

# 半正弦激励下多层果品冲击力学特性研究

张生芹<sup>1</sup>, 王 军<sup>1,2</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学 包装工程系, 江苏 无锡 214122;  
2. 江南大学 中国包装总公司食品包装技术与安全重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:** 果品损伤与外界冲击激励的关系是科学控制果品冲击损伤的一个必要条件。采用 Kuwabara-Kono 模型描述果品的黏弹性, 并在此基础上建立了多层果品的动力学模型, 研究了半正弦脉冲激励下的多层果品冲击动力学特性, 得到了果品典型冲击损伤特征参数随脉冲激励变化的规律。结果表明: 果品特征参数、脉冲激励幅值、层数等对各层果品加速度响应峰值、达到峰值的时间等损伤指标影响显著。

**关键词:** 半正弦激励; 果品; 冲击; 堆码

**中图分类号:** TB485.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2011)03-0036-04

## The Shock Characteristics of Multi-Layer Fruits under the Action of Half-Sine Acceleration Pulse

Zhang Shengqin<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>1,2</sup>, Lu Lixin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Packaging Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Techniques and Safety of China National Packaging Corporation, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** It's very important to investigate the inner relationship between fruit damage and shock, considering fruits are usually stacked during transportation. The mechanical model of multi-layer fruits is built and the shock response of each layer under the action of half-sine acceleration pulse is investigated. It shows that the effect of viscoelastic parameter of fruits, pulse peak and numbers of layers on the typical bruising parameters of fruits is noticeable.

**Key words:** half-sine acceleration pulse; fruits; shock; stacks

## 0 引言

果品在采摘、清洗、分选、分级、包装、运输等处理环节中, 均极易因受到跌落、冲击、振动等因素的影响而造成一些机械损伤, 从而影响果品的储藏与销售。

近年来, 果品损伤的力学研究引起了国内外学者们的广泛关注<sup>[1-10]</sup>。但是, 已有的研究多集中于对

单个果品的跌落冲击动力学特性的分析, 并在此基础上获取果品系统的损伤力学规律<sup>[11-13]</sup>。而实际上, 果品在运输过程中常采用多层堆积, 因此, 研究多层果品冲击动力学特性具有重要的现实意义和工程价值。本文拟建立多层果品的冲击动力学模型, 以研究多层果品在典型脉冲激励——半正弦激励下的冲击动力学特性, 以为果品减损设计提供一定的理论依据。

收稿日期: 2010-03-15

基金项目: 江苏省高等学校特色专业建设点基金资助项目(教高函[2010]15号)

作者简介: 张生芹(1988-), 男, 重庆人, 江南大学学生, 主要研究方向为食品包装, E-mail: cqyyzsq@163.com;

通信作者: 王 军(1982-), 男, 安徽巢湖人, 江南大学副教授, 博士, 主要研究方向为包装力学, 食品包装安全,

E-mail: packie@126.com

### 1 果品的黏弹性模型

果品是个复杂的黏弹性体。果品的黏弹性模型是其动力学分析的基础,研究者在分析果品的各类力学特性时,建立了大量的黏弹性模型,已有的果品黏弹性模型中, Kuwabara 与 Kono 提出的果品黏弹性模型<sup>[13]</sup>与果品特性的关联度最好<sup>[15-19]</sup>,该模型表示如下:

$$F = k\delta^{\frac{3}{2}} + c\delta^{\frac{1}{2}}\dot{\delta}, \quad (1)$$

式(1)中:

$k, c$  分别为果品的弹性、黏性特征参数,其数值可由试验确定;

$\delta$  为果品的变形量;

$\dot{\delta}$  为果品的变形速率。

与其他模型相比,该模型具有以下优点:

1) 模型所描述的果品运动特征与果品冲击过程吻合较好;

2) 模型具有明确的物理意义,可由赫兹理论推演得到。

鉴于式(1)所示模型的优势,本文拟采用此模型描述果品的黏弹性。

### 2 多层果品的冲击动力学模型与运动方程

相关文献资料<sup>[3]</sup>表明,在分析多列果品动力学特性时,一般可不考虑相邻果列的影响。因此,本研究中以单列果品建立多层果品的运动力学模型。为了建模和分析方便,后面仅以4层果品为例来研究多层果品的跌落破损边界,4层果品的动力学模型可参照如图1所示的多层果品动力学模型建立。

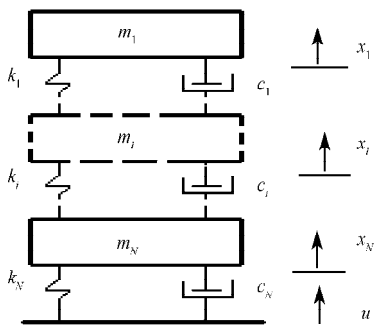


图1 多层果品动力学模型

Fig. 1 Mechanical model of stacks of fruits

图1中:  $m_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 表示各层果品的质量;  $k_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 表示材料的等效刚度系数;  $c_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 表示等效阻尼系数。

假设各层果品的质量、刚度、阻尼均相等,根据图1所示的多层果品的动力学模型,可建立如下该系统在脉冲激励下的动力学方程:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = k(x_2 - x_1)^{\frac{3}{2}} + c(x_2 - x_1)^{\frac{1}{2}}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), \\ m\ddot{x}_2 = k(x_3 - x_2)^{\frac{3}{2}} - k(x_2 - x_1)^{\frac{3}{2}} + c(x_3 - x_2)^{\frac{1}{2}}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - c(x_2 - x_1)^{\frac{1}{2}}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), \\ m\ddot{x}_3 = k(x_4 - x_3)^{\frac{3}{2}} - k(x_3 - x_2)^{\frac{3}{2}} + c(x_4 - x_3)^{\frac{1}{2}}(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - c(x_3 - x_2)^{\frac{1}{2}}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2), \\ m\ddot{x}_4 = k(u - x_4)^{\frac{3}{2}} - k(x_4 - x_3)^{\frac{3}{2}} + c(u - x_4)^{\frac{1}{2}}(\dot{u} - \dot{x}_4) - c(x_4 - x_3)^{\frac{1}{2}}(\dot{x}_4 - \dot{x}_3). \end{cases} \quad (2)$$

考虑果品系统底部受到的激励为最接近实际运输工况的半正弦脉冲激励,可表示为:

$$\ddot{u} = \ddot{u}_{0m} \sin \frac{\pi t}{t_0} \Delta H(t, t_0).$$

在系统中引入如下变量:

$$\delta_1 = \frac{x_2 - x_1}{L}, \quad \delta_2 = \frac{x_3 - x_2}{L}, \quad \delta_3 = \frac{x_4 - x_3}{L},$$

$$\delta_4 = \frac{u - x_4}{L}, \quad \tau = \frac{t}{T}.$$

$$\text{其中 } T = \frac{c}{k}, \quad L = \left( \frac{mk}{c^2} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

可得到如下无量纲化运动方程:

$$\begin{cases} \delta_1'' = \delta_2^{\frac{3}{2}} + \delta_2^{\frac{1}{2}}\delta_2' - 2\delta_1^{\frac{3}{2}} - 2\delta_1^{\frac{1}{2}}\delta_1', \\ \delta_2'' = \delta_3^{\frac{3}{2}} + \delta_3^{\frac{1}{2}}\delta_3' + \delta_1^{\frac{3}{2}} + \delta_1^{\frac{1}{2}}\delta_1' - 2\delta_2^{\frac{3}{2}} - 2\delta_2^{\frac{1}{2}}\delta_2', \\ \delta_3'' = \delta_4^{\frac{3}{2}} + \delta_4^{\frac{1}{2}}\delta_4' + \delta_2^{\frac{3}{2}} + \delta_2^{\frac{1}{2}}\delta_2' - 2\delta_3^{\frac{3}{2}} - 2\delta_3^{\frac{1}{2}}\delta_3', \\ \delta_4'' = U'' + \delta_3^{\frac{3}{2}} + \delta_3^{\frac{1}{2}}\delta_3' - \delta_4^{\frac{3}{2}} - \delta_4^{\frac{1}{2}}\delta_4'. \end{cases} \quad (3)$$

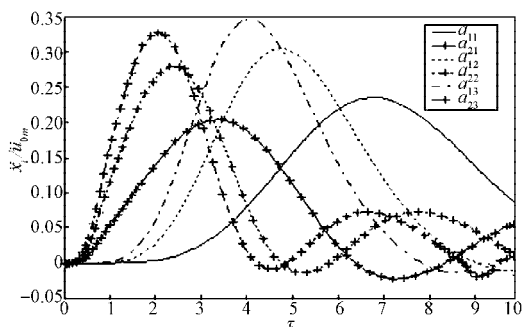
$$\text{其中 } U'' = \beta \ddot{u}_{0m} \sin \frac{\pi \tau}{\tau_0} \Delta H(\tau, \tau_0).$$

### 3 多层果品动力学响应

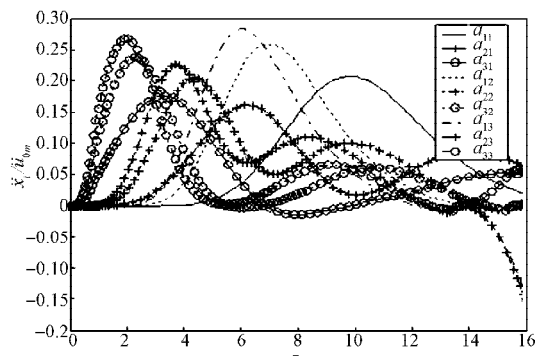
运用四阶龙格-库塔法求解方程(3),依据求解结果可作出图1所示各层果品的加速度响应曲线,见图2。图2中,纵坐标  $\ddot{x}_i/\ddot{u}_{0m}$  表示各层响应加速度与激励幅值之比,  $\tau$  为无量纲时间。  $a_{ij}$  表示第  $i$  层(自上而下)果品在第  $j$  种激励下的加速度响应。  $j$  与激励加速度幅值的关系如表1所示。

**表 1  $j$  与无量纲脉冲激励幅值关系**  
**Table 1 Relationship between  $j$  and dimensionless shock parameters**

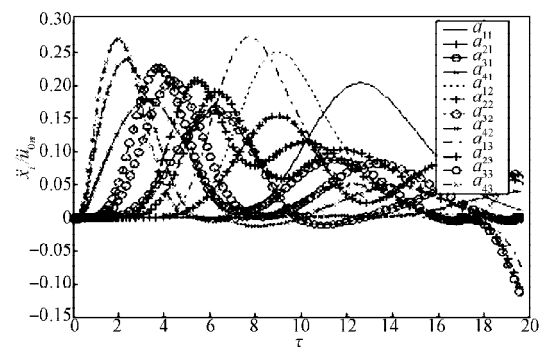
$j$	1	2	3
$\beta \ddot{u}_{0m}$	0.01	0.05	0.1
$\tau_0$	1	1	1



a) 2层



b) 3层



c) 4层

**图 2 半正弦波激励下多层果品加速度响应曲线**

**Fig. 2 Acceleration response of multi-layer fruits under the action of half-sine acceleration pulse**

由图2可知,在半正弦激励下,多层果品冲击响应一般具有如下规律:

1) 相同的激励下,中间各层果品的加速度小于顶层和底层,这主要是由于上下果品层对中间果品层的缓冲及约束引起的;

2) 随着无量纲脉冲激励幅值的增加,各果品层响应加速度均增大;

3) 相同的激励下,响应加速度达到峰值的时间自底层往上依次增加,这主要是由多层堆码系统的传递特性决定的;

4) 随着无量纲脉冲激励幅值的增加,各果品层达到响应加速度峰值的时间均减小;

5) 比较图2中的3个分图,不难发现,在相同的激励下,随着果品堆放层数的增加,顶层果品的响应加速度减小,这主要是由于下层果品的综合缓冲效果降低引起的。

## 4 结语

果品损伤已成为制约我国农业经济发展的重要因素之一,冲击作为引起果品损伤的一个主要原因,应予以控制。在本文所建立的多层果品冲击动力学模型中,果品特征参数、脉冲激励幅值、层数等对各层果品加速度响应峰值、达到峰值的时间等损伤指标影响显著。该结论为揭示多层堆码果品冲击损伤机理及相关理论分析奠定了一定的理论基础,同时为果品减损技术研究提供了一定的理论依据。

### 参考文献:

- [1] Holt J E, School D. Prediction of Bruising in Impacted Multilayer Apple[J]. Transaction of the ASAE, 1981, 24 (1): 242-247.
- [2] Holt J E, School D. Mechanics of Failure in Fruits and Vegetables[J]. Journal of Texture Studies, 1982, 13: 83-97.
- [3] School D, Holt J E. Impact Bruising in 3 Apple Arrangements[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27 (1): 507-512.
- [4] Holt J E, School D. Package Protection and Energy Dissipation in Apple Packs[J]. Scientia Horticulture, 1984, 24: 165-176.
- [5] Jones C S, Holt J E, School D. A Model to Predict Damage to Horticultural Produce during Transport[J]. J. Agric. Engng. Res., 1991, 50 (4): 259-272.
- [6] Singh S P, Gary Burgess, Xu Ming. Bruising of Apple in Four Different Packages Using Simulated Truck Vibration [J]. Packaging Technology and Science, 1992, 5: 145-150.
- [7] Singh S P, Xu M. Bruising in Apples as a Function of Truck Vibration and Packaging[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1993, 9(5): 455-460.
- [8] 王 军, 卢立新, 王志伟, 等. 矩形脉冲激励下正切型包装系统关键部件破损曲面研究[J]. 包装学报, 2010, 2 (1): 14-17.  
Wang Jun, Lu Lixin, Wang Zhiwei, et al. Damage Boundary Surface of Tangent Nonlinear Packaging System

- with Critical Component[J]. *Packaging Journal*, 2010, 2 (1): 14-17.
- [9] 刘亮,王军,陈安军.路面基础激励下分数导数型包装系统核心部件振动特性研究[J].*包装学报*,2010,2 (4): 14-17.  
Liu Liang, Wang Jun, Chen Anjun. Vibration Suppression Characteristics of Two-Degree-of-Freedom Packaging System with Fractional Derivative Constitutive Relation[J]. *Packaging Journal*, 2010, 2(4): 14-17.
- [10] Hostens I, Anthonis J, Kennes P, et al. Six-Degrees-of-Freedom Test Rig Design for Simulation of Mobile Agricultural Machinery Vibrations[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 77(2): 155-169.
- [11] Humann D D. Analysis of Stress during Impact of Fruit Considered to be Viscoelastic[J]. *Transactions of the ASAE*, 1970, 13: 893-899.
- [12] Peleg K. Biomechanics of Fruits and Vegetables[J]. *Journal of Biomechanics*, 1987, 18: 843-862.
- [13] Kuwabara G, Kono K. Restitution Coefficient in a Collision between Two Spheres[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1987, 26(8): 1230-1233.
- [14] Brilliantov N V, Spahn F, Hertzsch J-M, et al. Model for Collisions in Granular Gases[J]. *Physical Review E*, 1996, 53(5): 5382-5392.
- [15] Ramírez R, Poschel T, Brilliantov N V, et al. Coefficient of Restitution of Colliding Viscoelastic Spheres[J]. *Phys. Rev. E*, 1999, 60: 4465-4472.
- [16] Gran S, Galili N. Rheological Model of Fruit Collision with an Elastic Plate[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 75: 139-147.
- [17] Tijskens E, Ramon H, De Baerdemaekfr J. Discrete Element Modelling for Process Simulation in Agriculture [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266: 493-514.
- [18] Van Zeebroeck M, Dintwa E, Tijskens E, et al. Determining Tangential Contact Force Model Parameters for Viscoelastic Materials (Apples) Using a Rheometer[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 33: 111-125.
- [19] Van Zeebroeck M, Tijskens E, Van Liedekerke P, et al. Determination of the Dynamical Behaviour of Biological Materials during Impact Using a Pendulum Device[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266, 465-480.
- [20] 王俊,杜尧舜,王剑平,等.梨的各向机械特性差异[J].*农业机械学报*,2000,16(6): 58-60, 64.  
Wang Jun, Du Yaoshun, Wang Jianping, et al. Anisotropic Mechanical Properties of Pears[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(6): 58-60, 64.
- [21] 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 Jianping, Wang Jun, Chen Shanfeng, et al. Impact Characteristics of Huanghua Pear[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18 (6): 32-35.
- [22] 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 Shanfeng, Zhou Yibin, Wang Jun, et al. 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.

(责任编辑:廖友媛)