

矩形脉冲激励下双曲正切包装系统非线性动力学特性研究

洪翔¹, 卢立新^{1,2}, 王军^{1,2}

(1. 江南大学, 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, 无锡 214122)

摘要: 建立了二自由度非线性包装系统模型, 得到了冲击动力学方程并对其进行了数值求解, 在此基础上, 研究了带有关键部件双曲正切包装系统的冲击响应特性。矩形脉冲为各种脉冲激励中最严酷的, 因此选矩形脉冲为研究对象, 得到了关键部件的三维冲击谱图。从谱图中进一步讨论了频率比、脉冲激励幅值、阻尼和系统参数对关键部件冲击谱的影响规律, 结果表明频率比、脉冲激励幅值、阻尼和系统参数对关键部件冲击响应峰值均有显著影响。为产品缓冲包装设计提供一定的科学依据。

关键词: 关键部件; 非线性; 矩形脉冲; 二自由度; 三维冲击谱

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)17-0001-03

Nonlinear Dynamic Characteristics Research of Hyperbolic Tangent Packaging System under the Action of Rectangular Acceleration Pulse

HONG Xiang¹, LULi-xin^{1,2}, WANG Jun^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Technology and Safety, Wuxi 214122, China)

Abstract: Two-degree-of-freedom nonlinear packaging system model was established. The shock dynamic equations were obtained and their numerical solutions were solved. The shock response characteristics of hyperbolic tangent packaging system with critical component were investigated. The rectangular acceleration pulse was chosen in the experiment due to its highest severity among all kinds of pulse. The influences of frequency ratio, amplitude of pulse excitation, damp, and system parameters on shock response of critical components were studied. The results showed that frequency ratio, amplitude of pulse excitation, damp, and system parameters all have significant influence on the peak value of shock response of critical components. The purpose was to provide reference on cushion packaging design.

Key words: critical component; nonlinear; rectangular acceleration pulse; double-degree-of-freedom; three-dimensional shock spectra

Newton^[1]的破损边界理论是基于单自由度假设的基础上提出的, 长期以来一直被运输包装从业人员奉为经典。然而, 很多产品尤其是机电、电子类产品, 元件数量很多, 其内部系统结构十分复杂, 光从自由度上来讲就不仅仅是单自由度这么简单。对这类产品而言, 传统的研究方法在应用上具有明显的局限性。王军等人^[2-3]以正切型包装系统为例, 提出了破损边界曲面和三维冲击谱的新概念^[4-7]。在各种包装系统中, 矩形脉冲为各种脉冲激励中最为严酷的,

因此笔者用矩形脉冲激励作为激励, 研究双曲正切型包装系统关键部件的非线性动力学特性, 为产品缓冲包装设计提供一定理论依据。

1 包装系统模型的建立

实际中使用的某些缓冲材料, 如瓦楞纸板、蜂窝纸板、EPS等, 其载荷-形变曲线属于双曲正切型, 见图1。这类缓冲材料也是运输包装中最为常用的缓

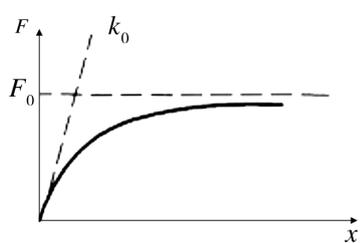


图1 双曲正切型缓冲材料的载荷-变形曲线
Fig. 1 Load-deformation curve of hyperbolic tangent cushioning materials

冲材料,因此,研究双曲正切型包装材料具有很大的实际意义。由于相同条件下矩形脉冲在各种脉冲激励中所引起的响应最为强烈,故与实际情况相比,矩形脉冲下双曲正切型系统的响应更加剧烈,按照此结果设计缓冲包装将更有利于产品的保护。

对带有关键部件的产品,建立其包装系统动力学模型,见图2^[5-6]。其中: m_1, m_2 分别表示关键部件和

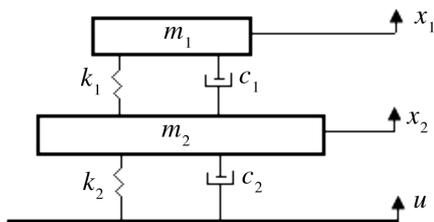


图2 考虑关键部件的产品包装系统动力学模型
Fig. 2 Dynamic model of packaging system with critical components

主产品的质量; c_1, k_1 分别为关键部件和主产品之间连接部(以下简称“连接部”)的阻尼和等效弹性系数; c_2, k_2 分别为缓冲衬垫的阻尼和弹性系数^[6-7]。双曲正切型包装材料的力与形变间的关系满足: $f(x) =$

$F_0 \tanh \frac{k_2 x}{F_0} + c_2 \dot{x}$ 。选定研究的脉冲激励为矩形脉冲,矩形脉冲数学表达式可写作:

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

根据以上假设和定义,可得整个包装系统的运动方程为:

$$m_1 \ddot{x}_1 = k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = F_0 \tanh \left[\frac{k_0}{F_0} (u - x_2) \right] + c_2(\dot{u} - \dot{x}_2) - k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

式中的初始条件为: $x_{1,2}(0) = 0; \dot{x}_{1,2}(0) = 0$ 。引

$$\lambda: \delta_1 = \frac{x_2 - x_1}{L}; \delta_2 = \frac{u - x_2}{L}; \tau = \frac{t}{T}。并令: T = \sqrt{m_2/k_2}; L = \frac{F_0}{k_2}; \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}; \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}; \zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{m_1 k_1}}; \zeta_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{m_2 k_2}}; \lambda_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \lambda_2 = \frac{m_1}{m_2}。$$

将上述运动方程进行无量纲化,可得:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_1 &= \tanh \delta_2 + 2\zeta_2 \dot{\delta}_2 - (\lambda_2 + 1)\lambda_1^2 \delta_1 - 2(\lambda_2 + 1)\lambda_1 \zeta_1 \dot{\delta}_1 \\ \dot{\delta}_2 &= \dot{U} + \lambda_2 \lambda_1^2 \delta_1 + 2\lambda_1 \lambda_2 \zeta_1 \dot{\delta}_1 - \tanh \delta_2 - 2\zeta_2 \dot{\delta}_2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中的初始条件为: $\delta_{1,2}(0) = 0, \dot{\delta}_{1,2}(0) = 0$ 。无量纲方程中: $\dot{U} = \beta u''_{0m} \Delta H(\tau, \tau_0)$ 。

在此,定义 $\beta = \frac{T^2}{L}$ 为系统特征参数^[5]。

2 冲击响应特性分析

对式(3)应用龙格-库塔法求解,可以依据求解结果分析关键部件 m_1 在矩形脉冲激励下的非线性动力学特性^[6]。

2.1 传统二维冲击谱

当 $\beta u''_{0m} = 0.5, \lambda_2 = 0.1$ 时,在不同频率比 λ_1 的影响下,关键部件的传统二维冲击响应谱见图3。其

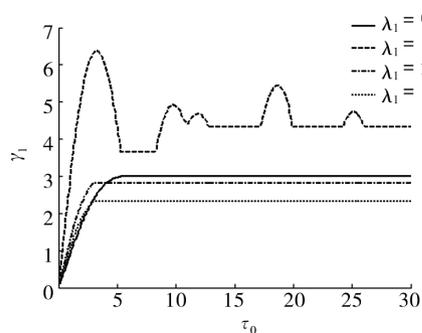


图3 关键部件传统冲击谱

Fig. 3 Shock response spectrum of critical components

中: $\gamma_1 = \dot{x}'_{1m} / u''_{0m}$ 为关键部件的加速度响应幅值 \dot{x}'_{1m} 与脉冲激励幅值 u''_{0m} 之间的比例关系^[4]; $\tau_0 = \omega_2 t_0$, 为无量纲脉冲时间,不同的频率比将使关键部件冲击响应产生很大差异。

2.2 三维冲击谱

三维冲击谱^[2-3]与传统二维冲击谱的不同,在于它针对带有关键部件包装系统的特点,引入了频率比对关键部件冲击响应影响的概念,使3个参数在同一个坐标系中表征,因而可以更全面地反映关键部件冲击响应特点^[6-7]。当 $\lambda_2 = 0.1$ 时,在不同的激励幅值

$\beta u_{0m}''$ 的影响下,关键部件的三维冲击响应谱,见图 4。

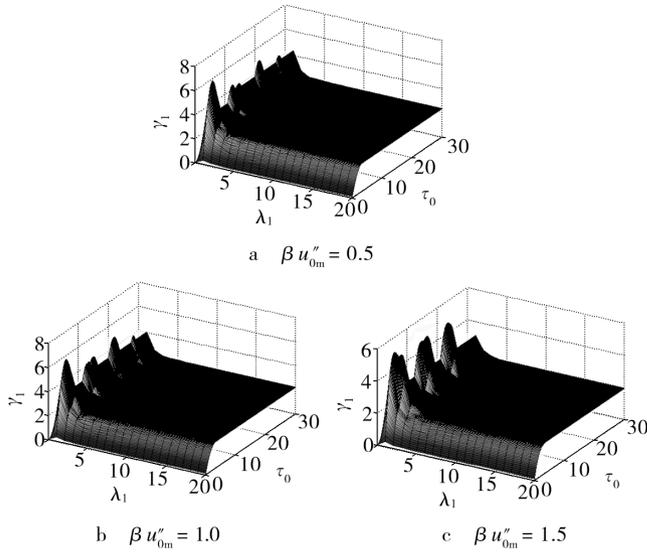


图 4 关键部件三维冲击谱

Fig. 4 3-D shock response spectrum of critical components

2.3 冲击响应影响因素

根据式(2)和(3)可知,除了无量纲脉冲幅值会对关键部件冲击响应产生影响外,连接部阻尼以及缓冲材料阻尼也必须加以考虑。

2.3.1 连接部阻尼

当 $\beta u_{0m}'' = 0.5, \lambda_2 = 0.1, \zeta_2 = 0$ 时,分别选择不同的连接部阻尼 ζ_1 进行试验,最终得到关键部件的三维冲击谱,见图 5。其中, γ_1 同样为关键部件的加速度响应幅值与脉冲激励幅值之间的比例关系。

2.3.2 材料阻尼

当 $\beta u_{0m}'' = 0.5, \lambda_2 = 0.1, \zeta_1 = 0$ 时,在不同 ζ_2 影响下,关键部件的三维冲击谱见图 6。

3 结果与讨论

1) 由图 3 可知,频率比 λ_1 在关键部件和主体分离的状态下,对关键部件冲击谱有很大影响。

2) 由图 4 可知,无量纲激励幅值 $\beta u_{0m}''$ 的增加会引起关键部件冲击谱峰值减小,而系统特征参数 β 与无量纲激励幅值 $\beta u_{0m}''$ 成正比,故增大参数 β 能有效降低关键部件冲击谱峰值。

3) 由图 5 和 6 可知,随着连接部阻尼或材料阻尼的增大,关键部件在低频率比处的波动趋于平缓。具体来说,在低频率比(文中条件: $\lambda_1 < 4$) 附近, ζ_1 的增

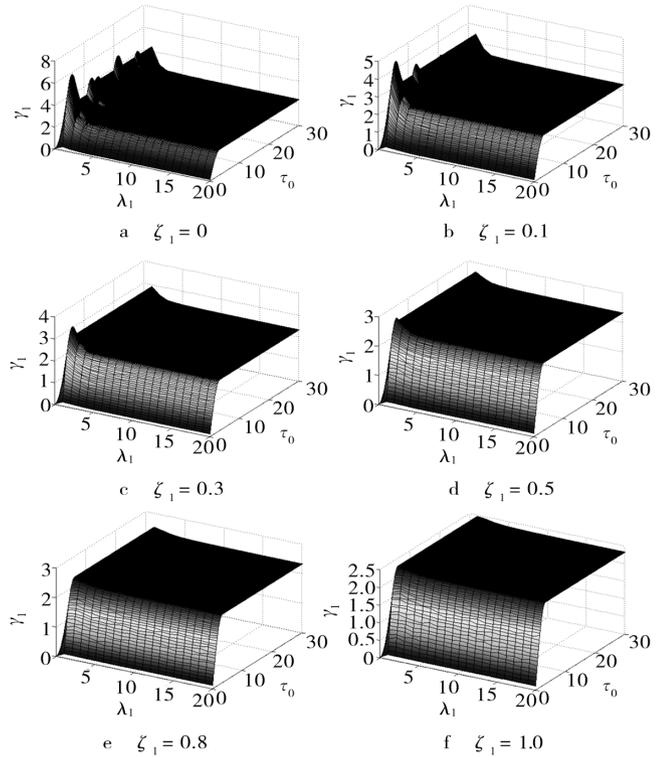


图 5 不同连接部阻尼对关键部件三维冲击响应谱的影响
Fig. 5 3-D shock response spectrum of critical components at different damping ratio of joint part

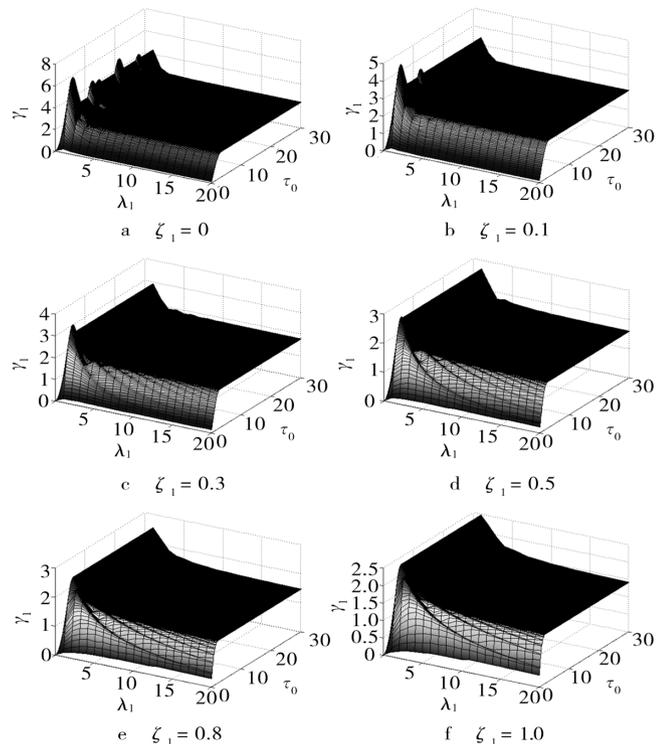


图 6 不同材料阻尼对关键部件三维冲击响应谱的影响
Fig. 6 3-D shock response spectrum of critical components at different damping ratio of cushioning pad

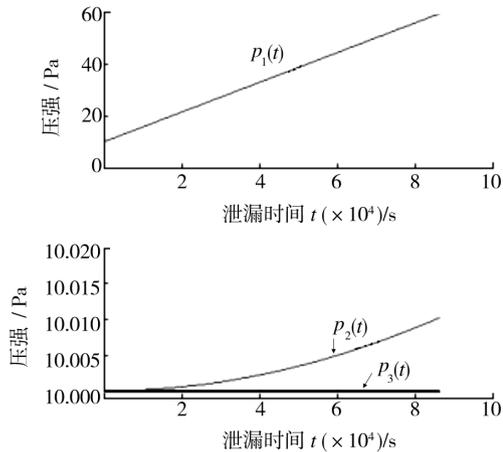


图 6 3 层密封结构的压强检测值

Fig. 6 Pressure detection value of 3 layers sealed structure

好地密封效果,而且其测试具有多功能性。

4 结语

提出了 3 层密封结构的薄膜透气性测试装置模型,给出了薄膜透气性测试装置 3 层密封结构的数学模型和压强变化的特性,并给出了相应的仿真结果,为薄膜透气性测试装置 3 层密封结构的实际应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 赵江. 压差法是药品用软包装材料透气性测试的首选方法[J]. 中国制药装备, 2008(2): 30-32.
- [2] 康亚芬, 汪仁煌. 透气性测试技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009.
- [3] 刘孝锋, 汪仁煌. 基于压差法的薄膜透气性测试装置研究现状[J]. 包装工程, 2011, 32(9): 115-118.
- [4] LIU Xiao-feng, WANG Ren-huang, LI Xue-cong, et al. Research on Sealed Structure for Gas Permeability Computer Test Device[C]. 2010 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application (PACIA2010), Wuhan, China, 2010: 324-328.
- [5] GB/T 1038-2000, 塑料薄膜和薄片气体透过量试验方法——压差法[S].
- [6] 越后纪康, 奥村英树, 佐谷裕司. 透气性测量方法及透气性测量装置: 日本, 200310124712. 6[P]. 2004-01-07.
- [7] 刘阳, 于建平. 多极串联密封系统泄漏仿真与实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2005(2): 127-133.
- [8] 王晓东. 真空技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

(上接第 3 页)

大可以显著降低关键部件冲击谱峰值;而在高频率比附近, ζ_1 的变化对关键部件的冲击谱峰值的影响不明显。同样,增大 ζ_2 能有效降低关键部件冲击谱峰值。

当连接部刚度较小时,提高连接部阻尼或缓冲材料阻尼都可以减小关键部件的响应,从而对关键部件起到防护作用;而当连接部刚度较大时,要想降低关键部件的响应,则必须提高缓冲材料阻尼。

参考文献:

- [1] NEWTON R E. Fragility Assessment Theory and Practice[R]. Monterey Research Laboratory, Inc. Monterey, California, 1968.
- [2] 王军, 王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损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.
- [3] 王军, 王志伟. 考虑易损件的正切型包装系统冲击破

边界曲面研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 166-167.

- [4] 王雷, 王志伟, 王军. 三次非线性包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 92-93.
- [5] 王军, 卢立新, 王志伟. 双曲正切包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 99-101.
- [6] 王军, 卢立新, 王志伟. 线性包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2010(2): 60-62.
- [7] 王军. 产品破损评价及其防护包装动力学理论研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [8] 王振林, 吴长富, 奚德昌. 物品包装系统位移损坏边界[J]. 振动工程学报, 1998, 11(4): 434-442.
- [9] WANG Z W, HU C Y. Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Nonlinear Package Cushioning System[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(5): 207-217.
- [10] 王怀奥, 刘壮, 高德. 矩形波冲击下瓦楞纸板缓冲包装衬垫的冲击响应[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 14-16.