统以及机架组成。每一层破壳 机组主要由破壳机构、振动筛、电机和传动机构组 成,自上而下排列,装配在机架上成为整体。最上 层称为第一层破壳机组,中间为第二层,底下为第 三层,三层破壳机组以串联的方式连接。整个机具 的电路由电器控制柜控制。破壳机结构如图 1 所示。

如图 2 所示,巴旦木通过振动喂料器均匀地喂 至一级破壳机构中,原料经过挤压和剪切后,破壳 后的巴旦木仁、巴旦木碎壳和未破壳的巴旦木共 3 种物料落入第一层振动筛机构,在振动过程中,与 筛孔大小接近的物料落入收集箱,实现第一次分 级,未破壳的巴旦木则进入二级破壳机组;同样的 过程经过二级和三级破壳,并且分离后,最终实现 三级破壳,将巴旦木按照指定的尺寸大小分为3个 层级。

1.3 破壳机构

目前坚果破壳机种类较多,开发出的坚果设备 都采用机械式破壳,主要包括撞击、碾搓、剪切、挤 压和揉搓5个原理。现有坚果破壳机构中由于破壳 辊间隙不均匀,存在破壳率低和整仁率低的问题。 针对上述问题,本研究破壳机结合挤压法破壳和揉 搓法破壳为一体,采用轴端同步调节机构,均匀同 步调节辊间隙,以提高破壳机构的破壳率及整仁率。

破壳机构分级破壳机构的核心工作装置位于 每一层级入料口下方,分别对分级后的巴旦木进行 破壳,其工作原理如图3所示,即主动破壳辊4通过 皮带传动(图中省略)由电机带动运转,旋转方向如 图所示,被动破壳辊3通过转动换向机构5,经过链 条传动使其反向旋转,由于两个破壳辊之间存在速 度差,当巴旦木核通过两破壳辊间隙时,两辊的压 迫以及相互揉搓最终导致壳破开压碎。为了增加 破壳辊与巴旦木的摩擦力,辊表面增加凸台,依据'莎



1.振动喂料器;2.一级破壳机构;3.第一层振动筛机构;4.机架;
 5.二级破壳机构;6.第二层振动筛机构;7.传动机构;8.出料口;
 9.第三层振动筛机构;10.三级破壳机构

1. Vibrating feeder; 2. First-class shell-breaking mechanism;

3. First layer vibrating screen mechanism; 4. Frame;

5. Secondary shell breaking mechanism;

Second layer vibrating screen mechanism;
 Transmission mechanism;
 Outlet;

9. Third layer vibrating screen mechanism;

10. Third-class shell-breaking mechanism

图 1 巴旦木分级破壳机结构图

Fig.1 Structure diagram of almond grading sheller



图 2 分级破壳工作原理简图

Fig.2 Schematic diagram of grading sheller operation



1.间隙调节手轮;2.同步链轮;3.被动破壳辊;
 4 主动破壳辊;5.转动换向机构

 $1.\ Gap$ adjustment handwheel; $2.\ Synchronous sprockets;$

3. Passive breaking roller; 4. Active breaking roller;

5. Rotating reversing mechanism

图 3 破壳机构工作原理示意

Fig.3 Working principle of shell-breaking mechanism

车3号'的外形及力学特性,设置凸台宽为2.0~2.5 mm,高0.8~1.2 mm,长度1500 mm,辊子外径160 mm,此外凸台还可以减少巴旦木仁的破损几率以提高整仁率。

如图 4 所示,将两破壳辊区分为左辊和右辊,其 角速度分别为 ω_A 和 ω_B ,当 $\omega_A = \omega_B$ 时,巴旦木进入两 辊之间挤压破壳区域,所受作用力 $P_A = P_B$,此时无 法产生相对滑动和搓移,很难破壳。当 $\omega_A \neq \omega_B$ 时, 则 $P_A \neq P_B$,若 $\omega_A > \omega_B$,巴旦木进入两辊之间挤压破 壳区域,所受水平作用力 $P_{Ax} > P_{Bx}$,水平分力差造成 巴旦木壳形变,产生裂纹。图示摩擦力 f_A , f_B 相对于 巴旦木纸面轴心为支点形成相对的搓移和滑动,使 破裂处的裂纹进一步扩大,造成巴旦木壳撕裂,最



图 4 破壳过程受力分析简图

Fig.4 Stress analysis diagram of the shell breaking process

终破壳。因此,通过受力分析,当 $\omega_A \neq \omega_B$,两者存在 差值时,可保证巴旦木破壳。图中 N_A 、 N_B 分别为左、 右破壳辊对巴旦木产生的垂直于摩擦力方向的反 作用力, a_i 为破壳辊转动的角度。

通过受力分析可得,两力 $P_A \mathcal{D} P_B \mathcal{D} x_y$ 方向上的关系如式(1)所示

$$\begin{cases} P_{Ay} = P_{Ax} \operatorname{tg}(\varphi - a_i) \\ P_{By} = P_{Bx} \operatorname{tg}(\varphi - a_i) \end{cases}$$
(1)

式中, α_i为破壳辊转动的角度; φ为巴旦木与破壳辊 间的摩擦角。可见, 对辊所产生的挤压力和两个辊 之间的转速差有关系, 因此通过计算可以得出左辊 和右辊速度比≥3时, 可使巴旦木壳产生形变和裂 纹, 确定左辊转速介于 800~1 500 r・min⁻¹之间。

1.4 同步间隙调节机构

同步间隙调节机构如图 5 所示,挤压揉搓破壳 对两轧辊间距离的均匀性要求较高,同步间隙调节 机构是破壳机构的重要装置,主要作用是同步均匀 调节两破壳辊的间隙。同步间隙调节机构的工作 原理(如图5)如下:首先松开锁紧螺母4,然后转动 手柄6,手柄带动调节丝杠5,使滑块3、轴承座板9 沿着轴承座支架往复运动,同时链轮8通过链条的 驱动,带动另一根调节丝杠,使两边轴承座同时移 动,完成两破壳辊之间距离的拉开或者闭合,从而 调整破壳间隙。为了提高调节的精确性和方便性, 安装标尺10,标尺可显示破壳辊间隙调整的大小, 通过间隙的精确调整,保证较高整仁率。

1.5 巴旦木主要物理参数

选用'莎车3号'巴旦木作为测试对象,该品种适用于机械加工。样品经过脱青皮处理后自然晾晒,除去破裂的巴旦木,随机抽取5组样本,每组50粒。

1.5.1 巴旦木的物理尺寸与加载方向 将巴旦木 样本平放于水平桌面上(图 6,见 284 页),在 x 方 向,平行于巴旦木核根顶连线方向作为果核长 Ax; 在 y 方向,垂直于根顶连线方向作为果核宽 Ay;在 z 方向,垂直于 XOY 平面方向作为果核高 Az。

'莎车3号'巴旦木大小不一,使用游标卡尺对 其果核长 Ax、果核宽 Ay、果核高 Az 进行测量,根据 尺寸,由小到大将其分为3个等级,分别为Ⅰ级、Ⅱ 级、Ⅲ级,各级果核尺寸范围详见表1。



1.轴承座支架;2.轴承座;3.滑块;4.锁紧螺母;5.调节丝杠;
 6.手柄;7.链条;8.链轮;9.轴承座板;10.标尺

Housing bracket;
 Housing;
 Sliders;
 Lock nut;
 Adjusting screw;
 Handle;
 Chain;
 Sprockets;
 Bearing housing plate;
 Ruler

图 5 同步间隙调节机构

Fig.5 Synchronous clearance adjusting mechanism

表 1	'莎车3号	号'巴旦木的分级/mm
-----	-------	-------------

级别 Level	Ax	Ay	Az	
Ι	25.40~29.52	16.08~19.12	12.22~14.34	
П	29.52~33.98	19.12~22.36	14.34~16.28	
Ш	33.98~39.42	22.36~25.54	16.28~18.94	

1.5.2 巴旦木的含水率 分别取一定量的巴旦木 壳、仁及壳仁混合样品作为样品,将其切碎放入测 试盘中,使用水分测定仪测量5次含水率并取平均 值,可得巴旦木壳、仁和壳仁混合样品的平均含水 率分别为5.78%、3.34%和8.54%。

1.5.3 巴旦木加载速度的确定 通用农业材料的压 缩加载速度为 2~100 mm・min⁻¹,试验选用的加载速 度为 5~25 mm・min⁻¹,在这个范围内等距分成 5 个 不同的加载速度,分别 5、10、15、20、25 mm・min⁻¹。

2 结果与分析

2.1 破壳力的测定

将巴旦木通过夹具固定在试验机上,电脑输入 参数施加载荷,待壳破裂,观察到的每次力与位移 曲线如图7所示,当巴旦木的形变达到一定程度时 载荷发生突变,此时的力为破裂时所需的最大载 荷,即破壳力^[20-25]。

2.2 加载方向与破壳力

选取 II 级尺寸' 莎车 3 号' 巴旦木样品, 分别沿 x、y、z 方向对其加载直至巴旦木壳裂开, 选用压缩 加载速度 15 mm · min⁻¹, 在 x、y、z 共 3 个方向各进 行 5 次试验, 测其破壳力并求平均值。如表 2 所示, 相同加载速度下, 在 z 方向上加载时破壳力最小, 同 时在 z 方向上巴旦木便于定位和夹持, 此后的试验 中没有特殊要求的情况下, 均沿 z 方向加载。

2.3 含水率与破壳力

选取 II 级尺寸'莎车3号'巴旦木样品,按照壳 含水率4%、7%、10%、13%和16%共5个水平,将样 品均分为5组,破壳方向沿z向,加载速度取15 mm ·min⁻¹,测其破壳力值并求平均值(表3),同时绘 制破壳力与含水率关系曲线图(图8)。



注:图中曲线尾部的数字(1~5)含义为试验次序。

Note: The numbers $1\!\sim\!5$ at the end of the curve in the figure mean the test number.

图 7 形变曲线图 Fig.7 Deformation curve chart 由图 8 可知,当含水率为 4%~13%时,破壳力 介于 220~300 N。当含水率为 9%~11%时破壳率 较高,壳仁收缩率差异致使壳仁间隙不断变小,增 加了破壳难度;巴旦木壳主要成分为木质纤维素, 含水率越高脆性越低,柔性越大,其强度越大,因此 破壳压缩力越大。当含水率>13%时,破壳力接近 线性增长。

2.4 巴旦木尺寸与破壳力

取含水率为10%的'莎车3号'巴旦木试样,加 载速度为15 mm·min⁻¹,沿 z向加载,分别对Ⅰ级、 Ⅱ级和Ⅲ级3种巴旦木各做5次试验,测得巴旦木 壳破裂时破壳力值并计算其平均值,结果见表4。 在相同含水率和加载方向条件下,巴旦木尺寸等级 不同,所需的破壳力大小也不相同,对比Ⅰ级、Ⅱ 级、Ⅲ级巴旦木看出,Ⅲ级尺寸破壳力最大,破壳难 度高。这是由于尺寸越大,巴旦木壳越厚,相同的 含水率水平下,壳的硬度越高。此外,试验机夹具

表 2 不同加载方向下'莎车 3 号'巴旦木的破壳力/N

Table 2 Cracking force of 'Shache No. 3'

almond under different loading directions

加载方向 Loading direction	破壳力 Cracking force					均值 Average
x	421.68	412.87	399.54	436.21	423.68	418.80
у	492.36	496.38	486.47	479.65	482.12	487.40
z	245.42	239.36	236.70	238.52	225.11	237.02

表 3 不同含水率下'莎车 3 号'巴旦木的破壳力/N

Table 3 Cracking force of 'Shache No. 3'

almond under different moisture contents

含水率/% Moisture content		均值 Average				
4	243.20	265.27	253.12	278.68	360.52	280.15
7	272.05	248.78	243.23	226.13	268.28	251.69
10	245.42	239.36	236.70	238.52	225.11	237.02
13	376.23	293.69	396.76	415.36	404.02	377.21
16	492.36	359.94	378.29	447.19	476.47	419.45



图 8 破壳力随含水率变化曲线图



与巴旦木间采用点、线接触时,破壳力较小,采用面接触时破壳力较大,但差别不明显。

2.5 加载速度与破壳力

选取 II 级尺寸含水率为 10%的'莎车 3 号'巴 旦木样品,沿 z 方向加载,重复 5 次,测其破壳力并 求平均值(表 5),同时绘制破壳力与加载速度关系 曲线图(图 9)。由图 9 可以看出,当加载速度逐渐 加快,破壳力也不断增大,这是由于同一尺寸级别 的巴旦木破壳所需功耗基本相同。因此,随着加载 速度的增加,需要的破壳力也增大。

2.6 分级破壳机试验

破壳率 ζ_1 和破损率 ζ_2 为衡量分级破壳机性能 的主要参数指标,是影响巴旦木破壳后的产品品质 的重要因素,可分别采用式(2)、(3)计算。

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) \times 100\% \tag{2}$$

表 4 不同级别'莎车 3号'巴旦木的破壳力/N

 Table 4
 Cracking force of 'Shache No. 3'

almond with different size classes

尺寸级别 Size class		均值 Average				
Ι	243.42	240.56	229.70	227.52	215.11	231.26
П	379.14	293.83	397.76	411.16	402.54	376.89
Ш	498.99	362.34	378.21	455.19	448.47	428.64

表 5 不同加载速度下'莎车 3 号'巴旦木的破壳力/N

Table 5 Cracking force of 'Shache No. 3'

almond under different loading speeds

加载速度 Loading speed /(mm・min ⁻¹)	Cı	破壳力 racking for	ce		均值 Average
5	245.42	239.36	236.70	238.52	225.11	237.02
10	271.05	252.83	247.26	231.17	269.81	254.42
15	242.20	266.31	255.21	277.87	362.07	280.73
20	378.69	292.98	394.38	415.36	412.54	378.79
25	495.11	364.09	376.32	459.47	484.22	435.84



图 9 破壳力随加载速度变化曲线图

Fig.9 Change of cracking force with loading speed

式中, ζ_1 为破壳率(%); W_1 为1次试验后巴旦木未 完全破壳(仁无法取出)和未破壳(壳完整)总质量 (g); W_2 为1次试验巴旦木总质量(g)。按照DB65/ T 3156-2021《巴旦木仁果品质量分级》标准将破损 的核仁选出,并进行测算。

$$\zeta_2 = \frac{W_3}{W_4} \times 100\%$$
(3)

式中, ζ_2 为破损率(%); W_3 为破损巴旦木仁总质量 (g); W_4 为破壳后巴旦木仁总质量(g)。

2.7 正交试验与分析

2.7.1 试验因素的确定 从以上分析结果可以看出,巴旦木破壳过程中,破壳辊间隙、巴旦木含水率和巴旦木通过两辊间破壳区域的时间是影响破壳率的主要影响因素,巴旦木所受作用力 P_A和 P_B的大小与破壳辊转速之差具有密切关系。通过分析,选取破壳辊间隙 A、巴旦木含水率 B 以及巴旦木通过两辊间破壳区域的时间 C 作为试验研究的 3 个因素,由于巴旦木通过两辊间破壳区域的时间与破壳辊转速之差有关,因此将左辊转速作为因素 C,因素水平编码如表 6 所示。

2.7.2 试验结果 采用二次回归正交旋转组合共 计 17 组试验,利用 Design-Expert 软件,以影响因素 编码水平为自变量,破壳率和巴旦木仁破损率为指 标,建立数学模型,利用响应面分析法分析两因素 间交互作用,结果如表 7 所示。

由表 8 和表 9 可知,模型极显著,失拟项不显 著,决定系数分别为 0.9937 和 0.9384,拟合程度越 好表明预测的精确度越高,可用此模型对破壳率和 破损率进行分析和预测。回归方程中,系数绝对值 大小决定各因素影响,对破壳率影响表现为 A>C>B, 对破损率影响表现为 C>B>A。综合分析,影响破壳 装置作业性能的主要因素影响大小表现为 A>C>B。 2.7.3 试验分析

(1)基于破壳率的各因素响应曲面分析。从表 8可以看出,含水率 B 和左辊转速 C 的交互作用对 破壳率的影响较为明显。如图 10 所示,当含水率处

Table 6 Factor level coding table

		D	因素水平 Factors Leve	1	
编码 Code	破壳辊间隙A 含水离 P		左辊转速 C	Î	
	Gap between two	百小平 D Moisture content/%	Left roll speed		
	rollers/mm	Moisture content/ 70	$/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$		
	-1	13.5,12.4,11.5	12.25	810	
	0	14.5,13.4,12.5	9.25	1110	
	1	15.5, 14.4, 13.5	6.25	1410	

表 7	试验设计方	下案及结果
-----	-------	-------

Table 7 Experimental designs and results

试验编号 Test number	破壳辊 间隙 A Gap between two rollers	含水率 B Moisture content	左辊转速 C Left roll S speed	破壳率 ζ ₁ /% Shell breaking rate	破损率 ζ ₂ /% Breakage rate
1	0	0	0	92.60	3.36
2	1	0	1	73.86	5.95
3	0	0	0	91.98	2.28
4	1	-1	0	68.25	5.03
5	0	0	0	92.60	4.85
6	0	-1	-1	90.54	6.25
7	-1	0	-1	94.85	4.35
8	-1	1	0	96.62	4.25
9	0	0	0	91.20	3.65
10	1	0	-1	66.76	5.65
11	0	-1	1	91.64	8.95
12	0	1	1	93.60	6.23
13	0	0	0	90.85	2.96
14	0	1	-1	85.25	5.54
15	-1	0	1	97.98	9.96
16	1	1	0	72.23	8.25
17	-1	-1	0	95.85	9.56

表 8 破壳率方差分析

Table 8 Variance analysis of shell breaking rate

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean Square deviation	F值 F value	显著性 Significance
模型 Model	1691.49	9	187.94	121.73	* *
A	1357.20	1	1357.20	879.08	* *
В	0.25	1	0.25	0.16	
С	48.41	1	48.41	31.36	* *
AB	2.58	1	2.58	1.67	
AC	3.94	1	3.94	2.55	
BC	13.14	1	13.14	8.51	*
A^2	253.01	1	253.01	163.88	* *
B^2	3.09	1	3.09	2.00	
C^2	2.25	1	2.25	1.46	
残差 Residuals	10.81	7	1.54		
失拟项 Lack of fit	8.24	3	2.75	4.29	
纯误差 Pure error	2.56	4	0.64		
R^2	0.9937	,			
调整 R ² Adjustment R ²	0.9855	i			

注:*表示差异显著(P<0.05),**表示差异极显著(P<0.01)。下同。

Note: * denotes significant difference (P < 0.05), * * denotes highly significant difference (P < 0.01). The same below.

	Table 9	Variance anal	ysis of break	kage rat	е
来源	平方和	1 自由度	均方差	F 值	显茎性
Source	Sum of	Degree of	Mean Square	F value	Significan

表 9

破损率方差分析

Source	Sum of	Degree of	Mean Squar	^e F value	Significance	
	squares	ireedom	deviation			
模型 Model	79.54	9	8.84	11.84	* *	
A	1.31	1	1.31	1.76		
В	3.81	1	3.81	5.10		
С	10.81	1	10.81	14.48	* *	
AB	18.19	1	18.19	24.73	* *	
AC	7.05	1	7.05	9.44	*	
BC	1.01	1	1.01	1.35		
A^2	10.03	1	10.03	13.44	* *	
B^2	13.78	1	13.78	18.45	* *	
C^2	9.65	1	9.65	12.93	* *	
失拟项 Lack of fit	1.61	3	0.54	0.60		
纯误差 Pure error	3.61	4	0.90			
R^2	0.9384					
调整 R ² Adjustment R ²	0.8591					



图 6 '莎车 3 号'巴旦木的尺寸与加载方向 Fig.6 Size and loading direction of 'Shache No.3' almond



Effect of the distance between two rolls and moisture content on breakage rate

图 11 各因素交互作用对破损率的响应曲面

Fig.11 Response surface of different factors interaction to breakage rate

于较低水平时,破壳率随含水率的增加而逐渐降低。其原因是粗纤维构成的巴旦木外壳在含水率 越高的情况下韧性越好,越不容易发生脆性破裂, 故破壳率降低。当左辊转速 C 处于低位时,破壳率 明显上升,而在高位时则上升平缓。其原因主要是 C 处于较低水平时,左辊和右辊对于物料挤压搓裂 时间充足,挤压力和搓裂力与转速的增加成正比, 使破壳率增幅较大。

(2)破损率与各参数响应曲面分析。图 11a 为 破壳辊间隙 A 与含水率 B 交互效应对破损率影响 的响应曲面。当破壳辊间隙(两轧辊间距离)处于 较低水平时,破损率随两轧辊间距离水平下降而上 升,但上升幅度不大。其原因可能是破壳辊间隙较 小时,巴旦木壳形变较大,造成壳仁间隙较小,减小 两轧辊间距离可以增加破壳辊以及碎壳与巴旦木 仁接触几率,增大破损率;当破壳辊间隙处于高水 平时,巴旦木壳形变较小,且形变速率较小,破壳辊 以及碎壳与巴旦木仁接触几率明显减小。当含水率



图 10 含水率和左辊转速交互作用对破壳率的响应曲面 Fig.10 Response surface of the interaction of moisture content and left roll speed on shell breaking rate



D) 做 元 瓶 问 原 和 左 瓶 转 逐 列 做 须 平 影 吧 Effect of the distance between two rolls and the left roll speed on breakage rate 处于较高水平时,破损率上升幅度较大,且波动区 间较大;含水率处于较低水平时,破损率上升幅度 趋于平缓,且波动区间较小,随着含水率的降低,巴 旦木壳的硬度呈非线性上升,而巴旦木仁外皮较 软,因此破损率增大。图 11b 为破壳辊间隙 A 与左 辊转速 C 交互作用对破损率影响的响应曲面。当 破壳辊间隙处于低水平时,随着左辊转速 C 的升 高,破损率明显增大,其原因可能是破壳辊转速越 高,破壳挤压力和搓裂力越大,破壳辊以及碎壳与 巴旦木仁接触几率大,故破损率增大。对比分析图 11a 和图 11b 发现,破损率变幅波动度受含水率和 破壳辊间隙变化影响较大,表明破壳辊间隙 A 与含 水率 B 交互效应较明显, AB 是主要影响因素。

为使巴旦木破壳机作业质量达到最佳,即破壳 率最大时,破损率达到最低。通过 Design-Expert 软 件获得最优值组合为对辊间隙 13.92、12.82 mm 和 11.92 mm,含水率 10.41%,转速为 1 008.23 r・min⁻¹。此时,破壳率为 95.60%,核仁破损率为 3.29%。结合实际可操作性,将对辊间隙调整为 14、 13 mm 和 12 mm,含水率介于 9.8%~10.5%之间,转 速为 1 000 r・min⁻¹,进行为期 14 d 的可靠性验证 试验。为消除随机误差,取 5 次重复试验的平均值, 此时巴旦木破壳率为 95.57%、核仁破损率为 3.25%,表明最优值组合满足实际生产要求。

3 讨论与结论

1)影响巴旦木破壳力的主要因素是挤压加载 方向、含水率及加载速度。通过试验得出当破壳力 沿巴旦木 z 方向加载时,破壳容易;含水率 9%~ 11%时所需的破壳力较小,破壳容易,含水率过高或 过低都会造成破壳难度增大;巴达木尺寸越小越容 易破壳。

2)分级破壳两轧辊间距离分别为 I 级 13.92 mm、Ⅱ级 12.82 mm 和Ⅲ级 11.92 mm,含水率为 10.41%,当转速为 1 008.23 r min⁻¹时,机具表现最 佳,其破壳率为 95.60%,破损率为 3.29%。根据最 优参数结果,并考虑设备在实际应用过程中的可操 作性,将两轧辊间距离调整为 I 级 14 mm、Ⅱ级 13 mm、Ⅲ级 12 mm,转速为 1 000 r · min⁻¹,含水率控 制在 9.8%~10.5%的范围内,可靠性试验测得平均 破壳率 95.57%,平均破损率 3.37%,该参数组合满 足实际生产要求。

巴旦木的发展潜力巨大,其品种多样、繁杂,对

机具的破壳性能的影响也很大。因此,对不同品种 巴旦木力学特性的研究仍需进一步开展,以便建立 一套完善的研究体系,为巴旦木破壳机的设计与优 化提供技术支持,使其具有较强的适用性和可靠 性。未来可考虑将机器视觉技术等智能装备与巴 旦木破壳的开发相结合,与前后处理设备集成,研 发出集巴达木去青皮、干燥、除杂、剥壳及壳仁分离 为一体的巴旦木预处理系统,实现巴旦木生产加工 的全面机械化、系列化和智能化。

参考文献:

- KARIMI Z, FIROUZI M, DADMEHR M, et al. Almond as a nutraceutical and therapeutic agent in Persian medicine and modern phytotherapy: a narrative review[J]. Phytotherapy Research, 2021, 35(6):2997-3012.
- [2] 高雯雯,肖凡,苏婧怡,等.新疆野巴旦杏的资源现状和发展趋势分析[J].特种经济动植物,2020,23(8):47-48.
 GAO W W, XIAO F, SU J Y, et al. Analysis of the resource status and development trends of Xinjiang wild badana pricot[J]. Special Economic Animal and Plant, 2020, 23(8):47-48.
- [3] 王琴,刘凤兰,毛金梅,等.新疆巴旦木主栽品种果实品质及加工利用研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(20): 200-202.
 WANG Q, LIU F L, MAO J M, et al. Study on fruit quality and processing and utilization of main varieties of almonds in Xinjiang[J].Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(20): 200-202.
- [4] 夏轩泽,侯笑笑,李言,等.豌豆蛋白对巴旦木饮料贮藏稳定性的影 响极其机理探究[J/OL].食品与发酵工业:1-9.(2022-11-23)[2023-07-06].https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033391.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033391.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033391.XIA X Z, HOU X X, LI Y, et al. Exploration of the effect and mechanism of pea protein on the storage stability of badan wood beverage[J/OL].Food and Fermentation Industries: 1-9.(2022-11-23)[2023-07-06].https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033391.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033391.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033391.DOI
- [5] DU W X, DANYLUK M D, HARRIS L J. Evaluation of cleaning treatments for almond-contact surfaces in hulling and shelling facilities [J]. Food Protection Trends, 2007, 27(9): 678-683.
- [6] ERCISLI S, KARA M, OZTURK I, et al. Comparison of some physicomechanical nut and kernel properties of two walnut (*Juglansregia* L.) cultivars[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2011, 39(2): 227-231.
- [7] KHIR R, PAN Z L, ATUNGULU G G, et al. Size and moisture distribution characteristics of walnuts and their components [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 771-782.
- [8] LEDBETTER C A, PALMQUIST D E. Comparing physical measures and mechanical cracking products of 'Nonpareil' almond (*Prunus dulcis* [Mill.] D.A. Webb.) with two advanced breeding selections[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(2): 232-237.
- [9] GÜNER M, DURSUN E, DURSUN I G. Mechanical behaviour of hazelnut under compression loading [J]. Biosystems Engineering, 2003, 85

(4): 485-491.

435-440.

- [10] MOHSENIN N N. Physical properties of plant and animal materials: structure, physical characteristics and mechanical properties [M]. New York, London: Gordon and Breach Science Publishers, 1970; 20-89.
- [11] YURTLU Y B, CEVHER E Y. Mechanical behaviour and split resistance of chestnut under compressive loading[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2011, 17(4): 337-346.
- [12] 吐鲁洪·吐尔迪,阿依木妮莎·拜克热,吐逊·古丽,等. 6BD-150 型巴旦木破壳机的研制[J].新疆农机化, 2009, (3): 40-41.
 TU ER DI T L H, BAI KE RE A Y M N S, GU LI T X, et al. Development of 6BD-150 padan wood shell breaking machine [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2009, (3): 40-41.
- [13] 唐湘,谢方平,李旭,等.油茶果破壳力学特性试验研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2015,35(4):435-440.
 TANG X, XIE F P, LI X, et al. Experimental research of mechanics characteristics of *Camellia oleifera* fruit cracking[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 35 (4):
- [14] 刘军. 新疆杏核破壳最佳截面的探讨[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 168-172, 16.

LIU J. Exploration of optimal section of Xinjiang apricot stone cracking [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(3): 168-172, 16.

- [15] 刘延彬,吐鲁洪·吐尔迪,杨会民,等.巴旦木破壳机具的研究现 状与分析[J].中国农机化学报,2018,39(2):49-55.
 LIUY B,TU ER DI T L H, YANG H M, et al. Research and analysis of almonds shelling machines[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(2):49-55.
- [16] 刘延彬,吐鲁洪·吐尔迪,杨会民,等.厚度和含水率对巴旦木破 壳力学特性的影响[J].新疆农业科学,2018,55(7):1293-1304.
 LIU Y B,TU ER DI T L H, YANG H M, et al. Effects of thickness and moisture content on mechanical properties of almond shell breaking[J].
 Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(7): 1293-1304.
- [17] 刘延彬,吐鲁洪·吐尔迪,杨会民,等.对国内外巴旦木破壳机具的分析[J].新疆农机化,2018,(2):32-35.
 LIU Y B,TU ER DI T L H, YANG H M, et al. Analysis of badam shell breaking mechinery at home and abroad [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2018, (2): 32-35.
- [18] 张学军,马少腾,朱兴亮,等.正多杆变隙式油葵脱粒装置设计与 试验[J].农业工程学报,2020,36(4):26-33.

ZHANG X J, MA S T, ZHU X L, et al. Design and test of oilsunflower threshing device with variable clearance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 26-33.

- [19] 国家林业局,巴旦木(扁桃)生产技术规程:LY/T 1750-2008[S].北 京:中国标准出版社,2008.
 State Forestry Administration.Technical regulation for production of almonds:LY/T 1750-2008[S].Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] 石鑫, 吐鲁洪, 吐尔迪, 杨豫新, 等. 巴旦木初加工全程机械化生产技术[J]. 新疆农机化, 2022, (3): 23-25.
 SHI X, TU ER DI T L H, YANG Y X, et al. Full mechanized production technology for primary processing of almonds[J]. Xin-jiang Agricultural Mechanization, 2022, (3): 23-25.
- [21] 石鑫,杨豫新,牛长河,等.巴旦木脱青皮机的改进设计与试验研究[J].干旱地区农业研究,2022,40(6):268-275.
 SHI X, YANG Y X, NIU C H, et al. Improved design and experimental study of almond peeling machine[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 268-275.
- [22] 边博,张丽,吐鲁洪·吐尔迪,等.比重式巴旦木壳仁风选装置试验与优化分析[J]. 农机化研究, 2022, 44(11):191-196.
 BIAN B, ZHANG L, TU ER DI T L H, et al. Experiment and optimization analysis of gravity type almond shell and kernel air separation device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44 (11): 191-196.
- [23] 边博,吐鲁洪,吐尔迪,张丽,等.巴旦木壳仁物料及空气动力学特性分析[J]. 新疆农业科学,2021,58(5):893-902.
 BIAN B,TU ER DI T L H, ZHANG L, et al. Research and experiment on material and aerodynamic characteristics of almonds shell and kernel [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(5): 893-902.
- [24] 张丽,边博,吐鲁洪,吐尔迪,等. 气吸式巴旦木壳仁风选装置试验与优化分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8); 1540-1546.
 ZHANG L, BIAN B, TU ER DI T L H, et al. Experiment and optimization analysis of air suction type for almonds shell kernel sorting device
 [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(8); 1540-1546.
- [25] 吐鲁洪·吐尔迪,张丽,边博. 干燥处理对巴旦木核脱壳效果的影响[J]. 新疆农机化, 2020,(6): 25-26, 29.
 TU ER DI T L H, ZHANG L, BIAN B. The shelling effect of almond based on drying process[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2020,

(6): 25-26, 29.