

玫瑰香橙压缩特性及损伤机理

Compression characteristics and damage mechanism of rose orange

卢思宇 罗 强 赖于树 肖启明

LU Siyu LUO Qiang LAI Yushu XIA Qiming

(重庆三峡学院机械工程学院, 重庆 404100)

(School of Mechanical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)

摘要:目的:减少玫瑰香橙在包装、运输过程中的损伤。

方法:根据玫瑰香橙的基础几何数据及 TPA 试验、穿刺试验得出的最大压缩力、穿刺力,构建有限元模型对玫瑰香橙进行压缩仿真模拟。**结果:**玫瑰香橙直径范围为 58.2~78.6 mm,平均质量为 169.746 g,赤道部果皮平均厚度为 3.1 mm,最大穿刺力为 6.26 N,平均破裂力为 126.802 N。**结论:**玫瑰香橙赤道部位的抗压能力相对较弱,应避免受到挤压、冲击;玫瑰香橙在采摘、运输过程中能承受的不力不宜超过 100 N。

关键词:玫瑰香橙;压缩特性;有限元分析;损伤机理

Abstract: Objective: Reduced the damage of rose orange in the process of packaging and transportation, and provided a theoretical basis for postharvest storage and spectral quality testing. **Methods:** According to the basic geometric data of rose orange and the maximum compression force and puncture force obtained from TPA test and puncture test, the finite element model was constructed to simulate the compression of rose orange. **Results:** The diameter of rose orange ranged from 58.2 mm to 78.6 mm, the average weight was 169.746 g, the average thickness of peel at the equator was 3.1 mm, the maximum puncture force was 6.26 N, and the average rupture force was 126.802 N. **Conclusion:** The pressure resistance of rose orange equator is relatively weak to avoid extrusion and impact, and the force that rose orange can bear in the process of picking and transportation should not exceed 100 N.

Keywords: rose orange; compression characteristics; finite element analysis; damage mechanism

基金项目:重庆市科委自然科学基金面上项目(编号: cstc2020jcyj-msxmX0143);重庆市教委科学技术研究项目(编号: KJZD-K202101203);重庆市万州区科研局项目(编号: wzsc-20230218);国家级大学生创新创业项目(编号: 202310643003)

作者简介:卢思宇,女,重庆三峡学院在读硕士研究生。

通信作者:罗强(1988—),男,重庆三峡学院副教授,硕士。

E-mail: qluo@sanxiao.edu.cn

收稿日期:2023-06-20 **改回日期:**2023-10-25

玫瑰香橙果肉呈血红色,以汁多、香甜、淡玫瑰香味而闻名^[1]。其果实内的花色苷对人体有益,深受消费者喜欢,有极大的需求量^[2]。玫瑰香橙在运输和销售过程中,果实易发生机械损伤,主要包括碰撞、挤压、摩擦及振动等。在运输和销售过程中,机械碰撞是造成果实机械损伤最主要的因素,但果实遭受机械碰撞损伤的程度与果实的品种、大小、形状、结构等因素有关。果实受到挤压时会造成机械损伤,同时其内部组织会被挤压变形或破裂,并在破裂点附近开始腐坏。

目前,关于果实的力学特性方面,已有较多的理论和实践基础。通过对白萝卜、土豆、苹果进行压缩试验得到试样的破坏力、弹性模量值等数据并对其进行数据分析^[3]。苹果具有两向异性,在运输过程中易受到压缩、振动、蠕变损伤,需研究包装、采摘工具材料选取有助于减缓损伤^[4-8]。潘嘹等^[9]基于分数导数的果柱蠕变模型,以苹果、梨作为研究对象,用较少的参数准确地描述了果品的蠕变现象。詹园凤等^[10-13]对西瓜、河套蜜瓜等瓜类水果的挤压、跌落、冲击力学特性及造成机械损伤的因素进行了研究,建立了机械特性与损伤面积的回归方程,并对受压产生的损伤进行预测,找出了贮运过程中瓜类作物的最佳摆放位置。姜松等^[14-15]研究了柑橘的挤压、穿刺、跌落等力学特性,发现成熟度会影响柑橘的抗压力和穿刺力。成熟的柑橘果皮柔软易裂,且底部抗破坏能力最差,在采摘过程中应避免机械爪与其底部接触^[16]。柑橘在受到超过某临界阈值的力时,会产生严重的机械损伤并发生破裂^[17]。如果受到机械损伤,柑橘腐烂率会剧增。宽皮柑橘剥皮宜采用环割划皮且垂直跌落高度应控制在 90 cm 内,在无防护措施的情况下挤压力不宜超过 10 N^[18-19]。从沃柑的跌落仿真试验^[20]中发现,被冲击材料的弹性模量越大,沃柑的最大等效应力就越大。Pallottino 等^[21]用万能试验机对塔罗科品种的柑橘果实进行机械压缩评价,探索了一种选择和检测血橙品种的有用工具。邵显^[22]通过正交试验探索宽皮柑橘的力学特

性,并借助有限元软件对不同挤压程度的宽皮柑橘进行模拟仿真。目前现有文献中关于宽皮柑橘、温州蜜桔、南丰蜜橘等品种相关力学特性的研究较多,但关于玫瑰香橙压缩特性的研究及损伤机理研究较少。研究拟对玫瑰香橙在包装、运输过程中的损伤机理进行探索,旨在寻找有效的减损方案,以降低玫瑰香橙在流通过程中的损失。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

试验所用的玫瑰香橙样品产自于重庆市万州区甘宁镇人家坡一处生态果园。试验果均采自同一棵果树,单果质量 130.10~236.31 g,平均单果质量 169.746 g。玫瑰香橙的基本尺寸按 X、Y、Z 方向划分,X 方向直径 a 的范围为 62.1~78.6 mm,Y 方向直径 b 的范围为 58.2~75.8 mm,Z 方向直径 c 的范围为 55.2~77.9 mm 的,赤道部果皮平均厚度为 3.1 mm,果蒂及顶部周围果皮厚度为 3.5 mm,球形度为 0.94,密度为 0.95 g/cm³。玫瑰香橙的三维尺寸见图 1,玫瑰香橙几何尺寸见表 1。

质构仪:ENS-PRO 型,北京盈盛恒泰公司。

1.2 试验方法

1.2.1 压缩试验 压缩测试中使用的探头是适用于 TPA 检测的圆盘探头,其直径为 75 mm,测试程序选用 TPA-500N。TPA 试验参数:测前速度 60 mm/min,测试速度 60 mm/min,初始力 0.07 N,整果的变形百分比分别为 20%,30%。分别随机选取 13 个外形相似的果实做重复测试,将整果的破裂力、破裂位移、内聚力、弹性、弹性系数作为测定的指标,并记录果实在压缩过程中的破损情况。根据式(1)计算出样本的破损率。

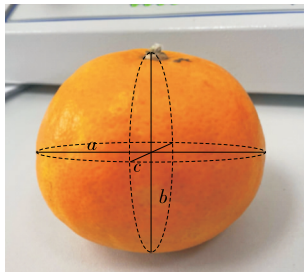


图 1 玫瑰香橙几何尺寸和几何形状

Figure 1 Geometric size and shape of rose orange

表 1 玫瑰香橙几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of rose orange

名称	单位	最小值	最大值	平均值±标准差
重量	g	130.1	236.6	169.746±24.167
X 方向直径长度	mm	62.1	78.6	69.176±3.586
Y 方向直径长度	mm	58.2	75.8	65.616±3.596
Z 方向直径长度	mm	55.2	77.9	68.270±4.972

$$C = (C_1 / C_0) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C ——破损率,%;

C_0 ——试验果实样本总数;

C_1 ——试验中破裂的果实数量。

1.2.2 穿刺试验 参照姜松等^[15]的方法。各取 5 个样本进行横、纵两类穿刺试验^[17],分别在横向最大截面积处均匀穿刺 6 个点,如图 2(a)所示;穿刺部位如图 2(b)所示。

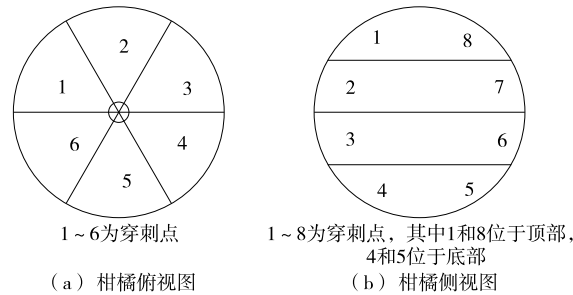


图 2 穿刺部位示意图

Figure 2 Puncture site diagram

2 结果与分析

2.1 压缩试验

如图 3 所示,样本 A 为形变 20% 的试验数据,样本 B 为形变 30% 的试验数据。从曲线中可以看出,在形变 20% 的压缩试验中,力随位移增加而增大,曲线呈上升趋势,在 101.34 N 处出现峰值,该峰值点为形变 20% 状态下玫瑰香橙所受的最大力,随后停止压缩,力快速下降至 0 点。在形变 30% 的压缩试验中,曲线可分为两个阶段,第一阶段同形变 20% 的力—位移曲线一致,呈上升趋势,直至 119.85 N 处出现第一个峰值,该峰值即玫瑰香橙在形变 30% 时承受的最大压力,此压力超过了果实的承受能力,导致果实开始破裂。第二阶段为出现第一个峰值后,力出现下降波动,表明玫瑰香橙暂时失去抵抗变形能力,继续增加压力达到目标形变百分比,随后力快速下降

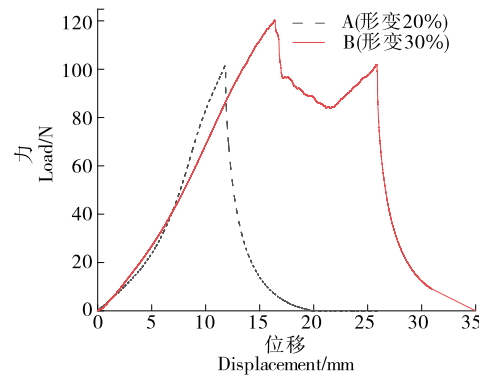


图 3 玫瑰香橙压缩力—位移曲线

Figure 3 Compressive force-displacement curve of rose orange

至 0 点。玫瑰香橙在受到压缩抗力时会发生一处或多处破裂,破裂点集中在玫瑰香橙赤道部。

对试验中玫瑰香橙的压缩抗力进行统计分析,形变 20%时,平均破裂力为 104.744 N,有 38%的试样出现细小破裂;形变 30%时,平均破裂力为 148.86 N,超过其承受范围,所有试样均出现明显破裂,具体数据见表 2。随

着香橙受到的压力增加,内聚力减小,弹性增大。说明香橙的内部分子之间的吸引力在逐渐减小,果实内部组织联系越来越松散,香橙的内部受到了损伤。试验结果表明,玫瑰香橙受到超过 104 N 的力后易出现破裂,在运输过程中,香橙受到的力越大,内部的组织破裂就越多,越容易出现腐坏。

表 2 平均破裂力统计表

Table 2 Statistical table of mean rupture force

形变量/%	平均破裂力/N	破裂时位移/mm	内聚性	弹性/mm	弹性系数	破损率/%
20	104.744	12.758	0.5	9.043	0.706	38
30	148.860	19.930	0.4	12.449	0.618	100

2.2 穿刺试验

玫瑰香橙的穿刺试验力—位移曲线如图 4 所示,将探头接触玫瑰香橙果实表面,此时探头对果实的起始压力为 0.07 N,逐渐增加压力直至刺破果实表皮,刺破时达到最大峰值 5.45 N,且曲线开始呈下降趋势,此时以试验产生的最大峰值为果实的穿刺力。

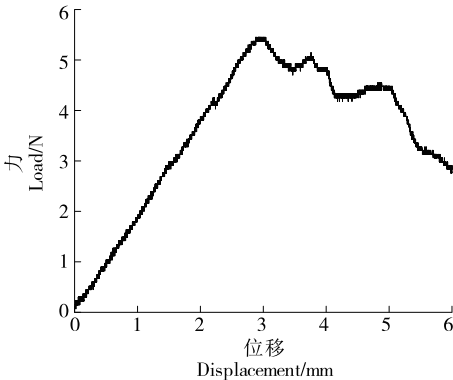


图 4 玫瑰香橙穿刺力—位移曲线

Figure 4 Puncture force-displacement curve of rose orange

玫瑰香橙在最大横截面上穿刺力相差不大,最大穿刺力为 6.19 N,最小穿刺力为 3.66 N,平均穿刺力为 4.80 N。表 3 中显示,玫瑰香橙在横向最大截面上穿刺力极差最小为 1.34 N,最大为 1.72 N。穿刺力之间的差异性较小,说明玫瑰香橙在横向最大截面处力学差异性不显著,运输中可正面向上放置果实。

图 5 是果实纵向上 8 个点的平均穿刺力分布图。玫瑰香橙纵向的穿刺力范围为 5.000~6.343 N,其中底部 4、5 号的穿刺力分别为 6.179,6.343 N,明显高于其他部位,说明玫瑰香橙底部果皮组织较厚,抗破坏能力强。果实中部硬度小、果皮薄,不宜受到过大的撞击或磕碰。因此,在采摘玫瑰香橙的过程中尽量避免剪下过长的果梗,以免刺入相邻的果实中;果实顶部及中部较底部更为脆弱,在放置时尽量底部朝下放置,减少损伤。

表 3 玫瑰香橙个体偏差分析

Table 3 Individual deviation analysis of rose orange

样品	平均值/ N	极差/ N	标准偏 差/N	相对标准 偏差/%
1	5.19	1.72	0.60	11.65
2	4.22	1.34	0.54	12.90
3	4.55	1.72	0.61	13.40
4	4.79	1.42	0.47	9.83
5	5.25	1.42	0.54	10.36

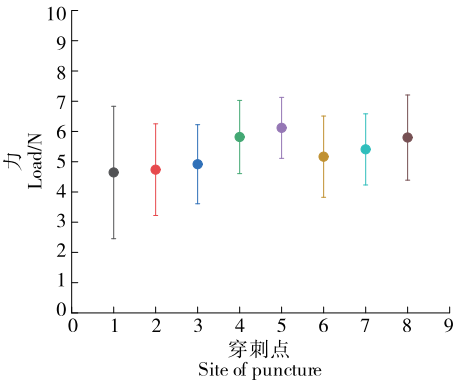


图 5 玫瑰香橙纵向穿刺力分布

Figure 5 Longitudinal puncture force distribution of rose orange

3 玫瑰香橙破损的有限元受力分析

3.1 有限元模型建立

挤压装置材料选为硬铝合金,硬铝合金具有高强度、刚度和耐磨性,可以承受较大的载荷和冲击力,同时具有较好的耐腐蚀性能和稳定性。运动过程中,将力加载在上板 Z 轴方向,下板为固定平台。假设玫瑰香橙为各向同性的椭球体。网格划分采用 3 mm,且进行网格加密设置。果皮的属性设置为已获得的水平压缩时的弹性模量为 10.315 MPa,泊松比为 0.416 6。玫瑰香橙果肉的属性设置为试验所得的弹性模量为 0.625 MPa。果肉的泊松比通过计算为 0.42。根据实际加载情况,玫瑰香橙沿 X、

Y 轴方向放置在两平板之间,其中有一端作为载物台,设为 6 个方向均无位移的固定支撑。另一端为压盘,保持仅 X 或 Y 轴方向的位移,其余方向设定无位移^[23]。玫瑰香橙受压示意图及网格划分如图 6 所示。

3.2 有限元结果分析

参考该批次玫瑰香橙的压缩试验,压缩形变 20% 及 30% 所用到的力为 73.36~198.66 N,在 X、Y 轴两种加载方向上依次施加 75,100,120,140 N 的载荷。X 轴加载方向上的有限元分析结果见图 7,Y 轴方向上的有限元分析结果见图 8。当载荷为 75 N 时,沿 X、Y 轴方向加载的最大位移分别为 10.949,11.094 mm,最大等效应力分别为 1.147 5,0.981 1 MPa,应变 0.241 24,0.227 77 mm/mm。当载荷为 100 N 时,沿 X、Y 轴方向加载的最大位移分别为

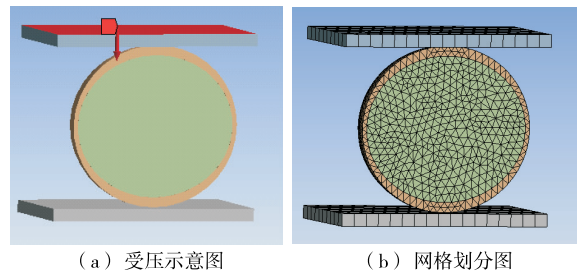


图 6 受压示意图及网格划分图

Figure 6 Compression diagram and grid division diagram

13.101,13.105 mm,最大等效应力分别为 1.223 4,1.093 7 MPa,应变 0.241 24,0.269 43 mm/mm。当载荷为 120 N 时,沿 X、Y 轴方向加载的最大位移分别为

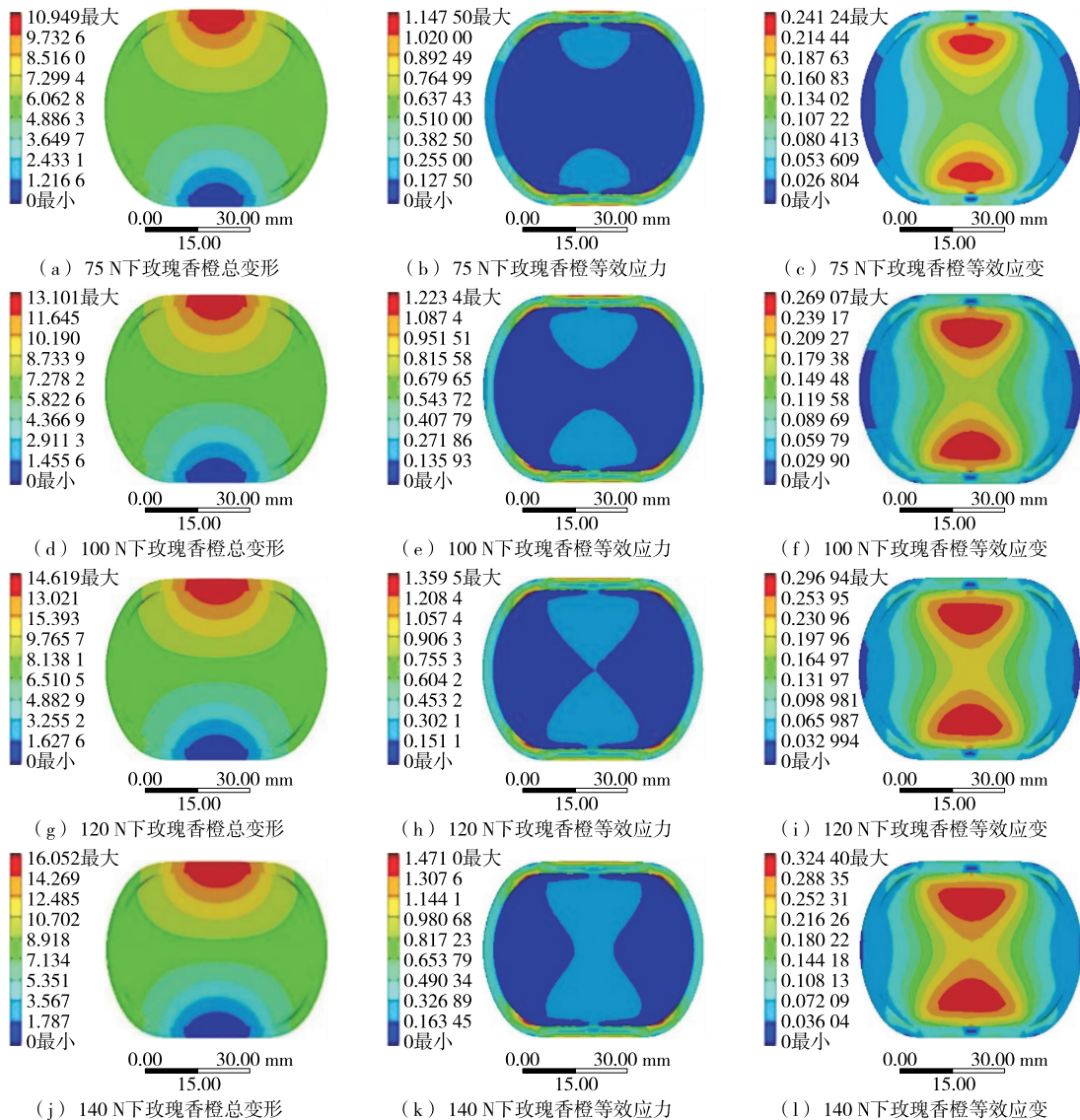


图 7 X 轴方向有限元分析图

Figure 7 The finite element analysis diagram of X

14.649, 14.524 mm, 最大等效应力分别为 1.359 5, 1.213 9 MPa, 应变 0.296 94, 0.299 60 mm/mm。当载荷为 140 N 时, 沿 X、Y 轴方向加载的最大位移分别为 16.052, 15.808 mm, 最大等效应力分别为 1.471 0, 1.289 3 MPa, 应变 0.324 4, 0.328 2 mm/mm。分析可知, 玫瑰香橙在受不同方向压缩载荷作用时, 变形和应力应变趋势相近。当载荷相同时, 最大变形和最大等效应力均发生在香橙与压盘的接触面区域, 随着载荷逐渐增大, 压盘与果实间的接触面积也逐渐增大, 玫瑰香橙表皮和果肉间逐渐出现破裂崩溃现象。当载荷为 75~100 N 时, 玫瑰香橙在此载荷下有一定变形, 内部可能产生了难以察觉的机械损伤。在 120, 140 N 挤压的状态下, 玫瑰香橙整体都受到非常明显的外观变形, 对照玫瑰香橙的实际情况, 此时玫瑰香橙果皮及果肉均已产生破裂。

将有限元计算与试验得到的玫瑰香橙力一位移曲线进行比较, 结果见图 9。对比结果可知, X 轴方向的有限元计算的最大平均误差为 11.18%; Y 轴方向的有限元计算的最大平均误差为 9.5%。由此可见, 结合有限元方法研究玫瑰香橙的力学特性是可行的。

4 结论

(1) 在玫瑰香橙受到形变 20% 的压力时, 有 38% 的概率会破裂, 形变 30% 时全部破裂。玫瑰香橙在最大横截面上穿刺力相差不大, 平均穿刺力为 4.8 N, 无明显差异性。纵向穿刺力范围在 5.00~6.34 N, 玫瑰香橙底部组织较厚, 底部的穿刺力为 6.26 N, 相较于赤道部抗破坏能力强。

(2) 玫瑰香橙果梗部垂直向上放置时所能承受的重

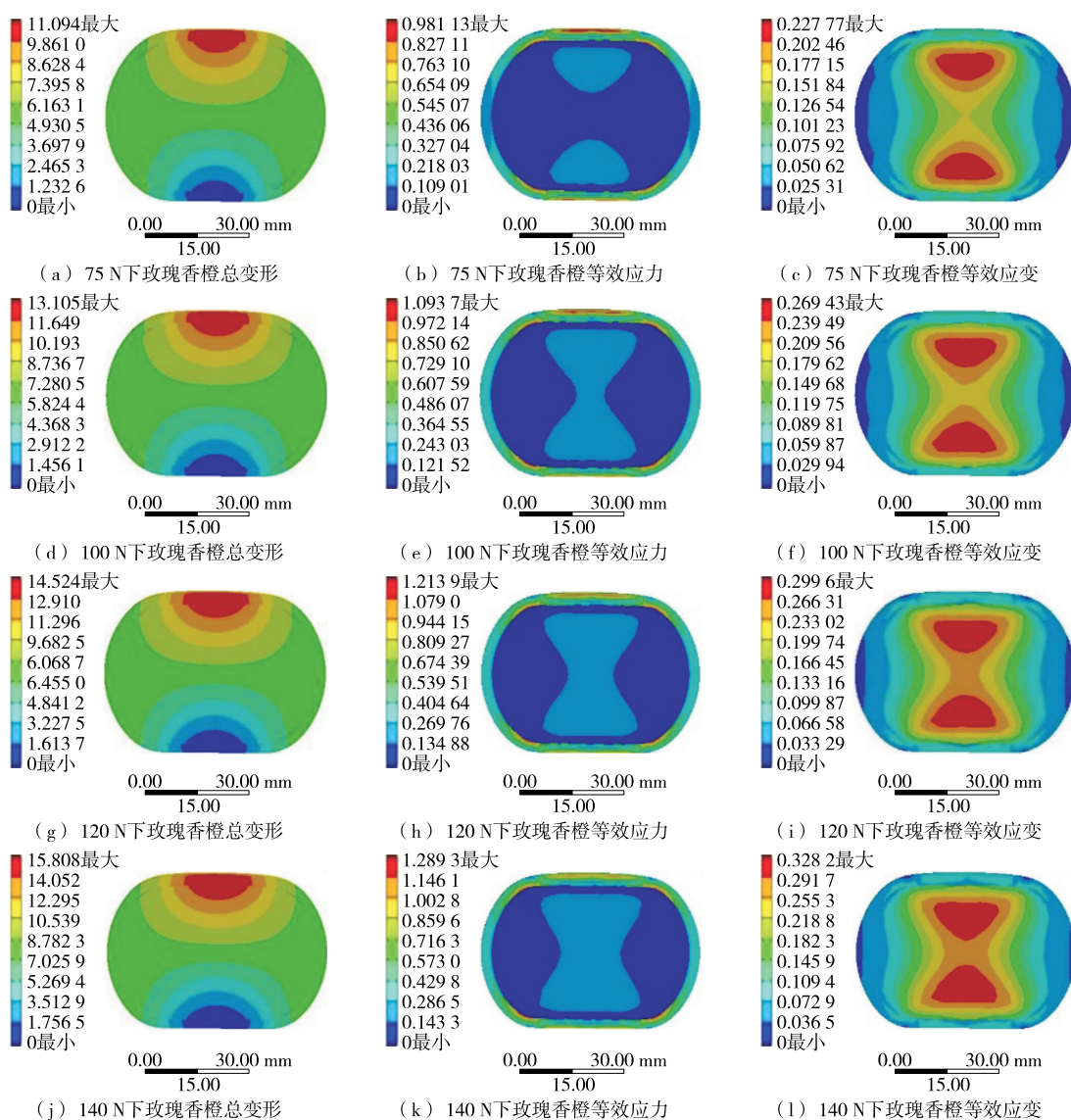


图 8 Y 轴方向有限元分析图

Figure 8 The finite element analysis diagram of Y

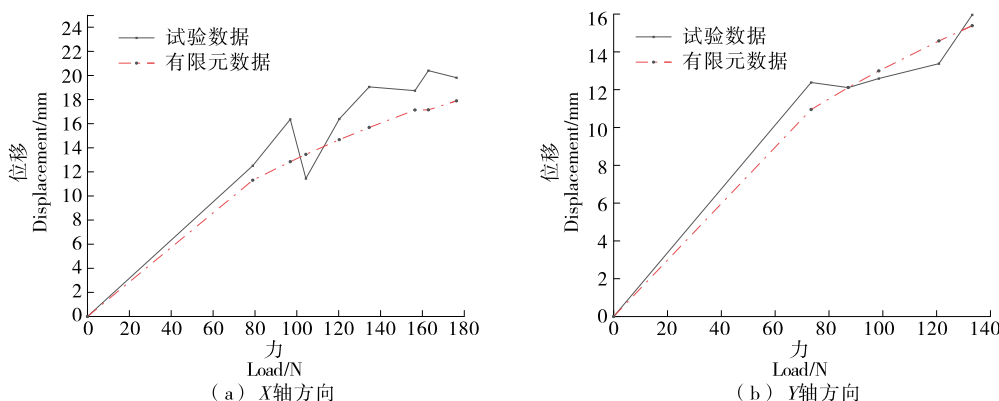


图9 力—位移误差分析图

Figure 9 Force-displacement error analysis diagram

量和变形,均高于果梗部水平面放置时。在施加 75~100 N 的载荷时,玫瑰香橙外观会明显变形且内部产生了难以察觉的机械损伤。因此,为保证运送到消费者手中的玫瑰香橙的品相、口感俱佳,在打包装箱时尽可能使果梗向上放置并在贮运过程中不宜受到超过 75 N 的力;为防止玫瑰香橙在运送途中破裂,应避免玫瑰香橙受到超过 100 N 的力。

参考文献

- [1] 洪林, 农江飞, 彭芳芳, 等. 塔罗科血橙果实空间方位对其品质的影响[C]// 中国园艺学会 2019 年学术年会暨成立 90 周年纪念大会. 郑州: [出版者不详], 2019: 79.
- [2] 钱丰清, 樊敏. 血橙呈现“红色”的探讨[J]. 化学教育(中英文), 2022, 43(17): 1-6.
- [3] 冯慧敏, 郭玉明, 武新慧. 果蔬压缩破坏特性的试验研究[J]. 包装与食品机械, 2015(3): 1-4.
- [4] 李小昱, 王为. 苹果运输振动损伤初探[J]. 西北农业大学学报, 1998(4): 20-24.
- [5] 段壳. 基于生物屈服点的苹果无损采摘研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 55.
- [6] FU H, KARKEE M, LONG H, et al. Bruise patterns of fresh market apples caused by fruit-to-fruit impact [J]. Agronomy, 2020, 10 (1): 59.
- [7] 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.
- [8] 王佳, 李绍波, 陈春皓, 等. 果箱包装结构对苹果损伤特性的影响[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(1): 48-54.
- [9] 潘嘹, 卢立新, 王军. 基于分数阶导数的果品果柱蠕变特性表征[J]. 包装与食品机械, 2013, 31(1): 1-4.
- [10] 詹园凤, 贺滢, 谢彩虹, 等. 耐裂性不同的西瓜发育过程中果实力学特性及果皮结构动态研究[J]. 广东农业科学, 2020, 47 (10): 18-24.
- [11] 王芳, 王春光, 杨晓清. 西瓜的力学特性及其有限元分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 118-121.
- [12] 杨晓清, 王春光. 河套蜜瓜机械特性与静载损伤关系的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 31-37.
- [13] HU G R, BU L X, ZHANG E Y, et al. Experimental research of anisotropic mechanical properties and drop test of apples[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 154-160.
- [14] WANG J, LI S B, CHEN C H, et al. Effects of packing structure of fruit box on damage characteristics of apples [J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(1): 48-54.
- [15] PAN L, LU L X, WANG J. The creep properties of fruit samples based on fractional order derivative [J]. Packaging and Food Machinery, 2013, 31(1): 1-4.
- [16] ZHAN Y F, HE H, XIE C H, et al. Study on fruit mechanical properties and peel structure during development of watermelon with different crack tolerance [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 47(10): 18-24.
- [17] WANG F, WANG C G, YANG X Q. Mechanical properties and Finite element analysis of watermelon [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (11): 118-121.

- YANG X Q, WANG C G. Relationship between mechanical properties and damage of hetao muskmelons under static compression [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 31-37.
 - [13] 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.
WANG F, HAN Y Y, WEI X, et al. Drop impact characteristics of hetao melon [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45 (8): 199-201.
 - [14] 姜松, 鲍黄贵, 蔡健荣, 等. 柑橘力学差异性研究[J]. 江苏农业科学, 2009(5): 244-246.
JIANG S, BAO H G, CAI J R, et al. Study on mechanical differences of citrus[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2009 (5): 244-246.
 - [15] 姜松, 鲍黄贵, 蔡健荣, 等. 不同成熟度柑橘力学特性研究[J]. 食品工业科技, 2009(12): 117-119.
JIANG S, BAO H G, CAI J R, et al. Study on mechanical parameters of orange at different maturity stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009(12): 117-119.
 - [16] 鲍黄贵. 基于机器人采摘的柑橘力学特性分析及柑橘贮藏期品质变化研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009: 53.
BAO H G. Analysis of mechanical properties of citrus based on robot picking and study on quality change of citrus during storage [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009: 53.
 - [17] 尹伊君. 宽皮柑橘压缩损伤特性与机械损伤评估研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 68.
YIN Y J. Research on compression damage characteristics and Mechanical damage evaluation of wide-peel citrus [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 68.
 - [18] 陈红, 尹伊君, 潘海兵, 等. 宽皮柑橘机械损伤致损因素分析及缓冲减损防护措施[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 258-266.
CHEN H, YIN Y J, PAN H B, et al. Loss factor analysis of mechanical damage and cushioning protection measure for citrus reticulate blanco [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 258-266.
 - [19] 陈红, 徐翔宙, 尹伊君, 等. 宽皮柑橘移动夹持剥皮力学特性与果皮分离特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 25-31.
CHEN H, XU X Z, YIN Y J, et al. Experimental study on mechanical properties and peel separation characteristics of citrus reticulate blanco with peel clamped moving[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 25-31.
 - [20] 王剑英, 王海宝, 罗强, 等. 沃柑果实跌落的仿真分析[J]. 南方农业, 2022, 16(21): 241-245.
WANG J Y, WANG H B, LUO Q, et al. Simulation analysis of Orah mandarin fruit drop [J]. South China Agriculture, 2022, 16 (21): 241-245.
 - [21] PALLOTTINO F, COSTA C, MENESATTI P, et al. Assessment of the mechanical properties of Tarocco orange fruit under parallel plate compression[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 308-316.
 - [22] 邵显. 宽皮柑橘挤压损伤与品质劣变机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 32-33.
SHAO X. Study on mechanism of extrusion damage and quality deterioration of wide-peel citrus [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 32-33.
 - [23] 张新, 王博, 张黎骅. 葵花籽仁力学特性的有限元分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 31-35.
ZHANG X, WANG B, ZHANG L H. Finite element analysis on mechanical properties of sunflower seed [J]. Food & Machinery, 2017, 33(2): 31-35.
-
- (上接第 127 页)
- [18] 张治权. 果蔬导热系数影响因素及其内部温度场数值模拟研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019: 36-58.
ZHANG Z Q. Numerical simulation study on the influencing factors of thermal conductivity of fruits and vegetables and their internal temperature field [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019: 36-58.
- [19] 丁玉先. 采后果蔬热处理传热分析与试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020: 17-24.
DING Y X. Analysis and experimental study on heat transfer in post-harvest vegetable heat treatment [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020: 17-24.
- [20] CARLESCU P M, ARSENOAIA V, ROSCA R, et al. CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 85: 479-486.
- [21] LAGUERRE O, DENIS A, BOULEDJERAF N, et al. Heat transfer and aroma modeling of fresh fruit and vegetable in cold chain: Case study on tomatoes[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 133: 133-144.
- [22] DUGA A T, DELELE M A, RUYSEN K, et al. Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 62-75.
- [23] ZHANG J L, MENG Y M, WANG H, et al. Optimization design of cane sugar evaporative crystallizer based on orthogonal test and computational fluid dynamics [J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(4): 1-10.
- [24] 程玉娇, 李云云, 张敏. 热处理对‘塔罗科’血橙物流变温环境下的保鲜效果[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 254-260.
CHENG Y J, LI Y Y, ZHANG M. Fresh-keeping effect of heat treatment on 'Taroco' blood orange logistics temperature change environment[J]. Food Science, 2016, 37(6): 254-260.