

农产品保鲜与食品包装

皇冠梨采后冲击损伤影响因素研究及模型预测

张立军¹, 窦煜博¹, 袁江涛¹, 孙一鸣¹, 吴子鸣¹,
吴映桐¹, 王立军^{1,2}, 宋海燕^{1,2}

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457;
2.中国轻工业食品包装材料与技术重点实验室, 天津 300457)

摘要: 目的 考虑到皇冠梨在储运过程中损伤严重, 探究跌落冲击及果实本身特性对水果的损伤的影响, 为皇冠梨的减损提供理论依据。方法 以河北赵县皇冠梨为研究对象, 研究跌落高度、接触材料、果实硬度、曲率半径以及环境温度对皇冠梨冲击损伤的影响, 并利用多元线性回归分析方法, 建立皇冠梨果实的损伤预测模型 ($P \leq 0.05$)。结果 跌落高度与损伤面积呈线性相关, 皇冠梨分别与钢板和橡胶板冲击时产生临界损伤的跌落高度为 30 mm 和 50 mm, 而与本实验选取的 EPE 板和瓦楞纸板冲击时产生临界损伤的跌落高度为 220 mm 和 340 mm。皇冠梨与 EPE 板冲击时表现为当跌落高度小于 400 mm 时, 果实曲率半径越小, 损伤面积越大; 当跌落高度大于 400 mm 时, 较大的曲率半径导致更大的损伤面积, 果实硬度越小, 冲击时损伤面积越大, 环境温度越高, 损伤越严重。结论 接触材料种类和果实本身特性对水果冲击损伤有较大影响。依据试验结果建立了损伤预测模型, 预测模型可为皇冠梨自动化采摘、分级装备以及贮存、运输包装提供一定的理论指导。

关键词: 皇冠梨; 跌落冲击; 果实特性; 损伤; 预测模型

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)15-0045-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.15.007

Influencing Factors and Prediction Model for Postharvest Impact Damage of 'Huangguan' Pears

ZHANG Li-jun¹, DOU Yu-bo¹, YUAN Jiang-tao¹, SUN Yi-ming¹,
WU Zi-ming¹, WU Ying-tong¹, WANG Li-jun^{1,2}, SONG Hai-yan^{1,2}

(1. School of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Materials and Technology of China Light Industry, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: Considering the serious damage of 'Huangguan' pears during storage and transportation, the work aims to provide a theoretical basis for damage reduction of 'Huangguan' pears, and explores the effect of drop impact and fruit characteristics on fruit damage. The effects of drop height, contact material, fruit hardness, curvature radius and ambient temperature on the impact damage of 'Huangguan' pears in Zhaoxian County, Hebei Province were studied. A damage prediction model ($P \leq 0.05$) of 'Huangguan' pears was established by multiple linear regression analysis. The results showed that there was a linear correlation between the drop height and the damage area. The drop height of the critical damage caused by the impact of 'Huangguan' pears with steel and rubber was 30 mm and 50 mm, while the drop height of

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金 (32202116)

作者简介: 张立军 (1997—), 男, 硕士生, 主攻运输包装。

通信作者: 宋海燕 (1977—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为物流包装材料、技术与设备。

the critical damage caused by the impact of EPE and corrugated paperboard selected in this experiment was 220 mm and 340 mm. When the drop height of impact with the EPE was less than 400 mm, the smaller the curvature radius of the fruit, the larger the damage area; when the drop height was greater than 400 mm, the larger curvature radius leads to a larger damage area. The smaller the fruit hardness, the larger the damage area during impact; the higher the ambient temperature, the more serious the damage. The type of contact material and the characteristics of fruit have great effects on the impact damage of fruit. A damage prediction model is established based on the test results. The prediction model can provide some theoretical guidance for automatic picking, storage transportation and packaging of 'Huangguan' pears.

KEY WORDS: 'Huangguan' pear; drop impact; fruit characteristics; damage; prediction model

据调查相关数据显示,自1993年以来,我国一直保持着世界第一水果生产大国的地位^[1],但我国水果在采摘和储运过程中平均的损耗率已高达20%,水果采摘和储运过程中造成的经济损失已达到上千亿元。然而西方发达国家的水果损耗率却普遍低于5%,甚至有些发达国家的损耗率只有1%~2%^[2-3]。皇冠梨又名黄金梨,产地主要分布在河北、河南、山东等地,成熟期在8~9月。果实近球形或卵形,果皮黄白,皮薄肉厚,风味酸甜带有蜜香,含有胡萝卜素、维生素B1、B2和苹果酸等人体必需的元素^[4]。皇冠梨因其果实肉脆多汁,易在运输中产生明显的机械损伤,严重影响了皇冠梨的经济价值。保证采后流通过程中皇冠梨的质量,既可以提高梨的市场价格,又能保持果农的生产生活积极性,具有十分重要的经济价值和社会意义。

目前,许多学者已开展了水果跌落损伤方面的研究,主要集中在接触材料和跌落高度对果实的损伤,但对水果本身特性对损伤的影响研究较少。Yurtlu等^[5]通过桃子与不同碰撞材料的跌落试验,提出聚氨酯泡沫材料作为缓冲材料可大幅降低桃子的跌落碰撞损伤。孙慧杰等^[6]、吴杰等^[7]研究了香梨在不同跌落高度和与4种材料碰撞时的接触应力,确定接触应力分布与香梨损伤之间的关系。Stropek等^[8]从冲击时间、最大变形、永久变形、恢复系数和最大应力等方面研究了冲击对2个品种的梨的影响。分析得出上述特征与损伤的大小有关,损伤的临界值是根据冲击速度和硬度确定的,并指出损伤的增长速度取决于果实的硬度,较硬的梨更耐冲击。Lu等^[9]探究瓦楞纸板包装对苹果的跌落损伤,结果表明利用感压胶片测量的冲击力可用于评估和预测苹果的碰撞损伤。Zeebroeck等^[10]建立了多个线性和非线性回归模型,将成熟度、硬度、果实温度、曲率半径和采收日期与损伤联系起来,解释了果实因素之间的相互作用,以及果实因素和损伤程度之间的联系。果实的损伤面积与果实本身特性有直接关系,研究果实本身特性是果实损伤规律的切入点^[11],因此探究果实本身特性对损伤的影响对降低机械损伤具有重要意义^[12]。

本实验采用单因素试验方法对皇冠梨进行跌落碰撞试验,对皇冠梨的跌落冲击损伤和峰值加速度特

性进行测定,探究跌落冲击以及皇冠梨本身特性对其损伤规律及其峰值加速度的研究。为皇冠梨的采摘、分级、包装、加工、运输以及销售过中设备设计、优化包装和贮运方式等提供必要的科学理论依据。

1 试验

1.1 材料

皇冠梨产自中国河北省赵县,肉脆多汁,磕碰受损部位明显易观察。选择无虫害、大小均匀、形似球体的皇冠梨果实作为试验对象,并确保皇冠梨在采摘、运输等环节未受到损伤。单果质量为320~340 g,果实硬度为5.5~7.0 kg/cm²,冲击位置曲率半径为40~50 mm。依据梨果机械化和自动化作业以及包装系统的常用材料^[13-14],皇冠梨跌落接触材料选用钢板、橡胶板、发泡聚乙烯板(EPE板)和瓦楞纸板。4种接触材料特性见表1,其中瓦楞纸板为单瓦3层,瓦楞齿形为UV型,楞型为A型。

表1 接触材料的特性
Tab.1 Characteristics of contact materials

| 材料类型 | 厚度/mm | 密度/(g·cm ⁻³) |
|------|-------|--------------------------|
| 钢板 | 5 | 7.8 |
| 橡胶板 | 5 | 1.5 |
| EPE板 | 5 | 0.027 |
| 瓦楞纸板 | 4.5 | 0.12 |

1.2 仪器

选用的加速度传感器为美国压电公司的PCB三轴向加速度传感器,型号为356A24/NC、灵敏度为10 mV/g、量程范围为±500 g、测量频率范围(±5%)为1~9 000 Hz。该传感器可满足水果冲击的要求。其他选用的试验仪器如下:

自制跌落损伤测试系统由电动柔性机械爪(赛博电子科技有限公司)、加速度传感器、电荷放大器等组成;GY-4型水果硬度计,艾普计量仪器有限公司;天目RG-12数显曲率半径测量仪;温湿度试验箱,苏州苏试试验仪器有限公司;电子分析天平,上海梅

特勒托利多公司; 游标卡尺。

1.3 方法

1.3.1 跌落冲击试验

如图 1 所示, 由柔性机械爪抓取皇冠梨, 然后旋转机械爪开关使皇冠梨呈自由落体跌落, 在果实的非碰撞侧面固定加速度传感器, 皇冠梨的赤道部位与材料碰撞, 随后快速接住皇冠梨, 防止二次碰撞影响试验结果。皇冠梨跌落接触材料选取钢板、橡胶板、EPE 板和瓦楞纸板; 皇冠梨的跌落高度分别为 100、200、300、400、500、600 mm; 碰撞位置的曲率半径、果实硬度、环境温度的单因素试验选择 EPE 板为接触材料。依据皇冠梨的曲率半径分布, 果实曲率半径选择 2 个极值曲率半径 (R 为 (40 ± 2) 、 (50 ± 2) mm) 作为因素水平。依据皇冠梨的硬度分布, 果实硬度选择 (5.5 ± 0.2) 、 (6.2 ± 0.2) 和 (7.0 ± 0.2) kg/cm^2 3 个硬度水平。依据皇冠梨的最佳冷藏温度和货架期的通常温度^[13], 选择冷藏 ($1\text{ }^\circ\text{C}$) 和常温 ($25\text{ }^\circ\text{C}$) 2 个温度水平进行果实贮存。在进行不同果实温度下的碰撞试验之前的 24 h, 皇冠梨被储存在相对应的温度下。对于 EPE 板和瓦楞纸板, 每次冲击实验后要更换, 保证材料的特性一致, 每个高度跌落碰撞重复 10 次, 测量皇冠梨的跌落冲击峰值加速度。

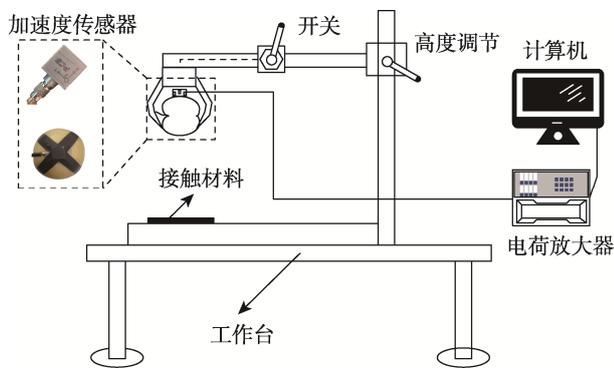


图 1 跌落损伤测试系统
Fig.1 Drop damage test system

1.3.2 皇冠梨跌落冲击峰值加速度的测量

皇冠梨在进行跌落冲击前, 在果实的非碰撞侧面固定加速度传感器, 保证传感器记录方向与果梗方向垂直, 与水平碰撞方向一致。冲击试验结束后, 记录其峰值加速度值。

1.3.3 皇冠梨跌落损伤面积的测量

皇冠梨跌落碰撞后, 在室温环境下放置 24 h 以上使其充分褐变。根据 Stopa 等^[15]采用的损伤面积方法测量皇冠梨的碰撞损伤面积, 见式 (1)。

$$A = \pi ab \quad (1)$$

式中: A 为皇冠梨果实褐变的损伤面积, mm^2 ; a 、 b 分别为苹果果实椭圆形损伤区域的长半轴和短

半轴, mm。

1.3.4 皇冠梨果实本身特性的测量

据研究报道表明, 果实接触位置的曲率半径对果实碰撞损伤有影响^[16]。曲率半径通过数显曲率半径测量仪在撞击点进行局部测量。在进行冲击试验之前, 用曲率半径仪测量每个皇冠梨样品冲击位置的周向曲率半径和径向曲率半径。因为皇冠梨不是完美的球体, 所以利用式 (2) 计算其调和平均值, 作为冲击位置的曲率半径值。

$$R = \frac{2 \times R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

式中: R 为皇冠梨冲击位置曲率半径值, mm; R_1 为冲击位置周向曲率半径值, mm; R_2 为冲击位置径向曲率半径值, mm。

冲击试验前用水果硬度计测定皇冠梨的硬度。选取皇冠梨赤道线一周均匀的 3 个位置, 手持硬度计, 使硬度计垂直于去皮皇冠梨表面, 压头均匀压入皇冠梨内, 当压头到刻度线 (10 mm) 处即停止, 指针所指示的读数即为皇冠梨硬度值。每次测量后按动回零按钮, 使数值复位到初始刻度线。记录试验数据, 试验结果取平均值, 单位用 kg/cm^2 表示^[17]。

1.3.5 数据处理

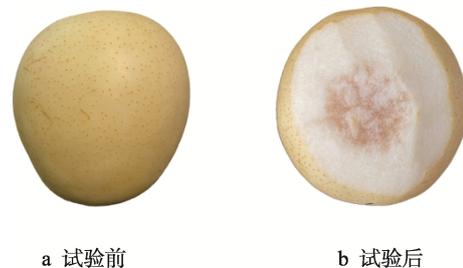
采用 Matlab 2018 软件进行预测模型的建立, 并用 Origin2018 软件画图。

2 结果与讨论

2.1 跌落高度、接触材料种类对皇冠梨跌落冲击损伤的影响

2.1.1 跌落高度对皇冠梨跌落冲击损伤的影响

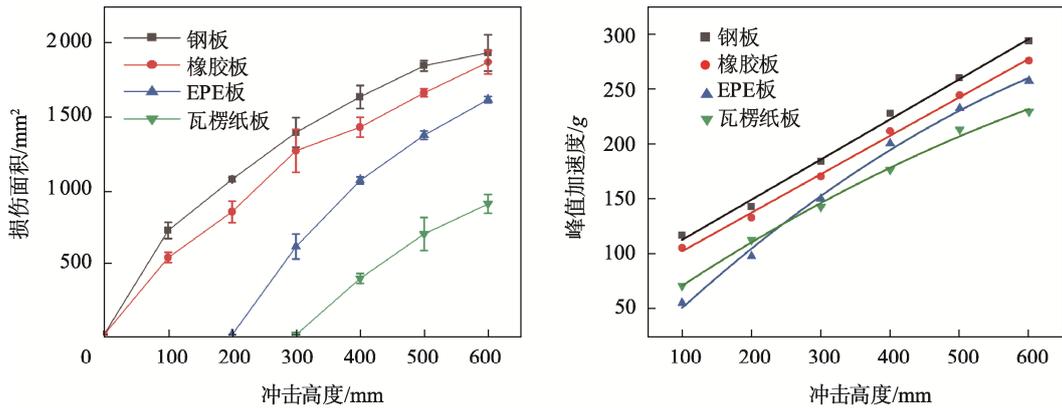
通过测量损伤面积来表征皇冠梨的损伤情况, 图 2 为皇冠梨冲击试验前后对比。如图 2b 所示, 皇冠梨冲击试验后在室温环境下放置 24 h 能明显看出皇冠梨的损伤情况。



a 试验前 b 试验后

图 2 皇冠梨冲击试验前后对比
Fig.2 Comparison before and after impact test of 'Huangguan' pears

图 3a 是跌落高度与碰撞材料对皇冠梨跌落冲击损伤的影响。如图 3a 所示, 跌落高度与损伤面积呈



a 跌落高度、接触材料对皇冠梨跌落冲击损伤的影响

b 皇冠梨峰值加速度与冲击高度的关系

图3 皇冠梨与4种接触材料冲击的结果分析

Fig.3 Impact analysis of 'Huangguan' pears with 4 contact materials

线性相关,随着跌落高度的增加,皇冠梨的损伤面积增大。这是因为随着跌落高度的增加,皇冠梨在开始跌落时的重力势能越大,受到的冲击力越大,所以皇冠梨受到的损伤面积越大^[18-19]。表2是皇冠梨在不同跌落高度下与钢板冲击时的损伤面积。由表2中数据可知,10、20 mm高度时冲击并未给皇冠梨产生残余变形,这表明皇冠梨在10、20 mm高度冲击下的变形是弹性变形^[20],此时皇冠梨没有产生损伤或损伤极其微弱;当跌落高度达到30 mm时,冲击给皇冠梨产生了残余变形,此时皇冠梨开始出现损伤;在高度为30、40、50 mm时,冲击试样残余变形随着跌落高度的增加而增加。本研究以皇冠梨首次出现损伤时的高度作为临界损伤高度,由此得到皇冠梨与钢板冲击产生损伤的临界损伤高度 $h=30$ mm。采用同样的方法得出皇冠梨与其他3种接触材料的临界损伤高度。当跌落高度为30 mm和50 mm以上时,皇冠梨在钢板和橡胶板上会产生损伤,而具有缓冲性能的EPE板和瓦楞纸板分别在220 mm和340 mm的跌落高度才会产生损伤。

表2 皇冠梨在不同高度下的损伤面积(钢板)
Tab.2 Damage area of 'Huangguan' pears at different heights (steel plate)

| 跌落高度/mm | 冲击损伤面积/mm² | | |
|---------|------------|--------|--------|
| | 第1组 | 第2组 | 第3组 |
| 10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 30 | 40.63 | 54.72 | 0.00 |
| 40 | 95.83 | 102.56 | 72.56 |
| 50 | 149.33 | 157.23 | 169.85 |

2.1.2 接触材料种类对皇冠梨跌落冲击损伤的影响

如图3a所示,在同一高度跌落,钢板上冲击损

伤面积大于橡胶板上冲击损伤面积,但差异不显著($P>0.05$);而瓦楞纸板、EPE板具有缓冲性,对皇冠梨的冲击损伤面积较小,其中瓦楞纸板对皇冠梨的保护性能最好。随着冲击能量增加,钢板和橡胶板为刚性材料不吸收能量,皇冠梨吸收全部的能量,导致其损伤面积增大;而瓦楞纸板和EPE板是柔性材料,会转移部分能量使得皇冠梨的损伤面积减小,这与Lu等^[21]的研究结果一致。

图3b是皇冠梨在4种接触材料上碰撞峰值加速度与冲击高度的关系。如图3b所示,随着跌落高度的不断增加,皇冠梨的峰值加速度呈线性增大趋势。此外,从皇冠梨在瓦楞纸板和EPE板上碰撞峰值加速度变化趋势来看,在跌落高度为200 mm以下时,皇冠梨在瓦楞纸板上碰撞的峰值加速度要比EPE板上的大,这基本与这2种缓冲材料冲击能损耗的差异性相吻合。但是,随着冲击能逐渐变大,皇冠梨在EPE板上碰撞损伤面积快速增大,与瓦楞纸板上碰撞损伤的差异逐渐变大。值得注意的是,当跌落高度高于200 mm时,皇冠梨与EPE板碰撞时的峰值加速度开始反超皇冠梨与瓦楞纸板碰撞时的峰值加速度。说明此时皇冠梨与EPE板碰撞时吸收的能量大于与瓦楞纸板碰撞时吸收的能量,这与Fadji等^[22]关于苹果碰撞损伤的研究结果相一致。经观察发现,之所以会出现这种结果,是因为对5 mm厚度的EPE板而言,在较高的冲击水平下,与皇冠梨碰撞接触部位的许多泡结构都已经破裂溃塌,EPE板的缓冲性能受到极大削弱。不同于EPE这种软弹性的发泡材料,瓦楞纸板的受力与变形具有双曲正切关系,随着冲击力增大,瓦楞纸板在冲击过程的变形通常仍能较好地限制在一个较为稳定的水平上^[23]。因此,在较高冲击水平下,与EPE板厚度大致相同的瓦楞纸板反而能对皇冠梨起到更好的缓冲保护作用。这与吴杰等^[24]的研究结果一致。

2.2 皇冠梨果实本身特性对冲击损伤的影响

2.2.1 皇冠梨的曲率半径

图 4 是皇冠梨冲击位置的曲率半径对冲击损伤面积的影响。实验选取了皇冠梨果实 2 个极端的曲率半径值。如图 4 所示, 皇冠梨碰撞位置的曲率半径对低冲击水平和高冲击水平表现出相反影响。当跌落高度在 400 mm 以下时, 曲率半径较小的皇冠梨出现更大的损伤; 但当跌落高度在 400 mm 以上时, 情况恰好相反, 曲率半径较小的皇冠梨则出现较小的损伤。这种差异的过渡跌落高度约为 400 mm, 在这一高度上, 曲率半径对损伤面积几乎没有影响。

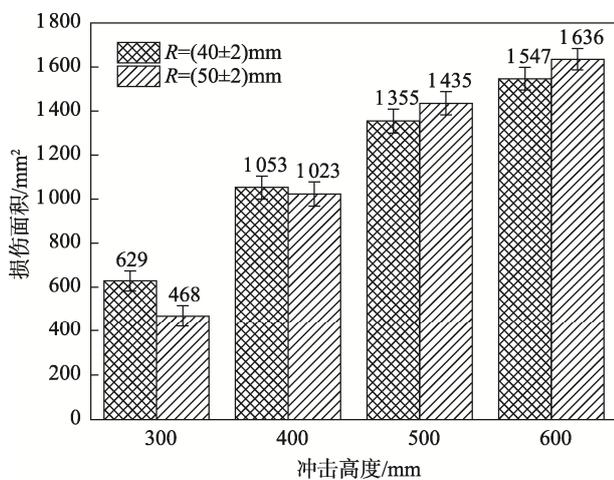


图 4 曲率半径对损伤面积的影响

Fig.4 Effect of curvature radius on damage area

此外, 基于赫兹理论的 2 个物理模型也得出相同的结论。第 1 个模型是由 Baritelle 等^[25]推导出来, 见式 (3)。

$$h_c = C\sigma_f^2(mg^{-1})[(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2]^4 \cdot (1/R_1 + 1/R_2)^{-3} \quad (3)$$

式中: h_c 为临界跌落高度, m; σ_f 为失效应力, Pa。

从这个模型中可以看出, 曲率半径越大, 临界损伤高度越高。这证实了低冲击水平碰撞, 小曲率半径会导致更多的跌落损伤。

Siyami 等^[26]从赫兹理论推导出的另一个模型显示了苹果曲率半径对挫伤直径和面积的相反影响, 见式 (4)。

$$D = 4.624 \left[(mhR^2) / (4F_{mt}) \right]^{1/5} \quad (4)$$

式中: D 为损伤直径, mm; m 为苹果的质量, kg; R 为碰撞位置的曲率半径, m; h 为跌落高度, mm。

从这个模型了的得出, 较大的曲率半径导致较大的损伤直径, 并因此导致较大的损伤面积。这证实了文中高冲击水平的碰撞结果。

2.2.2 皇冠梨的硬度对冲击损伤的影响

图 5 为皇冠梨的硬度对冲击损伤面积的影响。如图 5 所示, 皇冠梨的损伤面积随着其硬度的增加而减小。皇冠梨的硬度与跌落高度之间存在显著交互作用, 不同跌落高度下的损伤面积因皇冠梨硬度的增大而不同。然而, 这种相对差异随着跌落高度的增加而减小。硬度为 $(5.5 \pm 0.2) \text{ kg/cm}^2$ 与硬度为 $(7.0 \pm 0.2) \text{ kg/cm}^2$ 的皇冠梨相比, 在 300 mm 的跌落高度下, 前者比后者损伤面积大 45.5%; 在 600 mm 的跌落高度下, 前者比后者的损伤面积仅高 13.3%。这是因为皇冠梨的硬度越大, 说明其屈服强度越大^[27]。屈服强度是衡量果实抵抗塑性变形能力的一项重要参数, 其值越大, 则果实越难发生塑性变形, 也就是弹性碰撞所允许的接触力越大。

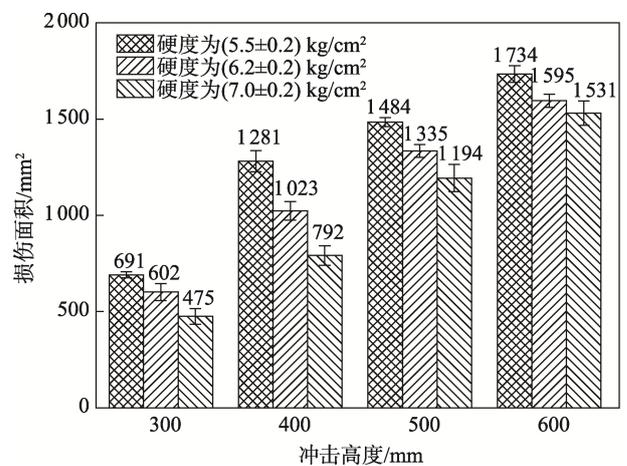


图 5 果实硬度对损伤面积的影响

Fig.5 Effect of fruit hardness on damage area

2.2.3 皇冠梨的果实温度对冲击损伤的影响

图 6 是皇冠梨的果实温度对冲击损伤面积的影响。如图 6 所示, 皇冠梨的果实温度与损伤面积呈正相关的关系, 温度越高, 损伤越大。在不同的跌落高度下皇冠梨的果实温度对损伤面积的影响存在差异性。在较低的冲击水平下, 皇冠梨的果实温度对损伤面积表现出更大的影响。也就是说, 温度对损伤面积的影响随着跌落高度的增加而逐渐减小。从实验结果可以看出, 在 1 °C 和 25 °C 环境温度下的皇冠梨, 当跌落高度为 600 mm 时, 损伤面积只相差了不到 1%, 而在 300 mm 的跌落高度下, 25 °C 下的皇冠梨损伤面积要比 1 °C 下的大了 19.42%。这一结果与 Van Zeebroeck 等^[10]的结果研究一致。

2.3 损伤预测模型的建立

冲击损伤对皇冠梨果实品质有不利影响。为了减少这种伤害, 有必要了解果实特性对冲击损伤面积的影响^[28]。对以上试验数据进行多元线性回归分析, 建立了皇冠梨果实的损伤预测模型 ($P \leq 0.05$)。

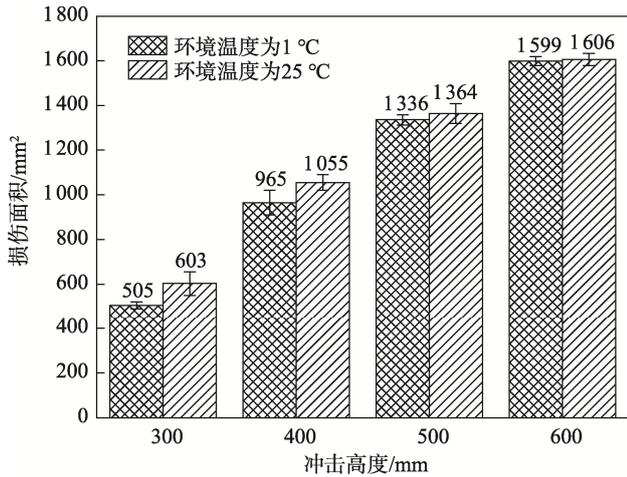


图6 果实温度对损伤面积的影响

Fig.6 Effect of fruit temperature on damage area

$$S = 164.44 + 3.73 \times h + 6.08 \times R - 161.46 \times P + 2.61 \times t$$

$$R^2 = 0.96 \quad (5)$$

式中: S 为损伤面积, mm^2 ; h 为皇冠梨跌落高度, mm ; R 为冲击位置的曲率半径, mm ; P 为果实硬度, kg/cm^2 ; t 为果实温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

在模型中, 跌落高度和水果的3个特性(硬度、曲率半径和温度)被作为自变量。硬度、曲率半径和果实温度以及一些相互作用对损伤的显著影响在5%的概率水平下获得, 模型的决定系数为0.96。试验测量损伤面积值与模型预测损伤面积值的对比见图7, 可以验证模型的可靠性。预测模型表明, 减小跌落高度、降低果实温度、增大硬度等可以减轻皇冠梨果实的损伤。

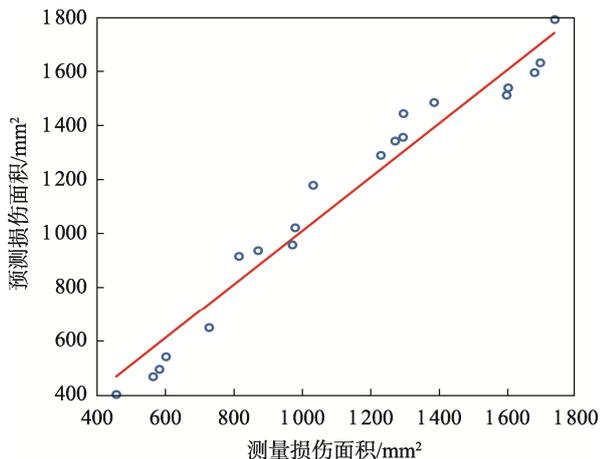


图7 测量损伤面积与模型预测损伤面积对比

Fig.7 Comparison between measured damage area and model predicted damage area

3 结语

1) 跌落高度与冲击损伤面积呈线性相关。皇冠梨与钢板、橡胶板、EPE板及瓦楞纸板碰撞, 产生损

伤的临界跌落高度分别为30、50、220和340 mm。研究表明, 橡胶板并不能起到一定的保护作用, 在智能分选时应添加其他缓冲材料防止皇冠梨受到冲击损伤; EPE板的缓冲保护性能取决于冲击程度。试验结果可为皇冠梨自动化采摘、分级装备以及运输包装提供一定的技术参数。

2) 皇冠梨与EPE板冲击表现为跌落高度小于400 mm时, 果实曲率半径越小, 损伤面积越大; 跌落高度大于400 mm时, 较大的曲率半径导致更大的损伤面积。因此在分选或包装过程中, 合理控制皇冠梨摆放或跌落的姿态, 以减少过程中造成的损伤。

3) 不同硬度下的冲击试验表明, 硬度越小的皇冠梨会产生越大的冲击损伤面积。

4) 产生冲击损伤时, 皇冠梨的温度越高损伤越多。这种影响随着跌落高度的增加而逐渐减小。因此运输过程, 应合理选择低温运输。

5) 利用多元线性回归分析的方法建立了跌落高度和3个特性(硬度、曲率半径和温度)的四因素皇冠梨果实损伤预测模型($P \leq 0.05$), 其决定系数为0.96。损伤预测模型可用于预测皇冠梨产生冲击损伤时的损伤面积。

参考文献:

- [1] WANG Li-Jun, ZHANG Qi, SONG Hai-yan, et al. Mechanical Damage of 'Huangguan' Pear using Different Packaging under Random Vibration[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022 (187): 111847.
- [2] 刘志刚, 王丽娟, 喜冠南, 等. 水果成熟度检测技术的现状与发展[J]. 农业与技术, 2020, 40(8): 17-21. LIU Zhi-gang, WANG Li-juan, XI Guan-nan, et al. Present Situation and Development of Fruit Maturity Detection Technology[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(8): 17-21.
- [3] PORAT R, LICHTER A, TERRY L, et al. Postharvest Losses of Fruit and Vegetables during Retail and in Consumers Homes: Quantifications, Causes, and Means of Prevention[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139: 135-149.
- [4] 刘华彬. 发展皇冠梨闯出一片天——记河北省衡水市饶阳县兴吾水果专业合作社[J]. 中国农民合作社, 2018(6): 51-52. LIU Hua-bin. Developing Crown Pear and Creating a Sky—A Record of Xingwu Fruit Professional Cooperative in Raoyang County, Hengshui City, Hebei Province[J]. China Farmers' Cooperatives, 2018(6): 51-52.
- [5] YURTLU Y, GÜNGÖR B. Determining Impact Bruising Thresholds of Peaches Using Electronic Fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 262(3): 109046.
- [6] 孙慧杰, 吴杰, 冯哲. 香梨跌落碰撞接触应力分布特性及损伤估测[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 183-186. SUN Hui-jie, WU Jie, FENG Zhe. Measurement of

- Contact Pressure Distribution and Bruise Estimation for Drop Impact of Korla Pear[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(6): 183-186.
- [7] 吴杰, 郭康权, 葛云, 等. 香梨果实跌落碰撞时的接触应力分布特性[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 250-254.
- WU Jie, GUO Kang-quan, GE Yun, et al. Contact Pressure Distribution Characteristics of Korla Pear Fruit at Moment of Drop Impact[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(1): 250-254.
- [8] STROPEK Z, GOLACKI K. Impact Characteristics of Pears[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 100-106.
- [9] FEI L, ISHIKAWA Y, KITAZAWA H, et al. Impact Damage to Apple Fruits in Commercial Corrugated Fiberboard Box Packaging Evaluated by the Pressure-Sensitive Film Technique[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2010, 8(2): 218-222.
- [10] VAN ZEEBROECK M, VAN LINDEN V, DARIUS P, et al. The Effect of Fruit Factors on the Bruise Susceptibility of Apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(1): 10-19.
- [11] STOPA R, SZYJEWICZ D, KOMARNICKI P, et al. Determining the Resistance to Mechanical Damage of Apples under Impact Loads[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 146: 79-89.
- [12] ZHAO Miao, PENG Yue-lian, LI Long. A Robot System for the Autodetection and Classification of Apple Internal Quality Attributes[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180(3): 111615.
- [13] CELIK H K, USTUN H, ERKAN M, et al. Effects of Bruising of 'Pink Lady' apple under Impact Loading in Drop Test on Firmness, Colour and Gas Exchange of Fruit during Long Term Storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 179: 111561.
- [14] MIR H, SHAHBAZI F. Simulated Transit Vibration Effects on the Postharvest Quality of Persimmon During Storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 189: 111918.
- [15] KOMARNICKI P, STOPA R, DANIEL S. Influence of Contact Surface Type on the Mechanical Damages of Apples Under Impact Loads[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(8): 1479-1494.
- [16] HUSSEIN Z, AFAWOLE O, OPARA U L. Harvest and Postharvest Factors Affecting Bruise Damage of Fresh Fruits[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2020, 6(1): 1-13.
- [17] LIU Yang, ZHANG Qiang, NIU Hao, et al. Prediction Method for Nutritional Quality of Korla Pear during Storage[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021(3): 247-254.
- [18] KOMARNICKI P, STOPA R, SZYJEWICZ D, et al. Evaluation of Bruise Resistance of Pears to Impact Load[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 114: 36-44.
- [19] ZEEBROECK M V, LINDEN V V, RAMON H, et al. Impact Damage of Apples During Transport and Handling[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2007, 45(2): 157-167.
- [20] 章永年, 张任飞, 孙晔, 等. 局部按压对不同成熟度番茄机械损伤的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11): 292-298.
- ZHANG Yong-nian, ZHANG Ren-fei, SUN Ye, et al. Effects of Local Compression on the Mechanical Damage of Tomato with Different Maturity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11): 292-298.
- [21] FEI Lu, ISHIKAWA Y, KITAZAWA H, et al. Measurement of Impact Pressure and Bruising of Apple Fruit Using Pressure-Sensitive Film Technique[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(4): 614-620.
- [22] FADIJI T, COETZEE C J, PATHARE P, et al. Susceptibility to Impact Damage of Apples Inside Ventilated Corrugated Paperboard Packages: Effects of Package Design[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 286-296.
- [23] MING Xia, ZHAO Xiao-xiao, WEI Xiao-peng, et al. Impact of Packaging Materials on Bruise Damage in Kiwifruit during Free Drop Test[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2020, 42(7): 119.
- [24] 吴杰. 库尔勒香梨的动态粘弹特性及碰压损伤机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011.
- WU Jie. Study on Dynamic Viscoelastic Characteristics and Impact-Compression Damage Mechanism of Korla Fragrant Pear[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2011.
- [25] BARITELLE A L, HYDE G M. Commodity conditioning to reduce impact bruising[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2001, 21(3): 331-339.
- [26] SIYAMI S, BROWN G, BURGESS G, et al. Apple Impact Bruise Prediction Models[J]. *Transactions of the ASAE American Society of Agricultural Engineers*, 1988, 31(4): 1038-1046.
- [27] FU Han, DU Wen-di, YANG Jing-kai, et al. Bruise Measurement of Fresh Market Apples Caused by Repeated Impacts Using a Pendulum Method[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 195: 112143.
- [28] 杨生保, 唐亚萍, 杨涛, 等. 加工型番茄果实硬度特异材料的果实特性及果肉组织特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 285-290.
- YANG Sheng-bao, TANG Ya-ping, YANG Tao, et al. Fruit Characteristic and Flesh Tissue Feature of Special Firmness Type Processing Tomato Cultivar[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 285-290.