

引用本文格式 唐学鹏, 张振国, 王帅, 等. 籽瓜跌落碰撞损伤试验研究[J]. 农业工程, 2024, 14(9): 108-115. DOI: [10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.09.019](https://doi.org/10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.09.019). TANG Xuepeng, ZHANG Zhenguo, WANG Shuai, et al. Experimental study on falling impact damage of seed melon[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(9): 108-115.

籽瓜跌落碰撞损伤试验研究

唐学鹏¹, 张振国¹, 王帅¹, 赵宾宾²

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为研究籽瓜收获和储运环节产生的跌落碰撞机械损伤问题, 对籽瓜进行跌落碰撞损伤试验, 研究不同条件对籽瓜跌落碰撞机械特性和损伤的影响规律。单因素试验结果表明, 跌落高度由 100 mm 到 300 mm 变化, 加速度峰值、损伤体积均呈现逐渐增大趋势; 籽瓜质量由 3 kg 到 4 kg 变化, 加速度峰值呈现逐渐减小的趋势, 损伤体积呈现逐渐增大趋势; 跌落角度由 0°到 90°变化, 加速度峰值、损伤体积呈现逐渐增大的趋势。多因素响应面试验结果表明, 跌落高度与跌落角度的交互作用对加速度峰值影响显著, 跌落高度与质量、质量与跌落角度的交互作用对加速度峰值影响不显著; 质量与跌落角度的交互作用对损伤体积的影响显著, 跌落高度与质量、跌落高度与跌落角度的交互作用对损伤体积影响不显著。建立了跌落高度、质量和跌落角度对试验指标加速度峰值、损伤体积的回归方程模型, 进行了模型验证。所建立的回归模型预测可靠度高, 可为籽瓜碰撞机械损伤的预测、低损机械收获装备的设计提供理论参考和指导。

关键词: 籽瓜; 跌落高度; 跌落角度; 机械特性; 损伤体积

中图分类号: S183 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2024)09-0108-08

DOI: [10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.09.019](https://doi.org/10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.09.019)

Experimental study on falling impact damage of seed melon

TANG Xuepeng¹, ZHANG Zhenguo¹, WANG Shuai¹, ZHAO Binbin²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052, China;
2. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to study mechanical damage caused by drop collisions during harvesting and storage of seed melon, drop collision damage tests were conducted on seed melon to investigate mechanical characteristics and damage effects of different conditions on seed melon drop collisions. Results of single factor experiment showed that maximum acceleration and damage volume gradually increased with drop height from 100 mm to 300 mm. When quality of seed melon increased from 3 kg to 4 kg, maximum acceleration showed a gradually decreasing trend, while damage volume showed a gradually increasing trend. When drop angle increased from 0° to 90°, maximum acceleration and damage volume showed a gradually increasing trend. Results of multi factor response surface test indicated that interaction between drop height and drop angle had a significant impact on maximum acceleration, interaction between drop height and mass, mass and drop angle had no significant effect on maximum acceleration. Interaction between quality and drop angle had a significant impact on damage volume, while interaction between drop height and quality, and drop height and drop angle had no significant impact on damage volume. Regression equation model for maximum acceleration and damage volume of experimental indicators was established based on drop height, mass, and drop angle, and the model was validated. Regression model established has high prediction reliability and could provide theoretical reference and guidance for predicting mechanical damage caused by seed melon collisions and designing low damage mechanical harvesting equipment.

Keywords: seed melon, falling height, falling angle, mechanical characteristics, damage volume

收稿日期: 2024-07-06 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2020D01B30)

作者简介: 唐学鹏, 硕士, 实验师, 主要从事农产品低损收获技术与装备研究 E-mail: gndtxp@163.com
张振国, 通信作者, 博士, 副教授, 主要从事农业工程技术与装备研究 E-mail: zhangzg@cau.edu.cn

在线投稿
www.d1ae.com

0 引言

籽瓜种植区主要分布在新疆维吾尔自治区（简称新疆）、甘肃省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区等，籽瓜中含有果胶、多糖、维生素、氨基酸和微量元素多种营养成分，瓜皮用于提取果胶、化妆品原料和制作低糖果脯，瓜瓢瓜汁及提取物用于制作罐头、饮料和保健品，瓜籽主要作为炒货和瓜籽油原料^[1-5]。籽瓜深加工之前，要求籽瓜是完整低损的，在机械收获和储运环节不可避免会受到跌落碰撞作用，产生的机械损伤会导致籽瓜品质衰变，储藏期缩短，影响其经济价值，因此，研究籽瓜跌落损伤具有重要意义。

近年来，国内外研究人员对梨、苹果、马铃薯、甘薯、葡萄、荔枝、蜜瓜和西瓜等瓜果进行了跌落碰撞机械损伤研究^[6-9]。何晓东等^[10]以红富士苹果为试验材料，研究跌落高度、果实质量、碰撞材料对苹果碰撞损伤的影响，通过3因素3水平正交试验，分析试验因素对苹果碰撞损伤体积影响显著性。冯斌等^[11]以马铃薯为试验对象，进行了不同因素下的跌落冲击试验，分别研究了跌落高度、碰撞材料、马铃薯含水率和跌落方向等因素对马铃薯块茎冲击特性和损伤综合指数的影响，并分析了其损伤规律，研究结果可对马铃薯在收获过程中碰撞损伤进行评估。高国华等^[12]针对甘薯块根在收获过程中关于跌落碰撞力学问题缺少理论研究的现象，通过设计甘薯力学特性试验和跌落冲击试验，以甘薯坚实度为参考指标，进行理论分析，建立跌落高度和冲击力、跌落高度和冲击应力之间的数学模型，测得一定质量范围甘薯的临界损伤受力值及临界损伤跌落高度。马帅等^[13]针对葡萄在收获、储运过程中的碰撞损伤问题，对其进行不同高度的跌落碰撞试验，采用高速摄像机拍摄碰撞过程，分析跌落碰撞速度与果实碰撞损伤程度之间的关系。王芳等^[14]以河套蜜瓜为研究对象，采用正交试验和单因素试验，分别研究跌落高度、跌落角度、蜜瓜质量对冲击加速度的影响，试验结果对进一步研究蜜瓜的冲击力学特性、损伤机制有一定的借鉴意义。王芳等^[15]通过对不同因素下的西瓜进行跌落试验，以研究其冲击力学特性，以及损伤与每个因素的相关性，采用单因素试验方法，研究了跌落高度、西瓜质量、碰撞材料及碰撞材料层数等物理参数对西瓜的碰撞加速度峰值和最大变形量等参数的影响，得出跌落高度和西瓜质量对西瓜的力学特性影响显著。陈思宇^[16]以苹果为研究对象，通过正交试验，分析了苹果单果质量、跌落高度和缓冲材料3个因素与苹果碰撞损伤体积的影响，得出对损伤体积影响显著性由高到低依次跌落高度、苹果缓冲材料、苹果质量。于福锋^[17]以脆熟期红枣为试验对

象，以跌落高度、碰撞材料和红枣品种为试验因素，分析了各试验因素对加速度峰值、表面硬度质量损伤率、表面损伤体积的影响。魏星^[18]通过对西瓜质量、碰撞材料及层数等跌落因素的单因素及多因素正交试验分析，得到西瓜的加速度峰值、最大形变量及恢复系数与不同跌落因素的相关性，最后得到西瓜损伤的预测模型。目前围绕籽瓜碰撞机械损伤的深入研究较少。

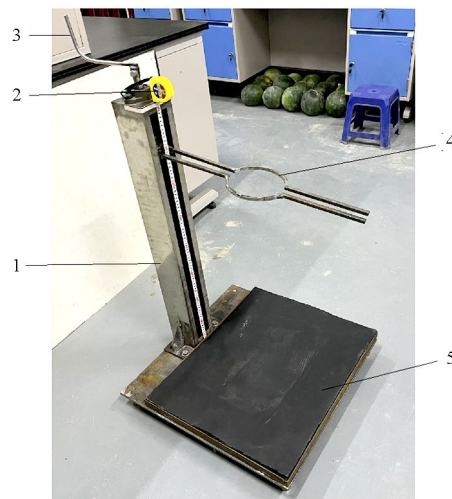
本研究采用自制跌落碰撞装置对完好籽瓜进行跌落碰撞试验，研究不同试验条件对籽瓜跌落碰撞机械特性和损伤的影响规律，建立跌落碰撞试验指标与试验因素之间的回归数学模型，为碰撞损伤预测、储运方式选择和低损收获装备的设计提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

试验籽瓜品种为新疆呼图壁县种植的黑丰1号，种植株距23 cm、行距30 cm、膜宽70 cm，种植模式为3膜6行平作，膜间距90 cm，成熟期8月下旬—9月上旬，该品种近似圆球体。在同一种植区域人工采摘选取形状均匀，硬度在2.8 MPa左右，无任何损伤和病虫害的籽瓜作为试验样品，按试验要求分组编号。

试验仪器主要有自制跌落碰撞试验台，如图1所示，GY-4型数显果实硬度计，角度尺，电子秤，KT1010 L型加速度传感器。



1. 高度调节装置 2. 高度尺 3. 调节手柄 4. 瓜托 5. 碰撞材料

图1 跌落碰撞试验台

Fig. 1 Drop crash test bench

1.2 试验方法

1.2.1 试验因素

进行跌落碰撞试验时，不同的跌落高度对籽瓜产生的损伤不同，质量不同导致碰撞时接触面积不同，产生的碰撞力不同，从而产生的损伤也不同。籽瓜主要由瓜梗、瓜顶、外表皮、瓜皮、瓜瓢和瓜籽组成，

各组成部分的密度、弹性模量不同，各部位的瓜皮厚度和外表皮韧性不同，籽瓜具有明显的各向异性特点，不同的跌落角度导致碰撞后产生的损伤程度不同，其中，跌落角度由瓜梗瓜顶轴线与碰撞平面的夹角表示^[19-20]。为此，将跌落高度、质量、跌落角度作为跌落碰撞损伤试验因素。

1.2.2 试验指标

碰撞加速度峰值是跌落碰撞试验的重要参数，是表征出物体瞬间受到外力大小的一个物理量，力与损伤程度具有相关性，因此碰撞加速度峰值与损伤程度有相关性，加速度峰值 $a_{\max}$ 由加速度传感器获得，试验时，加速度传感器固定在籽瓜正上方。损伤体积直观反映籽瓜内部损伤程度，碰撞后籽瓜常温贮藏 48 h，沿碰撞位置切开籽瓜，损伤部位发生褐变，其损伤形状近似椭球体。损伤体积计算公式为

$$V = \frac{1}{6} \pi ABC \tag{1}$$

式中 V ——损伤体积， mm^3
 A ——损伤长度， mm
 B ——损伤宽度， mm
 C ——损伤高度， mm

将加速度峰值、损伤体积作为跌落碰撞损伤试验因素。

1.2.3 单因素试验方案

分别以跌落高度、质量、跌落角度为试验因素，以加速度峰值、损伤体积为试验指标，进行籽瓜跌落碰撞损伤试验。跌落高度单因素试验：质量 3.7 kg、跌落角度 60°；质量单因素试验：跌落高度 240 mm、跌落角度 60°；跌落角度单因素试验：跌落高度 240 mm、质量 3.7 kg。单因素试验水平如表 1 所示。

表 1 单因素试验水平
Tab. 1 Single factor test level

试验水平	试验因素		
	跌落高度/mm	质量/kg	跌落角度/(°)
1	100	3.0	0
2	160	3.3	30
3	240	3.7	60
4	300	4.0	90

1.2.4 多因素响应面试验方案

为研究多因素交互对试验指标的影响，在单因素

试验的基础上，利用 Design-Expert 11.0 软件，采用 Box-Behnken Design 试验设计方法进行 3 因素 3 水平试验设计，试验因素水平编码如表 2 所示，根据编码后的试验方案进行跌落碰撞损伤试验^[21]。

表 2 多因素试验水平
Tab. 2 Multifactor test level

编码	试验因素		
	跌落高度/mm	质量/kg	跌落角度/(°)
-1	100	3.0	0
0	200	3.5	45
1	300	4.0	90

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

根据单因素试验方案进行试验，用重复试验平均值±标准差表示单因素试验中各试验指标结果，如表 3 所示。

表 3 单因素试验结果
Tab. 3 Single factor test results

试验因素	试验水平	试验指标	
		加速度峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	损伤体积/ mm^3
跌落高度/mm	100	144.6±3.2	1 173±19
	160	163.5±3.1	1 264±18
	240	188.5±3.3	1 387±19
	300	207.1±3.7	1 482±19
质量/kg	3.0	198.5±3.0	1 226±18
	3.3	194.3±3.1	1 295±19
	3.7	188.3±3.3	1 388±20
	4.0	184.3±3.2	1 456±18
跌落角度/(°)	0	170.5±3.4	1 253±15
	30	179.4±3.4	1 319±18
	60	188.6±3.1	1 389±18
	90	197.3±3.3	1 461±14

2.1.1 跌落高度对试验指标的影响

由表 3 可知，跌落高度由 100 mm 到 300 mm 变化，加速度峰值、损伤体积分别呈现逐渐增大趋势，即跌落高度越大，加速度峰值、损伤体积越大。对跌落高度单因素试验结果进行方差分析，结果如表 4 所示。

由表 4 可知，跌落高度对加速度峰值、损伤体积的影响均极显著 ($P<0.01$)，由 F 值的大小判断，跌落高度对各试验指标影响程度顺序为加速度峰值>损伤

表 4 跌落高度方差分析
Tab. 4 Variance analysis of drop height

试验因素	试验指标	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
跌落高度	加速度峰值	11 336	3	3 778	340.27	<0.001
	损伤体积	278 253	3	92 751	260.44	<0.001

注： $P<0.01$ 表示影响极显著； $0.01\leq P<0.05$ 表示影响显著； $P\geq 0.05$ 表示影响不显著。下同。

体积。

2.1.2 质量对试验指标的影响

由表3可知,质量由3 kg到4 kg变化,加速度峰值呈现逐渐减小趋势,损伤体积呈现逐渐增大趋势,即质量越大,加速度峰值越小,损伤体积越大。对质量单因素试验结果进行方差分析,结果如表5所示。

由表5可知,质量对加速度峰值、损伤体积的影响均极显著($P<0.01$),由 F 值的大小判断,质量对各试验指标影响程度顺序为损伤体积>加速度峰值。

2.1.3 跌落角度对试验指标的影响

由表3可知,跌落角度由 0° 到 90° 变化,加速度峰值、损伤体积分别呈现逐渐增大趋势,即跌落角度越大,加速度峰值、损伤体积越大,对跌落角度单因素试验结果进行方差分析,结果如表6所示。

由表6可知,跌落角度对加速度峰值、损伤体积的影响均极显著($P<0.01$),由 F 值的大小判断,跌落角度对各试验指标影响程度顺序为损伤体积>加速度峰值。

2.2 多因素响应面试验结果与分析

根据多因素响应面试验方案进行 Box-Behnken Design 试验设计和试验,试验结果如表7所示。 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为试验因素跌落高度、质量、跌落角度的编码值。

利用 Design-Expert 11.0 软件对试验数据进行方差分析,建立各试验因素与各试验指标之间的二次线性回归方程数学模型,绘制各试验因素对试验指标的响应曲面图,分析各试验因素交互作用对试验指标的影响。

2.2.1 试验因素对加速度峰值的影响

加速度峰值 $a_{\max}$ 的方差分析如表8所示,回归模型的 $P<0.01$,拟合度极显著, X_1 、 X_2 、 X_3 对加速度峰值 $a_{\max}$ 的影响极显著 ($P<0.01$), X_1X_3 对加速度峰值 $a_{\max}$ 的影响显著 ($0.01<P<0.05$), X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对加速度峰值 $a_{\max}$ 的影响不显著 ($P>0.05$), 将不显著项并入残差项,得到各因素对加速度峰值 $a_{\max}$ 的

回归方程。即

$$a_{\max} = 175.52 + 30.32X_1 - 7.15X_2 + 12.00X_3 + 4.07X_1X_3 \quad (2)$$

各试验因素对试验指标加速度峰值 $a_{\max}$ 的影响显著性程度依次为 $X_1>X_3>X_2$ 。失拟项 $P>0.05$, 说明模型失拟性不显著,回归模型与实际拟合较好。

为确定各试验因素交互作用对试验指标加速度峰值的影响,选取某一因素并固定水平,分别绘制跌落高度、质量、跌落角度对加速度峰值影响的响应曲面图,如图2所示。

由图2a可知,当跌落高度100 mm时,随着质量由小到大,加速度峰值呈现逐渐减小的趋势,减小了5.7%;当跌落高度300 mm时,随着质量由小到大,加速度峰值也呈现逐渐减小的趋势,减小了6.0%,趋势没有显著差异。当质量3 kg时,随着跌落高度由小到大,加速度峰值呈现逐渐增大的趋势,增加了40.8%;当质量为4 kg时,随着跌落高度由小到大,加速度峰值也呈现逐渐增大的趋势,增加了40.3%,趋势没有显著差异。跌落高度与质量的交互作用对加速度峰值影响不显著 ($P>0.05$)。

由图2b可知,当跌落高度100 mm时,随着跌落角度由小到大,加速度峰值呈现逐渐增大的趋势;当跌落高度300 mm时,随着跌落角度由小到大,加速度峰值也呈现逐渐增大的趋势,但趋势变陡。当跌落角度 0° 时,随着跌落高度由小到大,加速度峰值呈现逐渐增大的趋势;当跌落角度 90° 时,随着跌落高度由小到大,加速度峰值也呈现逐渐增大的趋势,但趋势变陡。跌落高度与跌落角度的交互作用对加速度峰值影响显著 ($0.01<P<0.05$)。

由图2c可知,当质量3 kg时,随着跌落角度由小到大,加速度峰值呈现逐渐增大的趋势;当质量4 kg时,随着跌落角度由小到大,加速度峰值也呈现逐渐增大的趋势,趋势没有显著差异。当跌落角度 0° 时,随着质量由小到大,加速度峰值呈现逐渐减小的趋势;当跌落角度 90° 时,随着质量由小到大,加速度

表5 质量方差分析

Tab. 5 Variance analysis of weight

试验因素	试验指标	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
质量	加速度峰值	588	3	196	20.00	<0.001
	损伤体积	154 124	3	51 374	148.18	<0.001

表6 跌落角度方差分析

Tab. 6 Variance analysis of drop angle

试验因素	试验指标	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
跌落角度	加速度峰值	1997	3	665	62.13	<0.001
	损伤体积	120 342	3	40 114	148.02	<0.001

表 7 多因素响应面试验结果
Tab. 7 Multifactor response surface test results

序号	试验因素			加速度峰值 $a_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	损伤体积 V/mm^3
	X_1	X_2	X_3		
1	0	-1	1	190.2	1 263
2	1	0	1	222.6	1 554
3	-1	-1	0	151.4	979
4	0	-1	-1	170.1	981
5	0	0	0	173.9	1 210
6	0	0	0	177.8	1 242
7	0	0	0	176.1	1 226
8	1	1	0	200.4	1 572
9	0	1	1	178.9	1 420
10	-1	0	1	152.8	1 199
11	0	0	0	175.3	1 232
12	-1	0	-1	139.7	979
13	1	0	-1	193.2	1 255
14	-1	1	0	142.8	1 212
15	1	-1	0	213.1	1 241
16	0	0	0	180.1	1 249
17	0	1	-1	145.5	1 280

表 8 加速度峰值方差分析
Tab. 8 Variance analysis of maximum acceleration

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	9 132.03	9	1 014.67	106.52	<0.000 1
X_1	7 356.84	1	7 356.84	772.29	<0.000 1
X_2	408.98	1	408.98	42.93	0.000 3
X_3	1 152	1	1 152.00	120.93	<0.000 1
X_1X_2	4.2	1	4.20	0.441 2	0.527 8
X_1X_3	66.42	1	66.42	6.97	0.033 4
X_2X_3	44.22	1	44.22	4.64	0.068 1
X_1^2	40.27	1	40.27	4.23	0.078 8
X_2^2	33.19	1	33.19	3.48	0.104 2
X_3^2	29.74	1	29.74	3.12	0.120 6
残差	66.68	7	9.53		
失拟	43.77	3	14.59	2.55	0.194 1
误差	22.91	4	5.73		

峰值也呈现逐渐减小的趋势，趋势没有显著差异。跌落角度与质量的交互作用对加速度峰值影响不显著 ($P>0.05$)。

2.2.2 试验因素对损伤体积的影响

损伤体积 V 的方差分析如表 9 所示，由表可知，该回归模型的 $P<0.01$ ，拟合度极显著， X_1 、 X_2 、 X_3 对损伤体积 V 的影响极显著 ($P<0.01$)， X_2X_3 对损伤体积 V 的影响显著 ($0.01<P<0.05$)， X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对损伤体积 V 的影响不显著 ($P>0.05$)，将不显著项并入残差项，得到各因素对损伤体积 V 的回归方程。即

$$V=1240.82+156.63X_1+127.50X_2+117.63X_3-35.50X_2X_3 \quad (3)$$

各试验因素对试验指标损伤体积 V 的影响显著性程度依次为 $X_1>X_2>X_3$ 。失拟项 $P>0.05$ ，说明模型失拟

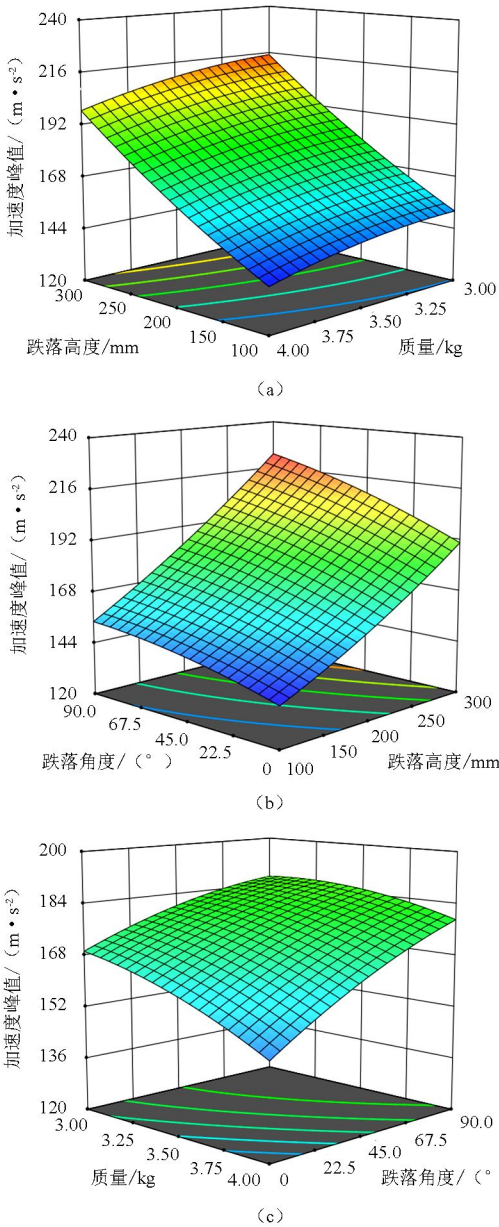


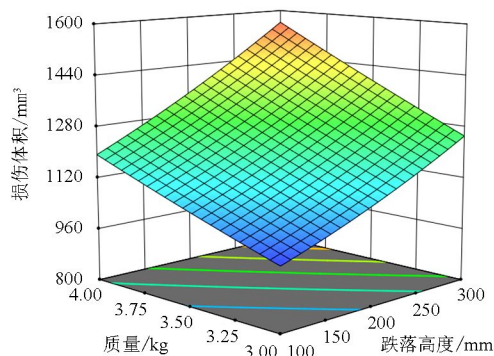
图 2 双因素交互作用对加速度峰值的响应曲面
Fig. 2 Response surface of two-factor interaction to maximum acceleration

性不显著，回归模型与实际拟合较好。
分别绘制跌落高度、质量、跌落角度对损伤体积影响的响应曲面图，如图 3 所示。
由图 3a 可知，当跌落高度 100 mm 时，随着质量由小到大，损伤体积呈现逐渐增大的趋势；当跌落高度 300 mm 时，随着质量由小到大，损伤体积也呈现逐渐增大的趋势，趋势没有显著差异。当质量 3 kg 时，随着跌落高度由小到大，损伤体积呈现逐渐增大的趋势；当质量 4 kg 时，随着跌落高度由小到大，损伤体积也呈现逐渐增大的趋势，趋势没有显著差异。跌落高度与质量的交互作用对损伤体积影响不显著 ($P>0.05$)。
由图 3b 可知，当跌落高度 100 mm 时，随着跌落

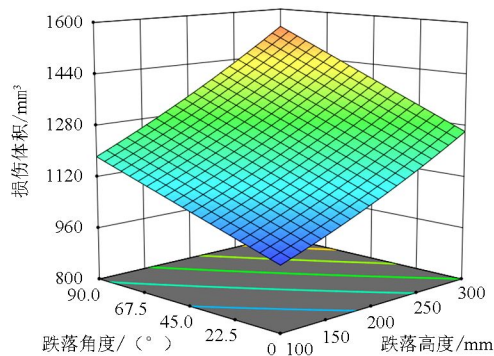
表 9 损伤体积方差分析

Tab. 9 Variance analysis of damaged volume

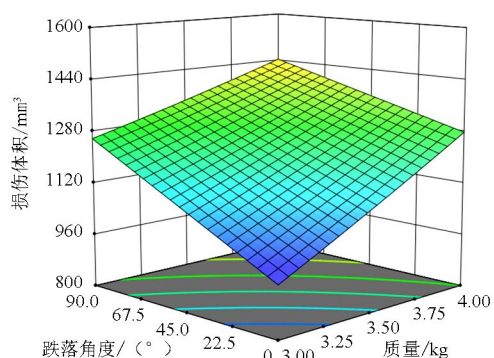
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	447 000	9	49 671.49	97.86	<0.000 1
X_1	196 300	1	196 300.00	386.64	<0.000 1
X_2	130 100	1	130 100.00	256.22	<0.000 1
X_3	110 700	1	110 700.00	218.07	<0.000 1
X_1X_2	2 401	1	2 401.00	4.73	0.066 1
X_1X_3	1 560.25	1	1 560.25	3.07	0.123 0
X_2X_3	5 041	1	5 041.00	9.93	0.016 1
X_1^2	944.21	1	944.21	1.86	0.214 8
X_2^2	75.16	1	75.16	0.148 1	0.711 8
X_3^2	0.002 6	1	0.002 6	0.000 005 185	0.998 2
残差	3 553.05	7	507.58		
失拟	2 644.25	3	881.42	3.88	0.111 6
误差	908.8	4	227.2		



(a)



(b)



(c)

图 3 双因素交互作用对损伤体积的响应曲面

Fig. 3 Response surface of two-factor interaction to damaged volume

角度由小到大, 损伤体积呈现逐渐增大的趋势; 当跌落高度 300 mm 时, 随着跌落角度由小到大, 损伤体积也呈现逐渐增大的趋势, 趋势没有显著差异。当跌落角度 0° 时, 随着跌落高度由小到大, 损伤体积呈现逐渐增大的趋势; 当跌落角度 90° 时, 随着跌落高度由小到大, 损伤体积也呈现逐渐增大的趋势, 趋势没有显著差异。跌落高度与跌落角度的交互作用对损伤体积影响不显著 ($P>0.05$)。

由图 3c 可知, 当质量 3 kg 时, 随着跌落角度由小到大, 损伤体积呈现逐渐增大的趋势; 当质量 4 kg 时, 随着跌落角度由小到大, 损伤体积也呈现逐渐增大的趋势, 但趋势变平缓。当跌落角度 0° 时, 随着质量由小到大, 损伤体积呈现逐渐增大的趋势; 当跌落角度 90° 时, 随着质量由小到大, 损伤体积也呈现逐渐增大的趋势, 但趋势变平缓。跌落角度与质量的交互作用对损伤体积影响显著 ($0.01<P<0.05$)。

2.2.3 模型验证

用试验指标加速度峰值、损伤体积的试验数据与模型预测数据的绝对误差比验证模型的可靠度, 绝对误差比计算如式 (4) 所示。

$$\Phi_i = \frac{|a_i - A_i|}{a_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中 Φ_i ——绝对误差比, %

A_i ——模型预测数据

a_i ——试验数据

加速度峰值、损伤体积试验数据与模型预测数据比较如图 4 所示, 加速度峰值绝对误差比范围 0.25%~2.20%, 误差比平均值 1.01%; 损伤体积绝对误差比范围 0.02%~2.61%, 误差比平均值 1.03%。结果表明, 试验指标加速度峰值、损伤体积的预测模型可靠度高, 所建立的回归模型是有意义的, 可为籽瓜机械收获和储运过程中相关参数的确定和损伤程度的预测提供参考。

3 结束语

(1) 单因素试验结果表明, 跌落高度由 100 mm 到 300 mm 变化, 加速度峰值、损伤体积均呈现逐渐增大趋势, 跌落高度对各试验指标影响均极显著, 影响程度为加速度峰值>损伤体积; 质量由 3 kg 到 4 kg 变化, 加速度峰值呈现逐渐减小的趋势, 损伤体积呈现逐渐增大趋势, 质量对各试验指标影响均极显著, 影响程度为损伤体积>加速度峰值; 跌落角度由 0° 到 90° 变化, 加速度峰值、损伤体积呈现逐渐增大的趋势, 跌落角度对各试验指标影响均极显著 ($P<0.01$), 影响程度为损伤体积>加速度峰值。

(2) 利用 Design-Expert 进行多因素响应面试验设计和数据分析, 研究了多因素交互作用对试验指标的

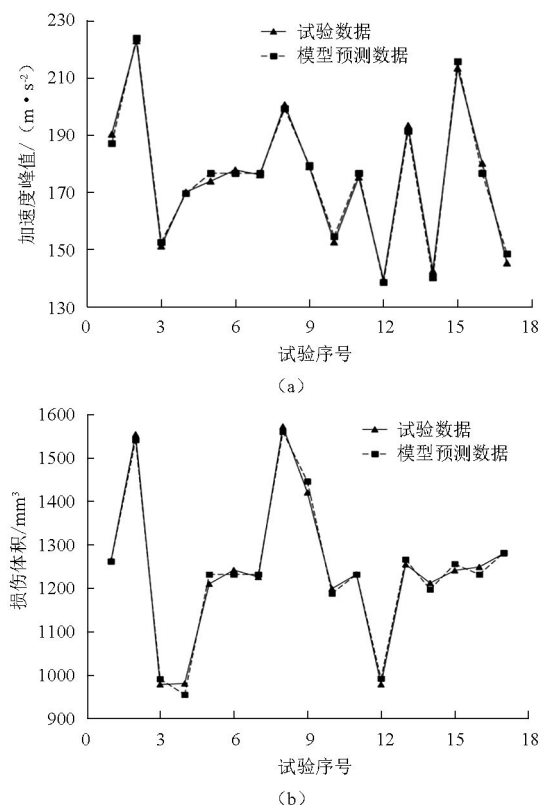


图4 试验数据与模型预测数据比较

Fig. 4 Comparison of test data with model prediction data

影响, 跌落高度与跌落角度的交互作用对加速度峰值影响显著 ($0.01 < P < 0.05$), 跌落高度与质量、质量与跌落角度的交互作用对加速度峰值影响不显著 ($P > 0.05$); 质量与跌落角度的交互作用对损伤体积的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$), 跌落高度与质量、跌落高度与跌落角度的交互作用对损伤体积影响不显著 ($P > 0.05$)。

(3) 分别建立了跌落高度、质量、跌落角度对试验指标加速度峰值、损伤体积的回归方程模型, 进行了模型验证, 结果表明模型可靠。

参考文献

- [1] 代彩玲. 籽用西瓜果皮果胶的提取和瓜瓤多糖的分离纯化与结构分析及其生物活性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
DAI Cailing. Studies on pectin extract of peel and polysaccharides separation and purification and structure analysis and its biological activity of pulp from seed-used watermelon[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [2] 王磊, 阿地里江·阿不都拉, 张富春, 等. 籽瓜瓤提取物对酪氨酸酶抑制作用及其成分分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(19): 7-13.
WANG Lei, ABUDOU LA Adilijiang, ZHANG Fuchun, et al. Constituent analysis and inhibition of tyrosinase activity of seed-watermelon pulp extract[J]. Food Research and Development, 2018, 39(19): 7-13.
- [3] 张晓倩, 田丽萍, 张义晖, 等. 籽瓜提取物葫芦素 E 对化学性肝损伤的保护作用研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 164-169.
ZHANG Xiaoqian, TIAN Liping, ZHANG Yihui, et al. Study on the protective effect of cucurbitacin E on chemical liver injury[J]. Food Research and Development, 2018, 39(16): 164-169.
- [4] 李志豪. 籽瓜种仁蛋白质及其加工功能特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
LI Zhihao. Study on the protein and processing characteristics of seed-watermelon kernels[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.
- [5] 钱雅雯, 魏佳, 张政, 等. 籽瓜多糖提取工艺的响应面优化及其体外降血脂活性[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 101-107.
QIAN Yawen, WEI Jia, ZHANG Zheng, et al. Optimization of polysaccharides extraction from seed melon by response surface methodology and its hypolipidemic effects in vitro[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 101-107.
- [6] 陈志惠, 段宏兵, 蔡兴奎, 等. 马铃薯跌落碰撞时的接触应力分布特性[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 99-108.
CHEN Zhihui, DUAN Hongbing, CAI Xingui, et al. Distribution characteristics of potato contact stress during the drop impact[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 99-108.
- [7] 张立军, 窦煜博, 袁江涛, 等. 皇冠梨采后冲击损伤影响因素研究及模型预测[J]. 包装工程, 2023, 44(15): 45-51.
ZHANG Lijun, DOU Yubo, YUAN Jiangtao, et al. Influencing factors and prediction model for postharvest impact damage of 'Huangguan' pears[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(15): 45-51.
- [8] 胡广锐, 卜令昕, 张恩宇, 等. 苹果两向异性力学特性和跌落试验研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(4): 154-160.
HU Guangrui, BU Lingxin, ZHANG Enyu, et al. Experimental research of anisotropic mechanical properties and drop test of apples[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 154-160.
- [9] 肖越, 武佩, 王顺喜, 等. 葡萄贮运过程中跌落与振动损伤的试验分析[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 9-18.
XIAO Yue, WU Pei, WANG Shunxi, et al. Experimental analysis of dropping and vibration damage in grapes storage and transportation[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 9-18.
- [10] 何晓东, 朱德泉, 朱健军, 等. 苹果采后加工碰撞损伤影响因素研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 101-108.
HE Xiaodong, ZHU Dequan, ZHU Jianjun, et al. Study on the influencing factors of collision damage in apple postharvest processing[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 101-108.
- [11] 冯斌, 孙伟, 孙步功, 等. 收获期马铃薯块茎跌落冲击特性及损伤规律研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 267-274.
FENG Bin, SUN Wei, SUN Bugong, et al. A study on dropping impact characteristics and damage regularity of potato tubers during harvest[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 267-274.
- [12] 高国华, 谢海峰, 李博文, 等. 甘薯跌落碰撞损伤试验研究与分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 85-90.
GAO Guohua, XIE Haifeng, LI Bowen, et al. Experimental study and analysis on collision damage of sweet potato in drop[J]. Journal of

- Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 85-90.
- [13] 马帅, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 葡萄果实碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 180-186.
- MA Shuai, XU Liming, XING Jiejie, et al. Study on collision damage experiment of grape and finite element analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(11): 180-186.
- [14] 王芳, 韩媛媛, 魏星, 等. 河套蜜瓜跌落冲击特性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 199-201.
- [15] 王芳, 魏星, 韩媛媛, 等. 西瓜冲击力学特性及损伤分析研究[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(2): 185-189.
- WANG Fang, WEI Xing, HAN Yuanyuan, et al. Impact mechanical characteristics and damage analysis of watermelon[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2016, 34(2): 185-189.
- [16] 陈思宇. 苹果力学损伤特性研究及采收试验平台设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- CHEN Siyu. Study on mechanical damage characteristics of apple and design of harvesting test platform[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [17] 于福锋. 脆熟期红枣物理特性及机械损伤试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020.
- YU Fufeng. Experimental study on physical characteristics and mechanical damage of jujube during crisp ripening period[D]. Alar: Tarim University, 2020.
- [18] 魏星. 西瓜冲击作用下力学特性及损伤研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- WEI Xing. Study on impact mechanical characteristics and damage of watermelon[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [19] 王启慧, 熊世磊, 万芳新, 等. 不同规格、不同部位籽瓜果皮质地特性分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2021, 36(4): 700-707.
- WANG Qihui, XIONG Shilei, WAN Fangxin, et al. Analysis of texture characteristics of seed melon peel in different specifications and parts[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(4): 700-707.
- [20] 张志强. 籽瓜破碎取籽分离机的设计与研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- ZHANG Zhiqiang. Design and research of seed-used watermelon crushing separator[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [21] 王红梅, 曹卫锋. 试验设计与统计分析[M]. 北京: 中国林业出版社, 2022.