

文章编号:1673-1689(2007)04-0011-05

梨果实跌落冲击特性与流变模型

曹海燕¹, 卢立新^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 国家轻工业包装制品质量监督检测中心, 江苏 无锡 214122)

摘要: 基于梨果实非损伤条件下的跌落冲击动力学特征, 采用非线性黏弹性本构模型表征其流变特性。依据跌落冲击未损伤时的试验结果, 进行模型参数识别。结果表明理论模型与试验结果十分吻合。采用本模型结合试验结果能较准确方便地确定果实跌落冲击的流变特征参数。研究结果为果实黏弹性流变特性分析以及模型表征提供了一种新方法。

关键词: 果实; 流变模型; 黏弹性; 梨; 冲击; 非线性

中图分类号: S 126; O 377

文献标识码: A

The Dropping Impact Behavior and Rheological Model of Pear

CAO Hai-yan¹, LU Li-xin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. China National Package Quality Supervising and Testing Center, Wuxi 214122, China)

Abstract: Based on the dropping impact dynamics characteristic under non-damage condition, a non-linear viscoelastic model was develop to describe of pear the rheological characteristic. The model was composed of one non-linear spring and one non-linear viscous damper. The model parameter identification was completed by making use of the non-damage dropping test results, and it indicated that the theoretical model is in good agreement with the test results. The simulation results show that the suggest model in this manuscript could determine the rheological characteristic parameters of fruit's dropping impact accurately and conveniently. This manuscript provided a Novel method to determine the viscoelastic rheological characteristic and model characterization of dropping impact characteristic of pears and other fruit.

Key words: fruit; rheological model; viscoelastic; pear; impact; non-linear

果实在采摘、清洗、分级及贮运过程中存在着 振动、碰撞、冲击、静载、挤压等载荷形式的作用, 形

收稿日期: 2006-07-01.

基金项目: 国家“十五”重大科技专项项目(2001BA804A23)

作者简介: 曹海燕(1983-), 女, 江苏省泰兴人, 农产品运输包装硕士研究生, Email: chy1521@163.com.

通讯作者: 卢立新(1966-), 男, 江苏宜兴人, 教授。主要从事农产品、食品保鲜包装与储运技术、包装工艺与设备研究, Email: Lulx@sytu.edu.cn

成以塑性或脆性破坏形式为主的现时损伤和以粘弹性变形为主的延迟损伤,即机械损伤^[1]。在高度机械化的国家,果实由于机械损伤而引起的平均损耗约占总重量的30%~40%^[2]。

目前,减少果蔬采后损耗是全世界农产品业主要关心的问题之一。对贮运过程中各种工况下果实的流变特性、本构模型进行测定与表征,是研究果实机械分选、减损包装等的理论基础。国内外有一些学者对常见果实的动力学特性进行了探讨。卢立新^[3]结合压缩应力—应变试验曲线特征与模型特性建立了准静态压缩损伤的果实黏弹性塑性模型。李小昱^[4,5]研究了苹果碰撞过程各个参数的影响,建立了描述苹果碰撞过程的加速度—时间曲线的数学模型。陈善锋^[6,7]通过试验研究了梨跌落冲击加速度特性,分析了成熟度、激振功率、成熟度等因素对动态弹性模量的影响。Finney^[8]从生物力学角度建立了土豆组织受到机械载荷后作为一个黏弹性体表现出来的生理特性,并通过试验结合广义黏弹性麦克斯韦模型分析土豆应力松弛特性。Holt^[9]等人对苹果动静态特性及损伤能量分配进行了较全面的研究。Chappell^[10]研究了苹果静载压缩时的泊松比和弹性模量。Franke^[11]、Ragni^[12]利用试验球模拟果实跌落冲击损伤的特性。

迄今为止国内外对果实流变模型的研究大都基于准静态压缩试验进行,相应建立的模型为静态本构模型。工程实际中,果实在各种工况中遭受的大都是振动、跌落冲击载荷,为此探讨果实的动态流变特性更具工程价值。但由于果实动态流变特性的复杂性,目前对果实动态流变模型的研究甚少^[13,14],其在跌落冲击下动态黏弹性模型的研究还未见报道。

本文以梨为研究对象,通过试验研究其跌落冲击特性,提出梨果实跌落冲击未损伤的粘弹性流变模型。结合试验与理论分析提出模型参数的识别方法。

1 梨果实跌落冲击下的流变模型与参数表征

1.1 非线性动态黏弹性模型构建

对果实进行不同高度下的刚性跌落冲击试验,发现果实跌落存在损伤临界高度^[15,16],即仅当果实的跌落高度大于其损伤临界高度时,果实将产生损伤,同时发生塑性变形;否则果实将不会产生损伤。

对梨果实在非损伤条件下的跌落冲击试验发现,即使果实跌落高度很低,其连续冲击的冲击力

信号有差异,后次冲击后的果实回弹高度低于前次跌落高度,果实的冲击变形为非完全弹性变形,果实发生了黏性变形。同时由“冲击力—变形”特征曲线还可以看出其呈现非线性特性。故果实在非损伤条件下的动态本构关系应采用非线性黏弹性模型表征。

因此,梨跌落冲击力 F 可表示为

$$F = F_e(S) + F_v(S, \dot{S}) \quad (1)$$

式中, S 为梨跌落冲击过程中的变形量; $\dot{S}$ 为梨跌落冲击过程中的速度; F_e 为弹性力; F_v 为粘性力。

Brilliantov^[17]提出了一种表述两个黏弹性球体冲击的非线性模型

$$\begin{cases} F_e(S) = kS^{3/2} \\ F_v(S, \dot{S}) = cS^{1/2} \times \dot{S} \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 为弹性系数; c 为非线性增强黏性系数。

即

$$F = kS^{3/2} + cS^{1/2} \times \dot{S} \quad (3)$$

本文采用此模型表征水晶梨跌落冲击(未损伤)流变特性。

1.2 模型参数表征

结合 Brilliantov 提出的非线性模型,Michael 利用赫兹理论经过推导得到黏弹性球体和刚性球体(刚性平板)碰撞的参数表达式,即

$$k = \frac{4E}{3(1-\nu^2)}(R)^{1/2} \quad (4)$$

$$c = \frac{1}{3}E^*(R)^{1/2}A \quad (5)$$

式中, E 为刚性冲击的弹性模量, ν 为材料泊松比, A 为能量耗散参数, R 为球体半径, E^* 为材料平均弹性模量,其中 $E^* = (1-\nu^2) \times E$ 。

根据经验值梨泊松比范围为0.25~0.39^[13],结合以往试验取平均值0.35作为试验中梨的泊松比。

依据试验得到的冲击力和位移数据,利用最小二乘法,可得出梨跌落冲击模型中参数 k 、 c 的值。

2 材料与方 法

2.1 材料

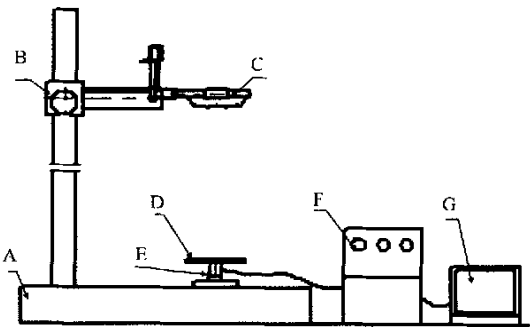
河北新鲜水晶梨,购于无锡一农产品市场。选取外形规则,成熟度相近的特等水晶梨。购买后立即运往实验室,运输中确保无损伤,将试样置于温度为5℃,湿度为90%的条件下24 h后进行试验。

2.2 主要仪器设备

水晶梨跌落冲击试验系统见图1。试验主机为自制的跌落试验机。冲击力传感器为CL-YD-315

型(响应频率为 15 kHz)。力传感器上一端固定一铝制托砵(直径 70 mm,厚度 3 mm),另一端通过螺柱联接固定在一传感器导杆上,并一起夹紧在试验机支座上。采用 INV3061D 智能信号采集分析仪,采用激励自触发进行数据的采集。采样频率 10 000 Hz。

水晶梨硬度的测定采用英国 Lloyd 公司的 L100OS 型电子万能试验机,精度 0.5%。



A. 底座 B. 高度调整装置 C. 夹持器 D. 跌落盘 E. 传感器 F. 信号采集器 G. 信号分析仪

图 1 跌落冲击试验系统

Fig. 1 Schematic diagram of drop test apparatus

2.3 跌落冲击试验方法与损伤临界高度试验设计

2.3.1 跌落冲击试验方法 跌落冲击试验之前,测量梨试样质量,测出不同部位试样直径,求出平均值即为试样的等效球径。

用万能材料试验机测定试样坚实度。根据 GB10650—89 中果实硬度测定方法^[19-20],在梨相对两面的胴部,用小刀削去一层直径为 12 mm 的果皮;在万能材料试验机上固联直径为 5 mm 的压头,以速度 20 mm/min 刺入果面测试处,每次刺入深度为 10 mm,测量最大压力,最大压力和压头面积之比即为试样的坚实度。

考虑到梨的贮运排放方式,梨试样的跌落部位为试样圆表面,即跌落方向与果柄方向垂直。

2.3.2 损伤临界高度试验设计 (1) 按质量和硬度选取 3 组水晶梨,每组水晶梨质量误差在 ± 20 g 之内,硬度在 0.10~0.15 MPa 之内;

(2) 选取跌落高度 20~200 mm 进行跌落试验,每个高度选取 3 个水晶梨试验,每个梨选 3 个位置进行跌落。从不同跌落高度进行跌落冲击试验,记录跌落过程的冲击力信号;

(3) 试验后将梨放置在常温中 24 h,观察并测定其损伤面积,并以此为依据,判断损伤临界高度。

3 结果与分析

3.1 损伤临界跌落试验结果

根据试验数据,水晶梨刚性冲击的损伤面积与跌落高度的关系如图 2 所示。从曲线上可以确定梨跌落出现可见损伤的临界高度为 25 ± 5 mm。

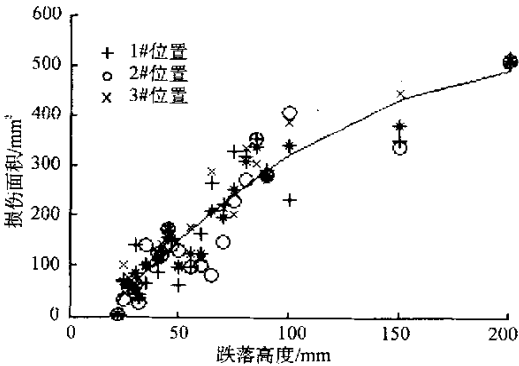


图 2 梨果实损伤面积与跌落高度关系

Fig. 2 Relationship between bruise area and dropping height of pears

3.2 模型参数结果及相关性分析

根据接近损伤临界高度的 21 个试样的跌落冲击试验测试结果,采用公式(3)进行理论分析与模型参数识别,可得到试样未损伤条件下的弹性系数 k 、非线性增强黏性系数 c ,并利用式(4)、(5)进一步得出其弹性模量和能量耗散值。其计算结果(均值)见表 1。

表 1 模型参数计算结果

Tab. 1 Results of the model parameters

$K/(N \cdot m^{-2/3})$	2.522×10^6
$C/(N \cdot s \cdot m^{-3/2})$	3.67×10^5
$E/(N \cdot m^{-2})$	8.956×10^6
$A(s)$	0.721
R^2	0.974

以理论计算所得模型参数为基础,进行理论计算与试验结果的比较。任意选取跌落高度 25 mm、28 mm 的试验结果与理论模型进行比较,其结果见图 3、图 4。结果表明,总体上本文建立的理论模型结果与试验结果吻合性较好,特别是在试样的冲击压缩阶段,模型结果与试验结果非常吻合。

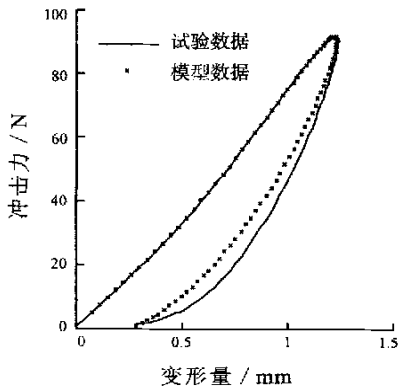


图3 跌落高度 25 mm 时的理论和试验曲线

Fig. 3 Curves of theory and test at the height of 25 mm

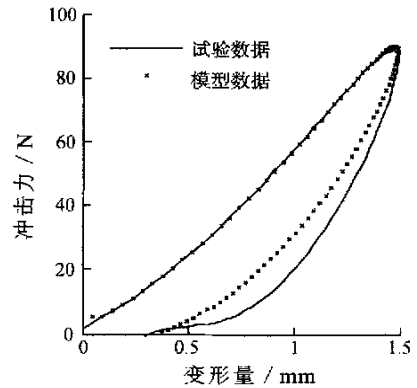


图4 跌落高度 28 mm 时的理论和试验曲线

Fig. 4 Curves of theory and test at the height of 28 mm

4 结 语

本文基于水晶梨跌落冲击试验,得到了水晶梨跌落冲击的损伤临界高度。结合理论提出了一个表征其非线性黏弹性特性的流变模型并得到模型参数。结果表明:

1) 25 mm 为水晶梨跌落出现可见损伤的临界高度;质量偏小的梨临界高度会有所增加,而质量偏大的梨临界高度会有所减小,其幅值不超过 5 mm。

2) 本文模型与试验结果很吻合,该模型能较准确地表征梨果实跌落冲击特性的非线性黏弹性流变特性。

参考文献(References):

- [1] 卢立新,王志伟. 果实运输中的机械损伤机理及减损包装研究进展[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 131-141.
LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Study of mechanisms of mechanical damage and transport packaging in fruits transportation [J]. *Packaging Engineering*, 2004, 25(4): 131-141. (in Chinese)
- [2] 高水毅,焦群英. 水果机械损伤研究概况及发展趋势[J]. 湘潭师范学院学报:自然科学版, 2002, 24(3): 26-29.
GAO Yong-yi, JIAO Qun-ying. Recent progress in the studies of fruits mechanical damage [J]. *Journal of Xiangtan Normal University: Natural Science Edition*, 2002, 24(3): 26-29. (in Chinese)
- [3] 卢立新,王志伟. 基于准静态压缩的果实黏弹塑性模型[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 30-33.
LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Nonlinear viscoelastic plastic model of the fruits under quasi-static compressive loading [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(12): 30-33. (in Chinese)
- [4] 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, 23(2): 79-83.
LI Xiao-yu, WANG Wei, ZHAO Jing. Apple impact bruise prediction model [J]. *Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis*, 1995, 23(2): 79-83. (in Chinese)
- [5] 李小昱,王为. 苹果碰撞响应数学模型的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 112(4): 204-207.
LI Xiao-yu, WANG Wei. The research on mathematical model of apple impact response [J]. *Transactions of the CSAE*, 1996, 112(4): 204-207. (in Chinese)
- [6] 陈善锋,周亦斌,王俊,等. 梨的下落碰撞冲击加速度特性研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2003, 29(3): 339-342.
CHEN Shan-feng, ZHOU Yi-bin, WANG Jun. Mechanical parameters of impact occurred due to fruit fall in relation to bruise suffered by fruit [J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.*, 2003, 29(3): 339-342. (in Chinese)
- [7] 王剑平,王俊,陈善锋,等. 黄花梨的撞击力学特性研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 32-35.
WANG Jian-ping, WANG Jun, CHEN Shan-feng. Impact characteristics of huanghua pear [J]. *Transactions of the*

- CSAE, 2002, 18(6): 32—35. (in Chinese)
- [8] Finney E E, Hall C W, Mase G E. Theory of linear viscoelasticity applied to the potato[J]. *Journal of Agric. Engng. Res.*, 1964; 307—312.
- [9] Holt J E, Schoorl D. Fracture in potatoes and apples[J]. *Journal of Materials Science*, 1983; 2017—2028.
- [10] Chappell T W. Poisson's ratio and Young's modules for apple flesh under compression lading[J]. *Trans. of the ASAE*, 1968, 11(5): 608—610.
- [11] Franke J E, Rohrbach R P. A nonlinear impact model for a sphere with a flat plate[J]. *Transactions of the ASAE*, 1981, 0001—2351(81); 2406—1683.
- [12] Ragni L, Berardinelli A. Mechanical behaviour of apples, and damage during sorting and packaging[J]. *J. Agric. Engng Res*, 2001, 78(3): 273—279.
- [13] 潘见. 草莓振动损伤的流变力学初探[J]. *生物力学*, 1990, 5(7): 63—70.
PAN Jian. Study on rheological dynamic mechanics of vibration of strawberry [J]. *Biological Mechanics*, 1990, 5(7): 63—70. (in Chinese)
- [14] 周德志, 卢立新. 水蜜桃动态松弛特性与模型表征[J]. *包装工程*, 2005, 26(6): 12—21.
ZHOU De-zhi, LU Li-xin. Dynamic relaxation property and modeling for peach[J]. *Packaging Engineering*, 2005, 26(6): 12—21. (in Chinese)
- [15] Chen P, Yazdani R. Prediction of apple bruising due to impact on different surfaces[J]. *Trans. ASAE*, 1991, 34(3): 956—961.
- [16] 卢立新. 跌落损伤脆值及损伤边界[J]. *包装工程*, 2005, 26(6): 1—4, 11.
LU Li-xin. Dropping bruise fragility and bruise boundary[J]. *Packaging Engineering*, 2005, 26(6): 1—4, 11. (in Chinese)
- [17] Brilliantov. The collision of particles in granular systems[J]. *Physica A*, 1996a, 231, 417—424.
- [18] U G A Anazodo, S C Chikwendu. Poisson's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials-small deformation approximation. [J]. *Trans of the ASAE*, 1982, 26(3), 923—929.
- [19] 中华人民共和国标准(鲜梨)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [20] 杨寿清. 苹果常温保鲜技术[J]. *无锡轻工大学学报: 食品与生物技术*, 2003, 22(4): 27—31.
YANG Shou-qing. Apple fresh technology in normal temperature[J]. *Journal of Wuxi University of Light Industry*, 2003, 22(4): 27—31. (in Chinese)

(责任编辑: 杨萌)