

矩形脉冲激励下正切型包装系统 关键部件破损曲面研究

王 军^{1,2}, 卢立新^{1,2}, 王志伟³, 陈安军^{1,2}, 唐亚丽^{1,2}

(1. 江南大学 包装工程系, 江苏 无锡 214122; 2. 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;
3. 暨南大学 包装工程研究所, 广东 珠海 519070)

摘要: 研究了正切包装系统的关键部件在矩形脉冲激励下的冲击破损评价方法。建立了二自由度非线性产品包装系统模型, 得到了该系统的冲击动力学方程, 并进行了数值求解。依据数值求解结果得到该系统的关键部件破损边界曲线和破损边界曲面, 并讨论了频率比、阻尼、脉冲激励幅值和系统参数对关键部件破损边界的影响规律。结果表明, 频率比、阻尼、脉冲激励幅值和系统参数对关键部件破损边界影响显著。

关键词: 关键部件; 非线性; 二自由度; 矩形脉冲; 破损边界

中图分类号: TB485.1; O328

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2010)01-0014-04

Damage Boundary Surface of Tangent Nonlinear Packaging System with Critical Component

Wang Jun^{1,2}, Lu Lixin^{1,2}, Wang Zhiwei³, Chen Anjun^{1,2}, Tang Yali^{1,2}

(1. Department of Packaging Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China ;

2. Key Laboratory of Food Packaging Techniques & Safety of China National Packaging Corporation, Wuxi Jiangsu 214122, China;

3. Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai Guangdong 519070, China)

Abstract: The damage potential and evaluation method of a tangent nonlinear packaging system with critical component was investigated under the action of rectangular acceleration pulse. The dynamical model of the system was developed, and the numerical results of the dynamical equations were got. Based on the results, the damage boundary curve and damage boundary surface of critical component were obtained. And the effect of the frequency ratio, the damping ratio, the pulse peak acceleration in addition to the defined system parameter on the damage boundary of critical component were discussed. It shows that all of their effects are significant. The results lead to some insights into the design of cushioning packaging.

Key words: Critical component; nonlinear; double-degree-of-freedom; rectangular acceleration pulse; damage boundary surface

0 引言

Newton^[1]破损边界理论及随后改进的疲劳破损边界^[2]、位移损坏边界^[3]、跌落损伤边界^[4]等一系列破损

评价方法是指导缓冲包装设计的重要依据。然而实际上, 大多数产品, 尤其是机电产品, 往往包含大量元件形成复杂结构。对这类产品而言, 传统的将产品包装系统处理为单自由度系统的方法在应用上具有明显

收稿日期: 2009-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775100), 江南大学引进人才启动基金资助项目(1075210372090700), 江南大学青年科学基金资助项目(1075210322091060)

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

E-mail: packie@126.com

的局限性。考虑到产品破损往往首先出现在关键部件, 王军等人^[5-6]以正切系统为例, 研究其在半正弦脉冲激励下的冲击响应特征, 提出了三维冲击谱和破损边界曲面的新概念。实际运输中, 矩形波激励最为苛刻, 研究包装系统在矩形激励下的冲击响应特征具有重要意义。因此, 文中在建立考虑关键部件的正切型非线性包装系统模型的基础上, 研究其在矩形脉冲激励下的冲击特性, 以期产品的缓冲包装设计提供一定的理论基础。

1 包装系统模型与运动方程及其无量纲化

本研究中, 考虑关键部件的产品包装系统模型如图1所示。图1中, m_1 、 m_2 分别表示关键部件和产品主体的质量; k_1 、 k_2 分别表示关键部件与主体连接部件及缓冲垫刚度系数; c_1 、 c_2 分别表示关键部件与主体连接部及缓冲垫阻尼系数; x_1 、 x_2 为关键部件和主体的位移, u 为基础位移。

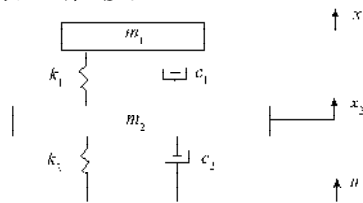


图1 产品包装系统动力学模型

Fig. 1 Product packaging dynamical model

对于正切型包装材料, 其力与变形间的关系应满足下式:

$$f(x) = \frac{2k_2 d_b}{\pi} \tan \frac{\pi}{2d_b} x + c_3 x'$$

式中: d_b 为材料压缩极限。

矩形脉冲作为最严酷的实际运输工况的脉冲形式, 其数学表达式可写为:

$$u'' = u''_{0m} \Delta H(t, t_0) \tag{1}$$

式中: t_0 为脉冲作用时间。

依据以上分析, 可得系统在半正弦脉冲激励下的动力学方程为:

$$\begin{aligned} m_1 x_1'' &= k_1 (x_2 - x_1) + c_1 (x_2' - x_1'), \\ m_2 x_2'' &= \frac{2k_2 d_b}{\pi} \tan \left[\frac{\pi}{2d_b} (u - x_2) \right] + c_2 (u' - x_2') - \\ & k_1 (x_2 - x_1) - c_1 (x_2' - x_1') \end{aligned} \tag{2}$$

该动力学方程的初始条件为:

$$x_{1,2}(0) = 0, x'_{1,2}(0) = 0$$

引入变量 δ_1 、 δ_2 和 τ , 且

$$\delta_1 = (x_2 - x_1)/L, \delta_2 = (u - x_2)/L, \tau = t/T;$$

并且令:

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{m_2/k_2}, L = 2d_b/\pi, \omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}, \omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}, \\ \lambda_1 &= \omega_1/\omega_2, \lambda_2 = m_1/m_2, \zeta_1 = c_1/2\sqrt{m_1 k_1}, \zeta_2 = c_2/2\sqrt{m_2 k_2} \end{aligned}$$

可得到系统的无量纲化运动方程为:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_1 &= \tan \delta_2 + 2\zeta_2 \dot{\delta}_2 - (\lambda + 1) \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \delta_1 - 2(\lambda + 1) \frac{\omega_1}{\omega_2} \zeta_1 \dot{\delta}_1, \\ \ddot{\delta}_2 &= \ddot{U} + \lambda_2 \lambda_1^2 \delta_1 + 2\lambda_2 \lambda_1 \zeta_1 \dot{\delta}_1 - \tan \delta_2 - 2\zeta_2 \dot{\delta}_2 \end{aligned} \tag{3}$$

且其初始条件为: $\delta_{1,2}(0) = 0, \dot{\delta}_{1,2}(0) = 0$ 。

其中: $\ddot{U} = \beta u''_{0m} \Delta H(\tau, \tau_0)$, β 为系统特征参数。

2 包装系统模型冲击响应特性

采用龙格-库塔法求解方程(3), 依据求解结果, 分析系统模型中关键部件 m_1 在矩形脉冲下的冲击响应特性。

2.1 破损边界曲线

图2给出了当系统模型中 $\beta u''_{0m} = 0.5, \lambda_2 = 0.1$ 时, 不同频率比 λ_1 下的正切包装系统关键部件破损边界曲线。图中的 Γ_1 表示无量纲临界加速度, 且 $\Gamma_1 = \beta u''_{0m} / \alpha_1$; V_1 表示无量纲临界速度, 且 $V_1 = \beta u''_{0m} \tau_0 / \alpha_1$ 。

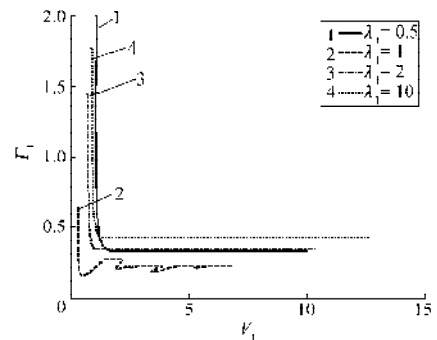


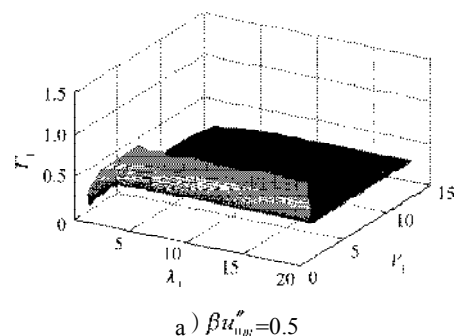
图2 破损边界曲线

Fig. 2 Damage boundary curve

由图2可看出, 包装系统关键部件破损边界对频率比十分敏感, 在不同的频率比条件下, 破损边界差异较大。

2.2 破损边界曲面

根据2.1中的结论, 选取频率比 λ_1 、无量纲临界速度 V_1 和无量纲临界加速度 Γ_1 3个量作为坐标参量, 构建关键部件破损边界曲面, 用于评判关键部件冲击破损特性。图3为不同脉冲幅值下的关键部件破损边界曲面。



a) $\beta u''_{0m} = 0.5$

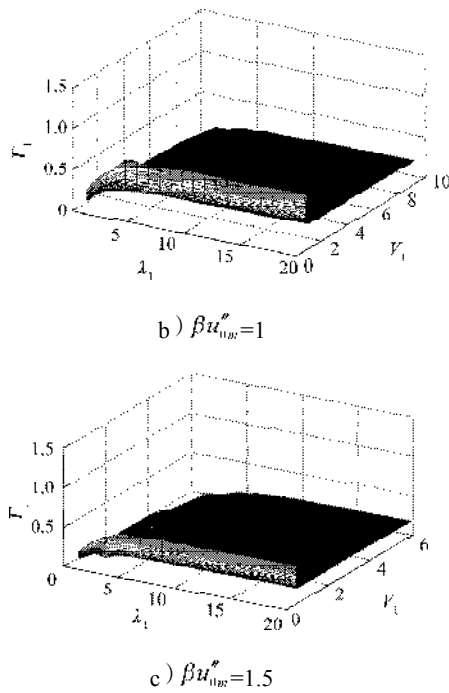


图3 不同脉冲幅值下的关键部件破损边界曲面
Fig.3 Damage boundary surface of critical component

2.4 破损曲面影响因素

根据公式(2)、(3)可知,影响包装系统关键部件冲击的响应因素除了应考虑无量纲脉冲幅值(参见图3)外,还应考虑系统中关键部件与主体间的等效连接阻尼和缓冲材料阻尼。

2.4.1 连接部件阻尼

图4给出了当包装系统中 $\beta u_{0m}^* = 0.5, \lambda_2 = 0.1, \zeta_2 = 0$ 时,不同 ζ_1 下的关键部件破损曲面。

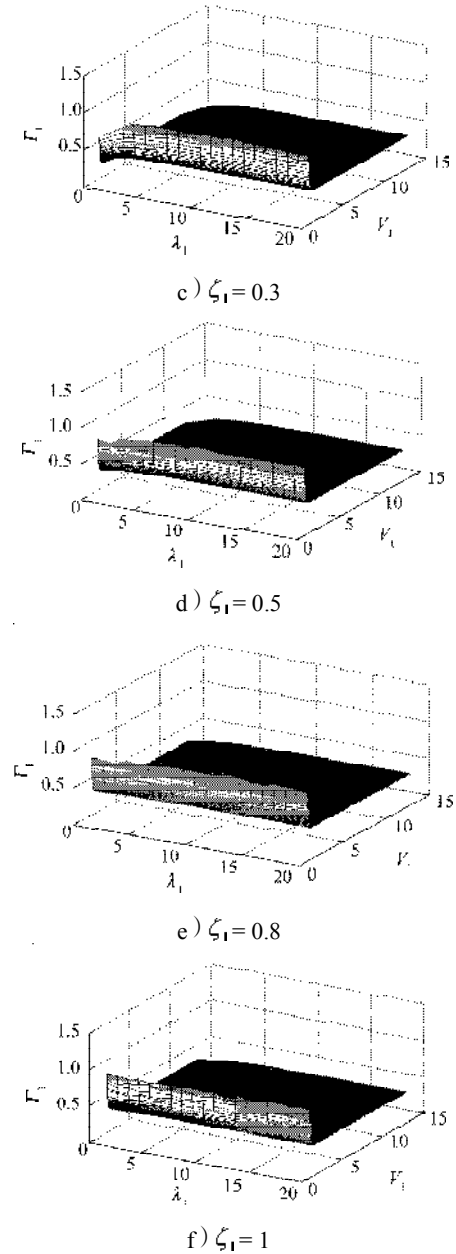
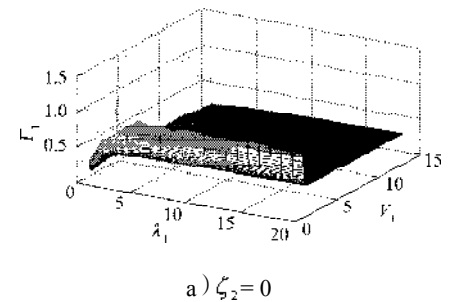
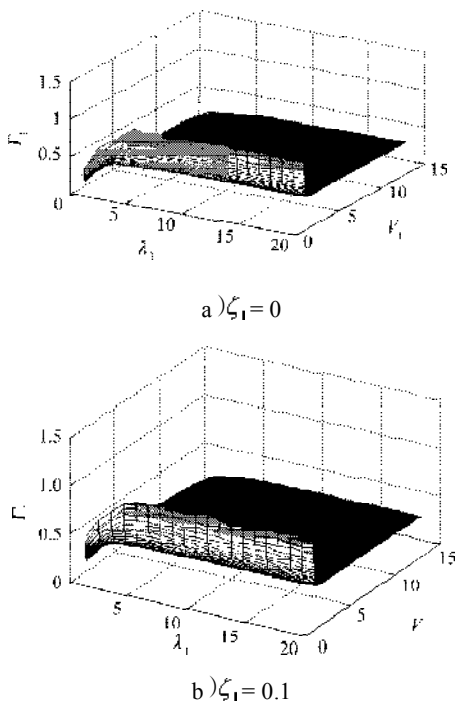


图4 不同连接部阻尼下关键部件破损曲面
Fig.4 Effect of damping ratio of critical component on damage boundary surface of critical component

2.4.2 材料阻尼

图5给出了当包装系统中 $\beta u_{0m}^* = 0.5, \lambda_2 = 0.1, \zeta_1 = 0$ 时,不同 ζ_2 下的关键部件破损曲面。



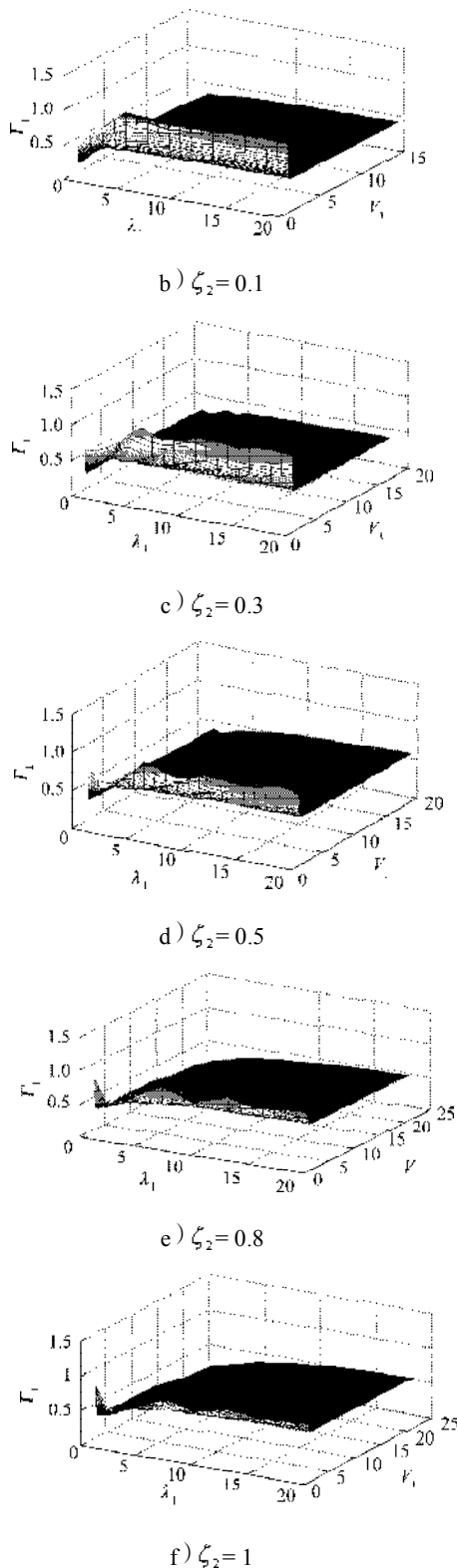


图5 不同材料阻尼下关键部件破损曲面

Fig. 5 Effect of damping ratio of cushion on damage boundary surface of critical component

3 结果与讨论

包装系统破损曲面能很好地描述系统关键部件的破损特性, 综合以上结果可得到如下结论:

1) 由图3可看出, 在相同的脉冲幅值下, 包装系统关键部件的破损边界与频率比有关, 且存在敏感频率比使得破损区增大的现象, 故包装设计时应尽量予以避开;

2) 随着无量纲脉冲幅值的增加, 包装系统关键部件的加速度边界与速度边界均向着减小的方向移动, 因而可知, 减小系统参数能有效增大安全区;

3) 由图4可看出, 在低频率比处, 增大 ζ_1 能有效拓宽安全区; 而在高频率比处, ζ_1 影响不明显;

4) 随着 ζ_2 的增大, 在低频率比处(文中条件下, $\lambda_1 < 1$), 包装系统关键部件安全区增大; 而在高频率比处, 关键部件加速度边界上升, 速度边界下降。

参考文献:

- [1] Newton R E. Fragility Assessment Theory and Practice. Monterey Research Laboratory[M]. California: Inc. Monterey, 1968.
- [2] Burgess G J. Product Fragility and Damage Boundary Theory [J]. Packaging Technology and Science, 1988, 15(10): 5-10.
- [3] Wang Z L, Wu C F, Xi D C. Damage Boundary of a Packaging System under Rectangular Pulse Excitation[J]. Packaging Technology and Science, 1998, 11: 189-202.
- [4] Lu L X, Wang Z W. Dropping Bruise Fragility and Bruise Boundary of Apple Fruit[J]. Transaction of ASABE, 2007, 50 (4): 1323-1329.
- [5] 王军, 王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损件(关键部件)的正切型包装系统冲击特性研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 167-168, 173.
Wang Jun, Wang Zhiwei. 3-Dimensional Shock Response Spectra Characterizing Shock Response of a Tangent Packaging System with Critical Components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1): 167-168, 173.
- [6] 王军, 王志伟. 考虑易损件(关键部件)的正切型包装系统冲击破损边界曲面研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27 (2): 166-167, 185.
Wang Jun, Wang Zhiwei. Damage Boundary Surface of a Tangent Nonlinear Packaging System with Critical Component [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 166-167, 185.

(责任编辑: 廖友媛)