

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.03.010

缓冲包装设计中构建破损边界曲线的新途径

宋宝丰, 袁志庆

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 多年的运输包装实践说明, 根据传统破损边界曲线 (DBC) 得到的产品脆值应用到缓冲包装设计时, 常会产生保守性, 导致过度包装及包装材料的浪费等。根据瞬态振动理论中冲击响应谱 (SRS) 的基本特性, 采用 Biot 模型代表一个产品的结构系统模型, 则该结构系统是由一系列单自由度 (SDOF) 质量-弹簧振子所组成, 再获得其 SRS。通过现代的实验装置及先进测头可以获得结构系统中易损元件的 SRS。然后根据工程力学中动荷系数的概念, 在上述易损元件 SRS 基础上, 设定易损元件危险点处最大应力达到弹性极限时, SRS 表示的最大响应加速度值即达到了临界值, 在此基础上绘制新的 DBC, 据此可求得基于响应加速度的新脆值。此新脆值使用在缓冲包装设计时, 将会避免上述传统脆值可能带来的保守性。

关键词: 缓冲设计; 运输包装; 破损边界曲线

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)03-0046-05

A New Way of Constructing Damage Boundary Curve in Cushioning Packaging Design

Song Baofeng, Yuan Zhiqing

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Distribution packaging practices demonstrate over-package or material wastes due to the conservatism in fragility according to traditional damage boundary curve(DBC) applied in cushioning packaging design. Based on the basic features of shock response spectrum(SRS) in vibration theory, the model of Maurice Biot(Biot Model) is put forward and used as a structural model by taking the product structure as a vibration system consisting of a number of single degree of freedom(SDOF) mass-spring oscillators. Through testing and measuring by use of advanced electronic equipments with automatic signal analysis devices, the SRS of elected fragile elements in the structural system can be obtained. Then from the concept of dynamic coefficient(G factor) in engineering mechanics, the G factor is just nearly equal to the fragility G_s of the element when the maximum stress in the element dangerous point reaches the elastic limit of the element material. That means each G_s in the new DBC based on responses can be drawn graphically indicating the relationship between critical maximum response accelerations and natural frequencies of the key parts in products system. According to the new DBC, the new fragility based on response acceleration of a key part in product system can be acquired if the natural frequency of the key part is known. This new fragility is certainly more suitable to cushioning packaging designs because the conservatism factor in traditional fragility is eliminated.

Key words: cushioning design; transportation packaging; damage boundary curve(DBC)

收稿日期: 2012-12-10

作者简介: 宋宝丰 (1939-), 男, 上海人, 湖南工业大学教授, 主要从事包装动力学及包装结构设计等方面的研究,

E-mail: songbf402@tom.com

1 背景与问题

20世纪60年代末, 美国学者R·E·纽顿在R·D·明德林建立的脆值定义^[1]的基础上, 首次提出了关于破损边界的概念^[2-3]; 20世纪70年代初期, 破损边界理论在美国密歇根州立大学包装学院的实验室里得到了实验验证。此后不久, 这一理论在包装企业界获得了普遍认可和应用, 并且被视为确定商品包装设计中脆值计算的有效方法^[4]。同时, 美国实验与材料协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)制定出了ASTM D3332《使用冲击试验机确定产品机械冲击脆值的标准试验方法》的测试标准。从此, 破损边界曲线(damage boundary curve, DBC)的概念以及其测试方法在世界范围内得到了广泛的应用。多年来, 破损边界的理论和方法在运输包装设计中起到了重要的作用, 为合理设计缓冲包装结构提供了理论依据。定义并且确定产品的冲击脆值已经成为缓冲设计“五步法”中不可缺少的一个重要步骤^[5]。

自从DBC测试方法和ASTM D3332测试标准获得广泛应用以来, 据国内外包装行业的实践结果表明, 采用上述途径设计出的产品缓冲结构, 许多实际情况下, 当其经受的最大冲击加速度超过了临界最大冲击加速度(冲击脆值)时, 产品并未出现损伤。这就意味着传统的DBC理论和方法存在着保守性, 据此设计可能带来过度包装, 从而导致提高运输成本和浪费包装材料等。造成这种保守性的主要原因在于: 利用冲击试验机测定产品DBC时, 输入的激励信号为矩形冲击波或与之近似的梯形波, 该波形对于被试产品而言是最严酷的外界状态。但实际状态下, 输入的激励冲击波形都是十分复杂的, 即使在十分简化的条件下也只是近似于半正弦波形^[6]。

为了避免出现以上问题, 不少学者建议利用冲击响应谱(shock response spectrum, SRS)理论建立新的脆值定义^[7-12]。因为SRS曲线上的响应加速度最大值与输入冲击脉冲波的波形没有对应关系, 这样, 新的脆值可采用临界最大冲击响应加速度来定义。但是直到现在, 利用SRS理论定义新的脆值的工作尚未进入实用阶段, 因为要将新的脆值应用到具体的缓冲包装设计中, 还得有与之相配的破损边界曲线。因此, 本文提出以Biot模型作为包装产品结构系统的模型, 使用现代测试设备及仪器获取产品内部易损元件的SRS, 再通过工程力学中材料强度问题的动荷系数(G因子), 建立新的基于易损元件响应加速度的破损边界概念, 最后制订具体程序, 绘

制出产品结构系统的新DBC。

2 原理与特性

假设现有一个无阻尼单自由度(single degree of freedom, SDOF)质量-弹簧振子系统, 根据瞬态振动理论, 可以知到系统受冲击力后的一般运动方程如下:

$$\frac{1}{w_n^2} \ddot{v}(t) + v(t) = \xi(t), \quad (1)$$

式中: $\xi(t)$ 为系统底部的激励加速度;
 $v(t)$ 为系统质量上的响应加速度;
 w_n 为振子系统的自然频率。

式(1)的一般闭式解为

$$v(t) = w_n \int_0^t \xi(\tau) \sin w_n(t-\tau) d\tau. \quad (2)$$

除非系统底座上激励冲击脉冲是相当简单的函数形式, 否则式(2)都是通过数值积分进行求解。

现设有一简单产品结构系统的质量为 M , 落向地面(见图1), 其地面上受到的冲击激励加速度为 $\ddot{u}(t)$, 质量上产生的响应加速度为 $\ddot{x}(t)$, 根据式(2), 可以求得

$$\ddot{x}(t) = w_n \int_0^t \ddot{u}(\tau) \sin w_n(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

式(3)中 $w_n = \sqrt{k/m}$, 其中, k 为系统的弹簧常数。

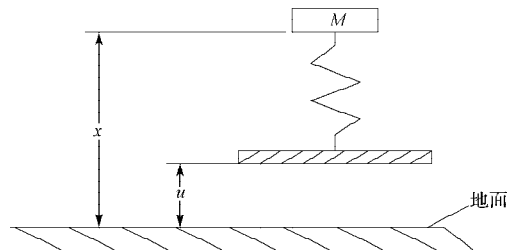


图1 无阻尼单自由度振子

Fig. 1 Non-damped SDOF oscillator

假设 $\ddot{u}(t)$ 是一个半正弦波形激励(见图2), 其表达式如下:

$$\ddot{u}(t) = \begin{cases} p_0 \sin w(t), & 0 < t < t_0; \\ 0, & t > t_0. \end{cases} \quad (4)$$

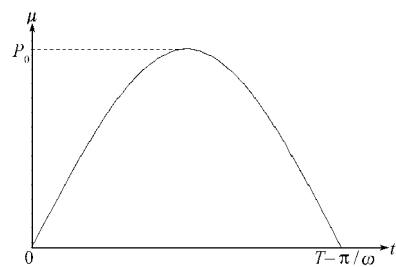


图2 半正弦形冲击激励波

Fig. 2 Half-sine shock impulse

将式(4)代入式(3)并进行运算,可以得到式(5)所示解答式:

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = \frac{P_0}{1 - \frac{w}{w_n}} \left(\sin wt - \frac{w}{w_n} \sin w_n t \right), & 0 < t < t_0; \\ \ddot{x}(t) = P_0 \frac{\frac{w_n}{w}}{1 - \left(\frac{w_n}{w}\right)^2} \left[\sin w_n + \sin w_n \left(t + \frac{\pi}{w} \right) \right], & t > t_0. \end{cases} \quad (5)$$

显然,接下来需要求得式(5)的最大值,可通过微分法求得,其最大值分别为:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{\max} = P_0 \frac{\frac{w_n}{w}}{\frac{w_n}{w} - 1} \sin \frac{2n\pi}{1 + \frac{w_n}{w}}, \\ n < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{w_n}{w} \right), n = 1, 2, 3, \dots; \end{cases} \quad (6-a)$$

$$\ddot{x}_{\max} = 2P_0 \frac{\frac{w_n}{w}}{1 - \left(\frac{w_n}{w}\right)^2} \cos \frac{\pi w_n}{2w}. \quad (6-b)$$

如果以 \ddot{x}_{\max}/P_0 为纵坐标, w_n/w 为横坐标,即可描绘无因次量的一种冲击响应谱。根据式(6)描绘的半正弦激励波的冲击响应谱如图3所示,即为在半正弦冲击激励下无阻尼单自由度质量-弹簧系统的冲击响应谱。

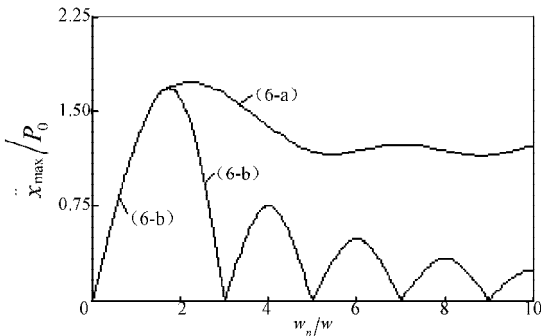


图3 半正弦激励波的冲击响应谱
Fig. 3 SRS of half-sine impulse

根据上述分析可知,冲击响应谱以图示方式表达了在一定冲击激励作用下,单自由度质量-弹簧系统产生的最大响应参数(加速度、速度或位移),在缓冲包装设计,常以加速度为研究参数。从上述冲击谱基本理论中,可以得到如下启示:冲击谱揭示了系统响应最大值与激励函数最大值以及频率和结构系统的自然频率之间的关系,而与激励函数的波形无关。这说明:不同的冲击激励波形可以产生相同的冲击谱,同一冲击谱也可以对应不同的冲击波形。此外,根据图3可知,冲击响应最大值无论

发生在冲击作用的内部还是发生在作用后的外部,两者数值差别很小。这两点特性给测试工作和SRS的获取带来了方便。

3 模型与应用

图4所示为Biot模型的结构示意图。

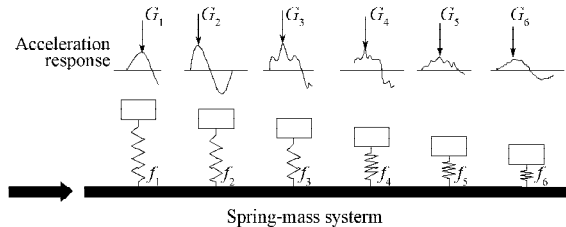


图4 Biot模型的结构示意图
Fig. 4 Diagram of Biot Model

图4表明,Biot模型的SRS由一系列SDOF振子在整个频率范围内的响应最大加速度值所构成^[11]。从图4可知,简化的包装件结构系统与Biot模型很相似,因为通常条件下,包装件结构系统可以简化为一系列无阻尼SDOF分系统。因此,对于包装件结构系统,可以应用Biot模型来分析其SRS,并且在此基础上讨论其DBC的构建。

现考虑将一个瞬态冲击脉冲施加到Biot模型的底部,其上装有一系列具有不同自然频率的无阻尼线性振子。同时,假设底部质量足够大,不至于影响到振子质量的运动状态,这一点也适用于一般包装产品结构的系统特征。假设在瞬态冲击脉冲下,振子1的最大响应加速度为 G_1 , 振子2的为 G_2 , 振子3的为 G_3 , ..., 把每一个振子的最大响应加速度与其所有自然频率的变化关系表示在二维坐标上,即可以形成此结构系统的SRS,如图5所示。这就是基于Biot模型的结构系统的SRS图示方法,显然该方法同样可以用于包装产品结构系统上。将此SRS与图3所示SRS相比较,可以发现:前者是后者的延伸和发展,而图3所示SRS只是图4所示诸多振子中的一个而已。

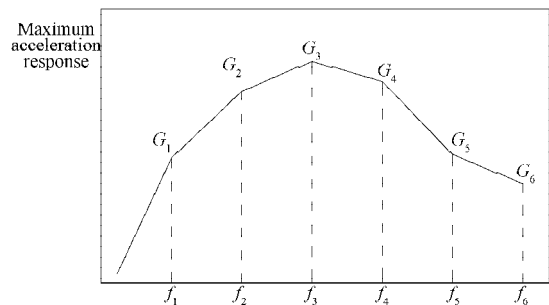


图5 Biot模型结构系统的SRS
Fig. 5 SRS of structural system of Biot Model

4 构建新 DBC

Biot 模型的优点之一是可以启示一个产品结构系统内部元件的 SRS 的测试途径。假设图 4 所示的质量-弹簧系统模型可以被认为是一个产品结构系统,其中在组成的诸多机电元件中包括若干个易损元件。缓冲包装设计的主要目的显然是为了保护其中任一易损元件在冲击载荷作用下免受损伤。根据 Biot 模型所得的结构系统,为 SRS 只表示在一定的冲击脉冲下一系列单自由度质量-弹簧系统的响应参数,但是不能表示出是哪一个易损元件可能会受到损伤。这就表明这种 SRS 不能起到类似于传统 DBC 所起到的指示是否安全的作用,而对于具体的缓冲包装而言,无具体意义。

当然,利用 Biot 模型,通过破坏性试验也可以得到基于响应参数的新 DBC,但是其试验之复杂、成本之高以及效率之低下是不言而喻的。因此,本文根据工程力学原理,提出一种非破坏性的方法来构建基于响应参数的新 DBC。如果已经根据 Biot 模型绘制出了产品结构系统的 SRS,现需要在已知其 SRS 的基础上得到这个产品结构系统的新 DBC。假设在该系统中已经确定了某几个易损元件(分系统)。则可以根据 Biot 模型,通过试验得出这些易损元件的最大响应加速度 $a_{m_1}, a_{m_2}, a_{m_3}, \dots$, 据此可以求得其动态因子如下:

$$\begin{aligned} G_{m_1} &= a_{m_1} / g, \\ G_{m_2} &= a_{m_2} / g, \\ G_{m_3} &= a_{m_3} / g, \\ &\dots \end{aligned}$$

式中: g 为重力加速度;

G_{m_i} 为第 i 个易损元件的动态因子。

现假设在一个冲击载荷作用下,某产品结构系统的第一个易损元件在发生动态变化过程中存在一个应力危险点(面),此处的最大应力可以写成^[13]:

$$\sigma_{s_1} = G_{m_1} \cdot \sigma_{o_1}, \quad (7)$$

式(7)中: G_{m_1} 为动态因子或动荷系数,

σ_{o_1} 为此易损元件静态载荷条件下的静应力。

现今 σ_{o_1} 在动态载荷进一步提高的条件下增加,直至达到此易损元件材料的弹性极限值 σ_{e_1} , 此时式(7)可改写为

$$\sigma_{e_1} = G_{c_1} \cdot \sigma_{o_1}, \quad (8)$$

式(8)中, G_{c_1} 为此易损元件的临界动态因子。

可以认为 G_{c_1} 的数值表明,此元件不受到冲击破损前的最大临界响应加速度的影响,这就说明它符合新脆值定义的意义。这样,按照上述分析程序,此

产品结构系统中若干易损元件的 $G_{c_1}, G_{c_2}, G_{c_3}, \dots$ 都可以求出。根据这些易损元件的新脆值,以此参照图 5 所示 SRS 二维坐标,即可以绘制出结构系统易损元件所组成的基于响应加速度的新 DBC。显然,曲线下部为产品安全区,上部则为不安全区。

基于易损元件响应参数的新 DBC 可总结成下述绘制程序:

- 1) 应用理论分析、试验方法或统计经验法等途径,确定产品结构系统中哪些是在包装设计中需要考虑的易损元件;
- 2) 按照振动理论方法及相关测试原理,确定所选定的易损元件的自然频率;
- 3) 根据 Biot 模型和各易损元件的结构特点,测定产品结构系统的响应参数,绘制 SRS;
- 4) 按照工程力学动态系数(因子)概念确定各易损元件危险点(面)处的最大应力;
- 5) 当易损元件的最大应力达到此元件材料的弹性极限时,计算出此易损元件的临界最大响应加速度,以及基于此响应参数的易损元件的新脆值;
- 6) 利用各个易损元件的新脆值及其上述程序 2) 中的自然频率,在程序 3) 的 SRS 所示二维坐标上绘制出产品结构系统的新 DBC。

5 结语与商榷

本文说明,基于输入冲击激励加速度的传统冲击脆值可以被基于输出的响应加速度的新冲击脆值替代,以克服传统冲击脆值在缓冲包装设计时带来的保守性问题。但是,自不少学者提出这一设想以来,实际上并未将其应用到实际的缓冲包装设计实践中。究其原因,主要是还没有建立以新脆值概念为基础的新 DBC。

本文利用基于输出的响应加速度的新脆值概念,通过 SRS 理论与 Biot 模型及工程力学动荷系数的理论,提供了一个新的构建产品结构系统中易损元件的 DBC 的方法及绘制此曲线的程序。由于这一新方法绘制的新 DBC 在二维坐标上表明了安全区和非安全区,因而可以直接为缓冲包装设计提供比传统方法更合理的脆值参数。

有学者认为, R·E·纽顿关于破损边界的思想是基于脆值理论和 BIOT 冲击谱思想提出的。对此问题,笔者有下述看法与之商榷。纽顿所指脆值概念是传统的,是基于激励冲击加速度定义的,所以不能说纽顿是根据 BIOT 冲击谱引出破损边界思想的。那么,在纽顿的论文中,介绍了从冲击谱转化为破

损边界的内容。这里,必须先搞清研究的对象是何种结构。当纽顿由冲击谱推导破损边界时,他所指的响应是指从包装整体产品(包装件)上得到的;而根据BIOT模型,响应谱是从包装整体内部的产品易损元件上测得的,笔者以为,或许在当时的技术条件下,纽顿难于做到后者。

参考文献:

- [1] Mindlin R D. Dynamics of Packaging Cushioning[J]. Bell System Technical, 1945, 24(7/8/9/10): 352-461.
- [2] Newton R E. Fragility Assessment Theory and Test Procedure[EB/OL]. [2012-11-20]. <http://wenku.baidu.com/view/15359ebf960590c69ec3761f.html>.
- [3] 洪翔, 万陈, 王军. 一种马铃薯临界损伤跌落高度的测定方法[J]. 包装学报, 2012, 4(3): 30-33.
Hong Xiang, Wan Chen, Wang Jun. A Method to Determine the Critical Damage Dropping Height of Potato[J]. Packaging Journal, 2012, 4(3): 30-33.
- [4] 马利林·贝克. 包装技术大全[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 322-326.
Marilyn Bakker. The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology[M]. Beijing: Science Publishing House, 1992: 322-326.
- [5] Robert M Fiedler. 5-Step Package Development[M]. Virginia: MTS System Corp, 1985: 65-78.
- [6] 彭国勋, 王瑞栋, 郭延洪. 缓冲包装动力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1989: 113-114.
Peng Guoxun, Wang Ruidong, Guo Yanhong. Cushioning Packaging Dynamics[M]. Changsha: Hunan University Press, 1989: 113-114.
- [7] 宋宝丰. 根据冲击响应谱(SRS)确定产品冲击脆值[J]. 包装工程, 2004, 25(1): 16-17.
Song Baofeng. To Determine Product Shock Fragility Based on Shock Response Spectra (SRS)[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(1): 16-17.
- [8] 刘晋浩, 李琛. 冲击响应谱的应用方法研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 29-30.
Liu Jinhao, Li Chen. Research of Application Methods in Shock Response Spectra[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 29-30.
- [9] 王保升, 郝洪艳, 寇二刚. 基于冲击响应谱的产品脆值描述与测试[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 27-29.
Wang Baosheng, Hao Hongyan, Kou Ergang. Product Fragility Description and Measurement[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 27-29.
- [10] Armstrong W R. Using Shock Response Spectra to Design Cushioing Packages[C]//Best of Trans. Pack.[S. l.]: Institute of Physics Publishing, 1996: 167-181.
- [11] William I K. Development in Testing Products for Distribution[J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(3): 89-98.
- [12] Alexander J E. Shock Response Spectrum: A Primer[J]. Sound and Vibration, 2009, 43(6): 6-15.
- [13] Daniel Schiff. Dynamic Analysis and Failure Modes of Simple Structures[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc.USA, 1990: 177-179.

(责任编辑: 廖友媛)