

苹果临界跌落高度和损伤脆值的试验研究

孔真

(乌鲁木齐职业大学, 乌鲁木齐 830002)

摘要: **目的** 研究苹果的损伤率与临界损伤脆值的关系。**方法** 利用自制摆锤冲击试验机设计多个高度的苹果跌落试验, 分析苹果跌落冲击过程的损伤特性, 得到临界跌落高度; 在临界跌落高度以上的高度进行跌落试验, 得到苹果在跌落过程中的加速度-时间曲线。**结果** 结合试样在不同高度跌落所得的峰值加速度幅值, 得到了试样的损伤脆值; 根据不同跌落高度下的苹果的损伤体积, 得到了苹果在不同损伤率下的损伤脆值。**结论** 研究得到的损伤脆值与损伤率的关系对苹果缓冲包装的改进具有参考意义。

关键词: 苹果; 临界跌落高度; 损伤率; 损伤脆值

中图分类号: TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0084-04

Experimental Study on Critical Dropping Height and Bruise Fragility of Apple

KONG Zhen

(Urumqi Vocational University, Urumqi 830002, China)

ABSTRACT: The work aims to study the relationship between damage rate and critical bruise fragility of apple. The apple dropping test at multiple heights was designed by the self-made pendulum impact testing machine, the damage characteristics of apple in the drop impact process were analyzed, and the critical dropping height was obtained. The acceleration-curves of apple in the dropping process were obtained from drop test conducted at the place above the critical dropping height. In combination with the peak acceleration amplitude obtained from the test samples dropped at different heights, the bruise fragility of test samples was obtained. According to the apple's damage volume at different dropping heights, the bruise fragility of apple under various damage rates was obtained. The relationship between bruise fragility and damage rate obtained from the study provides reference for the improvement of apple's cushion packaging.

KEY WORDS: apple; critical dropping height; damage rate; bruise fragility

水果自采摘后一直都在经受着外界冲击振动的威胁, 在运输过程中尤为明显。外界的冲击振动会给水果造成可视化的损伤, 一方面, 损伤给果品外表面造成褐斑, 会影响果品销售; 另一方面, 损伤处容易滋生细菌, 加速果品的霉变。据研究表明, 桃子可视化的损伤会加速整个桃子乃至周围桃子的腐烂。如何降低外界冲击振动对果品的损伤, 从而延长果品保质期, 这是包装工作者一直追求的目标。

不少学者对果品冲击损伤进行了很多的研究, Lichtensteiger 以番茄为研究对象, 研究分析了番茄跌落过程的加速度、速度以及能量的变化^[1]; Baritelle 发现应变率对梨果柱破坏应力、破坏应变、弹性模量

影响显著, 而果柱尺寸越大, 破坏应力越大, 相应的破坏应变越小^[2]。康维民等^[3]在模拟 3 自由度振动条件下, 对水果运输振动加速度传递率及损伤展开了深入的研究, 得到模拟振动试验中的频率、振幅、时间等方法; 孙骊等^[4]以苹果为研究对象, 研究振动损伤面积与振动试验参数的规律, 并对模型进行了评价; 陈萃仁^[5]以草莓为对象, 研究冲击振动对果肉的损伤程度影响, 得到了草莓果实振动损伤的预测模型; Zhou 等^[6]以黄花梨为对象, 研究了包装衬垫材料类型对黄花梨损伤程度的影响; 卢立新、黄祥飞、华岩等^[7-8]以水晶梨为研究对象, 基于模拟运输条件, 对梨果实包装振动损伤展开了研究; 李小昱等^[9]以相互

收稿日期: 2016-12-26

基金项目: 2016 年度新疆维吾尔自治区高校科研计划 (XJEDU2016I117)

作者简介: 孔真 (1982—), 女, 硕士, 乌鲁木齐职业大学讲师, 主要研究方向为印刷包装技术。

碰撞的苹果为对象, 研究苹果之间的碰撞对其损伤程度的影响, 并得到了相应的预测模型; 王俊^[10]以梨桃为对象, 研究梨桃的各向流变特性及动态特性; Zhang 等^[11]以桃为对象, 基于桃的冲击试验, 得到了桃受到冲击时的加速度-时间模型; 李小昱等^[12]通过苹果的碰撞试验, 建立了苹果之间相互碰撞过程的力学模型; 卢立新^[13]对苹果跌落进行了研究, 构建了跌落冲击下苹果的动态流变模型, 首次提出了果实跌落损伤脆值。苹果在临界跌落高度以上会立即给其造成可视损伤。从苹果的摘取到销售的一系列过程中很难避免机械损伤的发生, 机械损伤引起果品的生理失常, 从而造成经济损失。这里研究苹果的临界跌落高度和临界损伤脆值对果品缓冲包装设计具有重大意义。

1 试验

1.1 原理

苹果跌落时, 冲击会导致其产生损伤, 损伤体积与原体积的比值为损伤率, 在该损伤率下苹果所能承受的最大加速度幅值与重力加速度的比值即为损伤脆值 A_b ^[13], 其表示为:

$$A_b(\mu_b) = \frac{a_{\max}(\mu_b)}{g} \quad (1)$$

式中: μ_b 为产品的损伤率; $A_b(\mu_b)$ 为产品在不同损伤率下的损伤脆值; $a_{\max}(\mu_b)$ 为在损伤率为 μ_b 时产品允许的峰值加速度幅值。

苹果的临界高度确定后, 选取其临界高度以上的高度, 根据式(1)求得在临界高度以上跌落的损伤脆值。由于苹果是特殊物品, 物理模型是一个粘弹性体, 所以不能按照其他物品测定脆值的方法来进行^[13]。该试验采用摆锤冲击, 能较好采集到苹果与刚性平面撞击时的峰值力, 但无法控制果品的跌落损伤率。

苹果损伤的测定与传统脆值的测定方法类似, 都是逐渐增大被测物品的跌落冲击高度, 以此获得产品未发生损伤的临界最大加速度响应幅值, 最大加速度幅值与重力加速度的比值即为脆值。苹果损伤脆值的不同之处在于, 不管多高的冲击苹果都会发生一定损伤, 因此苹果的损伤脆值基于一定的损伤率。

1.2 材料和仪器

主要材料: 购于超市的新鲜的陕西糖心富士苹果, 尺寸大小、形状、成熟情况基本一致, 且表面无伤疤和可视损伤, 等效直径为 70~80 mm, 质量为 164.4~196.8 g, 硬度为 0.68~0.80 MPa。

主要仪器: 高精度天平, 用于称量苹果的质量; 自制摆锤冲击试验仪, 见图 1, 用于实现苹果在不同高度下的冲击试验, 果品的跌落试验一般采用无初速

度的自由落体^[14-15], 摆锤试验原理是利用摆锤冲击前位能与冲击后所剩位能之差, 得到试样的吸收功, 通过角度-高度关系换算, 等同于当果品从一定高度跌落冲击所产生的能量; DASP 数据采集系统, 用于记录苹果在冲击过程的加速度变化; 硬度计, 用于测量苹果的硬度; 游标卡尺, 用于测量苹果的直径。

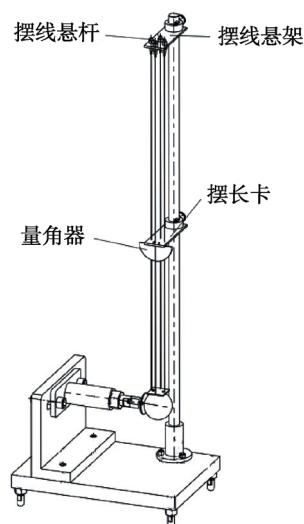


图 1 摆锤冲击试验仪
Fig.1 Pendulum impact tester

1.3 方法

试验前首先对每个苹果进行称量, 并测量苹果各个部位的直径, 其平均值为等效直径。然后用硬度计测量苹果的硬度, 多次测量求平均值。最后对每个苹果进行编号分组。试验高度从低到高逐渐增加, 每个苹果跌落 1 次后旋转角度再进行 1 次跌落, 试验后苹果在室温下放置 24 h。在试验操作过程中, 必须要控制好角度, 苹果开始摆的位置与撞击点的位置之间的夹角必须要人为控制, 而且量角器的灵敏度不够会产生很大的误差。手要保持无助力释放, 在放手时要保证苹果冲击的姿态, 即每次都冲击在苹果的相同部位。试验采用 5 个高度 (1, 2, 3, 4, 5 cm), 每个高度测试 5 个试样。

试验开始前, 计算出跌落高度与角度的对应关系。试验时把产品固定在装置上, 按一系列跌落角度进行冲击, 先从较小的角度开始, 逐次提高夹角度数, 直到产品破损。标记苹果与刚性平面冲击的部位, 方便后续试验测量计算损伤体积的参数。试验过程中的冲击所用时间极短, 一般为 2 ms 的脉冲, 要用数据采集器记录苹果与刚性平面撞击时产生的峰值力。苹果在受到任何冲击 (比如跌落) 时, 不论冲击强弱, 在整个冲击过程中都有一个最大加速度。跌落冲击时, 冲击夹角不同, 则最大加速度也不同。由牛顿第二定律可知, 产品受到冲击时产生的加速度正比于它受到的冲击力, 因此可以用产品所能承受的最大加速

度来代替产品所能承受的最大冲击力。

2 试验数据处理与分析

2.1 苹果的临界跌落高度

由于苹果是近似于球体的物品,计算苹果损伤体积时需要的体积参数是按照球体体积来等效的,见图2。苹果体积 V 计算公式为:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (2)$$

损伤体积 V_b 的计算公式为:

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} = \frac{\pi}{24} [3D^2(S_{b1} + S_{b2}) + 4S_{b1}^3 + 4S_{b2}^3] \quad (3)$$

式中: D 为果品损伤面直径; S_{b1} 为果品损伤变形量; S_{b2} 为苹果损伤面的损伤深度; R 为苹果半径。

苹果损伤体积与原体积之比即为苹果的损伤率。损伤体积率的计算为:

$$p = \frac{V_b}{V} \times 100\% \quad (4)$$

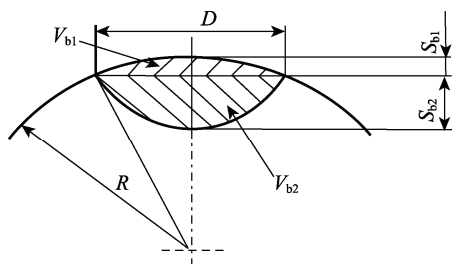


图2 果品损伤体积计算

Fig.2 Calculation of fruit damage volume

苹果在进行不同高度、不同部位的跌落试验后,将其置于实验室24 h,找到试样跌落标记位置,在发生褐变的部位沿着损伤变形面切开,用游标卡尺测得2个参量,代入式(3)计算出每个苹果的损伤体积。利用已有的公式求得损伤率数据,见表1。

表1 苹果在不同跌落高度下的损伤率
Tab.1 Data table of damage rate at different heights

高度/cm	损伤率 $p/\%$				
	1组	2组	3组	4组	5组
1	0	0	0	0	0
2	0.013	0	0	0	0
3	0.128	0.211	0.157	0	0
4	0.335	0.34	0.22	0.204	0
5	0.32	0.29	0.35	0.42	0.26

结合冲击过程中引起的苹果变形可以得出:1 cm时冲击并未给苹果产生残余变形,这表明苹果在1 cm高度冲击下的变形是弹性变形,此时苹果没有产生损伤或损伤极其微弱;当跌落高度达到2 cm时,冲击

给苹果产生了残余变形,此时苹果开始出现损伤;在高度为2, 3, 4, 5 cm时,冲击试样残余变形不是随着跌落高度的增加而增加,而是在这个范围内有可能出现损伤^[13]。从表2可看出,虽然每次测得的临界跌落高度值不完全一样,但其数据服从一定的统计规律。用正态分布拟合表1的试验数据得到正态分布 f ,求得其

数学期望值 $\mu=3.4$,标准差 $\sigma=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(x_i-\mu)^2}=1.02$,

其中 N 为计算方差时数据的个数,这里 N 为5。概率密度函数的计算为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

由式(5)可得出其正态分布曲线,见图3。由以上分析,将跌落高度 $h=3.5$ cm作为试样临界损伤跌落高度,当跌落高度超过3.5 cm时,苹果开始破损。

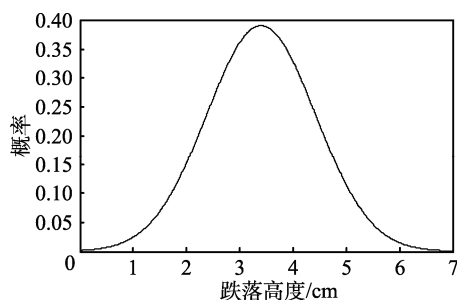


图3 果品损伤正态分布曲线

Fig.3 Normal distribution curve of fruit damage

2.2 苹果的临界损伤脆值

在上面的试验过程中,利用DASP系统可以得到苹果在冲击过程中加速度随时间的变化曲线。试验组苹果的临界损伤跌落高度为3.5 cm,因此将高于该数值的高度来计算损伤脆值,结果见表2。

表2 不同高度苹果损伤脆值
Tab.2 Apple damage fragility at different heights

高度 h/cm	损伤脆值 A_b/g				
	1组	2组	3组	4组	5组
4	54.90	49.50	53.28	49.00	52.68
5	68.37	72.76	74.00	68.38	64.00

结合表2可知,在无推力自由跌落冲击时,单个苹果在同一高度跌落的脆值也是波动的。随着高度的增加,脆值增加,正好验证了临界损伤高度测量时的选取。苹果试样经跌落试验后放置24 h,按照上述方法将褐变的部位沿着损伤变形面切开,根据式(2)—(4)计算跌落后的苹果损伤率。结合试样跌落冲击所得的加速度-时间曲线,可得到试样损伤脆值与损伤体积率的关系。对表2的数据点进行二次项拟合,可得到拟合关系式 $A_b = -2.556 \times 10^4 \mu_b^2 + 9.996 \times$

$10^6 \mu_b + 45$, $R^2=0.98$, 并得到其拟合曲线, 见图4。

拟合关系式中二次项的常数项为45, 选取其为脆值常数项。根据拟合关系式可得苹果在不同损伤率下的损伤脆值。例如, 损伤率为0.1%时, 其对应损伤脆值为56.50g。由于试验组有限, 当高度超过7cm后参考价值较小。

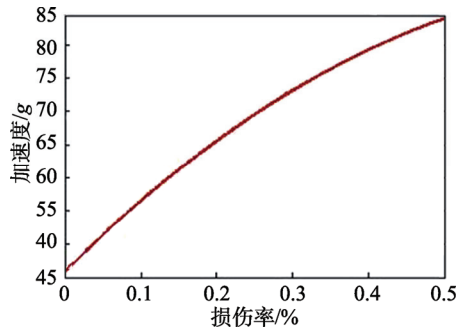


图4 苹果损伤脆值曲线

Fig.4 Damage and fragility curves of apple

3 结语

主要通过试验研究了苹果临界损伤跌落高度和损伤脆值, 可以得到以下结论: 通过试验得到跌落高度 $h=3.5$ cm 为试样临界损伤跌落高度, 当跌落高度超过 3.5 cm 时, 苹果开始出现破损; 通过试验得到苹果试样损伤脆值与损伤体积率的关系, 根据该关系可以得到苹果在不同损伤率下的损伤脆值。此外, 由于试验组有限, 当高度超过 7 cm 后参考价值较小。该研究结果对苹果缓冲包装设计具有参考意义。

参考文献:

- [1] LICHTENSTEIGER M J, HOLMES R G, HAMDY M Y, et al. Impact Parameters of Spherical Viscoelastic Objects and Tomatoes[J]. Transaction of the ASAE, 1988, 31(2): 595—602.
- [2] BARITELLE A, HYDE G M. Strain Rate and Size Effects on Pear Tissue Failure[J]. Transaction of the ASAE, 2000, 43(1): 95—98.
- [3] 康维民, 肖念新, 蔡金星, 等. 模拟 3 自由度振动条件下水果运输振动加速度传递率及损伤研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 219—222.
KANG Wei-min, XIAO Nian-xin, CAI Jin-xing, et al. Vibrating Acceleration Transmissibility and Fruit Bruise in Simulating Three-degree-of-freedom Vibration System[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 219—222.
- [4] 孙骊, 吴亮爽. 苹果振动损伤的规律及其评价[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(1): 78—83
SUN Li, WU Jing-shang. The Law of Apple Damage Caused by Vibrating and Its Damage Evaluation[J]. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-occidentalis, 1994, 22(1): 78—83.
- [5] 陈萃仁, 崔绍荣. 草莓果实振动损伤的预测模型[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 213—216.
- [6] CHEN Cui-ren, CUI Shao-rong. A Predictive Model of Strawberry Bruising Due to Vibration[J]. Transaction of the ASAE, 1997, 13(3): 213—216.
- [7] ZHOU Ran, SU Shu-qiang, LI Yun-fei. Effects of Cushioning Materials on the Firmness of Huanghua Pears during Distribution and Storage[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(1): 1—11.
- [8] 黄祥飞, 卢立新. 梨果实共振特性及振动损伤的实验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 1—3.
HUANG Xiang-fei, LU Li-xin. Research on Resonant Properties and Vibration Bruising of Pears[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 1—3.
- [9] 卢立新, 黄祥飞, 华岩. 基于模拟运输条件的梨果实包装振动损伤研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 110—113.
LU Li-xin, HUANG Xiang-fei, HUA Yan. Effect of Packaging Methods on Vibration Bruising of Pear Fruits by Simulated Transport Tests[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 110—114.
- [10] 李小昱, 王为, 赵静. 苹果碰撞损伤预测模型的研究[J]. 西北农业大学学报, 1995(2): 79—83.
LI Xiao-yu, WANG Wei, ZHAO Jing. Study on Prediction Model of Apple Impact Injury[J]. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-occidentalis, 1995(2): 79—83.
- [11] 王俊. 梨桃各向流变特性及动态特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2001.
WANG Jun. Studies on Anisotropic Theological Properties and Dynamic Properties of Pear and Peach[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2001.
- [12] ZHANG X, BRUSEWITZ G H. Impact Force Model Related to Peach Firmness[J]. Trans ASAE, 1991, 34(5): 2094—2098.
- [13] 李小昱, 王为. 苹果之间碰撞损伤的研究[J]. 西北农业大学学报, 1995(3): 83—87.
LI Xiao-yu, WANG Wei. Damage Research on Collision between Apple[J]. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-occidentalis, 1995(3): 83—87.
- [14] 卢立新. 跌落损伤脆值及损伤边界[J]. 包装工程, 2005, 26(6): 1—4.
LU Li-xin. Dropping Bruise Fragility and Bruise Boundary[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(6): 1—4.
- [15] 陈秀勤, 卢立新, 王军. 包装箱内层装果品差压预冷温度场的数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 249—257.
CHEN Xiu-qin, LU Li-xin, WANG Jun. Numerical Simulation and Experimental Verification of Forced-air Precooling Temperature Field inside Fruit Packaging Box with Multiple-layer Grids[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 249—257.
- [16] 姬伟, 李俊乐, 杨俊, 等. 机器人采摘苹果抓取损伤机理有限元分析及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 17—22.
JI Wei, LI Jun-le, YANG Jun, et al. Analysis and Validation for Mechanical Damage of Apple by Gripper in Harvesting Robot Based on Finite Element Method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 17—22.