

文章编号:1673-1689(2008)04-0001-05

跌落冲击损伤条件下的果实非线性黏弹性流变模型

卢立新

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

摘要: 基于果实跌落冲击动力学特征, 提出一表征其冲击损伤条件下的非线性黏弹性流变模型。以红富士苹果为研究对象, 进行多个高度下的跌落冲击试验, 基于试验数据识别获得了不同高度下的模型损伤弹性系数、黏性系数以及黏性特征参数。结果表明, 与已有模型进行比较, 本文提出的理论模型与试验结果吻合性最好; 本理论模型与试验结果吻合度高, 所提出模型能合理地表征苹果及类似特性果实的非线性黏弹性流变特征。研究结果为果实动态流变特性分析以及模型表征提供了一种新的方法, 也为进一步表征果实的黏弹塑性损伤特征提供了基础。

关键词: 苹果; 流变模型; 非线性黏弹性; 跌落冲击; 损伤

中图分类号: S 126; O 377

文献标识码: A

Non-linear Viscoelastic Modeling of the Fruits under Dropping Bruising

LU Li-xin

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University; China National Light Industry Package Quality Supervising & Testing Center, Wuxi 214122, China)

Abstract: A dynamic non-linear viscoelastic model and its parameter estimated method are developed for the fruits under dropping bruising. This model equation defines the force acting on the fruit as composed of a nonlinear elasticity force $k_b x^{3/2}$ and viscous damping force $c_b x^{9/2} \dot{x}$. An experimental system is used to measure and analyze dropping impact data of fruits. The dropping impact test with multi-heights is conducted on fresh 'Fuji' apples grown in Shandong, China. The model parameters are estimated based on the experimental data of the apples under the multi-heights dropping. The efficiency of the model is verified by comparing the results of numerical analyses with the results of experiments. These results indicated that, compared to other model, the proposed non-linear viscoelastic model is the most precise one in simulating the impact force versus deformation during dropping impact of apples.

Key words: apple; rheological model; nonlinear viscoelasticity; dropping impact; bruising

果实流变特性, 不仅是设计果实加工工艺与机械的理论依据, 而且可为减少与控制果实在采收、加工、包装、贮运等环节的机械损伤、提高产品质量

提供技术基础。

作为研究基础, 多年来国内外学者基于准静态压缩试验, 对果实流变特性中的物理非线性因素作

收稿日期: 2008-01-16.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAD30B02).

作者简介: 卢立新(1966-), 男, 江苏宜兴人, 工学博士, 教授, 博士生导师. 主要从事食品与农产品包装技术与安全、包装动力学与运输包装、包装工艺与设备等研究. E-mail: lulx@jiangnan.edu.cn

了大量的研究,取得了一系列有意义的成果^[1-9],相应建立的模型为静态流变模型。

工程实际中,果实在采收、分选、加工、包装、运输等作业环节中遭受的是振动、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。冲击载荷下的果品压缩为黏弹性、黏弹塑性变形。目前,由于理论表征果实的动态黏弹塑性流变模型甚为困难,动态黏弹性流变模型作为黏弹塑性流变模型研究的基础,同时其在实际工程中具有较大的应用价值,近年来人们围绕黏弹性体、果实的动态黏弹性流变模型展开研究。Frankel^[10]基于 Kelvin 模型建立了一非线性黏弹性模型,采用模拟球跌落试验进行参数拟合,但确定模型参数很困难;Kuwabara^[11]采用黏弹性模拟球,研究其压缩状态下的黏滞特性,并建立了一非线性黏弹性流变模型。上述成果都未应用于实际果实研究。此后,Zhang^[12]、李小昱^[13]分别建立了描述梨冲击过程的力-时间、苹果冲击加速度-时间关系式,但未涉及果实的流变参数。卢立新^[14]基于果实非损伤条件下的跌落冲击变形特征,提出了一表征其非线性动态流变的模型,但仅考虑果实非损伤工况,其应用局限性大,同时缺乏必要的理论基础。

目前的研究表明,变形速率显著影响果实的流变特性。果实在实际中承受不同高度的跌落冲击,致使其承受不同的冲击速率,为此研究果实不同冲击速度下的流变特性,并建立近似的或经验型的流变模型来反映冲击速率对果实材料力学行为的影响,成为工程应用迫切需要解决的问题。

本文提出一表征果实冲击损伤条件下的非线性黏弹性流变模型与模型参数的识别方法。以红富士苹果为研究对象,进行损伤冲击工况下的多个高度下的跌落冲击试验;基于冲击试验结果进行模型参数识别,以期获得合理表征红富士冲击损伤条件下的非线性黏弹性流变模型,为其工程应用及进一步表征果实的黏弹塑性损伤特征提供基础。

1 非线性动态黏弹性模型构建与参数表征

1.1 非线性动态黏弹性模型构建

大量研究表明,果实跌落冲击过程中的变形属非线性变形。作者从果实跌落冲击试验中发现,即使果实跌落高度很低,果实的变形仍非完全弹性变形^[14]。

基于黏弹性球体冲击状态下的特性,Kuwabara^[11]提出了一非线性黏弹性流变模型:

$$F = kx^{3/2} + cx^{1/2}x \quad (1)$$

式中, k 为弹性系数, c 为黏性系数, x 为变形量。

该模型中的弹性部分特征主要基于赫兹接触理论推导而得,具有较充分的理论基础;同时,采用 $cx^{1/2}$ 项来表征果实的非线性黏性特性。但此后的研究表明,采用 $cx^{1/2}$ 项来表征果实的非线性黏性特性时,在冲击起始点($t=0$)的动力学特征与实际试验结果不符^[15]。

为满足黏弹性球体冲击起始点的力-变形特征的表征要求,Hunt提出了另一模型^[16]:

$$F = kx^{3/2} + cx^{3/2}x \quad (2)$$

此后,Tsuji提出了另一非线性黏弹性流变模型^[17]:

$$F = kx^{3/2} + cx^{1/4}x \quad (3)$$

进一步分析表明,Tsuji模型及其参数在推导时忽略了弹性恢复系数与变形速率的联系^[18],同时确定其中的黏性系数较为困难,故该模型应用受到了限制。

基于对上述非线性黏弹性流变模型的分析,作者认为,果实黏弹性流变模型的建立应考虑其理论基础、模型结果与试验结果的吻合程度,即:

(1)基于赫兹接触理论来表征流变模型中的弹性项,具有较充分的理论依据;

(2)模型中的黏性项,应包含非线性变形项的影响。现有研究模型中,只有Kuwabara模型中的黏性项推导具有一定的理论依据,但存在冲击起始时的动力学特征与试验结果不符事实,其应用受到局限。故非线性变形项的幂次数应根据其研究对象的力-变形特征通过试验分析加以确定,并保证模型结果与试验结果必要的吻合程度。

为此,本文中建立如下模型来表征跌落损伤条件下果实的流变模型。即

$$F = k_0x^{3/2} + c_0x^n x \quad (4)$$

式中, k_0 为果实损伤弹性系数, c_0 为果实损伤黏性系数, n 为黏性特征参数。

1.2 模型参数表征识别方法

为表征模型参数,通过测定实际果实跌落冲击力-时间信号($F-t$),可进一步得到果实跌落冲击过程的冲击力-变形($F-x$)、冲击加速度-时间($a-t$)关系^[14],进而进行模型参数拟合。为此建立如下模型参数的识别目标函数:

$$\delta = \sum_{i=1}^q [(F_T - F_E) |_{x=x_i}]^2 \quad (5)$$

式中, F_T 、 F_E 分别为对于一冲击变形时的果实冲击力模型值、试验值。当 $\delta \Rightarrow \min$ 时,可得出对应模型参数。

2 材料与方 法

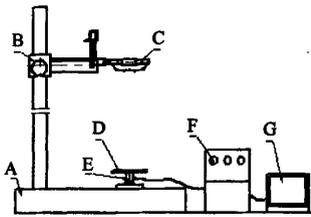
2.1 试验材料

供试材料为山东鲜销“富士”苹果。试验所选苹果试样形状规则,表面无损伤,质量在 251~275 g,其中同一高度试验时选用试样质量相差控制在 10 g 内,苹果的坚实度范围为 0.80~0.92 MPa。

2.2 试验仪器

苹果与刚性表面的跌落冲击试验系统如图 1 所示。冲击力传感器为 CL-YD-315 型(响应频率 15 kHz)。将力传感器通过螺柱连接固定在试验机底座上,同时在力传感器上固定一铝托盘(直径 50 mm,厚度 2.5 mm)以增加碰撞面积。采用 INV306D 智能信号采集处理分析仪,应用冲击激励自触发进行数据的采集、存储,数据采集频率 10 kHz。

苹果坚实度的测定采用英国 Lloyd 公司的 LRX PLUS 型万能材料试验机,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 of drop test apparatus

2.3 试验方法

跌落冲击试验之前,测量苹果试样质量,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。在万能材料试验机上固联直径为 5 mm 的压头,以推进速度 20 mm/min 刺入试样表面,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。

考虑到苹果的贮运排放方式,苹果试样的跌落部位为试样圆表面,即跌落方向与苹果果柄方向垂直。

采用 6 个跌落高度:0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m。每个高度用 3 个试样,每个试样试验 2 次,即初始位置和旋转 180°后各试验一次。

试验过程中保证跌落位置与坚实度测定位置相隔 90°左右,每次跌落冲击回弹后即人工抓接试样,以防止试样进行第二次跌落,同时应保证所有

试样跌落时均不发生破裂现象。

3 结果与讨论

3.1 典型分析样本的选取

选取每一跌落高度下的一典型分析样本作为分析对象。典型分析样本的选取过程与依据为:

1) 测定计算每一跌落高度下重复跌落的 6 次试验 $a-t$ 数据,计算 6 次跌落冲击的峰值加速度与冲击时间的均值;

2) 选取其中跌落峰值加速度、冲击时间与均值综合相对误差最小的一次跌落作为典型分析样本。即选取准则为:

$$\text{Min}(\delta = \sqrt{\left(\frac{a_p - \bar{a}_p}{\bar{a}_p}\right)^2 + \left(\frac{t_i - \bar{t}}{\bar{t}}\right)^2}) \quad (6)$$

式中, a_p 、 t_i 分别为典型分析样本跌落峰值加速度、冲击时间, \bar{a}_p 、 \bar{t} 分别为跌落峰值加速度均值、冲击时间均值。

3.2 模型黏性特征参数确定

依据跌落高度为 0.1 m 的 6 组试样的冲击力—变形数据,进行模型参数识别。为了确定模型中的特征参数 n 值,分别选取 $n = 7/2, 8/2, 9/2, 10/2$ 进行模型参数识别。同时以 6 组识别参数的均值为基础计算得到模型值,并与典型分析样本试验值进行比较,其特征参数对跌落冲击流变模型结果冲击加速度—时间、冲击力—变形比较,如图 2 所示。结果表明,随着 n 值的增大,模型结果与试验值的误差逐渐减小,但当 $n = 10/2$ 时,加速度、冲击力的峰值与试验值误差较大。考虑到加速度、冲击力的峰值在表征苹果损伤、动力学特性中的重要性,故此值不予考虑。当 $n = 9/2$ 时,模型值与试验值吻合性较高,加速度、冲击力的峰值与试验值的误差很小。同时,其余跌落高度下的试验也有同样结论。故选取模型特征参数 $n = 9/2$ 。至此,红富士苹果跌落冲击损伤条件下的非线性黏弹性流变模型可表示为:

$$F = k_b x^{3/2} + c_b x^{9/2} \quad (7)$$

以上述确定模型为基础,进一步与已建立的其它模型进行比较(见图 3)。结果表明,总体上本文中建立的理论模型结果与试验结果吻合性最好,只是在试样的跌落回弹阶段稍有偏差。同时发现其它模型结果与试验结果偏差较大,总体吻合性差;Kuwabara 模型、Tsuji 模型在跌落冲击的起始点($t=0; x=0$),模型曲线斜率与试验值不符,这一结论与其他作者的研究结果一致^[15]。

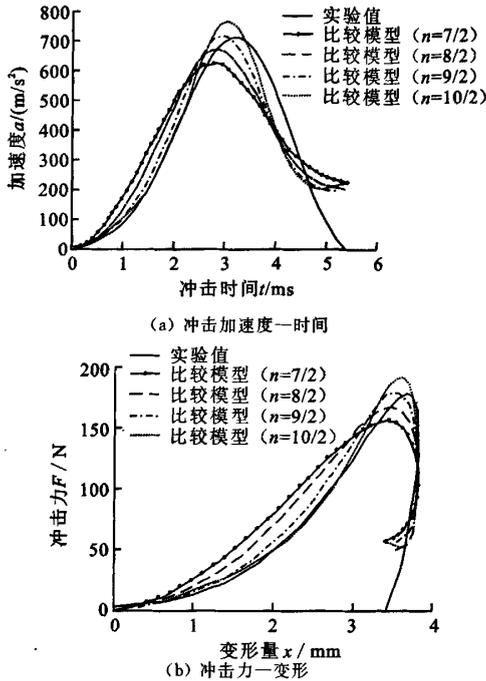


图2 特征参数对红富士苹果跌落冲击流变模型结果的影响 ($h=0.1\text{ m}$)

Fig.2 Effect of model parameters on the model results for Fuji apples ($h=0.1\text{ m}$)

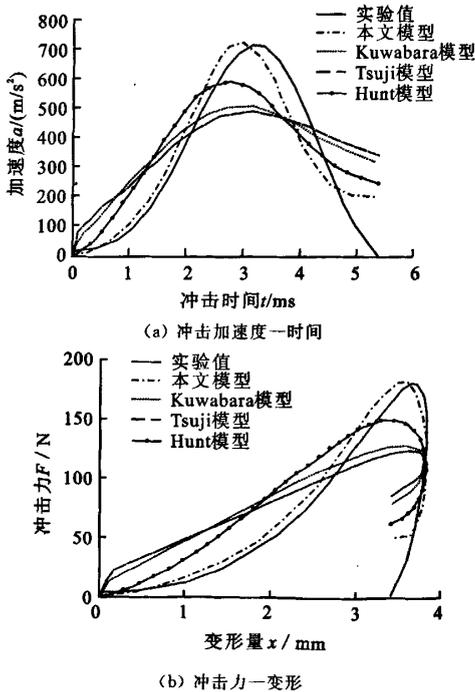


图3 红富士苹果跌落冲击流变模型与试验结果比较 ($h=0.1\text{ m}$)

Fig.3 Test data compared to the model results for Fuji apples ($h=0.1\text{ m}$)

3.3 苹果不同跌落高度下的流变模型参数确定

依据上述技术方法,同样对跌落高度分别为0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m的试验结果进行模型参数识别,得到红富士苹果不同跌落高度下的流变模型参数,见表1。

表1 红富士苹果不同跌落高度下的流变模型参数

Tab.1 The model parameters of Fuji apples under variable dropping heights

跌落高度 h/m	弹性系数 k_b $\times 10^5/\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$	黏性系数 C_b $\times 10^{11}/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-11/2}$
0.1	4.596	176.42
0.2	3.518	32.23
0.3	3.006	10.51
0.4	2.366	5.05
0.5	2.082	3.04
0.6	1.679	1.72

进行模型结果与典型分析样本试验值比较,其部分结果如图4所示。结果表明,总体上模型结果与典型分析样本试验值的吻合性较好;同时,随着跌落高度的增大,试样跌落回弹阶段的吻合性有所提高。

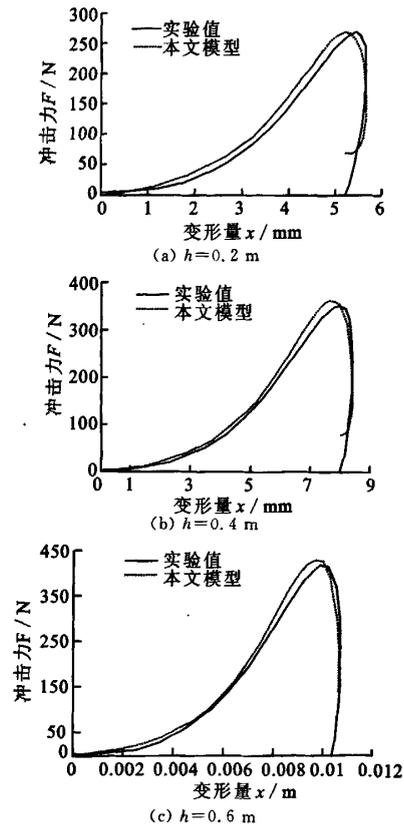


图4 红富士苹果跌落冲击流变模型与试验结果冲击力-变形的比较

Fig.4 Test data compared to the model results of $F-x$ for Fuji apples

4 结 语

基于果实跌落冲击变形特征, 提出一表征其非线性黏弹性的动态流变模型, 建立果实跌落冲击方程及模型参数识别方法。以红富士苹果为研究对象, 进行多个高度下的跌落冲击试验, 基于不同跌落高度下的冲击试验结果, 进行其模型参数识别, 结果表明:

1) 与已有模型比较, 本文提出的理论模型与试验结果吻合度最高;

2) 总体上, 试验结果与本理论模型结果吻合度高, 所提出模型能合理地表征苹果及类似特性果实的非线性黏弹性流变特征。

研究结果为果实动态流变特性分析以及模型表征提供了一种新的方法, 也为进一步表征果实的黏弹塑性损伤特征提供了基础。

参考文献(References):

- [1] Chen P, Fridley R B. Analytical method for determining viscoelastic constants of agricultural products[J]. *Trans ASAE*, 1972, 15(6): 1103-1106.
- [2] Chuma Y, Shiga T Iwamoto. Mechanical properties of satsuma oranges as related to the design of a contain of bulk transportation[J]. *J Text Studies*, 1978(9): 461-470.
- [3] Peleg K. Package produce interaction in corrugated containers for fresh produce[J]. *Trans Am Soc agric Engrs*, 1981, 24: 794-800.
- [4] Pitt R E, Chen H L. Time dependent aspects of strength and rheology of vegetative tissue [J]. *Trans Am Soc Agric Engrs*, 1983, 26:1275-1280.
- [5] Peleg K. A theological model of nonlinear viscoplastic solids[J]. *Journal of Rheology*, 1983, 27: 411-431.
- [6] 李小昱, 王为. 苹果压缩特性的研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(2):107-108.
LI Xiao-yu, WANG Wei. A study on compressive properties of apple [J]. *Journal of Northwest Agricultural University*, 1998, 26(2):107-108. (in Chinese)
- [7] 王俊, 王剑平, 陆秋君. 梨肉的各向机械特性研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6):58-60, 64.
WANG Jun, WANG Jian-ping, LU Qiu-jun. Anisotropic mechanical properties of pears[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(6):58-60, 64. (in Chinese)
- [8] 王荣, 焦群英, 魏德强. 葡萄与番茄宏观力学参数的确定[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 54-57.
WANG Rong, JIAO Qun-ying, WEI De-qiang. Determination of macromechanic parameters of grapes and tomatoes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 54-57. (in Chinese)
- [9] 卢立新, 王志伟. 基于准静态压缩的果实粘弹塑性模型[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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(12):30-33. (in Chinese)
- [10] Franke J E, Rohrbach R P. A nonliner impact model for a sphere with a flat plate[J]. *Trans ASAE*, 1981, 24(6):1683-1686.
- [11] Kuwabara G, Kono K. Restitution coefficient in a collision between two spheres[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1987, 26(8):1230-1233.
- [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. 苹果碰撞响应数学模型的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4):204-207.
LI Xiao-yu, WANG Wei. The research on mathematical model of apple impact response[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1996, 12(4):204-207. (in Chinese)
- [14] 卢立新, 王志伟. 跌落冲击下果实动态流变模型的构建与表征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4):238-241.
LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Dynamic nonlinear viscoelastic model for the fruits under dropping impact [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(4):238-241. (in Chinese)
- [15] Tijskens E, Ramon H, Baerdemaeker J D. Discrete element modeling for process simulation in agriculter[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266:493-514.
- [16] Hunt K H, Crossley F R E. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1975:440-445.
- [17] Tsuji Y, Tanaka T, Ishada T. Langrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe [J]. *Power Technology*, 1992, 71:239-250.
- [18] 卢立新. 果实跌落冲击行为及其缓冲包装的理论与试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.

(责任编辑: 秦和平)